

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene
Faculté de Génie Mécanique et de Génie des Procédés



MEMOIRE

Présenté pour l'Obtention du diplôme de MAGISTER

En : GENIE MECANIQUE

Spécialité : Mécanique énergétique et milieux poreux

Par : BENNOUAR YUCEF

Sujet

**Transfert de chaleur et de masse lors de traitement
thermique du bois**

Soutenue publiquement, le 18/09/2014, devant le jury composé de :

M.	S.CHIKH	Professeur à l'USTHB	Président
M.	A.BOUMEDIEN	Professeur à l'USTHB	Directeur de mémoire
Mme.	H.KAHALERRAS	Professeur à l'USTHB	Examinatrice
M.	A.BENABDESSLAM	Maitre de conférence/A à l'USTHB	Examineur

DEDICACES

À ma chère mère que dieu la garde

À la mémoire de mon père

À mes frères et sœur

À ma belle famille

À mes amies et collègues de l'USTHB

À tous ceux qui me sont chers

Résumé

L'objet de ce mémoire de Magister est le développement d'un modèle 3D couplé de transfert de chaleur et de masse en vue d'une meilleure compréhension du traitement thermique du bois à haute température et pour déterminer l'influence de plusieurs paramètres qui caractérisent ce processus . Cette étude est effectuée en résolvant le modèle tridimensionnel de Luikov dans le bois. Le logiciel de COMSOL a été utilisé pour résoudre le système d'équations Différentielles partielles fortement couplées. La validation du présent modèle a été effectuée avec succès, ce modèle s'avère être un outil important pour la conception de nouveaux fours et à l'optimisation de leur fonctionnement. Les méthodes informatiques peuvent considérablement réduire le temps des essais expérimentaux très coûteux et améliorer le procédé du traitement thermique du bois. Il ressort de ces études de simulations que la vitesse de chauffage ainsi que les coefficients d'échanges de chaleur et de masse (implicitement vitesse de l'écoulement) sont des paramètres clés pour le traitement thermique du bois à haute température. Nous avons aussi effectué un travail expérimental sur le bois, pour observer ou vérifier le changement physique et le changement des propriétés mécaniques du bois traité thermiquement à haut température par rapport au bois non traité.

Mots-clés : Transfert de masse et de chaleur, COMSOL, traitement thermique du bois, Luikov, bois.

Abstract

The aim of this memory is the development of a 3D model coupled heat and mass transfer to a better understanding of the high thermal treatment of wood and to determine the influence of several parameters that characterize the process. This study is carried by solving the three-dimensional Luikov model in wood. Femlb software was used to solve strongly coupled system of partial differential equations. The validation of this model has been successfully completed. This model is an important tool for the design of new furnaces, and optimization of their operation. Computational methods can greatly reduce the experimental time very expensive and a better understanding of the process of heat treatment of wood. It appears from these simulations that the heating rate and the heat and mass coefficients (implicitly from the tow velocity are key parameters for the heat treatment of wood at high temperature. We also conducted experimental work on wood, to observe or verify the physical change and the mechanical properties change of heat-treated wood compared to the untreated wood.

Keywords: Heat and mass transfer, laminar flow, modelling wood heat treatment, Luikov

Remerciements

Remerciements

Au terme de ce travail. Je tiens à remercier spécialement les personnes qui ont rendu possible l'aboutissement de cette mémoire.

Ce travail été fait sous la supervision de Monsieur ali boumedien professeure de l'USTHB, je lui suis reconnaissante de m'avoir fait l'honneur d'accepter la direct de cette mémoire. Pour son aide et sa patience tout au long de l'élaboration de ce travail.

Je tiens à remercier chaleureusement Monsieur Salah CHIKH, Professeur et maitre de conférences à l'USTHB, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ma mémoire.

Ma reconnaissance s'adresse aussi aux examinateurs membres du jury : mademoiselle H.KAHALERRAS Professeur à l'USTHB, Monsieur A.BENABDESSLAM Professeur à l'USTHB, je suis très honoré de l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et de leur présence au sein de ce jury

je voudrais aussi remercier ma famille pour son soutien et ses encouragements particulièrement, mas mère et mon frère, pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis pour que j'arrive à ce niveau d'étude.

Résumé.....	01
Remerciement.....	03
Table de matières.....	04
Nomenclature.....	07
Introduction générale.....	08

Chapitre I : Approche bibliographique traitement thermique du bois à haute température

I.1 Introduction.....	10
I.2 Traitement thermique à haute température.....	10
I.2.1 Les procédés (technologies).....	10
I.2.1.1 Le procédé hollandais.....	10
I.2.1.2 Le procédé allemand.....	12
I.2.1.3 Le procédé français.....	14
I.2.1.4 Le procédé finlandais.....	15
I.2.1.5 Procédé Perdure (canada).....	18
I.2.2 Synthèse.....	20
I.3 Modifications physico-chimique du bois traité thermiquement.....	20
I.3.1 Modifications chimiques.....	20
a. Modification chimique des extraits.....	20
b. Modification chimique des hémicelluloses.....	21
c. Modification chimique de la cellulose.....	22
d. Modification chimique de la lignine.....	22
I.3.2 Modifications physiques.....	23
a. Reprise en humidité.....	23
b. Stabilité dimensionnelle.....	24
c. Mouillabilité.....	25
d. Propriétés mécaniques.....	26
e. Amélioration de la durabilité.....	27
I.3.3 Autres propriétés du bois traité thermiquement.....	28
a. Couleur.....	28

b. Usinage et odeur.....	28
I.4 Avantages et entraves au développement du traitement thermique du bois.....	29
I.5 Conclusion.....	32

Chapitre II : Travail expérimental

II.1 Introduction	34
II.2 Le changement physique du bois traité thermiquement.....	35
II.2.1 La Couleur.....	35
II.2.2 L’Odeur.....	36
II.3 Calcul de la diffusivité thermique du bois traité thermiquement	36
II.4 La résistance mécanique du bois traité thermiquement.....	37
II.4.1 Flexion	37
II.4.2 Stabilité dimensionnelle.....	37

Chapitre III : Formulation mathématique et modélisation numérique

III.1 Introduction.....	39
III.2 Modèle couplé de transfert de chaleur et de masse.....	39
III.2.1. Les modèles basés sur l'utilisation d’une potentielle thermodynamique.....	40
III.2.1.1 Modèle basé sur le potentiel de transfert de masse.....	40
III.2.1.2 Modèle basé sur la thermodynamique irréversible.....	41
III.2.1.3 Modèle basé sur le potentiel chimique.....	43
III.2.1.4 Modèle basé sur le potentiel hydrique.....	44
III.2.2 Modèle à composantes multiples.....	45
III.3 Formulation mathématique.....	46
III.3.1 Modèle physique.....	46
III.3.2 Mise en équations.....	47
III.3.2.1 Hypothèses simplificatrices.....	47
III.3.2.2 Equations régissant pour le bois.....	48
a. Equation de transfert de chaleur.....	48
b. Equation de transfert d'humidité.....	48
III.3.2.3 Conditions initiales et aux limites.....	48

III.3.2.3.1 Conditions initiales.....	49
III.3.2.3.2 Conditions aux limites.....	49
III.4 Utilisation du logiciel COMSOL Multiphysics pour la résolution du problème	50
III.5 Principe de la méthode des éléments finis.....	50
III.6 choix d'un maillage.....	51
III.7 Détermination des propriétés thermo-physiques du Bois.....	54
III.8 Résolution numérique et validation du modèle.....	55
III.9 Conclusion.....	58

Chapitre IV : Résultats et discussions.

IV.1 Introduction.....	63
IV.2 Interprétation des résultats.....	64
IV.2.1 L'évolution temporelle de la température et de la teneur moyenne en humidité.....	64
IV.2.2 L'évolution temporelle de la température et de la teneur moyenne en humidité a différentes position.....	66
IV.2.3 Influence de la vitesse de chauffage sur les profils de température et d'humidité.....	68
IV.2.4 Effet de la taille de la pièce sur les profils de température et d'humidité.....	70
IV.2.5 Influence du taux d'humidité initiale du bois sur les profils de température et d'humidité.....	72
IV.2.6 Effet des coefficients de transfert de chaleur h_q et de masse h_m sur les profile de température et d'humidité.....	74
IV.3 Conclusion.....	78
Conclusion générale et perspectives.....	..80
Références bibliographiques.....	..82

Nomenclature

Nomenclature

C_m : chaleur spécifique hydrique ($\text{kg}_{\text{humide}}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{M}$).

C_q : Chaleur spécifique ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$).

D_{eff} : Diffusivité effective (m^2/s).

D_μ Coefficient de diffusivité de gaz (m^2/s).

G_m : Densité spécifique du bois.

H : Enthalpie (J/kg).

k_m : Conductivité hydrique ($\text{kg}_{\text{humide}}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{M}$).

k_q : Conductivité thermique ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$).

L : Épaisseur d'une planche de bois (m).

M : Teneur en humidité (%).

m : Poids de bois humide (kg).

m_0 : Poids de bois sec (kg).

q_m : Vecteur de flux d'humidité (kg/ms).

T : Température (K).

t : temps (s).

T_g : température du gaz ($^\circ\text{C}$).

M : Potentiel d'humidité ($100 \cdot \text{kg}_{\text{humide}}/\text{kg}_{\text{sec}}$) ($^\circ\text{M}$).

V : vecteur vitesse (m/s).

Lettres grecques

μ : Viscosité dynamique de l'air ($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$).

ψ : Potentiel hydrique (kg).

ψ_0 : Potentiel osmotique (J/kg).

ψ_m : Potentiel matriciel (J/kg).

α_m : Diffusivité masse ($\text{kg}_{\text{humide}}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{M}$).

α_q : Diffusivité thermique ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$).

λ : chaleur latente de vaporisation de l'eau (J/kg).

ε : Rapport du coefficient de diffusion de vapeur sur diffusion d'humidité totale.

δ : Coefficient de thermo migration ($\text{kg}_{\text{humide}}/\text{kg} \cdot \text{K}$).

ρ : Densité de l'échantillon de bois (kg/m^3).

Introduction générale

Le bois est considéré comme étant l'un des matériaux ancestraux utilisés par l'homme dans la construction. Il possède plusieurs avantages comme sa grande résistance, l'esthétisme, propriétés isolantes, faible coût et le caractère renouvelable. Ces qualités font de lui un matériau de première importance.

Actuellement, ce matériau noble est employé dans des domaines plus vastes comme les aménagements extérieurs (édifices publics les aires de jeux, charpentes, traverses de chemins de fer et poteaux de télécommunications) et intérieures (les meubles d'intérieur les volets et parques). Cependant, il présente l'inconvénient majeur d'être susceptible aux agents de biodégradation tels les microorganismes et les insectes. Non traité, le bois peut rapidement se détériorer et on voit apparaître moisissures et champignons.

Pour donner au bois une meilleure durabilité face aux champignons de pourriture et insectes, et pour une utilisation prolongée, des traitements chimiques sont réalisés avant sa mise en œuvre. Ces traitements chimiques utilisent souvent des produits nocifs sur l'environnement.

Suite aux divers rapports qui ont signalé que la santé publique pourrait être affectée au contact avec des bois traités chimiquement, plusieurs chercheurs ont tenté de trouver une alternative au traitement chimique. Dans ce contexte, le traitement thermique du bois à haute température suscite depuis quelques années un intérêt de plus en plus important du fait de l'augmentation de la durabilité du matériau face aux agents de pourriture et du faible impact environnemental du traitement comparativement aux méthodes classiques de préservation faisant appel à l'utilisation de biocides. Le bois ainsi traité, est un produit naturel sans adjonction de produits chimiques, avec une dureté et stabilité dimensionnelle augmentées, des propriétés physico-mécaniques améliorées, un caractère hygroscopique réduit et une meilleure résistance aux agents de dégradation, mais il perd une partie de son élasticité.

L'impact environnemental de ce traitement est très faible car dans le procédé, seule de la chaleur est introduite et les fumées peuvent être condensées et valorisées par combustion. Contrairement aux biocides, le bois traité thermiquement peut être recyclé ou incinéré en fin de vie sans presque aucun impact environnemental.

L'objectif principal de ce travail est le développement d'un modèle mathématique 3D, instationnaire pour le traitement thermique du bois à haute température en tenant compte à la fois des équations fortement couplées de transfert de chaleur et de masse dans le bois. Le travail

effectué dans cette mémoire est constitué de quatre chapitres.

Pour le chapitre I, et en se basant sur une abondante recherche bibliographique, nous avons développé en détail les différents procédés de traitement thermique du bois à haute température existants. A la fin de ce chapitre, nous exposerons les principales modifications des propriétés physico-chimiques du bois traité thermiquement.

Le chapitre II est consacré sur le travail expérimental en fait un traitement thermique au bois et en calculent la diffusivité thermique, vérification de stabilité dimensionnelle, et la résistance mécanique

Le chapitre III est consacré à la présentation des différents modèles de transfert de chaleur et de masse qui existent dans la littérature. Après avoir effectué la formulation mathématique du problème, les phénomènes de transfert dans le bois sont traités selon les directions (longitudinale, radiale et tangentielle) en se basant sur l'approche de Luikov. La modélisation du problème est faite en utilisant le logiciel COMSOL.

Après avoir validé le modèle proposé avec succès, une série de simulations numériques a été effectuée dans le dernier chapitre.

Plusieurs paramètres ont été analysés pour dégager l'importance des paramètres physiques qui caractérisent le problème, à savoir: l'effet de la vitesse de chauffage, la taille de la pièce de bois, l'effet des coefficients de transfert de chaleur et de masse et le taux d'humidité initiale sur les profils de température et d'humidité. Ces informations peuvent être employées pour ajuster les paramètres du procédé et pour commander plus efficacement la qualité du produit final. Le modèle mathématique 3D utilisé lors de cette étude prédit avec succès ces profils.

Une conclusion générale rappelle les objectifs de cette mémoire et les principales conclusions tirées de cette étude.

Chapitre I

Approche bibliographique

Traitement thermique du bois à haute température

I.1. Introduction

Le traitement thermique du bois à haute température est radicalement différent des techniques conventionnelles de séchage du bois qui se font à des températures avoisinant les 100 C. En effet, le séchage conventionnel vise uniquement la diminution du taux d'humidité dans la matrice ligneuse. Or, le traitement thermique du bois à haute température entraîne des transformations physico-chimiques des constituants du bois. Ces transformations chimiques et physiques donnent au bois de nouvelles propriétés à savoir une coloration foncée, une meilleure stabilité dimensionnelle, une dureté bonifiée et une amélioration de la durabilité du bois face aux attaques des micro-organismes Chanrion, P. et Schreiber, J. (2002).

I.2. Traitement thermique à haute température

Le traitement du bois à haute température se définit comme étant une pyrolyse ménagée du bois sous atmosphère contrôlée. L'opération est réalisée en l'absence d'oxygène ou en atmosphère pauvre en l'oxygène pour éviter l'oxydation et la combustion. Certains procédés utilisent comme agent régulateur de pyrolyse l'azote, la vapeur d'eau ou l'huile (Chanrion, P. et Schreiber, J. (2002)). A ce jour, il existe plusieurs procédés de traitement du bois : Thermowood, Perdure, Plato, OHT, etc. Les principaux traitements thermiques et leurs caractéristiques sont décrits ci-dessous.

I.2.1 Les procédés (technologies)

I.2.1.1 Le procédé hollandais

Le procédé hollandais Plato a été initialement mis au point par la société pétrolière shell dans les années 1980. L'année 1994 a vu naître la société Plato pour Providing lasting Advanced Timber option, qui a poursuivi le développement de cette technologie et sa commercialisation. Cette société propose sur le marché un bois qui a subi un traitement hydrothermique en quatre étapes. Avant le traitement, l'humidité du bois est ramenée à 18% La figure 2 illustre les quatre étapes de ce procédé.

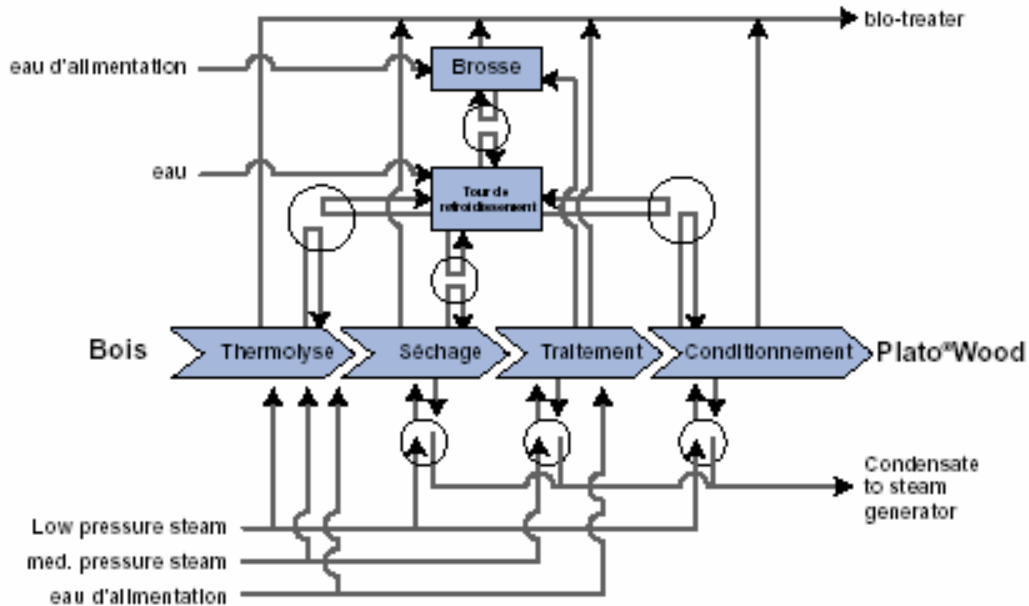


Figure I.1 : schéma du procédé Plato (source:Plato<http://www.patowood.nl/>)

Durant la première étape, dite Hydrothermolyse, le bois est chauffé à une température comprise entre 150 et 180 dans un environnement aqueux sous une pression de vapeur saturante (Boonstra, M et al (1998). Au cours de cette étape qui dure entre 3 à 4 heures, des intermédiaires réactifs se forment pour subir par la suite un traitement thermique à l'étape trois. Ainsi, l'hémicellulose et la lignine sont convertis de manière sélective. Après cette première étape, la lignine devient plus réactive à l'alkylation et il y a production d'aldéhydes par hydrolyse des hémicelluloses. Durant ce processus, la cellulose demeure intacte ce qui assure la qualité des propriétés mécaniques du bois PLATO

Pendant 3 à 5 jours, le bois est séché dans un séchoir à bois industriel conventionnel. Durant cette seconde étape, le séchage simple sous air, permet de ramener le taux d'humidité du bois à des valeurs comprises entre 8 et 10% cette phase de séchage est indispensable pour éviter des fissures internes durant la troisième phase.

Dans l'étape de durcissement, le bois est chauffé 14 à 16 heures à une température comprise entre 150°C et 190°C en atmosphère sèche (Militz, H. (2002). Durant cette étape se produisent des réactions de condensation des aldéhydes sur les lignines (Les aldéhydes formés réagissent avec les molécules de lignine activées pour constituer des composés hydrofuges, réticulés dans la

structure du bois). Le taux d'humidité final est de l'ordre de 1% c'est cette étape qui donne au bois sa durabilité et sa stabilité dimensionnelle

La dernière étape qui est celle du conditionnement consiste à conditionner le bois à l'humidité souhaitée. Ainsi, le bois est réintroduit dans les séchoirs utilisés à l'étape 2 ce qui augmente son humidité de 4 à 6 pour permettre un façonnage ultérieur : scier et/ou raboter.

Au final, la société hollandaise Plato décrit sa technologie de traitement de bois à haute température comme étant "celle qui réussit en chauffant (étape 1), séchant (étape 2) et cuisant (étape 3) à donner au bois de résineux les qualités des bois feuillus".

Avec ce procédé, il y a une amélioration de la durabilité des essences, donc peut être utilisé pour des espèces de bois non durables (épicéa, pin douglas, bouleau, etc.). Quant à elle, l'amélioration de l'hygroscopicité du pin serait de 40% contre 35 à 45% pour le bouleau. Les phénomènes de retrait et de gonflement sont réduits d'environ 50%. Le module d'élasticité (MOE) augmente (de 0 à 10% alors que le module de rupture (MOR) est affaibli (de 10 à 20%).

I.2.1.2 Le procédé allemand

Le procédé ONT (Oil Heat Treatment) a vu le jour en 1998 Grâce à la collaboration du centre fédéral de recherche sur la forêt et les produits forestiers BFH, à Hambourg et la compagnie Menz Holz GmbH (Ehrenberg-Reulbach, Allemagne). Dans ce procédé, le bois sec (<6% d'humidité) est chauffé par l'intermédiaire d'une huile végétale chaude (colza, lin ou tournesol. L'utilisation de l'huile garantit l'absence d'oxygène qui est à l'origine des réactions d'oxydation, et donc de la diminution des caractéristiques mécaniques du bois. De plus, l'huile assure un meilleur transfert de chaleur et un contrôle de la température du bois d'une grande précision (répartition rapide et équilibrée de la chaleur autour du bois). L'huile n'entre que très peu dans le bois en raison de l'évacuation de la vapeur d'eau au début du procédé suivi par des gaz de torréfaction.

Le bois chargé dans un autoclave est soumis à des températures allant de 180°C et 260°C avec des pressions comprises entre 2 et 14 bars. Donc, selon les caractéristiques du produit fini désiré, plusieurs niveaux de traitement sont possibles cependant, le meilleur compromis entre durabilité et propriétés mécaniques est obtenu pour des températures comprises entre 180°C et 200°C. Alors que si on souhaite avoir un maximum de durabilité et un minimum de consommation d'huile, un traitement thermique à 220°C est de mise.

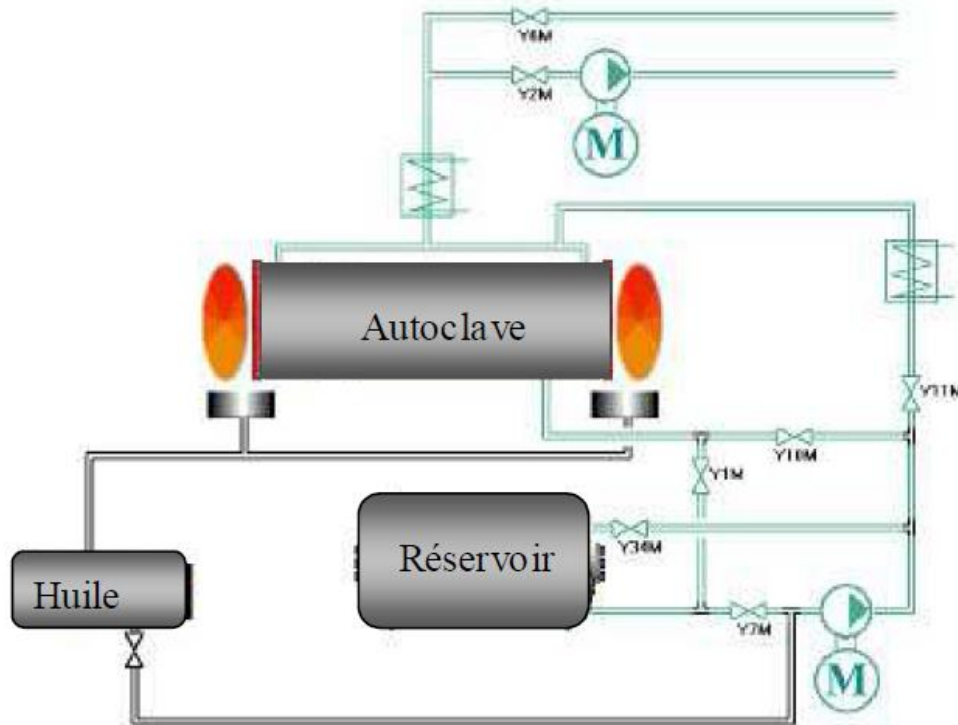


Figure I.2: schéma de principe du procédé Menz Holz (source: Menz Holz)

Après évacuation de l'huile et égouttage, une dernière phase de chauffage à l'air (60 à 220g permet le durcissement de la couche d'huile présente à la surface du bois. La durée d'un cycle de ce procédé varie en fonction de la dimension des sciages traités, mais elle est globalement de 18 heures comprenant les phases de montée en température, de traitement et de refroidissement (figure 12). Ce procédé semble être bien adapté aux essences résineuses peu imprégnables (pin et épicéa) et aux pièces de fortes sections. Il présente également l'avantage d'associer séchage, transformations thermo-chimiques, augmentation de la stabilité dimensionnelle (environ 40%), relaxation périphérique des contraintes et potentiellement une augmentation de la résistance aux champignons et aux insectes (Sailer, M. Rapp, A et al. (2000). Malheureusement cette technique pourrait causer d'importants dégâts internes (collapse et fissurations). De plus, il faut prévoir des frais supplémentaires pour le recyclage ou l'élimination des huiles usagées. Enfin l'aspect huilé du bois peut limiter son champ d'application.

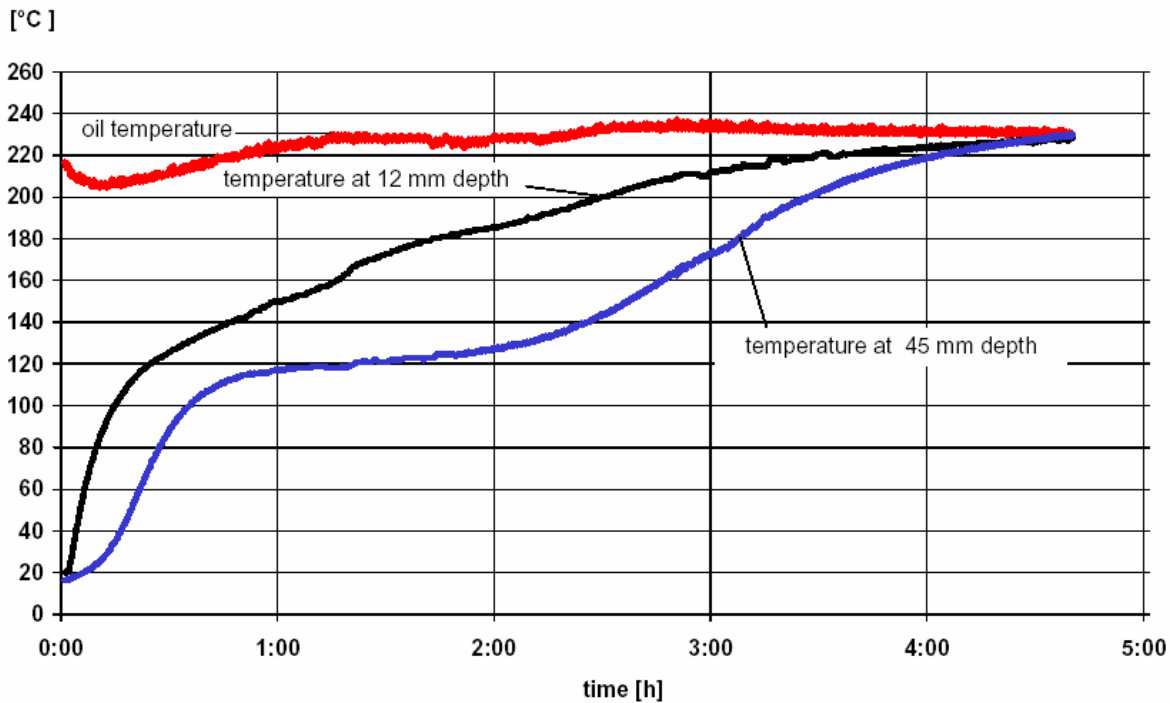


Figure I.3 : Courbe de température de l'huile et du bois durant a phase de chauffage.

I.2.1.3 Le procédé français

Le bois traité thermiquement en France est commercialisé par la société New option Wood (Now) sous le nom bois rétiné. Cette société Now, fondée en 1995, détient l'ensemble des brevets relatifs à ce procédé, à savoir la réтификаction,

La réтификаction est un procédé de traitement thermique du bois sous atmosphère gazeuse. Le mot rétificactiono (1995) est née de la contraction des termes «réticulation» et «torréfaction» Ce qui sous-entend la mise en évidence de phénomènes de réticulation de la matière ligno-cellulosique. La réticulation est un réarrangement de certaines chaînes moléculaires sous l'action de la chaleur. Le procédé se présente comme une pyrolyse ménagée du bois réalisée sous atmosphère inerte obtenue soit par injection d'azote ou d'autres gaz neutres (le Co2 émis par les brûleurs à gaz par exemple).

De façon générale, le produit fini (le bois rétinée) passe par trois étapes La première est une phase endothermique durant laquelle le bois subit un séchage poussé jusqu'à des températures comprises entre 150°C et 180°C A ce stade, le bois n'est pas «modifié» et son état est réversible. La deuxième étape du traitement fait à très haute température jusqu'à 250°C) et elle entraîne une modification physico-chimique définitive des composants du bois (Weiland, J. et Guyonnet R

(2001)). Ainsi, le bois subit d'importantes réactions chimiques : la thermolyse des hémicelluloses et de la réticulation des lignines. C'est la disparition des hémicelluloses et la modification de la lignine qui permettent d'obtenir une bonne résistance à la biodégradation, et donc de l'amélioration de la durabilité du bois rétifé. Dans la dernière étape, le refroidissement le bois dégage de plus en plus de chaleur attribuée aux réactions exothermiques de la dégradation des lignines puis de la cellulose.

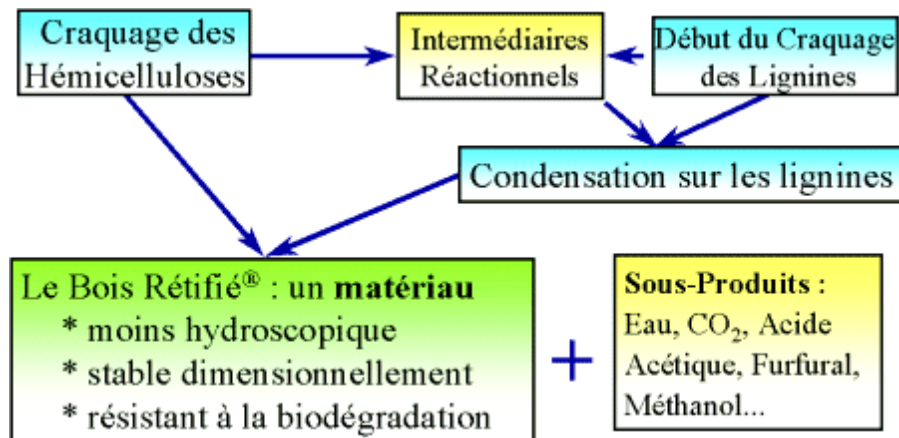


Figure I.4: Principe de la rétifcation du bois (Source: SPIN).

Un nombre important d'essences est compatible avec ce procédé le pin maritime, le peuplier, le frêne, le hêtre, le chêne, l'érable jaune et l'épinette. Cependant, avant le traitement, les essences doivent être stabilisées autour de 12% d'humidité absolue. La durée et la qualité du traitement sont variables et dépendent de plusieurs facteurs tels que l'essence, l'épaisseur des pièces à traiter, le taux d'humidité initial et le taux de remplissage du four. Le nouveau matériau issu de ce traitement possède des caractéristiques très intéressantes. Ainsi la durabilité et la stabilité du bois rétifé se retrouvent améliorées ce qui peut s'avérer intéressant pour les essences peu durables telles le peuplier cependant, à l'instar des autres procédés, les améliorations des propriétés physiques et de durabilité sont accompagnées d'une baisse des propriétés mécaniques et plus particulièrement du module de rupture (de-30% à-40%).

I.2.1.4 Le procédé finlandais

Il s'agit d'un procédé développé par le centre de recherche technique de Filande (VTT, Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus) en collaboration avec l'industrie finlandaise de la filière bois dans les années 90. A l'heure actuelle, ce procédé est le plus répandu en Europe et au Canada. Les produits issus de ce procédé sont commercialisés sous la marque de commerce ThermoWood.

Ce procédé ressemble au procédé de réтификаction, sauf que le vecteur caloporteur est principalement la vapeur d'eau. Ainsi, le bois se chauffe à une température d'au moins 180 °C tout en étant protégé par la vapeur. La figure15 représente le principe d'une installation de traitement thermique selon la technologie finlandaise.

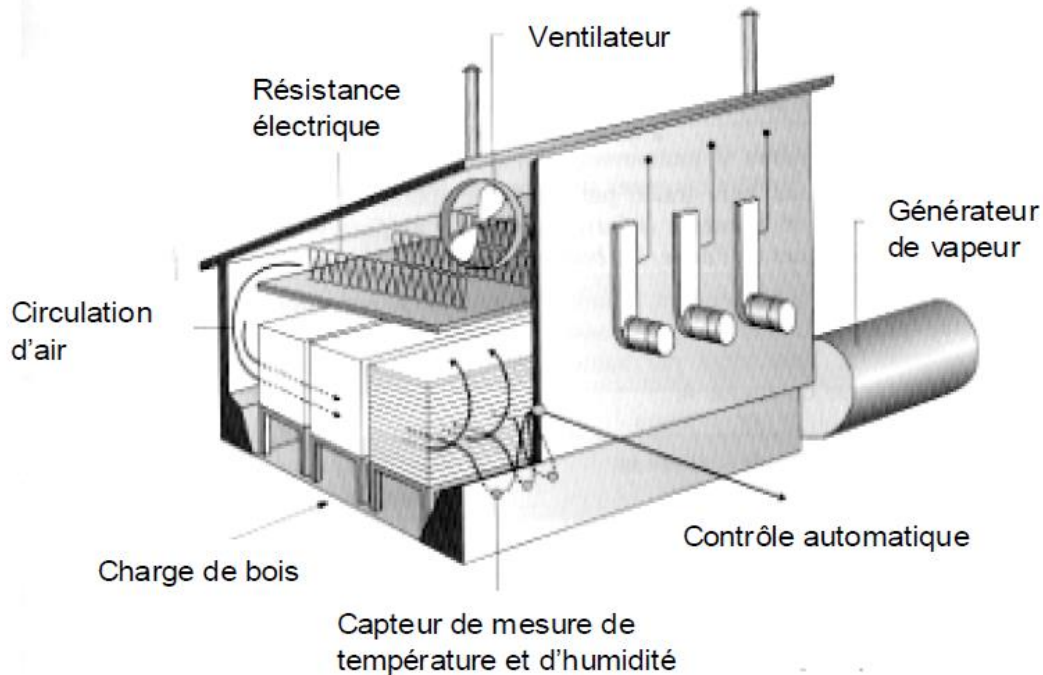


Figure I.5: Principe d'une installation de traitement thermique selon la technologie finlandaise
(source: VTT, 2002).

On peut subdiviser le procédé en question en trois étapes principales (Kotilainen, R. et al (2000), Sivonen, Hetal. (2002), Hietala, s et al. (2002), Nuopponen, M etal. (2004)). La première étape, appelée séchage à haute température, consiste à augmenter rapidement la température dans le four de séchage jusqu'à 100c environ. Ensuite, la température est élevée graduellement jusqu'à 130⁰C A la fin de cette phase, la teneur en humidité du bois devient proche de zéro.

La deuxième étape correspond au traitement thermique durant laquelle la température dans le four est élevée jusqu'à un niveau allant de 185 oc à 230 c. Dès que le niveau visé est atteint, la température est maintenue constante pendant 2 à 3 heures en fonction de l'application finale prévue (caractéristiques souhaitées : stabilisation dimensionner uniquement ou stabilisation dimensionnelle et durabilité). Durant cette phase, l'atmosphère est saturée par la vapeur d'eau et en gaz de pyrolyse.

L'étape finale, le refroidissement et la ré-humidification, consiste à stabiliser le bois par abaissement progressif de la température à l'aide d'aspersion d'eau. A partir de 80 à 90 OC, il y a reprise d'humidité dans le bois de l'ordre de 4 à 7%.

Durant tout le procédé, il est important de maintenir un faible écart de température entre le bois et l'atmosphère. En effet une trop grande différence exposerait le bois à de fortes tensions et conduirait une mauvaise qualité du produit final (figure 1.6).

Selon les conditions du traitement et les caractéristiques du produit recherché, le temps de traitement peut varier Par exemple, avec du bois prés séché, le traitement entier dure entre 36 et 48 heures, incluant la stabilisation du bois après traitement.

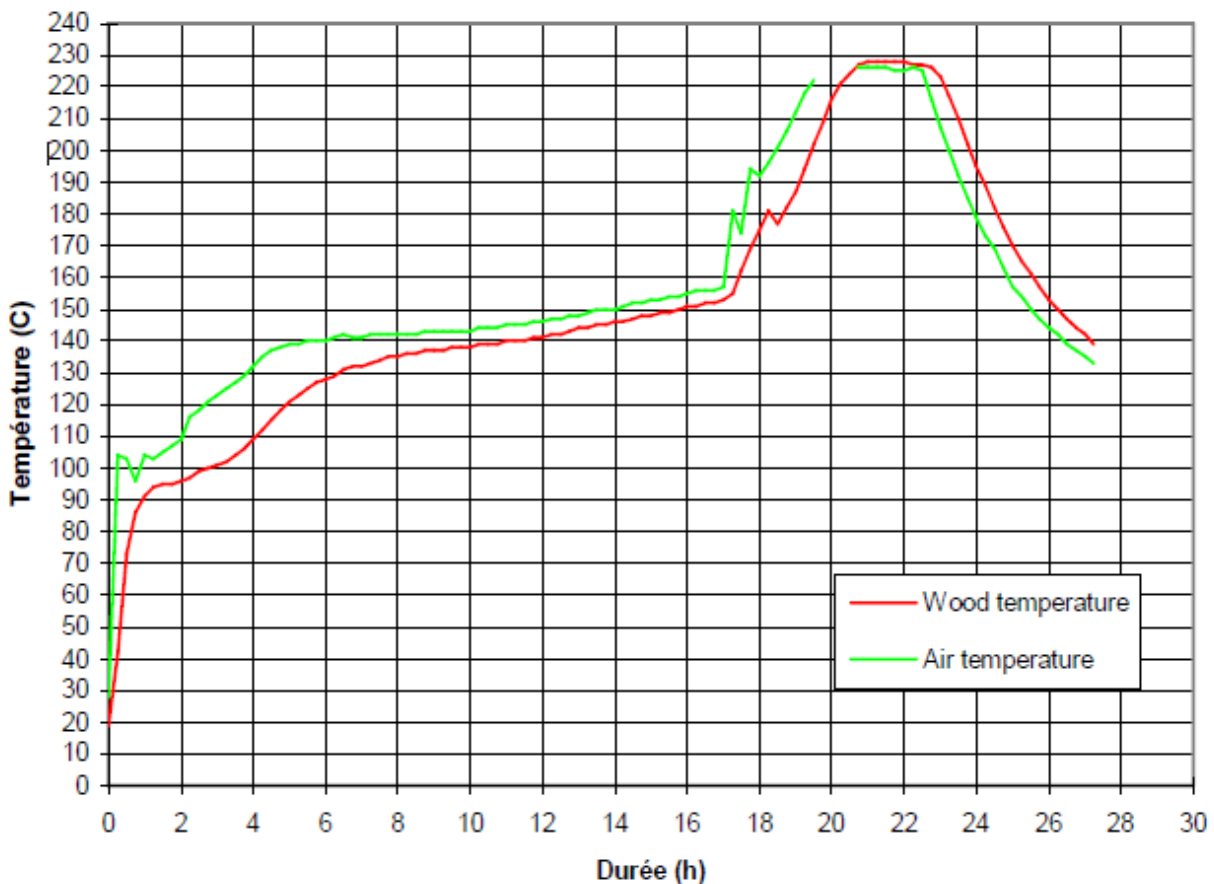


Figure I.6 : courbe de température obtenues sur du hêtre (source VTT).

Ce genre de traitement thermique donne un produit Thermowoode dont les caractéristiques varient en fonction de la température de traitement (tableau II.2). En augmentant celle-ci, le bois devient plus stable, et acquière une meilleure résistance à la putréfaction. Ainsi, grâce à ce procédé, le bois devient plus sombre, l'hygroscopicité est réduite d'environ 50% avec une

réduction de l'ASE (Anti-Swelling Emciency) de 50 à 90%, Cependant, ces améliorations s'accompagnent d'une réduction de la résistance à la flexion.

Différentes essences peuvent être traitées sèches ou humides (pin, épicéa, bouleau, et tremble). Habituellement, la température du traitement des résineux est plus élevée que celle des feuillus, à cause de leur utilisation finale. Les premiers souvent utilisés en extérieur (bardage, parois, etc.) nécessitent plus de protection vis-à-vis de l'humidité alors que les feuillus dont la qualité principale est la couleur et le grain seront utilisés en intérieur (meuble, parquet, etc.).

Tableau I.1 : Propriétés des bois traités en fonction de la température de traitement

Catégories	1	2	3
Température de traitement	170 – 180 °C	190 – 200 °C	210 – 230 °C
Durabilité conférée	aucune	+	++
Stabilité dimensionnelle	+	++	+++
Propriétés mécaniques	-/+	-/+	--
Couleur foncée	+	++	+++

I.2.1.5 Procédé Perdure (Canada)

En 2000, la société québécoise Pluri Cap International (PCI) a racheté la société française BCI qui était à l'origine du développement de la nouvelle technologie de traitement du bois à haute température Perdure .Possédant les droits intellectuels pour la technologie Perdure PCI Industries devient l'équipementier exclusif de cette technologie : la société conçoit, fabrique et vend les fours utilisés dans le traitement de bois à haute température. En association avec l'université du Québec à Chicoutimi UQAC PCI Industries a implanté un site de recherche qui vise la maîtrise de cette technologie pour le traitement des essences des forêts québécoises.

Selon cette technologie, le bois est traité à haute température par un procédé de pyrolyse ménagé sous atmosphère inerte. Le bois est chauffé à plus de 200 °C à cœur et cela sans produit chimique. Le four du traitement thermique utilisé par la technologie Perdure est alimenté au gaz propane. Il permet de récupérer et de brûler les gaz émis par le bois durant le traitement La durée totale approximative du traitement varie entre 7 et 15 heures. Le procédé donne naissance à un

nouveau matériau : le bois. Perdure. Enfin, la technologie Perdureo ne provoque aucun rejet atmosphérique. Elle génère uniquement des résidus liquides en quantité limitée (entre 30 et 300 litres/fournée de 10,5 m³).

Le traitement s'effectue en quatre étapes. Dans la première, le préchauffage, le bois est porté à une température allant jusqu'à 100 - 120 C avec de l'air chaud chauffé par le biais de gaz propane ou naturel. Cette phase vise l'élimination de l'eau libre, à savoir l'eau contenue dans les canaux du bois qui transportent la sève élaborée (la phase la plus facile). Cette étape dure entre 4 et 7 heures et dépend de l'essence, de l'épaisseur et du taux d'humidité initiale des pièces à traiter.

La deuxième étape, le séchage, s'effectue à la même température que précédemment. Les turbines de brassage assurent la circulation d'une partie des gaz provenant de l'enceinte de traitement à travers la chambre de combustion. Le fonctionnement du brûleur en atmosphère réductrice assure que le bois traité ne s'enflamme pas. Cette étape, qui dure entre 2 et 3 heures est plus difficile, car elle vise l'élimination de l'eau liée. Il s'agit de l'eau contenue dans les cellules du bois, et donc il faut que celle-ci traverse les parois du bois avant d'être évacuée.

Durant la troisième phase, celle de traitement proprement dit, la température du bois séché est portée entre 200 et 230 pour une période qui varie entre 1 et 6 heures c'est lors de cette étape que s'effectue une modification macromoléculaire du bois qui mène à la modification des propriétés mécaniques et physiques du bois. L'évacuation de la vapeur d'eau résiduelle et des gaz brûlés est assurée par les cheminées d'extraction. Le taux d'oxygène dans l'enceinte reste limité dû au fonctionnement du brûleur en atmosphère réductrice. (Limitant ainsi la pyrolyse du bois qui dégraderait ses caractéristiques mécaniques).

Dans la dernière étape qui consiste à refroidir le bois, de l'eau est vaporisée dans la chambre à combustion. Dans cette étape qui dure de 15 à 45 minutes, un soin particulier est porté sur la

dimension des gouttelettes d'eau pour ne pas tacher le bois.



Figure I.7 : Photo d'un four de traitement du bois Perdure (source : PCI Industries Inc., <http://www.perdure.com>)

I.2.2. Synthèse

Tous les procédés décrits ci-dessus se basent sur le même principe de chaleur élevée de traitement (Venois M. (2001), syramen,T. (2001), Militz H. et al. (2001), Rapp, A. et al. (2001)). En faisant abstraction du procédé utilisé et de l'essence traitée, seuls trois paramètres sont modifiables (a température finale, la vitesse de chauffage et le temps de séjour).

En effet, c'est le couplage de ces trois paramètres qui définit les cycles de traitement pour lesquels se produisent des réactions plus ou moins complètes de vaporisation, de décomposition et de condensation. Une légère modification dans les paramètres de traitement du bois relative aux différentes technologies entraîne la possibilité de voir de résultats différents qui sont la conséquence de réactions chimiques elles aussi différentes.

Donc, certaines conditions de traitement différencient les divers procédés les uns des autres telles que le type de gaz utilisé comme vecteur thermique, l'utilisation ou non de l'eau lors du refroidissement ou encore le temps de traitement. Le tableau II.2 synthétise les caractéristiques d'opération des divers procédés de traitement du bois à haute température précédemment cités.

Ce qui nous semble important de retenir est que le traitement thermique du bois entraîne des modifications chimiques dans le bois (réticulation des lignines, dégradation des hémicelluloses et modification de la cristallinité de la cellulose) et des modifications des propriétés physiques et mécaniques du bois. Ces modifications sont à l'origine des nouvelles propriétés du bois traité : une amélioration de la stabilité dimensionnelle, une fragilisation mécanique du matériau qui se manifeste par une altération de la résistance à la flexion et une diminution du module d'élasticité, une augmentation la durabilité du bois face aux attaques des agents de dégradation biologique tels que les champignons responsables de la pourriture molle et fibreuse, les insectes à l'exception des termites et une coloration plus foncée. Par ailleurs, le traitement thermique du bois est accompagné de différents dégagements (Weiland, J. et Guyonnet, R. (2001), comme de l'eau, du dioxyde de carbone, du furfural de l'acide acétique, de l'acide formique et du méthanol.

Tableau I.2: Principales caractéristiques des procédés mis en œuvre dans le traitement thermique de bois.

Procédé	Plato®	OHT	Rétification®	ThermoWood®	Perdure®
Energie de chauffe utilisée	Vapeur d'eau	Electricité	Electricité	Electricité	Gaz de combustion
Température maximale	190-200°C	200°C	250°C	230-204°C	240°C
Vecteur caloporteur	Vapeur d'eau	Huile végétale	Azote	Vapeur d'eau	Gaz d'émission et vapeur d'eau
Duré d'un cycle	3.5-4.5 jours	~18 h	7-13 h	~ 3 jours	Variable en fonction de l'essence

Phase de refroidissement	En présence de vapeur d'eau	Huile végétale	Azote ou injection d'eau	Injection d'eau	Injection d'eau
Capacité de production	Grande	Faible	Faible	Grande	Faible

I.2.3. Modifications physico-chimiques du bois traité thermiquement

Le traitement thermique modifie fermement plusieurs propriétés du bois tel que l'état de surface, l'hygroscopie, la stabilité dimensionnelle, la durabilité du matériau les propriétés mécaniques et plein d'autres propriétés.

Dans ce qui suit, nous allons détailler les principales modifications chimiques et physiques du bois traité thermiquement

I.2.3.1 Modification chimique

Durant le traitement thermique du bois, ses constituants subissent des modifications chimiques plus ou moins importantes selon la température du traitement ces modifications jouent un effet important sur les propriétés finales conférées au matériau bois ce qui justifie notre intérêt pour l'identification et la compréhension des transformations chimiques intervenant lors du traitement thermique.

a. Modification chimique des extraits

Il semblerait que la décomposition des extractibles serait similaire à celle de la lignine mais avec une vitesse de dégradation supérieure aux basses températures (Raveendran, K., Ganeshet A. et al. (1996). Ainsi, la plus grande partie des extraits disparaissent ou se dégradent pendant le traitement thermique, en particulier les plus volatiles. Les principaux produits identifiés dans les

extraits du bois traité thermiquement sont des cires, des glucides, des tanins et des résines (Bourgois, J et al. (1989)).

Selon Esteves et al. (2008c), la teneur en extraits augmente sensiblement avec l'intensité du traitement avant de diminuer par la suite. Cette augmentation peut s'expliquer par la formation de sous-produits issus de la thermodégradation des composants structurels de la paroi cellulaire.

b. Modification chimique des hémicelluloses

Lors du traitement thermique, les hémicelluloses sont les composés les moins stables et qui peuvent se décomposer assez rapidement (Weiland, J et Guyonnet, R (2001), Alén. R et al. (2002)) L 'hémicellulose est le premier polymère du bois à se décomposer lors d'un traitement thermique et son altération est accélérée par des réactions acido-catalysées (Fengel, D. et al. (1984), Ratimo, A. et al (1996)). Ce polymère se distingue de la cellulose par sa structure branchée qui le rend fragile et rapidement hydrolysable par les acides.

La dégradation s'amorce par la désacétylation et l'acide acétique libéré, qui agit comme catalyseur de la dépolymérisation, augmente encore la décomposition des polysaccharides (Tjeerdsma, B. et al. (1998), Sivonen, H et al. (2002), Nuopponen, M et al (2004) et Avat F 1993). Les xylanes semblent les plus réactives et seraient très sensibles aux réactions de dégradation et de déshydratation entre 200 et 260c (Kotilainen. R. (2000). En effet, la durée de vie des xylanes n'est que de 15 minutes à 260c (weiland, J. et al. (1998). Le furfural ainsi que l'acide acétique formés suite à ces réactions de dépolymérisation sont fréquemment identifiés et rapportés parmi les sous-produits issus du traitement thermique.

Les différents types d'hémicelluloses ne réagissent pas de manière similaire par rapport à la température de traitement (Avat, P. (1993), Repellin, V. (2006). Par exemple, les xylanes, composés majoritaires des feuillus, qui sont très sensibles à la thermodégradation, peuvent influencer les cinétiques de thermodégradation entre les résineux et les feuillus au cours du traitement thermique.

Comme les hémicelluloses sont les constituants les plus hydrophiles du bois, la diminution de leur taux est souvent considérée comme la cause principale de la réduction de l'hygroscopie du bois traité thermiquement.

c. Modification chimique de la cellulose

La cellulose est présente dans le bois sous deux formes : cristalline et amorphe. Lors du traitement thermique, la cellulose est moins réactive que l'hémicellulose du fait de son fort taux de cristallinité (Hakkou, M. et al (2005). La cellulose amorphe, plus sensible à la chaleur que la cellulose cristalline se dégrade au fur et à mesure que la température de traitement augmente Sivonen, H. et al. (2002). D'ailleurs, une étude menée par Bourgois et al. (1989) sur le pin traité thermiquement montre que la partie cristalline ne semble pas avoir subi de modification. La conséquence de la dégradation de la cellulose amorphe est l'augmentation du rapport cellulose cristalline/amorphe. Donc, le bois traité thermiquement se retrouve avec un taux de cristallinité plus grand. Une étude réalisée par Kim et al (2001) vient apporter des éclaircissements sur l'évolution du rapport cellulose cristalline/amorphe en fonction de la température de traitement. Dans le bois à l'état naturel, la cellulose amorphe prédomine, alors qu'à 150°C celle-ci devient minoritaire et donc plus sensible à la chaleur. Ces auteurs rapportent que le début de la décomposition de la cellulose cristalline est situé à des températures comprises entre 300 et 350°C. De ce fait, pour des températures de traitement allant de 100 à 300°C, il n'y a pas de modification significative de la cellulose cristalline. A 250°C, la cellulose subit une dégradation de l'ordre de 15%. D'autres études viennent conforter l'hypothèse de l'augmentation du taux de cristallinité avec la température de traitement (Sivonen, H. et al. (2002), Pétrissans, M. et al. (2003), cependant, quelques études semblent indiquer une évolution contraire du taux de cristallinité (Dwianto W. et al. (1996), Roffael, E. et al. (1971). Ce qu'il faut retenir, est que le traitement thermique n'induit pas de modifications significatives dans la cellulose. D'ailleurs, Bourgois, J et Guyonnet, R (1988) précisent que le traitement du pin à 260°C, dans une atmosphère inerte sans oxygène ne modifie pas la cellulose de manière significative. Des conclusions similaires ont été rapportées par Yildiz, S. et al. (2006). Une plus grande résistance de la cellulose par rapport aux hémicelluloses a également été signalée par Esteves, B. et al. (2008c). A la lumière de ces études, il ressort que dans la plage de températures correspondant à la pyrolyse ménagée, la cellulose (amorphe ou cristalline) se dégrade très peu.

d. Modification chimique de la lignine

Connu pour être moins réactive, la lignine subit elle aussi des modifications lors du traitement thermique et notamment des réactions de thermo-réticulation et de condensation (weiland, J et al. (2001); Tjeerdsma, B. et al.(1998) ; Sivonen, H. et al. (2002) ; Hakkou, M. et al (2005)). Ces réactions de thermo-réticulation seraient à l'origine de l'augmentation de la stabilité dimensionnelle du bois. Il est rapporté qu'à des basses températures (110-200, seules des réactions de condensation sont présentes et non pas une dégradation effective de la lignine qui interviendrait à des températures supérieures à celles utilisées lors du traitement thermique [Gardner, D. et al. (1985) ; Avat, F. (1993), Cependant, la lignine subit des changements structuraux sans perte de masse pour des températures allant de 250 à 320 C (Gardner D.et al. (1985)).

Selon weiland, J et al. [2001), après le traitement thermique, la plupart des composés qui apparaissent au sein du bois ont une structure proche de celle de la lignine. Il est important de mentionner que plusieurs auteurs ont suggéré que la teneur apparente élevée de la lignine déterminée par des méthodes standards pour le bois traité thermiquement est due aux réactions de polycondensation avec des composants de la paroi cellulaire (Tjeerdsma, B. et al.(2005), Boonstra, M. et Tjeerdsma, B. (2006). Esteves, B. et al. (2008c)).

I.2.3.2 Modifications physiques

a. Reprise en humidité

Le bois possède la propriété de perdre ou de reprendre de l'humidité en fonction des conditions de l'air dans lequel il est placé. Le traitement thermique à haute température du bois a pour conséquence une nette diminution de l'hygroscopicité (déterminée par tracé d'isotherme d'adsorption). Cette diminution est attribuée à la dégradation des hémicelluloses qui sont les polymères les plus hygroscopiques dans bois (Yildiz S. (2002), Nakano, T. et al. (2003). Cette dégradation qui survient à des températures comprises entre 160°C et 260°C rend le bois considérablement moins sensible aux phénomènes de perte ou de reprise d'humidité. Avec le traitement thermique, il y a une baisse des groupes hydroxyles OH, de par la dépolymérisation

des sucres initialement très hydrophiles, et donc moins de molécules d'eau peuvent se fixer au bois (Gündüz, G. et al. (2008)).

Des essais menés par Kollmann, F et al. (1963), sur diverses essences de bois ayant subi un traitement thermique à des températures comprises entre 70 °C et 200 °C pour des durées allant de 6 à 24 h, ont démontré que l'absorption d'eau diminue avec l'augmentation de la température de traitement et avec la prolongation du temps de traitement. Nikolov, S et al. (1967) ont abouti aux mêmes conclusions.

La diminution de l'humidité d'équilibre du bois dépend de plusieurs facteurs tels que l'essence de bois, la température, le temps, et le type de traitement. La multitude de variables influant la variation de l'humidité d'équilibre rend la comparaison des résultats bibliographiques assez ardue (Tjeerdsma, B et al. (1998), Kamdem, D et al. (2002), Esteves, B et al. (2007a, b), Bekhta, Petal (2003), Edvardsen, K et al. (1999). Cependant ils s'accordent sur la baisse de l'humidité d'équilibre du bois traité.

b. stabilité dimensionnelle

Pour caractériser la stabilité dimensionnelle, le coefficient d'efficacité anti-gonflement (ou ASE pour *Anti Swelling Efficiency*) est utilisé. Une ASE 65% désigne la différence entre le gonflement du bois traité et non traité, conditionné à 65% d'humidité relative. L'augmentation de la température et du temps de traitement entraîne une augmentation de l'ASE 65% qui peut atteindre 50% dans le cas du hêtre traité à 200°C (Yildiz, S (2002) et Sailer, M et al (2000)).

Des mesures de gonflement par absorption d'eau et le calcul du coefficient ASE ont montré une importante amélioration de la stabilité dimensionnelle du bois après traitement thermique (Mayes, D et al. (2002). Selon Giebeler, E (1983), le gonflement diminue d'environ 50% à 80% après traitement thermique du hêtre du peuplier du pin de l'épicéa et du bouleau.

L'amélioration de la stabilité dimensionnelle dépend de l'espèce (Milit, H et (2002)) et du traitement thermique choisi (durée, température finale, vecteur thermique, etc.). Elle dépend également de la direction du bois: l'amélioration de la stabilité est plus importante dans la direction tangentielle que dans la direction radiale selon Esteves, B et al. (2007a, b, 2008b), les valeurs de IASE sont alors plus importantes dans le plan tangentiel ce phénomène peut s'expliquer par la dégradation des hémicelluloses qui sont les polymères les plus hygroscopiques dans le bois (Yildiz, S. (2002)).

c. Mouillabilité

Suite au traitement thermique, le bois devient hydrophobe (Pétissans, Metal (2003) Dans le cas du hêtre, cette nouvelle propriété apparaît pour des températures de traitement comprises entre 130 c et 160c A ces températures Hakkou, M. et al. (2005) a constaté un changement soudain de mouillabilité qui traduit l'aptitude de l'eau à s'étaler sur la surface du bois Quant à lui, l'angle de contact atteint une valeur proche de 90^0 . Pour des températures de traitements supérieures, les angles de contact ne changent pas ($\sim 90^0$) le bois garde son caractère hydrophobe.

Étant donné que le caractère hydrophobe du bois apparaît à des températures en dessous de celles utilisées pour le traitement thermique, et donc bien avant toutes dégradations thermique, cela montre que les dégradations thermiques ne sont pas à l'origine du caractère hydrophobe du bois qui peut être expliqué par un réarrangement des réseaux polymères de la lignine.

En étudiant les caractéristiques du mouillage dynamique pour les essences québécoises (le frêne et l'érable). Kocaefe, D. et al (2008) ont abouti au même résultat, à savoir l'augmentation de l'angle de contact pour le bois traité thermiquement comparativement au bois non traité.

d. Propriétés mécaniques

Dans les paragraphes précédents, nous avons exposé les avantages apportés par le traitement thermique du bois. Malheureusement ces améliorations sont accompagnées par la détérioration de certaines propriétés du bois traité qui devient plus friable cassant et moins résistant aux chocs. Le bois traité possède des propriétés mécaniques moins intéressantes comparativement au bois d'origine.

Il ya un consensus pour dire que le bois traité thermiquement connaît une diminution de ses propriétés mécaniques (Kamdem, D.al. (2002)) et (Hakkou, M. et al. (2005a) Poncsak, S, et al. (2011)). Le module d'élasticité (MOE) apparaît moins sensible au traitement thermique que le module de rupture (MOR) qui peut diminuer de manière drastique (Borrega, M. et al. (2008), Kubojima, Y. et al (2000) ; Leitjen, A (2004). Selon Pétrissans, M. (2003), le module d'élasticité MOE ne varie pas ou peu (au maximum 20%), tandis que le module de rupture MOR diminue généralement d'environ 20 à 50%. Dans des cas extrêmes de mauvais traitement thermique (cuisson mal maîtrisée, bois de mauvaise qualité, etc.), ce module peut être diminué de 70% selon Mburu, F, et al. (2008), pour une même perte de masse, une baisse de 50% sur le module de

rupture MOR est notée comparativement à une baisse de 10% du MOE Le traitement thermique selon le procédé français à 200C et 260C a donné une diminution du MOE de 11% et 20%, et du MOR, de 8% et 40%, pour l'épicéa et le hêtre respectivement (Kamdem, D. et al. (2002). Cependant, certaines études ont rapporté une augmentation notable du module élastique après traitement (Boonstra, Metal. (2007): Santos, J. (2000) et Shi, J. et al. (2007). Sailer, M. et al. (2000) ont comparé les propriétés mécaniques du bois après traitement par les différents procédés. Ils ont conclu que le module d'élasticité n'est pas influencé par le type de traitement Par contre, le module de rupture subi une baisse de 51% après traitement dans l'huile, alors que cette baisse n'est que de 37% sous atmosphère inerte.

Pétrissans, Metal. (2003) supposent que la diminution des propriétés mécaniques du bois traité thermiquement est due à une perte de masse du matériau de 30% couplée à une augmentation de la porosité de 30 à 50 suivant les essences. La chute des performances mécaniques du bois thermo-traité n'apparaissent que lorsque la perte de masse devient significative (lorsque les hémicelluloses sont dégradées). Joscak T. et al. (2007) ne constatent aucune baisse des propriétés mécaniques en-dessous de 180C, alors que Poncsak et al. (2006) constatent cette chute à partir de 200°C. Des essais réalisés par Pétrissans, M (2004) ont montré que la perte de masse est négligeable voir faible pour des températures comprises entre 20 C et 160°C et cela pour les quatre essences étudiées deux feuillus, le hêtre et le peuplier, et deux résineux, le pin et le sapin. Pour des températures supérieures à 180 ec une forte perte de masse est notée pour les quatre essences et qui augmente avec l'augmentation de la température. Donc, il semblerait que la température de traitement soit le facteur le plus influent D'ailleurs, des tests menés par Kim, G. et al. (1998) sur le pin traité à différentes températures et différentes durées, ont conclu à l'existence d'une relation étroite entre a diminution des propriétés en flexion et les conditions opératoires (temps et température). L'utilisation du bois traité thermiquement en structure est à proscrire compte tenu de ses nouvelles caractéristiques : a diminution de sa résistance mécanique (Kamdem, D et al. 2002) et de la perte de son élasticité (Poncsak s et al. (2006), Kocaefe, D. et al. 2008)).

e. Amélioration de la durabilité

Une large analyse bibliographique démontre que le bois traité thermiquement voit sa résistance à la pourriture face à différents types de champignons augmentée, et cela pour différentes essences.

De plus ce traitement conduit à une amélioration de la résistance du bois à la biodégradation pour des essences peu durables dans des conditions favorables au développement des champignons. (Hakkou, Metal. (2006)). L'effet du traitement thermique sur la durabilité des essences de sapin, d'épicéa et du peuplier, considérés comme peu durables, face aux champignons de pourriture blanche et brune a été étudié par Dirol, D. et al. (1993) qui ont conclu que la perte de masse du bois traité due aux champignons, est inférieure à 1%, alors qu'elle dépasse 40% pour le bois non traités.

La durabilité acquise par le bois pendant le procédé de traitement thermique peut être initiée par la disparition des principaux nutriments des champignons qui n'est autre que les hémicelluloses. De plus la modification du réseau polymère de la lignine peut également avoir un rôle sur l'inhibition fongique.

Comme conclusion, on peut dire que quel que soit le type de traitement thermique utilisé, la durabilité du bois traité face aux différents champignons de pourriture augmente, cette conclusion est appuyée par plusieurs auteurs (Tjeerdsma, B. et al (2000), Sailer M et al. (2000), Welzbacherc et al. (2002)).

I.2.3.3. Autres propriétés du bois traité thermiquement

a. Couleur

Le traitement thermique modifie la couleur d'origine du bois, il devient brun tabac. Ce qui permet de donner l'apparence d'un bois noble comme le cerisier, teck ou le noyer à des essences de faible valeur marchande tel que les résineux et le peuplier. Les échantillons de bois deviennent plus foncés avec l'élévation des deux paramètres qui caractérisent le procédé à savoir la température du traitement et le temps (Mitsui, K et al. (2001. 2003, 2004), Militz, H. (2002), Bekhta, P. et al (2003). Mehrotra M. et al. (2010), Sundqvist, B. et al. (2002) justifient la couleur foncée du bois traité thermiquement par la formation de produits colorés issus de la dégradation des hémicelluloses et aux extractibles.

b. Usinage et odeur

Le bois traité thermiquement s'usine bien, mais il génère de très fines poussières difficiles à piéger et qui peuvent provoquer un incendie par arc électrique. Il a également une odeur typique de "fumée" qui se réduit progressivement lors de son utilisation (Militz, H. (2002), Peters J. et al (2008)).

I.3. Avantages et entraves au développement du traitement thermique du bois

La maîtrise du traitement thermique de bois à haute température nécessite le contrôle de plusieurs paramètres tel que la matière première et le processus de traitement, car un léger changement dans ces paramètres ou dans les caractéristiques du matériau de départ peuvent engendrer des résultats complètement différents. De nos jours, les propriétés des bois traités thermiquement dans des fours de petites dimensions sont plutôt maîtrisées, le passage vers le stade industrie reste toujours problématique (Poncsak S. et al. (2009,2011). a montre la nécessité d'entreprendre des travaux et des études afin de combler le vide qui réside entre recherche fondamentale et application industrielle.

Poncsak, S et al. 2006) ont élaboré un montage expérimental pour traiter des petites pièces de bois afin de déterminer des cédules de traitement pour plusieurs essences par la suite les essayer sur des fours industriels. L'approche en générale est très satisfaisante, néanmoins une différence existe pour le profil d'humidité étant donné que le four industriel traite plusieurs pièces du bois et le petit four de laboratoire une seule pièce de point de vue conditions aux limites on a deux différentes situations.

Les études réalisées sur le traitement thermique du bois se porte en général sur le choix des essences ainsi qu'à l'influence des paramètres réactionnels du traitement mais ne fait que rarement appel à la modélisation du procédé pour l'optimiser. Il existe quelques travaux de modélisation de traitement thermique du bois à haute température (Pang, S. (1994), Pang S et al. (1998). Fhyr, C etal. (1997), Johanson et al (1997), Nidjam, J.et al. (2000)).

Lors du traitement thermique à haute température du bois, il existe un couplage entre les phénomènes physiques de transfert de matière et d'énergie. Durant les dernières décennies, plusieurs travaux théoriques et expérimentaux ont vu le jour afin de mieux maîtriser ces mécanismes complexes

Quintard, M. et al (1986) formule un modèle complet pour le séchage du bois. Les auteurs s'appuient sur des équations de transferts simultanés de chaleur, de masse et de quantité de mouvement

Basé sur un bilan d'énergie de masse totale et de masse d'eau, Bohnke, I. (1993) développe un modèle qui prend en compte la géométrie de l'échantillon afin de calculer le champ de température, de densité et d'humidité. L'auteur a négligé plusieurs paramètres comme le gradient de pression due aux gaz de pyrolyse et à la vapeur d'eau. L'effet de la phase gazeuse et les variations volumiques de la géométrie équation du bilan d'énergie comprend un terme d'accumulation, un terme de conduction, un terme propre à la vaporisation d'eau pour des températures supérieures à 100°C et un terme pour décrire la réaction de pyrolyse pour des températures supérieures à 180°C.

Le bilan de masse tient compte de l'eau ainsi que la variation de la densité du bois mais ne prend pas en considération l'évolution du coefficient de diffusion avec l'humidité, de plus la pression interne est négligée. L'auteur résout numériquement ce système capacité calorifique du bois et la chaleur de la réaction de pyrolyse. Malgré la simplicité de ce modèle, il donne des résultats prometteurs pour le bois vert.

Le modèle précédemment cité servira de base pour un modèle 2D développé selon la direction radiale et tangentielle par Rajohnson, et al. (1994). Ce modèle mathématique est basé sur la combinaison d'un séchage haute température avec un modèle de pyrolyse. Dans ce travail la diffusion de la vapeur d'eau dans la phase gazeuse a été négligée et la pression issue des gaz de réactions n'a pas été prise en compte. L'équation de conservation d'énergie inclut un terme pour les phénomènes de conduction thermique (loi de Fourier), un autre pour la vaporisation de l'eau et un dernier pour la chaleur de réaction produite par les réactions exothermiques.

Pour la résolution du système d'équations non linéaires, les auteurs ont fait appel au code de simulation dynamique DSS/2 qui intègre simultanément les équations différentielles simples et partielles.

Grace à ce modèle, l'humidité, la densité et les profils de pression en fonction du temps peuvent être calculés.

Les travaux concernant les études de traitement thermique à basse température (le séchage conventionnel à 120°C) sont développés à une ou deux dimensions. Younsi, R. et al. (2006 a) ont

proposé un modèle simple de diffusion qui peut être utilisé aussi bien pour le séchage que le traitement thermique à haute température d'une pièce du bois. La température maximale considérée est 220 C Avec ce modèle, il est difficile d'obtenir les coefficients de diffusion pour les différentes essences. L'avantage de ce modèle est la possibilité de simuler simultanément le couplage thermohydrrique dans le four et dans le bois. Une étude paramétrique a été réalisée pour analyser l'effet des paramètres physiques tel que la vitesse de chauffage, la température maximale de traitement Les mêmes auteurs (Younsi, R et al. (2006b) ont proposé un modèle multiphasique qui prend en compte toutes les phases de l'eau dans le bois. La validation des résultats de ce modèle avec les résultats expérimentaux était très satisfaisante, mais il demeure difficile de traiter un four au avec des piles de bois étant donné la nécessité d'avoir un grand espace mémoire pour la simulation du fait de ce couplage.

I.5. Conclusion

Dans le présent chapitre nous nous sommes intéressés aux différentes techniques de traitement thermique du bois à haute température. Un tableau comparatif des conditions de traitement de chaque procédé a été présenté. Nous avons détaillé les transformations physicochimiques que subit le bois ainsi que les avantages et entraves au développement de cette technologie.

Chapitre II

Travail expérimental

II.1. Introduction

Le traitement thermique du bois est une alternative à la composition de traitement chimique à des fins de conservation. Le processus de traitement thermique permet d'améliorer la résistance du bois à la pourriture et sa stabilité dimensionnelle. Cependant, la résistance mécanique diminue par suite d'un traitement thermique. Par conséquent, les paramètres de traitement doivent être optimisés pour maintenir cette perte à un minimum tout en améliorant d'autres propriétés.

Le traitement thermique améliore la durabilité, empêche le gonflement et le rétrécissement (Stamm et al 1946; Stamm 1956), et donne une couleur foncée précieuse pour le bois. Il modifie également les propriétés mécaniques. Le bois devient plus rigide et fragile, et la résistance mécanique diminue. En fonction des paramètres de traitement tels que la température maximale de traitement, la vitesse de chauffage, le temps de maintien à la température maximale de l'humidité ou de gaz, des fissures peuvent apparaître et la structure cellulaire peut être partiellement dégradées ainsi. L'optimisation individuelle de ces paramètres doit être réalisée séparément pour chaque espèce de bois. Même les mêmes essences de bois en provenance des endroits avec des climats différents peuvent avoir des différences importantes dans leurs structures cellulaires; par conséquent, ils peuvent nécessiter différentes conditions de traitement.

II.2 Le changement physique de bois traité thermiquement

II.2.1. Couleur

Le traitement à haute température induit, dans la masse, une coloration brune marron des bois. Elle varie en fonction de la température, de la durée du traitement et de l'essence traitée. Elle est d'autant plus foncée que la température est élevée. Généralement, les essences feuillues prennent une teinte plus soutenue que les essences résineuses. À la longue, avec l'exposition aux rayons ultraviolets, on observe un grisaillement de la teinte initiale, à l'instar du bois naturel. Cependant, ce phénomène est plus rapide avec les bois traités thermiquement, la figure 1 montre le changement de couleur en fonction de temps de traitement bois Spin de dimension $2.5 \times 2.5 \times 0.3 \text{ cm}^3$

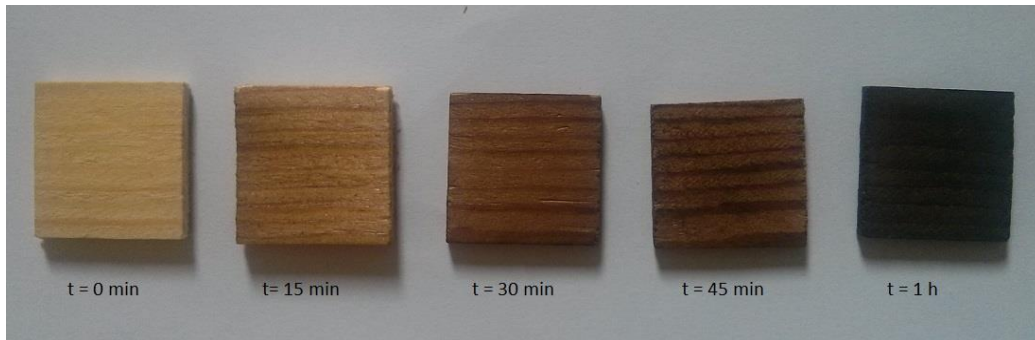


Figure II.1 : Coloration de bois en traitement thermique à $T=200^{\circ}\text{C}$

II.2.2. Odeur

Après traitement, le bois présente une forte odeur rappelant celle du café torréfié ou du caramel qui s'estompe avec le temps.

II.3. Calcule de la diffusivité thermique de bois traité thermiquement

La méthode de flash pour mesurer la diffusivité thermique a été introduite par Parker et al. [1] en 1961 depuis et a été la favori des chercheur de propriétés thermophysiques. Le procédé est bien connu et ses fondamentaux ont été largement décrite dans la littérature. Sa popularité est due en grande partie à sont petite taille de l'échantillon (généralement 12,5 mm de diamètre de disque mince), la rapidité de la mesure (quelques minutes au lieu de plusieurs heures ou jours pour les méthodes de l'état d'équilibre), et son applicabilité à des températures élevées.



Figure II.2 : FLASHLINE™-2010 diffusivité thermique

Tableau II.1 : la diffusivité thermique de bois (sapin)

Type de bois	Température (°C)	Temps (min)	Diffusivité (cm ² /s)
Sapin	Non traitée	Non traitée	0.0192
	140	45	0.0153
	200	45	0.0071

II.4. La résistance mécanique de bois traité thermiquement

II.4.1. La flexion

Nous avons comparé le comportement du bois traité avec le bois non traité lors de l'essai de flexion. La machine utilisée est disponible au niveau de la faculté de génie mécanique et génie des procédés. Nous remarquons que la résistance à la flexion diminue de 22% par rapport au bois non traité.

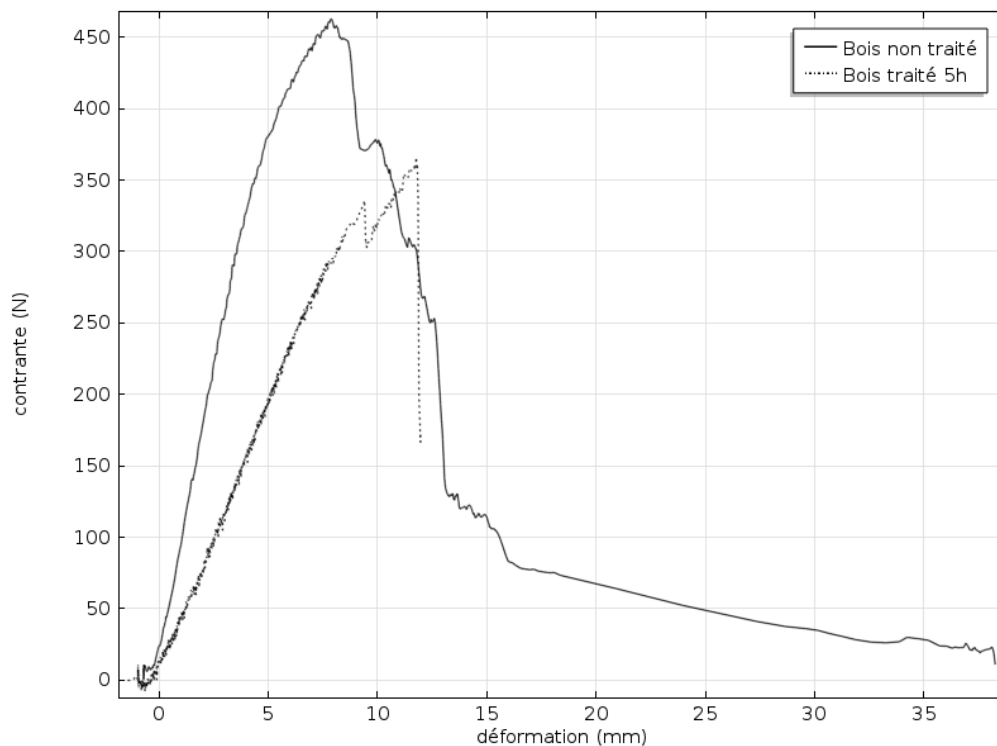


Figure II.3 : Graphe de l'essai de flexion

II.4.2. Stabilité dimensionnelle.

Pour mettre en évidence ce phénomène, nous avons comparé deux échantillons du bois étudié, un non traité et un autre de mêmes dimensions traité thermiquement. Nous avons laissé les deux

échantillons dans l'eau pendant deux jours. Nous avons constaté que l'échantillon traité garde pratiquement les mêmes dimensions comparativement à l'échantillon non traité.

Conclusion :

En fin, nous avons présenté un rappel des travaux faits sur la modélisation du bois traité thermiquement. Dans le chapitre suivant, nous allons proposer un modèle 3D qui prend en compte le couplage thermo hydrique.

Chapitre III

Formulation mathématique et résolution numérique

III.1. Introduction

La modélisation des processus de transfert dans le bois lors du séchage a suscité un grand nombre d'investigation. Une grande littérature lui est dédiée Le but est l'élaboration d'un modèle mathématique pour déterminer les phénomènes des transferts couplés de chaleur et de masse dans le bois (Lewis R.w. et al. (1990)). Cependant, il y a peu de modèle rapporté dans la littérature pour le traitement thermique du bois à haute température. Par conséquent, nous allons citer, l'essentiel des modèles de séchage de bois à haute température qui existe dans la littérature. Une recherche bibliographique détaillée a été effectuée pour comprendre et caractérise les phénomènes physiques ayant lieu durant le processus de séchage de bois. Quel qu'il soit difficile de classifier clairement les approches utilisées jusqu'ici, deux principales catégories des modèles de séchage de bois peuvent être identifiées:

- (a) Les modèles basés sur l'utilisation d'une potentielle thermodynamique.
- (b) Modèle à composantes multiples.

En se basant sur l'abondante production littéraire qui existe sur les modèles couplés de transfert de masse et de la chaleur dans les milieux, nous dresserons une revue bibliographique des différents modèles.

Dans ce qui suit, nous allons s'intéresser particulièrement au modèle basé sur le potentiel de transfert de masse (Modèle de Luikov).

III.2. Modèle couplé de transfert de chaleur et de masse

Selon Simpeon (Simpson, W.T. et al. (1997)) Tuttle étant le premier à avoir proposé une équation de diffusion pour le séchage du bois ; après lui, de nombreux modèles ont été développés. Le couplage entre le transfert de chaleur et de masse dans les milieux poreux capillaires a été établi par Luikov (Luikov, A.V. (1975)). Il a défini un système coupe d'équations différentielles à dérivées partielles en utilisant la thermodynamique du processus irréversible. Plusieurs chercheurs ont travaillé sur des solutions numériques et analytiques des équations de Luikov afin de modéliser les phénomènes de transfert de chaleur et de masse pour le séchage de bois (Irudayaraj, J. et al (1990), Comini, G. et al. (1976)).

Traditionnellement le gradient de la teneur en humidité a été utilisé comme force d'entraînement pour la diffusion. En outre les gradients du potentiel chimique et le potentiel hydrique ont été également employés. Le fait que le bois est un milieu anisotrope, introduit une certaine difficulté pour le modèle de séchage de bois car durant le processus couplé de chaleur et de diffusion massique, un gradient de température peut causer un transfert de masse (effet de Soret) et un gradient de concentration de masse peut causer un transfert de chaleur (effet de Dufour).

Plusieurs paramètres sont nécessaires pour décrire clairement ces phénomènes. Une fois que le problème est formulé avec succès en termes de système d'équations partielles couplé, la solution analytique de ces équations présente une difficulté, et par conséquent des solutions sont données seulement pour les configurations les plus simples. En général, elles doivent être résolues numériquement.

III.2.1. Les modèles basés sur l'utilisation d'une potentielle thermodynamique

Les modèles basés sur l'utilisation d'une potentielle thermodynamique peuvent être classés dans quatre groupes:

- modèles basés sur le potentiel de transfert de masse.
- modèles basés sur la thermodynamique irréversible.
- modèles basés sur le potentiel chimique.
- modèles basés sur le potentiel hydrique.

III.2.1.1. Modèle basé sur le potentiel de transfert de masse

Ce modèle a été proposé par Luikov en 1966 (Luikov, A.V. (1975)). Le potentiel de transfert de masse est défini par ‘

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [(k_{eff} + \delta \cdot \varepsilon \cdot Q_l \cdot D_{eff}) \nabla T + \varepsilon \cdot Q_l \cdot D_{eff} \cdot \nabla M] \quad \text{III.1}$$

$$\rho \frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot [D_{eff} \cdot \nabla M + D_{eff} \cdot \delta \cdot \nabla T] \quad \text{III.2}$$

L'équation III.2 tient compte du terme transfert de masse dû au gradient de concentration (Fick) et le terme transfert de masse dû au gradient de température (effet Soret). Le terme relatif à la gravité est néglige. Le bilan d'énergie inclut le transfert thermique par conduction sur l'ensemble des phases (loi de Fourier) et le chargement de phase.

L'équation III.2 tient compte du terme transfert de massa dû au gradient de concentration (Fick) et le terme transfert de masse dû au gradient de température (effet Soret). Le terme relatif à la gravité est négligé. Le balan d'énergie inclut le transfert thermique par conduction sur l'ensemble des phases (loi de Fourier) et le changement de phase.

Pour ce modèle les paramètres suivants doivent être connus. : Relation teneur en Humidité - potentiel de transfert de masse, coefficients de conductivité et de thermo-migration et le facteur de changement de phase.

Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'application de ce modèle au transfert de chaleur et de masse en milieux poreux, parmi eux on peut citer Thomas, H.R. et al. [1980), Gui, Y.Q. et al. (1994) et Liu, Q. et al. (1995).

Nous avons réalisé une étude paramétrique sur le traitement thermique d'une pièce de bois en utilisant le modèle de Luikov adimensionnel. L'utilisation de Luikov adimensionnel réduit le nombre de variables. L'effet des nombres de Luikov, Posnov et Kossovitych a été mis en évidence.

Ces modèles supposent une pression totale constante dans tout le matériau, ce qui est juste pour les procédés classiques où l'évaporation est moins intense.

Luikov A.V. (1975) reconnaît l'importance du transfert de chaleur et de masse par convection dû à la création d'un gradient de pression totale en phase gazeuse dans le matériau lors des procédés de séchage rapides. Ce gradient de pression est créé par l'intense évaporation et la résistance à l'écoulement de la vapeur d'eau par la structure capillaire.

III.2.1.2. Modèle basé sur la thermodynamique irréversible

Horacek, P. (2003) a étudié les modèles couplés de transfert de chaleur et d'humidité lors du séchage. Il a récapitulé les équations de diffusion inspirées par Siau (Siau, J.F. et al. (1994) qui

ont trouvé, en utilisant ces équations, un meilleur accord entre les données expérimentales et les résultats du modèle thermodynamique pour décrire les phénomènes de transfert de chaleur et d'humidité dans le bois.

L'auteur a analysé la diffusion non-isotherme en utilisant un modèle thermodynamique considérant les gradients de la température et de l'eau.

Dans ce modèle, les gradients de la teneur en eau et de température sont considérés comme des forces d'entraînement car tous les autres facteurs liés à la teneur d'humidité ne sont applicables que dans la région hygroscopique.

Les équations différentielles d'état pour une section transversale bidimensionnelle sont données par:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_{mx} \frac{\partial M}{\partial x} + \phi_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_{my} \frac{\partial M}{\partial y} + \phi_y \frac{\partial T}{\partial y} \right)$$

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{qx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{qy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{E_e}{1.8c} \frac{\partial M}{\partial t}$$

Avec ϕ est un coefficient phénoménologique du gradient de la température dans l'équation de bilan de matière proposé par Siau (Siau, J F. et al. (1994). C'est une fonction de la température et de l'humidité.

$$\phi = f(T, M)$$

$$a_m = f(T, M)$$

La sorption est la capacité d'un matériau hygroscopique tel que le bois d'absorber ou de dégager la vapeur d'eau dans l'air jusqu'à ce qu'un état d'équilibre soit atteint. Les isothermes de sorption sont la représentation graphique du comportement de sorption du matériau, en d'autres termes ces isothermes représentent le rapport entre la teneur en eau du matériau et de l'humidité relative d'air ambiant (équilibre) à une température donnée comme les capacités de sorption de chaque bois différent, ces isothermes sont spécifiques au spécimen de bois.

Horacek, P. (2003) a décrit les conditions aux limites sur une surface de bois comme :

$$-a_m \left(\frac{\partial M}{\partial x} \right)_L = \alpha_m (M(L, t) - M_a)$$

$$-k_q \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_L = \alpha_q (T(L, t) - T_a)$$

L'auteur a résolu ces équations aux dérivées partielles en utilisant la méthode d'élément fini de Galerkin avec des fonctions quadratiques ou cubiques de base impliquant des valeurs nodales des variables de système seulement.

L'avantage majeur de la thermodynamique des processus irréversibles réside essentiellement dans la description des différents modes de transfert dans le bois mais son application pratique reste très limitée par la détermination des coefficients phénoménologiques.

III.2.1.3 Modèle basé sur le potentiel chimique

Le potentiel chimique qui définit l'état d'équilibre entre deux phases d'une substance pure (ou l'équilibre d'un mélange de plusieurs phases pour un système fermé) est formulé à partir de la thermodynamique classique (les deux premiers principes) et de la fonction de Gibbs.

Le modèle basé sur le potentiel chimique a été proposé par Siau (Siau, J.F. et al. (1994) qui a exprimé la loi de Fick en considérant le potentiel chimique comme une force d'entraînement:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-D_\mu \frac{\partial k_v}{\partial x} \right)$$

Le potentiel chimique peut être exprimé en fonction de la température(T) et de l'humidité (h) comme:

$$\frac{\partial k}{\partial x} = \left(\frac{\partial k}{\partial T} \right)_\phi \frac{\partial T}{\partial x} + \left(\frac{\partial k}{\partial h} \right)_T \left(\frac{\partial h}{\partial \phi} \right)_T \frac{\partial \phi}{\partial x}$$

Le coefficient D_μ peut être exprimé en fonction de D_M et de la teneur en humidité

$$D_\mu = D_M \left(\frac{\partial M}{\partial \mu} \right) = D_M \left(\frac{\partial M}{\partial h} \right)_T \left(\frac{\partial h}{\partial k} \right)_T$$

Avec D_μ est le coefficient de diffusivité, basé sur le potentiel chimique de la vapeur d'eau, k_v est le potentiel chimique, et D_M est le coefficient de diffusivité basé sur la teneur en humidité M.

III.2.1.4. Modèle basé sur le potentiel hydrique

Fortin, Y. et al. (2001) ont utilisé le concept du potentiel hydrique pour caractériser l'eau dans le bois en termes d'énergie libre. Ils ont proposé un modèle isotherme de séchage de bois en employant le gradient du potentiel hydrique comme force d'entraînement

Le potentiel hydrique peut être défini comme suit :

$$\Psi = G - G_0$$

Avec Ψ est le potentiel hydrique, G est l'énergie libre de Gibbs spécifique de l'eau à l'état considéré et G_0 est l'énergie libre de Gibbs spécifique de l'eau à l'état standard de référence.

Le potentiel hydrique est dérivé de la combinaison du premier et second principe de la thermodynamique classique en utilisant la fonction d'énergie de Gibbs libre. Fortin Y. a développé un modèle isotherme de séchage de bois à la pression atmosphérique et a supposé que les seuls composants significatifs du potentiel hydrique sont le potentiel matriciel Ψ_m et le potentiel osmotique Ψ_0 .

Une expression combinée pour le pm et Ψ_m et Ψ_0 peut être obtenue en évaluant l'énergie libre de Gibbs et celle de la vapeur d'eau en équilibre avec l'eau dans le bois :

$$\Psi_{m+0} = \frac{RT}{M_{M.W}} \ln \frac{P_e}{P_s}$$

Avec P_e est la pression partielle de l'eau en équilibre avec l'eau dans le bois et P_s est la pression partielle de la vapeur d'eau en équilibre avec l'eau libre pur.

L'équation de transfert de masse est donnée par:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{q}_m = 0$$

Le teneur en eau est :

$$M_C = G_{SG} \rho_e \frac{M}{100}$$

La densité du bois est donné par :

$$G_{SG} = \frac{W_0}{\rho_e V_{hum}}$$

Fortin, Y. et al. (2001) ont supposé que le gradient de température est négligeable et l'équilibre thermodynamique existe entre l'eau liquide, la vapeur d'eau, et l'eau liée.

III.2.2. Modèle à composantes multiples

Whitaker, S. (1977) a réalisé une analyse détaillée des lois de Fick et de Fourier applicables au milieu poreux et a développé un ensemble d'équations macroscopiques où les flux des différents composants sont décrits en utilisant divers coefficients de transport et forces d'entraînement. L'approche de Whitaker peut être qualifiée comme approche à plusieurs composants car les équations de conservations d'énergie et de masse sont écrites pour l'eau en phase liquide, vapeur d'eau et pour le mélange gazeux (air +vapeur d'eau).

Turner, I, W. et al. (2001) a appliqué le modèle à composantes multiples pour décrire le transfert de chaleur et de masse lors de séchage de bois. Ils ont récapitulé les lois de conservations comme suit:

L'équation de conservation d'énergie :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\gamma_w \rho_w H_w + \gamma_g (\rho_g h_v + \rho_a H_a) + \rho_b H_b + \rho_0 H_s - \gamma_g P_g) \\ + \nabla \cdot (\rho_w H_w \vec{v}_w + (\rho_v H_v + \rho_a H_a) \vec{v}_g + H_b \rho_b \vec{v}_b) \\ = \nabla \cdot (\rho_g D_{eff} (H_v \nabla w_v + H_a \nabla w_a) + k_{eff} \nabla T) \end{aligned}$$

L'équation de conservation de masse pour la phase liquide est :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\gamma_w \rho_w + \gamma_g \rho_v + \rho_b) + \nabla \cdot (\rho_w \vec{v}_w + \rho_v \vec{v}_g + \rho_b \vec{v}_b) = \nabla \cdot (\rho_g D_{eff} \nabla w_v)$$

L'équation de conservation de masse pour l'air est :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\gamma_g \rho_a) + \nabla \cdot (\rho_a \vec{v}_g) = \nabla \cdot (\rho_g D_{eff} \nabla w_a)$$

Avec γ est la fraction de volume, H est l'enthalpie spécifique, v est la vitesse, D_{eff} est la diffusivité effective, ω est la fraction massique et k_{eff} est la conductivité thermique effective.

La même formulation a été utilisée par Younsi et al. (2006b) pour analyser le traitement thermique à haute température d'une petite pièce de bois (20cm x 3.5cm x 3.5cm). Un bon accord a été obtenu avec les résultats expérimentaux. Même si ce modèle semble très complet (tenant compte de toutes les phases de l'eau), il serait difficile de le coupler avec les équations de l'écoulement de gaz dans le four.

III.3. Formulation mathématique

Pour effectuer la formulation mathématique de notre problème nous allons présenter le modèle physique, les hypothèses simplificatrices ainsi que les conditions initiales et aux limites appropriées. Dans la plupart des modèles décrits précédemment, les valeurs des coefficients de transfert de chaleur et de masse à la surface du bois sont exprimées à partir des corrélations disponibles dans la littérature. En outre, ces coefficients sont supposés constants tout au long des surfaces. Mais en réalité, le traitement thermique du bois est un problème conjugué et transitoire. Le bord d'attaque chauffe plus rapidement par rapport aux autres surfaces.

Le modèle de Luikov est considéré comme une formulation fiable et toujours pratique et ne place aucune restriction sur le mécanisme de transfert d'humidité. C'est ce modèle qu'on va utiliser pour formuler nos équations de transfert thermo-hydrique dans le bois

III.3.1. Modèle physique

Le procédé de traitement thermique du bois à haute température implique le transfert simultané de chaleur et de masse dans un milieu poreux. Le problème considère un échantillon du bois soumis au chauffage convectif à haute température dans une atmosphère inerte, initialement humidité et température uniforme.

Le modèle physique étudié est représenté sur la figure III.1.

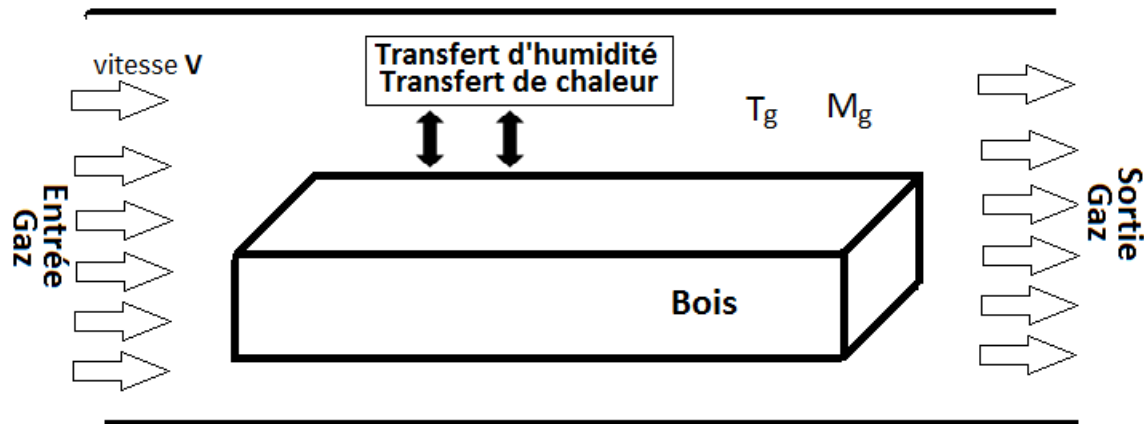


Figure III.1 : Représentation schématique du modèle physique

III.3.2. Mise en équations

III.3.2.1. Hypothèses simplificatrices

Le transfert de chaleur et de masse au sein des milieux poreux est très complexe.

Plusieurs hypothèses sont souvent nécessaires pour rendre le problème maniable. Dans notre travail, les hypothèses utilisées pour la simplification du modèle sont énumérées comme suit:

- La teneur initiale en eau et la température initiale dans le bois sont uniforme.
- L'écoulement et le système poreux est tridimensionnel.
- L'eau liquide est incompressible: le pourcentage de l'eau diminue de façon continue durant le traitement thermique.
- Le champ d'écoulement est laminaire.
- Il n'y a aucune génération de chaleur à l'intérieur du bois.

III.3.2.2. Équations régissantes sur le bois

Le modèle de Luikov a été utilisé pour formuler le problème de transfert de chaleur et de la masse dans l'échantillon de bois pendant le traitement thermique, ce qui implique des températures plus élevées que celles du séchage conventionnel.

Basées sur les hypothèses énumérées ci-dessus, les équations de conservation décrivant le transfert tridimensionnel de chaleur et d'humidité dans le bois pendant le traitement thermique sont données comme suit:

a) Équation de transfert de chaleur

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho c_q T] = \vec{\nabla} \cdot \left[\left(k_q + \frac{\varepsilon \Lambda k_m \delta}{c_m} \right) \vec{\nabla} T + \frac{\varepsilon \Lambda k_m}{100 c_m} \vec{\nabla} M \right]$$

b) Équation de transfert d'humidité

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\rho}{100} M \right] = \vec{\nabla} \cdot \left[\left(\frac{k_m \delta}{c_m} \right) \vec{\nabla} T + \frac{k_m}{100 c_m} \vec{\nabla} M \right]$$

Où m c'est la masse du bois et m_0 la masse du bois sec.

III.2.1. Les conditions initiales et aux limites

III.2.1.1. Conditions aux limites

Le bois est chauffé par gaz chaud. Les conditions aux limites gaz-bois et sont représentées en utilisant les conditions aux limites par convection pour le transfert de chaleur et de masse.

a) Transfert de chaleur :

$$- \left[\left(k_q + \frac{\varepsilon \lambda k_m \delta}{c_m} \right) \frac{\partial T}{\partial n} + \left(\frac{\varepsilon \Lambda k_m}{100 c_m} \right) \frac{\partial M}{\partial n} \right] = h_q (T - T_g) + \frac{\Lambda h_m}{100 c_m} (M - M_g) \quad (20)$$

b) Transfert de masse :

$$- \left[\left(\frac{k_m \delta}{c_m} \right) \frac{\partial T}{\partial n} + \left(\frac{k_m}{100 c_m} \right) \frac{\partial M}{\partial n} \right] = \frac{h_m}{100 c_m} (M - M_g) \quad (21)$$

Où n c'est les directions de l'espace (x, y, z), M_g est la teneur en humidité du gaz, la T_g est la température du gaz, h_q est le coefficient de transfert de chaleur par convection, et h_m est le coefficient de transfert de masse par convection.

Les corrélations suivantes (Incropera et DeWitt, 2002) pour l'écoulement laminaire forcé sont utilisés pour déterminer les coefficients transfert de chaleur (h_q) et le transfert de masse (h_m).

$$Nu = 0.664Re^{0.5}Pe^{0.33} \quad (22)$$

$$Sh = 0.664Re^{0.5}Sc^{0.33} \quad (23)$$

$$Nu = \frac{h_q L}{k_{qg}}, \quad Sh = \frac{h_m L}{D_v}, \quad Re = \frac{Lu\rho_g}{\mu_g}, \quad Pr = \frac{c_{qg}\mu_g}{k_{qg}}, \quad Sc = \frac{\mu_g}{D_v\rho_g} \quad (24)$$

Où les nombre Nu , Re , Pr , Sh , Sc sont Nusselt, Reynolds, Prandtl, Sherwood, et le nombre de Schmidt. L est la longueur de l'échantillon, v est la vitesse du gaz, et D_v est le coefficient de diffusion de la vapeur dans le gaz. k_{qg} , μ_g , C_{qg} , ρ_g sont la conductivité thermique, viscosité, chaleur spécifique, et la densité du gaz, respectivement.

III.1.2.2. Conditions initiales

Initialement, on suppose que l'échantillon du bois est à température et teneur en humidité uniforme, cela se traduit par :

$$\text{À } t=0 \quad \left\{ \begin{array}{l} T(n, 0) = T_0 \\ M(n, 0) = M_0 \end{array} \right.$$

Les équations de transfert de chaleur et de masse avec les conditions aux limites forment un système d'équations aux dérivées partielles non linéaires fortement couplées, qui ne peut pas être résolu de façon analytique.

Alors vis-à-vis de cette complexité, nous avons choisi de résoudre le système d'équations à l'aide d'un logiciel (COMSOL) qui travaille avec la méthode des éléments finis et qui est capable de tenir compte de toutes les exigences que le modèle demande pour sa résolution numérique.

III.4. Utilisation du logiciel COMSOL Multiphysics pour la résolution du problème

Pour notre travail, la version 3.2 du logiciel COMSOL Multiphysics (Femlab) a été utilisée. Il utilise une discrétisation par la méthode des éléments finis, avec un maillage automatique de la géométrie en triangles ou tétraèdres. Son langage de programmation est basé sur Matlab.

Le point fort de ce logiciel c'est qu'il propose des solveurs performants, ce qui permet la modélisation et la simulation des phénomènes physiques descriptibles sous forme d'équations aux dérivées partielles.

Femlab possède des modèles prédéfinis, avec lesquels on peut simuler la plupart des phénomènes physiques, et les couper entre eux. Grâce à l'interface graphique de ce logiciel on peut travailler directement sur les équations et les modifier selon les besoins dans des situations pointues.

Pour la résolution d'un problème à l'aide de COMSOL Multiphysics, nous devons suivre les étapes de la résolution suivantes :

1. La création de la géométrie.
2. Définition des équations aux dérivées partielles intervenant dans la géométrie.
3. Donner les propriétés physiques de la géométrie.
4. Définition des conditions aux limites.
5. Choix du Maillage.
6. Résolution numérique.
7. Visualisation des résultats.

III.5. Principe de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles qui peuvent représenter analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques. Cette méthode qui fait partie des outils de mathématiques appliquées consiste à approcher, dans un sous-espace de dimension finie, un problème écrit sous forme variationnelle (comme minimisation de l'énergie, en général) ou formulation faible, un algorithme discret mathématique permettant de rechercher une solution approchée d'une équation

aux dérivées partielles (EDP) sur un domaine compact avec conditions aux bords et/ou dans l'intérieur du compact.

Cette méthode représente plusieurs avantages tels que la possibilité de traitement de géométries complexes, détermination plus naturelle des conditions aux limites et la possibilité de démonstrations mathématiques de convergence et de majoration d'erreurs. Mais elle peut également représenter un inconvénient majeur qui se manifeste par la complexité de mise en œuvre.

III.6. Choix d'un maillage

La méthode des éléments finis repose sur un découpage de l'espace selon un maillage.

En général le maillage choisi peut être carré ou triangulaire mais rien n'empêche de choisir un maillage plus complexe est qui ne sera pas forcément régulier. On peut également le resserrer près des endroits d'intérêt aux endroits où l'on pense que la solution peut beaucoup varier, forts gradients); cependant, il faut avoir des éléments faiblement distordus (se rapprocher d'un polygone régulier) Pour obtenir une solution précise et proche de la solution réelle de l'équation aux dérivées partielles par la méthode des éléments finis, il faut que le maillage utilisé soit le plus resserré possible.

Après on doit prendre une base de fonctions adaptées au maillage. Plusieurs choix sont alors possibles. En général, les fonctions de base utilisées pour les éléments finis sont interpolantes, c'est-à-dire que les valeurs nodales sont les valeurs des grandeurs inconnues aux nœuds. La plus simple est l'emploi des polynômes de Lagrange. Dans cette méthode les fonctions de base valent 1 à un nœud du maillage et 0 à tous les autres. La fonction de base i est alors la fonction valant 1 au nœud i et 0 sur les autres nœuds et qui est polynomiale sur chaque élément. Il y a autant de fonctions de base par élément que de nombre de nœuds.

CONSOL Multiphysics propose neuf types de maillages de différentes finesses, de l'extrêmement fin à l'extrêmement grossier avec la possibilité de modifier les paramètres afin de l'améliorer. Le maillage peut être affiné au besoin, selon la complexité de la géométrie du problème, sur un sous domaine, une frontière

Le maillage utilisé pour discrétiser la géométrie étudiée est de type lagrangien avec remaillage automatique de forme triangulaire (voir figure III.2.)

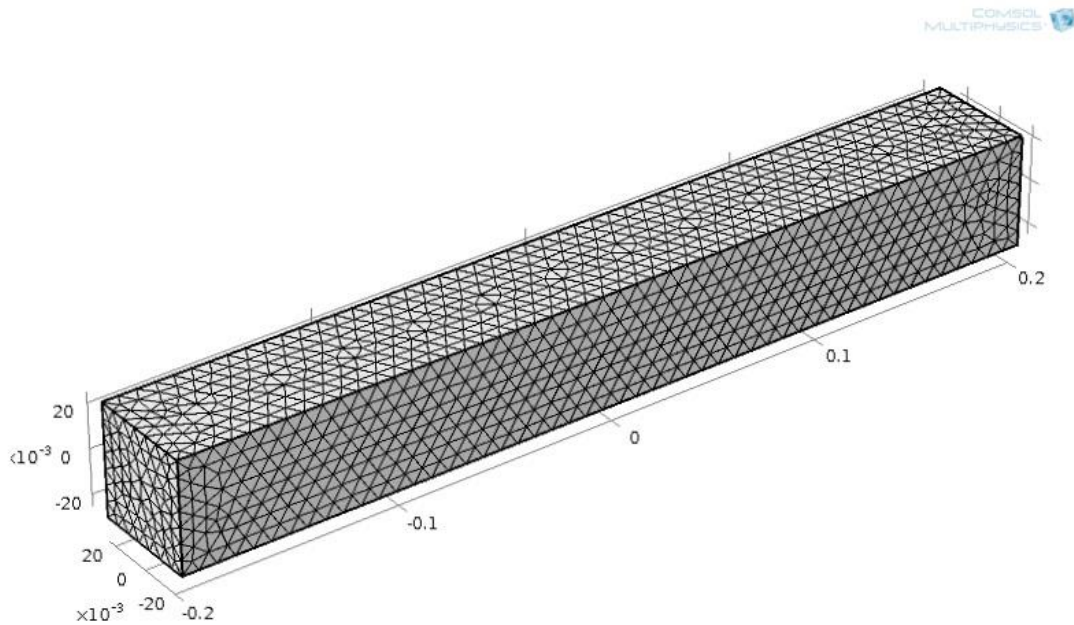


Figure III.2. : Représentation du maillage utilisé.

III.7. Détermination des propriétés thermo-physiques du bois

L'exactitude du modèle que nous avons utilisé dépend de l'exactitude des propriétés thermo-physiques du bois.

La densité (ρ), la gravité spécifique (G_m), la chaleur spécifique (c_p) et les conductivités thermiques (k_{qx} , k_{qy} , k_{qz}) du bois humide ont été calculées en utilisant des relations proposées par Simpson, W. et al. (1999) et Siau, F. (1984).

$$\rho = 1000. G_m(1 + M/100)$$

La chaleur spécifique et la conductivité thermique du bois humide sont des fonctions de l'humidité et de la température:

$$c_p = (c_{p0} + 0.01. c_{pe}. M)/(1 + 0.01. M) + A_c$$

Où M est la teneur en eau en % C_{pe} est la chaleur spécifique de l'eau, C_{p0} est la chaleur spécifique du bois sec et A_c est un paramètre qui est fonction de la teneur en eau et de la température.

Les expressions de C_{p0} et A_c sont données ci-dessous:

$$c_{p0} = 0.1031 + 0.003867.T$$

$$A_c = M.(-0.0691 + 2.36.10^{-4}.T - 1.33.10^{-4}.M)$$

La conductivité thermique du bois dans la direction longitudinale est doublement plus élevée que le coefficient de conductivité pour les directions radiale et tangentielle tels qu'il est rapporté dans la littérature (Leon, G, et al. (2000)).

Les conductivités thermiques dans les différentes directions sont données par les relations suivantes:

$$k_q = G_m.(0.1941 + 0.004064.M) + 0.01864$$

La chaleur de vaporisation a été adaptée à un polynôme comme une fonction de la température, elle est donnée comme suit :

$$\lambda = 2.792.10^6 - 160.T - 3.43.T^2$$

Les autres propriétés physiques utilisées sont récapitulées dans le tableau III.1.

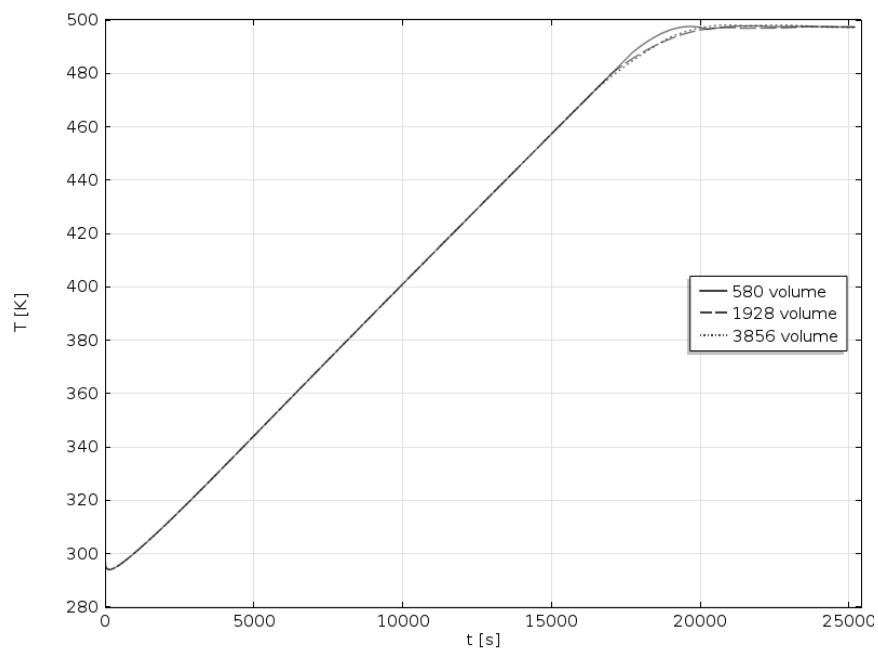
Tableau III.1. Paramètres utilisée dans le modèle

Propriété	Valeur
δ (kg _{humide} /kg.k)	0.025
ε	0.3
k_m (kg _{humide} /m.s.M)	1.8×10^{-8}
c_m (kg _{humide} /kg.M)	0.01
T_0 (K)	298
M_0 (%)	12-30
M_g (%)	0.1

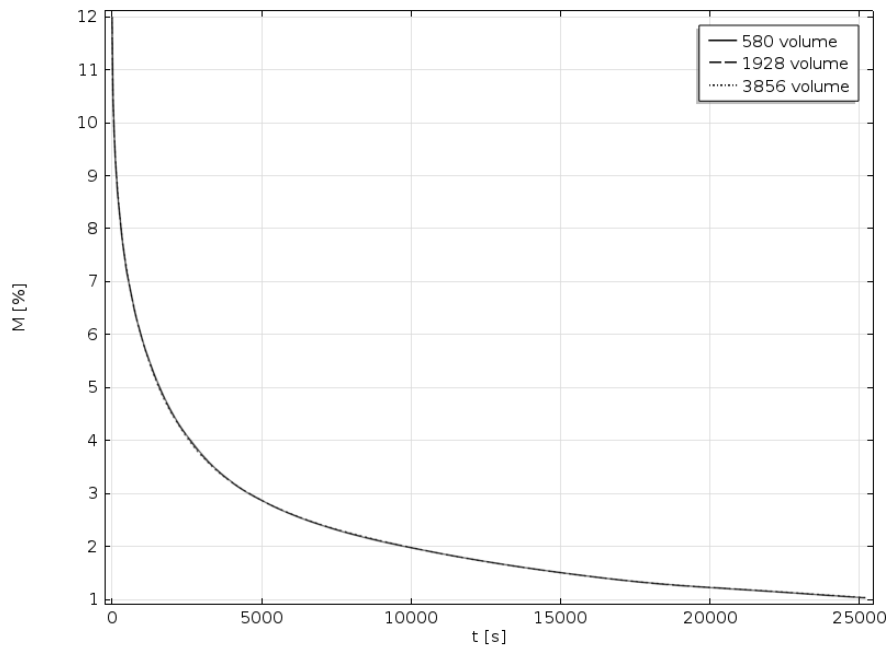
III.8. Résolution numérique

Afin de vérifier l'indépendance de la solution du maillage nous avons exécuté le programme pour différents maillages non uniformes, tel qu'illustré sur la figure III.3.a et figure III.3.b.

Nous avons considéré le traitement thermique d'une pièce de bois de $0.05 \times 0.05 \times 0.4 \text{ m}^3$ pour les conditions de traitement thermique suivantes: vitesse de chauffage 40°C/h , teneur en eau initiale de 12% et une température finale de 200°C . Nous avons reporté sur cette figure l'évolution de la teneur moyenne en eau à la surface et au centre. Ces résultats montrent qu'un maillage avec 3856 éléments est suffisant pour assurer une bonne résolution spatiale du problème étudié.

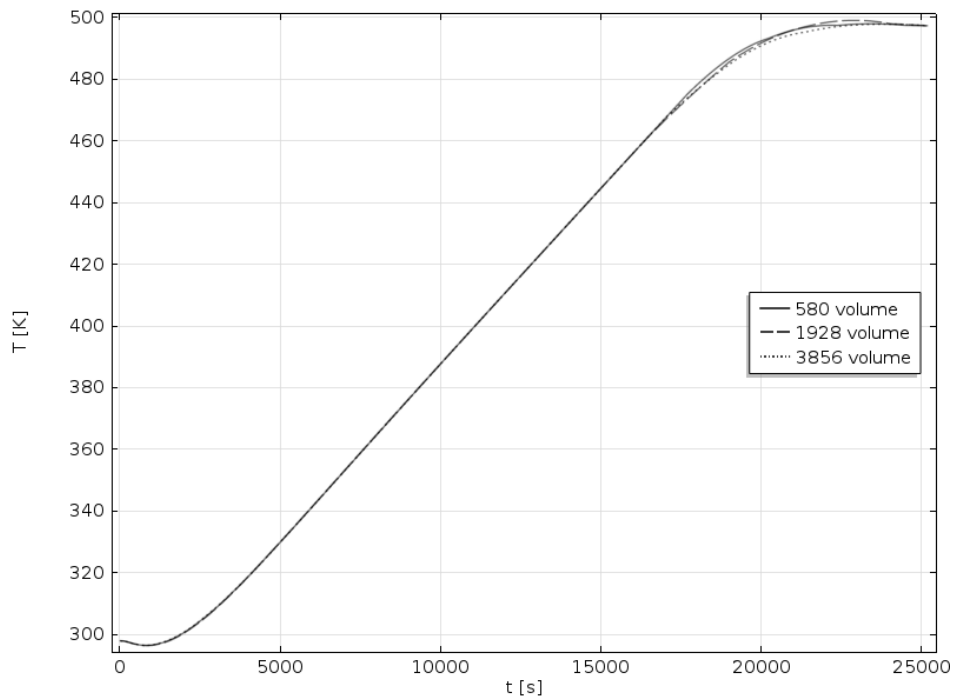


(a)

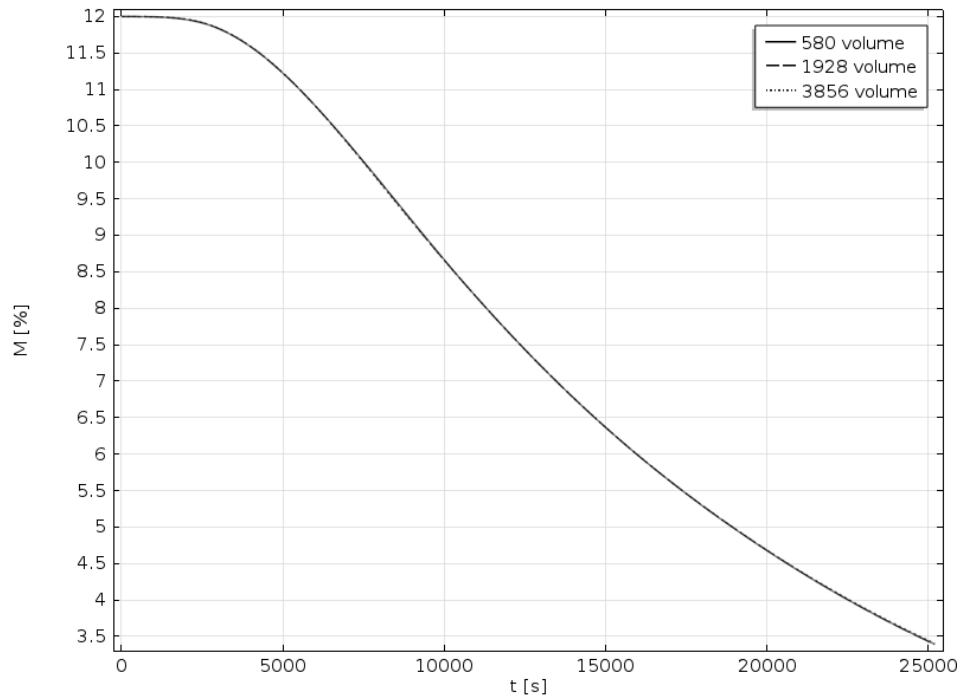


(b)

Figure III.3.a : Evolution de la température et teneur en humidité à la surface $T_g=200^\circ\text{C}$ vitesse de chauffage 40°C/h . $M_0=12\%$.



(a)



(b)

Figure III.3.a : Evolution de la température et teneur en humidité au centre de la pièce
 $T_g=200^{\circ}\text{C}$ (finale) chauffage 40°C/h . $M_0=12\%$.

III.9. Validation du modèle

Le modèle numérique a été validé avec succès en comparant les résultats du modèle avec les résultats expérimentaux et numérique obtenus par Younsi, R. et al (2006) pour le traitement thermique haute température d'une pièce de dimension de $0.035\text{m} \times 0.035\text{m} \times 0.20\text{m}$. Les résultats sont illustrés sur la figure III.4 pour l'évaluation de la teneur en humidité et l'évaluation de la température.

Tableau III.2: Paramètres utilisés pour la validation (R. Younsi et al [16])

Paramètres	Unité	valeur
C_p	J/kg/K	1883
C_m	kg _m /kg.M°	0.01
G_m		0.66
V_g	m/s	0.02
k_q	W/m. K	0.18
k_m	kg _m /m.s.M°	18×10^{-8}
M_0	Kg _m /Kg (M°)	12
T_0	K	298
M_g	Kg _m /Kg (M°)	0.02
ε		0.3
δ	kg _m /kg.K	0.02

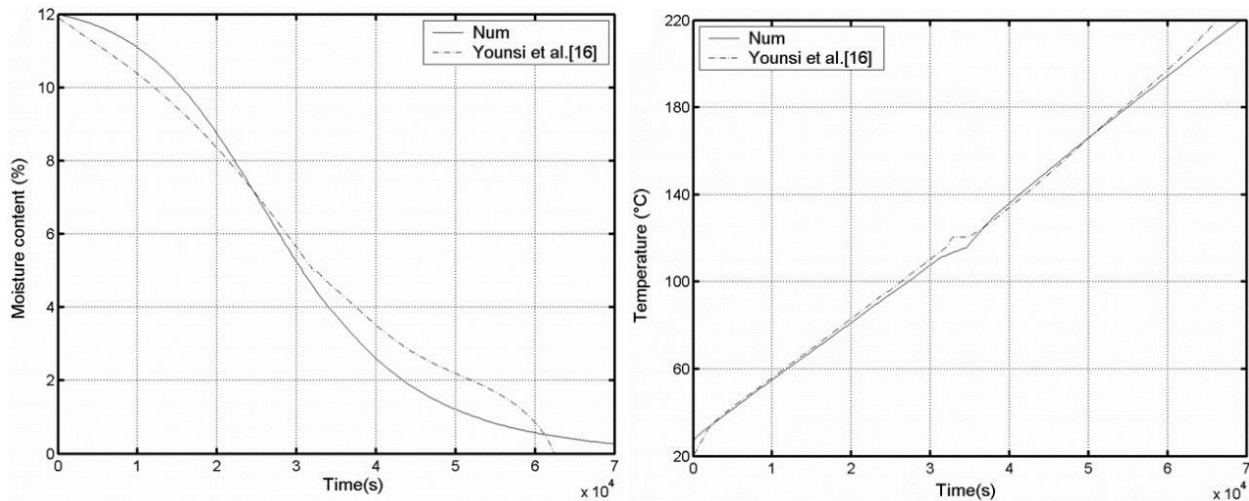
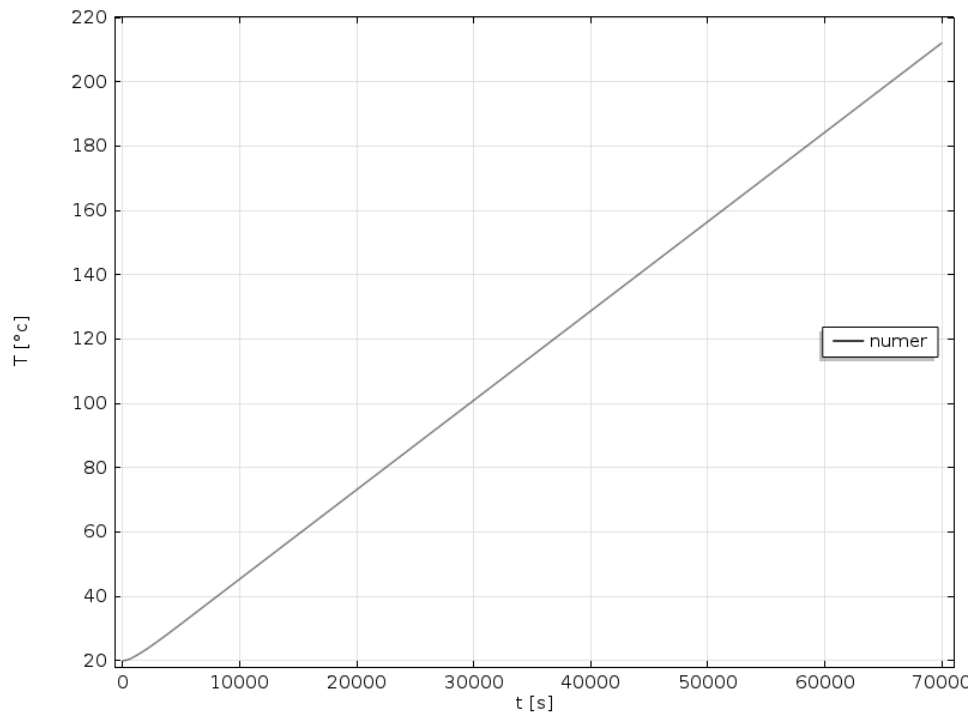
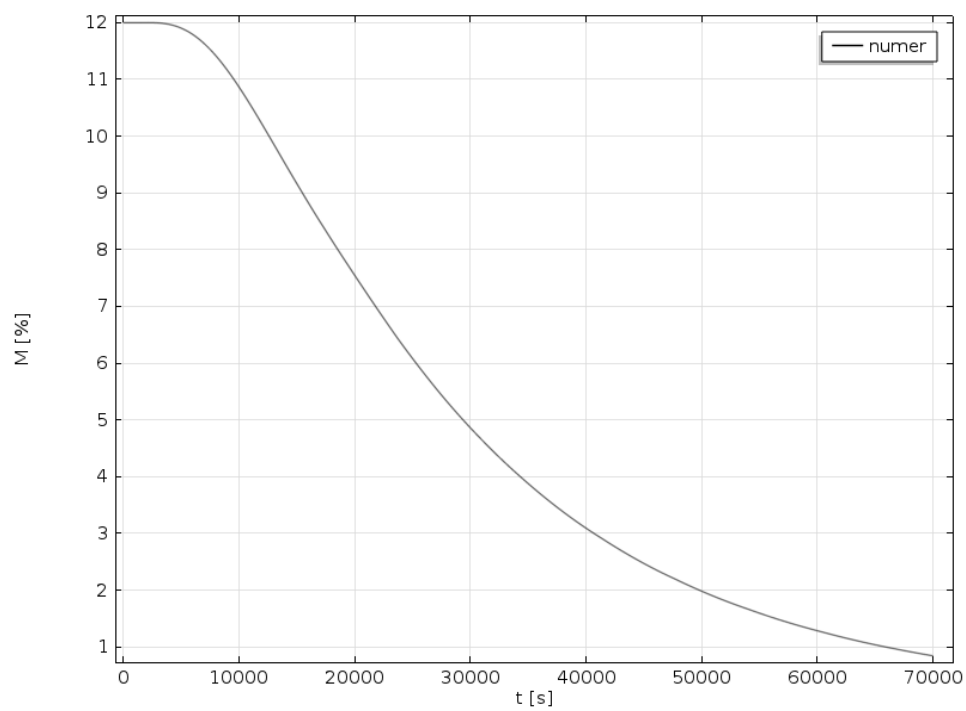


Figure III.4 : l'évaluation de température et teneur en humidité $T_g=220^\circ\text{C}$ (finale) avec une augmentation de 10°C/h et $M_0=12\%$ (Younsi.R et al 2006) [16].



(a)



(b)

Figure III.5 : l'évolution de la température et le teneur en l'eau pour le modèle avec les mêmes paramètres.

Un bon accord a été observé pour les conditions de traitement utilisées. Les différences observées entre les données du modèle et les valeurs expérimentales peuvent être expliquées par dégagement des composants extractibles et des réactions chimiques telles que la décomposition de l'hémicellulose des polymères hydrosolubles qui sont négligés par le modèle.

III.10 Conclusion

L'avantage du modèle proposé est la résolution simultanée du couplage thermo hydrique dans le bois. Les phénomènes de transfert dans le bois sont traités selon les directions (longitudinale, radiale et tangentielle) en utilisant le modèle de Luikov. L'interface entre le gaz et le bois relie ceux-ci à partir des conditions aux limites.

Après avoir posé toutes ces équations ainsi que les conditions aux limites appropriées, nous avons procédé à la modélisation du problème en utilisant le logiciel COMSOL. Le code numérique étant validé avec succès, nous procédons par la suite à une série de simulations numériques pour dégager l'influences des paramètres physiques caractérisant le problème à savoir: l'effet de la vitesse de chauffage, la taille de la pièce de bois et d'autres paramètres sur le profil de température et d'humidité.

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1 Introduction

Durant le traitement thermique du bois à hautes températures, il est important de connaître l'évolution temporelle de la teneur en humidité et de la température. Ces informations peuvent être employées pour ajuster les paramètres de traitement et par conséquent, commander plus efficacement la qualité du produit final. Le modèle mathématique utilisé lors de cette étude prévoit avec succès ces profils. Dans ce chapitre, nous allons exploiter le code de calcul en faisant varier les différents paramètres caractéristiques du traitement thermique du bois à haute température.

Pour nos simulations, nous avons opté l'augmentation de la température illustrée sur la figure IV.1. Qui est très facile à reproduire expérimentalement et qui est proche de la réalité des procédés industriels de torréfaction du bois. Les dimensions de la pièce de bois sont $0.05 \times 0.05 \times 0.4 \text{ m}^3$. Initialement, le bois est supposé être à une température initiale de 25°C et une humidité initiale de 12%

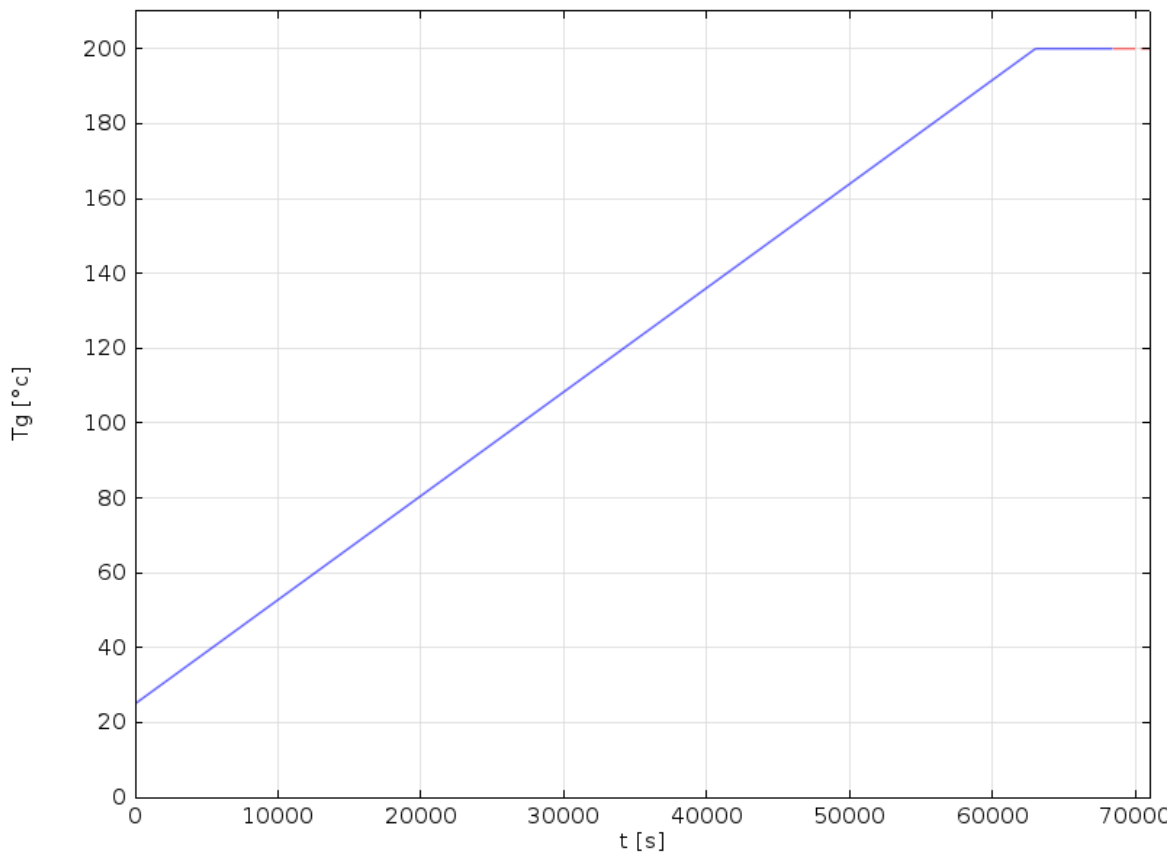


Figure IV.1 : courbe présente l'augmentation de la température de gaz.

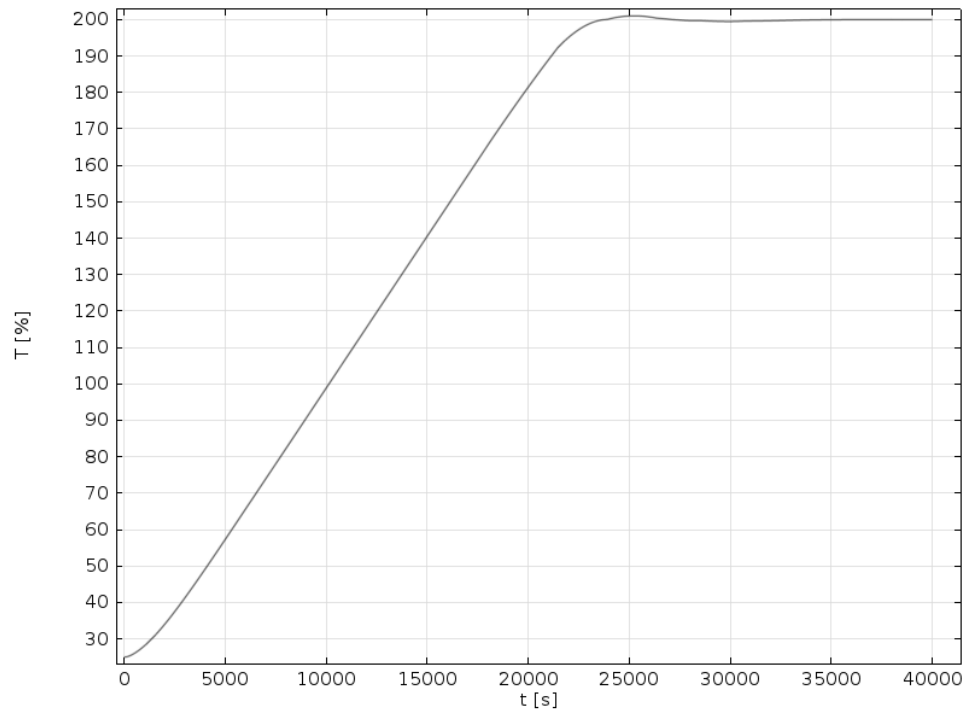
IV.2 Interprétation des résultats

IV2.1 L'évolution temporelle de la température et de la teneur moyenne en humidité

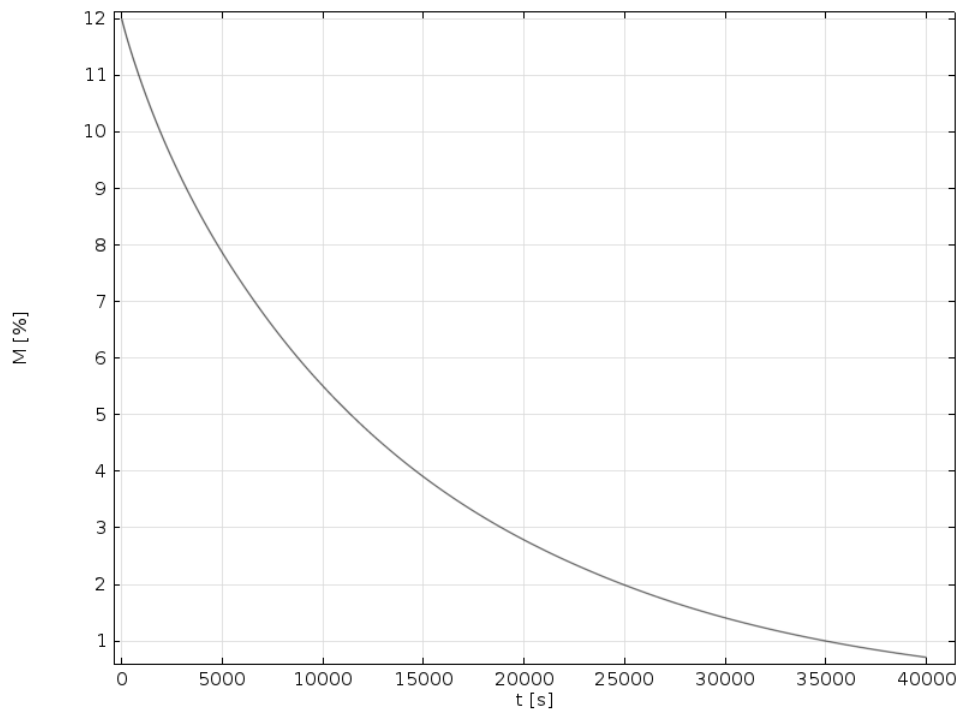
La figure IV.2 illustre l'évolution temporelle de la température et la teneur en eau moyenne durant le traitement thermique pour une température finale du gaz de 200 avec une vitesse de chauffage de 10°C/h et une humidité initiale de $M_0=12\%$. Les autres paramètres sont maintenus constants. Pendant le traitement thermique du bois l'évolution temporelle de la température et de la teneur moyenne en humidité est presque linéaire. Cela est dû à l'influence de la température du gaz qui augmente linéairement avec le temps. La chaleur produite est utilisée à la fois pour évaporer l'humidité et pour chauffer le bois

La température du bois affecte aussi bien les coefficients internes de transfert d'humidité que la quantité d'humidité d'équilibre sur la surface.

L'eau migre vers la surface externe du bois par écoulement capillaire sous l'influence d'un gradient d'humidité. La teneur moyenne en humidité tend vers zéro à la fin du traitement.



(a)



(b)

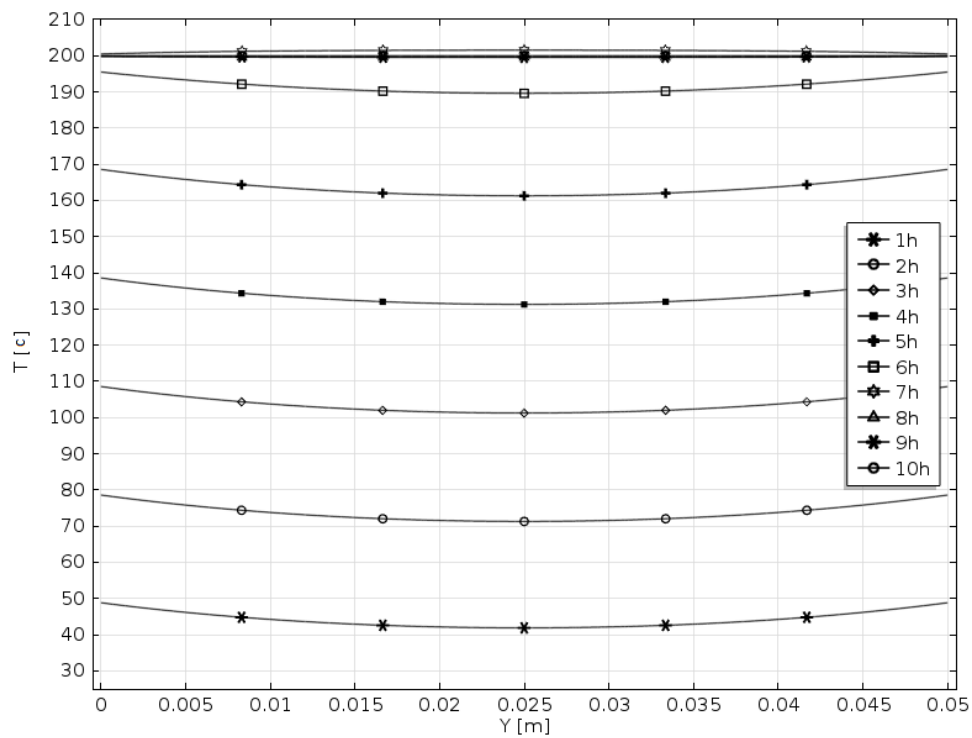
Figure IV.2 : Evolution globale de la température et de la teneur en humidité
Pour taux chauffage 10°C/h

IV2.2 L'évolution temporelle de la température et de la teneur moyenne en humidité a différentes position

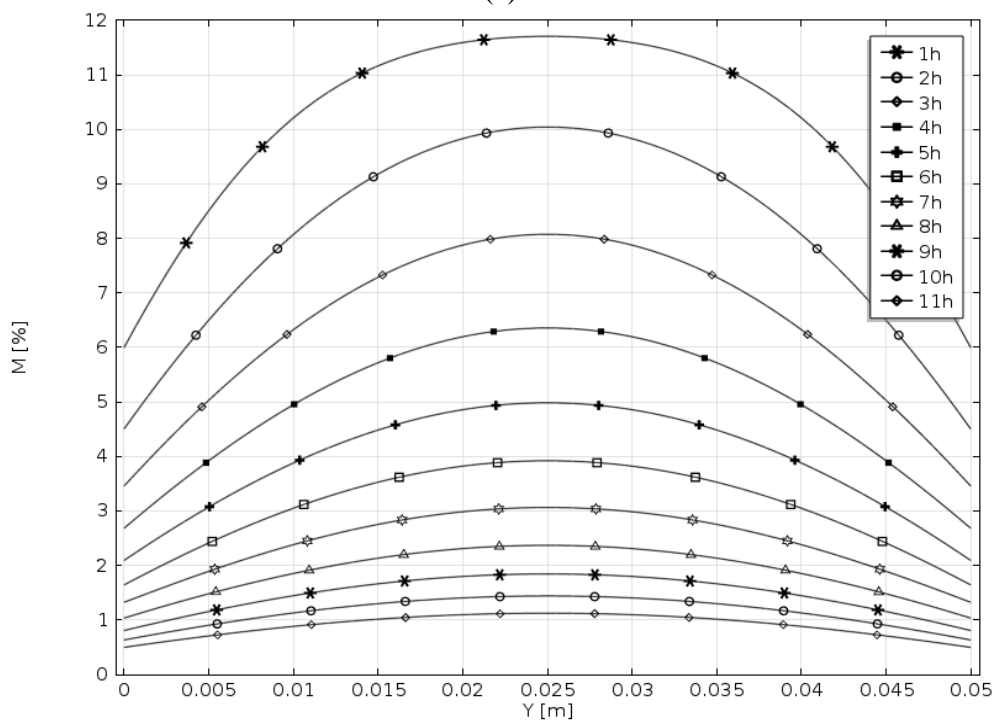
La distribution dans La direction transversale à mi-hauteur $Z=0.025m$ de la température et de la teneur en humidité x est présentée sur la figure IV3. La vitesse de chauffage a été fixée à $10^{\circ}c/h$ et la teneur en humidité initiale de l'échantillon était de 12%.

A une position donnée dans le bois, la température augmente et la teneur en humidité diminue avec le temps. Les profils de température prouvent que les températures à la surface sont légèrement plus élevées que ceux à l'intérieur du bois à différents temps. Le gaz étant la source de chaleur, il est en contact avec le bois en surface. Comme la valeur de la conductivité thermique du bois est relativement faible, la chaleur est transférée lentement dans le bois à partir de la surface vers le centre. Le gradient d'humidité à la surface est très élevé au début du traitement, puis il diminue avec le temps.

L'élimination de l'humidité commence à la surface quand le gaz chaud et le bois sont mis en contact. Une fois que l'humidité à la surface est éliminée, celle du centre (qui se trouve sous forme liquide ou vapeur selon la température) doit se répandre vers la surface sous forme d'un gradient, par conséquent, ce gradient d'humidité est très élevé aux deux extrémités et il est plat à l'intérieur de l'échantillon sur sa longueur. En avançant dans le temps différence entre la teneur en humidité sur la surface et à l'intérieur de échantillon diminue. Comme prévu. Tous les profils sont symétriques puisque toutes les surfaces externes des échantillons sont soumises aux mêmes conditions aux limites.



(a)



(b)

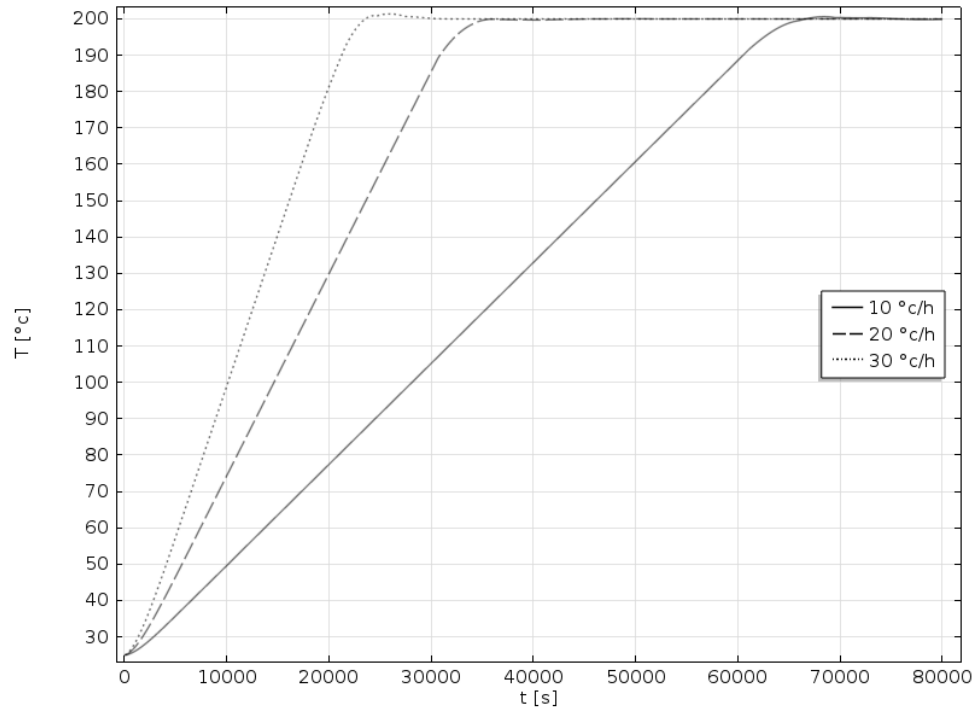
Figure IV.3 : Profil transversal de la teneur en humidité (b) et de la température (a) durant le traitement thermique.

IV.2.3 Influence de la vitesse de chauffage sur les profils de la température et d'humidité

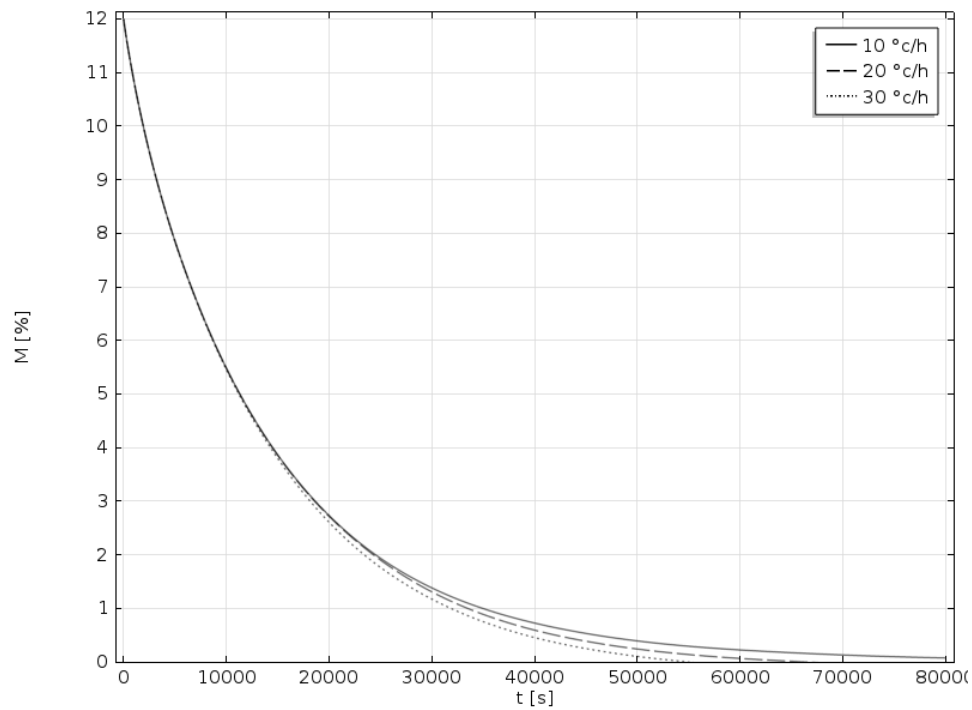
Afin d'évaluer l'effet de la vitesse de chauffage sur les profils de température et d'humidité, nous avons procédé à quatre séries de simulation dont lesquelles la vitesse de chauffage est modifiée et les autres paramètres sont maintenus constants

La figure IV.4a et 4b montre l'évolution temporelle de la teneur moyenne en humidité et de la température de l'échantillon du bois pour différentes valeurs de vitesse de chauffage du gaz (10°C/h, 20°C/h et 30°C/h). On constate que si la vitesse de chauffage augmente, la température du bois augmente plus rapidement. Cependant, la différence entre les températures du bois à un temps donné est plus prononcée entre la vitesse de chauffage du gaz 10°C/h et 20°C/h comparé à celle entre 20°C/h et 30°C/h. Quand la température du gaz augmente rapidement, la chaleur ne peut être transférée aussi rapidement vers le centre de l'échantillon. Par contre, si le gaz est chauffé lentement (vitesse de chauffage moins élevée), il y aurait assez de temps pour que la chaleur soit transférer aux parties intérieures du bois.

Les résultats prouvent que la teneur en humidité est très sensible à la vitesse de chauffage. D'après le graphe IV.4. (a), on peut voir que pour un temps donné, plus la vitesse de chauffage est élevée, plus la teneur moyenne en humidité du bois est faible. Cependant, on doit garder à l'esprit que le bois n'est pas à la même température à un moment donné pour les différentes valeurs de la vitesse de chauffage. A la vitesse de chauffage de 10°C/h la teneur moyenne en humidité du bois est presque nulle au bout d'un temps de 8×10^4 s ce qui correspond à une température de 200°C. Pour des vitesses de chauffage relativement plus élevées, l'humidité du bois persiste jusqu'à la fin de l'expérience, cette humidité est celle qui se trouve dans la partie intérieure de l'échantillon. Par conséquent, la vitesse de chauffage est l'un des paramètres critiques pour le traitement thermique du bois à haute température.



(a)



(b)

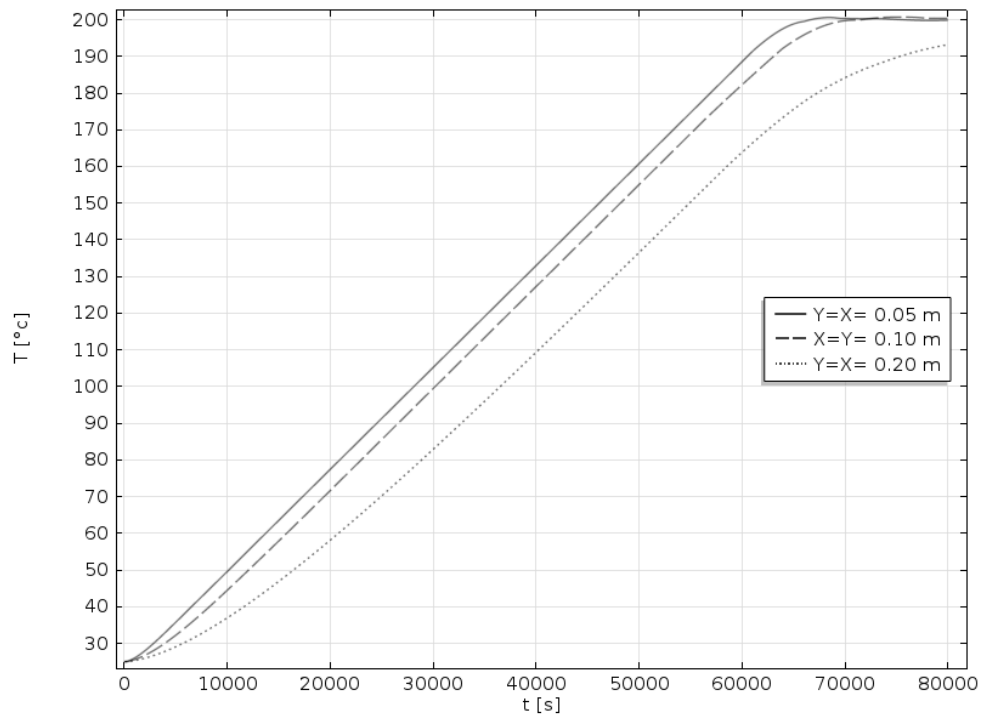
Figure IV.4 : influence de la vitesse de chauffage sur les évolutions de la température (a) et de la teneur en humidité (b)

VI.2.1 Effet de la taille de la pièce sur les profils de la température et d'humidité

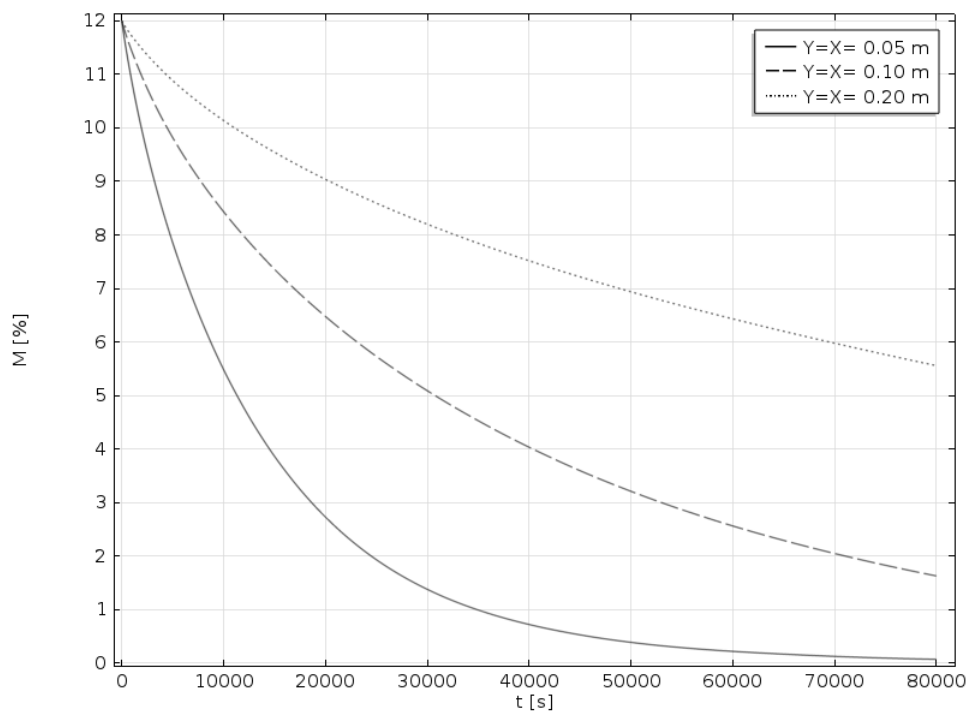
En utilisant le modèle développé, on peut prédire l'évolution temporelle de la température et la distribution locale de la teneur en humidité pour n'importe quelle taille d'échantillon du bois. Des simulations ont été effectuées pour différentes dimensions des échantillons. Pour ces simulations, la longueur de l'échantillon a été gardée constante (1 m). Les rapports des échantillons considérés ont été pris en tant que 0,35, 0,55 et 0,75 (y/x).

La figure IV.5.a comparé les profils de température au centre des échantillons pour différentes dimensions. Comme on peut le constater, la température est plus basse pour le plus grand échantillon et plus élevée pour le plus petit échantillon quel que soit le temps considéré. Au fur et à mesure que la dimension de l'échantillon augmente, la distance que doit parcourir la chaleur avant qu'elle n'atteigne le centre, augmente. Comme la conductivité thermique du bois est très faible, on peut distinguer l'écart entre les profils de température.

L'évolution temporelle de la teneur moyenne en humidité pour les trois échantillons est représentée sur la figure IV.5.b. La diminution de la teneur moyenne en humidité devient beaucoup plus rapide quand les dimensions de l'échantillon diminuent. Afin d'éliminer l'humidité de l'échantillon qui se trouve dans la partie intérieure de l'échantillon, celle-ci doit migrer à la surface. L'humidité éliminée à la surface du bois est alors emportée par le gaz. Quand les dimensions de l'échantillon augmentent, le procédé de diffusion s'effectue plus lentement. Dans les mêmes conditions de traitement thermique, les échantillons peuvent être amenés à des différentes teneurs d'humidité finale. Par conséquent, la taille de l'échantillon doit être considérée quand le programme de traitement est préparé. Le modèle développé peut donner une très bonne évaluation du temps requis pour le traitement d'un échantillon de bois avec n'importe quelle taille et forme. Ceci nous permet de bien cédule le début de traitement (matin ou soir).



(a)



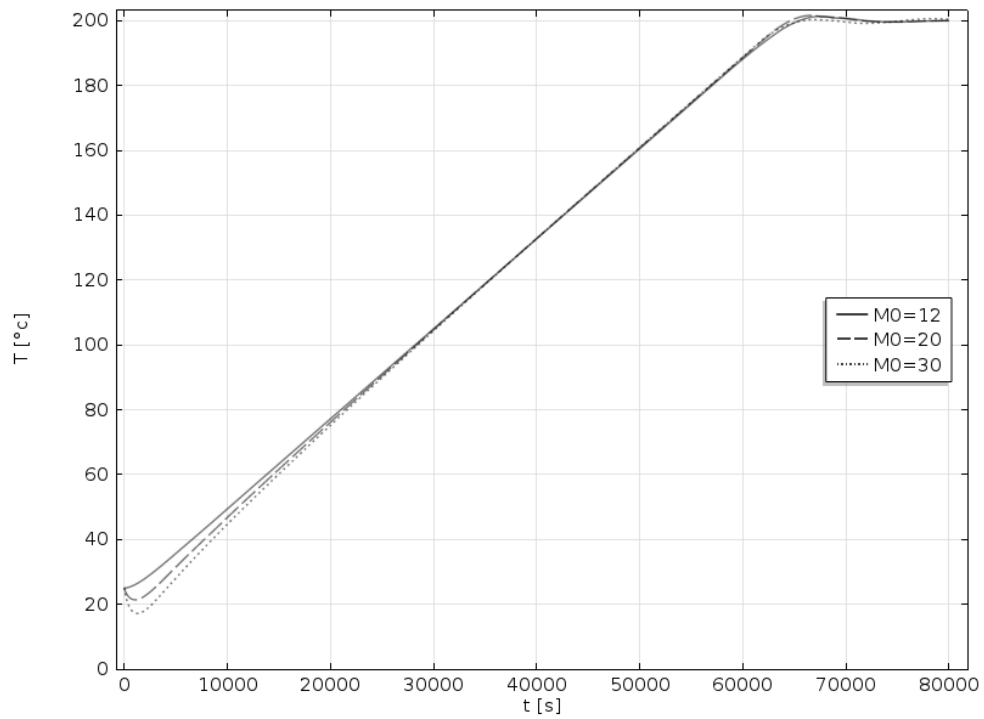
(b)

Figure IV.5 : influence de la vitesse de chauffage sur les évolutions de la température (a) et teneur en humidité (b)

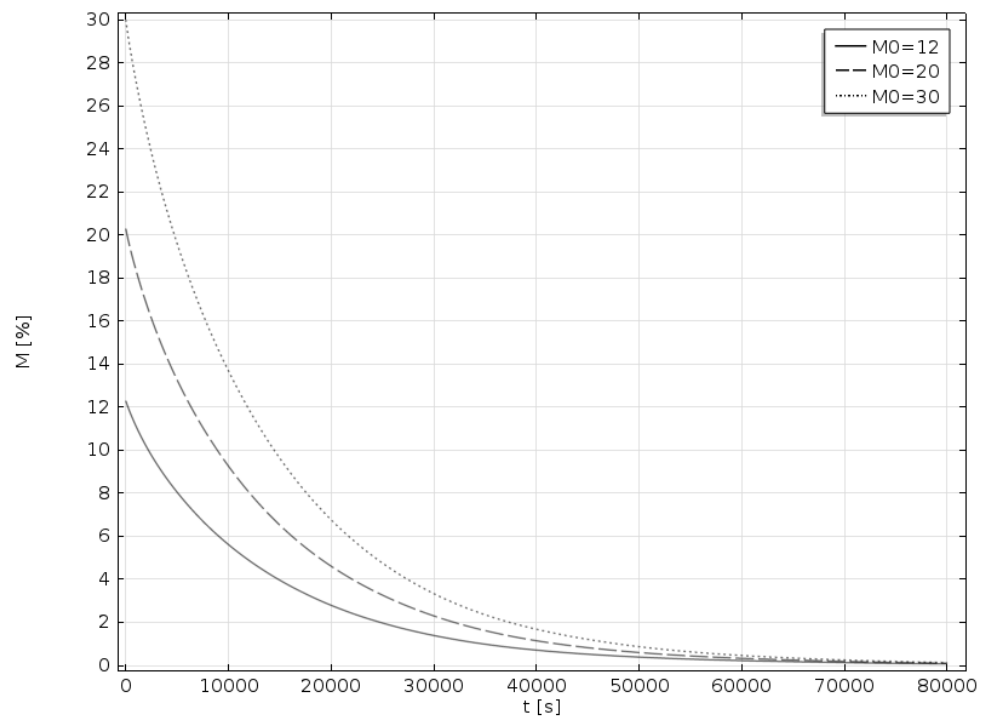
IV.2.5 Influence du taux d'humidité initiale du bois sur les profils de la température et d'humidité

Les simulations ont été effectuées pour différentes teneurs moyennes initiales en humidité M_0 (12%, 20% et 30%) et une vitesse de chauffage de 10.Ch. La température finale de gaz a été prise égale à 220°C. L'influence de la teneur moyenne initiale en humidité du bois sur la teneur moyenne en humidité et la température au cours du temps est présentée sur la figure IV.6A et 6B. La teneur moyenne en humidité diminue avec le temps. Comme prévu, le temps nécessaire pour l'élimination d'humidité est plus grand si la teneur initiale en humidité de l'échantillon est plus élevée quand les autres paramètres du traitement sont maintenus constants.

On peut voir aussi qu'il existe une légère différence entre les profils de températures des échantillons: plus la teneur en humidité initiale de l'échantillon est faible, plus élevée est la température. Évidemment, la vaporisation a un effet de refroidissement. Puisque l'humidité du gaz est constante, la teneur initial d'humidité élevée signifie que le gradient d'humidité est plus élevé sur la surface. Par conséquent, le taux de vaporisation sur la surface sera plus élevé pour l'échantillon avec une teneur en humidité élevée ce qui mène à des températures plus faible.



(a)



(b)

Figure IV.6 : Influence du taux d'humidité initiale du bois sur les évolutions de la température (a) et d'humidité (b).

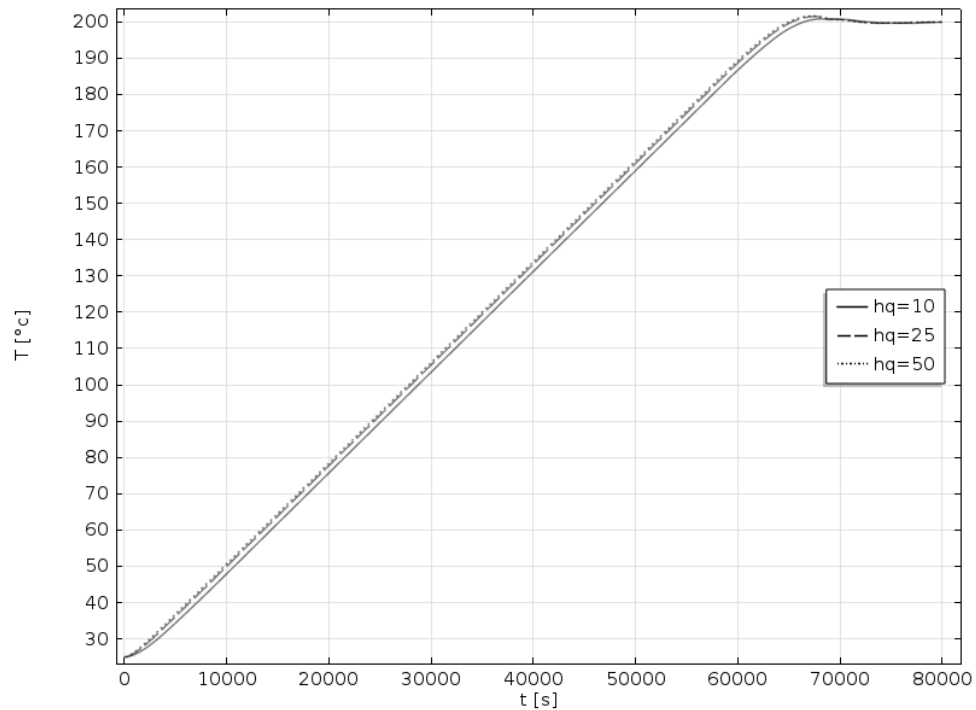
IV.2.6 Effet des coefficients de transfert de chaleur h_q et de masse h_m sur les profils de la température et d'humidité

Afin d'analyser l'effet des coefficients de transfert de chaleur et de masse sur les profils de température et d'humidité, un certain nombre de simulations ont été effectuées pour différentes valeurs de h_q et h_m . Ces coefficients sont directement liés à la vitesse de l'écoulement. Les autres paramètres ont été maintenus constants, à savoir vitesse de chauffage 10°C/h et température finale de gaz 200°C .

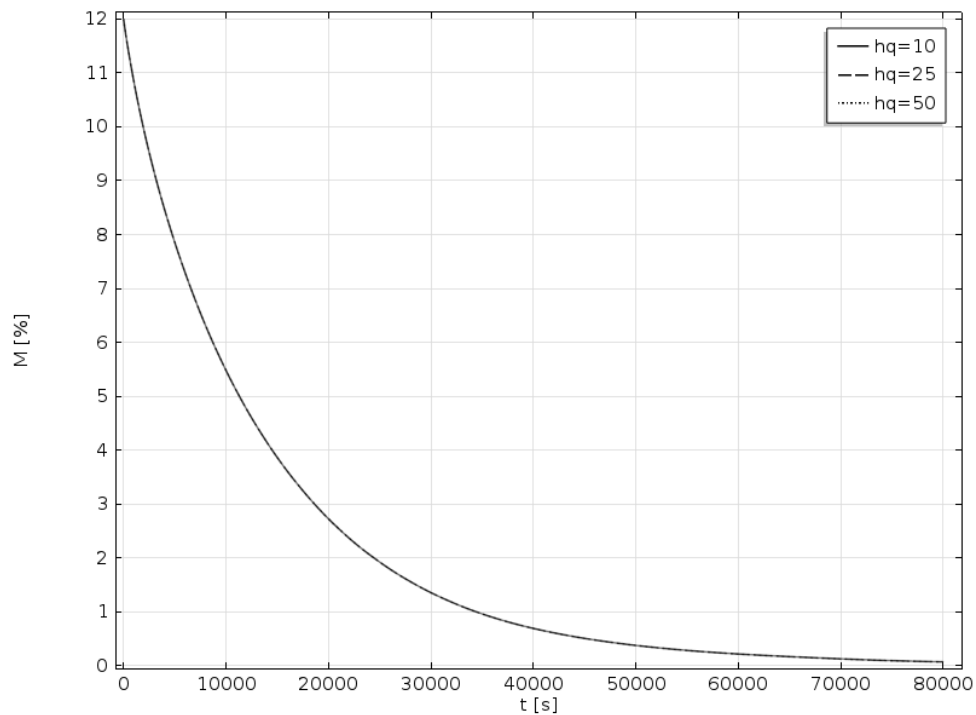
Pendant le traitement thermique, le bois est chauffé par un gaz chaud. La chaleur est transférée du gaz à la surface du bois par convection (équivalent à $h_q \Delta T$). Par la suite cette chaleur est transférée dans le bois par conduction. De même pour le transfert de masse, l'humidité doit être transférée par diffusion moléculaire de l'intérieure à la surface du bois et qu'elle doit être éliminée de la surface par transfert de masse convectif (équivalent à $h_m \Delta M$).

Dans les sections précédentes, la plupart du temps, l'effet de la conductivité thermique du bois a été ignoré puisqu'elle est très faible et que le bois est considéré comme étant un très bon isolant. Alors, la résistance au transfert thermique est considérablement plus grande à l'intérieur du bois que du côté du gaz. Le modèle que nous proposons tient compte de cet effet. Cependant, si la vitesse du gaz est modifiée, ceci peut affecter le coefficient de transfert de chaleur et de masse. La figure IV.7a 7b illustre l'effet de ce coefficient sur la teneur moyenne en humidité et de la température du bois. Au fur et à mesure que le coefficient de transfert de chaleur augmente, la température du bois augmente car il y a plus de chaleur transférée à partir du gaz vers la surface du bois.

Cependant, la différence entre les courbes de la température n'est pas très significative bien que le coefficient de transfert de chaleur soit augmenté six fois. Ceci prouve que comme prévu, la résistance au transfert thermique à l'intérieur du bois est beaucoup plus importante que la résistance du côté du gaz.



(a)



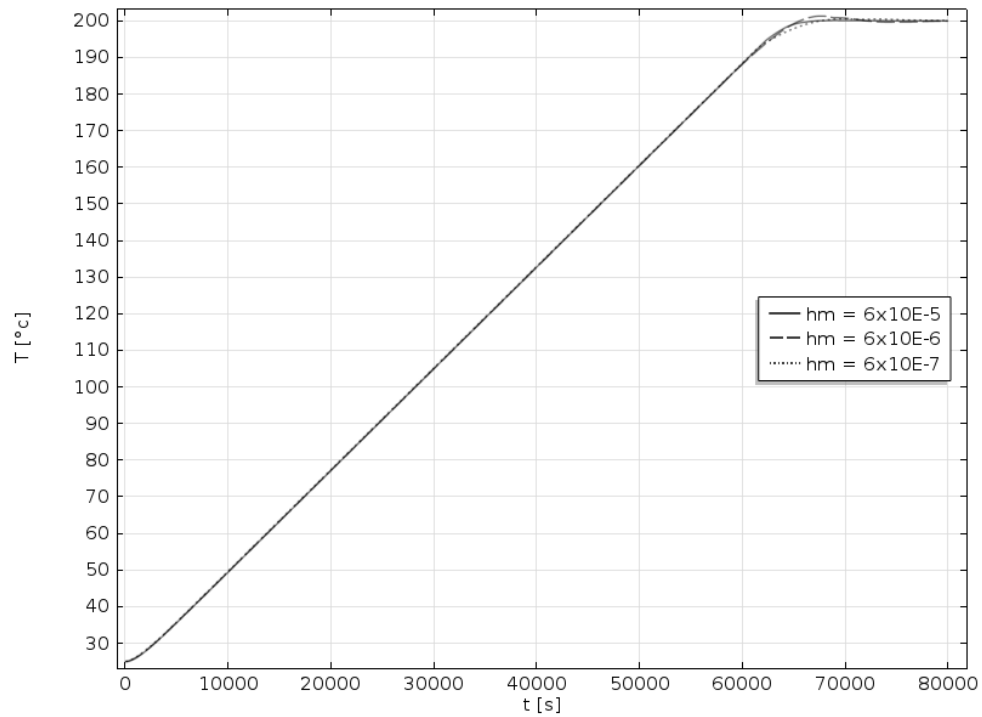
(b)

Figure IV.7 : Effet des coefficients de transfert de chaleur thermique h_q sur les évolutions de la température (a) et d'humidité (b).

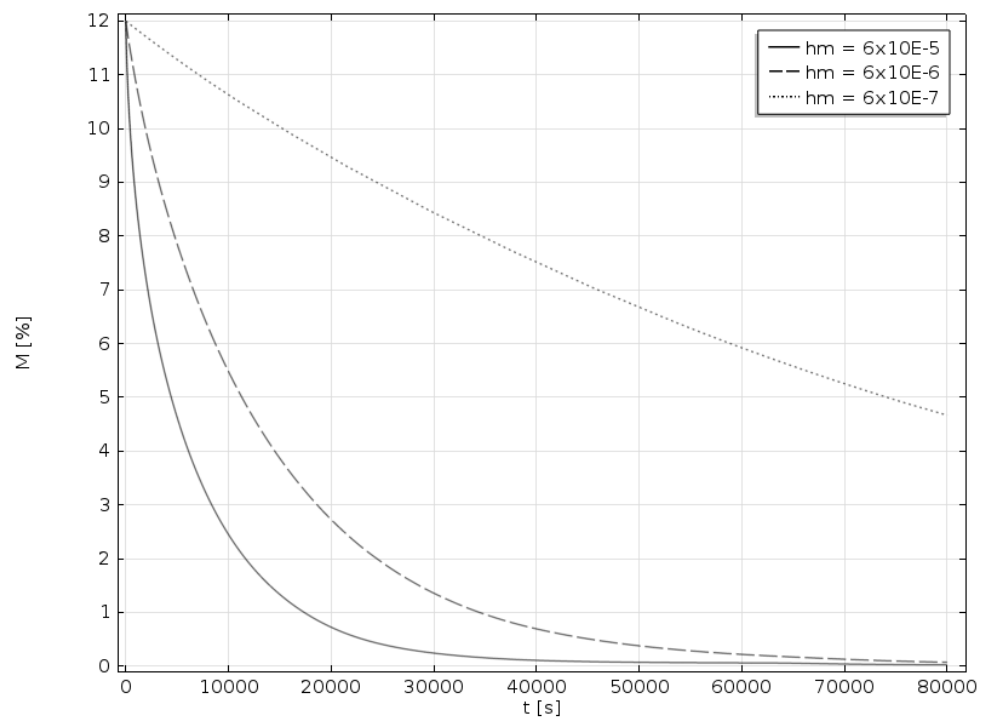
L'effet du coefficient de transfert de masse h_m sur la température et la teneur moyenne en humidité du bois est présenté sur les figures IV8a et 8b. Une fois que l'humidité est transférée à la surface du bois, elle doit être éliminée de la surface et transférée au gaz par convection. Le transfert de masse par convection dépend de l'importance du coefficient de transfert de masse et du gradient d'humidité.

Afin d'éliminer l'humidité, le gradient d'humidité entre la surface du bois et le volume du gaz doit être assez important pour conduire ce procédé de transfert. Si la teneur en humidité du gaz est très élevée et près de la saturation, le gradient sera faible, par conséquent, l'humidité ne peut pas être enlevée. De même, si le coefficient de transfert de masse est faible, le transfert d'humidité de la surface bois sera du très lent. Si ce transfert est lent, le traitement prendra beaucoup plus de temps, ce qui diminue la capacité de production. Par contre, s'il est trop rapide, l'humidité à la surface est enlevée rapidement mais à l'intérieur du bois, l'humidité ne peut pas migrer à la surface aussi rapidement. La différence entre la teneur en humidité extérieur et intérieures dans les pièces de bois devient très grande ce qui peut causer un rétrécissement et durcissement du bois (McCabe, W.I. et al (1985)).

Pour résumer, le taux d'élimination d'humidité de la surface a une influence significative sur le processus. Changer la dimension de l'échantillon ou la vitesse de chauffage du gaz peut affecter l'importance du coefficient de transfert de masse. Par contre, la température du bois n'est pas affectée par l'importance du coefficient de transfert de masse. Cependant, le transfert de masse (élimination d'humidité) est fortement influencé. Plus le coefficient de transfert de masse est élevé, plus le transfert d'humidité est rapide. Des résultats semblables sont rapportés par d'autres chercheurs dans la littérature (Pandy et al. (1999)).



(a)



(b)

Figure IV.8 : Effet des coefficients de transfert massique h_m sur les évolutions de la température (a) et d'humidité (b).

IV.3 Conclusion

Un modèle couplé de transfert de chaleur et de masse a été utilisé en vue d'une meilleure compréhension du traitement thermique du bois à haute température et pour déterminer l'influence de plusieurs paramètres qui caractérisent le processus de traitement thermique du bois à haute température. Cette étude est effectuée en résolvant le modèle tridimensionnel de Luikov dans le bois. Le logiciel de COMSOL a été utilisé pour résoudre le système d'équations différentielles partielles fortement couplées. Ce modèle s'avère un outil important pour la conception de nouveaux fours, et à l'optimisation de leur opération. Les méthodes informatiques peuvent considérablement réduire le temps expérimental très coûteux et améliorer la compréhension du procédé du traitement thermique du bois. Il apparaît de ces simulations que la vitesse de chauffage ainsi que les coefficients d'échanges de chaleur et de masse (implicitement, vitesse de l'écoulement) sont des paramètres clés pour le traitement thermique du bois à haute température.

Conclusion générale et Perspectives

L'objectif principal de cette mémoire était de développer, valider et résoudre un modèle tridimensionnel, couplé de traitement thermique du bois à haute températures.

Pour ce faire, les modèles de transfert de chaleur et de masse ont été soigneusement évalués afin de déterminer l'approche qui caractérise le mieux les phénomènes de transfert de chaleur et de masse dans le bois

Les équations de transfert de chaleur et d'humidité au sein du bois furent élaborées en se basant sur le modèle proposé par Luikov (principe du potentiel de transfert de masse), elles sont traitées selon les directions longitudinale, radiale et tangentielle. Ce modèle est assez puissant pour décrire les phénomènes de transfert simultané de chaleur et de masse dans un milieu poreux.

Le système d'équations différentielles partielles non linéaires obtenu ne peut pas être résolu de façon analytique. Pour cela, nous avons opté pour l'utilisation d'un logiciel (CONSOL Multiphysics) capable de tenir compte de toutes les exigences de notre modèle. Le logiciel utilise une discrétisation par la méthode des éléments finis, son langage de programmation est basé sur Matlab.

La plupart des mètres thermo-physiques du modèle ont été déterminés en utilisant des relations proposées dans la littérature.

Comme pour chaque procédé industriel, il est important de connaître l'évolution des paramètres qui commandent le processus car ces informations peuvent être utilisées pour ajuster et commander plus efficacement la qualité du produit final. Le travail effectué lors de cette mémoire nous a permis de souligner, dans l'ensemble l'importance de la vitesse de chauffage, de la taille de l'échantillon de bois, de la teneur moyenne initiale en humidité de la pièce de bois et les coefficients de transfert de chaleur et de masse, paramètres auxquels le modèle est très sensible. Grâce à ce modèle mathématique, on peut prévoir adéquatement, les profils de la teneur en humidité et de la température d'un échantillon de bois pendant le traitement thermique. De plus, ce modèle peut être utilisé pour l'optimisation et la conception de nouveaux fours.

Les méthodes informatiques peuvent considérablement réduire le temps expérimental très coûteux et améliorer la compréhension du procédé du traitement thermique du bois.

Perspectives

Les résultats obtenus pour la simulation numérique des phénomènes de transfert de masse et de chaleur lors du traitement thermique du bois à haute température sont très prometteurs, mais il serait intéressant d'élargir le champ d'investigation. Pour cela, les perspectives suivantes sont proposées :

- Réaliser un four prototype et effectuer des essais expérimentaux afin de les comparer aux résultats par la simulation, pour plusieurs essences du bois.
- Réaliser d'autres essais mécaniques (dureté, compression, fatigue....) pour analyser l'influence des conditions de traitement sur la qualité du produit final.

Références bibliographiques

Alén, R., Kotilainen Zaman, R. A. (2002). Thermochemical behavior of Norway spruce (*picea abies*) at 180-225°C *Wood Science and Technology* 36,163-171.

Bories, S.A., *Fundamentals of Drying of Capillary-Porous Bodies (Convective heat and mass transfer in porous media, S. Kakac, B. Kilic, F.A. Kulacki, F. Arinc)* Dordrecht The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1991.

Whitaker, S., Simultaneous Heat, Mass and Momentum Transfer in Porous Media: a Theory of Drying, *Advances in Heat Transfer*, 13(1977), pp. 119–203.

Younsi, R., Kocaefe, D., Kocaefe, Y., Three-Dimensional Simulation of Heat and Moisture Transfer in Wood, *Applied Thermal Engineering*, 26(2006), 11-12, pp. 274–85.

Younsi, R., Kocaefe D., Poncsak, S., Kocaefe, Y. Computational and Experimental Analysis of High Temperature Thermal Treatment of Wood Based on ThermoWood Technology, *Int. Comm. in Heat and Mass Transfer*, 13(2010), 1, pp. 21-28

Kocaefe, D., Younsi, R., Poncsak, S., Kocaefe, Y. Comparison of Different Models for the High-Temperature Heat-Treatment of Wood, *Int. J. of Thermal Sciences.*, 46(2007), pp.707–716.

Simpson, W., Tenwold, A. Physical Properties and Moisture Relations of Wood, (in *Wood Handbook*), USDA Forest service, forest product laboratory, Wisconsin, US, 1999.

Siau, J.F., *Transport Processes in Wood*, New York, Springer-Verlag, 1984.

Leon. G., Cruz-de-Leon, J., Villasenor, L., Thermal Characterization of Pine Wood by

Stanish, M.A., Schajer, G.S., Kayihan, F. A., Mathematical Model of Drying for Hygroscopic Porous Media, *American Institute of Chemical Engineering*, 32(1986), 8 , pp. 1301-311.

Comsol, Femlab AB. Version 2.0, Reference Manual, 2000.

Afet Aysegul Osma, Duygu Kocaefe 2008 Mathematical modelling of an industrial furnace for high-temperature heat treatment of wood

Karamanos A, Hاديarakou S, Papadopoulos AM. The impact of temperature and moisture on the thermal performance of stone wool. *Energy Build* 2008;40:1402 - 11.

P. Perre, I.W. Turner, The use of numerical simulation as a cognitive tool for studying the microwave drying of softwood in an over-sized waveguide, *Wood Science and Technology* 33 (1999) 445–446.