



BIBLIOTHÈQUE

CÉGEP DE L'ABITIBI-TÉMISCAMINGUE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans [Depositum](#), site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous. L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) obtained the permission of the author to use a copy of this document for nonprofit purposes in order to put it in the open archives [Depositum](#), which is free and accessible to all. The author retains ownership of the copyright on this document.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

**CARACTÉRISATION NUMÉRIQUE ET ANISOTROPE DU TEMPS
DE DÉGEL DU BOIS PAR LA MÉTHODE HYBRIDE DES ÉLÉMENTS
FINIS 3D**

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

Nesrine AMORRI

FÉVRIER 2021

Résumé

Le bois est un matériau fortement anisotrope, thermiquement et mécaniquement, et son utilisation dans des applications industrielles nécessite, généralement, un séchage efficace qui tient compte des conditions environnementales. C'est dans ce cadre que le projet est orienté et il concerne la caractérisation numérique du temps de dégel de quatre essences du bois canadiens (Peuplier faux-tremble; Bouleau blanc ; Bouleau jaune ; Érables à sucre). Pour cela, une approche physique 3D basée sur le nouveau concept d'enthalpie hybride est utilisée. Les propriétés thermo-physiques du bois sont fonction de l'orientation structurelle, de la température et de l'humidité. La température initiale du bois gelé est considérée constante ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) et la température visée par le chauffage est $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Des simulations numériques effectuées sur le code ThermoForm, après des validations effectuées par Abaqus, ont permis d'approuver les résultats obtenus par rapport aux résultats expérimentaux issus de la littérature. Les résultats obtenus ont, également, révélé que le temps de dégel diminue lorsque la densité augmente et qu'il augmente lorsque la teneur en humidité augmente.

MOTS CLES: Bois canadien, Enthalpie hybride, Convection thermique, Méthode d'élément fini.

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je tiens à remercier le M. Fouad Erchiqui, professeur et directeur du doctorat en ingénierie à l'Université de Québec en Abitibi Témiscamingue et directeur de ce mémoire, pour l'aide qu'il a fourni et les connaissances qu'il a su me transmettre. Je le remercie également pour sa disponibilité et la qualité de ses conseils.

J'adresse mes remerciements les plus sincères au corps professoral et administratif de l'Université du Québec en Abitibi Témiscamingue, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers mes amis et collègues qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

Un grand merci à ma mère et mon père, pour leur amour, leurs conseils ainsi que leur soutien inconditionnel, à la fois moral et économique, qui m'a permis de réaliser les études que je voulais et par conséquent ce mémoire.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Table des matières

1	INTRODUCTION ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE BOIS ET LE CHAUFFAGE DU BOIS	14
1.1	MATÉRIAU BOIS ET APPLICATIONS.....	14
1.2	CHAUFFAGE DU BOIS	19
1.2.1	<i>Chauffage par convection</i>	19
1.2.2	<i>Chauffage par micro-ondes</i>	20
1.2.3	<i>Chauffage par radiofréquence</i>	21
1.2.4	<i>Chauffage par rayonnement infrarouge</i>	22
1.2.5	<i>Chauffage par température imposée</i>	23
1.3	ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	24
1.4	SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE ET ORIGINALITÉ DU PROJET PROPOSÉ.....	27
1.4.1	<i>Originalité</i>	27
1.4.2	<i>Objectif général</i>	28
1.4.3	<i>Objectifs spécifiques</i>	28
1.4.4	<i>Propriétés des essences de bois canadien étudiés</i>	29
1.5	MÉTHODOLOGIE	32
2	DÉVELOPPEMENT THÉORIQUE ET MISE EN ÉQUATIONS	33
2.1	MILIEU CONTINU ISOTROPE	33
2.1.1	<i>Transfert de chaleur avec changement de phase</i>	33

2.1.2	<i>Enthalpie volumique et équation d'énergie</i>	35
2.1.3	<i>Formulation intégrale faible l'équation d'énergie</i>	37
2.1.4	<i>Discretisation spatiale :</i>	37
2.1.5	<i>Discretisation temporelle</i>	39
2.2	MILIEU CONTINU ANISOTROPE	40
2.2.1	<i>Équation d'énergie anisotrope en terme enthalpique</i>	40
2.2.2	<i>Équation anisotrope d'énergie en terme enthalpique hybride</i>	42
2.2.3	<i>Formulation par éléments finis de l'équation anisotrope d'énergie</i>	45
2.2.4	<i>Validation numérique et expérimentale</i>	46
2.2.5	<i>Validation numérique pour le cas d'une essence du bois Canadien</i>	51
3	RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS	56
3.1	CARACTÉRISATION DU TEMPS DE CHAUFFAGE DES ESSENCES DU BOIS GELÉ	57
3.1.1	<i>Effet de la teneur en humidité (MC) sur le dégel du bois :</i>	68
3.1.2	<i>Effet de la teneur en humidité (MC) sur le chauffage du bois à 0°C</i>	72
3.1.3	<i>Temps de dégel et de chauffage des différentes essences du bois</i>	77
3.1.4	<i>Courbes de tendances : effet de MC sur le dégel du bois</i>	78
3.1.5	<i>Courbes de tendances: effet de MC sur la chauffe du bois à 0°C</i>	80
4	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS :	81
4.1	CONCLUSION :	81

4.2	PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS :	82
5	RÉFÉRENCES.....	83
6	ANNEXE A: CARACTÉRISTIQUES THERMO-PHYSIQUES DES MATÉRIAUX.....	88

Tables des figures

FIGURE 1. ILLUSTRATION D'UN ARBRE COUPÉ À DIFFÉRENTS GROSSISSEMENTS (WOOD HANDBOOK, 2010)	15
FIGURE 2. STRUCTURE DU BOIS RÉSINEUX	16
FIGURE 3. STRUCTURE DU BOIS FEUILLUS	16
FIGURE 4. BOIS ET ORIENTATION DES FIBRES	17
FIGURE 5. VARIATION DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE ET DE LA CHALEUR SPÉCIFIQUE AVEC LA TEMPÉRATURE	17
FIGURE 6. : EXEMPLE DES PROPRIÉTÉS DIÉLECTRIQUES DU BOIS (SAPIN DE DOUGLAS)	18
FIGURE 7. EXEMPLE D'UTILISATION DU BOIS	18
FIGURE 8. CHAUFFAGE PAR CONVECTION	19
FIGURE 9. DÉCOMPOSITION DE L'ONDE EN ONDE RÉFLÉCHIE, TRANSMISE ET ABSORBÉE	20
FIGURE 10. CHAUFFAGE PAR EFFET DIÉLECTRIQUE	22
FIGURE 11. POLARISATION DE LA MOLÉCULE D'EAU	22
FIGURE 12. CHAUFFAGE PAR INFRAROUGE – RAYONNEMENT INFRAROUGE	23
FIGURE 13. CHAUFFAGE PAR TEMPÉRATURE IMPOSÉE – SURFACE EN MOUVEMENT	24
FIGURE 14. PRÉSENTATION D'UN VECTEUR EN SYSTÈME CYLINDRIQUE VIS-À-VIS D'UN SYSTÈME CARTÉSIEN	45

FIGURE 15. ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE DANS LE TEMPS DANS LE TRONC D'ARBRE PAR ABAQUS POUR DEUX TYPES DE MAILLAGES	47
FIGURE 16. TEMPÉRATURE (°C) AU CENTRE DU TRONC DE L'ARBRE – MAILLAGE RAFFINÉ (À GAUCHE) ET MAILLAGE NON RAFFINÉ (À DROITE)	47
FIGURE 17. TEMPÉRATURE (°C) VS TEMPS (S) POUR TROIS DIFFÉRENTES POSITIONS DANS LE TRONC D'ARBRE	48
FIGURE 18. VALIDATION DES TRAVAUX DE (ERCHIQUI, 2015) PAR ABAQUS.	48
FIGURE 19. MAILLAGE CYLINDRIQUE (3D)	49
FIGURE 20. TEMPÉRATURE EXPÉRIMENTALE ET NUMÉRIQUE EN FONCTION DU TEMPS DE CHAUFFAGE POUR TROIS POINTS DIFFÉRENTS SITUÉS À LA SURFACE D'UNE GRUME DE PIN BLANC.	50
FIGURE 21. VALIDATION DES TRAVAUX DE (PERALTA, 2006), THERMOFORM ET D'ABAQUS	51
FIGURE 22. MAILLAGE DU TRONC D'ARBRE NON RAFFINÉ	53
FIGURE 23. MAILLAGE DU TRONC D'ARBRE RAFFINÉ	53
FIGURE 24. EVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE POUR DIFFERENTES POSITIONS DANS L'ARBRE (CHAUFFAGE JUSQU'À 55°C)	54
FIGURE 25. DISTRIBUTION DE LA TEMPÉRATURE DANS LE TRONC D'ARBRE (CHAUFFAGE JUSQU'À 55°C)	54
FIGURE 26. MAILLAGE DE LA GÉOMÉTRIE	56
FIGURE 27. EFFET DE MC SUR LE DÉGEL ET LE CHAUFFAGE DU PEUPLIER FAUX TREMBLE	57
FIGURE 28. EFFET DE MC SUR LE DÉGEL ET LE CHAUFFAGE DU BOULEAU BLANC	58

FIGURE 29. EFFET DE MC SUR LE DÉGEL ET LE CHAUFFAGE DU BOULEAU JAUNE	58
FIGURE 30. EFFET DE MC SUR LE DÉGEL ET LE CHAUFFAGE DE L'ÉRABLE À SUCRE	59
FIGURE 31. EFFET DE MC= 35% SUR LES ESSENCES DU BOIS POUR T=1H	60
FIGURE 32. EFFET DE MC= 35% SUR LES ESSENCES DU BOIS POUR T=6H	61
FIGURE 33. EFFET DE MC= 35% SUR LES ESSENCES DU BOIS POUR T=12H	62
FIGURE 34. EFFET DE MC= 35% SUR LES ESSENCES DU BOIS POUR T=18H	63
FIGURE 35. EFFET DE MC= 35% SUR LES ESSENCES DU BOIS POUR T=18H	64
FIGURE 36. EFFET DE MC= 100% SUR LES ESSENCES DU BOIS POUR T=6H	65
FIGURE 37. EFFET DE MC= 100% SUR LES ESSENCES DU BOIS POUR T=12H	66
FIGURE 38. EFFET DE MC= 100% SUR LES ESSENCES DU BOIS POUR T=18H	67
FIGURE 39. EFFET DE MC SUR LE DÉGEL DU PEUPLIER FAUX TREMBLE	68
FIGURE 40. TEMPS DU DÉGEL DU PEUPLIER FAUX TREMBLE EN FONCTION DU MC	69
FIGURE 41. EFFET DE MC SUR LE DÉGEL DU BOULEAU BLANC	69
FIGURE 42. TEMPS DU DÉGEL DU BOULEAU BLANC EN FONCTION DU MC	70
FIGURE 43. EFFET DE MC SUR LE DÉGEL DU BOULEAU JAUNE	70
FIGURE 44. TEMPS DU DÉGEL DU BOULEAU JAUNE EN FONCTION DU MC	71
FIGURE 45. EFFET DE MC SUR LE DÉGEL DE L'ÉRABLE À SUCRE	71
FIGURE 46. TEMPS DU DÉGEL DE L'ÉRABLE À SUCRE EN FONCTION DU MC	72

FIGURE 47. EFFET DE MC SUR LE CHAUFFAGE DU PEUPLIER FAUX TREMBLE	73
FIGURE 48. TEMPS DU CHAUFFAGE DU PEUPLIER FAUX TREMBLE EN FONCTION DU MC	74
FIGURE 49. EFFET DE MC SUR LE CHAUFFAGE DU BOULEAU BLANC	74
FIGURE 50. TEMPS DU CHAUFFAGE DU BOULEAU BLANC EN FONCTION DU MC	75
FIGURE 51. EFFET DE MC SUR LE CHAUFFAGE DU BOULEAU JAUNE	75
FIGURE 52. TEMPS DU CHAUFFAGE DU BOULEAU JAUNE EN FONCTION DU MC	76
FIGURE 53. EFFET DE MC SUR LE CHAUFFAGE DE L'ÉRABLE À SUCRE	76
FIGURE 54. TEMPS DU CHAUFFAGE DE L'ÉRABLE À SUCRE EN FONCTION DU MC	77
FIGURE 55. EFFET DE MC SUR LE DÉGEL DES DIFFÉRENTES ESSENCES DE BOIS	79
FIGURE 56. EFFET DE MC SUR LE CHAUFFAGE DES DIFFÉRENTES ESSENCES DE BOIS	80

Tables des tableaux :

TABLEAU 1. GRAVITÉ SPÉCIFIQUE DES QUATRE ESPÈCES DU BOIS CANADIEN	29
TABLEAU 2. RELATION DES PROPRIÉTÉS THERMO-PHYSIQUES DU BOIS	30
TABLEAU 3. PROPRIÉTÉS THERMO-PHYSIQUES DE PEUPLIER FAUX TREMBLE AVEC MC=35%.....	52
TABLEAU 4. DURÉE DE LA FUSION POUR DIFFÉRENTES ESSENCES DE BOIS.	73
TABLEAU 5. TEMPS DE DÉGEL DES DIFFÉRENTES ESSENCES DE BOIS (HEURE).....	78
TABLEAU 6. TEMPS DE CHAUFFAGE DES DIFFÉRENTES ESSENCES DE BOIS (HEURE).....	78
TABLEAU 7. PROPRIÉTÉS THERMO-PHYSIQUES DU PEUPLIER FAUX-TREMBLE À MC=35%.....	88
TABLEAU 8. PROPRIÉTÉS THERMO-PHYSIQUES DU PEUPLIER FAUX-TREMBLE À MC=50%.....	89
TABLEAU 9. PROPRIÉTÉS THERMO-PHYSIQUES DU PEUPLIER FAUX-TREMBLE À MC=75%.....	90
TABLEAU 10. PROPRIÉTÉS THERMO-PHYSIQUES DU PEUPLIER FAUX-TREMBLE À MC=100%.....	91
TABLEAU 11. PROPRIÉTÉS THERMO-PHYSIQUES DU BOULEAU BLANC À MC=35%	92
TABLEAU 12. PROPRIÉTÉS THERMO-PHYSIQUES DU BOULEAU BLANC À MC=50%	93
TABLEAU 13. PROPRIÉTÉS THERMO-PHYSIQUES DU BOULEAU BLANC À MC=75%	94

TABLEAU 14. PROPRIÉTÉS THERMO-PHYSIQUES DU BOULEAU BLANC À MC=100%	
.....	95
TABLEAU 15. PROPRIÉTÉS THERMO-PHYSIQUES DU BOULEAU JAUNE À MC=35%.	96
TABLEAU 16. PROPRIÉTÉS THERMO-PHYSIQUES DU BOULEAU JAUNE À MC=50%.	97
TABLEAU 17. PROPRIÉTÉS THERMO-PHYSIQUES DU BOULEAU JAUNE À MC=75%.	98
TABLEAU 18. PROPRIÉTÉS THERMO-PHYSIQUES DU BOULEAU JAUNE À MC=100%	
.....	99
TABLEAU 19. PROPRIÉTÉS THERMO-PHYSIQUES DE L'ÉRABLE À SUCRE À MC=35%	
.....	100
TABLEAU 20. PROPRIÉTÉS THERMO-PHYSIQUES DE L'ÉRABLE À SUCRE À MC=50%	
.....	101
TABLEAU 21. PROPRIÉTÉS THERMO-PHYSIQUES DE L'ÉRABLE À SUCRE À MC=75%	
.....	102
TABLEAU 22. PROPRIÉTÉS THERMO-PHYSIQUES DE L'ÉRABLE À SUCRE À MC=100%.....	103

1 INTRODUCTION ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE BOIS ET LE CHAUFFAGE DU BOIS

1.1 Matériau bois et applications

Dans le contexte actuel du développement durable, le bois, par ses caractéristiques remarquables (recyclable, renouvelable et biodégradable), demeure une substance importante pour diverses utilisations techniques (construction, ameublement, etc.). D'ailleurs, plusieurs nouvelles technologies émergent dans ce sens et particulièrement celles orientées vers l'amélioration de l'efficacité du bois pour générer de la chaleur (Wood Handbook, 2010) pour l'industrie du séchage. Toutefois, la maîtrise de l'utilisation du bois dans diverses applications industrielles nécessite des connaissances approfondies du matériau bois. Effectivement, le bois est caractérisé par une structure biologique complexe composée de différentes cellules et produits chimiques (I. Rowell, 2005). Actuellement, vis-à-vis des différents pourcentages des composantes qui forment le bois, on dénombre plus de 20000 espèces différentes de plantes ligneuses (I. Rowell, 2005), ce qui explique la large marge de propriétés et d'utilisations essences du bois. Du point de vue ingénierie, il est nécessaire de connaître et de définir les composantes du bois sur différentes échelles (étude anatomique à grande et à petite échelle); la figure 1 illustre une vue d'un arbre coupé à différents grossissements. À ce stade, il est nécessaire de distinguer *le bois résineux* (qui est caractérisé par une forme conique et de leurs feuilles en forme d'aiguille; voir Figure 2) et le *bois feuillu* (qui est caractérisé par leurs feuilles caduques; voir Figure 3). La structure du bois résineux se compose principalement des trachéides; ce qui rend sa structure simple. Les trachéides sont des cellules allongées, terminées en biseau (Elloumi, 2017), à section carrée et leurs parois lignifiées sont

creusées de ponctuations aréolées. Cependant, la structure du bois feuillu est plus compliqué que celle du bois résineux, il y a plus d'éléments qui constituent les tissus qui se compose principalement des rayons ligneux avec des vaisseaux, fibres, parenchyme axial long et court et des éléments sécréteurs (Elloumi, 2017)

En conséquence, des études approfondies seront nécessaires pour expliquer et quantifier les propriétés mécaniques, chimiques et physiques de ses matériaux composites.

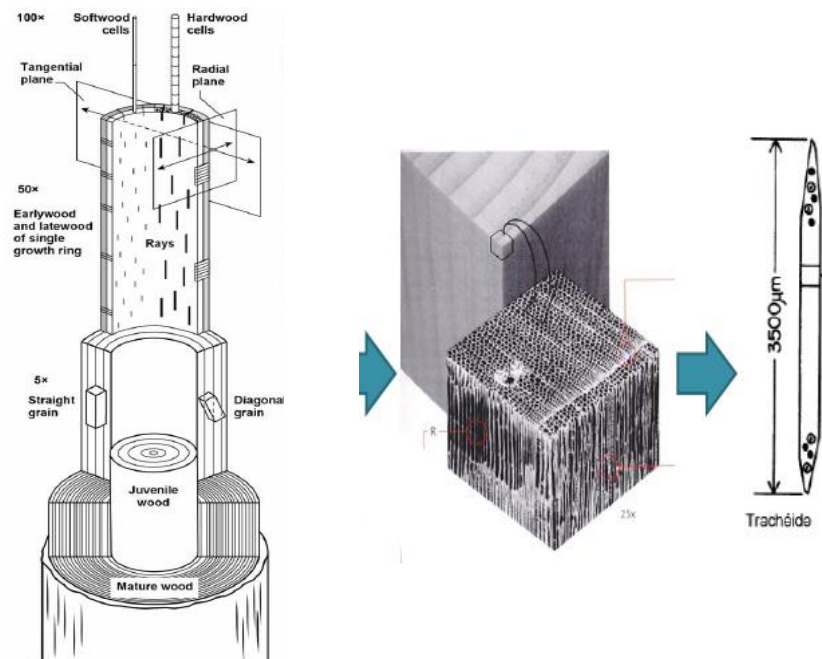


Figure 1. illustration d'un arbre coupé à différents grossissements (Wood Handbook, 2010)

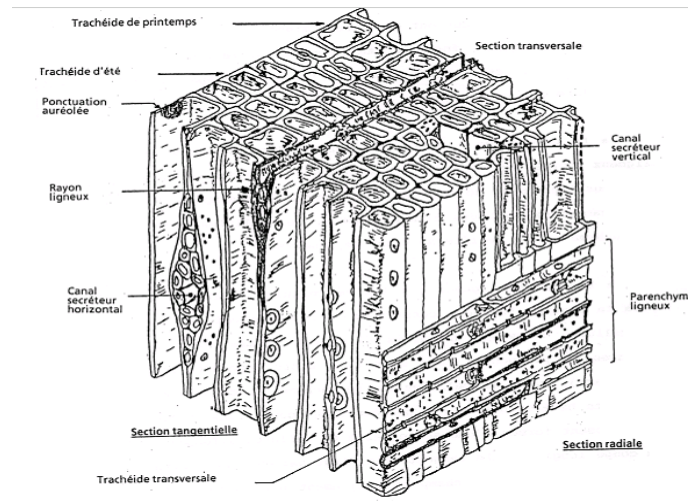


Figure 2. Structure du bois résineux

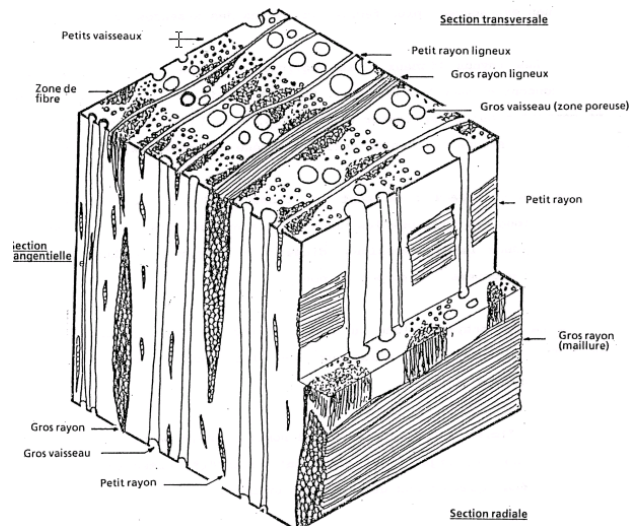


Figure 3. Structure du bois feuillus

Du point de vue physique, le bois est un matériau composite anisotrope; ses fibres sont orientées dans trois différentes directions: longitudinale, transversale et radiale (voir Figure 4). Cette anisotropie, qui est due à la structure de cellulose et à l'orientation des fibres, affecte les propriétés mécaniques, thermiques et diélectriques du bois. Dans le cas

thermique, ses propriétés thermo-physiques (conductivité thermique, chaleur spécifique et densité) varient avec la température, l'humidité et la direction structurale. La figure 5 illustre la chaleur spécifique et la conductivité thermique du Bouleau en fonction de la température selon la direction longitudinale (Annasabi, 2012).

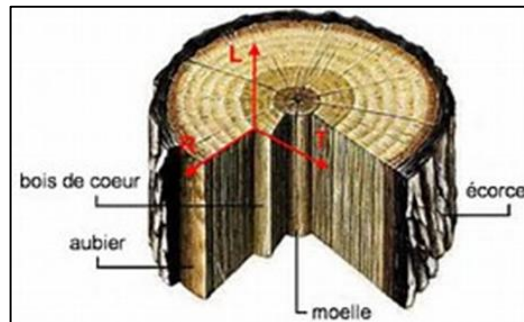


Figure 4. Bois et orientation des fibres

En surcroît, les propriétés diélectriques du bois dépendent aussi de la fréquence de l'onde électromagnétique qui le traverse. La figure 6, ci-dessous, illustre le comportement des propriétés diélectriques du *Sapin de Douglas* avec la température à la fréquence 50MHz et selon la direction longitudinale (Annasabi, 2012).

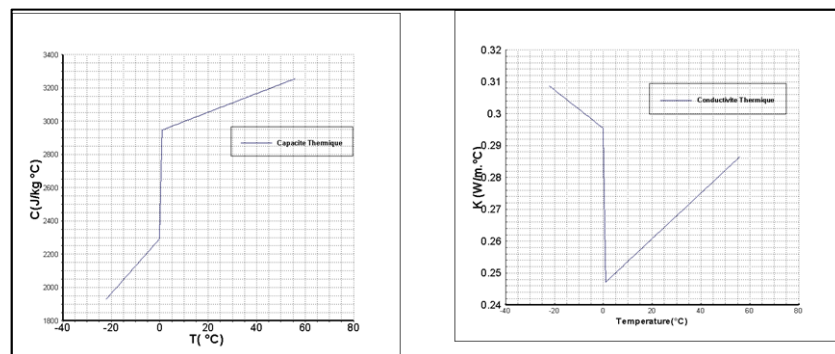


Figure 5. Variation de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique avec la température (Annasabi, 2012)

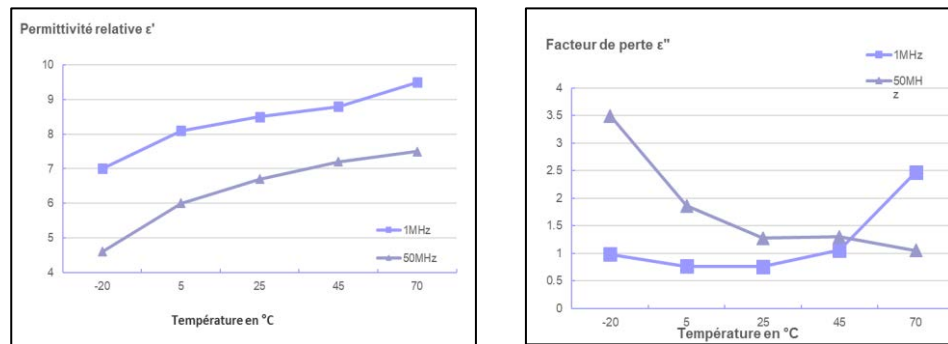


Figure 6. : Exemple des propriétés diélectriques du bois (Sapin de douglas) (Annasabi, 2012)

Les applications du bois sont variées : éléments structurels (charpente, ossature bois); matériaux de finition (pour façades, sols); mobilier; etc. Sur la figure 7, deux exemples d'application du bois en construction et en mobilier sont présentés.

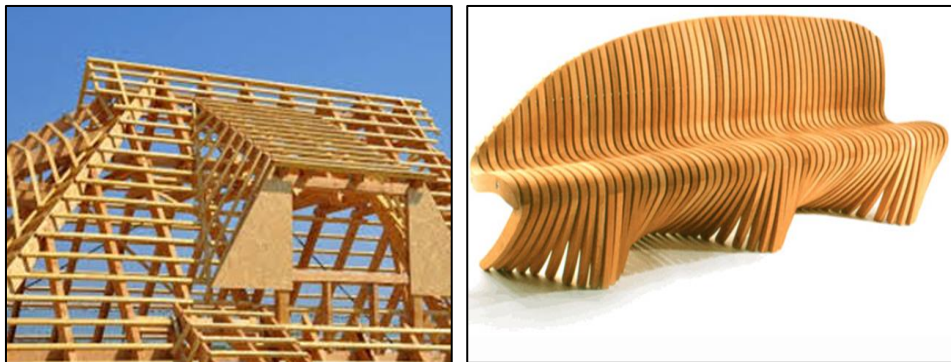


Figure 7. Exemple d'utilisation du bois

Avant l'utilisation du bois pour des applications structurales ou autre, il est impératif de le sécher. Le temps de séchage dépend largement de la méthode de chauffage considérée. Dans ce qui suit, une description sommaire de certains modes de chauffage est présentée.

1.2 Chauffage du bois

Le bois est considéré comme premier combustible utilisé pour le chauffage au Canada. Toutefois, lorsque ce bois se trouve à l'état gelé, il faut alors lui fournir un apport énergétique convenable pour le dégel. Le temps de dégel d'une structure en bois dépend largement du mode utilisé pour son chauffage. Parmi les modes qui peuvent être utilisés pour le dégel d'une structure citons la convection, la radiation infrarouge, les micro-ondes, les radiofréquences et les températures imposées.

1.2.1 Chauffage par convection

Le chauffage par convection d'un matériau solide est une conséquence d'un transfert énergétique associé au mouvement d'un fluide (liquide ou gaz) au corps solide; l'énergie générée par la chaleur du fluide est transmise au corps à chauffer.

La chaleur se transmet toujours de la région la plus chaude à la région la plus froide. En effet, lorsqu'il existe une différence de température entre deux points d'un fluide, le fluide chaud, qui aura une masse volumique plus faible que le fluide froid, aura tendance à monter sous l'effet de la poussée d'Archimède (Figure 8).

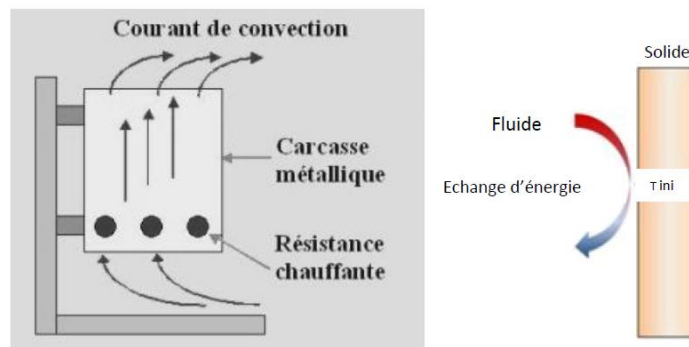


Figure 8. Chauffage par convection

Il y aura ainsi un mouvement d'ensemble des molécules qui provoque une propagation de chaleur sous l'effet d'un fluide élevé à une certaine température au contact d'un corps chaud.

1.2.2 Chauffage par micro-ondes

L'irradiation par micro-ondes est une technique de chauffage électrique visant à chauffer des matériaux peu conducteurs électriquement et généralement thermiquement. Le chauffage diélectrique permet la production de la chaleur à l'intérieur du matériau dans un temps relativement court comparativement au chauffage infrarouge. L'énergie dissipée par les micro-ondes dans le matériau est directement reliée à la réponse de l'orientation de la polarisation du milieu vis-à-vis des micro-ondes qui le traversent; cette polarisation modifie la propagation des micro-ondes dans le matériau (décomposition de l'onde en onde réfléchie, onde transmise et onde absorbée); voir figure ici-bas.

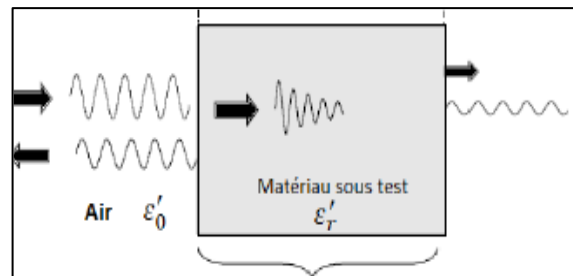


Figure 9. Décomposition de l'onde en onde réfléchie, transmise et absorbée

Dans le cas du bois, l'application d'un champ électrique a pour effet d'induire une asymétrie des molécules d'eau présentes dans le matériau (polarisation). Conséquemment, pour des fréquences particulières, les molécules se frottent et génèrent de la chaleur dans le matériau. La

prédiction de l'évolution de cette chaleur nécessite des outils expérimentaux et numériques robustes. Toutefois, la technique de chauffage par micro-ondes ne peut être applicable au bois que si elle n'engendre pas une dégradation des propriétés physico- mécaniques du matériau (Diagne. 2017). Dans ce cas, il est essentiel de vérifier si le chauffage aux micro-ondes entraîne ou non des effets non désirables sur les propriétés du bois.

1.2.3 Chauffage par radiofréquence

Le chauffage par radiofréquences est une technique qui consiste à chauffer des matériaux ayant une conductivité électrique faible (Figure 10) (www-fusion-magnetique.cea.fr). Contrairement au chauffage par micro-ondes, qui est plus rapide, le chauffage par radiofréquences nécessite beaucoup plus de temps. Toutefois, ce mode de chauffage induit une meilleure répartition de la température dans le matériau que celle générée par micro-ondes, qui induit des spots prononcés en températures hautes et basses (Diagne. 2017).

Le bois, à l'état naturel, réponds bien au chauffage électromagnétique en raison du l'important pourcentage d'eau qu'il contient. Ce dernier s'évapore au cours du processus entraînant une diminution du facteur de perte (Diagne. 2017).

En effet, étant un matériau diélectrique, le bois se polarise (présence des molécules d'eau) sous l'action d'un champ électrique et la polarisation résultante est de la forme $\vec{P} = \chi\vec{D}$, avec; \vec{D} est le déplacement électrique et χ est la susceptibilité diélectrique (Figure 11).

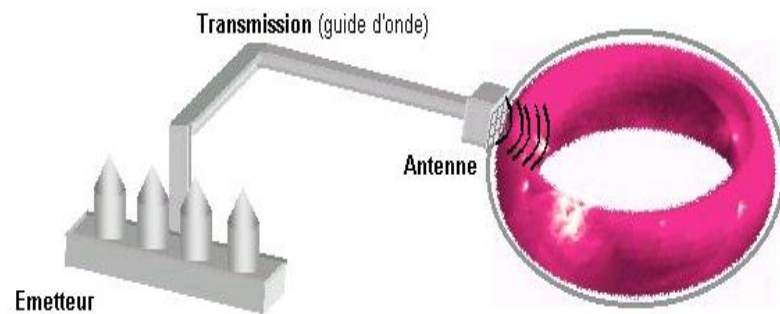


Figure 10. Chauffage par effet diélectrique

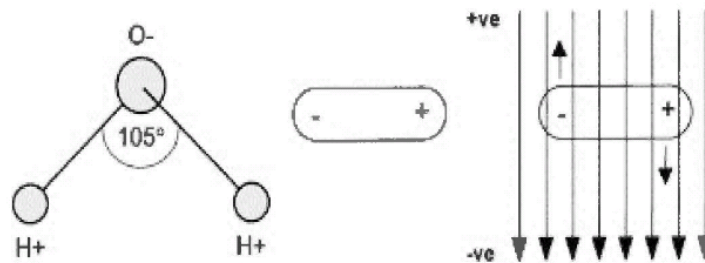


Figure 11. Polarisation de la molécule d'eau

1.2.4 Chauffage par rayonnement infrarouge

Un rayonnement infrarouge est une radiation calorifique invisible ou visible émise par des corps à partir d'une certaine température. La propagation de cette énergie peut s'effectuer autant dans le vide que dans certains milieux matériels dits *transparents* ou *semi-transparentes*. En contact avec un corps solide, le rayonnement infrarouge, qui peut être produit par des équipements spécialisés, se transformer en chaleur dans la matière soumise à ce rayonnement. La puissance et l'efficacité de ce rayonnement dépend de plusieurs facteurs :

- La longueur d'onde.
- La température de surface émettrice.
- Les propriétés thermo-physique du receveur.



Figure 12. Chauffage par infrarouge – rayonnement infrarouge

Le rayonnement infrarouge se distingue des autres rayonnements par des longueurs d'onde plus importantes que celles de la lumière visible et des ultraviolets (UV). On cite par exemple (Figure 12):

- Les ondes courtes : IRA d'une longueur de 780 à 1.400 nanomètres.
- Les ondes moyennes : IRB d'une longueur de 1.400 à 3.000 nanomètres.

Ce sont les ondes courtes à moyennes de l'infrarouge qui sont les plus intéressantes.

1.2.5 Chauffage par température imposée

Le chauffage direct par température imposée est illustré dans le phénomène de convection forcée dans laquelle l'écoulement du fluide est forcé par un dispositif mécanique quelconque (pompe ou gravité pour un liquide, ventilateur..) ou par un gradient de température imposé (Figure 13).

Il résulte que l'agitation des molécules constituant le fluide devient plus élevée ce qui conduit à un transfert de chaleur à une vitesse plus importante. Voici quelques exemples de convection forcée :

- Chauffage central avec accélérateur.
- Chauffages électriques avec soufflerie.
- Chauffe-eau solaire à circulation forcée.
- Four à convection de cuisinière.

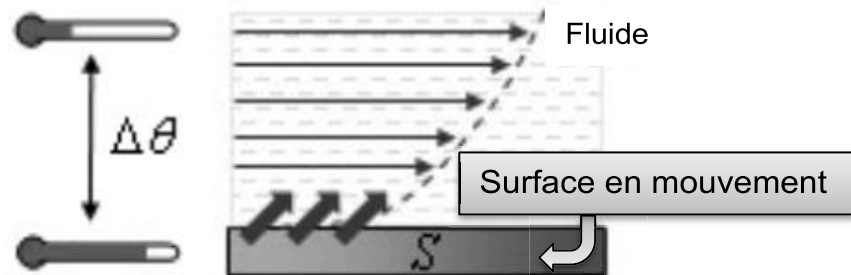


Figure 13. Chauffage par température imposée – surface en mouvement

1.3 Étude bibliographique

Concernant le volet de la modélisation numérique du chauffage du bois, c'est un sujet très complexe. Ce sujet implique un couplage thermomécanique hautement difficile, dû au caractère anisotrope du milieu bois. Effectivement, ce problème nécessite un couplage entre les équations de conservation de la masse, du mouvement et de l'énergie et, dans le cas des ondes électromagnétique, il faut aussi considérer les équations de Maxwell. Dans le cas du chauffage par micro-ondes du bois, des initiatives sont réalisées tels les travaux d'Erchiqui, par le couplage d'un modèle analytique 1D pour le volet électromagnétique et un modèle

3D (par éléments finis) pour le volet thermique dans le cas isotrope (*Erchiqui, 2013*) et, ensuite, dans le cas anisotrope (*Erchiqui, 2015*).

Dans le cas de l'équation de conservation d'énergie, la modélisation par la méthode des éléments finis (MEF) est largement utilisée dans les problèmes de chauffage thermique du bois. À cet effet, on rencontre deux approches : celle qui utilise la température comme variable dépendante (*Hu et Argyropoulos, 1995*) et celle utilisant une approche basée sur l'enthalpie volumique (*Erchiqui, 2015*). Pour le bois, les propriétés thermophysiques de ces matériaux sont considérées dépendantes de la température et de l'humidité (*Kanter, 1957*). L'avantage d'utiliser une formulation basée sur l'enthalpie plutôt que sur la température permet d'éliminer simultanément le dédoubleage de l'équation d'énergie (cas de bois contenant initialement de la glace et le bois, après chauffage, contenant aussi de l'eau) et les conditions de Stéfan (*Hu et Argyropoulos, 1995*), condition mathématique à l'interface glace-eau. Pour cela, il est souvent préférable de considérer la définition de l'enthalpie sensible pour la phase solide du matériau (*Nedjar, 2002*). Dans le cas du chauffage par micro-ondes, le flux intercepté par le bois, lors de l'impact des micro-ondes, nécessite la connaissance de l'énergie transportée et dissipée dans le bois. Pour cela, il est essentiel de déterminer le vecteur énergétique de *Poynting*; qui nécessite la résolution des équations de Maxwell (*Erchiqui, 2013*).

Concernant les méthodes numériques utilisées pour la modélisation du processus de chauffage d'un matériau, on rencontre trois approches pour les équations descriptives: différences finies, volumes de contrôle et éléments finis. À titre d'exemples, citons le travail de *Ohlsson et Bengtson (Ohlsson et Bengtson, 1971)* sur le chauffage unidimensionnel, par la méthode de différence finie, de la conduction de la chaleur dans un bloc de

viande par par micro-ondes. Swami (*Swami, 1982*) a utilisé un modèle aux différences finies pour décrire le chauffage des gels avec une teneur en eau et en NaCl. Rattanadecho (*Rattanadecho, 2006*) a utilisé une méthode de discrétisation par volumes finis pour simuler le chauffage des couches d'un liquide à l'aide d'un guide d'onde rectangulaire. Dans le cas de la méthode des éléments finis (*Reddy, 1993*), il est souhaitable d'utiliser un schéma implicite de Crank-Nicolson pour assurer la stabilité de la solution transitoire (inconditionnellement stable) (*Dokainish et Subbrajk, 1989*).

Concernant le chauffage par température imposée, mode fréquemment utilisé pour le du dégel du bois gelé dans l'eau chaude, on rencontre l'approche basée sur l'enthalpie volumique proposée par Steinhagen et Harry (*H. P. Steinhagen, W. Harry, 1987*). Dans leur approche numérique, Steinhagen et Harry ont modélisé le dégel d'un tronc d'arbre (de -22°C à 45°C) pour déterminer la durée nécessaire de son dégel en tout point du tronc. À cet effet, ils ont employé la méthode de différence finie pour résoudre l'équation non linéaire de conductivité thermique en incluant la chaleur latente de fusion. La résolution de l'équation a été faite numériquement avec un pas de temps de 0.02h pour un tronc de 31 cm de diamètre et en considérant que la densité et la teneur en humidité sont constantes et que la chaleur spécifique et la conductivité thermiques sont dépendantes de la température.

En 2004, Perry et Audimar (*Perry N et Audimar P, 2004*) ont étudié numériquement le chauffage du bois congelé. À cet effet, l'équation de la conduction de la chaleur a été exprimée en terme de la température et la résolution a été effectuée par la méthode des éléments finis. Ce problème a été abordé en transitoire dans les cas d'une, deux et trois dimensions avec différentes conditions initiales et limites. Les résultats trouvés pour

trois différents diamètres de tronc de Pin Blanc congelé (Chauffage de -23°C à 54°C) étaient comparés à 10% de près avec les résultats expérimentaux de Steinhagen (1977) et montrent que le temps du dégel du centre est plus important que le reste du tronc et que le transfert thermique dans la direction longitudinale du bois est plus important que celui des directions radiale et tangentielle.

Suite à ces études bibliographiques, on conclut que la méthode basée sur l'enthalpie volumique est plus fiable parce qu'elle est plus apte pour traiter le problème avec un changement de phase. Contrairement à la méthode basée sur la température, pour l'équation de l'énergie, comme variable indépendante ne peut traiter convenablement ce cas, malgré ces résultats acceptables.

Les travaux de Erchiqui (Erchiqui, 2015), d'un autre côté, ont abordé le même sujet sur la modélisation numérique anisotrope de chauffage d'un tronc d'arbre gelé de 20cm de rayon (chauffer de -22°C à 56°C). Pour ce problème, l'équation de la conduction de la chaleur est exprimée en enthalpie volumique. Les résultats trouvés, comparativement à l'expérimental, ne dépasse pas 10% près.

1.4 Synthèse bibliographique et originalité du projet proposé

1.4.1 Originalité

À la suite de l'analyse bibliographique, on vise à appliquer une nouvelle approche numérique tridimensionnelle, basée sur une nouvelle méthode dite *hybride* par éléments finis 3D, utilisant l'équation de l'énergie en termes d'enthalpie volumique, pour caractériser le temps de dégel du bois (supposé anisotrope), sous l'action d'une température imposée.

Le choix du matériau bois dans cette étude est justifié par son utilisation croissante dans les emballages, les installations d’emmagasiner, la construction, le naval, etc.

Dans ce travail, les propriétés thermo-physiques des matériaux étudiés seront supposées dépendantes de la température, de l’humidité et de la direction structurale.

1.4.2 Objectif général

L’objectif principal de la mémoire est de caractériser numériquement le temps de dégel et de chauffage du bois en tenant compte de son anisotropie directionnelle. Pour cela, quatre espèces de bois canadien sont considérés : le peuplier faux-tremble, le bouleau blanc, le bouleau jaune et l’érable à sucre. Les températures initiale et finale de la chauffe, utilisées pour la simulation numérique, sont respectivement -20°C et $+50^{\circ}\text{C}$. Les simulations sont réalisées pour quatre différents teneurs en humidité ($MC = \{35\%, 50\%, 75\%, 100\%\}$). Pour la modélisation de l’équation de la conduction de la chaleur, nous considérons l’approche basée sur l’enthalpie volumique hybride, tel que formulée dans (Erchiqui, 2019). Les simulations numériques sont réalisées par le code ThermoForm développé par le Pr Erchiqui. Ce code est basé sur la méthode des éléments finis.

1.4.3 Objectifs spécifiques

- Déterminer les propriétés thermo-physiques de chaque espèce du bois en fonction de la température et de l’humidité.
- Appliquer un nouveau modèle numérique 3D, basée sur le concept d’enthalpie hybride, pour étudier numériquement le dégel du bois

avec température imposée dans le cas isotrope avec validation et, ensuite, dans le cas anisotrope avec validation.

- Caractérisation du temps de dégel des quatre espèces du bois canadien (peuplier faux-tremble, le bouleau blanc, le bouleau jaune et l'érable à sucre) vis-à-vis de la température en tenant compte de l'anisotropie directionnelle.

1.4.4 Propriétés des essences de bois canadien étudiés

Pour modéliser la réponse numérique du bois, nous avons besoin des propriétés thermo-physiques spécifiques. Ces propriétés sont obtenus par des études expérimentales et, ensuite, présentées par des modèles analytiques. Dans notre cas, nous allons utiliser les formulations citées dans les travaux (Erchiqui, 2019).

1.4.4.1 Gravité spécifique du bois :

La gravité spécifique est une caractéristique qui différencie les essences du bois l'une de l'autre, elle est définie en tant que la densité d'un matériau relative à l'eau. La gravité spécifique des quatre espèces du bois; le peuplier faux-tremble, le bouleau blanc, le bouleau jaune et l'érable à sucre, est citée ci-dessous :

Espèce du bois	SG
Peuplier faux-tremble	0.35
Bouleau blanc	0.48
Bouleau jaune	0.55
Érable à sucre	0.56

Tableau 1. Gravité spécifique des quatre espèces du bois canadien

1.4.4.2 Propriétés thermo-physiques

Les propriétés thermo-physiques des espèces du bois dépendent, généralement, de la température, de l'humidité et des directions structurales. Pour ce travail de mémoire, nous utiliserons les relations citées (Erchiqui, 2019). Le Tableau ci-dessous, extraite de la référence (Erchiqui, 2019), illustre les expressions analytiques de la densité, de la conductivité thermique, de la chaleur spécifique et de l'enthalpie volumique vis-à-vis la température, l'humidité, les directions structurales (radiale, tangentielle et longitudinale) et de la gravité spécifique.

Propriétés	$T < 0$	$T > 0$
Densité	$\rho = \rho_w SG (1 + MC)$	$\rho = \rho_w SG (1 + MC)$
Conductivité radiale	$k_r = (0.096 + 0.0033 * MC - 0.0008 * T) * (0.105 + 2.03 * SG)$	$k_r = (0.138 + 0.0019 * MC + 0.00022 * T + 0.000011 MC * T) * (0.105 + 2.03 * SG)$
Conductivité longitudinale	$k_l = 2.5 * k_r$	$k_l = 2.5 * k_r$
Conductivité transversale	$k_t = \frac{1}{0.9} * k_r$	$k_t = \frac{1}{0.9} * k_r$
Enthalpie latente	$L = \frac{L_w (100 * MC - 30)}{100 * MC + 100}$	$L = \frac{L_w (100 * MC - 30)}{100 * MC + 100}$
Chaleur spécifique	$C_p = 2280 + 16.6 * T$	$C_p = 2000 + 8.71 * MC + 4.98 * T$

Tableau 2. Relation des propriétés thermo-physiques du bois

Avec :

ρ_w : Densité de l'eau ($\rho_w = 1000 \text{ Kg/m}^3$)

L_w : Chaleur latente de la fusion de l'eau ($L_w = 334 \cdot 10^3 \text{ J/Kg}$)

L : Enthalpie latente [KJ/m^3]

MC : Teneur en humidité exprimée en %

SG : Gravité spécifique

T : Température ($^{\circ}\text{C}$)

k_r, k_l, k_t : Conductivités thermique selon les trois directions [$\text{W/m}^{\circ}\text{C}$]

C_p : Chaleur spécifique [$\text{J/Kg}^{\circ}\text{C}$]

1.4.4.3 Propriétés thermo-physiques : Peuplier faux-tremble, Bouleau blanc, Bouleau jaune et Érable à sucre

Les expressions analytiques des propriétés thermo-physiques de chaque essence du bois sont obtenues par la substitution de la gravité spécifique (SG) et de la teneur en humidité (MC), données par les formules apparaissant dans le Tableau 2. Les expressions obtenues sont données dans l'Annexe A.

Soulignons que les simulations numériques, sur le chauffage des quatre espèces du bois gelé, sont réalisées à partir des données fournies sur les propriétés thermo-physiques pour une température imposée de 50°C et cela pour chaque teneur en humidité.

1.5 Méthodologie

Ce projet est subdivisé en trois parties principale:

Dans le premier chapitre, l'aspect théorique du transfert de chaleur avec changement de phase dans un milieu continu, isotrope ainsi qu'anisotrope, sera abordé ainsi que la formulation de l'équation de la conservation de l'énergie en termes d'enthalpie volumique (hybride ou non). Ensuite, des validations numériques suivront.

Dans le deuxième chapitre, on présentera quatre espèces de bois et les différents diamètres choisis ainsi que leurs propriétés thermophysiques.

Ensuite, dans le troisième chapitre, une étude numérique sera réalisée sur chaque type de bois. Après validation, une analyse comparative suivra sur les évolutions des températures.

Finalement, des conclusions et des recommandations seront présentées.

2 DÉVELOPPEMENT THÉORIQUE ET MISE EN ÉQUATIONS

Dans cette partie, l'accent est mis d'une part, sur les équations qui gouvernent le transfert de chaleur avec changement de phase dans un milieu isotrope et anisotrope et, d'autre part, sur la formulation 3D par la méthode des éléments finis de type Galerkin. Pour le changement de phase, nous considérons une formulation basée sur l'enthalpie volumique (Erchiqui, 2013).

2.1 Milieu continu isotrope

2.1.1 Transfert de chaleur avec changement de phase

Dans les milieux physiques, les transferts de chaleur sont la conséquence, en général, de trois mécanismes : la conduction, le rayonnement et la convection. En conséquence, le calcul des champs de température ne peut se faire que par un couplage de ces trois modes de transfert et la réponse transitoire en température est alors donnée par la résolution de l'équation de la chaleur. Toutefois, lorsque le milieu subit un changement de phase (liquide et solide), la résolution numérique est plus délicate à cause de la présence d'une ou plusieurs frontières communes aux phases solide et liquide (région de fusion). En général, pour ce type de problème, on trouve deux approches : résoudre les équations d'énergie pour chacune des phases liquide et solide en tenant compte de la frontière mobile (interface solide-liquide) ou utiliser une approche en termes d'enthalpie, qui à notre avis, est plus appropriée au problème de changement de phase. Effectivement, la fonction enthalpie est physique et est bien définie autant pour la phase solide que liquide.

Dans ce travail, nous supposons que l'interface Γ entre les phases solide (Ω^-) et liquide (Ω^+) du milieu matériel puisse être décrite en terme

d'une fonction régulière $F(x,y,z,t)$ de la façon suivante (*Hu et Argyropoulos, 1995, Erchiqui, 2013*) :

$$\Gamma = \{(x,y,z,t) \in \Omega \times (0,\tau) / F(x,y,z,t) = 0\} \quad 3.1$$

$$\Omega^+ = \{(x,y,z,t) \in \Omega \times (0,\tau) / F(x,y,z,t) > 0, T(x,y,z,t) \geq T_l = 0\} \text{ (liquide)} \quad 3.2$$

$$\Omega^- = \{(x,y,z,t) \in \Omega \times (0,\tau) / F(x,y,z,t) < 0, T(x,y,z,t) \leq T_s = 0\} \text{ (solide)} \quad 3.3$$

$$\text{avec : } \Omega^+ \cup \Gamma \cup \Omega^- = \Omega \times (0,\tau) \text{ et } 0 \leq t \leq \tau \quad 3.4$$

En utilisant une formulation basée sur la température, les deux équations d'énergie qui gouvernent les deux milieux solide et liquide s'écrivent, en absence de mouvements convectifs:

$$\rho_s(T_s)C(T_s)\frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (K(T_s)\nabla T_s), \text{ pour } F(x,y,z,t) < 0 \quad 3.5$$

$$\rho_l(T_l)C(T_l)\frac{\partial T_l}{\partial t} = \nabla \cdot (K(T_l)\nabla T_l), \text{ pour } F(x,y,z,t) > 0 \quad 3.6$$

ρ et c_p sont respectivement la densité volumique et la chaleur spécifique du matériau. Les phases solide et liquide sont séparées par l'interface Γ définie par l'équation suivante :

$$F(x,y,z,t) = 0 \quad 3.7$$

Les conditions frontières, dites conditions de Stéfán (*Hu et Argyropoulos, 1995*), permettent de tenir compte du saut d'énergie entre les deux phases :

$$T_s(x,y,z,t) = T_l(x,y,z,t) \text{ pour } F(x,y,z,t) = 0 \quad 3.8$$

$$K(T_s)\nabla T_s \cdot \nabla F - K(T_l) \cdot \nabla F = -\rho \cdot L \frac{\partial F}{\partial t} \quad \text{pour } F(x,y,z,t) = 0 \quad 3.9$$

2.1.2 Enthalpie volumique et équation d'énergie

L'avantage d'utiliser une formulation basée sur l'enthalpie plutôt que sur la température permet d'éliminer simultanément le dédoubleage de l'équation d'énergie et les conditions de Stéfan. Pour cela, considérons la définition suivante de l'enthalpie volumique (*Nedjar, 2002*):

$$H(T) = \int_{T_{ref}}^T \rho(T)c_p(T)dT \quad 3.10$$

T_{ref} est une température de référence. L'allure de l'enthalpie dépend fortement du type de matériau, mais il faut faire la différence entre deux situations distinctes :

- i) Cas où le changement de phase se passe dans un intervalle $[T_S \ T_F]$, où T_S et T_F sont respectivement les températures du solide et du liquide.
- ii) Le cas où le changement de phase se fait à une température constante, donc l'enthalpie exhibe une discontinuité à la température $T_m = T_l = T_S$ de fusion.

Le zéro de l'enthalpie est défini à la température du solide saturé.

Pour exprimer l'équation de la conduction de la chaleur en terme d'enthalpie volumique, on a besoin, d'une part de l'expression de la variation, dans le temps, de l'enthalpie volumique H et la définition de la transformation de Kirchhoff χ d'autre part (*Erchiqui, 2013*), soient :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \rho(T)c_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad 3.11$$

$$\chi(K) = \theta(T) = \int_{T_{ref}}^T K(T) dT \quad \forall T \quad 3.12$$

En tenant compte des équations ci-dessus, l'équation de la chaleur en terme d'enthalpie volumique s'écrit (Erchiqui, 2013) :

$$\frac{\partial H(T)}{\partial t} = \nabla^2 \theta(T) + Q_{flu} \quad 3.13$$

Cette équation est valable pour les deux phases et où toutes les propriétés thermiques varient avec la température. Comme l'exige les équations ci-dessus, nous devons, dans un premier temps, exprimer la chaleur massique, la masse volumique et la conductivité thermique en fonction de la température et, par la suite, selon les deux équations (3.11) et (3.12), exprimer l'enthalpie H et la transformée de Kirchhoff χ en fonction de la température.

Dans l'équation (3.13), on a ajouté le terme source Q_{flu} , associé au mode de transfert de chaleur.

Pour compléter le problème, ajoutons à l'équation (3.13) la condition de frontière suivante :

$$K \nabla T \cdot \mathbf{n} + h(T - T_\infty) - q \cdot \mathbf{n} = 0 \quad 3.14$$

h est le coefficient d'échange de chaleur par convection et T_∞ est la température du milieu ambiant (air). Le terme $h(T - T_\infty)$ représente le transfert de chaleur par convection à partir du matériau vers le milieu ambiant. Dans le cas où il y a présence d'une source de chaleur, le flux de

chaleur incident dépend de la configuration de la source et de la position du matériau. La formule (3.14) en termes de θ s'écrit :

$$K\nabla\theta \cdot \mathbf{n} + h(T - T_\infty) - q \cdot \mathbf{n} = 0 \quad 3.15$$

2.1.3 Formulation intégrale faible l'équation d'énergie

Résoudre analytiquement l'équation de la conservation de l'énergie consiste à chercher une solution différentiable par rapport aux coordonnées spatiales. Pour la plupart des problèmes physiques, y compris celui du transfert radiatif et sous certaines conditions, une telle tâche s'avère difficile, voire même impossible. On montre souvent l'existence et l'unicité d'une solution, mais on ne connaît pas son expression. La méthode des éléments finis propose d'approcher la solution exacte, à priori inconnue, par une solution dont la singularité est moins forte que celle de la solution exacte (*Zienkiewicz et Taylor, 2000*). En général, pour obtenir une telle formulation intégrale, on multiplie l'équation de l'énergie (dite forme forte) par une fonction test Φ , appartenant à un certain espace fonctionnel V (*Reddy, 1993*), puis on intègre sur tout le domaine physique. On obtient alors la formulation intégrale. Ainsi, pour déterminer le champ de température qui vérifie l'équation d'énergie (sous forme d'enthalpie volumique), on va établir en trois dimensions pour l'équation (3.15) la forme intégrale faible associée. Pour cela, on considérera l'approche proposée dans (*Erchiqui, 2015*).

2.1.4 Discrétisation spatiale :

Pour l'application de la méthode des éléments finis, l'équation qui régit le problème de transfert de chaleur (équation 3.13) sera exprimée sous une forme variationnelle. À ce stade, il est important de distinguer le traitement

numérique du domaine physique par rapport à celui du temps, relativement au problème de transfert de chaleur. En conséquence, une solution approchée de l'équation variationnelle sera obtenue en subdivisant le domaine physique en sous-domaines élémentaires (éléments finis) :

$$\int_{\Omega_s} (*) d\Omega_s = \sum_{\text{Elements } \Omega_s^e} \int_{\Omega_s^e} (*) d\Omega_s \text{ et } \oint_{\Gamma_s} (*) d\Gamma_s = \sum_{\text{Elements } \Gamma_s^e} \int_{\Gamma_s^e} (*) d\Gamma_s \quad 3.16$$

Chaque élément fini est alors caractérisé par un ensemble de nœuds et à partir desquels on interpole les variables physiques ou mathématiques. Dans notre cas, ce sont les variables enthalpie volumique (H) et la transformée de Kirchhoff (θ).

L'assemblage des matrices élémentaires conduit alors à un système d'équations algébriques de la forme (*Erchiqui, 2013*) :

$$[C] \cdot \left\{ \frac{dH}{dt} \right\} + [\bar{K}] \cdot \{H(t)\} + [G] \cdot \{H^2(t)\} = \{R\} + \{Q\} \quad 3.17$$

La matrice [C] est la matrice globale de capacité thermique, $[\bar{K}]$ et [G] sont les matrices des globales de conductivité thermique et {R} est le vecteur des sollicitations. Finalement, la solution du problème ci-dessus sera dictée par la résolution du système suivant (*Erchiqui, 2013*) :

$$\left\{ \frac{dH}{dt} \right\} [C']^{-1} \cdot [\bar{K}] \{H\} + [C']^{-1} \cdot [G] \cdot \{H^2\} = [C']^{-1} \cdot (\{R\} + \{Q\}) \quad 3.18$$

Pour la résolution dans le temps de chauffage, un schéma mono-pas implicite d'intégration en temps sera considérée (*Dokainish et Subbraj, 1989*).

2.1.5 Discrétisation temporelle

Les schémas d'approximation temporelle numérique constituent la base de la réponse transitoire et sont obtenus à l'aide des relations de récurrence entre $H(t)$ et $H(t + \nabla t)$ à deux instants t et $(t + \nabla t)$. La solution est obtenue une étape à l'autre à partir de $t = 0$ jusqu'à la durée finale t de la réponse transitoire.

En utilisant l'approximation d'Euler de la famille des différences finies pour le temps, on obtient que la solution de l'équation de la chaleur soit de la forme (Erchiqui, 2015)

$$H^{n+\theta} = (1 - \theta)H^\theta + \theta H^{n+\theta}, \text{ avec; } \theta = \frac{t-t_n}{\Delta t} \quad 3.19$$

$\theta \in [0 - 1]$ et θ est plus stable lorsque $\theta \leq 1/2$ et $O(\Delta t)$ sont exactes, à l'exception du cas de la convergence du Crank-Nicolson de $O(\Delta t^2)$, cas de $\theta = 1/2$. Le cas $\theta = 1$ conduit à la formulation d'Euler totalement implicite en premier ordre qui est, en effet, très stable, donc amplement favorisé pour l'intégration.

Dans notre étude, on choisit d'utiliser le cas du Crank-Nicolson en semi-implicite. Donc, l'équation de la chaleur devient;

$$(K_{n+1}^* + G_{n+1}^*)H_{n+1} = K_n^*H_n + G_n^*H_n^2 + R_{n,n+1}^* \quad 3.20$$

Avec :

K^*, G^* et R^* sont les matrices globales modifiées.

H_{n+1} est le vecteur d'enthalpies nodales globales à l'instant.

2.2 Milieu continu anisotrope

Le matériau bois est un matériau hautement anisotrope à l'opposition de plusieurs autres matériaux isotropes. La considération du caractère anisotrope est primordiale pour l'étude du chauffage d'une structure de bois car son comportement sera très différent du comportement de la structure considéré comme un milieu isotrope ce qui est très largement utilisée en pratique et ceci pour des raisons de simplification de calcul. Ce dernier entraîne une mauvaise évaluation des résultats.

Pour un matériau anisotrope, les propriétés fondamentales (mécaniques, thermiques et diélectriques, etc...) diffèrent considérablement selon la direction envisagée. Afin de résoudre numériquement ce type de problème, nous présenterons dans les prochaines sections l'approche qui sera considérée.

2.2.1 Équation d'énergie anisotrope en terme enthalpique

Considérons un système de coordonnées orthogonales à trois dimensions (x, y, z) comme référentiel. Selon la loi de conduction thermique de Fourier (Erchiqui, 2015), pour un matériau anisotrope linéaire et hétérogène, le tenseur de conductivité thermique relie le vecteur flux thermique au gradient de la température par les relations suivantes:

$$q_x = -k_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} - k_{xy} \frac{\partial T}{\partial y} - k_{xz} \frac{\partial T}{\partial z} \quad 3.21.a$$

$$q_y = -k_{yx} \frac{\partial T}{\partial x} - k_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} - k_{yz} \frac{\partial T}{\partial z} \quad 3.21.b$$

$$q_z = -k_{zx} \frac{\partial T}{\partial x} - k_{zy} \frac{\partial T}{\partial y} - k_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \quad 3.21$$

Le flux de chaleur dans une direction donnée est influencé uniquement par le gradient de température dans cette direction, donc, on a; $k_{ij} = 0 ; i \neq j$

En suivant une procédure semblable à celle présentée dans le paragraphe (3.1) pour la transformation de Kirchhoff (cas d'un milieu isotrope), en obtient pour un milieu anisotrope les expressions suivantes pour les transformations de Kirchhoff (associées aux conductivités thermiques) (Erchiqui, 2015):

$\forall T;$

$$\theta_x(T \leq T_m) = \int_{T_{ref}}^T k_x^s(T) dT \quad 3.22.a$$

$$\theta_y(T \leq T_m) = \int_{T_{ref}}^T k_y^s(T) dT \quad 3.22.b$$

$$\theta_z(T \leq T_m) = \int_{T_{ref}}^T k_z^s(T) dT \quad 3.22.c$$

et

$$\theta_x(T > T_m) = \int_{T_m}^T k_x^l(T) dT \quad 3.23.a$$

$$\theta_y(T > T_m) = \int_{T_m}^T k_y^l(T) dT \quad 3.23.b$$

$$\theta_z(T > T_m) = \int_{T_m}^T k_z^l(T) dT \quad 3.23.c$$

L'équation de chaleur est alors donnée par (Erchiqui, 2015);

$$\frac{\partial H(T)}{\partial T} = \left(\frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \theta_{ij}(T)}{\partial x_j} \right) + Q(T) \quad 3.24$$

Avec les conditions aux limites suivantes :

$$\left(n_x \frac{\partial \theta_x}{\partial x} + n_y \frac{\partial \theta_y}{\partial y} + n_z \frac{\partial \theta_z}{\partial z} \right) + h (T - T_\infty) - q n = 0 \quad 3.25$$

Où, q [W/m²] est le flux incident de chaleur

n est la normale sortante à la surface; $n = (n_x, n_y, n_z)$

h [W/m²/°C] est le coefficient de transfert de chaleur de la surface

T_∞ est la température du milieu environnant

Le transfert de la chaleur du matériau vers le milieu environnant est exprimé par le terme $h(T - T_\infty)$.

2.2.2 Équation anisotrope d'énergie en terme enthalpique hybride

La formulation présentée dans le paragraphe précédent est valable seulement pour les cas où le tenseur de conductivité thermique est de nature cartésien. Dans notre problème, le matériau à l'étude est le bois dont le tenseur de conductivité thermique est nature cylindrique. Pour remédier à cette situation, nous utiliserons la nouvelle approche proposée dans (Erchiqui, 2019) qui consiste à utiliser le même système cartésien pour traiter des matériaux anisotropes dont le tenseur de la conductivité est de nature cylindrique. L'approche d'enthalpie hybride a pour fin d'aborder les géométries complexes.

Pour cela, les composantes du tenseur cylindrique de la conductivité thermique du bois sont transformées, par une matrice de passage, et réécrites dans le système cartésien.

Ainsi, en considérant un système de coordonnées cylindriques, un point M peut être identifié par le rayon du cylindre ρ , sa dimension z par rapport au plan de référence xOy et l'angle ϕ (voir la Fig.14.) et caractérisé par un système de coordonnées orthonormé local cylindrique $(\hat{e}_\rho, \hat{e}_\phi, \hat{e}_z)$. En conséquence, les formules suivantes sont établies pour le tenseur de la conductivité en repère cartésien (Erchiqui, 2019):

$$\underline{k}_{xx}^{(\rho, \phi, z)} = k_{\rho\rho} \cos^2 \phi + k_{\phi\phi} \sin^2 \phi - k_{\rho\phi} \sin 2\phi \quad 3.26$$

$$\underline{k}_{xy}^{(\rho, \phi, z)} = \underline{k}_{yx}^{(\rho, \phi, z)} = \frac{1}{2} (k_{\rho\rho} - k_{\phi\phi}) \sin 2\phi + k_{\rho\phi} \cos 2\phi \quad 3.27$$

$$\underline{k}_{xz}^{(\rho, \phi, z)} = \underline{k}_{zx}^{(\rho, \phi, z)} = \cos \theta k_{\rho z} - \sin \phi k_{\rho\phi} \quad 3.28$$

$$\underline{k}_{yy}^{(\rho, \phi, z)} = k_{\rho\rho} \sin^2 \phi + k_{\phi\phi} \cos^2 \phi + k_{\rho\phi} \sin 2\phi \quad 3.29$$

$$\underline{k}_{yz}^{(\rho, \phi, z)} = \underline{k}_{zy}^{(\rho, \phi, z)} = \sin \theta k_{\rho z} + \cos \phi k_{\rho\phi} \quad 3.30$$

$$\underline{k}_{zz}^{(\rho, \phi, z)} = k_{zz} \quad 3.31$$

Les expressions de la transformation de Kirchhoff anisotrope sont alors données par (Erchiqui, 2019)

$\forall T;$

$$\underline{\theta}_{xx}(T \leq T_m) = \int_{T_{ref}}^T \underline{k}_{xx}^{(\rho, \phi, z)^s}(T) dT \quad 3.32.a$$

$$\theta_{xy}(T \leq T_m) = \int_{T_{ref}}^T \underline{k}_{xy}^{(\rho, \phi, z)^s}(T) dT \quad 3.32.b$$

$$\theta_{yy}(T \leq T_m) = \int_{T_{ref}}^T \underline{k}_{yy}^{(\rho, \phi, z)^s}(T) dT \quad 3.32.c$$

$$\theta_{yz}(T \leq T_m) = \int_{T_{ref}}^T \underline{k}_{yz}^{(\rho, \phi, z)^s}(T) dT \quad 3.32.d$$

$$\theta_{zz}(T \leq T_m) = \int_{T_{ref}}^T \underline{k}_{zz}^{(\rho, \phi, z)^s}(T) dT \quad 3.32.e$$

$$\theta_{xz}(T \leq T_m) = \int_{T_{ref}}^T \underline{k}_{xz}^{(\rho, \phi, z)^s} dT \quad 3.32.f$$

et

$$\underline{\theta}_{xx}(T > T_m) = \int_{T_m}^T \underline{k}_{xx}^{(\rho, \phi, z)^l}(T) dT \quad 3.33.a$$

$$\theta_{xy}(T > T_m) = \int_{T_m}^T \underline{k}_{xy}^{(\rho, \phi, z)^l}(T) dT \quad 3.33.b$$

$$\theta_{yy}(T > T_m) = \int_{T_m}^T \underline{k}_{yy}^{(\rho, \phi, z)^l}(T) dT \quad 3.33.c$$

$$\theta_{yz}(T > T_m) = \int_{T_m}^T \underline{k}_{yz}^{(\rho, \phi, z)^l}(T) dT \quad 3.33.d$$

$$\theta_{zz}(T > T_m) = \int_{T_m}^T \underline{k}_{zz}^{(\rho, \phi, z)^l}(T) dT \quad 3.33.e$$

$$\theta_{xz}(T > T_m) = \int_{T_m}^T \underline{k}_{xz}^{(\rho, \phi, z)^l}(T) dT \quad 3.33.f$$

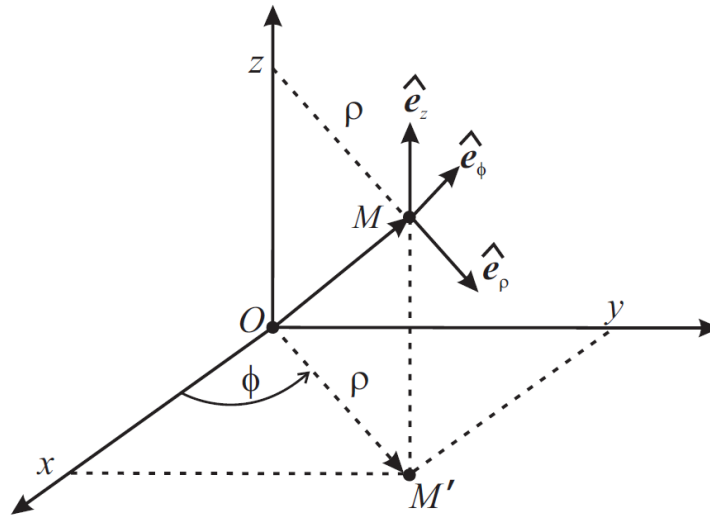


Figure 14. Présentation d'un vecteur en système cylindrique vis-à-vis d'un système cartésien

Dans ce cas, l'équation de chaleur est alors donnée par la nouvelle expression (Erchiqui, 2019);

$$\frac{\partial H(T)}{\partial T} = \left(\frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \theta_{ij}(T)}{\partial x_j} \right) + Q(T) \quad 3.34$$

Où les expressions de θ_{ij} sont données par les formules (3.33)

2.2.3 Formulation par éléments finis de l'équation anisotrope d'énergie

Les mêmes schémas d'approximation spatiale (2.1.3.1) et temporelle (2.1.3.2) utilisés dans les paragraphes ci-dessus sont considérés pour la simulation.

2.2.4 Validation numérique et expérimentale

Dans cette section, dans le cas de dégel du bois, on s'intéresse à la validation numérique de l'équation de la chaleur à l'aide de l'approche enthalpique vis-à-vis le Logiciel Abaqus et des résultats expérimentaux (Peralta, 2006). Pour cela nous considérons la démarche suivante :

- i) S'assurer de la qualité du maillage utilisé pour la simulation numérique 3D.
- ii) S'assurer de la conformité des résultats numérique obtenus par ThermoForm vis-à-vis le Logiciel commercial Abaqus
- iii) Valider les résultats numériques obtenus par *ThermoForm* vis-à-vis l'expérimental pour une essence du bois non canadien

2.2.4.1 Validation numérique par Abaqus

Pour la validation de l'approche proposée, nous considérons un tronc d'arbre de 20 cm de rayon dont la température initiale est -22°C et la température imposée est 55°C . Les propriétés thermophysiques du tronc d'arbre sont données dans (Erchiqui, 2015).

i- Choix de maillage et validation

Dans un premier temps, pour s'assurer de la convergence des résultats à l'aide du Logiciel Abaqus, nous avons utilisé deux maillages (Maillage raffiné et maillage non raffiné) pour la simulation. Les résultats obtenus convergent. Ensuite, dans un deuxième temps, nous avons confronté les résultats obtenus avec ceux fournis dans (Erchiqui, 2015).

La figure 15 illustre les résultats obtenus dans le temps, au nœud central du tronc d'arbre, vis-à-vis les deux maillages (raffiné et non raffiné). Les résultats obtenus sont comparables (convergent). A La figure 16, on présente une vue de la distribution de la température.

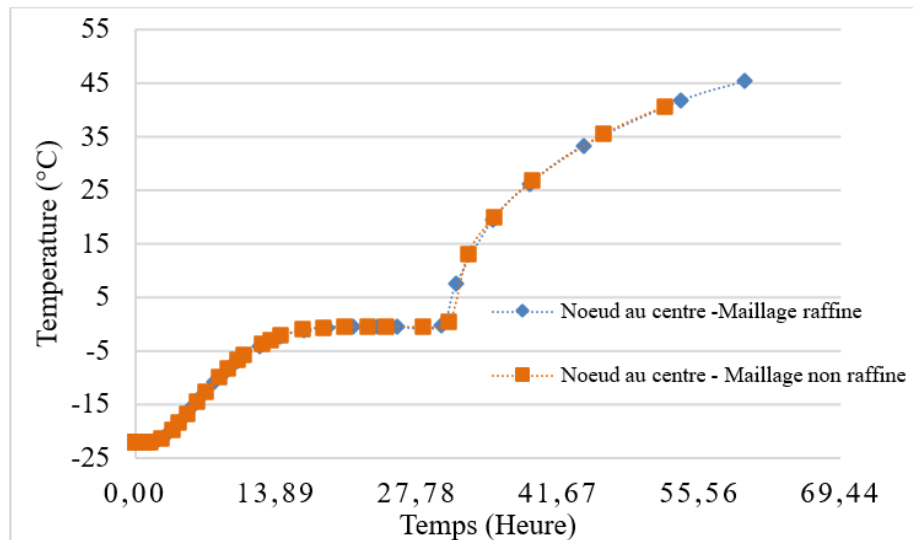


Figure 15. Évolution de la température dans le temps dans le tronc d'arbre par Abaqus pour deux types de maillages

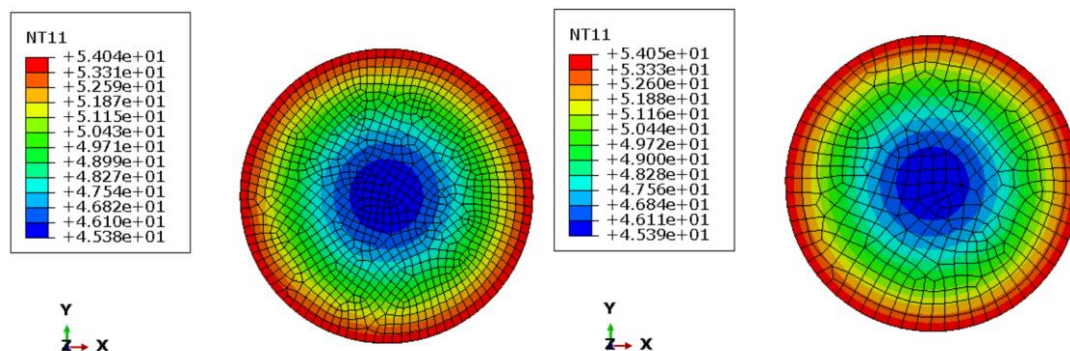


Figure 16. Température (°C) au centre du tronc de l'arbre – maillage raffiné (à gauche) et maillage non raffiné (à droite)

La figure 17 représente l'évolution des températures en trois endroits du tronc d'arbre : centre, bord et la position médiane entre le bord et le centre (dite milieu). L'allure des courbes obtenu par Abaqus sont similaires à celles présentées dans (Erchiqui, 2019). La figure 18 illustre une comparaison entre les résultats numériques obtenus par Abaqus et des résultats obtenus par ThermoForm (Erchiqui, 2015). On remarque une similarité entre les résultats.

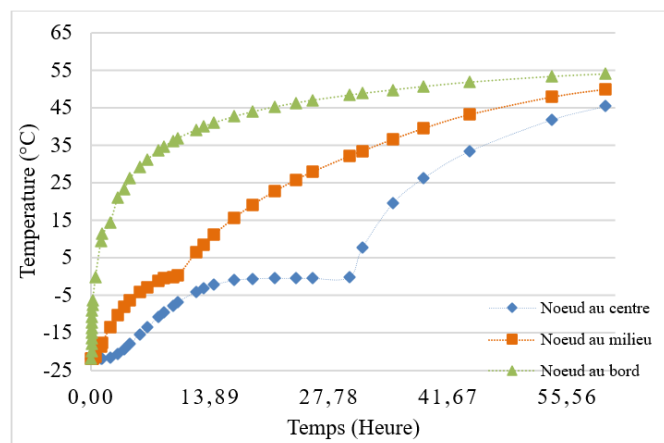


Figure 17. Température (°C) Vs temps (s) pour trois différentes positions dans le tronc d'arbre

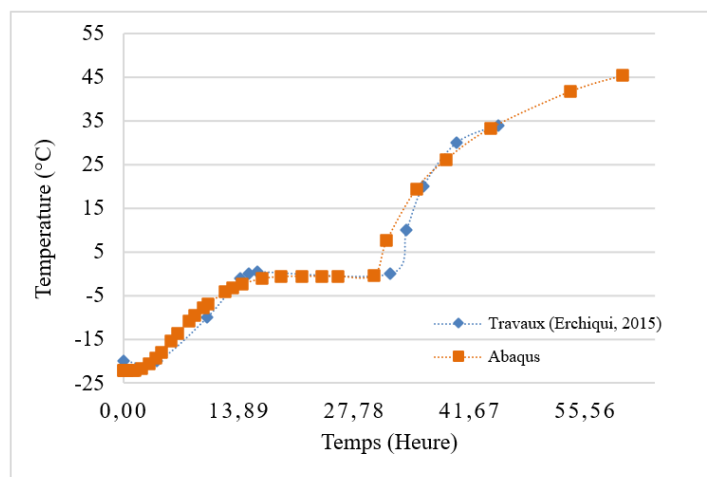


Figure 18. Validation des travaux de (Erchiqui, 2015) par Abaqus.

2.2.4.2 Validation expérimentale

Nous considérons d'abord les mesures expérimentales de température obtenues pour le chauffage transitoire de bûches congelées (Peralta, 2006). Il s'agit de chauffer une bûche de pin blanc (rayon du tronc est de 0,2285 m et sa température initiale est de -23°C) immergé dans de l'eau à une température de 54°C . Dans (Peralta, 2006), on suppose que le bois est soumis à un chauffage orthotrope (radial et longitudinal). Le temps de chauffage est de 60 heures. Les propriétés thermo-physiques du matériau bois sont données dans (Peralta, 2006).

Pour l'analyse par éléments finis, à l'aide de *ThermoForm*, nous considérons un maillage 3D (11099 nœuds et 9800 éléments de type hexaèdre de 8 nœuds). La figure 19 illustre le maillage.

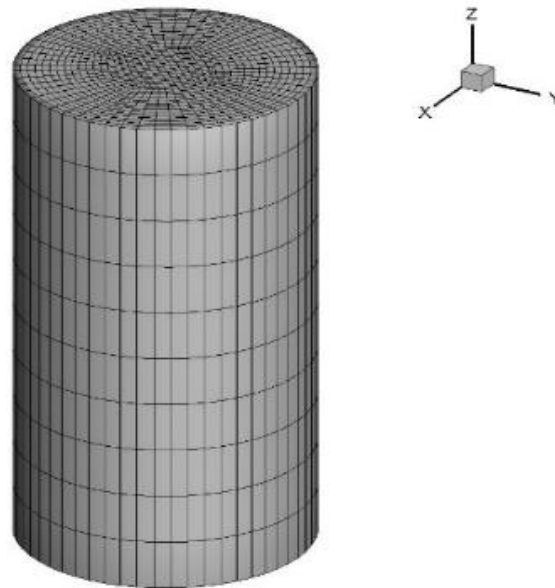


Figure 19. Maillage cylindrique (3D)

Dans la Figure 20. Nous avons présenté la température en fonction du temps de chauffage pour trois points différents situés à 22,9 cm

(emplacement 1), 10,2 cm (emplacement 2) et à 2,5 cm (emplacement 3) de la surface d'une grume de pin blanc. Les résultats numériques pour le chauffage du bois congelé ont montré un excellent accord entre les données expérimentales (Peralta, 2006) et numériques (ThermoForm).

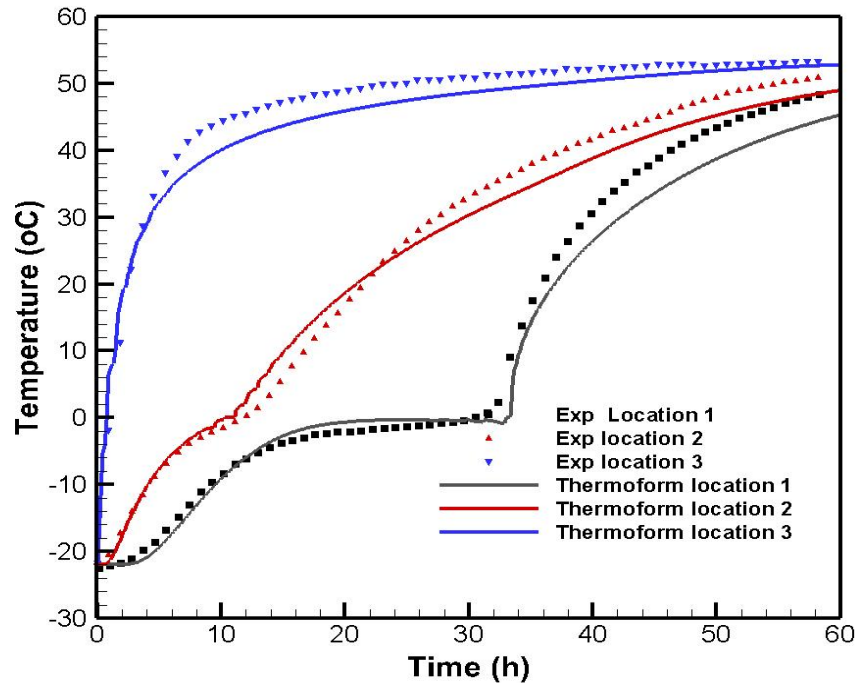


Figure 20. Température expérimentale et numérique en fonction du temps de chauffage pour trois points différents situés à la surface d'une grume de pin blanc.

Finalement sur la figure 21, on a réalisé une comparaison entre les résultats obtenus par *Abaqus*, par *ThermoForm* et par les travaux expérimentaux de (Peralta, 2006) pour le centre du tronc. Encore une fois, les résultats s'accordent très bien.

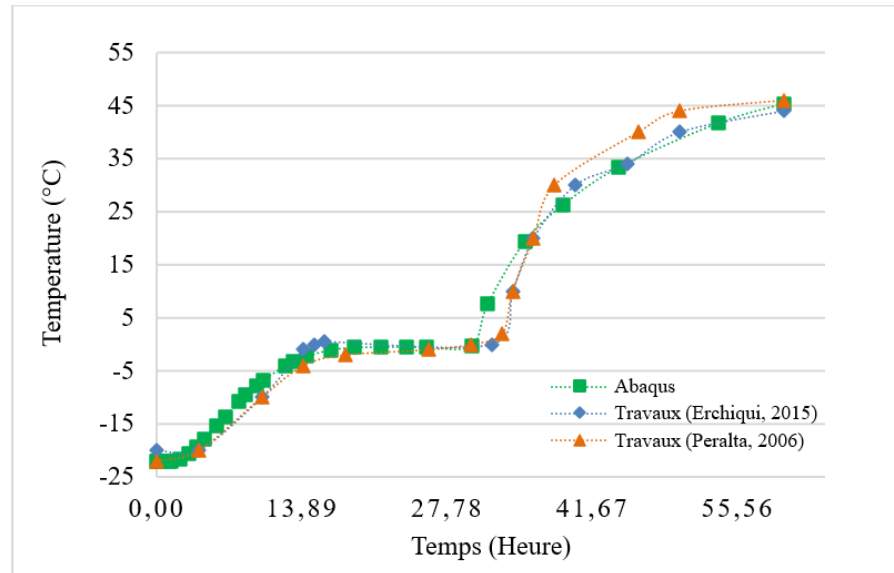


Figure 21. Validation des travaux de (Peralta, 2006), ThermoForm et d'Abaqus

2.2.5 Validation numérique pour le cas d'une essence du bois Canadien

Pour le maillage qui sera retenu pour le chapitre d'application de la méthode hybride par éléments finis, nous considérons le Peuplier Faux Tremple à MC= 35%.

L'analyse est réalisée sur un tronc d'arbre de 0.25 m de diamètre et de 0.5 m de longueur. Pour s'assurer de la qualité du maillage sur la convergence des résultats numériques, par l'entremise de ThermoForm, nous considérons deux types de maillage :

i) maillage grossier (de taille 0.015m avec 10197 éléments), Voir Figure 22

ii) maillage raffiné (de taille 0.009m avec 47544 éléments) voir figure 23.

La température initiale du tronc d'arbre est -20°C. Ensuite, le tronc d'arbre est émergé dans l'eau à 55°C. Le temps de la simulation est 60 heures.

Les propriétés thermophysique du bois utilisés sont données dans la table 3 ci-dessous.

	$T < 0$	$T > 0$
Densité [Kg/ m^3]	$\rho = 472,5$	$\rho = 472,5$
K radiale [W/ $m^{\circ}C$]	$k_r = 0.1718 - 0.000651 * T$	$k_r = 0.166 + 0.000485 * T$
K longitudinale [W/ $m^{\circ}C$]	$k_l = 0.4296 - 0.00162 * T$	$k_l = 0.4151 + 0.001212 * T$
K transversale [W/ $m^{\circ}C$]	$k_t = 0.1909 - 0.000723 * T$	$k_t = 0.1845 + 0.0005388 * T$
Enthalpie latente [KJ/ m^3]	$L = 13360$	$L = 13360$
Cp [J/Kg $^{\circ}C$]	$C_p = 2280 + 16.6 * T$	$C_p = 2304.85 + 4.98 * T$

Tableau 3. Propriétés thermo-physique de peuplier Faux tremple avec MC=35%

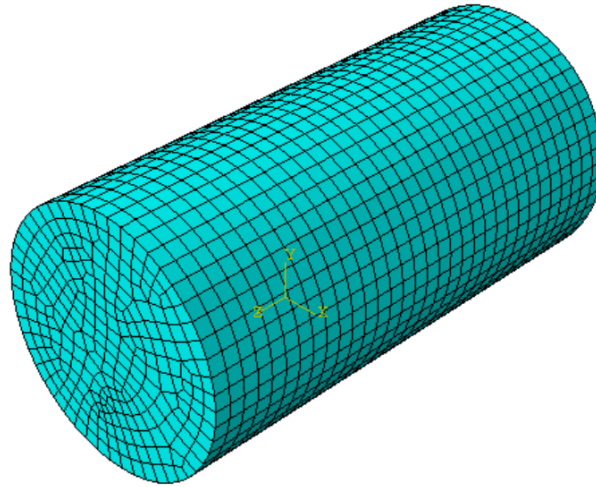


Figure 22. Maillage du tronc d'arbre non raffiné

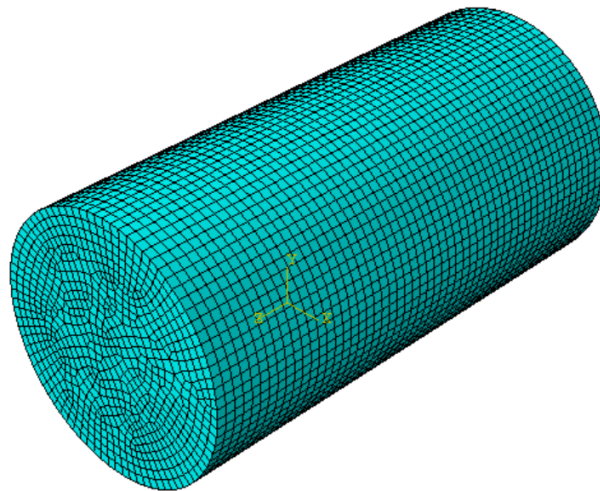


Figure 23. Maillage du tronc d'arbre raffiné

On observe que les résultats des maillages raffiné et non raffiné sont pratiquement similaire (Figure 24). Par la suite, nous considérons le maillage non raffiné pour les simulations.

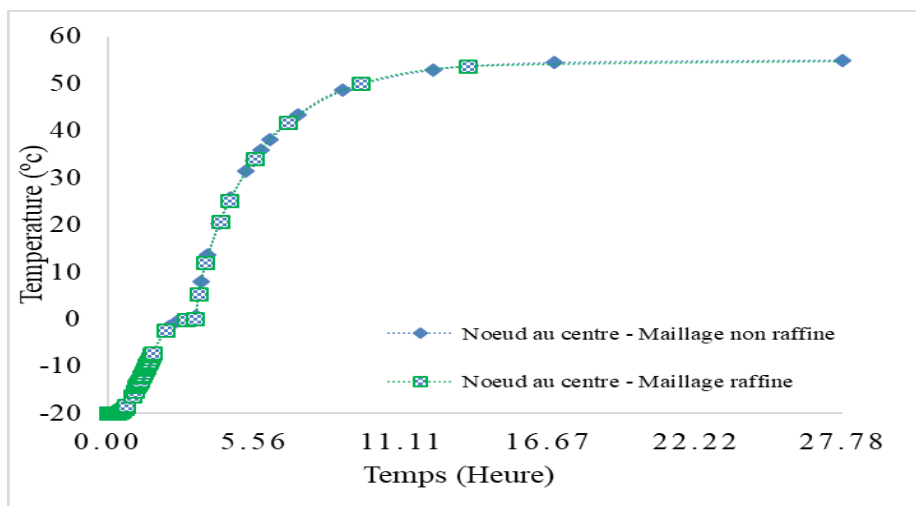


Figure 24. Evolution de la température pour différentes positions dans l'arbre (chauffage jusqu'à 55°C)

La courbe de dégel et de chauffage présente un palier dû à l'emploi de l'énergie Latente qui correspond à fusion de la quantité d'eau glacé présente dans le bois (MC=35%). Le chauffage nécessite une durée de 15h pour atteindre la température de 55°C. La figure 25 illustre une vue de la distribution de la température sur une coupe latérale du bois.

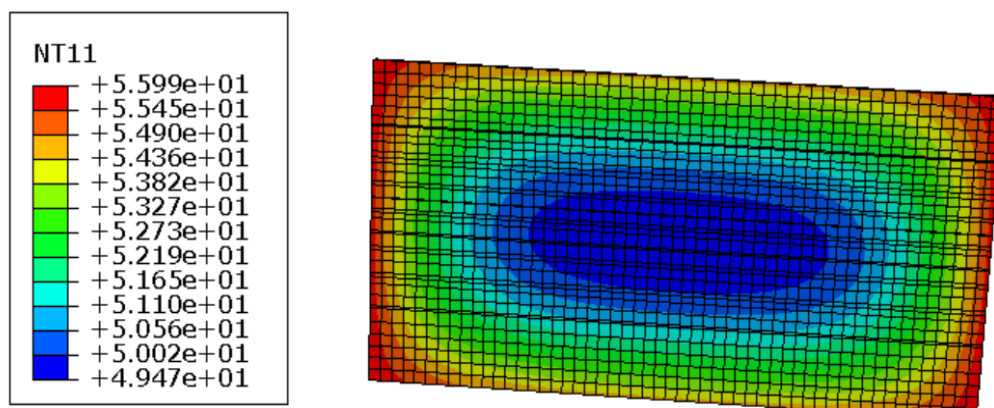


Figure 25. Distribution de la température dans le tronc d'arbre (chauffage jusqu'à 55°C)

En conclusion, le maillage non raffiné, ici-haut établi, sera considéré par le chapitre d'application qui suivra.

3 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

Dans cette partie, on s'intéresse à l'application de la méthode de l'élément finis à base d'enthalpie hybride pour le dégel et le chauffage de quatre essences de bois canadien (Peuplier Faux Tremble, Bouleau Blanc, Bouleau Jaune, Érable à Sucre) à partir de la température de -22°C jusqu'à 60°C . Les propriétés thermo-physiques des quatre espèces du bois, pour différentes humidités, sont données dans l'Annexe A.

Pour les quatre essences du bois on considère la même géométrie que précédemment ; un tronc d'arbre de forme cylindrique de diamètre de 0.25m et de longueur de 0.5m qui sera émergée dans un liquide assimilé à l'eau qui se trouve à la température 60°C . Du point de vue numérique, on a utilisé un maillage 3D tel que présenté dans la figure ci-dessous :

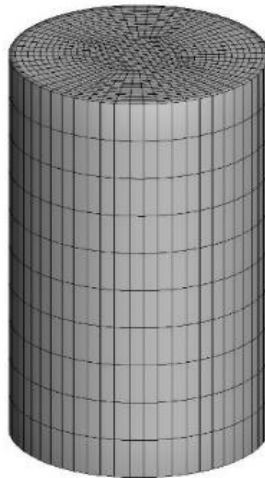


Figure 26. Maillage de la géométrie

Les simulations numériques ont été réalisées avec le code *ThermoForm* en vue de déterminer le temps du dégel et du chauffage nécessaire selon la teneur en humidité présente.

3.1 Caractérisation du temps de chauffage des essences du bois gelé

Dans cette section, on expose les résultats obtenus du code de calcul *ThermoForm* et ils sont repartis selon les détails les plus intéressants pour le travail.

Les Figures 27, 28, 29 et 30 illustrent les évolutions des températures pour les quatre essences du bois utilisé. On observe pour chaque essence du bois que la température suit une loi croissante en fonction du temps et que le temps du dégel dépend de la teneur en humidité. Toutefois, le temps du dégel varie aussi en fonction de l'essence du bois envisagés.

i. Peuplier Faux Tremble

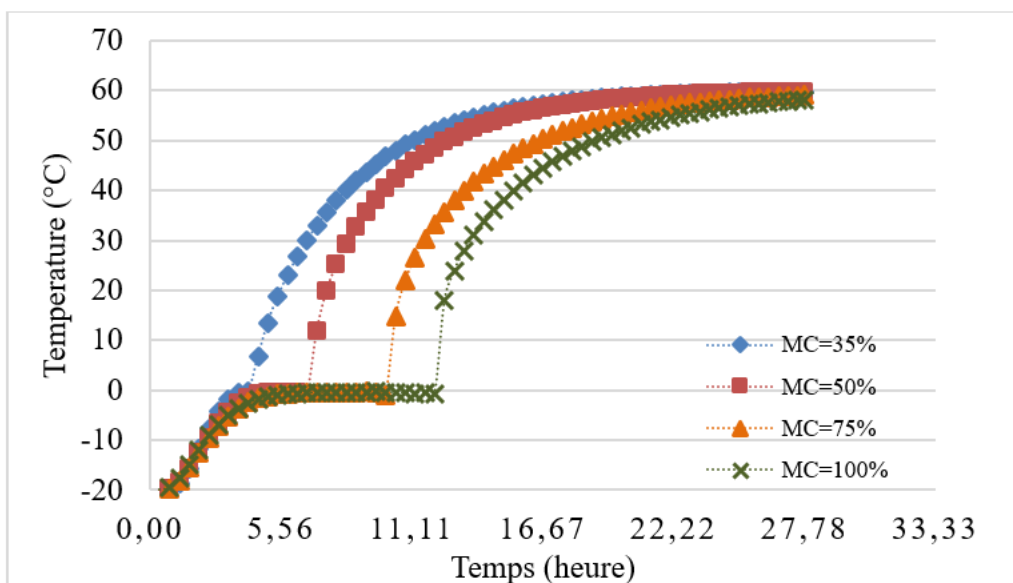


Figure 27. Effet de MC sur le dégel et le chauffage du Peuplier Faux Tremble

ii. Bouleau Blanc

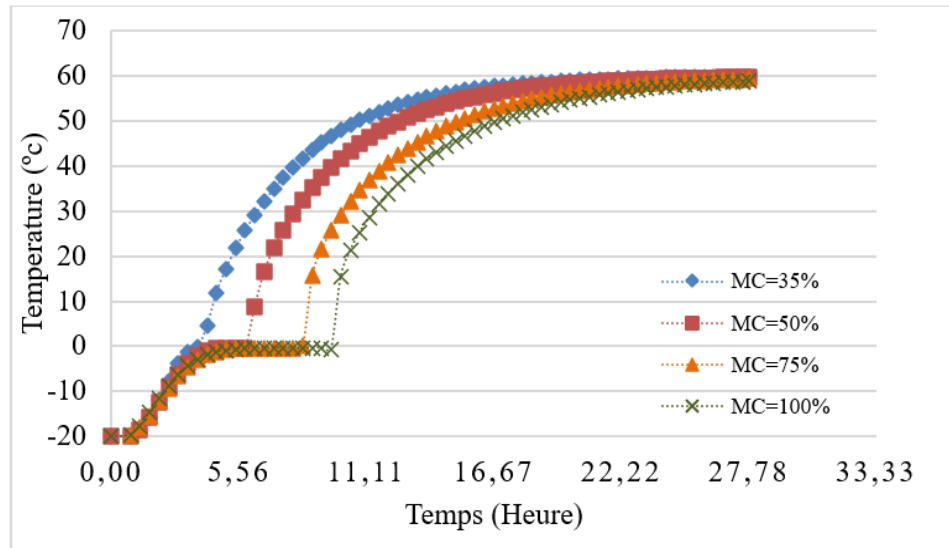


Figure 28. Effet de MC sur le dégel et le chauffage du Bouleau Blanc

iii. Bouleau Jaune

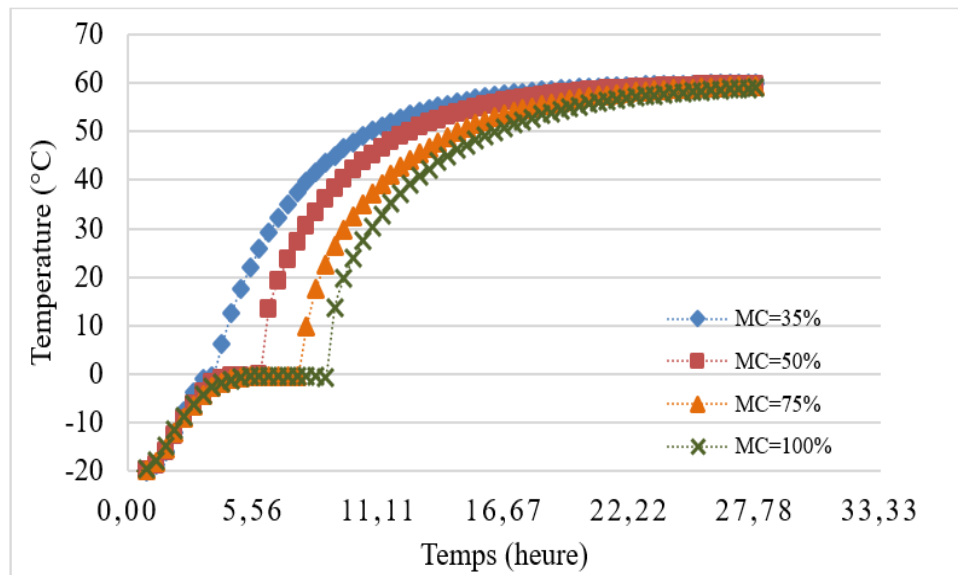


Figure 29. Effet de MC sur le dégel et le chauffage du Bouleau Jaune

iv. Érable à Sucre

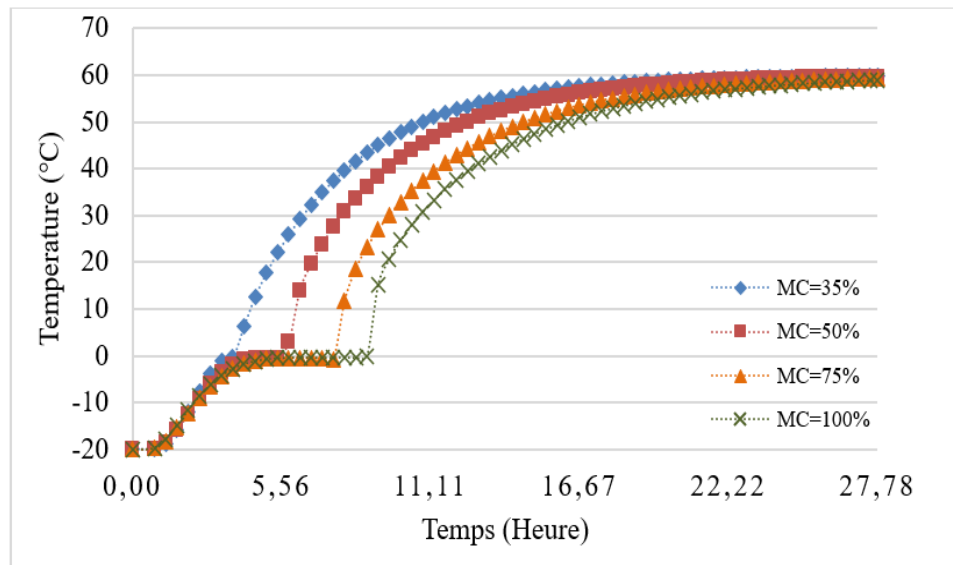


Figure 30. Effet de MC sur le dégel et le chauffage de l'Érable à Sucre

Les figures 31 à 38 illustrent des vues, pour différents moments (1h, 6h, 12h, 18h) de la distribution des températures pour les quatre essences du bois et cela pour une teneur en humidité de 35% et de 100%. Selon l'ensemble de ces figures (31-38), on remarque que pour l'instant $t=6h$ et pour une teneur en humidité de 35%, le Peuplier faux Tremble nécessite plus de temps de dégel que les autres essences du bois et la température atteinte est entre 27°C au centre et 60°C au bord. D'autre part, à l'instant $t=6h$ et pour une teneur en humidité de 100%, on remarque que le Peuplier Faux Tremble nécessite toujours plus de temps de dégel que, respectivement, le Bouleau Blanc, le Bouleau Jaune et l'Érable à Sucre et que la température atteinte est entre 0°C au centre et 60°C au bord. Entre autres, ceci indique que plus la teneur en humidité augmente plus le temps

du dégel augmente. De même, on remarque que les essences du bois possédant une densité plus grande nécessitent plus de temps de dégel.

i. Pour MC= 35% :

i. Quatre essences de bois pour MC=35% et t=1h :

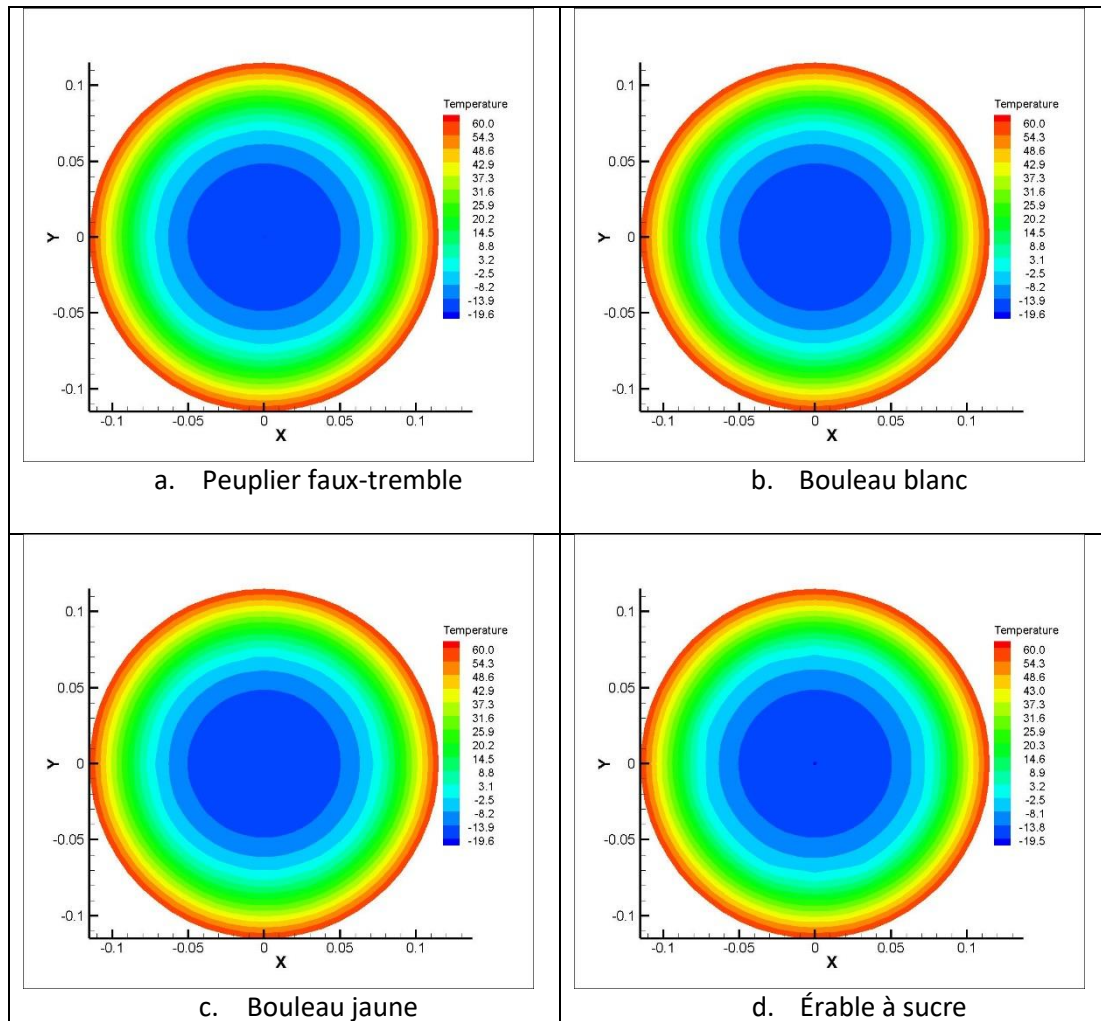


Figure 31. Effet de MC= 35% sur les essences du bois pour t=1h

ii. Quatre essences de bois pour MC=35% et t=6h :

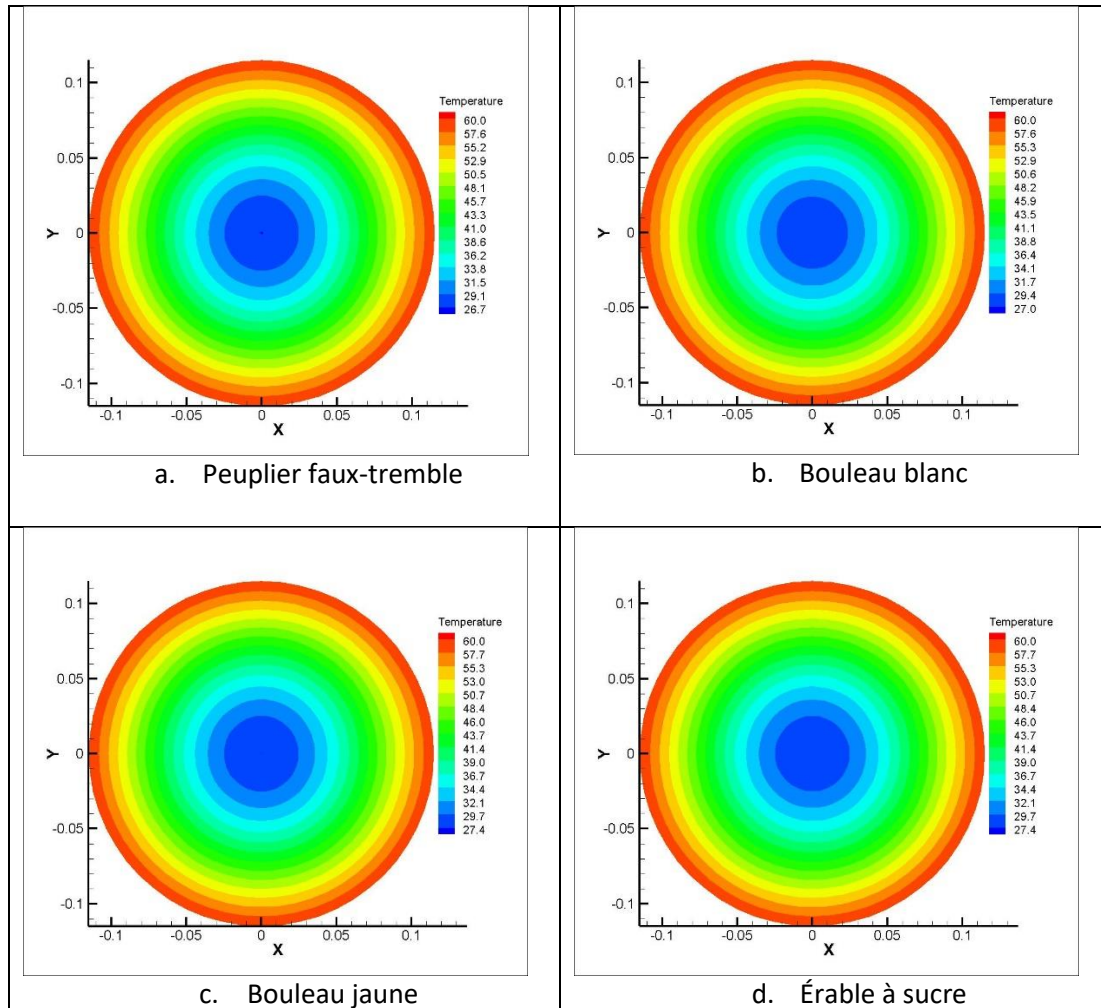


Figure 32. Effet de MC= 35% sur les essences du bois pour t=6h

iii. Quatre essences de bois pour MC=35% et t=12h :

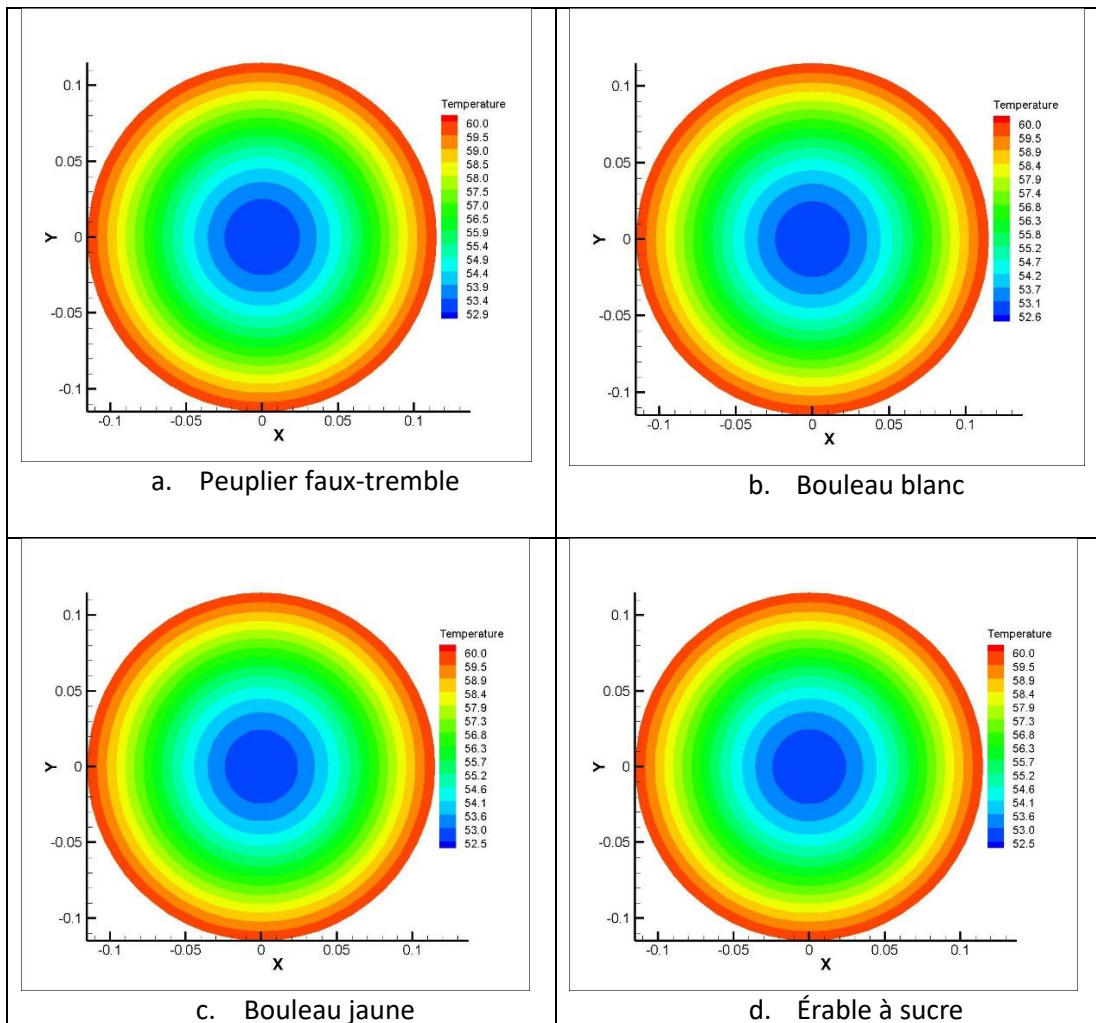


Figure 33. Effet de MC= 35% sur les essences du bois pour t=12h

iv. Quatre essences de bois pour MC=35% et t=18h :

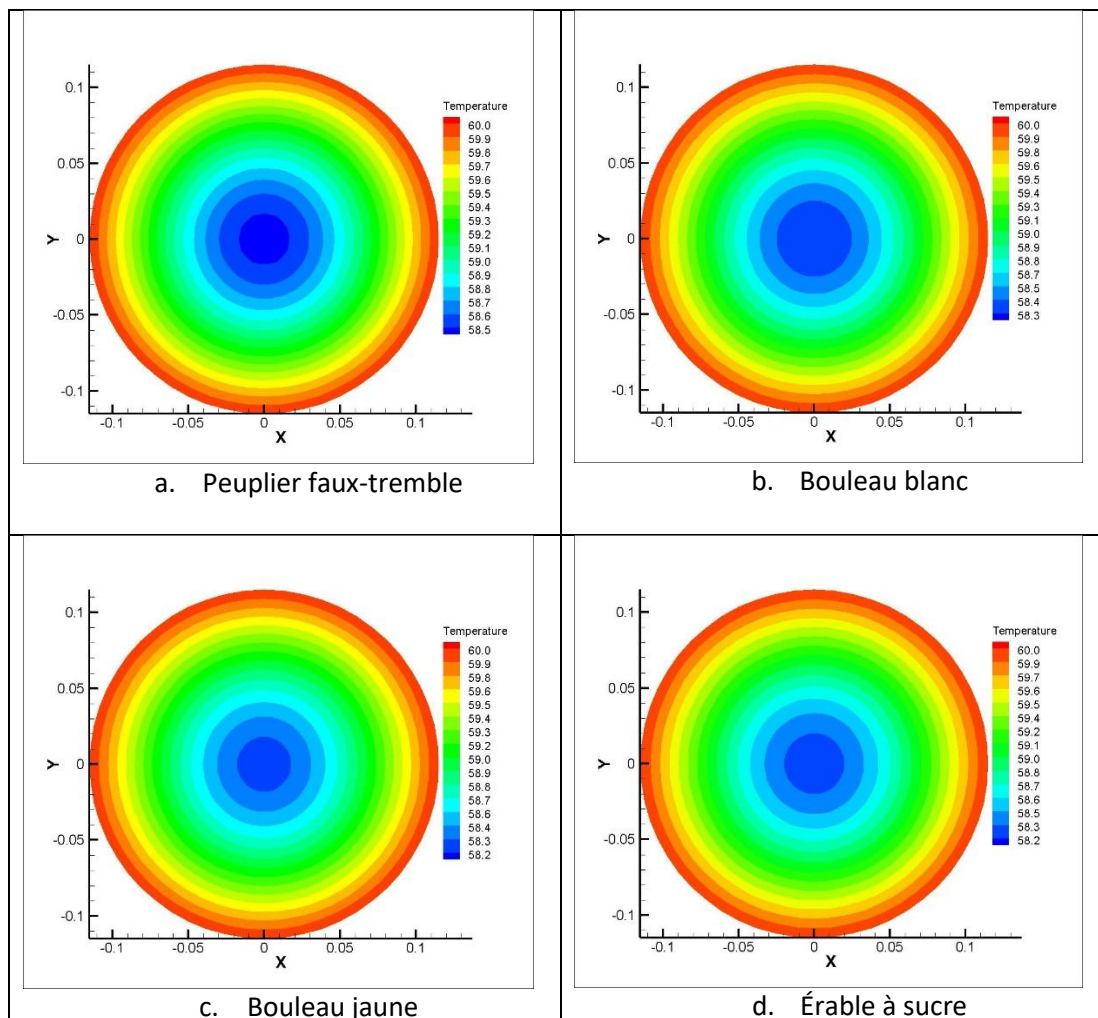


Figure 34. Effet de MC= 35% sur les essences du bois pour t=18h

ii. Pour MC=100%

i. Quatre essences de bois pour MC=100% et t=1h :

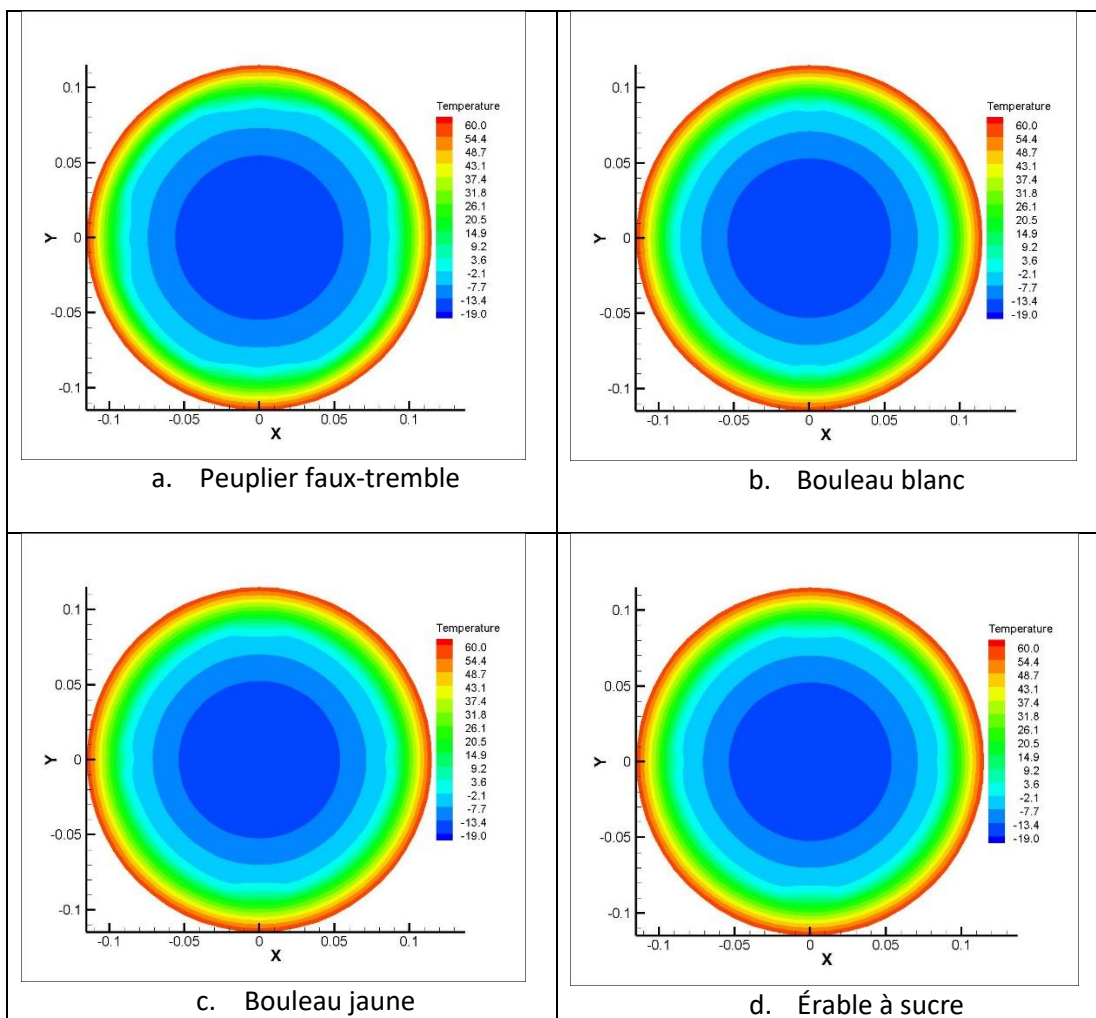


Figure 35. Effet de MC= 35% sur les essences du bois pour t=18h

ii. Quatre essences de bois pour MC=100% et t=6h :

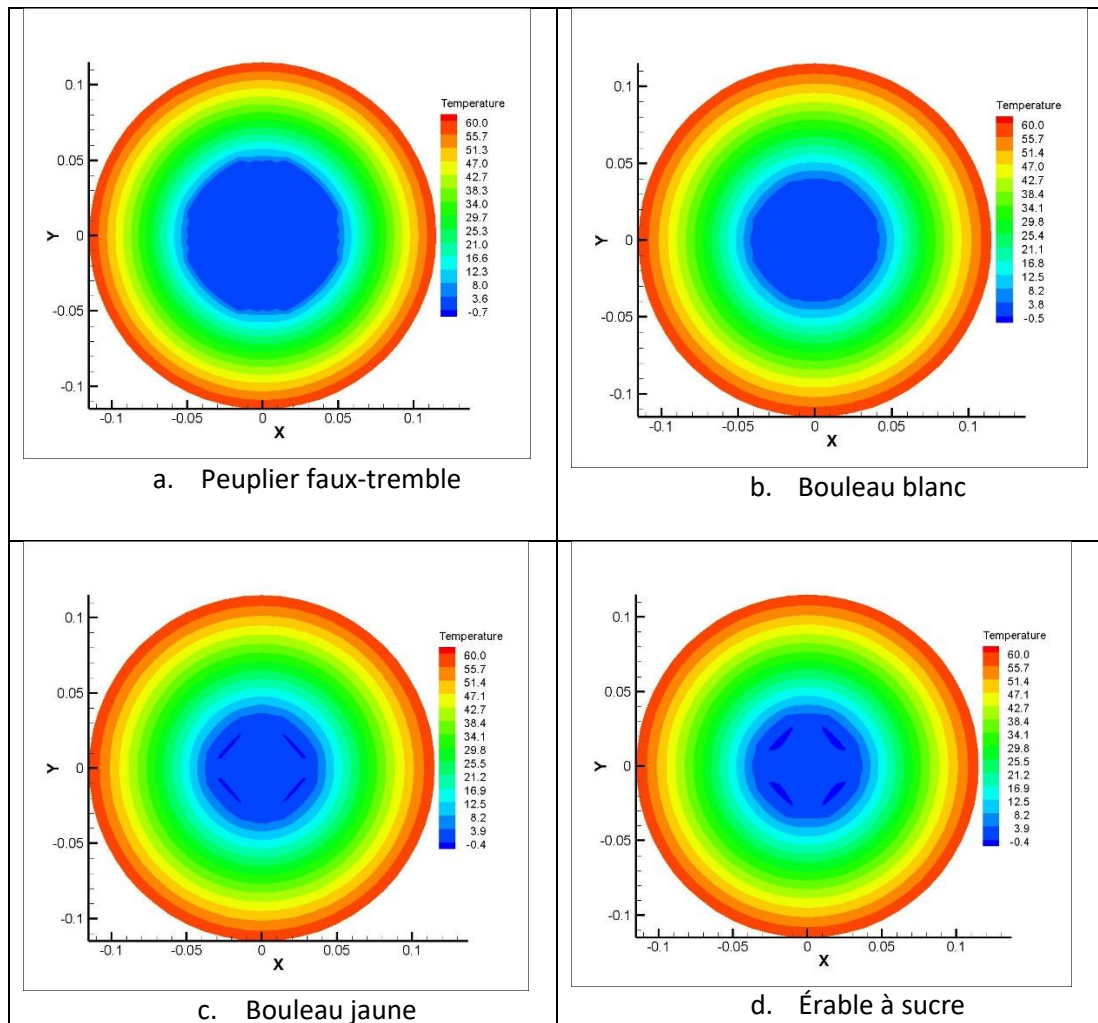


Figure 36. Effet de MC= 100% sur les essences du bois pour t=6h

iii. Quatre essences de bois pour MC=100% et t=12h :

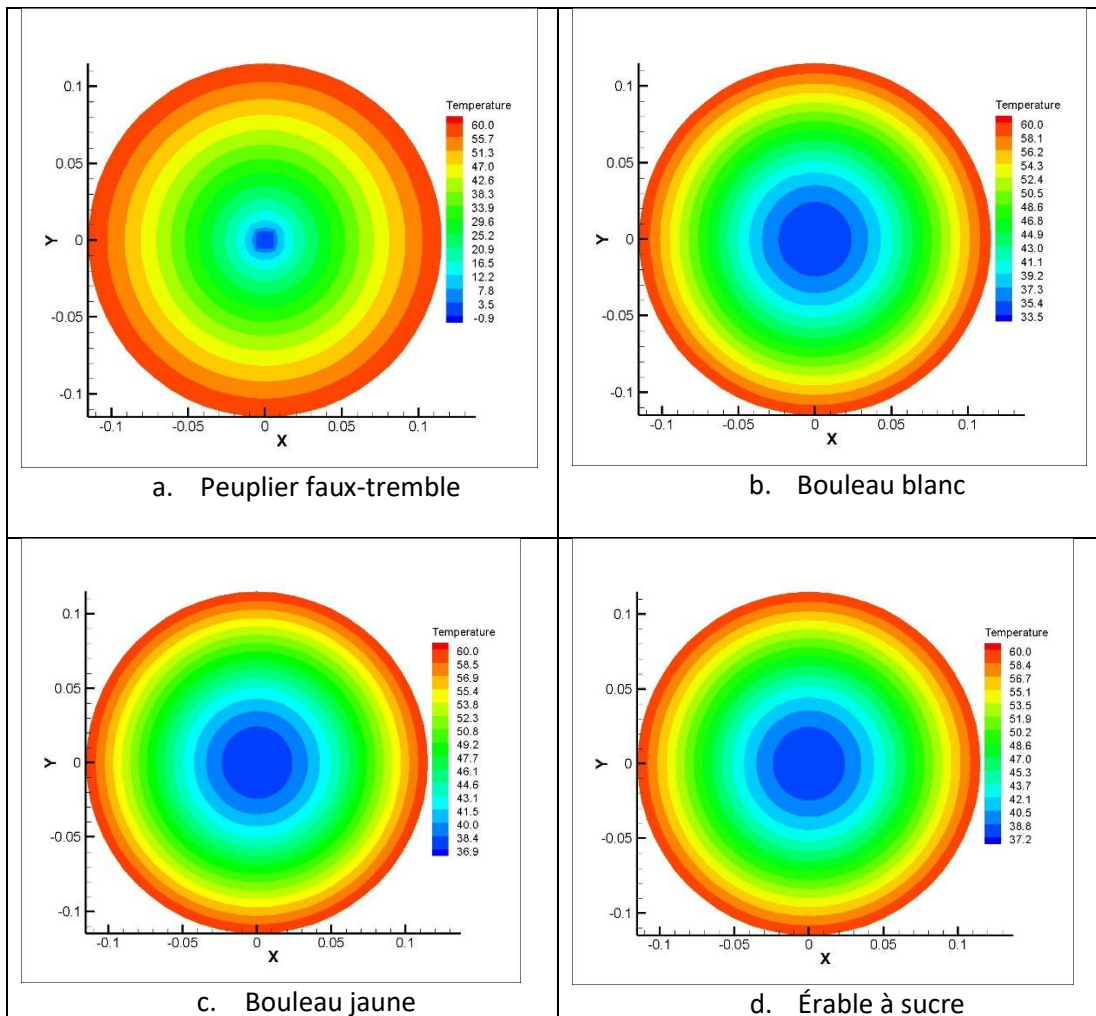


Figure 37. Effet de MC= 100% sur les essences du bois pour t=12h

iv. Quatre essences de bois pour MC=100% et t=18h :

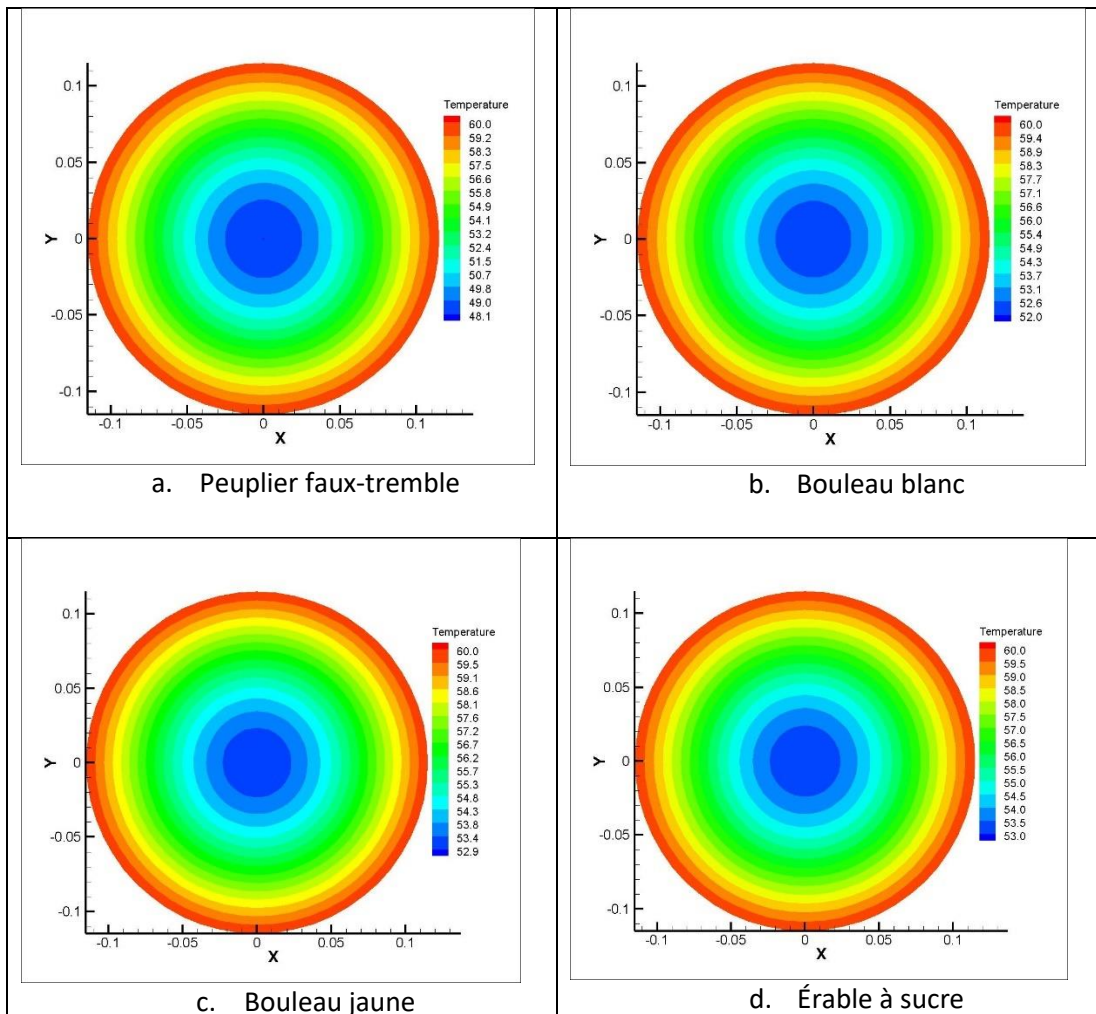


Figure 38. Effet de MC= 100% sur les essences du bois pour t=18h

3.1.1 Effet de la teneur en humidité (MC) sur le dégel du bois :

Les Figures ci-dessous illustrent l'évolution des températures jusqu'à fusion de chaque essence de bois en fonction de la teneur en humidité.

On observe que, pour les toutes les essences du bois; les courbes du dégel (Figure 39, Figure 41, Figure 43 et Figure 45) présentent une pente plutôt linéaire de -20°C jusqu'à 0° (zéro négatif) et qui varie de façon décroissante en fonction de la teneur en humidité (de $\text{MC}= 35\%$ jusqu'à $\text{MC}= 100\%$). Ceci est bien justifié étant donné que plus la teneur en humidité dans le bois est importante et nécessite plus l'énergie au dégel, et par conséquent plus le temps de dégel est long.

i. Peuplier Faux Tremble :

Le temps de dégel du Peuplier Faux Tremble varie selon la teneur en humidité et passe de 4h30 pour une teneur en humidité de 35% jusqu'à 12h pour une teneur en humidité de 100% (Figure 40).

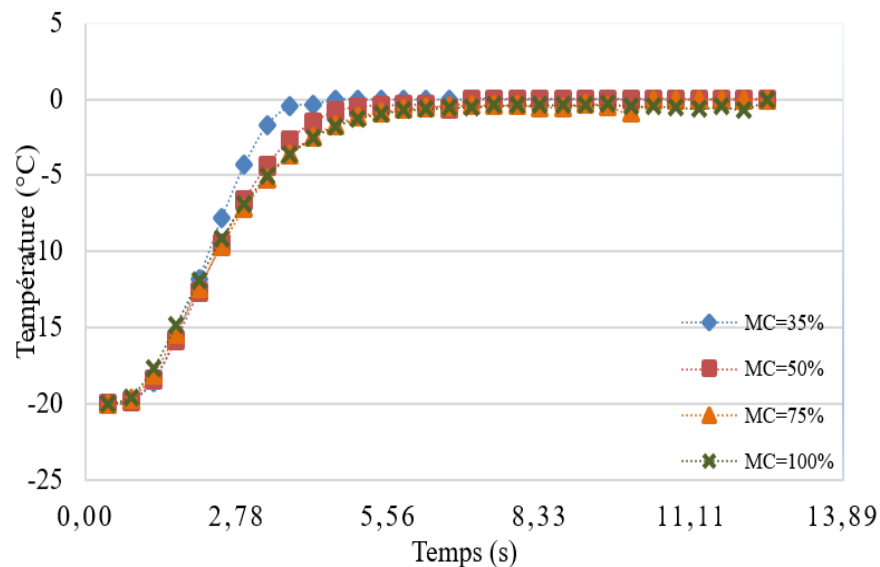


Figure 39. Effet de MC sur le dégel du Peuplier Faux Tremble

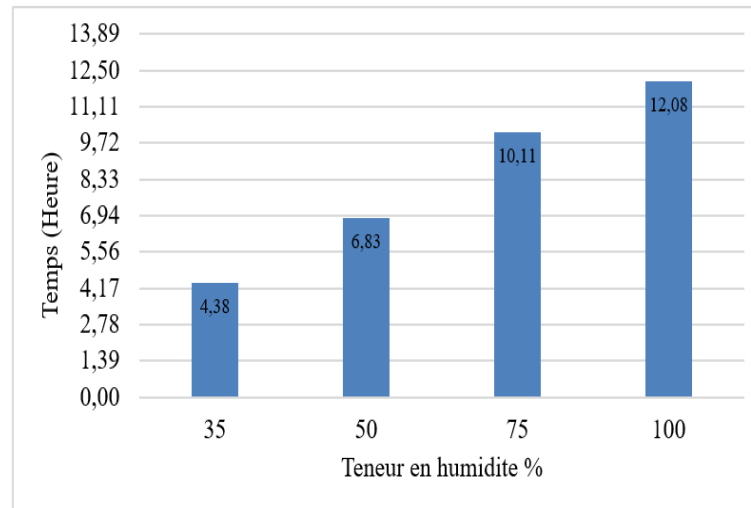


Figure 40. Temps du dégel du Peuplier Faux Tremble vs MC

ii. Bouleau Blanc

Le Bouleau Blanc nécessite un temps de dégel de 4h pour une teneur en humidité de 35% et franchi 9h30 pour une teneur en humidité de 100% (Figure 42).

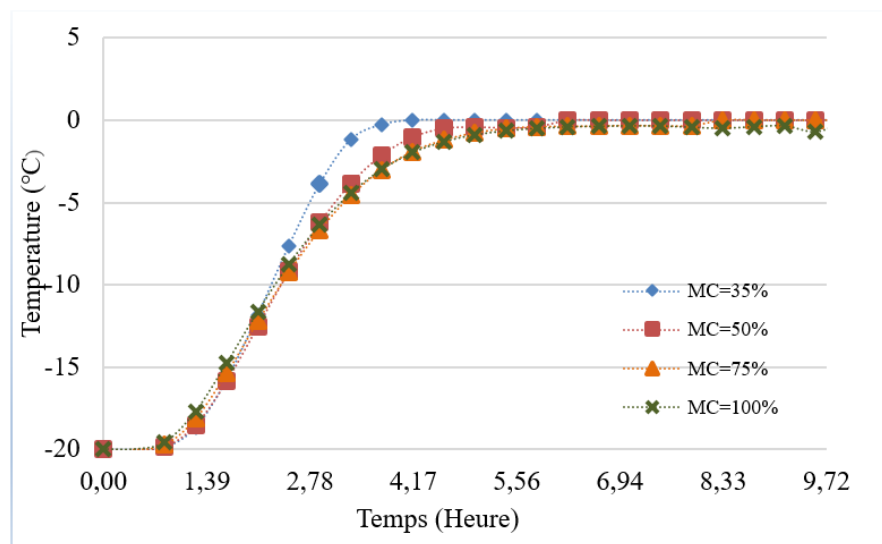


Figure 41. Effet de MC sur le dégel du Bouleau Blanc

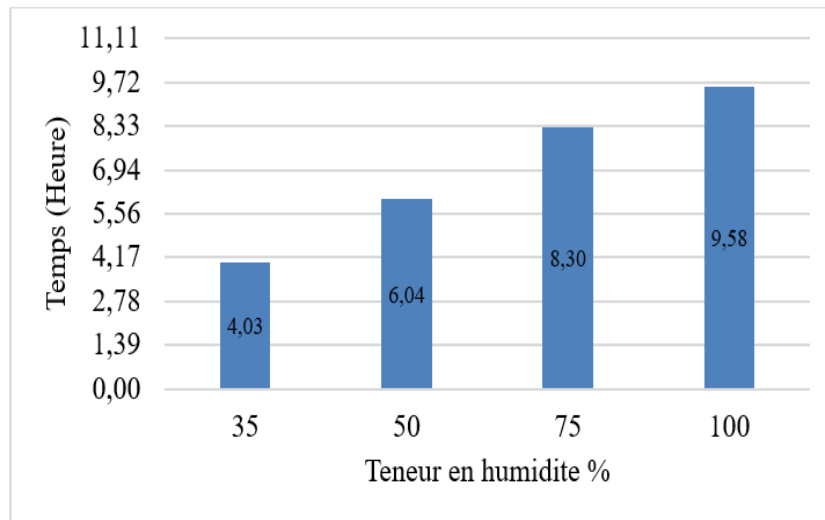


Figure 42. Temps du dégel du Bouleau Blanc en fonction du MC

iii. Bouleau Jaune

Le temps de dégel du Bouleau Jaune est compris entre 4h et 9h pour une teneur en humidité qui varie de 35% à 100% (Figure 44).

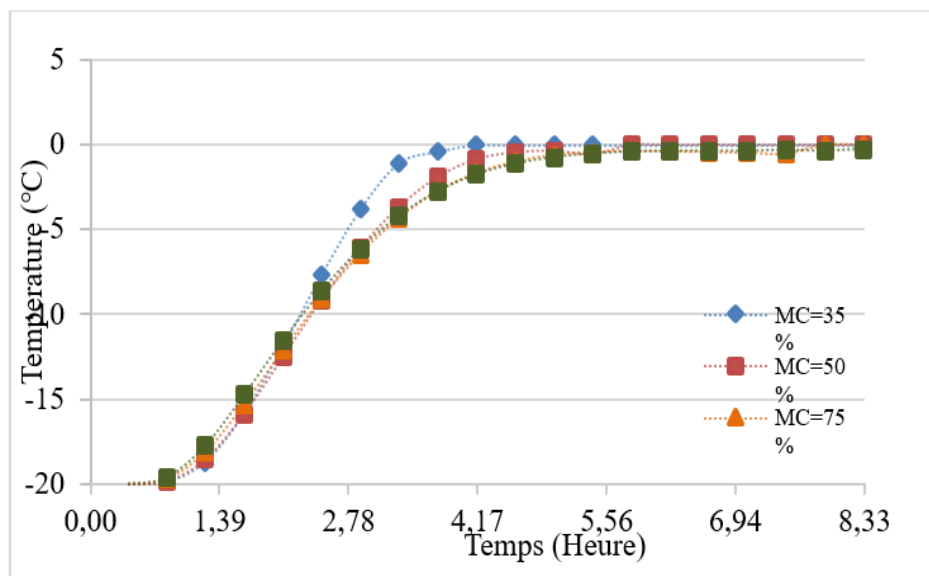


Figure 43. Effet de MC sur le dégel du Bouleau Jaune

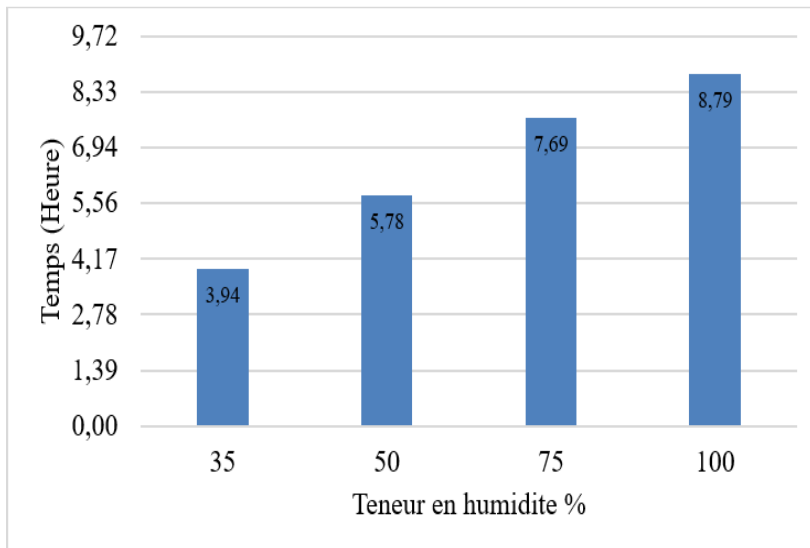


Figure 44. Temps du dégel du Bouleau Jaune en fonction du MC

iv. Erable à sucre

Pour une teneur en humidité de 35%, l'Érable à sucre prend 4h pour dégeler et la durée de dégel s'étale jusqu'à 8h45 pour MC=100% (Figure 46).

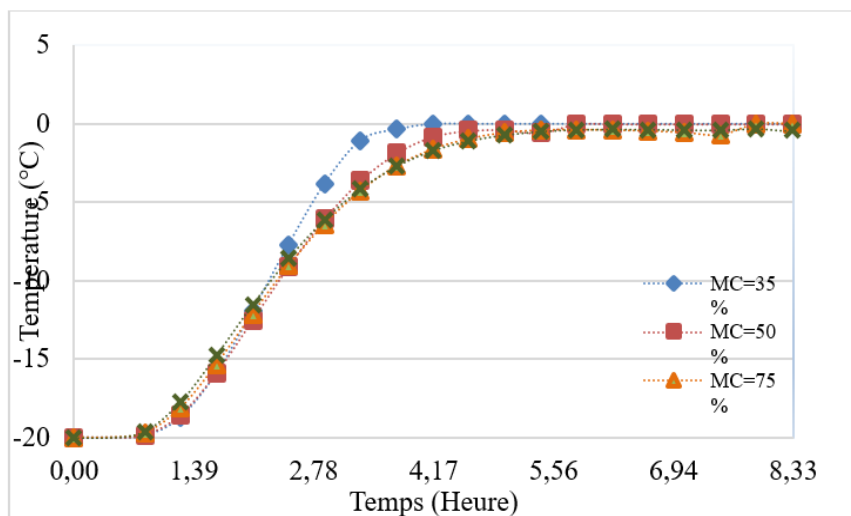


Figure 45. Effet de MC sur le dégel de l'Érable à sucre

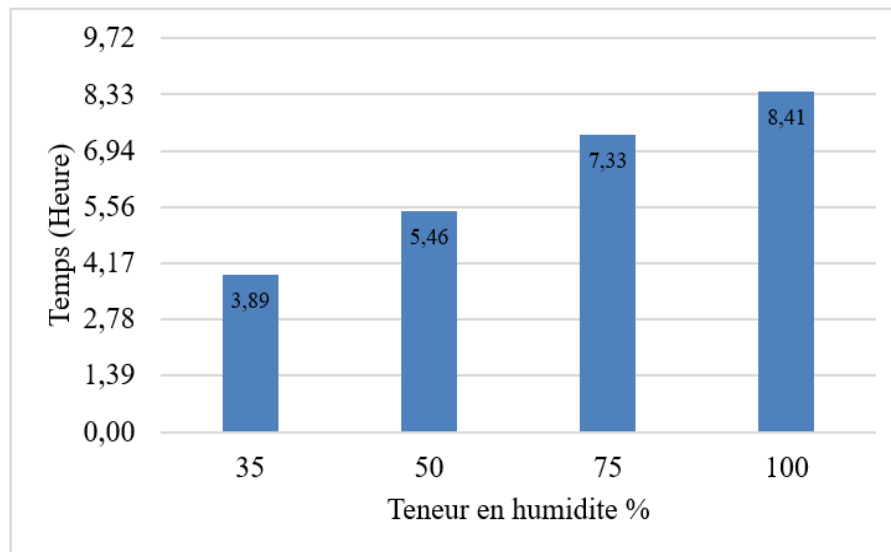


Figure 46. Temps du dégel de l'Érable à Sucre en fonction du MC

3.1.2 Effet de la teneur en humidité (MC) sur le chauffage du bois à 0°C

Les Figures ci-dessous (47-53) illustrent l'évolution des températures, pour chaque espèce de bois se trouvant à la température initiale de 0°C, jusqu'à la fin de cycle de chauffage et cela en fonction de la teneur en humidité.

Selon les figures 47, 49, 51 et 53, les courbes de chauffage des quatre essences du bois, ont une allure parabolique croissante avec une pente croissante en fonction de la teneur en humidité. Cependant, les courbes pour chaque essence de bois, commencent par un décalage significatif. Ce décalage peut être calculé par la différence entre le temps du dégel jusqu'à -0°C et le temps du chauffage à partir du +0°C et correspond à la durée du passage de l'eau de l'état solide à l'état liquide. L'énergie employée pour réaliser ce phénomène de fusion est caractérisée

par l'énergie Latente. Dans le tableau ci-dessous (Tableau 4), on récapitule la durée nécessaire pour la fusion, associée à l'énergie latente, de différentes essences du bois en fonction de la teneur en humidité.

MC %	Peuplier Faux tremble	Bouleau Blanc	Bouleau Jaune	Sucre à l'érable
35	0.87	0.70	0.65	0.64
50	2.07	1.95	1.76	1.75
75	5.05	4.51	3.21	3.16
100	6.90	4.85	4.22	4.14

Tableau 4. Durée de la fusion pour différentes essences de bois.

i. Peuplier Faux Tremble :

Le temps nécessaire pour le chauffage du Peuplier Faux Tremble de 0°C jusqu'à 55°C varie de 16h jusqu'à 18h pour une teneur en humidité passant de 35% à 100% (Figure 48).

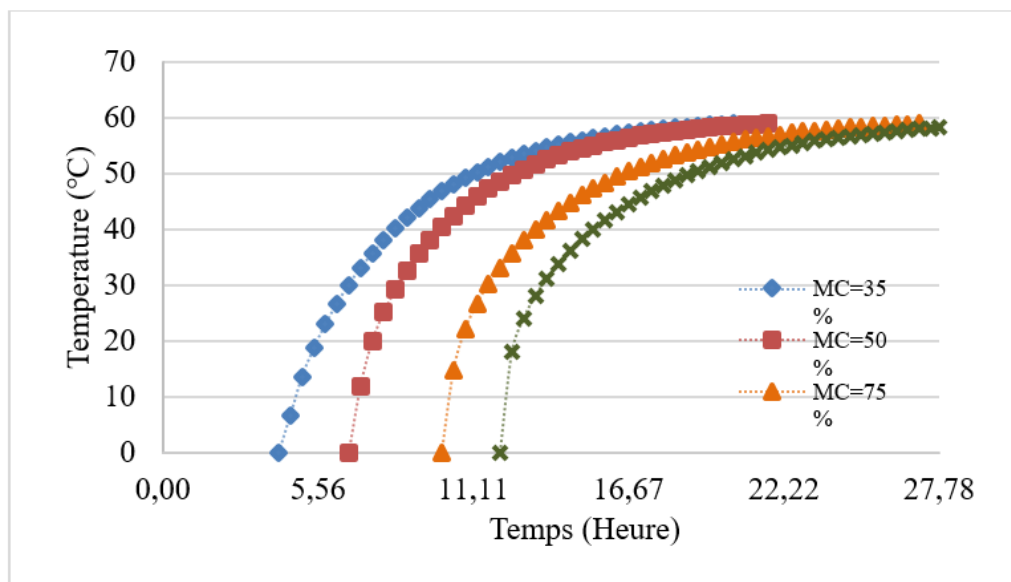


Figure 47. Effet de MC sur le chauffage du Peuplier Faux Tremble

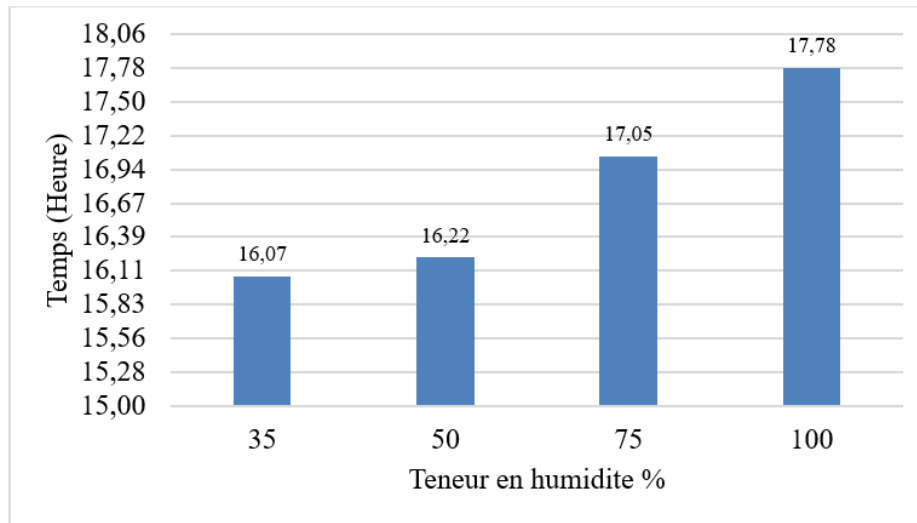


Figure 48. Temps du chauffage du Peuplier Faux Tremble en fonction du MC

ii. Bouleau Blanc :

Pour un intervalle de teneur en humidité de 35% à 100%, la durée du chauffage du Bouleau Blanc est de l'ordre de 16h à 18h (Figure 50).

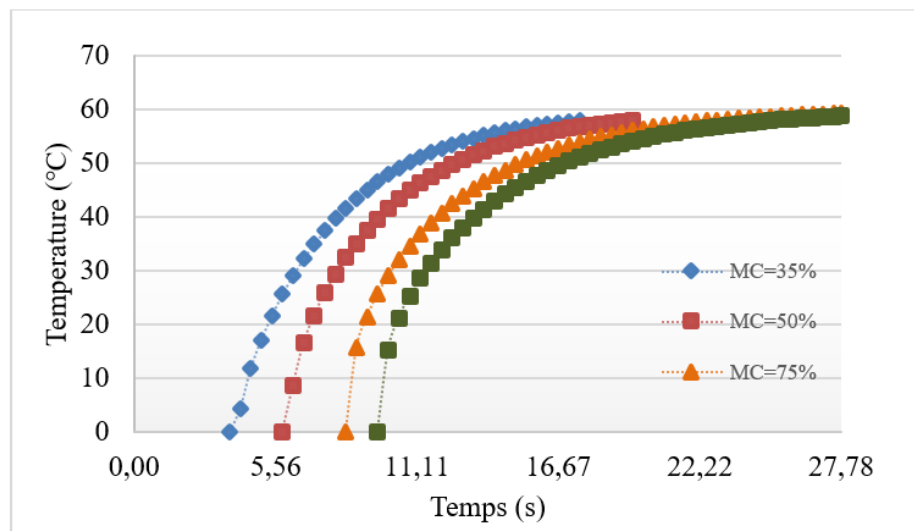


Figure 49. Effet de MC sur le chauffage du Bouleau Blanc

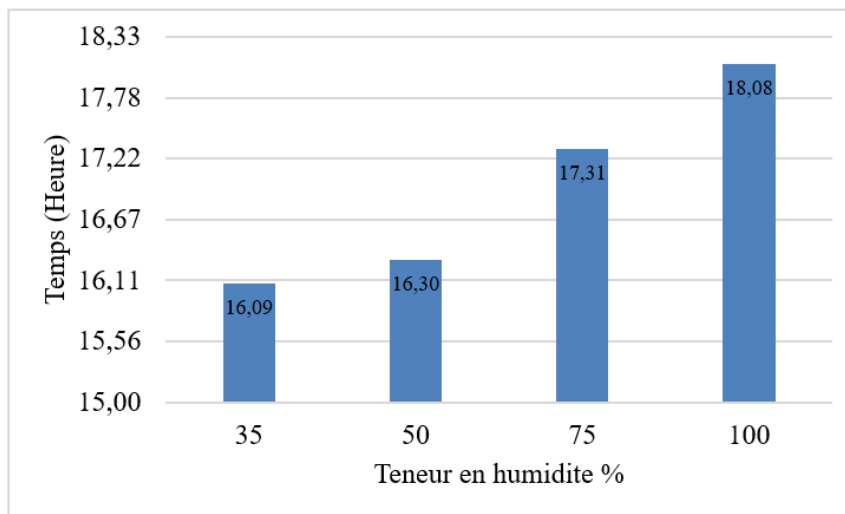


Figure 50. Temps du chauffage du Bouleau Blanc en fonction du MC

iii. Bouleau Jaune

Le Bouleau Jaune nécessite un temps de chauffage de 16h30 pour une teneur en humidité de 35% et qui augmente à une durée de 19h lorsque la teneur en humidité est de 100% (Figure 52).

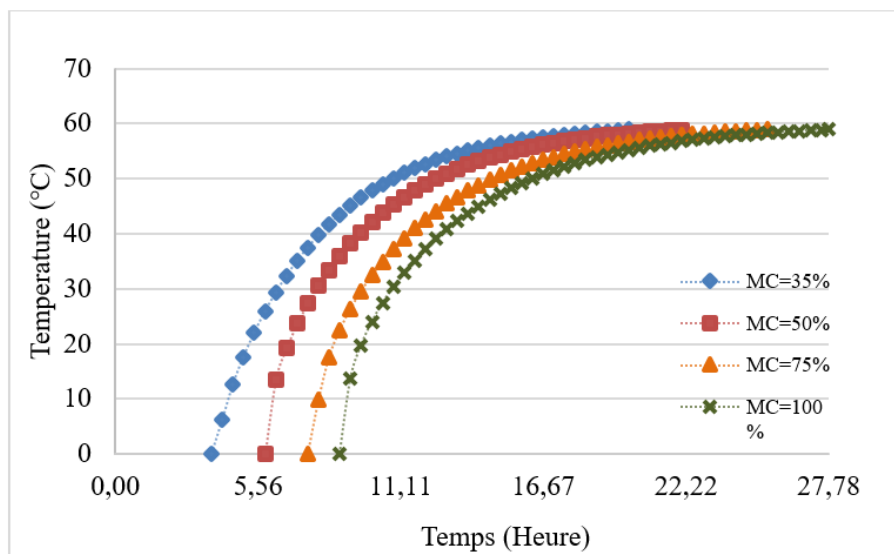


Figure 51. Effet de MC sur le chauffage du Bouleau Jaune

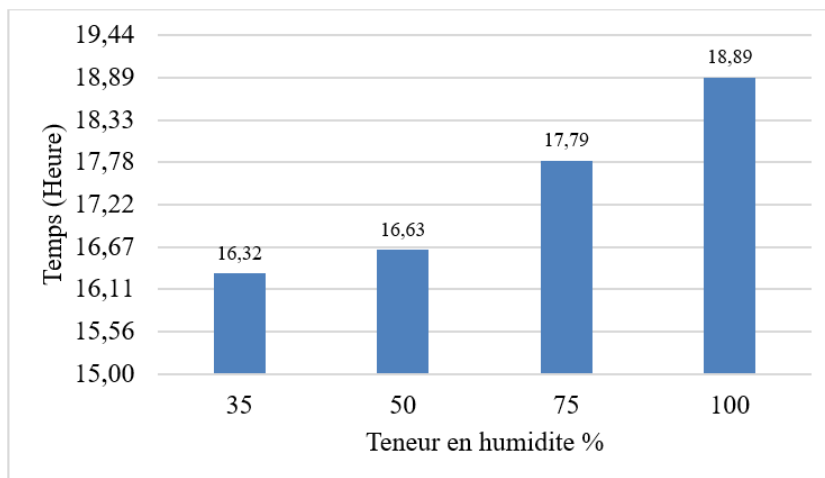


Figure 52. Temps du chauffage du Bouleau Jaune vs MC

iv. Erable à sucre :

Le temps du chauffage de l'érable à sucre est de l'ordre de 16h30 pour une teneur en humidité de 35% et il passe à 19h lorsque la teneur en humidité augmente jusqu'à 100% (Figure 54)

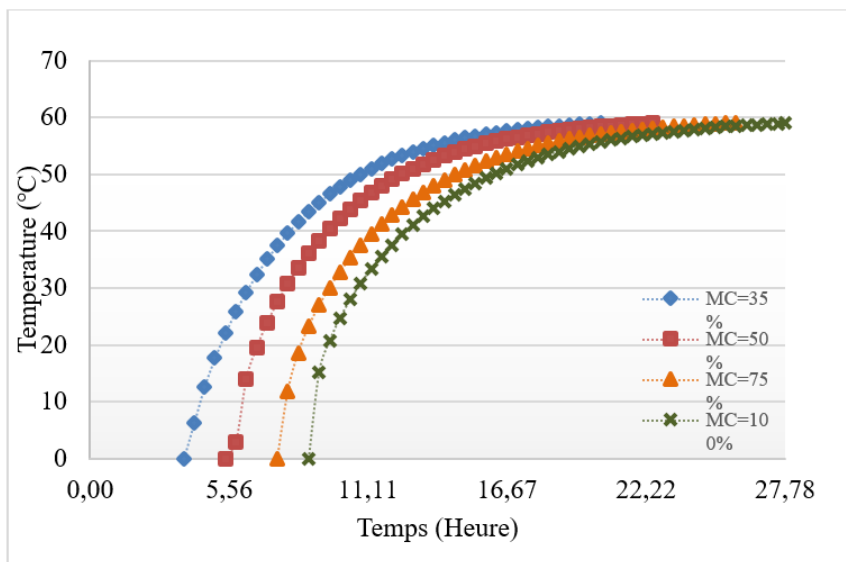


Figure 53. Effet de MC sur le chauffage de l'Érable à sucre

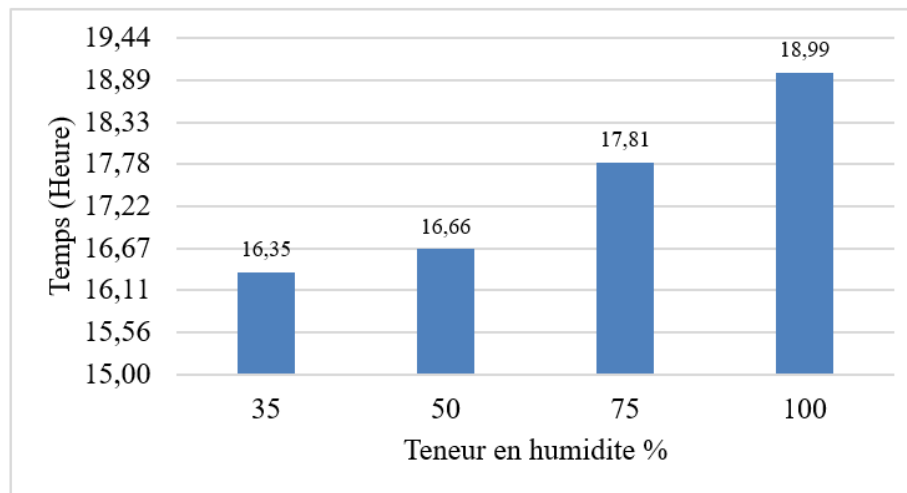


Figure 54. Temps du chauffage de l'Érable à Sucre en fonction du MC

3.1.3 Temps de dégel et de chauffage des différentes essences du bois

Dans cette section, ont quantifié les temps nécessaires au dégel et au chauffage de chaque essence du bois selon le pourcentage d'eau présent (MC).

Les Figures 27, 28, 29 et 30, ci-dessus, représentent le temps nécessaire pour le dégel et le chauffage des différentes essences du bois. On remarque bien que le temps de dégel et de chauffage augmente proportionnellement en fonction de la teneur en humidité et que le temps de la fusion dû à l'énergie Latente augmente considérablement lorsque la teneur en humidité augmente. En effet, l'énergie Latente varie fortement en fonction de la teneur en humidité, d'où, la différence remarquable entre les paliers des fusions des courbes de dégel pour une essence de bois donnée. En conséquence, le temps de dégel du bois varie de façon

croissante en fonction de la teneur en humidité et varie de façon décroissante en fonction de la densité. Dans les tables 5 et 6 on expose les temps nécessaires au dégel et au chauffage de chacune des essences de bois.

i. Temps de dégel des différentes essences de bois :

MC %	Peuplier Faux tremble	Bouleau Blanc	Bouleau Jaune	Érable à sucre
35	4.37	4.30	3.93	3.88
50	6.83	6.04	5.77	5.45
75	10.11	8.29	7.69	7.33
100	12.08	9.58	8.78	8.40

Tableau 5. Temps de dégel des différentes essences de bois (Heure)

ii. Temps de chauffage des différentes essences de bois :

MC %	Peuplier Faux tremble	Bouleau Blanc	Bouleau Jaune	Érable à sucre
35	16.06	16.08	16.31	16.34
50	16.21	16.29	16.62	16.65
75	17.05	17.31	17.79	17.80
100	17.77	18.08	18.88	18.99

Tableau 6. Temps de chauffage des différentes essences de bois
(Heure)

3.1.4 Courbes de tendances : effet de MC sur le dégel du bois

Suite aux résultats numériques obtenus, on expose dans cette section les courbes de tendances qui nous permettent de déterminer le temps du dégel en fonction de la teneur en humidité.

La (Figure 55) représente la courbe qui estime le temps nécessaire pour le dégel des différentes essences du bois en fonction de la teneur en humidité. On remarque, selon cette figure, que l'évolution du temps du dégel en fonction de la teneur en humidité présente une allure linéaire croissante et similaire pour toutes les essences du bois. Pour une teneur en humidité faible (MC=35%), la durée de dégel de toutes les essences du bois (de différentes densités) est comparable. Toutefois, pour des humidités plus importantes (supérieur à 50%), la durée de dégel est différente pour chaque espèce du bois étudié. Finalement, il est opportun de souligner que le temps de dégel augmente considérablement lorsque la teneur en humidité augmente.

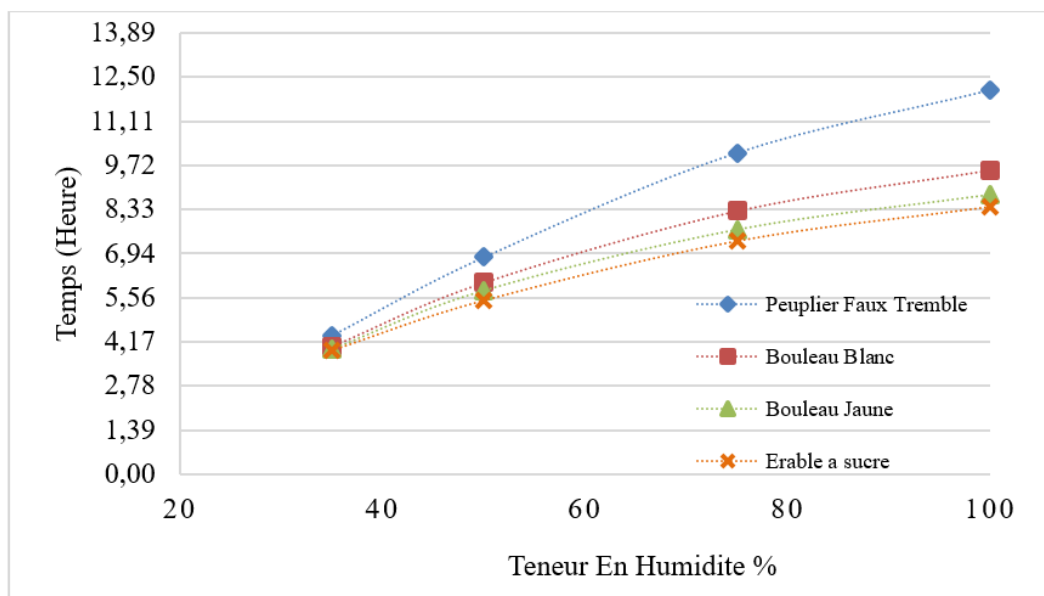


Figure 55. Effet de MC sur le dégel des différentes essences de bois

3.1.5 Courbes de tendances: effet de MC sur la chauffe du bois à 0°C

Dans cette partie, on présente les courbes de tendances qui nous permettent d'estimer le temps de chauffage pour toute teneur en humidité donnée.

La figure 56, illustre les durées, en fonction de la teneur en humidité, qu'elle faut affecter à chaque essence du bois pour augmenter sa température de 0°C à 50°C. On remarque que l'allure de chaque courbe, à toute fin pratique, est linéaire croissante. Ceci est potentiellement dû aux valeurs de la conductivité thermique qui varient faiblement en fonction de la teneur en humidité. Les durées de chauffage de toutes les essences varient de 16h à 19h. On peut, néanmoins, conclure que le temps de chauffage varie de manière croissante en fonction de la teneur en humidité.

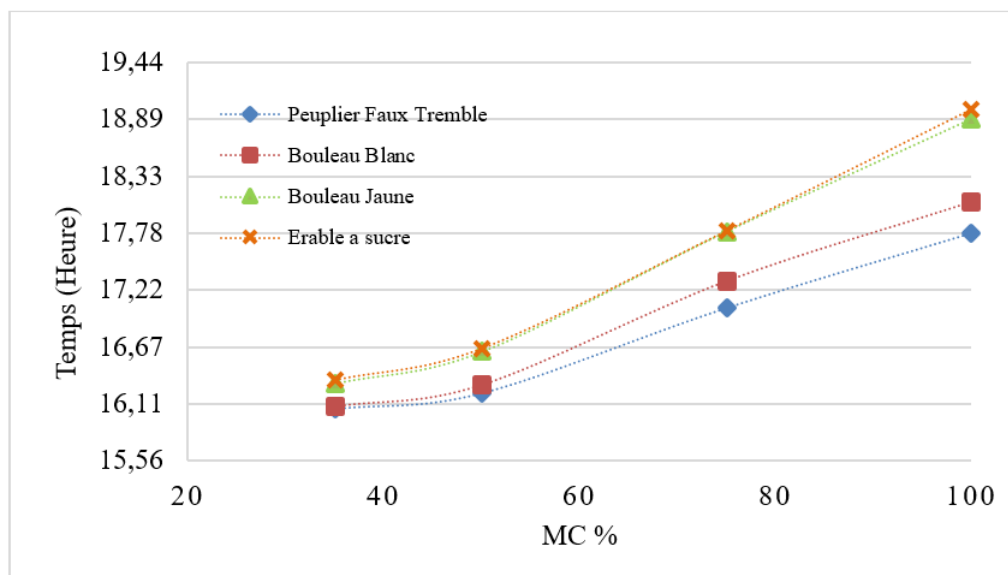


Figure 56. Effet de MC sur le chauffage des différentes essences de bois

4 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS :

4.1 Conclusion :

Dans ce projet, nous avons étudié numériquement le dégel et le chauffage du bois à l'aide du code Thermoformé. Ce code maison, développé par le Pr Erchiqui, utilise un nouveau concept (enthalpie volumique hybride) pour la modélisation, par la méthode des éléments finis 3D, de la conduction de la chaleur dans les matériaux anisotropes. Le matériau *bois* est supposé anisotrope et ses propriétés thermo-physiques sont fonctions de la température, de l'humidité et de la direction structurale.

L'étude de dégel de quatre espèces de bois sont considérés et caractérisé numériquement: Peuplier Faux Tremble (*Populus tremuloides*), Bouleau Blanc (*Betula papyrifera*), Bouleau Jaune (*Betula alleghaniensis*) et Érable A Sucre (*Acer saccharum*).

Cette étude nous a permis de déterminer le temps de dégel nécessaire pour les quatre espèces de bois en fonction des différentes valeurs de la teneur en humidité et a été suivi par une étude comparative entre les résultats obtenus par *ThermoForm* et par Abaqus.

À la suite de l'étude, nous remarquons que les matériaux de forte densité nécessitent moins de temps de dégel, et pour une essence de bois donnée, le temps du dégel augmente lorsque la teneur en humidité augmente.

Pour une teneur en humidité donnée, l'Érable à Sucre nécessite moins de temps du dégel que le Bouleau Jaune et ce dernier nécessite

moins de temps de dégel que le Bouleau Blanc qui, également, nécessite moins de temps de dégel que le Peuplier Faux Tremble.

Le temps de dégel pour les différentes essences de bois varie de 4h jusqu'à 12h pour atteindre la température 0°C.

Le temps de chauffage des différentes essences de bois varie selon la valeur de l'énergie latente qui dépend essentiellement de la valeur de la teneur en humidité et varie entre 16h et 19h pour passer de 0°C à 58°C.

Les résultats obtenus sont cohérents avec l'affirmation qui évoque que le temps de dégel augmente lorsque la teneur en humidité augmente et ceci a été validé avec les résultats que nous avons obtenus avec le logiciel Abaqus.

4.2 Perspectives et recommandations :

La nouvelle approche de modélisation thermique en se basant sur la méthode d'enthalpie hybride est avantageuse pour traiter les matériaux anisotropes, en bois particulièrement, ayant une géométrie complexe.

Une perspective qui peut être utile est de réaliser des diagrammes de dégel des différents types de bois Canadien et de les mettre disponible à disposition des organisations qui en ont besoin.

5 RÉFÉRENCES

- Erchiqui F., 2000, Modélisation par MEF de changement de phase de matériaux par une approche utilisant l'enthalpie volumique 2000. Rapport interne CNRC.
- Erchiqui F., Z. Annasabi, A. Koubaa, F. Slaoui Hasnaoui, 2013, Numerical Modeling of Microwave Heating of Frozen Wood, The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol.9, p.1582-1589, 2013.
- Erchiqui F., Analysis and evaluation of power formulations for wood and hardboard using radiofrequency and microwave energy, Drying Technology, Vol. 32, No. 8, 2014.
- Erchiqui F., 3D Numerical Simulation of Thawing Frozen Wood Using Microwave Energy: Frequency Effect on the Applicability of the Beer-Lambert Law, Drying Technology, Vol.31, No.11, pp. 1219-1233, 2013.
- Erchiqui F., 3D hybrid finite element enthalpy for anisotropic thermal conduction analysis, International Journal of Heat and mass Transfer 136 (2019) 1250-1264.
- Erchiqui F., Analysis of Power formulations for Numerical Thawing Frozen Wood Using Microwave Energy, Chemical Engineering Science, Vol. 98, pp.317–330, 2013.
- Erchiqui F, Modélisation des interactions fluide-structure par une approche variationnelle couplant les équations intégrales et la méthode des éléments finis, Thèse de doctorat, Université Laval, 1996.

- Hu, H. and Argyropoulos S. A. 1995, Modelling of Stefan problems in complex configurations involving two different metals using the enthalpy method. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 3(1): p. 53-64.
- Kanter, K.R. The Thermal Properties of Wood. *Derev. Prom.* 1957, 6 (7), 17–18.
- Nedjar, B., An enthalpy-based finite element method for nonlinear heat problems involving phase change 2002. *Computers and Structures*, 80(1): p. 9-21.
- Dokainish M. A., Subbraj K. 1989, A survey of direct time-integration methods in computational structural dynamics. *Comput. Struct.* Vol. 32, No. 6, 1989, pp. 1371-1386.
- Ohlsson, T.; Bengston, N. Microwave heating profile in foods—A comparison between heating and computer simulation. *Microwave Energy Applied Newsletter* 1971, 6, 3–8.
- Swami S. 1982, Microwave heating characteristics of simulated high moisture foods. MS Thesis. University of Massachusetts, USA, 1982.
- Rattanadecho, P., 2006, The simulation of microwave heating of wood using a rectangular wave guide: Influence of frequency and sample size. *Chemical Engineering Science* 2006, 61, 4798–4811.
- Reddy, J. N. 1993. *An introduction to the finite element method*, McGraw-Hill, 2 edition.

Nedelec, J. C. 2001. Acoustic and Electromagnetic Equations, Integral Representation for harmonic Problems. Springer-Verlag J.C.

Zienkiewicz, O.C. & Taylor, R.L., 2000. Finite Element Method: Volume 1 - The Basis. Butterworth Heinemann, London, 2000, 712 pp.

H. P. Steinhagen, W. Harry, Enthalpy method to compute radial heating and thawing of logs, 1988, Wood and Fiber Science. 20 (4) (1988) 451–421.

P. N. Peralta, A. P. Bangi, Finite element model for the heating of frozen wood, Wood and Fiber Science. 38 (2), (2006) 359 – 364.

Z. Annasabi Modélisation par MEF de chauffage du bois. Mémoire de maitrise UQAC 2012,

H. P. STEINHAGEN, 1977. Heating times for frozen veneer logs— New experimental data. Forest Prod. J. 27(6):24–28.

I. Elloumi, caractérisation des propriétés diélectriques du bois et des composites bois-polymère. Mémoire de maitrise UQAT 2017.

M. Diagne, Caractérisation numérique du temps de dégel du bois par chauffage radiofréquence. Mémoire de maitrise UQAT 2017.

F. Erchiqui, Z. Annasabi, M. Souli et F. Slaoui-Hasnaoui, (2015). 3D numerical analysis of the thermal effect and dielectric anisotropy on thawing frozen wood using microwave energy. International Journal of Thermal Sciences 89 (2015) 58–78.

I. Rowell, Roger M. (2005). Handbook of wood chemistry and wood composites p. cm ISBN 0-8493-1588-3.

Forest Products Laboratory. (2010). Wood handbook—Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 p.

Annexe A

6 Annexe A: Caractéristiques thermo-physiques des matériaux

i. Peuplier faux-tremble : SG=0.35

➤ MC= 35%

	$T < 0$	$T > 0$
Densité [Kg/m^3]	$\rho = 472,5$	$\rho = 472,5$
Conductivité thermique radiale [$W/m^{\circ}C$]	$k_r = 0.1718 - 0.000651 * T$	$k_r = 0.166 + 0.000485 * T$
Conductivité thermique longitudinale [$W/m^{\circ}C$]	$k_l = 0.4296 - 0.00162 * T$	$k_l = 0.4151 + 0.001212 * T$
Conductivité thermique transversale [$W/m^{\circ}C$]	$k_t = 0.1909 - 0.000723 * T$	$k_t = 0.1845 + 0.0005388 * T$
Enthalpie latente [KJ/m^3]	$L = 13360$	$L = 13360$
Capacité thermique [$J/Kg^{\circ}C$]	$C_p = 2280 + 16.6 * T$	$C_p = 2304.85 + 4.98 * T$

Tableau 7. Propriétés thermo-physiques du Peuplier faux-tremble à MC=35%

➤ MC= 50%

	$T < 0$	$T > 0$
Densité [Kg/m^3]	$\rho = 525$	$\rho = 525$
Conductivité thermique radiale [$W/m^{\circ}C$]	$k_r = 0.2121 - 0.000651 * T$	$k_r = 0.189 + 0.000617 * T$
Conductivité thermique longitudinale [$W/m^{\circ}C$]	$k_l = 0.5303 - 0.001627 * T$	$k_l = 0.4725 + 0.001542 * T$
Conductivité thermique transversale [$W/m^{\circ}C$]	$k_t = 0.2357 - 0.000723 * T$	$k_t = 0.21 + 0.000685 * T$
Enthalpie latente [KJ/m^3]	$L = 44533,33$	$L = 44533,33$
Capacité thermique [$J/Kg^{\circ}C$]	$C_p = 2280 + 16.6 * T$	$C_p = 2435.5 + 4.98 * T$

Tableau 8. Propriétés thermo-physiques du Peuplier faux-tremble à MC=50%

➤ MC= 75%

	$T < 0$	$T > 0$
Densité [Kg/ m^3]	$\rho = 612,5$	$\rho = 612,5$
Conductivité thermique radiale [W/ $m^{\circ}C$]	$k_r = 0.2792 - 0.000651 * T$	$k_r = 0.2272 + 0.000837 * T$
Conductivité thermique longitudinale [W/ $m^{\circ}C$]	$k_l = 0.6981 - 0.001627 * T$	$k_l = 0.5681 + 0.002092 * T$
Conductivité thermique transversale [W/ $m^{\circ}C$]	$k_t = 0.3103 - 0.000723 * T$	$k_t = 0.2525 + 0.00093 * T$
Enthalpie latente [KJ/ m^3]	$L = 85885,71$	$L = 85885,71$
Capacité thermique [J/ Kg $^{\circ}C$]	$C_p = 2280 + 16.6 * T$	$C_p = 2653.25 + 4.98 * T$

Tableau 9. Propriétés thermo-physiques du Peuplier faux-tremble à
MC=75%

➤ MC= 100%

	$T < 0$	$T > 0$
Densité [Kg/m^3]	$\rho = 700$	$\rho = 700$
Conductivité thermique radiale [$W/m^{\circ}C$]	$k_r = 0.3464 - 0.000651 * T$	$k_r = 0.2655 + 0.001057 * T$
Conductivité thermique longitudinale [$W/m^{\circ}C$]	$k_l = 0.866 - 0.00162 * T$	$k_l = 0.6637 + 0.002642 * T$
Conductivité thermique transversale [$W/m^{\circ}C$]	$k_t = 0.3848 - 0.000723 * T$	$k_t = 0.295 + 0.001174 * T$
Enthalpie latente [KJ/m^3]	$L = 116900$	$L = 116900$
Capacité thermique [$J/Kg^{\circ}C$]	$C_p = 2280 + 16.6 * T$	$C_p = 2871 + 4.98 * T$

Tableau 10. Propriétés thermo-physiques du Peuplier faux-tremble à MC=100%

ii. Bouleau blanc : SG = 0.48

➤ MC = 35%

	$T < 0$	$T > 0$
Densité [Kg/m^3]	$\rho = 648$	$\rho = 648$
Conductivité thermique radiale [$W/m^{\circ}C$]	$k_r = 0.2275 - 0.0008616 * T$	$k_r = 0.2194 + 0.000642 * T$
Conductivité thermique longitudinale [$W/m^{\circ}C$]	$k_l = 0.5689 - 0.002154 * T$	$k_l = 0.549 + 0.001605 * T$
Conductivité thermique transversale [$W/m^{\circ}C$]	$k_t = 0.2528 - 0.000957 * T$	$k_t = 0.2441 + 0.000713 * T$
Enthalpie latente [KJ/m^3]	$L = 13360$	$L = 13360$
Capacité thermique [$J/Kg^{\circ}C$]	$C_p = 2280 + 16.6 * T$	$C_p = 2304.85 + 309.83 * T$

Tableau 11. Propriétés thermo-physiques du Bouleau blanc à MC=35%

➤ MC= 50%

	$T < 0$	$T > 0$
Densité [Kg/m^3]	$\rho = 720$	$\rho = 720$
Conductivité thermique radiale [$W/m^{\circ}C$]	$k_r = 0.2809 - 0.0008616 * T$	$k_r = 0.2501 + 0.000817 * T$
Conductivité thermique longitudinale [$W/m^{\circ}C$]	$k_l = 0.7023 - 0.002154 * T$	$k_l = 0.6252 + 0.002043 * T$
Conductivité thermique transversale [$W/m^{\circ}C$]	$k_t = 0.3121 - 0.000957 * T$	$k_t = 0.2778 + 0.000908 * T$
Enthalpie latente [KJ/m^3]	$L = 44533,33$	$L = 44533,33$
Capacité thermique [$J/Kg^{\circ}C$]	$C_p = 2280 + 16.6 * T$	$C_p = 2435.5 + 4.98 * T$

Tableau 12. Propriétés thermo-physiques du Bouleau blanc à MC=50%

➤ MC= 75%

	$T < 0$	$T > 0$
Densité [Kg/m^3]	$\rho = 840$	$\rho = 840$
Conductivité thermique radiale [$W/m^{\circ}C$]	$k_r = 0.3698 - 0.000816 * T$	$k_r = 0.3007 + 0.001108 * T$
Conductivité thermique longitudinale [$W/m^{\circ}C$]	$k_l = 0.9245 - 0.002154 * T$	$k_l = 0.7517 + 0.002771 * T$
Conductivité thermique transversale [$W/m^{\circ}C$]	$k_t = 0.4109 - 0.000957 * T$	$k_t = 0.3341 + 0.001231 * T$
Enthalpie latente [KJ/m^3]	$L = 85885,71$	$L = 85885,71$
Capacité thermique [$J/Kg^{\circ}C$]	$C_p = 2280 + 16.6 * T$	$C_p = 2653.25 + 4.98 * T$

Tableau 13. Propriétés thermo-physiques du Bouleau blanc à MC=75%

➤ MC= 100%

	$T < 0$	$T > 0$
Densité [Kg/m^3]	$\rho = 960$	$\rho = 960$
Conductivité thermique radiale [$W/m^{\circ}C$]	$k_r = 0.4587 - 0.000861 * T$	$k_r = 0.3513 + 0.0014 * T$
Conductivité thermique longitudinale [$W/m^{\circ}C$]	$k_l = 1.1468 - 0.002154 * T$	$k_l = 0.8782 + 0.0035 * T$
Conductivité thermique transversale [$W/m^{\circ}C$]	$k_t = 0.5096 - 0.000957 * T$	$k_t = 0.3903 + 0.001555 * T$
Enthalpie latente [KJ/m^3]	$L = 116900$	$L = 116900$
Capacité thermique [$J/Kg^{\circ}C$]	$C_p = 2280 + 16.6 * T$	$C_p = 2871 + 4.98 * T$

Tableau 14. Propriétés thermo-physiques du Bouleau blanc à MC=100%

iii. Bouleau jaune : SG = 0.55

➤ MC = 35%

	$T < 0$	$T > 0$
Densité [Kg/m^3]	$\rho = 742,5$	$\rho = 742,5$
Conductivité thermique radiale [$W/m^{\circ}C$]	$k_r = 0.2575 - 0.000975 * T$	$k_r = 0.2486 + 0.000727 * T$
Conductivité thermique longitudinale [$W/m^{\circ}C$]	$k_l = 0.6439 - 0.00243 * T$	$k_l = 0.6216 + 0.001817 * T$
Conductivité thermique transversale [$W/m^{\circ}C$]	$k_t = 0.2861 - 0.001083 * T$	$k_t = 0.2762 + 0.000807 * T$
Enthalpie latente [KJ/m^3]	$L = 13360$	$L = 13360$
Capacité thermique [$J/Kg^{\circ}C$]	$C_p = 2280 + 16.6 * T$	$C_p = 2304.85 + 4.98 * T$

Tableau 15. Propriétés thermo-physiques du Bouleau jaune à MC=35%

➤ MC= 50%

	$T < 0$	$T > 0$
Densité [Kg/m^3]	$\rho = 825$	$\rho = 825$
Conductivité thermique radiale [$W/m^{\circ}C$]	$k_r = 0.3179 - 0.000975 * T$	$k_r = 0.283 + 0.000925 * T$
Conductivité thermique longitudinale [$W/m^{\circ}C$]	$k_l = 0.7948 - 0.00243 * T$	$k_l = 0.7075 + 0.002312 * T$
Conductivité thermique transversale [$W/m^{\circ}C$]	$k_t = 0.3532 - 0.001083 * T$	$k_t = 0.3144 + 0.001027 * T$
Enthalpie latente [KJ/m^3]	$L = 44533,33$	$L = 44533,33$
Capacité thermique [$J/Kg^{\circ}C$]	$C_p = 2280 + 16.6 * T$	$C_p = 2435.5 + 4.98 * T$

Tableau 16. Propriétés thermo-physiques du Bouleau jaune à MC=50%

➤ MC= 75%

	$T < 0$	$T > 0$
Densité [Kg/m^3]	$\rho = 962,5$	$\rho = 962,5$
Conductivité thermique radiale [$W/m^{\circ}C$]	$k_r = 0.4185 - 0.000975 * T$	$k_r = 0.3402 + 0.001255 * T$
Conductivité thermique longitudinale [$W/m^{\circ}C$]	$k_l = 1.0464 - 0.00243 * T$	$k_l = 0.8506 + 0.003137 * T$
Conductivité thermique transversale [$W/m^{\circ}C$]	$k_t = 0.465 - 0.001083 * T$	$k_t = 0.378 + 0.001394 * T$
Enthalpie latente [KJ/m^3]	$L = 85885,71$	$L = 85885,71$
Capacité thermique [$J/Kg^{\circ}C$]	$C_p = 2280 + 16.6 * T$	$C_p = 2653.25 + 4.98 * T$

Tableau 17. Propriétés thermo-physiques du Bouleau jaune à MC=75%

➤ MC= 100%

	$T < 0$	$T > 0$
Densité [Kg/m^3]	$\rho = 1100$	$\rho = 1100$
Conductivité thermique radiale [$W/m^{\circ}C$]	$k_r = 0.5192 - 0.000975 * T$	$k_r = 0.3975 + 0.001585 * T$
Conductivité thermique longitudinale [$W/m^{\circ}C$]	$k_l = 1.298 - 0.00243 * T$	$k_l = 0.9937 + 0.003962 * T$
Conductivité thermique transversale [$W/m^{\circ}C$]	$k_t = 0.5768 - 0.001083 * T$	$k_t = 0.4416 + 0.001761 * T$
Enthalpie latente [KJ/m^3]	$L = 116900$	$L = 116900$
Capacité thermique [$J/Kg^{\circ}C$]	$C_p = 2280 + 16.6 * T$	$C_p = 2871 + 4.98 * T$

Tableau 18. Propriétés thermo-physiques du Bouleau jaune à MC=100%

iv. Érable à sucre : SG = 0.56

➤ MC = 35%

	$T < 0$	$T > 0$
Densité [Kg/m^3]	$\rho = 756$	$\rho = 756$
Conductivité thermique radiale [$W/m^{\circ}C$]	$k_r = 0.2618 - 0.000991 * T$	$k_r = 0.2527 + 0.000739 * T$
Conductivité thermique longitudinale [$W/m^{\circ}C$]	$k_l = 0.6546 - 0.002478 * T$	$k_l = 0.6319 + 0.001847 * T$
Conductivité thermique transversale [$W/m^{\circ}C$]	$k_t = 0.2909 - 0.001101 * T$	$k_t = 0.2808 + 0.000821 * T$
Enthalpie latente [KJ/m^3]	$L = 13360$	$L = 13360$
Capacité thermique [$J/Kg^{\circ}C$]	$C_p = 2280 + 16.6 * T$	$C_p = 2304.85 + 4.98 * T$

Tableau 19. Propriétés thermo-physiques de l'Érable à sucre à MC=35%

➤ MC= 50%

	$T < 0$	$T > 0$
Densité [Kg/m^3]	$\rho = 840$	$\rho = 840$
Conductivité thermique radiale [$W/m^{\circ}C$]	$k_r = 0.3232 - 0.000991 * T$	$k_r = 0.2877 + 0.00094 * T$
Conductivité thermique longitudinale [$W/m^{\circ}C$]	$k_l = 0.8081 - 0.002478 * T$	$k_l = 0.7195 + 0.002351 * T$
Conductivité thermique transversale [$W/m^{\circ}C$]	$k_t = 0.3591 - 0.001101 * T$	$k_t = 0.3196 + 0.001044 * T$
Enthalpie latente [KJ/m^3]	$L = 44533,33$	$L = 44533,33$
Capacité thermique [$J/Kg^{\circ}C$]	$C_p = 2280 + 16.6 * T$	$C_p = 2435.5 + 4.98 * T$

Tableau 20. Propriétés thermo-physiques de l'Érable à sucre à MC=50%

➤ MC= 75%

	$T < 0$	$T > 0$
Densité [Kg/m^3]	$\rho = 980$	$\rho = 980$
Conductivité thermique radiale [$W/m^{\circ}C$]	$k_r = 0.4255 - 0.000991 * T$	$k_r = 0.3459 + 0.001275 * T$
Conductivité thermique longitudinale [$W/m^{\circ}C$]	$k_l = 1.0638 - 0.002478 * T$	$k_l = 0.8647 + 0.003189 * T$
Conductivité thermique transversale [$W/m^{\circ}C$]	$k_t = 0.4728 - 0.001101 * T$	$k_t = 0.3848 + 0.001417 * T$
Enthalpie latente [KJ/m^3]	$L = 85885,71$	$L = 85885,71$
Capacité thermique [$J/Kg^{\circ}C$]	$C_p = 2280 + 16.6 * T$	$C_p = 2653.25 + 4.98 * T$

Tableau 21. Propriétés thermo-physiques de l'Érable à sucre à MC=75%

➤ MC= 100%

	$T < 0$	$T > 0$
Densité [Kg/m^3]	$\rho = 1120$	$\rho = 1120$
Conductivité thermique radiale [$W/m^{\circ}C$]	$k_r = 0.5278 - 0.000991 * T$	$k_r = 0.4041 + 0.001611 * T$
Conductivité thermique longitudinale [$W/m^{\circ}C$]	$k_l = 1.3196 - 0.002478 * T$	$k_l = 1.0102 + 0.004028 * T$
Conductivité thermique transversale [$W/m^{\circ}C$]	$k_t = 0.5864 - 0.001101 * T$	$k_t = 0.449 + 0.00179 * T$
Enthalpie latente [KJ/m^3]	$L = 116900$	$L = 116900$
Capacité thermique [$J/Kg^{\circ}C$]	$C_p = 2280 + 16.6 * T$	$C_p = 2871 + 4.98 * T$

Tableau 22. Propriétés thermo-physiques de l'Érable à sucre à MC=100%