UCLouvain

École polytechnique de Louvain

Modélisation du procédé THM appliqué à du bois de peuplier

Auteur: **Valentin Coenen**
Promoteurs: **Thomas Pardoen, Laurent Delannay**
Lecteurs: **Sophie Ryelandt, Vincent Defays**
Année académique 2022–2023
Master [120] : ingénieur civil mécanicien

Abstract

Wood is a resource that has been used by humans since ancient times. Highly abundant, it is present in many everyday applications (construction, heating, tools, etc.). For years, humans have aimed for higher performance by using increasingly scarce materials and creating ever more complex objects. However, at a time when the future of our planet is a major concern, the use of these non-renewable materials and this complexity raises questions.

Wood seems to have a role to play in the upcoming changes. In the energy sector, biomass is used to create synthetic fuels that can replace current non-renewable fuels. In the industrial sector, the transformation of wood into a more durable and robust material is being studied. One particular process, the Thermo-Hygro-Mechanical (THM) process, enables the transformation of wood to achieve the desired performance while remaining an ecological process and keeping the wood chemically unchanged. This THM process relies on the use of three factors to alter the wood's properties : temperature (T), humidity (H), and the application of force (M).

This work focuses on the THM process and characterizes the behavior of wood during this process. To achieve this, a series of experiments is conducted with the aim of defining the parameters and models capable of accurately describing wood behavior. Ultimately, various numerical simulation tools are explored and analyzed. The work concentrates on the pre-treatment phases (drying, humidification) as well as the compression and relaxation phases.

Finally, two models capable of accurately describing wood behavior have been created. The first model describes the evolution of temperature and humidity over time. The second model describes the effect of stress on wood using Abaqus' Hyperfoam model coupled with a viscoelastic model. This model also takes into account the diffusion of temperature during stress compression and relaxation.

Résumé

Le bois est une ressource utilisée par l'Homme depuis la nuit des temps. Très abondant, il est présent dans beaucoup d'application du quotidien (construction, chauffage, outils, ...). Pendant des années, les Hommes ont voulu atteindre la performance, en utilisant des matériaux toujours plus rares et en créant des objets toujours plus complexes. Cependant, à l'heure où le futur de notre planète fait partie des actualités majeur, l'utilisation de ces matériaux non-renouvelable et de cette complexité posent question.

Le bois semble avoir un rôle à jouer dans le changement à venir. Dans le secteur de l'énergie, la biomasse est utilisée pour créer des carburants de synthèses permettant de remplacer les combustibles non-renouvelables actuels. Dans le secteur industriel, c'est la transformation du bois en matériau plus durable mais aussi plus robuste qui est étudiée. Un procédé en particulier, le procédé Thermo-Hygro-Mécanique (THM), permet une transformation du bois pour atteindre la performance recherchée tout en étant un procédé écologique et en gardant un bois non transformé chimiquement. Ce procédé THM se base sur l'utilisation de trois facteurs pour changer les propriétés du bois. La température (T), l'humidité (H) et l'application d'une force (M).

Ce travail se concentre sur le procédé THM et caractérise le comportement du bois durant ce procédé. Pour se faire, une série d'expérience est menée dans le but de définir les paramètres ainsi que les modèles capable de décrire correctement le bois. Finalement, différents outils de simulation numérique sont explorés et analysés. Le travail se concentre sur les phases de pré-traitements (séchage, humidification) ainsi que sur la phase de compression et de relaxation.

Finalement, deux modèles capables de décrire correctement le comportement du bois ont été créé. Un premier permet de décrire l'évolution de la température et du taux d'humidité en fonction du temps. Le second décrit l'action d'une contrainte sur le bois en utilisant le modèle Hyperfoam d'Abaqus, couplé à un modèle viscoélastique. Ce modèle prend également en compte la diffusion de la température durant la compression et la relaxation des contraintes.

Remerciements

Avant toute chose, j'aimerais remercier toutes les personnes qui m'ont soutenu et aidé dans la réalisation de ce TFE.

Premièrement, je voudrais remercier mes promoteurs Thomas Pardoen et Laurent Delannay pour leurs conseils, idées et expertise tout au long de la réalisation de ce TFE. Je tiens à remercier particulièrement les chercheuses qui m'encadrent, Sophie Ryelandt et Marie-Stéphane Colla, pour leur accompagnement, leur disponibilité, leur relecture et leurs précieux conseils.

Je voudrais aussi remercier Vincent Defays de l'OEWB pour avoir amené le sujet et avoir accepté d'être l'un des lecteurs de mon mémoire.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui m'ont offert leur aide pour les expériences. D'abord, les membres du LEMSC, Quentin Mesrez pour son aide sur la mise en place des expériences et le fonctionnement des machines, Alex Bertholet pour son aide et ses idées intéressantes, Vincent Forzee pour la découpe des échantillons et Antoine Bietlot pour l'aide à l'utilisation de certains appareils. Ensuite, un grand merci à Pascal van Velthem pour sa disponibilité, ses idées et son aide dans la réalisation des tests DMA. Enfin, toutes les personnes qui m'ont prêté leurs chaussures, pantalons et blouse pour me permettre d'aller en labo.

J'aimerais finalement remercier les personnes qui m'ont entouré, car comme dit le dicton, "Tout comme les branches d'un arbre se soutiennent mutuellement, nos proches sont les piliers qui renforcent notre parcours.".

Table des figures

1.1 *Forêts en Wallonie, séparation du territoire en zones bioclimatiques [5].* . . 3
1.2 *Évolution de la surface forestière belge [8].* 4
1.3 *Techniques de transformation du bois [16].* 7
1.4 *Système d'axe au tronc [18].* 8
1.5 *Tronc d'un arbre et ses couches [19].* 8
1.6 *En clair le bois de printemps et en foncé le bois d'été.* 9
1.7 *Organisation des microfibrilles [26].* 10
1.8 *Couplage cellulose-hémicellulose-lignine [3].* 10
1.9 *Cellule de bois et ses différentes parois [30].* 11
1.10 *Ponctuation aréolée [25].* 12
1.11 *Perforations et ponctuations dans les vaisseaux [25].* 12
1.12 *Microstructure d'une cellule de bois feuillu [31].* 12
1.13 *Microstructure d'une cellule de bois résineux [31].* 12
1.14 *Listes des procédés de densification* [32]. 13
1.15 Exemple de procédé VTC [33]. 14
1.16 *Comportement typique du module élastique avec la température [40].* 18
1.17 *Température de transition vitreuse des composants du bois en fonction de l'humidité [44].* 19
1.18 Conductivité thermique transversale [46]. 19
1.19 Conductivité thermique longitudinale [46]. 19
1.20 Conductivité thermique du bois en fonction de la température et de l'humidité pour $\rho_{sec} = 515kg/m^3$. [50] 20
1.21 Chaleur spécifique du bois en fonction de la température et de l'humidité pour $\rho_{sec} = 515kg/m^3$ [50]. 20
1.22 Cellule de bois sous différentes concentrations d'eau [56]. 21
1.23 *Retrait et hygroscopicité [59].* 22
1.24 *EMC du bois en fonction de la température et de l'humidité relative suivant la loi d'Hailwood-Horrobin [60].* 23
1.25 *Gonflement volumétrique pour différentes espèces de bois [62].* 24
1.26 Coefficient de diffusion D de l'eau liée en fonction de la température et de l'humidité pour une densité à sec de 500 $\frac{kg}{m^3}$ [65]. 26
1.27 *Coefficient de diffusion D de l'eau libre en fonction de la densité [66].* . . . 26
1.28 Représentation viscoélastique d'un matériau [69]. 28
1.29 Modèle de Maxwell [69]. 28
1.30 Modèle de Kelvin-Voight [69]. 28
1.31 Modèle de Maxwell généralisé pour $y(t) = E(t)$, le module de Young [69]. . 29
1.32 William Landel Ferry [73]. 30
1.33 Comportement du bois sous compression radiale [75]. 31
1.34 Cellule de bois de sapin avant compression [77]. 31
1.35 Cellule de bois de sapin après compression [77]. 31

1.36 Déformation en compression dans la direction tangentielle pour différentes espèces d'arbres. Les courbes pour un chargement radial sont en principe similaire [62]. 32
1.37 Cycles de compression radiale du bois de sugi dans des conditions humides et sèches selon différentes températures [62]. 32
1.38 Effet de Mullins [78]. 33
1.39 *Dégradation du bois avec la température [83].* 34

2.1 *Échantillon en repère cartésien [84].* 35
2.2 *Mise en place de l'expérience thermique.* 37
2.3 *Schéma de l'échantillon de bois cubique avec les thermocouples.* 38
2.4 *Échantillon de bois cubique avec les thermocouples.* 38
2.5 *Schéma de fonctionnement d'un thermocouple.* 38
2.6 *Machine de compression.* 39
2.7 *Échantillon de bois "plaque" avant compression.* 39
2.8 *Limite d'élasticité au flambement [90].* 41
2.9 *Résultats d'une analyse DMA [93].* 42
2.10 *Échantillons DMA testés en tension et en cisaillement.* 43
2.11 *Température en fonction du temps pour les expériences en DMA.* 43

3.1 *Évolution du taux d'humidité en fonction du temps en séchage pour un échantillon "bâton".* 45
3.2 *Évolution du taux d'humidité pour différentes géométries.* 45
3.3 *Évolution de la masse en fonction du temps en humidification dans une enceinte climatique à 98% pour cinq échantillons de géométrie "bâton".* . . 46
3.4 *Évolution de la température à l'intérieur de l'échantillon.* 47
3.5 Courbe de compression de différents échantillons. 50
3.6 *Phase élastique de la compression.* 51
3.7 *Relaxation des contraintes à sec pour une géométrie "plaque".* 53
3.8 *Relaxation des contraintes pour une géométrie "bâton" et un taux d'humidité de 22.5%.* 53
3.9 *Relaxation des contraintes à 170°C pour différentes géométries et à un taux d'humidité de 22.5%* 54
3.10 *Module de stockage E'_r et facteur de perte dans la direction radiale.* 56
3.11 *Module de cisaillement $G_{r\theta}$ et facteur de perte dans la direction radiale.* . . 57
3.12 *Module de stockage E_z et facteur de perte dans la direction longitudinale.* . 57

4.1 Conductivité thermique donnée par l'équation 4.21 en fonction de la température pour différents taux d'humidité. 64
4.2 *Type de test pour données expérimentales [111].* 71

5.1 *Évolution du taux d'humidité moyen pour un échantillon "bâton" en séchage à 104°C.* 75
5.2 Simulation pour différents coefficients de convection k_v d'un échantillon "bâton" en séchage. 76
5.3 Simulation pour différents coefficients de diffusions D_0 d'un échantillon "bâton" en séchage. 77
5.4 *Évolution du taux d'humidité selon un axe de direction longitudinale passant par le centre de l'échantillon pour différents temps.* 77

5.5 *Évolution du taux d'humidité moyen pour un échantillon "cube".* 78
5.6 *Coupe radiale de l'échantillon "cube" après 2000 secondes dans l'étuve (évaluation du taux d'humidité).* 78
5.7 *Coupe longitudinale de l'échantillon "cube" après 2000 secondes dans l'étuve (évaluation du taux d'humidité).* 78
5.8 *Simulation - Évolution de la température en fonction du temps pour un échantillon "cube" et "bâton" placé dans l'étuve à 104°C.* 79
5.9 *Coupe radiale de l'échantillon "cube" après 200 secondes dans l'étuve (évaluation de la température).* 80
5.10 *Coupe longitudinale de l'échantillon "cube" après 200 secondes dans l'étuve (évaluation de la température).* 80
5.11 *Comparaison entre l'état de température sur un axe radial et longitudinal à 200s.* 80
5.12 *Évolution du taux d'humidité moyen pour un échantillon "bâton".* 81
5.13 *Évolution de la température moyenne simulée et expérimentale aux thermocouples pour deux coefficients de convection différents.* 82
5.14 *Évolution de la température aux thermocouples pour la simulation et l'expérience.* 82
5.15 Diffusion de l'humidité et de la température et de la température de l'échantillon dans la presse. 83
5.16 *Taux d'humidité sur la face de normale radiale en contact avec la presse après 3000s.* 84
5.17 Évolution de la température moyenne de l'échantillon "cube", comparaison avec Abaqus. 85
5.18 Évolution du taux d'humidité dans l'étuve en fonction du temps. 86
5.19 Courbe de déformation-contrainte évaluée pour plusieurs degrés de U. . . . 87
5.20 Courbe de déformation-contrainte évaluée pour différents coefficients de Poisson pour $N = 3$. 88
5.21 *Cylindre du test de compression entre les plaques de la presse.* 89
5.22 *Échantillon "plaque" entre les plaques de la presse.* 89
5.23 *Essai de compression simulé pour différentes géométries et résultats expérimentaux pour la géométrie "plaque".* 90
5.24 Modèles d'Ogden et Polynomial. 91
5.25 Modèle d'Ogden pour la compression simulée du cylindre et de la géométrie "plaque" comparé à l'expérience. 92
5.26 Prise en compte des paramètres viscoélastiques pour une vitesse de compression de 20 mm/min. 93
5.27 Relaxation des contraintes en fonction du temps pour différents échantillons. 94
5.28 Résultat du modèle Crushable foam pour différents coefficients de Poisson, comparé à la courbe expérimentale d'un échantillon "plaque" à 170°C et 0% d'humidité. 96
5.29 *Résultat du modèle Crushable foam pour différents ratio de limite d'élasticité en compression uniaxiale et hydrostatique, comparé à la courbe expérimentale d'un échantillon "plaque" à 170°C et 0% d'humidité.* 97

A.1 Cycle du bois [12]. 113
A.2 Proportions des composants selon différentes espèces [126]. 114
A.3 Volume d'eau pour une densité de bois donnée [38]. 114

A.4 Retrait du bois en fonction de l'espèce [38]. 115
A.5 Caractère viscoélastique en fonction du taux de cristallinité 115
A.6 Fonction d'énergie de déformations pour différents modèles 116

B.1 Bois de peuplier entreposé dans le Lemsc 117
B.2 Balance - sartorius 1501 MP8. 117
B.3 Pied à coulisse - Mitutoyo DIGIMATIC Caliper 117
B.4 Humidimètre - GE Protimeter timbermaster 118
B.5 Étuve - Heraeus UT 6760 118
B.6 Enceinte climatique - vötschtechnik VC3 4018 118
B.7 Lecteur de thermocouples - l'Agilent 34972A LXI Data Acquisition 119
B.8 Résine thermo-hygro résistante. 119
B.9 Expérience de diffusion de la température - mise en place. 119
B.10 Machine de DMA - DMA/SDTA861 Mettler Todeo 120

D.1 *Abaqus Hyperfoam - contrainte, test de compression du cylindre à une déformation de -0.5.* 123
D.2 *Abaqus Hyperfoam - contrainte, test de compression du cylindre à une déformation de -0.9.* 123
D.3 *Abaqus Hyperfoam - contrainte, test de compression du cylindre à une déformation de -1.2.* 124
D.4 *Abaqus Hyperfoam - contrainte, test de compression de la géométrie "plaque" à une déformation de -0.3.* 124
D.5 *Abaqus Hyperfoam - contrainte, test de compression de la géométrie "plaqueé à une déformation de -0.5.* 124
D.6 *Abaqus Hyperfoam - contrainte, test de compression de la géométrie "plaque" à une déformation de -0.8.* 125
D.7 *Abaqus Hyperfoam - contrainte, test de compression de la géométrie "plaque" à une déformation de -1.2.* 125
D.8 *Abaqus Hyperfoam - contrainte, test de compression de la géométrie "plaque" à une déformation de -1.2 - Adaptive meshing* 125

E.1 *Abaqus Ogden - contrainte, test de compression de la géométrie "cylindre" à une déformation de -1.2* 126
E.2 *Abaqus Ogden - contrainte, test de compression de la géométrie "cylindre" à une déformation de -1.2 - Adaptive meshing* 126

F.1 *Abaqus Visco - contrainte, test de relaxation de la géométrie "plaque" à une déformation de -1.2, t=0s* 127
F.2 *Abaqus Visco - contrainte, test de relaxation de la géométrie "plaque" à une déformation de -1.2, t=200s* 127
F.3 *Abaqus Visco - contrainte, test de relaxation de la géométrie "plaque" à une déformation de -1.2, t=1000s* 128
F.4 *Abaqus Visco - contrainte, test de relaxation de la géométrie "plaque" à une déformation de -1.2, t=5000s* 128

G.1 *Abaqus Crushable foam - contrainte, test de compression de la géométrie "plaque" à sec, 170°C à une déformation de -0.3* 129
G.2 *Abaqus Crushable foam - contrainte, test de compression de la géométrie "plaque" à sec, 170°C à une déformation de -0.6* 129

G.3 *Abaqus Crushable foam - contrainte, test de compression de la géométrie "plaque" à sec, 170°C à une déformation de -1.2* 129

Liste des tableaux

1.1 *Données des espèces d'arbres forestiers selon l'IPRFW [12].* 5
1.2 Répartition du bois productif [$10^3\,m^3$] [12]. 6

3.1 Moyenne des coefficients de retrait sur les 9 échantillons de géométrie "bâton". 44
3.2 Moyenne des coefficients de gonflement sur 3 échantillons de géométrie "bâton". 46
3.3 EMC du bois selon différents taux d'humidité pour une géométrie "bâton" (95%) et "plaque" (65%). 46
3.4 Module d'élasticité E moyen pour des échantillons "plaque" compressés dans la direction radiale. 51
3.5 Module d'élasticité E moyen en fonction de la température pour des échantillons "plaque" secs compressés dans la direction radiale. 52
3.6 Limite de flambement σ_b moyenne en fonction de la température pour des échantillons "plaque" compressés dans la direction radiale. 52
3.7 Limite de flambement σ_b moyenne en fonction de la température pour des échantillons "plaque" secs compressés dans la direction radiale. 52
3.8 Coefficient de Poisson moyen. 54
3.9 Paramètres obtenus à l'ambiant comparé à la littérature. 58

4.1 Table des paramètres définissant D. 65
4.2 Unités de base pour les simulations. 68

5.1 Modules de cisaillement prédits par le modèle Hyperfoam pour l'évaluation de l'essai de compression à 170°C et $\phi = 22.5\%$. 87
5.2 Modules de cisaillement prédits par le modèle Hyperfoam en fonction de différents coefficients de Poisson, pour l'évaluation de l'essai de compression à 170°C et $\phi = 22.5\%$. 89
5.3 Paramètres de Prony. 92
5.4 *Paramètres G_0 évalués par Abaqus pour l'essai d'un échantillon à 170°C et 0% d'humidité.* 94
5.5 Paramètres de Prony pour l'essai d'un échantillon à 170°C et 0% d'humidité. 95

C.1 Table des paramètres définissant k en fonction de la température, humidité et densité. 121

Table des matières

Abstract i

Résumé ii

Remerciements iii

Table des figures iii

Liste des tableaux ix

Introduction 1

1 État de l'art 2
- 1.1 Contexte . . . 2
- 1.2 Le bois en Belgique . . . 3
  - 1.2.1 Politique belge . . . 3
  - 1.2.2 Exploitation forestière . . . 5
  - 1.2.3 Le travail du bois . . . 6
- 1.3 Structure du bois . . . 8
  - 1.3.1 Anatomie du bois . . . 8
- 1.4 Les procédés THM . . . 12
  - 1.4.1 Densification sans vapeur . . . 13
  - 1.4.2 Densification avec vapeur . . . 14
  - 1.4.3 Post traitements . . . 15
- 1.5 Propriétés du bois . . . 17
  - 1.5.1 Densité et porosité . . . 17
  - 1.5.2 Thermodynamique . . . 17
  - 1.5.3 Hygrodynamique . . . 21
  - 1.5.4 Viscoélasticité du bois . . . 27
  - 1.5.5 Contrainte . . . 30
  - 1.5.6 Endommagement . . . 33

2 Matériel et méthodes 35
- 2.1 Bois . . . 35
- 2.2 Densité . . . 36
- 2.3 Masse sèche . . . 36
- 2.4 Transfert de chaleur . . . 37
- 2.5 Transfert de l'humidité . . . 37
- 2.6 Compression . . . 39
- 2.7 Analyse DMA . . . 41

3 Résultats expérimentaux et discussion **44**
3.1 Diffusion de l'eau liée et de la température . . . 44
3.1.1 Séchage . . . 44
3.1.2 Humidification . . . 45
3.1.3 Diffusion de la chaleur . . . 46
3.1.4 Discussion intermédiaire . . . 48
3.2 Essais mécaniques . . . 50
3.2.1 Compression . . . 50
3.2.2 Relaxation . . . 52
3.3 Analyse DMA . . . 56
3.3.1 Direction radiale . . . 56
3.3.2 Direction longitudinale . . . 56

4 Simulation numérique - Modèles et mise en place **60**
4.1 Équation de diffusion chaleur-humidité . . . 60
4.1.1 Mise en place . . . 60
4.1.2 Hygro . . . 65
4.1.3 Les analyses . . . 66
4.2 Abaqus . . . 68
4.2.1 Contrainte . . . 69
4.2.2 Hyperfoam . . . 70
4.2.3 Hyperelasticity . . . 72
4.2.4 Crushable foam . . . 72
4.2.5 Viscoélasticité . . . 73
4.2.6 Modèles Abaqus . . . 73

5 Simulation Numérique - Résultats et discussion **75**
5.1 Diffusion de l'humidité et de la chaleur - séchage . . . 75
5.2 Diffusion de l'humidité et de la chaleur - humidification . . . 80
5.3 Diffusion de l'humidité et de la chaleur - expérience en température . . . 81
5.4 Diffusion de l'humidité et de la chaleur - presse . . . 83
5.5 Abaqus . . . 84
5.5.1 Diffusion de la chaleur et de l'humidité . . . 84
5.5.2 Modèles Hyperfoam . . . 86
5.5.3 Hyperelasticity . . . 90
5.5.4 Viscoelasticity . . . 92
5.5.5 Échantillon à sec . . . 94
5.5.6 Crushable foam . . . 95
5.6 Résumé de la discussion . . . 97

Appendix **111**

A État de l'art et modèles **113**
A.0.1 Energy dissipation for elastomeric foam et Mullins effect . . . 113

B Matériel **117**

C Application à d'autres bois **121**
C.1 Conductivité thermique 121
C.2 Chaleur spécifique 122
C.3 Diffusion de l'eau 122
C.4 Retrait et gonflement 122
C.5 Propriétés mécaniques 122

D Résultats de la simulation - Hyperfoam **123**
D.1 Cylindre 123
D.1.1 Plaque 124

E Résultats de la simulation - Ogden **126**

F Résultats de la simulation - Viscoelasticité **127**

G Résultats de la simulation - Crushable foam **129**

Liste des symboles

$\alpha_{\phi i}$	Coefficient de retrait du bois dans la direction i	–
$\alpha_{\phi V}$	Coefficient de retrait volumique du bois	–
α_{thi}	Coefficient de dilatation thermique du bois dans la direction i	–
β_i	Compressibilité du terme i de la fonction d'énergie de déformation U	–
ϵ_ϕ	Gonflement dû à l'humidité	–
$\epsilon_{el,n}$	Déformation élastique nominale	–
$\epsilon_{el,t}$	Déformation élastique vraie	–
ϵ_{pl}	Déformation plastique	–
ϵ_{th}	Dilatation thermique	–
ϵ_{tot}	Déformation totale	–
ϵ_{vel}	Déformation viscoélastique nominale	–
ν_{ij}	Coefficient de Poisson dans la direction j suite à l'application d'une contrainte dans la direction i	–
ϕ	Taux d'humidité du bois	$\frac{kg_{eau}}{kg_{sec}}$
ρ	Densité du bois à un certain taux d'humidité ϕ	$\frac{kg}{m^3}$
ρ_{sec}	Densité du bois sec	$\frac{kg_{sec}}{m^3}$
σ_b	Limite d'élasticité avant flambement des parois	MPa
τ_i	Temps de relaxation du terme numéro i de la série de Prony	s
A	Aire d'une surface	m^2
a_T	Facteur de décalage de la loi WLF	–
ASE	Anti-Swelling Efficiency, définit le retour de forme	–
c_p	Chaleur spécifique	$\frac{W}{kgK}$
D	Coefficient de diffusion de l'humidité	$\frac{m^2}{s}$
E_i''	Module de Young (de perte), module élastique sous tension dans la direction i	MPa
E_i *ou* E_i'	Module de Young (de conservation), module élastique sous tension dans la direction i	MPa
EMC	Équilibre hygrométrique	$\frac{kg_{eau}}{kg_{sec}}$

F	Force	N
G''_{ij}	Module de Coulomb (de perte), module élastique sous cisaillement de direction j d'une surface de normale i	MPa
$g_R(t)$	Module de Coulomb normalisé	MPa
G_{ij} *ou* G'_{ij}	Module de Coulomb (de conservation), module élastique sous cisaillement de direction j d'une surface de normale i	MPa
h	Coefficient de convection thermique	$\frac{W}{m^2K}$
J	Flux d'humidité total	$\frac{kg_{eau}}{kg_{sec}m^2s}$
j	Flux d'humidité	$\frac{kg_{eau}}{kg_{sec}m^2s}$
K	Module de masse, module élastique sous compression uniforme	MPa
k	Conductivité thermique	$\frac{W}{mK}$
K, K'	Module de masse	MPa
$k_R(t)$	Module de masse normalisé	MPa
k_v	Coefficient de convection de l'humidité	$\frac{1}{ms}$
m	Masse du bois à un certain taux d'humidité	kg
m_{sec}	Masse du bois à sec	kg_{sec}
PSF	Point de saturation des fibres	$\frac{kg_{eau}}{kg_{sec}}$
Q	Flux de chaleur total	$\frac{W}{K}$
q	Flux de chaleur	$\frac{W}{m^2K}$
R_h	Humidité relative de l'air	$\frac{kg_{eau}}{kg_{eau,max}}$
s	Solubilité	$\frac{kg_{eau}}{kg_{sec}}$
T	Température	$°C$
T_g	Température de transition vitreuse	$°C$
$tan(\delta)$	Facteur d'amortissement	$-$
U	Énergie de déformation	J
V	Volume d'un bois	m^3
x_∞	∞ indique les conditions environnantes	$-$
x_{wall}	*wall* indique les conditions à la surface du bois	$-$

Introduction

Contexte

À mesure que les industries et la société évoluent, la demande pour des matériaux de construction et des produits manufacturés à haute performance et durables augmente. Dans ce contexte, le bois a gagné en intérêt en tant que matériau de choix pouvant répondre à ces exigences. Cependant, pour exploiter pleinement le potentiel du bois dans les applications modernes, il est essentiel de développer des méthodes innovantes de transformation qui renforcent ses propriétés sans affecter ses caractéristiques naturelles.

C'est ici que la densification thermique-hygro-mécanique (THM) entre en jeu. La densification THM est une technique récente qui repose sur l'utilisation simultanée de la chaleur, de l'humidité et de la compression mécanique contrôlée pour améliorer les propriétés du bois. Le procédé tire parti des changements de structure cellulaire du bois, induits par la variation des facteurs cités, pour augmenter sa densité, sa résistance et sa stabilité. En conséquence, le bois densifié par la méthode THM devient un matériau hybride, alliant les avantages naturels du bois à des performances améliorées, le rendant ainsi adapté à une gamme plus large d'applications.

L'intérêt pour la densification THM du bois est particulièrement pertinent à l'ère de la durabilité et de l'efficacité des ressources. Les avantages de cette méthode incluent l'utilisation de ressources et d'équipements relativement peu coûteux, le recours à des procédés respectueux de l'environnement et la capacité à valoriser davantage les ressources forestières en augmentant leur utilisation. Cette technique s'aligne sur les principes d'une économie durable en prolongeant la durée de vie utile du bois et en réduisant la dépendance aux matériaux non renouvelables.

Cependant, la densification THM n'a pas que des avantages. Il existe des considérations techniques, environnementales et économiques complexes à prendre en compte lors de l'application de cette méthode. Il est donc impératif de mener des recherches approfondies pour comprendre les mécanismes en action, les propriétés obtenues et les conditions optimales en fonction des différents paramètres.

Objectifs

L'objectif principal de ce travail d'explorer et de mener à bien une simulation du procédé de densification THM. Cette simulation est utile dans la mesure où elle permet de mieux comprendre le procédé de densification et, dans le futur, d'évaluer les optimums de fonctionnement du procédé. Plus précisément, les objectifs sont les suivants,

- **Identifier** les **paramètres** principaux entrant en jeu dans le procédé Thermo-hygro-mécanique par expérience ou par littérature.
- **Définir** les **modèles**, les lois permettant de décrire ces paramètres en fonction de la température, de l'humidité et d'une charge mécanique.
- **Créer** une ou plusieurs **simulations** numériques basées sur ces modèles.
- **Valider** ces simulations sur base des données expérimentales.

Ce travail est séparé en plusieurs chapitres traduisant chacun un des objectifs.

Le premier chapitre est consacré à une revue de la littérature. Il commence par détailler le contexte du bois en tant que ressource en Belgique. Il s'ensuit alors la description de la structure du bois et des différences entre les espèces. Finalement, son comportement sous l'action de contraintes, de différent taux d'humidité et sous différentes températures est décrit.

Le second chapitre décrit la mise en place d'expériences menées en laboratoire et permettant d'obtenir des données expérimentales nécessaires à l'évaluation des paramètres du procédé TMH et/ou à la validation des modèles. L'espèce sur laquelle ce mémoire se concentre est le peuplier, malgré le fait que le travail réalisé peut s'appliquer à d'autres espèces. En effet, la méthode d'étude est similaire pour tous les types de bois, car ils sont constitués des mêmes composants aux proportions près.

Le troisième chapitre présente les résultats des expériences décrites au chapitre précédent. Une discussion et analyse sont faites sur base des observations.

Le quatrième chapitre reprend la mise en place des simulations, leurs objectifs respectifs et décrit les modèles et paramètres utilisés.

Le cinquième et dernier chapitre analyse les résultats des simulations et discute de leur précision et applicabilité en fonction des modèles.

Enfin, une conclusion sur le travail est présenté dans le dernier chapitre, accompagnée des différentes pistes d'améliorations et des possibles investigations futures.

1 | État de l'art

Le premier chapitre de ce mémoire a pour but de décrire le matériau bois ainsi que le procédé de mise en forme thermo-hygro-mécanique (THM). Le début du chapitre est consacré à la place que celui-ci occupe en Belgique et en Wallonie. La suite porte sur l'analyse du bois en tant que matériau. Cette analyse décrira tant la structure, la composition, que les propriétés et les lois analytiques qui régissent son comportement.

1.1 Contexte

Le bois, d'après la définition qu'en donne le dictionnaire, est "la substance solide qui constitue le tronc, les racines et les branches des arbres."[1]. Cette solidité a été exploitée très tôt par l'Homme qui a vu en cette ressource abondante un potentiel. Il a appris à la modéliser à la forme qu'il le souhaite à des fins d'outils ou de construction. Au fil du temps, avec l'accroissement des populations ainsi qu'avec l'expansion des structures anthropiques, le territoire forestier a diminué fortement pour atteindre son niveau actuel. Grâce à la récente évolution des mentalités globales et du confort de vie occidental, la manière de gérer cette ressource change, des règles sont mises en place et on observe même une réaugmentation de la ressource ces dernières années[2].

Le bois fait partie de la ressource "renouvelable" nommée la biomasse. La notion de renouvelable fait référence à une ressource capable de se régénérer à un rythme supérieur ou égal à sa consommation[3]. Parfois, une échelle de temps (échelle humaine) est fixée, de sorte que la ressource est capable de se régénérer dans cet intervalle. Une quantité limite peut également être fixée, afin de garantir un stock de ressource. Le bois est donc renouvelable à condition de le laisser se régénérer et de ne pas en prélever une trop grande quantité. Au-delà de son caractère renouvelable, le bois est un matériau puisant sa matière (constituée de carbone) dans le CO_2 de l'atmosphère[3]. Tant qu'il ne se dégrade pas, il stocke alors une grande quantité de carbone. Finalement, ses propriétés mécaniques sont telles qu'il peut être utilisé comme un matériau substitutif de certains autres étant non renouvelables (métaux, pierre, etc)[4].

Dans l'optique des politiques et des mentalités actuelles, qui consistent à viser une consommation responsable et décarbonnée, la ressource qu'est le bois devient intéressante. Dans le secteur de la construction notamment, il suscite un grand intérêt.

1.2 Le bois en Belgique

En Belgique, 23% du territoire national est couvert de forêts. La plupart de ces forêts sont wallonnes, soit 79%[5]. Sachant que la région wallonne couvre 55.3% du territoire national, près de 33% du territoire wallon est couvert de forêts. La forêt belge stocke environ 480 millions de tonnes d'équivalents CO_2 (biomasse ligneuse, litière, bois mort et couche superficielle du sol). En outre, par le prélèvement de bois et son emploi de longue durée, la forêt compense l'émission annuelle de CO_2 de 800.000 voitures[6] [7].

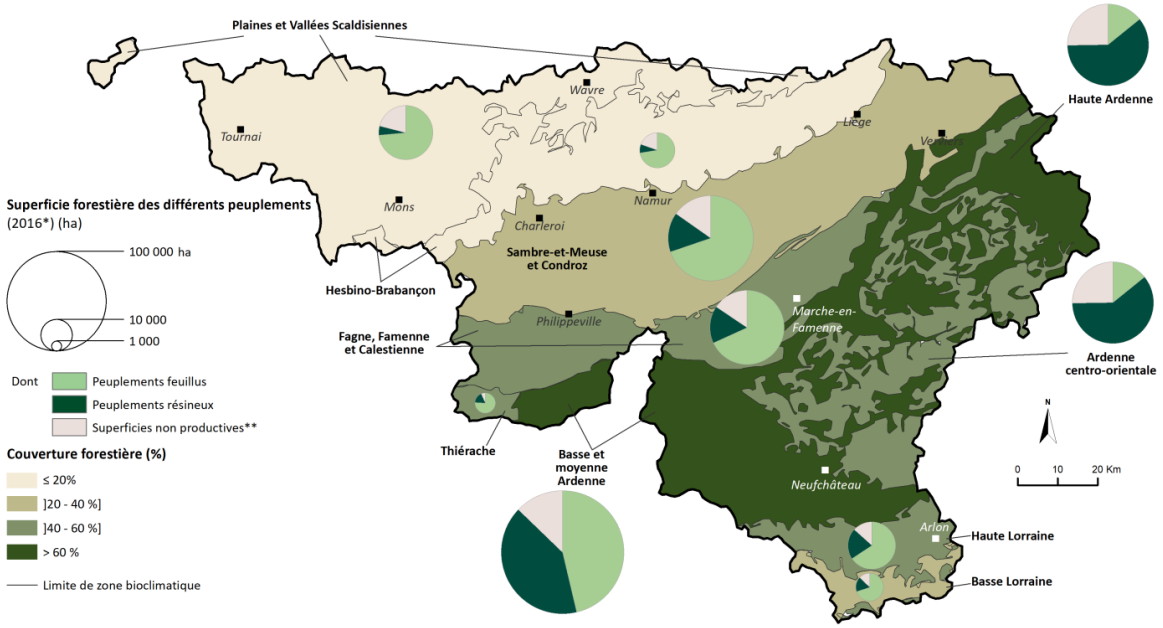


Figure 1.1 *– Forêts en Wallonie, séparation du territoire en zones bioclimatiques [5].*

1.2.1 Politique belge

Depuis les années 80, la Belgique dispose d'un outil de suivi des ressources forestières, appelé, l'Inventaire permanent des ressources forestières de Wallonie (IPRFW)[8]. Depuis le début des recensements, le peuplement d'arbres ne fait qu'augmenter. Comme représenté sur la figure 1.2.
Le 15 juillet 2008, un nouvel arrêté gouvernemental est entré en vigueur [6], celui-ci incite la Belgique à changer son comportement en matière d'abattage d'arbres et de gestion de ses forêts. Il impose notamment une égale répartition entre la population de feuillus et de résineux ainsi qu'une meilleure gestion de la diversité et de la production.

Une forêt peut être séparée en deux types d'arbres de divisions différentes, **les angiospermes**, aussi appelés feuillus, et **les gymnospermes**, aussi appelés résineux.

Le premier groupe comprend les plantes à fleurs donnant des fruits. Une partie des espèces composant ce groupe peuvent grandir en arbre. Elles sont apparues il y a environ 214 Ma, leur développement serait dû, comparé aux gymnospermes, à un avantage concernant une taille de feuilles plus petite, et une meilleure efficacité de la photosynthèse[9].



Figure 1.2 – *Évolution de la surface forestière belge [8].*

Le second groupe comprend les plantes dont l'ovule est à nu. La plupart d'entre elles sont des conifères, il n'existe dans cette division que des plantes ligneuses (arbres et arbustes). Elles sont apparues lors du Dévonien moyen, il y a environ 400 Ma et ont dominé la terre avant l'arrivée des angiospermes[10].

Pour revenir à nos jours, en Belgique, plus de la moitié des peuplements de résineux se composent de pessières (forêts d'épicéas) (tableau 1.1). D'autre part, ces dernières années, il est observé une diminution significative du nombre d'épicéas et de pins. L'exploitant ne replantant pas nécessairement ces espèces. Au vu des prévisions climatiques des prochaines années, elles ne seraient plus adaptées à nos régions. De plus, à partir de 2018, la scolyte a atteint un grand nombre d'épicéas. La tendance actuelle indique une augmentation de la population de feuillus. Il est prouvé que favoriser la diversité des espèces aide à ralentir la propagation de maladie.[11]

Législativement, les forêts wallonnes peuvent être séparées en deux parties. D'un côté se trouvent les forêts **privées**, (50,6%) et de l'autre les forêts **publiques** (49,4%). L'arrêté de 2008 est imposé sur les forêts d'ordre public. La région souhaite arriver à une manière durable d'utiliser les forêts wallonnes par une série de règles. Ces forêts peuvent elles-mêmes être séparées en plusieurs types de propriétaires, les communes, les régions et provinces et ensuite les fabriques d'église, CPAS et intercommunales[5].

Afin de garantir une gestion responsable de la forêt, l'organisation FSC (Forest Stewardship Council [13] [14]) instaura en 1993 un système de certification indépendant et performant dans tous les types de forêts. Elle se base sur 3 piliers : économique (être rentable), social (rémunérer les travailleurs de manière juste) et environnemental (récolte dans le respect de la forêt). 42 281 ha (3,7%) de forêt sont certifiés FSC en Belgique, mais seulement pour la région flamande. Un autre certificat, nommé PEFC a vu le jour en 2012 [15]. Il est aujourd'hui le plus grand système de certification forestière au monde. Près de 302 085

Espèce	Volume sur pied [m^3] - Public	Volume sur pied [m^3] - Privé	Volume sur pied [m^3]
Chênes indigènes	14 061 132	9 799 478	23 860 610
Hêtres	10 727 140	4 578 292	15 305 432
Frênes	841 643	2 952 087	3 794 730
Bouleaux	1 629 808	1 740 981	3 370 789
Peupliers	221 753	1 465 602	1 687 355
Autres feuillus	2 808 971	4 581 495	7 390 466
Total feuillus	30 290 447	25 118 935	55 409 382
Epicéas	20 751 581	27 158 468	47 910 050
Douglas	3 581 512	4 237 104	7 818 616
Mélèzes	1 272 198	1 547 020	2 819 616
Pins	2 231 392	1 063 081	3 294 473
Autres résineux	538 009	547 382	1 085 391
Total résineux	28 374 692	34 553 056	62 927 748
Total général	58 665 139	59 671 991	118 337 130

Table 1.1 *– Données des espèces d'arbres forestiers selon l'IPRFW [12].*

ha (42,6 %) de la surface totale forestière belge est certifiée, seules les forêts wallonnes ont la possibilité d'être certifiées PEFC, 29 324 ha en forêt privée et 271 413 ha en forêt publique. Cette certification repose sur deux principes : la gestion durable des forêts (interdiction d'OGM, respect de la diversité, régénération naturelle de la forêt, chasse, etc) et la certification des entreprises qui transforment le bois afin d'assurer la traçabilité de la matière depuis la forêt jusqu'au produit fini.

1.2.2 Exploitation forestière

Les forêts publiques et privées sont elles-mêmes séparées en deux parties, certaines peuvent être **productives** ou **non productives**. Les surfaces productives sont celles dans lesquels le bois, une fois à maturité, est valorisé en tant que matériau. Pour ce qui est des forêts publiques, 87,5 % des surfaces forestières wallonnes sont productives. Les feuillus représentant 60,6% des espèces et les résineux 39,4 % [5].
Une fois les arbres abattus, le bois peut être utilisé sous 3 types [12] :

- Le **bois d'œuvre** qui est transformé directement et utilisé en tant que matériau de structure/construction (meubles, emballages, constructions, autres boiseries).

- Le **bois d'industrie** qui subit une transformation annexe avant d'être utilisé en un produit dérivé du bois (pâte à papier, chimie du bois, matériaux composites). Ces deux premiers sont transformés en scierie par tranchage, déroulage, travail des bois ronds, sciage et trituration.

- Le **bois d'énergie** qui est utilisé comme combustible soit directement pour se chauffer, soit par le biais d'un produit dérivé.

Pays/Région	Volume sur pied	Accroissement	Récolte bois d'énergie	Récolte bois d'œuvre et d'industrie	Récolte totale
Bruxelles	610	15	1	3	4
Flandre	40 902	1 220	325	526	851
Wallonie	118 337	4 099	725	3 444	4 169
Belgique	159 849	5 334	1051	3 973	5 024

Table 1.2 *– Répartition du bois productif [$10^3\,m^3$] [12].*

Sur base de données enregistrées ces dernières années (tableau 1.2) le volume sur pied de forêt en Wallonie est de $1.18\,10^8$ m^3 parmi lequel $5.024\,10^6$ m^3 est récolté. De plus, le taux de récolte est de 94 % ($\frac{V_{récolte}}{V_{Croissance}}$). Ceci signifie que la croissance des arbres est supérieure à ce qui est coupé. En outre, 83 % de ce bois coupé est destiné au bois d'œuvre et d'industrie, soit environ $4\,10^6$ m^3 par an. Une grande partie du bois d'œuvre se compose d'épicéa.

L'optique de ce mémoire est donc de **valoriser** des espèces d'arbres ayant des **propriétés mécaniques faibles**, mais qui, suite à un traitement, seraient capables de maintenir le même rôle que celui que jouent d'autres espèces plus denses.

1.2.3 Le travail du bois

Le bois dans son passage d'être vivant à matériau va subir une série de transformations. Les procédés classiques sont listés ci-dessous.

- L'**abatage**, soit la mise à mort s'un arbre, consiste en une coupe à la base provoquant sa chute. Il peut être élagué ou démonté préalablement (coupe de l'arbre par le haut). Il s'ensuit un tronçonnage afin de transformer le bois brut en grume (tronc débarrassé de branches et prêt pour la scierie). Cette première étape peut se faire à l'aide d'une tronçonneuse ou d'une machine adaptée (dépendant du rayon de l'arbre)˙

- Le **débitage** consiste en la réduction du fût en produit découpé comme représenté sur figure 1.3. Il existe différents types de débitage définissant les parties des grumes valorisées ainsi que les formes créées[16].

- Le **sciage** est une technique de débitage, qui transforme la grume en planches ou en chevrons. Les tailles (longueurs, largeurs, hauteurs), dépendent directement de la demande. Dans une scierie bien organisée, le déplacement des grumes se fait par tapis roulant[17].

- Le **tranchage** est une méthode similaire au sciage, dans le sens où les formes créées sont similaires. Cependant, l'outil est en mouvement translationnel par rapport au bois à trancher.

- Le **déroulage** est un procédé d'usinage consistant à faire rouler un billon (partie

de la grume, bûche) et à le découper dans sa direction tangentielle telle une feuille continue de bois "déroulée" [16].

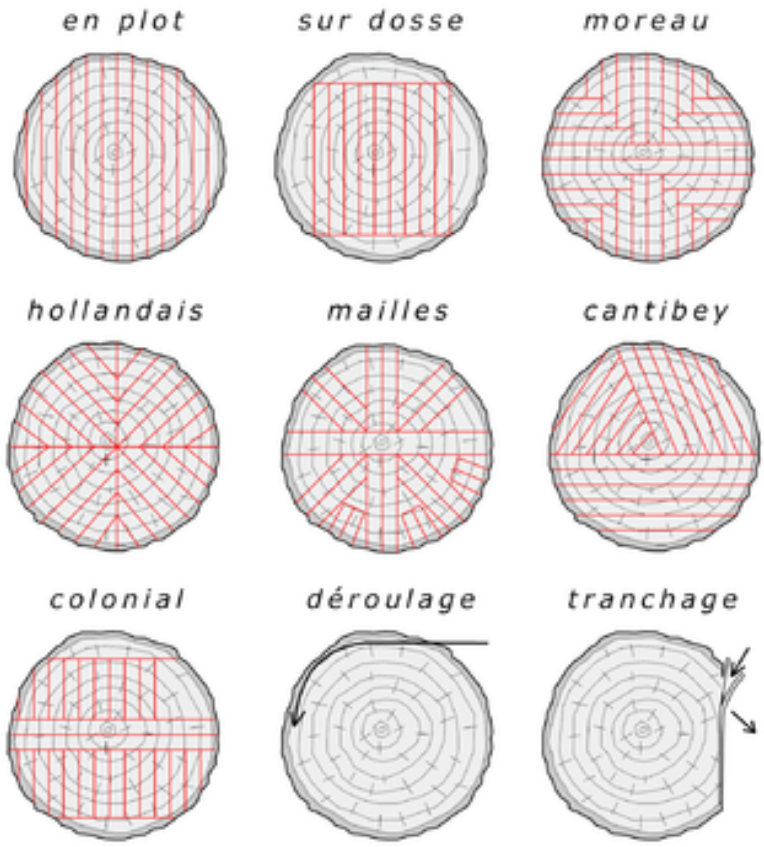


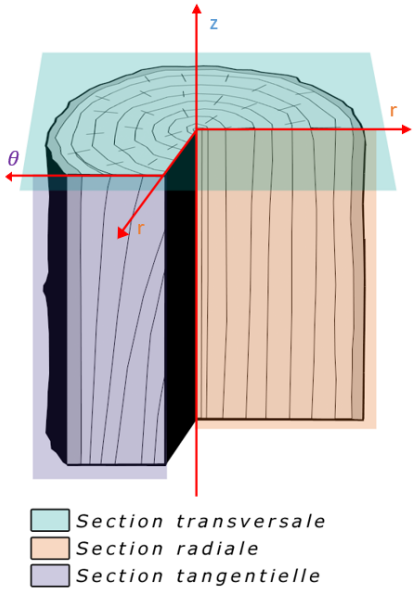
Figure 1.3 – *Techniques de transformation du bois [16].*

1.3 Structure du bois

Pour entamer la suite, il est nécessaire de définir un repère d'axe cylindrique lié à la grume, et dont les pièces de bois découpées suivent les axes. Ce repère est illustré figure 1.4.

- **Direction radiale** r, direction perpendiculaire aux cernes.
- **Direction tangentielle** θ, direction tangentielle aux cernes.
- **Direction longitudinale** z, direction de la longueur du tronc.

Pour commencer, la structure du bois en tant que matériau doit être comprise. Un arbre est un matériau organique dont le tronc est composé de plusieurs couches avec pour élément principal des chaînes carbonées. L'espèce sur laquelle ce mémoire se concentre dans les chapitres suivants est le peuplier. C'est un arbre à croissance rapide et peu dense. Dans tous les cas, le travail réalisé peut s'appliquer à d'autres espèces, la méthode d'étude étant similaire et le bois étant constitué des mêmes composants aux proportions près. La partie de l'arbre valorisée pour ses propriétés mécaniques est le tronc.



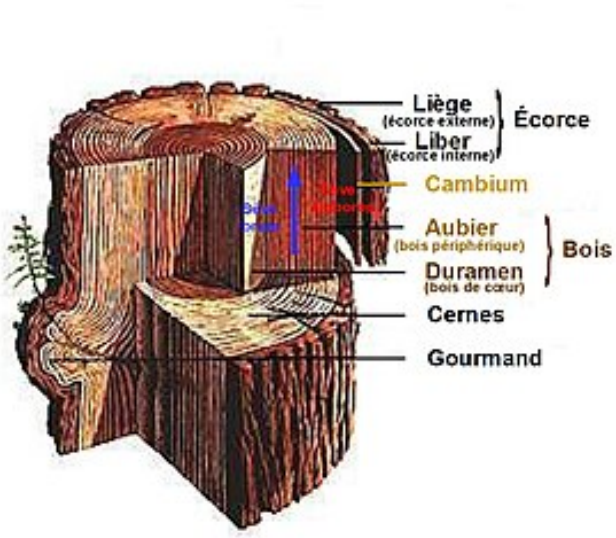


Figure 1.4 *– Système d'axe au tronc [18].* ***Figure 1.5*** *– Tronc d'un arbre et ses couches [19].*

1.3.1 Anatomie du bois

Macroscopiquement, il existe différentes couches dans le tronc de l'arbre figure 1.5.

En partant de l'extérieur, il y a d'abord **l'écorce** [20] , ayant un rôle de protection et de nutrition. Sous l'écorce se trouve le **cambium** [21]. Cette zone est constituée de cellules méristématiques, soit capables de se diviser. Elle est responsable de l'accroissement radial de l'arbre. L'arbre grandissant à la verticale, le tronc doit augmenter de diamètre

avec les années afin de supporter l'augmentation du poids de la plante. Le cambium répond à ce besoin.

Ensuite, vient **l'aubier** [22]. C'est un bois vivant, plus poreux, plus clair, plus léger et plus tendre. Il a le rôle de transporter la sève brute venant des racines. C'est un bois hydraté et plus fragile. Le centre du tronc est appelé **duramen** ou bois de cœur. C'est la partie interne du bois, où se trouvent les cellules les plus anciennes. Cette zone est plus foncée que l'aubier. Les cellules qui le constituent sont mortes, le transport de sève brute ne se fait plus et son rôle, vu la densité plus élevée, est d'apporter une résistance mécanique. Le bois d'œuvre est extrait du duramen [23].

En Europe, le climat est tempéré et il s'opère une baisse des températures durant l'hiver et l'automne. La division cellulaire cesse alors pour reprendre durant le printemps et l'été. Cela donne naissance à des cernes. Une sécheresse peut également stopper la division cellulaire et créer de faux cernes. Dans le tronc, la possibilité de voir les cernes macroscopiquement se traduit par une différence de densité et de taille des cavités. En effet, au printemps, les cavités vont être très larges afin d'assurer le transport de sève. Lorsque l'hiver approche, leur taille va réduire pour favoriser une fonction de support. Comme affiché sur la figure 1.6, le **bois de printemps** (ou bois initial) plus clair est distinguable du **bois d'été** (bois final) [24].



Figure 1.6 – *En clair le bois de printemps et en foncé le bois d'été.*

Microscopiquement, le bois se compose de différentes molécules[25].

La **cellulose** est un biopolymère composé de molécules de glucose. Des liens entre les différentes molécules de glucose peuvent s'établir sous forme de liaisons hydrogène. Cet ensemble de molécules s'organise alors en microfibrilles. Des fibrilles qui peuvent ensuite s'organiser en couches. Si dans la microfibrille, les chaînes de celluloses se lient à d'autres de manière ordonnée et périodique, on parle alors de cristallinité comme représenté à figure 1.7. La zone cristalline est appelée micène et la zone non cristalline est appelée amorphe. La cellulose est le composé le plus abondant dans le règne végétal et est le

principal constituant des parois cellulaires. Son degré de polymérisation varie entre 1 000 et 30 000[**cellulose**].

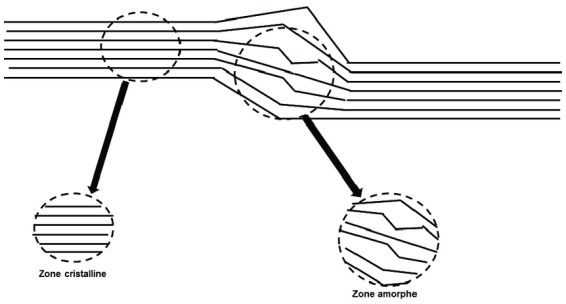


Figure 1.7 *– Organisation des microfibrilles [26].*

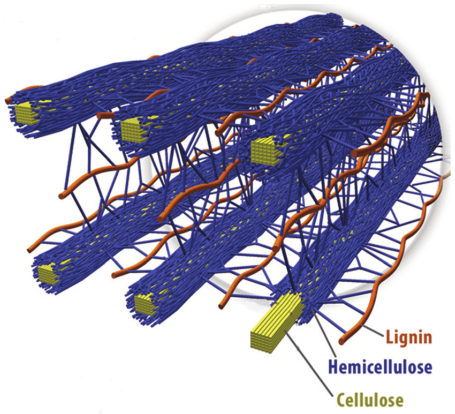


Figure 1.8 *– Couplage cellulose-hémicellulose-lignine [3].*

L'**hémicellulose** est un autre constituant des parois végétales. Elle est faite de chaînes de polymères entrelacées. Ces polymères sont également composés de sucres, principalement de xylose, mais contiennent aussi des sucres à 6 carbones. Sa structure est plus complexe que celle de la cellulose. Elle se ramifie et possède un rôle de pontage entre les fibres de cellulose. Elle est également plus courte que la cellulose. Son degré de polymérisation varie entre 200 et 300[27]. .

La **lignine** est le troisième composant très présent dans le bois avec l'hémicellulose et la cellulose. Elle confère solidité mécanique, résistance à l'eau et à l'humidité. Elle est plus complexe que les deux autres molécules. Elle lie les cellules ensemble dans les parois cellulaires [28].

L'arrangement spatial de ces 3 composants pourrait ressembler à celui donné schématiquement à la figure 1.8. En effet, dépendantes de l'environnement et du type de plante, les propriétés qui doivent être développées ne sont pas pareilles. Le bois a une grande quantité de lignine par rapport aux autres plantes, les efforts imposés à ce type de plantes étant importants. Les proportions de cellulose, hémicellulose et lignine sont représentées suivant la plante sont représentées figure A.2.

Enfin, à faible dose, d'autres substances organiques (polysaccharides, tannins, résines, colorants, etc) ainsi que non organiques (minéraux) sont présentes. Il faut compter également que le bois peut contenir de l'eau en quantité particulièrement élevée.

Cellule de bois

Les parois cellulaires d'un feuillu sont au nombre de 3 (figure 1.9). Elles sont distinguables par les différentes orientations que possèdent les fibres, par leur épaisseur et par la composition en lignine, hémicellulose et cellulose.
La **lamelle mitoyenne** colle les cellules entre elles et est non fibrillaire, c'est-à-dire qu'elle ne possède pas de cellulose. La **paroi primaire** est celle avec laquelle la cellule naît, elle se lignifie jusqu'à sa différentiation des autres cellules.

La **paroi secondaire** contient 3 couches. La S1 est au contact de la paroi primaire. La S2 est la couche la plus épaisse. Cette dernière détermine, de par l'AMF (angle des microfibrilles), les propriétés mécaniques du bois. Les tiges et les branches, étant sujettes à un chargement différent comparé au tronc, possèdent alors un AMF différent. Cependant, pour la suite, seul le tronc est considéré. En effet, en pratique, ces parties de l'arbre sont utilisées principalement pour faire de la pâte à papier ou des panneaux. La S3 est la dernière couche et est en contact avec la sève brute [29].

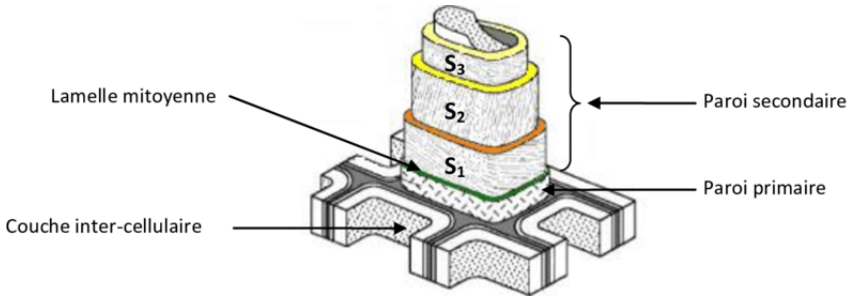


Figure 1.9 – *Cellule de bois et ses différentes parois [30].*

Sur ces parois peuvent apparaître des ponctuations (figure 1.10). Ils marquent un lien entre les trachéides (type de cellules) et permettent l'écoulement de la sève aux cellules adjacentes. Ils peuvent être comparés à de petites valves. Lorsqu'il s'agit de transmettre la sève entre deux cellules qui se chevauchent, ce sont les perforations qui entrent en jeu, comme observé sur figure 1.11 [25].

Les résineux (gymnospermes) et les feuillus (angiospermes) ne possèdent, à cette échelle, plus la même structure.

Dans les **résineux** (figure 1.12) les cellules de bois sont de deux types. Les trachéides sont des cellules allongées venant d'une cellule initiale. Leur rôle est de conduire la sève brute par le biais de perforations et de ponctuations. Elle a aussi un rôle de soutien mécanique. Le second type est défini par les rayons ligneux qui sont constitués de parenchyme radial. Ce dernier a un rôle de stockage et réserve, et d'élaboration de substances de défense, de compartimentation. Ils sont branchés sur le flux de sève brute [25].

Dans les **feuillus** (figure 1.13) il existe également des trachéides, ce sont des petits éléments de vaisseaux transmettant par ponctuation. Il existe également des cellules nommées parenchyme. Elles jouent un rôle dans le transfert d'eau parmi beaucoup d'autres. Les fibres sont des cellules aux parois épaisses dont le lumen (trou des ponctuations) est réduit. Elles assurent un rôle de soutien mécanique [25]. En regardant la forme de la cellule de tant que telle, elle peut être représentée par une forme géométrique dans le plan $r - \theta$. Pour un résineux, cette forme a tendance à se rapprocher de celle d'un rectangle. Pour un feuillu, elle est semblable à un hexagone.

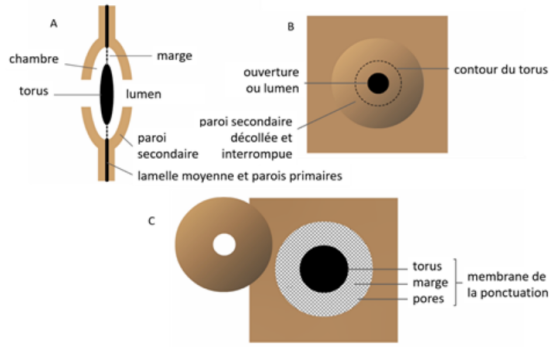


Figure 1.10 – *Ponctuation aréolée [25].*

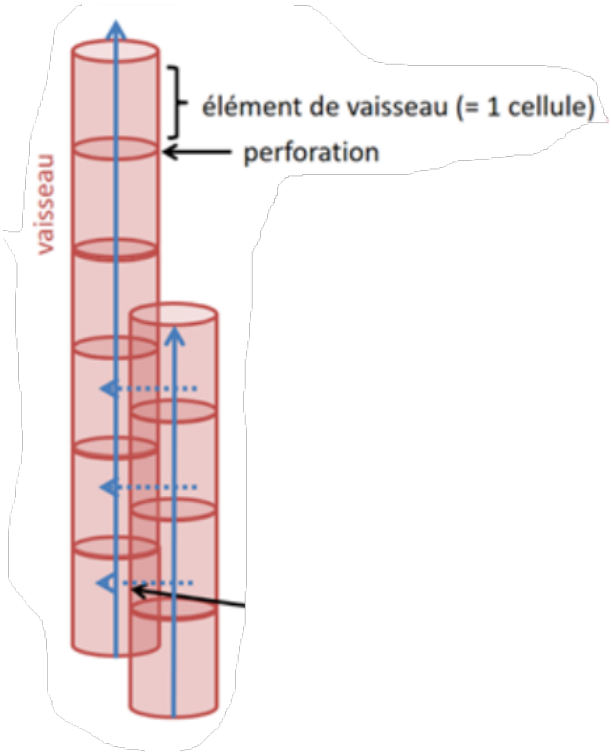


Figure 1.11 – *Perforations et ponctuations dans les vaisseaux [25].*

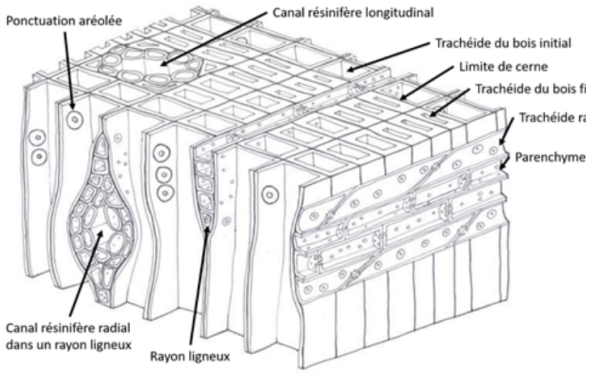


Figure 1.12 – *Microstructure d'une cellule de bois feuillu [31].*

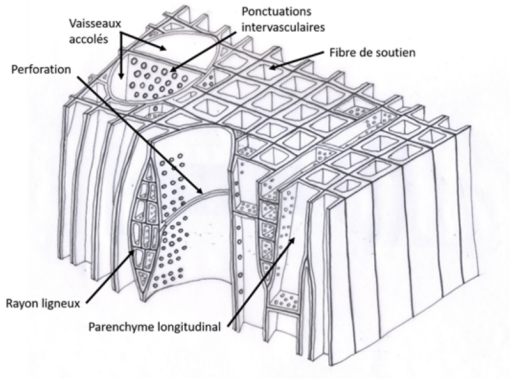


Figure 1.13 – *Microstructure d'une cellule de bois résineux [31].*

1.4 Les procédés THM

Il est possible d'identifier deux types de techniques de densification du bois. La première demande l'utilisation d'un agent chimique dans le but de ramollir, combler les porosités ou créer de nouvelles liaisons. La seconde ne constitue qu'un jeu de température et l'intervention éventuelle de vapeur d'eau afin de ramollir le bois pour ensuite le comprimer (THM, compression thermo-hydro-mécanique). L'avantage de cette seconde technique est qu'elle peut être moins coûteuse, mais elle est aussi plus éco-responsable (bois recyclable, pollution environnementale évitée) [32].
Il y a trois directions selon lesquelles le bois peut être densifié. Selon la direction tangentielle, le bois final subit un flambement et finit en forme de vague. Selon la direction longitudinale,

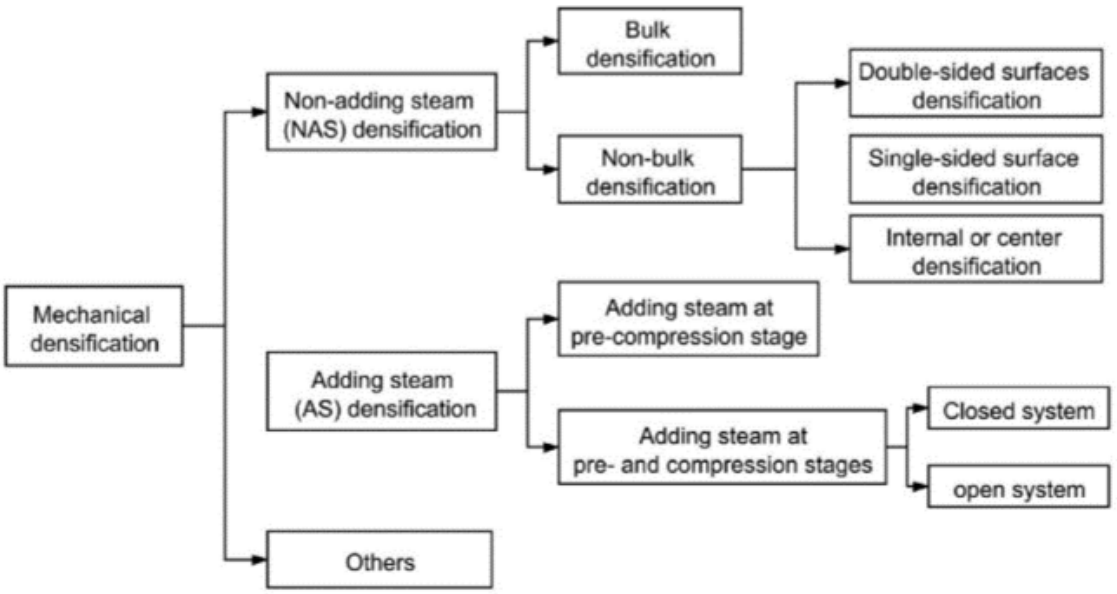


Figure 1.14 *– Listes des procédés de densification [32].*

cela produit des plis et un endommagement considérable à l'échelle microscopique. La direction de compression du bois choisie est généralement la direction radiale, ce qui évite les fractures durant la compression. Les paramètres sur lesquels jouer sont la température de l'échantillon, la pression et l'hygroscopie.

1.4.1 Densification sans vapeur

La **densification NAS** (non added steam) comporte 4 étapes : le ramollissement, la plastification, la compression et le refroidissement. On distingue les procédés de densification homogène des autres. Une densification non uniforme est définie par la compression d'une partie spécifique du bois (surface, centre), ce qui réduit le rapport de compression.

Premièrement, les échantillons sont séchés pour atteindre une quantité d'humidité de 12%. Le rôle de l'humidité est d'assurer que l'échantillon se déforme de manière hyperélastique ainsi que de réduire les effets indésirables causés par la compression (fracture, endommagement). Dans un second temps, l'échantillon est placé entre les plaques pré-chauffées avec une pression faible, ceci afin d'atteindre la température de pré-compression. Celle-ci doit être plus grande que la température de transition vitreuse, à laquelle le bois peut passer de l'état rigide à un état thermoplastique. Cette température varie entre 100 et 230 °C dépendant de l'espèce de bois considérée et des conditions hygroscopiques et thermiques. Le temps de cette pré-compression est celui nécessaire à ce que l'ensemble de l'échantillon atteigne la température de pré-compression. Troisièmement, l'échantillon est comprimé pour atteindre une épaisseur donnée. Enfin, avant de le retirer de la presse, il est nécessaire de refroidir l'échantillon à moins de 100 °C. A des fins industrielles, le procédé peut être subdivisé en plusieurs compressions de plus faibles amplitudes.

Le principe de la **compression non uniforme** se fait en contrôlant la température, de telle sorte que seul l'endroit de l'échantillon dont on souhaite améliorer les propriétés

mécaniques, soit à température suffisante lors de la compression. Les avantages sont : ce procédé est plus court (moins d'énergie dépensée) mais il y a aussi moins de perte de volume.

Le problème majeur des méthodes de densification sans vapeur est la récupération de forme des échantillons, en plus d'un effet de ressort instantané (15-20%), lorsque le bois densifié est exposé à un fort taux d'humidité, un gros retour de forme apparaît. Si le taux d'humidité est maintenu au-delà de 85% après compression, ce dernier peut atteindre 20-30% et dans le cas d'un échantillon compressé entièrement plongé dans de l'eau, il peut être de 60 à 90%. Cette instabilité dimensionnelle limite les utilisations de cette méthode. Une solution est d'appliquer un post-traitement thermique ou de comprimer en presse fermée.

1.4.2 Densification avec vapeur

En plus de la chaleur et de la pression, la **densification avec vapeur** joue également sur l'ajout d'eau. L'ajout de vapeur au sein du bois fait décroître T_g, la compression nécessite dès lors une température inférieure. L'insertion de vapeur permet également un transfert de chaleur plus rapide. L'avantage considérable est la réduction significative du retour de forme. La théorie la plus probante serait la libération des contraintes internes sous l'action combinée de la vapeur et de la chaleur. De la vapeur surchauffée peut également dégrader les composants hygroscopiques des parois cellulosiques, ce qui augmente la stabilité dimensionnelle, vu que les sites -OH ne peuvent plus se recombiner avec de l'eau. Une autre théorie implique la recristallisation de la cellulose dans la fixation de la forme. Il est également possible de comprimer toute l'épaisseur ou seulement localement en augmentant le taux d'humidité local. Par exemple, pour une densification de surface, de l'eau sera aspergée localement, ce qui rendra cette partie du bois plus malléable.

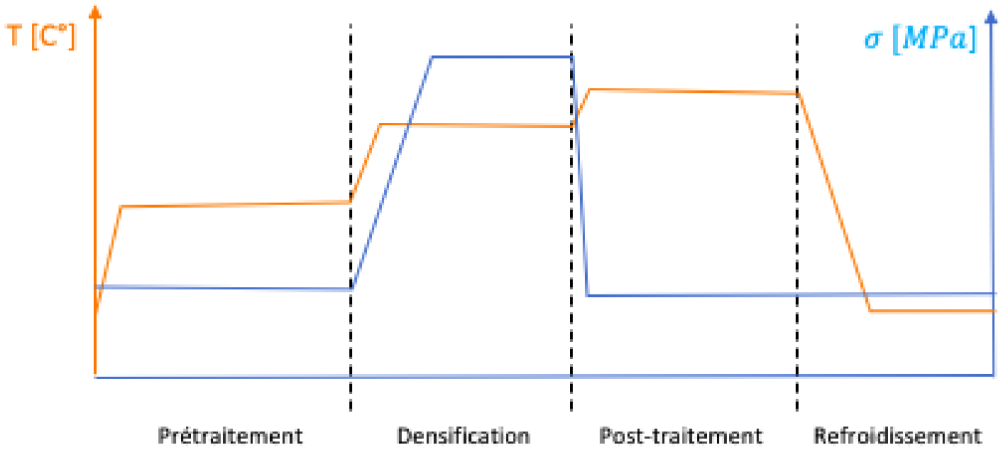


Figure 1.15 – *Exemple de procédé VTC [33].*

Cette gamme de procédés est plus intéressante comparée à celle n'ajoutant pas de vapeur. Notamment, la méthode nommée VTC (viscoelastic thermal compression), promet de bons résultats. L'environnement, en presse fermée, est saturé en vapeur d'eau. Une fois le bois suffisamment ramolli, la vapeur est retirée. Lors de la dernière étape, le bois est refroidi durant la compression figure 1.15. La température de compression peut être plus

basse comparée à une compression en enceinte ouverte. Étant en enceinte fermée, la vapeur d'eau se permet de remplir la presse. Les avantages de cette méthode sont multiples. C'est un processus très rapide (20 minutes). Les propriétés mécaniques peuvent être augmentées jusqu'à un peu plus de 100% pour la limite d'élasticité et la limite à la rupture, pour une densification légèrement supérieure à 50 %. Le taux de retour de déformation est également faible ($\approx 8\%$).

En plus d'ajouter de la vapeur durant l'étape de pré-compression, certains procédés en ajoutent durant la phase de compression. En système fermé, ceci est fait en s'aidant d'une presse dont les plaques sont percées de trous équitablement distribués. Ils permettent également d'évacuer la vapeur en plus d'en injecter. Durant la pré-compression, la presse maintient l'échantillon et le chauffe par le biais des plaques. Durant la compression, elles pressent tout en injectant de la vapeur. Elles maintiennent ensuite à l'épaisseur voulue tout en continuant d'injecter de la vapeur et finalement, elles arrêtent d'injecter pour laisser la vapeur s'échapper. Les avantages de cette méthode sont une augmentation de la stabilité dimensionnelle (avec un post-traitement, le retour de forme tend vers 0%), un temps de courte durée. Toutes les actions sont faites sur la même machine, ce qui permet de l'adapter en industrie et d'augmenter l'efficacité de la production. Les inconvénients majeurs sont la faible augmentation des propriétés mécaniques comparées au procédé VTC et une non-uniformité de la compression due aux trous injectant la vapeur.

1.4.3 Post traitements

Les post-traitements sont en général basés sur une dégradation thermique du bois. Leur but est de figer les dimensions du bois, notamment face à l'humidité, en diminuant le coefficient de retrait, α_ϕ (voir sous-section 1.5.3). De hautes températures permettent la dégradation des polymères d'hémicelluloses hygroscopiques et la création de lien entre des groupes hydroxyles et des chaines cellulosiques adjacentes, voire avec des molécules aromatiques dans la lignine. De plus, cela réduit les contraintes internes générées durant la compression. Les feuillus sont moins sensibles à ce type de post-traitement au vu de leur plus faible composition en hémicellulose.

Le premier type de post-traitement thermique n'utilise que de l'air chauffé. Il a été démontré que la stabilité dimensionnelle de l'échantillon fut grandement améliorée, réduisant les déformations en milieu humide entre 88% et 85% par rapport à un échantillon non post-traité. Un post-traitement par huile existe également, mais coûte plus cher et dégrade encore plus l'hémicellulose (de 84.4 à 91.5% de réduction). Le point négatif de ces deux méthodes est la réduction des propriétés mécaniques. Le dernier post-traitement se base sur de la vapeur surchauffée, mais n'améliore pas spécifiquement la stabilité dimensionnelle (74% de moins), il rend juste le bois plus esthétique. Le point faible est la consommation en énergie et en temps de ces méthodes.

Le second moyen utilisé afin d'augmenter la stabilité dimensionnelle de l'échantillon est la compression dans une presse fermée étanche. Durant la phase de chauffe, l'humidité se trouvant à l'intérieur de l'échantillon se transforme en vapeur et remplit l'enceinte. L'échantillon peut être plongé dans l'eau au préalable afin d'augmenter la teneur en humidité. Après la compression, la vapeur pressurisée est libérée par le biais d'une valve.

Le retour de forme est grandement diminué par cette méthode et est quasiment négligeable pour des temps de post-traitement de 1h à 3h à des températures de 180-220 °C. Il y a un lien direct entre la température et le temps. Une étape de refroidissement est nécessaire avant l'ouverture afin de réduire la pression interne de la vapeur.

1.5 Propriétés du bois

Dans le but de modéliser le comportement du bois, il est important de comprendre les paramètres physiques ainsi que les lois qui permettent de le prédire. Sous l'action couplée d'une contrainte, d'une humidité relative et de chaleur, le bois va subir une série de déformations dues à des mécanismes différents.

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_{el} + \epsilon_{th} + \epsilon_{vel} + \epsilon_{\phi} \tag{1.1}$$

où ϵ_e, ϵ_{mc}, ϵ_{ve}, ϵ_{vp}, ϵ_{ms} sont les déformations élastiques, thermiques, viscoélastiques et hydriques. ϵ_{tot} est la déformation totale.

1.5.1 Densité et porosité

Le bois comprend un ensemble d'espèces considérables. Celles-ci ont une densité variant de 80 kg/m^3 à $1400kg/m^3$. En général, la densité est inférieure à $1000kg/m^3$, c'est la raison pour laquelle le bois flotte [34]. Il est à distinguer la densité du bois à sec ρ_{sec} de la densité en condition atmosphérique ρ. Dans les deux cas, elle est définie comme le rapport entre la masse et le volume occupé :

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1.2}$$

La densité du bois est inversement proportionnelle au volume de vide qu'il possède. Étant pourvu des mêmes constituants (lignine, cellulose, hémicelluloses) en quantités différentes, mais similaire, seul le volume de vide importe. La porosité est définie comme [35] :

$$r = 1 - \rho_{sec}/\rho_{max} \tag{1.3}$$

La densité des molécules de lignine ρ_{lignin}, d'hémicellulose $\rho_{hémicellulose}$ et de cellulose pures $\rho_{cellulose}$, sans porosité sont respectivement de $1400kg/m^3$, $1560kg/m^3$ et $1520kg/m^3$ [28] [36]. Ceci permet d'évaluer une idée la densité maximale ρ_{max} d'un bois sans vide en fonction des proportions volumiques de lignine $\%lignin$, hémicellulose $\%hemicellulose$ et cellulose $\%cellulose$:

$$\rho_{max} = \%lignin * \rho_{lignin} + \%hemicellulose * \rho_{hemicellulose} + \%cellulose * \rho_{cellulose} \tag{1.4}$$

En se référant au tableau donnant les proportions des composants pour une espèce donnée (figure A.2), ρ_{max} vaut $1500\frac{kg_{sec}}{m^3}$. En comparant cette valeur à la densité du peuplier, sa porosité vaut, $r = 0.66$. Ce qui est en accord avec la littérature [37].
La densité est également affectée par la présence d'eau dans le bois comme décrit dans les annexes figure A.3, [38].

1.5.2 Thermodynamique

La température est un aspect important pour la caractérisation des propriétés du bois, car elles ont une forte dépendance à ce paramètre.

Température de transition vitreuse

A température ambiante, le bois est un matériau rigide et fragile. La température de transition vitreuse (T_g $[K]$) d'un polymère est celle à laquelle il passe de cet état vitreux à un état caoutchouteux [39].

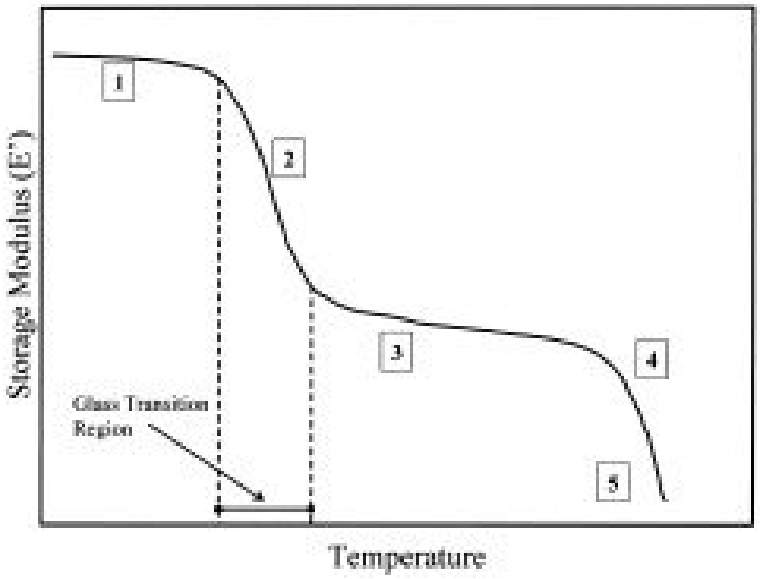


Figure 1.16 – *Comportement typique du module élastique avec la température [40].*

Elle dépend de nombreux facteurs dont la composition et la structure moléculaire. Le plateau vitreux (régime 1) est caractérisé par un module d'élasticité élevé ainsi que peu de mouvement moléculaire (figure 1.16). La zone caoutchouteuse (régime 3) est, quant à elle, caractérisée par un très haut taux d'élongation à la rupture et un module de Young bien inférieur(3000 à 4000 fois). En augmentant encore la température, le polymère passe à un état de masse fondue (régime 5). Cette transition vitreuse (régime 2) est plus apparente si le polymère est amorphe. S'il est semicristallin, l'effet est moins marqué [41].

La température de transition vitreuse du bois dépend de l'humidité (figure 1.17). Il est possible de découpler la transition en fonction des composants du bois. La cellulose peut être cristallisée en partie et sa T_g dépend directement du taux de cristallinité. Sa partie amorphe possède une température de transition vitreuse aux alentours de -30°C, ce qui assure, à température ambiante, un comportement caoutchouteux [42]. Pour l'hémicellulose, il existe un grand nombre de composants chimiques, la T_g dépend dès lors du bois considéré. En général, c'est la lignine qui possède la T_g la plus élevée. À des taux d'humidité tels que le bois est saturé, la température de transition vitreuse se trouve aux alentours de 80-90°C [43].

Conductivité thermique

La conductivité thermique (k $[\frac{W}{kgK}]$) est la capacité qu'un matériau possède à transmettre la chaleur [45]. Dans le bois, elle va dépendre de plusieurs paramètres. Le premier étant la porosité du bois. En effet, l'air est un très bon isolant. Elle va également dépendre du taux d'humidité et de la température.

Sur la figure 1.19, la conductivité thermique des bois augmente avec la densité. Ces données sont définies par la base de donnée de Granta pour le bois à 12% d'humidité [46].

La conductivité thermique va dépendre de la direction (r,θ,z) du bois. Elle est environ deux fois plus élevée dans la direction longitudinale par rapport à la transversale [47].

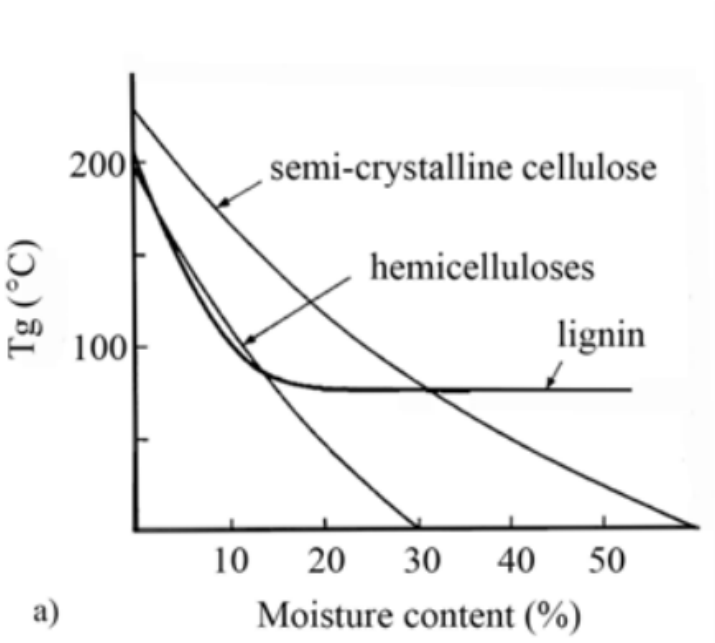


Figure 1.17 – *Température de transition vitreuse des composants du bois en fonction de l'humidité [44].*

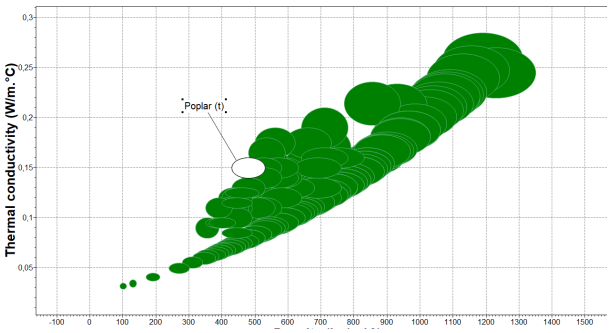


Figure 1.18 – *Conductivité thermique transversale [46].*

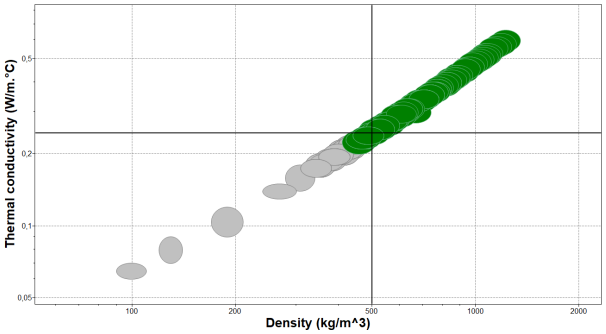


Figure 1.19 – *Conductivité thermique longitudinale [46].*

La seconde dépendance de k est l'humidité. Lorsque le taux d'humidité ϕ du bois augmente,le nombre de molécules d'eau augmente également. L'eau étant très conductrice, la conductivité thermique augmente. La conductivité thermique du bois en fonction de la température et de l'humidité est donnée figure 1.20 pour le bouleau (birch wood). Comme ce bois possède une densité toutefois proche de celle du peuplier (ρ_{sec} =515 kg/m^3), ses données sont utilisées. D'un autre côté, un grand nombre de chercheurs ont établi des relations pour la conductivité thermique prenant en compte la densité et le taux d'humidité du bois. Ces expressions sont majoritairement de la forme suivante [48], avec E, F et G des constantes :

$$k = E * \rho_{sec} * \phi + F * \rho_{sec} + G \tag{1.5}$$

Chaleur spécifique

La chaleur spécifique c_p $[\frac{J}{kgK}]$ est définie comme la quantité d'énergie qu'un matériau peut stocker thermiquement [49]. Elle dépend du taux d'humidité et de la température du bois suivant la figure 1.21.

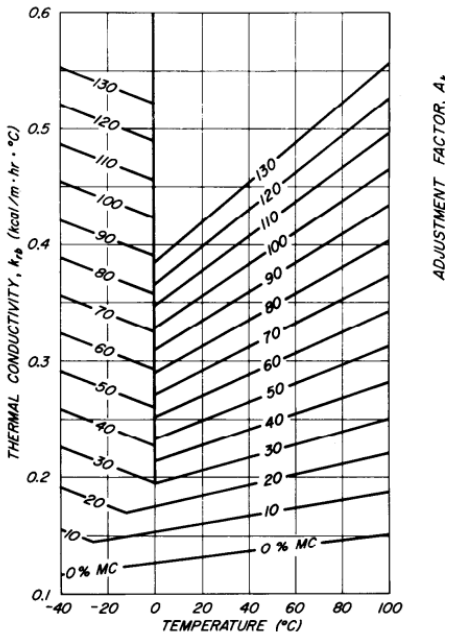


Figure 1.20 *– Conductivité thermique du bois en fonction de la température et de l'humidité pour $\rho_{sec} = 515kg/m^3$. [50]*

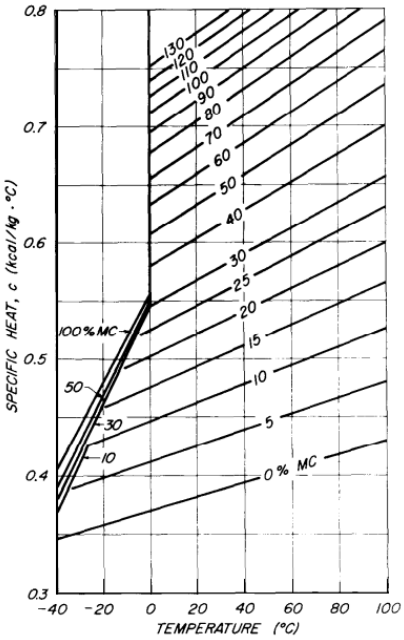


Figure 1.21 *– Chaleur spécifique du bois en fonction de la température et de l'humidité pour $\rho_{sec} = 515kg/m^3$ [50].*

Un grand nombre d'auteurs ont établi également des relations entre le taux d'humidité ϕ et c_p. Ces relations sont de la forme suivante [51].

$$c_p = \frac{c_{p0} + \phi\, c_{pw}}{1 + \phi} + A \tag{1.6}$$

Avec c_{p0}, la chaleur spécifique du bois sec, c_{pw} celle de l'eau et A un coefficient prenant en compte la chaleur spécifique due au lien entre le bois et l'eau liée.

Diffusion de la chaleur

La loi classique de diffusion de la chaleur est une équation aux dérivées partielles paraboliques [45].

$$\rho c_p \frac{\delta T}{\delta t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \tag{1.7}$$

$$Q = -k \nabla T \tag{1.8}$$

Elle définit qu'il existe un flux de chaleur Q $[\frac{W}{m^2}]$, si un gradient de température est présent, ∇T. La variation temporelle de la température est dépendante des propriétés précédemment décrites, c_p, k et ρ.

Dilatation thermique ϵ_{th}

Sous l'action d'un changement de température $(T - T_{ref})$, les dimensions l_0 du bois changent de la manière suivante, pour atteindre une dimension l [52],

$$l = l_0 + l_0\,\alpha_T * (T - T_{ref}) \tag{1.9}$$

Ce changement de dimension est linéaire avec la température. Il est dès lors défini un coefficient, nommé coefficient de dilatation thermique α_T $[\frac{1}{K}]$.

Dans le bois, ce coefficient varie en fonction de la direction. En effet, il est beaucoup plus élevé dans la direction transversale (α_{Tt}) et radiale (α_{Tr}) par rapport à la longitudinale (α_{Tl}). D'après [53], ce coefficient varie également avec la densité du bois, particulièrement dans la direction transversale.

$$\alpha_{Tl} \approx 5 * 10^{-6}\,C \tag{1.10}$$
$$\alpha_{Tr} \approx 50 * 10^{-6}\,C \tag{1.11}$$
$$\alpha_{Tt} \approx 70 * 10^{-6}\,C \tag{1.12}$$
$$\tag{1.13}$$

1.5.3 Hygrodynamique

L'eau peut exister sous 3 formes différentes dans le bois. L'**eau liée**, l'**eau libre** et l'**eau sous forme de vapeur** (figure 1.22). L'eau liée est intégrée à l'hémicellulose et la cellulose des parois par le biais de liaisons hydrogène entre des groupements hydroxyles OH et la molécule d'eau H_2O (grâce à la forte polarité de l'eau) [54]. L'eau libre est quant à elle libre de se déplacer dans les micropores des parois cellulaires ainsi que dans les lumens [55]. Finalement, de l'eau sous forme de vapeur peut également se retrouver dans les mêmes espaces où l'eau libre se trouve. Lors du séchage, ces deux dernières sont les premières à être éliminées.

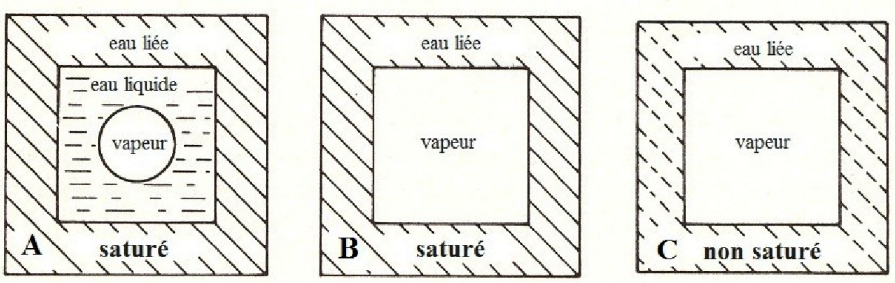


Figure 1.22 *– Cellule de bois sous différentes concentrations d'eau [56].*

Le bois est un matériau pouvant être considéré comme poreux. L'eau sous toute forme peut diffuser à l'intérieur de sa structure. La composition en eau du bois brut dépend de la partie considérée du bois. La teneur en eau du bois est caractérisée par son taux d'humidité, ϕ $[\frac{kg_{eau}}{kg_{sec}}]$, définie comme [57] :

$$\phi(T, RH) = \frac{m_{bois} - m_{sec}}{m_{sec}} \tag{1.14}$$

Où m_{bois} et la masse du bois possédant un taux d'humidité ϕ. m_{sec} est la masse du bois lorsqu'il ne contient ni eau libre, ni eau liée, ni eau sous forme de vapeur. Lorsque le bois est soumis à des conditions constantes de température T et d'humidité relative (RH), l'eau quelle que soit sa forme diffusera jusqu'à ce que le bois atteigne l'équilibre hygrométrique, défini ci-dessous. À l'équilibre, ϕ dépend alors de l'humidité relative [57].

La masse sèche est déterminée expérimentalement en séchant le bois à une température de 104°C pendant un temps long. Le processus de séchage va d'abord permettre d'évacuer l'eau libre hors du bois jusqu'à ce qui est appelé PSF (**point de saturation des fibres** ($\phi \approx 30\%$)). Le PSF est le point à partir duquel le bois est saturé en eau liée (figure 1.23) [58].

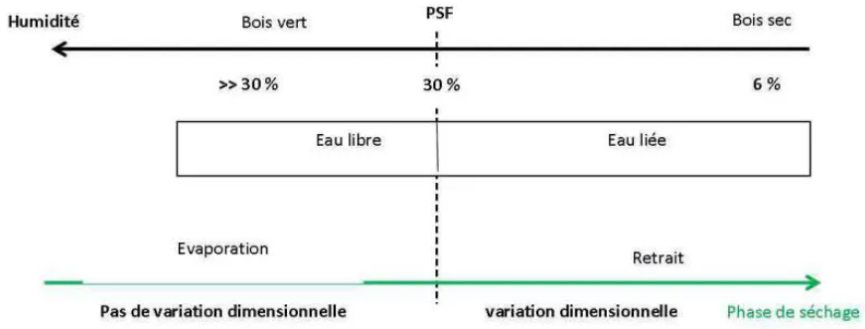


Figure 1.23 *– Retrait et hygroscopicité [59].*

L'**équilibre hygrométrique** ou EMC (equilibrium moisture content) est la teneur en humidité que le bois possède à l'équilibre, pour une température et une humidité relative donnée. L'EMC diminue avec la température et augmente avec le taux d'humidité. Expérimentalement, la courbe d'EMC ne suit pas la même tendance lorsque le bois est soumis à des cycles de séchage et d'hydratation [60].

Les modèles décrivant le comportement de la courbe d'EMC sont dépendants du bois. L'équation de Hailwood-Horrobin donne une approche analytique de l'EMC en fonction de la température et du taux d'humidité.

$$EMC = \frac{1800}{W}\left(\frac{kh}{1-kh} + \frac{k_1 kh + 2k_1 k_2 k^2 h^2}{1 + k_1 kh + k_1 k_2 k^2 h^2}\right) \tag{1.15}$$

où k_1, k_2, k et W sont des coefficients dépendants de la température et h et T l'humidité relative et la température [60].

Déformations dues au changement d'humidité ϵ_ϕ

L'évacuation de l'eau libre n'entraîne pas de variation dimensionnelle du bois. En poursuivant le processus de séchage, l'eau liée va s'évacuer et entraîner une variation dimensionnelle, car elle est directement liée aux parois.

Cette variation est nommée **retrait** du bois. Inversement, une augmentation du taux d'humidité induit un **gonflement**. Pour la suite de cette section, la notion de retrait est

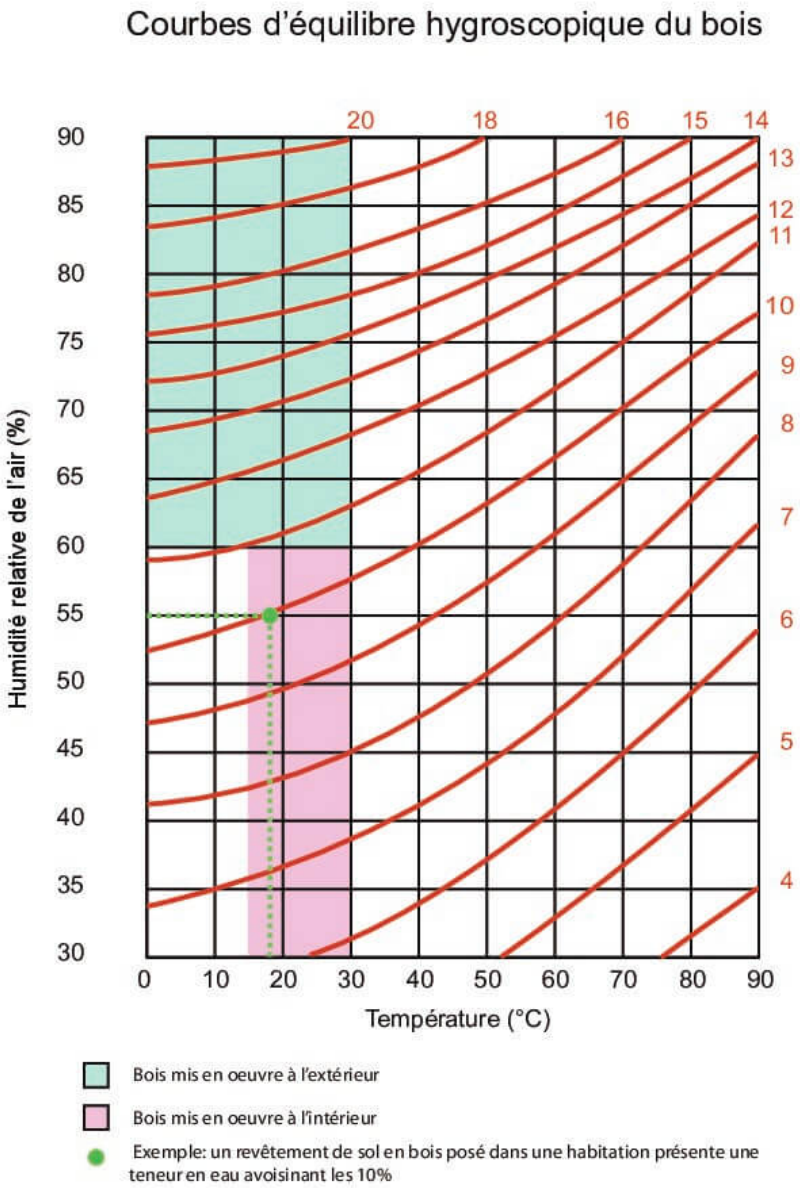


Figure 1.24 *– EMC du bois en fonction de la température et de l'humidité relative suivant la loi d'Hailwood-Horrobin [60].*

décrite, mais tout est également applicable pour le cas d'un gonflement [61]. Le retrait n'est pas identique selon les différentes directions. La variation est prédominante dans la direction tangentielle (θ), non négligeable dans la direction radiale (r) et très faible dans la direction longitudinale (z). Comme en température, un coefficient α_ϕ $[\frac{m}{\%humidity}]$ est introduit, le coefficient de retrait. Le retrait total est la variation entre la dimension à l'état saturé PSF (l) et anhydre (l_0) [61] :

$$l - l_0 = \alpha_\phi(\rho, \phi)\phi \tag{1.16}$$

Ce changement de dimensions peut modifier la forme du bois en créant des contraintes internes. Pour rappel, seule l'eau liée est responsable de ce changement de dimensions, au-delà du PSF, les dimensions sont donc constantes. La linéarité des coefficients de retraits $\alpha_{\phi r}$, $\alpha_{\phi t}$ et $\alpha_{\phi l}$ avec le taux d'humidité est valable seulement entre 5-25% d'humidité

(figure 1.25). De plus, plus le bois a une densité élevée, plus il aura un coefficient qui augmente rapidement avec le taux d'humidité [62].

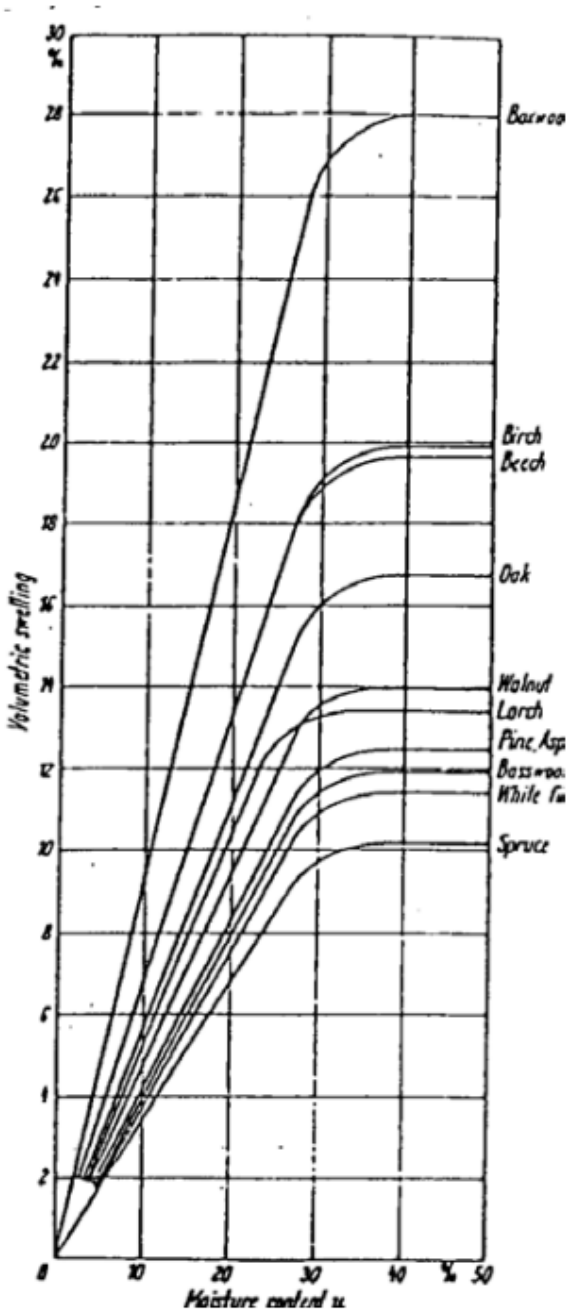


Figure 1.25 – *Gonflement volumétrique pour différentes espèces de bois [62].*

Stabilité dimensionnelle hydrique

Le bois est un matériau très hétérogène. En effet, la courbure des cernes, l'enroulement des fibres, la géométrie, la situation sur le tronc, induisent une hétérogénéité. Le changement de dimension suite à l'action d'un changement d'humidité peut engendrer des efforts internes. La stabilité dimensionnelle du bois va dépendre de sa structure [63].

Afin de stabiliser dimensionellement le bois, plusieurs méthodes sont possibles, l'idée pour la plupart d'entre elles étant d'éviter que l'eau se lie aux sites OH en les désactivant. En effet, une fois séché, le bois reprend forme en présence de l'humidité dans l'air ambiant. Ces méthodes sont basées sur des traitements thermiques ou hydriques. Une d'entre elle sera détaillée dans la figure 1.5.6. Le coefficient d'antiretrait, ASE, permet de comparer l'efficacité des méthodes de stabilisation.

$$ASE = 100 * \frac{S_c - S_i}{S_c} \tag{1.17}$$

où S_c et S_i sont les retraits avant et après traitement. L'ASE peut être testé en immergeant le bois dans l'eau et en observant le **retour de forme**.

Diffusion de l'eau

Cinématiquement, le bois qui subit un changement d'atmosphère va voir l'eau diffuser à l'intérieur de sa matière. La description du phénomène de diffusion est donnée par les lois de Fick [64].

$$J = -D\nabla\phi \tag{1.18}$$

$$\frac{\delta\phi}{\delta t} = \nabla \cdot (D\nabla\phi) \tag{1.19}$$

Où

- ϕ est le taux d'humidité.
- $D(T, \phi, \rho)$ est le coefficient de diffusion de l'eau dans le bois solide $[\frac{mm^2}{s}]$.
- J est le flux de diffusion $[\frac{kg_{eau}}{m^2 s}]$.

Dans la littérature, il existe de différents modèles décrivant le coefficient de diffusion D. En général, il est décrit par une loi d'Arrhénius telle que,

$$D = D_0 \, e^{-\frac{E_b}{RT}} \tag{1.20}$$

Où D_0 $[\frac{mm^2}{s}]$ est le facteur exponentiel, T est la température, R est la constante des gaz universels et E_b est l'énergie d'activation, qui dépend de la température et du taux d'humidité [65].

Pour des concentrations en humidité assez basses, éloignées du PSF, le bois obéit relativement bien à la loi de Fick. Autrement, cela n'est plus le cas vu que l'eau existe sous différentes phases [67].

Si le bois est soumis à une force ou un flux de chaleur, l'équation 1.18 n'est plus suffisante. Il faut ajouter deux autres termes dans la première équation de Fick qui viennent prendre en compte que la diffusion peut être influencée par un gradient de température ainsi qu'un gradient de pression [68] :

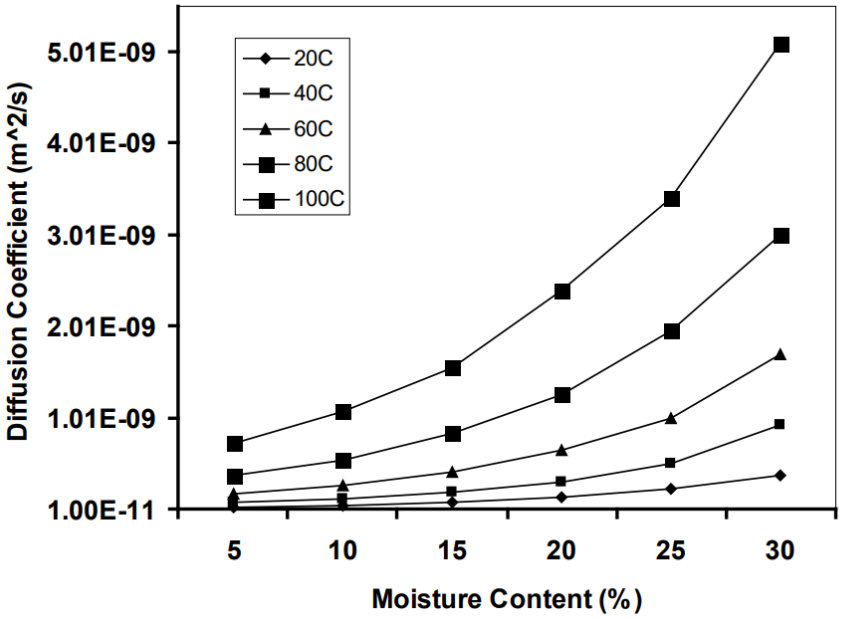


Figure 1.26 – *Coefficient de diffusion D de l'eau liée en fonction de la température et de l'humidité pour une densité à sec de 500* $\frac{kg}{m^3}$ *[65].*

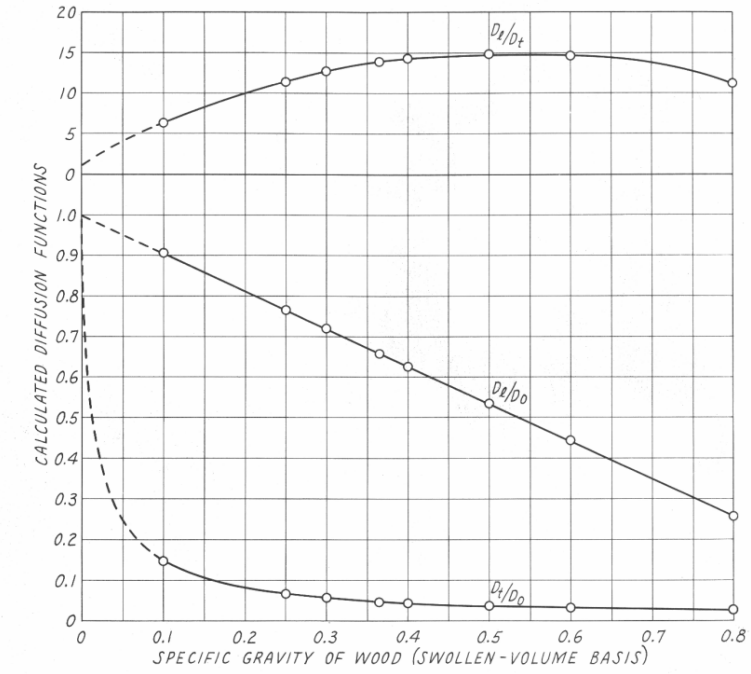


Figure 1.27 – *Coefficient de diffusion D de l'eau libre en fonction de la densité [66].*

$$J = -D\Big[\frac{\delta}{\delta x}\phi + \kappa_s \frac{\delta}{\delta x}\Big(ln(T - T_{ref})\Big) + \kappa_p \frac{\delta p}{\delta x}\Big] \tag{1.21}$$

$$\frac{\delta \phi}{\delta t} = \nabla \cdot (D \nabla \phi) \tag{1.22}$$

Où κ_s est le facteur de Soret et κ_p est le facteur de pression. Dans un procédé où la diffusion de l'eau est dominée par une différence de température, le terme comprenant le

facteur de Soret sera conséquent. Il en est de même pour une diffusion marquée par une grosse différence de pression.

1.5.4 Viscoélasticité du bois

Un matériau est viscoélastique lorsque son comportement, à l'application d'une contrainte ou d'un déplacement constant, est dépendant du temps. Le matériau soumis à une charge stocke une partie de l'énergie pour la libérer par la suite. C'est la propriété du matériau qui couple les effets visqueux et élastiques [69]. Le domaine des sciences des matériaux étudiant cette caractéristique se nomme la réologie. La classe classique de matériau se comportant de cette manière sont les polymères. Le bois se composant d'un ensemble de molécules polymériques, il est dès lors considéré comme tel.

Le comportement viscoélastique du bois est grandement influencé par la teneur en eau, la température et la contrainte appliquée [63].

En dessous de la température de transition vitreuse, le comportement à l'humidité du bois en matière viscoélastique est dominé par un comportement de mécano-sorption [70]. Sous l'action d'une contrainte σ, le bois peut subir du fluage, soit une évolution de la déformation dans le temps sous contrainte constante. La déformation induite peut alors être décrite par trois phénomènes : de la pure viscoélasticité (dépendant du temps), du fluage méchano sorptif, et du pseudo fluage dû à des phénomènes de recouvrance.

La viscoélasticité pure est seulement dépendante du matériau et des conditions environnementales. Le fluage méchano sorptif est associé à un changement d'humidité relative sous chargement mécanique. Cette dernière fut étudiée par nombreux chercheurs et de nombreux articles sont disponibles. La troisième se manifeste lors de cycles d'humidifications. Cependant, concernant la première, peu d'études ont été effectuées. La raison serait la complexité des modèles et son faible impact au final [70].

Au-delà de la température de transition vitreuse, la viscoélasticité pure est plus prononcée. Il convient alors d'utiliser d'autres théories pouvant la modéliser. D'un autre côté, un comportement viscoélastique apparaît suite à l'évacuation d'humidité sous contrainte[71]. Le modèle pour la viscoélasticité pure peut être modélisé linéaire ou non linéaire. La viscoélasticité est linéaire lorsque la déformation $\epsilon(t)$ et la contrainte $\sigma(t)$ peuvent être représentées par une équation de Volterra [69] tel que :

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \int_0^t K(t-t')\frac{\delta\sigma(\tau)}{\delta t}d\tau \tag{1.23}$$

où t est le temps, K est la fonction de fluage et E $[Pa]$ est le module élastique. $\epsilon(t)$ $[-]$ et $\sigma(t)$ $[Pa]$ sont alors séparables.
Lorsque ce n'est pas le cas, la viscoélasticité est non linéaire, ce qui est généralement le cas pour de large déformation ou si les propriétés du matériau changent durant la déformation.

Les modèles de bases pour décrire la viscoélasticité incluent des combinaisons linéaires de ressorts et d'amortisseurs. Ils sont représentés schématiquement comme des circuits électriques,

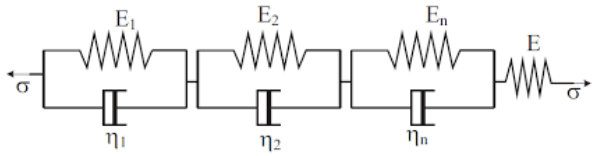


Figure 1.28 *– Représentation viscoélastique d'un matériau [69].*

Le ressort représente l'élasticité dont la formule donnée est la loi de Hooke, avec pour module d'élasticité, le module de Young E $[Pa]$

$$\sigma = E\epsilon \tag{1.24}$$

L'amortisseur représente la viscosité et définit une dépendance temporelle par l'équation suivante, avec η la viscosité du matériau.

$$\sigma = \eta\frac{d\epsilon}{dt} \tag{1.25}$$

Les modèles de bases sont les modèles de Maxwell et les modèles de Kelvin-Voight,

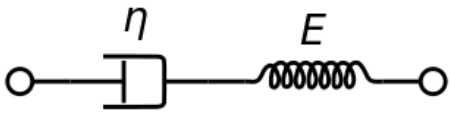


Figure 1.29 *– Modèle de Maxwell [69].*

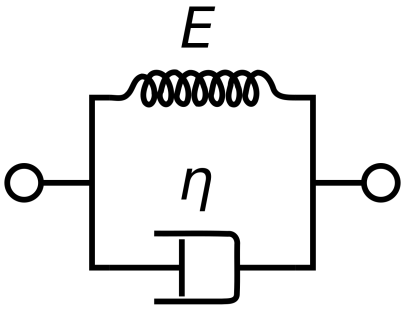


Figure 1.30 *– Modèle de Kelvin-Voight [69].*

Un outil pour caractériser la viscoélasticité sont les **séries de Prony**. Lorsqu'un test de relaxation est réalisé, le lien entre la contrainte et le déplacement peut être réexprimé par une fonction dépendante du temps [69].

$$\sigma(t) = Y(t)\epsilon(t) \tag{1.26}$$

Avec Y(t), le module élastique considéré. Si le comportement du matériau est supposé suivre un modèle de Maxwell généralisé (figure 1.31), la fonction de relaxation pourra être modélisée par une série de Prony,

$$Y(t) = Y_\infty(1 - \sum_{i=1}^{N} Y_i(1 - e^{-t/\tau_i})) \tag{1.27}$$

Les constantes τ_i et Y_i sont repectivement les constantes de relaxation et les constantes de Prony. Il est supposé N modèles de Maxwell en parallèle pour ce cas-ci. Similairement, pour un test de fluage [**sitegov**],

$$\epsilon(t) = J(t)\sigma_0 \tag{1.28}$$

Où J(t) est la fonction de fluage [63].

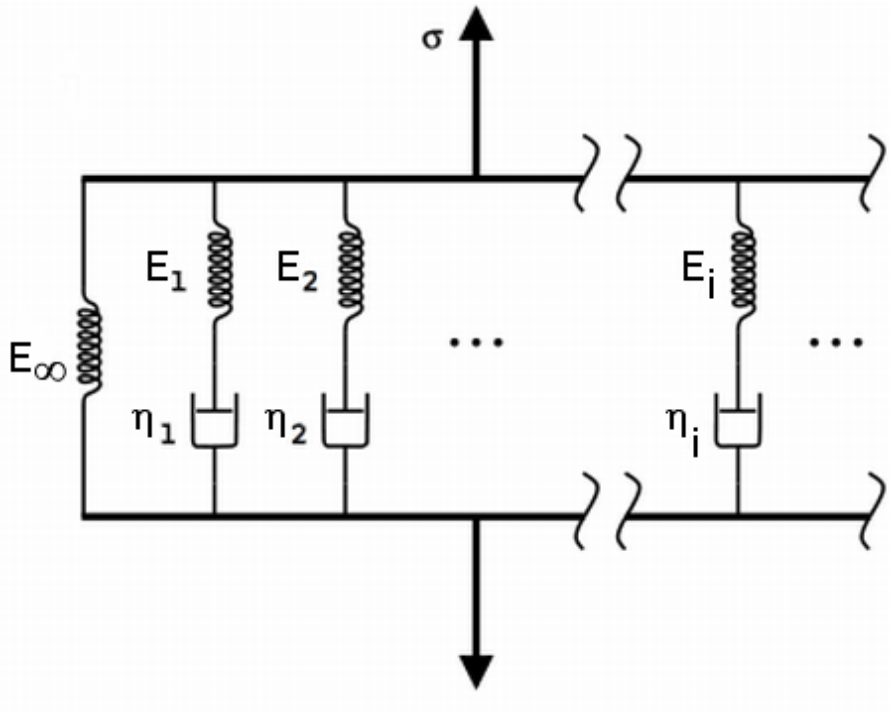


Figure 1.31 *– Modèle de Maxwell généralisé pour $y(t) = E(t)$, le module de Young [69].*

Comportement en cisaillement

Le module de relaxation des contraintes en cisaillement, $G_R(t)$, montre quels sont les déformations en cisaillement $\gamma(t)$ en fonction de la contrainte $\tau(t)$. Pour un temps infini ou nul, les modules caractéristiques diffèrent [72],

$$G_\infty = \lim_{t\to\infty} G_R(t) \tag{1.29}$$

$$G_0 = G_R(0) \tag{1.30}$$

On définit un module de relaxation des contraintes en cisaillement adimensionnel $g_R(t)$, tel que,

$$\gamma(t) = G_R(t)\tau(t) \tag{1.31}$$

$$g_R(t) = \frac{G_R(t)}{G_0} \tag{1.32}$$

Comportement volumétrique

Similairement, le module de relaxation des contraintes volumétriques, $K_R(t)$, montre les déformations $\epsilon(t)$ en fonction d'une contrainte $p(t)$,

$$K_\infty = \lim_{t\to\infty} K_R(t) \tag{1.33}$$

$$K_0 = K_R(0) \tag{1.34}$$

Le module de relaxation des contraintes volumétrique adimensionnel $k_R(t)$, tel que,

$$\epsilon(t) = K_R(t)p(t) \tag{1.35}$$

$$k_R(t) = \frac{K_R(t)}{K_0} \tag{1.36}$$

Dépendance en température

Le module de stockage G'' dépend de la température.
La viscoélasticité en fonction de la température peut être décrite grâce à un facteur de déplacement α_T (figure 1.32) suivant la théorie WLF (William-Landel-Ferry) :

$$\epsilon(T_0, t) = \epsilon(T, \frac{t}{\alpha_T}) \tag{1.37}$$

$$log(\alpha_T) = \frac{-C_1(T - T_0)}{C_2 + T - T_0} \tag{1.38}$$

Où C_1 et C_2 sont des constantes dépendantes du matériau. α_T permet de bouger le module de stockage par une translation horizontale, liant le temps de réaction à la température. Cette théorie est valable pour des températures bien supérieures à T_g [73].

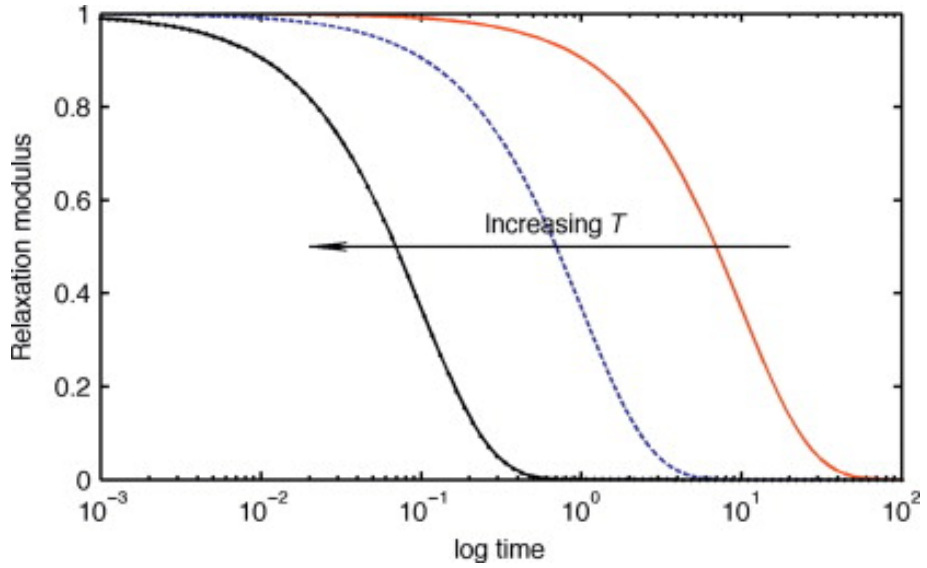


Figure 1.32 – *William Landel Ferry [73].*

Certains auteurs tels que [74], définissent une loi WLF pour le déplacement horizontal de la viscoélasticité en fonction de l'humidité et pour son cas de polymère, cela semble bien fonctionner.

1.5.5 Contrainte

Dans ce travail, il sera décrit le comportement du bois sous l'action d'une compression dans la direction radiale. Lors d'un essai de compression, il est observé 3 zones (figure 1.33).

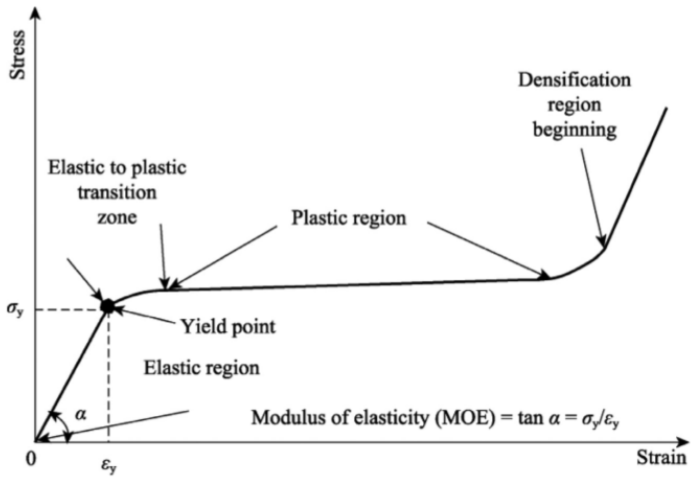


Figure 1.33 *– Comportement du bois sous compression radiale [75].*

Dans la première (figure 1.34), la déformation est élastique et linéaire. Elle apparaît avant la rupture de la structure cellulaire décrite par un flambement des parois. C'est la seconde étape, marquée par un plateau. Les vides se referment petit à petit. Les premières cellules à connaître ce phénomène de flambement sont les cellules de printemps, dont la parois est plus fine et les cellules plus imposantes. La déformation se fait comme si les cellules étaient cisaillées. Les premières parois à flamber sont les parois radiales au vu de leur mode de flambement plus élevé. De plus, elles contiennent plus de ponctuation que les parois tangentielles (dans l'axe tangentiel). La propagation de la contrainte d'une cellule à l'autre n'est possible qu'à partir d'un contact entre la cellule du dessus et celle du dessous. La dernière étape (figure 1.35) est l'étape de la densification, les parois cellulaires des cellules compressées touchent leur voisine une par une, ce qui augmente la contrainte à imposer pour obtenir une plus grande déformation [76].

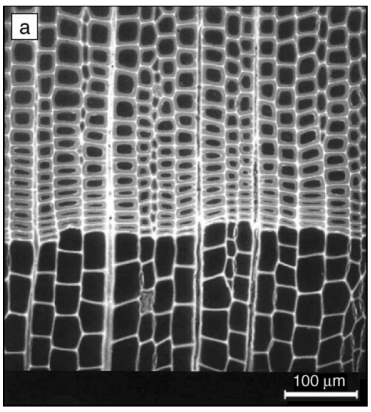


Figure 1.34 *– Cellule de bois de sapin avant compression [77].*

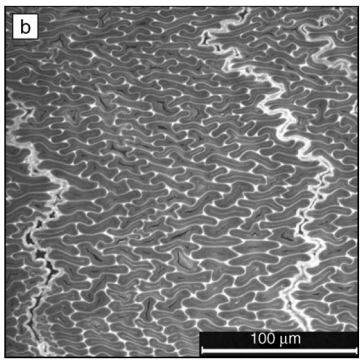


Figure 1.35 *– Cellule de bois de sapin après compression [77].*

La densité originale du bois induit des courbes élongation-contrainte différentes, figure 1.36. Si le bois est plus dense, le plateau est plus faible et l'étape de densification se fait à plus faible élongation.
D'un autre côté, le caractère irréversible de la compression est directement dépendant

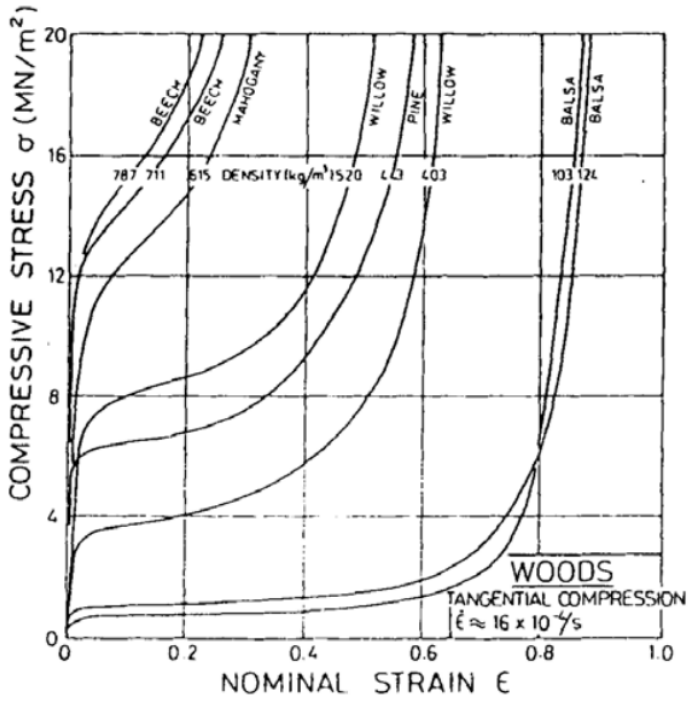


Figure 1.36 – *Déformation en compression dans la direction tangentielle pour différentes espèces d'arbres. Les courbes pour un chargement radial sont en principe similaire [62].*

de la température et de l'humidité figure 1.37. Il est préférable que la nature du bois soit conservée après compression. Dès lors, une compression au-delà de la température de transition vitreuse garantit un comportement réversible [62]. Cependant, à cette température, la compression montre un retour élastique important comparé à une compression à température ambiante.

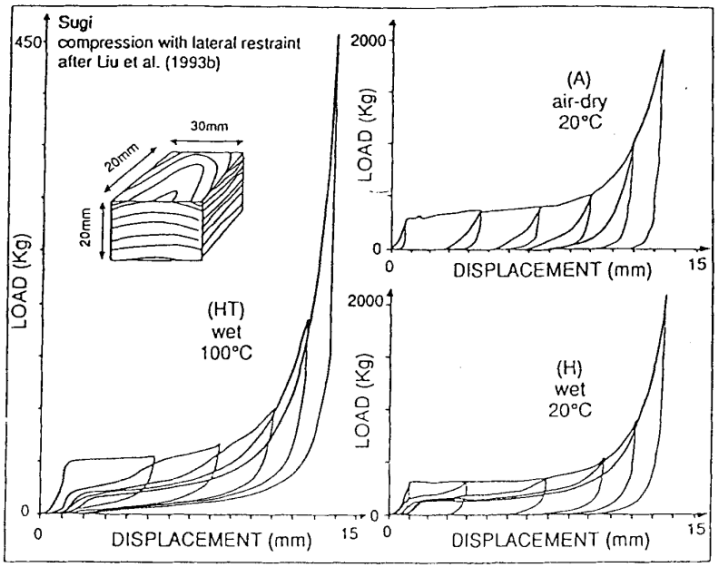


Figure 1.37 – *Cycles de compression radiale du bois de sugi dans des conditions humides et sèches selon différentes températures [62].*

L'enjeu du procédé de densification est alors de densifier au-dessus de la température de

transition vitreuse tout en libérant un maximum les contraintes afin d'éviter le retour élastique.

1.5.6 Endommagement

L'endommagement est défini par une dégradation, dû à un facteur physique ou chimique, des propriétés physiques du matériau. Cette partie couvrira deux types d'endommagement qui peuvent apparaître dans le bois. Le premier apparaît lors de la compression, lorsque le matériau est soumis à de grandes déformations. Le second lors d'une température trop élevée, où les composants du bois se dégradent, entraînant un endommagement. Un troisième type d'endommagement existe, dû à une présence accrue d'humidité, mais il sera négliger dans ce travail au vu que, dans le cadre du procédé, le taux d'humidité atteint reste acceptable.

Endommagement par déformations

Dans cette partie, il existe également deux types d'endommagement. Le premier, décrit par l'effet de Mullins. Cet effet apparaît lors d'un cycle de chargement d'un élastomère. La courbe caractéristique dépendra de la valeur maximum de contrainte qui fut atteinte lors de précédentes déformations.

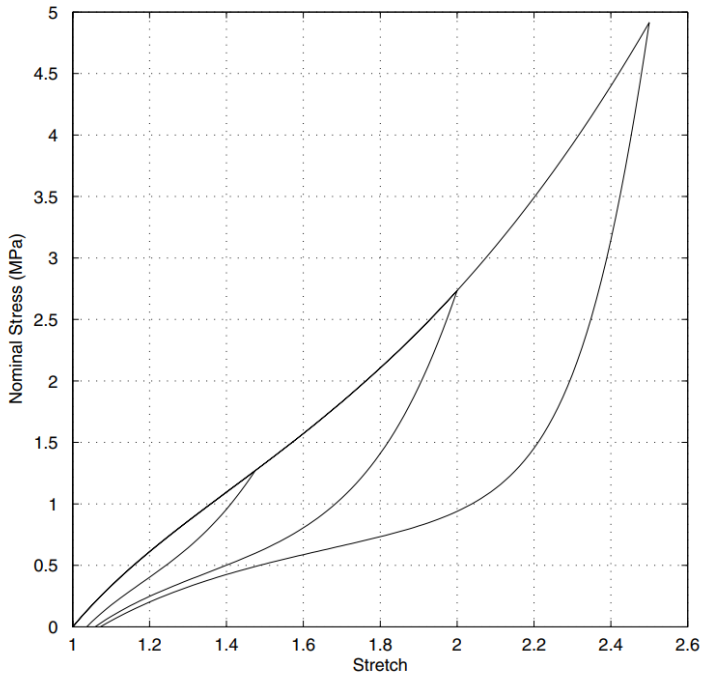


Figure 1.38 – *Effet de Mullins [78].*

Comme observé sur figure 1.38, il existe toujours une déformation après déchargement. Dans une mousse (comme le bois), le flambement est très important, ce qui induit un effet de Mullins conséquent. Lors du déchargement, toutes les déformations subies ne sont pas réversibles et une partie d'entre elles sont permanentes. Ces déformations irréversibles

viennent de l'énergie dissipée dans le flambement des parois ainsi que par la réorganisation des chaînes de polymères [78].

Endommagement par température

Au-delà d'une certaine température, les composants du bois (cellulose, hémicellulose, lignine) se dégradent et provoquent une perte de masse. Il est également possible que les composants changent de nature chimique. Dans la littérature, le terme thermally modified wood est employé. De nombreux tests ont été menés comme suit. Le bois, ayant un taux d'humidité de base est placé dans une enceinte contrôlée en température. Après un certain temps, il est retiré et les propriétés mécaniques sont mesurées. Deux points sont à remarquer. Plus le taux d'humidité du bois initial est élevé, plus la perte en propriété sera grande. Plus la température de traitement est élevée, plus la perte sera grande également [79].

Le but d'un traitement thermique est de diminuer le coefficient de retrait α_ϕ. Il faut alors trouver un optimum entre fixation des dimensions, ASE et perte en propriétés mécaniques. [80] a étudié l'effet de 3 paramètres lors d'un traitement de modification du bois sur le coefficient de retrait. Il note que la dépendance majeure est celle du temps, de la température de traitement ainsi que de la densité du bois considéré [81].

La température à laquelle les constituants du bois vont se dégrader sont différentes pour chacun d'entre eux. L'hémicellulose est le premier à se dégrader avec une température de dégradation entre 120 et 260°C. La cellulose, quant à elle, se dégrade entre 170 et 400°C. La rupture d'une chaîne d'hémicellulose n'a pas autant d'impact sur la résistance qu'une rupture de chaîne de cellulose. La lignine s'évapore au-delà de 200°C et des réactions chimiques ont déjà lieu entre 120 et 220 °C. La dégradation de cet élément influe significativement les propriétés au vu du rôle structurel majeur que joue la lignine. L'objectif d'un traitement thermique est alors de neutraliser les sites OH de la cellulose, se liant avec les molécules d'eau. Il faut donc atteindre une température minimale de 170°C. Au-delà de 180°C, il y a lieu de forte dégradations [82].

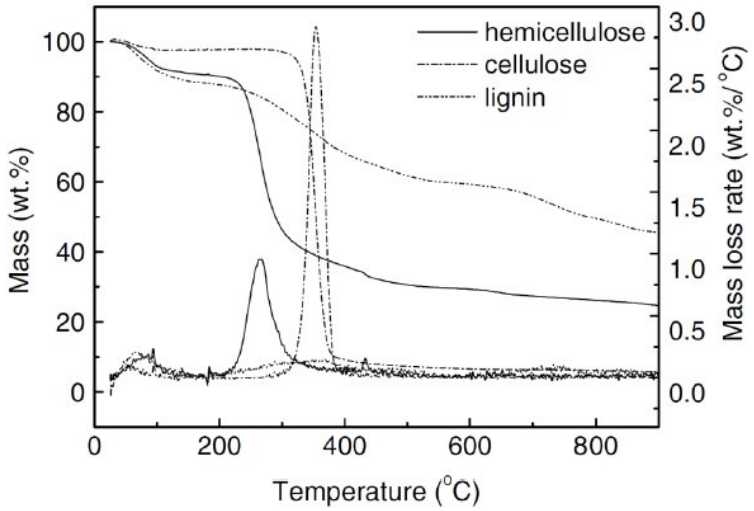


Figure 1.39 *– Dégradation du bois avec la température [83].*

2 | Matériel et méthodes

Afin de mettre en place une simulation numérique conforme au comportement du bois, un certain nombre d'expériences ont été réalisées Les résultats permettront d'alimenter les modèles utilisés. Les tendances mesurées sont également comparées à ce qui se trouve dans la littérature.

2.1 Bois

Le bois utilisé est un bois de peuplier commun venant de Belgique. L'espèce n'est cependant pas connue. Il a été découpé et séché dans la scierie Bourguignon de Tourinnes Saint-Lambert, à 10 km de Louvain-la-Neuve.

Il fut débité sur dosse en plateaux de 54 mm d'épaisseur puis déligné avant d'être raboté en produit fini de dimension L_rxL_θxL_L, 50X50X3000 mm. Les plateaux prélevés l'ont été sur quartier. Le bois a été séché de l'état frais à 12% d'humidité en 10 jours à une température comprise entre 40 et 80°C à l'air chaud climatisé. Il est maintenant entreposé dans un hangar du LEMSC aux conditions ambiantes intérieures depuis un peu plus d'un an.

Les échantillons créés sont des parties du tronc représenté figure 1.5. Ces échantillons étant de faibles dimensions par rapport aux dimensions du tronc, les axes r et θ extraits du repère cylindrique décrit dans la section section 1.3 sont projetés dans un repère cartésien comme représenté sur la figure 2.2.

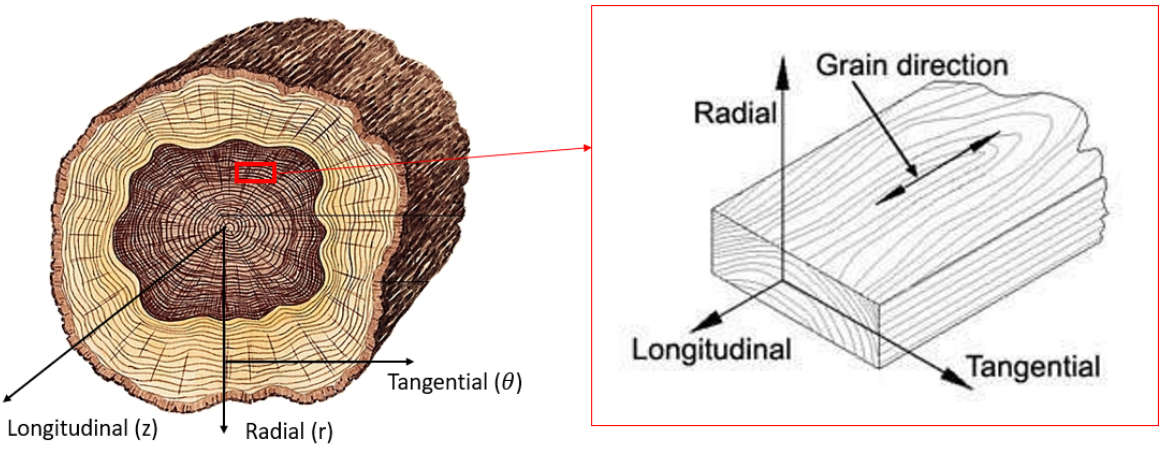


Figure 2.1 – *Échantillon en repère cartésien [84].*

2.2 Densité

La densité de l'échantillon reçu est déterminée par l'équation 1.2. Cette densité dépend directement du taux d'humidité présent dans le bois. La mesure de cette densité a été réalisée par les mesures respectives de la masse et du volume des échantillons. Les échantillons utilisés sont de plusieurs tailles, pour la suite, on les nommera comme suit,

— Les échantillons de taille L_rxL_θxL_z, 20x20x250 mm sont sommés "bâton".

— Les échantillons de taille L_rxL_θxL_z, 47x47x47 mm sont nommés "cube".

— Les échantillons de taille L_rxL_θxL_z, 20x44x100 mm sont nommés "plaque".

La masse des échantillons a été mesurée par une *balance sartorius 1501 MP8* ayant une précision au dixième de gramme. La mesure de ces longueurs a été faite à l'aide d'un pied à coulisse électronique *Mitutoyo DIGIMATIC Caliper* d'une précision au centième de millimètre. Le volume a été calculé par multiplication des longueurs moyennes dans les 3 directions (r,θ,z). Ces longueurs moyennes sont calculées par moyenne arithmétique de 2 ou 3 valeurs mesurées.

2.3 Masse sèche

Il existe différents moyens de déterminer expérimentalement la masse sèche. Le premier consiste à utiliser un humidimètre.

C'est un outil de laboratoire actif, induisant un courant et une différence de tension entre deux points, mesurant ainsi la résistance équivalente du matériau. Le *protimeter - GE Protimeter timbermaster* utilisé possède une base de données avec 150 espèces de bois, d'où il peut déduire le taux d'humidité ϕ du bois [85]. Le point faible de cette méthode se trouve dans les imprécisions induites par l'appareil ainsi que par la taille minimale des échantillons qui est nécessaire (la plus grande des dimensions doit faire minimum 10 mm). Les mesures du taux d'humidité par humidimètre ont été réalisées en différents points et ϕ a alors été calculé par moyenne arithmétique. Une fois le taux d'humidité du bois connu, et par mesure de la masse et du volume, ρ_{sec} est déterminé par l'équation suivante :

$$\rho = \frac{1+\phi}{1+\alpha_{\phi V}}\rho_{sec} \tag{2.1}$$

La seconde méthode est celle du séchage par étuve. En effet, comme mentionné dans la sous-section 1.5.3, le taux d'humidité moyen tend vers une valeur dépendant des conditions environnantes. Si le bois est placé dans une étuve à humidité relative nulle, il est possible de déterminer, après 16-18h de temps de séchage, m_{sec}, la masse sèche. L'étuve utilisée est une étuve de laboratoire *Heraeus UT 6760* [86].

2.4 Transfert de chaleur

Afin de mesurer l'évolution de la température à l'intérieur du bois, le système représenté sur la figure 2.2 a été mis en place. Cette expérience met en évidence la conduction radiale, le procédé de compression induisant un transfert de chaleur majoritairement radial.

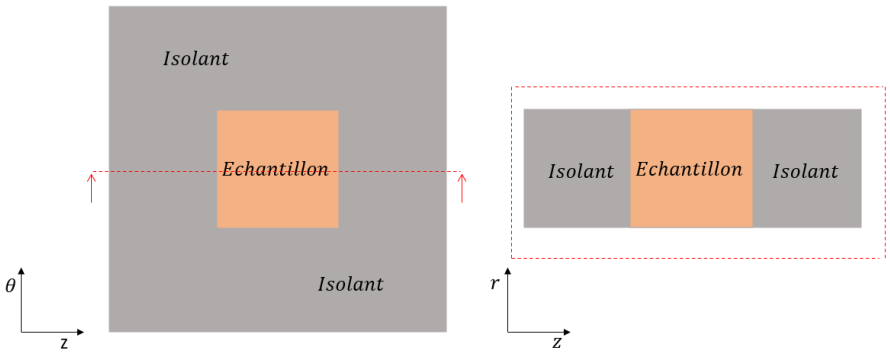


Figure 2.2 – *Mise en place de l'expérience thermique.*

L'échantillon de bois est un échantillon cubique de dimension 47x47x47 mm. Sur la surface de normale suivant la direction longitudinale, 5 thermocouples de type T ont été placés. Des trous perpendiculaires ont été percés avec une mèche de 1 mm. La distance entre chaque thermocouple est approximativement de 5 mm, sauf pour les deux derniers (TC_4 et TC_5) qui sont espacés de 3 mm. Le thermocouple de type T utilisé a l'avantage de pouvoir résister à des températures au-delà de 200 °C et est bon marché (figure 2.5). C'est un thermocouple dont les deux matériaux en parallèles sont le cuivre et le constantan (alliage de cuivre et de nickel) [87]. L'embout des thermocouples inséré, une résine thermo-hygro résistante a été choisie pour fixer le tout. Par la suite, les thermocouples ont été branchés à *l'Agilent 34972A LXI Data Acquisition* [88] (appareil mesurant, analysant et enregistrant les températures aux thermocouples). Il a été configuré un enregistrement des températures aux 5 positions, à une fréquence de 1 Hz. Les échantillons ont ensuite été placés dans l'étuve avec un isolant recouvrant 4 des faces de manière à obtenir un transfert de chaleur uniaxial dans la direction radiale. Trois échantillons de ce type ont été analysés et des expériences ont été menées dans la presse et dans l'étuve (figure 2.7). Seules les données de l'expérience dans l'étuve étaient exploitables.

2.5 Transfert de l'humidité

Afin de mesurer la variation en humidité du bois, **l'enceinte climatique** *vötschtechnik VC3 4018* a été utilisée pour les expériences de **prise** en humidité [89]. Celle-ci permet de fixer une température de maximum 95 °C pour une humidité relative comprise entre 0% et 98%. Pour les expériences de **perte** en humidité du bois, **l'étuve** précédemment décrite a été utilisée. Ces mesures permettent d'obtenir les coefficients de retrait $\alpha_{\phi r}$, $\alpha_{\phi\theta}$, $\alpha_{\phi z}$, $\alpha_{\phi V}$, mais aussi l'EMC du peuplier ainsi que le coefficient de diffusion D de l'humidité dans le bois.

Afin de mettre en évidence la diffusion directionnelle, deux géométries ont été étudiées en séchage. La première est la géométrie "bâton", la seconde est la géométrie "cube". Ces deux

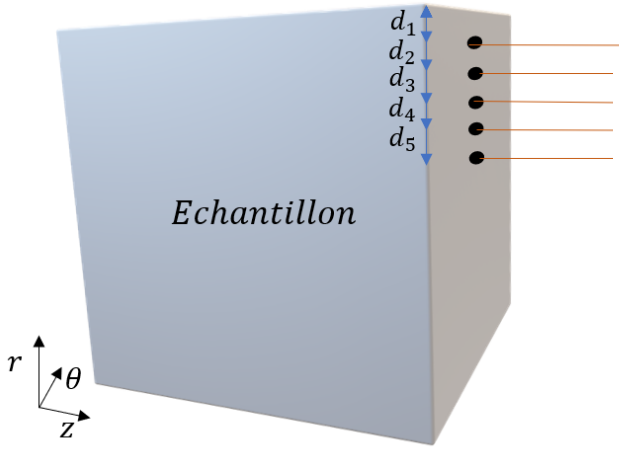


Figure 2.3 *– Schéma de l'échantillon de bois cubique avec les thermocouples.*

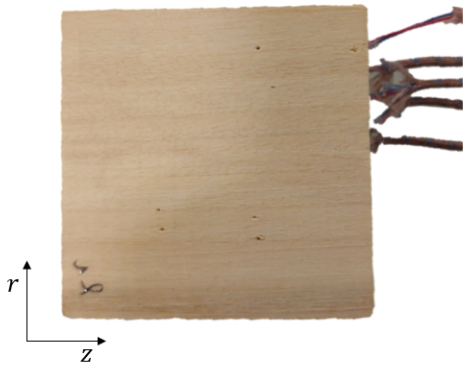


Figure 2.4 *– Échantillon de bois cubique avec les thermocouples.*

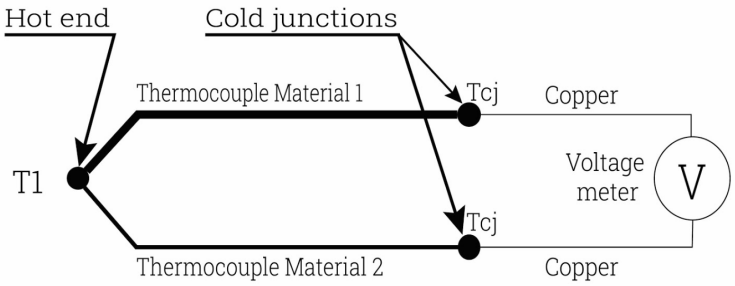


Figure 2.5 *– Schéma de fonctionnement d'un thermocouple.*

échantillons possèdent un volume similaire, mais une surface en contact avec l'extérieur différente. Il est alors possible de déterminer un coefficient de convection de l'humidité, définissant le flux d'humidité aux frontières de l'échantillon par l'équation suivante,

$$J = Ak_v(\phi_\infty - \phi_w) \tag{2.2}$$

Où J $[\frac{kg_{eau}}{kg_{sec}s}]$ est le flux d'humidité, A $[m^2]$ est l'aire en contact avec l'extérieur, ϕ_w est le taux d'humidité à la surface de l'échantillon et ϕ_∞, celle de l'étuve. k_v $[\frac{kg_{eau}}{kg_{sec}m^2s}]$ est le coefficient de convection de l'humidité et est inhérent aux conditions à l'intérieur de l'étuve. Les géométries "bâton" et "cube" possèdent respectivement un rapport surface-volume de $\frac{S}{V} = 2.044\ m^-1$ et $\frac{S}{V} = 1.27\ m^-1$, en conditions ambiantes. Le taux d'humidité ϕ_∞ est nul dans l'étuve. Dans l'enceinte climatique cependant, ϕ_∞ est dépendant de l'humidité relative ainsi que de la température selon la loi de Hailwood-Horrobin (sous-section 1.5.3). Une limite inférieure pour k_v peut être déterminée en séchage. En effet, en considérant que ϕ_w est égal au taux d'humidité moyen de l'échantillon, équation 2.2 devient,

$$ln(\frac{\phi}{\phi_0}) = -A\Delta t k_v \tag{2.3}$$

Où ϕ_0 est le taux d'humidité initial, ϕ le taux d'humidité après un temps Δt.

2.6 Compression

La compression est une étape du procédé de densification. Des échantillons de tailles variables ont été compressés afin d'obtenir la courbe de déformation-contrainte ainsi que la libération des contraintes post-compression. Il est possible de gérer la température de la presse. L'humidité relative, quant à elle, reste proche de 0.

Les échantillons utilisés sont les échantillons "plaque", ils ont été comprimés dans la direction radiale. Des expériences ont été menées pour des échantillons venant de l'enceinte climatique à des humidités relatives de 0%, 65% et 98 %, ce, pour deux températures de compression : 140 et 170°C.



Figure 2.6 – *Machine de compression.*

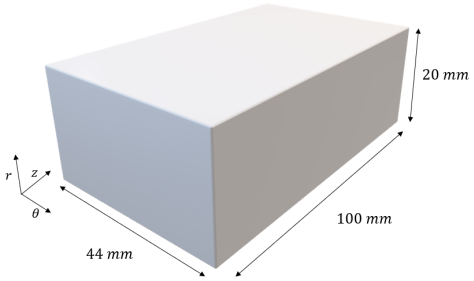


Figure 2.7 – *Échantillon de bois "plaque" avant compression.*

Les essais de compression réalisés pour ce TFE ont été faits à une vitesse de compression de 20 mm/minute, dans le but de limiter au maximum la présence de relaxation de contraintes. Au-delà de cette vitesse, des problèmes peuvent apparaître au sein du bois. De plus, la force maximale atteinte dans ces conditions (130 kN) était proche de la limite pour la presse. Cette vitesse élevée suppose que les déformations apparaissant ne sont qu'élastique et éventuellement plastique.

L'échantillon est ensuite maintenu tel que la distance entre les plateaux de la presse est de $\frac{1}{3}$ de L_{r0} (ratio de compression de 3) pendant un temps de 5000 secondes. Ce ratio de compression a été choisi sachant que la porosité du peuplier est de 66%. Un ratio de compression de 3 permet alors d'atteindre la phase de densification.

En répétant cette expérience pour différentes conditions, la relaxation des contraintes en

fonction de la température et de l'humidité est obtenue.

La machine de compression donne une force en fonction d'un déplacement. La contrainte et la déformation effectuées à un instant précis sur le matériau sont exprimées en terme de contrainte et de déformation vraie.

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{2.4}$$

$$\epsilon_{rr} = ln(\frac{L_r}{L_{r0}}) \tag{2.5}$$

Avec F [N], la force appliquée, A [m^2] l'aire réelle d'application de la force (estimée à partir du coefficient de Poisson moyen), L_r [m] et L_{r0} [m], les dimensions actuelles et initiales dans la direction radiale. Le coefficient de Poisson moyen de chaque essai est déterminé après chaque essai de compression - relaxation par la relation suivante.

$$\epsilon_{\theta\theta} = ln(\frac{L_{\theta f}}{L_{\theta 0}}) = -\nu_{r\theta}\epsilon_{rr} \tag{2.6}$$

$$\epsilon_{zz} = ln(\frac{L_{zf}}{L_{z0}}) = -\nu_{rz}\epsilon_{rr} \tag{2.7}$$

Où $\epsilon_{\theta\theta}$, ϵ_{zz} sont les déformations vraies observées selon les directions θ et z. $L_{\theta 0}$, L_{z0} et $L_{\theta f}$, L_{zf} sont les longueurs initiales et finales dans les directions θ et z. Les coefficients de Poisson définissent les déformations subies par le matériau au cours de l'essai selon les autres directions que celle où la contrainte est appliquée. L'aire réelle d'application précédemment mentionnée, pour un échantillon de type plaque, est alors approximée comme,

$$A = L_z * L_\theta = L_{z0} * L_{\theta 0} \exp -\epsilon_{rr}(\nu_{rz} + \nu_{r\theta}) \tag{2.8}$$

Avec L_z et L_θ les longueurs actuelles de l'échantillon pour une force F appliquée.

Le module de Young d'une courbe de déformation-contrainte est défini par la pente caractérisant la phase élastique. L'apparition du flambement est caractérisée par une contrainte nommée **limite d'élasticité**, σ_b (figure 2.8) [90]. Elle équivaut à l'intersection entre la pente définie par le module de Young et la pente définissant le plateau de la phase de flambement.

Le bois est un matériau orthotrope [91]. Ceci signifie, contrairement à un matériau isotrope, qu'il possède des propriétés mécaniques dépendantes de la direction. Les relations d'élasticité qui lient la contrainte à la déformation sont les suivantes,

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{rr} \\ \epsilon_{\theta\theta} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{\theta z} \\ \epsilon_{zr} \\ \epsilon_{r\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_r} & -\frac{\nu_{\theta r}}{E_\theta} & -\frac{\nu_{zr}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{r\theta}}{E_r} & \frac{1}{E_\theta} & -\frac{\nu_z}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{zr}}{E_r} & -\frac{\nu_{\theta z}}{E_\theta} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{\theta z}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{zr}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{r\theta}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{rr} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{\theta z} \\ \sigma_{zr} \\ \sigma_{r\theta} \end{pmatrix}$$

Ces relations sont valables dans le domaine élastique, avant σ_b.

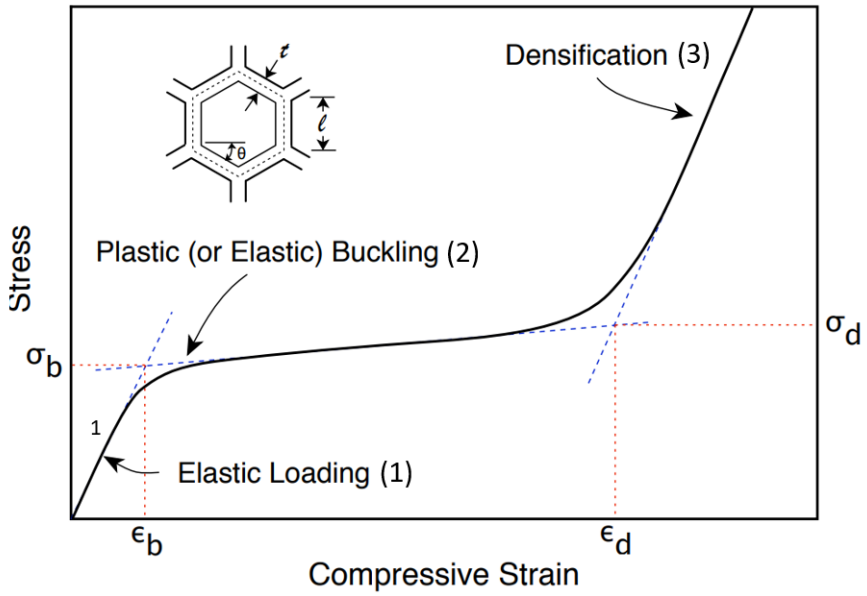


Figure 2.8 – *Limite d'élasticité au flambement [90].*

2.7 Analyse DMA

Afin de déterminer les propriétés élastiques et viscoélastiques du bois, une analyse DMA (spectrométrie mécanique dynamique) peut être utilisée. Celle-ci caractérise, par le biais de vibrations, le lien complexe qui peut exister entre le module de stockage et le module de perte [92]. L'appareil applique une contrainte sinusoïdale de fréquence f ($\omega = 2\pi f$) telle que,

$$\sigma(t) = \sigma_0 sin(\omega t) \tag{2.9}$$

Où σ_0 est l'amplitude de la contrainte. Il est observé un signal de réponse en terme de déformation,

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 sin(\omega t + \delta) \tag{2.10}$$

Où ϵ_0 est l'amplitude de la déformation et δ est le déphasage.

La DMA donne les grandeurs physiques suivantes [94],

- E^*, le module complexe de Young, représente le module viscoélastique (viscoelastic modulus)
- G^*, le module complexe de Coulomb, représente le module viscoélastique en cisaillement (shear modulus)
- T_g, la température de transition vitreuse

Les modules complexes de Young et de Coulomb peuvent être séparés en une partie réelle, G' aussi appelé module de stockage et imaginaire G'', aussi appelé module de perte. Le facteur d'amortissement (ou de perte) est défini comme :

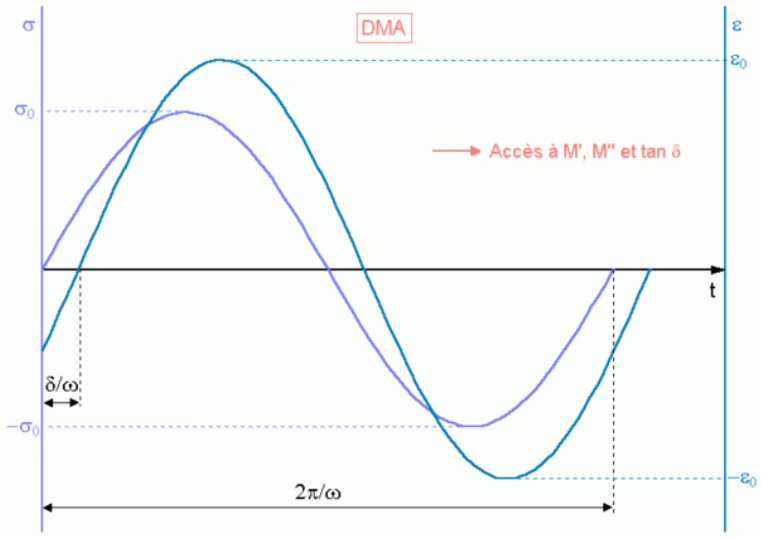


Figure 2.9 – *Résultats d'une analyse DMA [93].*

$$G^* = G' + iG'' \tag{2.11}$$

$$tan(\delta) = \frac{G''}{G'} \tag{2.12}$$

Il est possible de faire un lien entre ce module, dérivé du domaine fréquentiel et le comportement viscoélastique dans un domaine temporel.

Les propriétés mécaniques initiales des échantillons en fonction de la température ont été mesurées par le biais d'un appareil DMA. Ces propriétés sont importantes, car elles pourraient permettre de décrire le comportement en compression de l'échantillon.

La machine utilisée est la *DMA/SDTA861 Mettler Todeo*. Des échantillons ont été testés en traction et en cisaillement, dans les directions radiale et longitudinale, ce qui donne les modules complexes de Young et de Coulomb selon les directions radiale et longitudinale E_r^*, E_z^*, $G_{r\theta}^*$, $G_{z\theta}$.

Les échantillons testés en traction sont de tailles L_1xL_2xL_3, 20x4x1 mm (figure 2.10). Avec 1 étant la direction radiale r (donne E_r^*, le module complexe de Young dans la direction radiale) ou longitudinale z (donne E_z^*, le module complexe de Young dans la direction longitudinale).

Les échantillons testés en cisaillement sont de tailles L_1xL_2xL_3, 1x4x4 mm (figure 2.10). Avec 1 étant la direction radiale r (donne $G_{r\theta}^*$, le module complexe en cisaillement dans la direction radiale) ou longitudinale z (donne $G_{\theta z}^*$, le module complexe en cisaillement dans la direction longitudinale).

Dans cette machine, le taux d'humidité ne peut être géré. Dès lors, les propriétés obtenues sont un aperçu des propriétés à sec en fonction de la température. Les données peuvent être faussées en début d'expérience (séchage de l'échantillon). Dès lors, l'échantillon est testé 2 fois. D'abord, il est chauffé par le biais d'une résistance pour atteindre une certaine

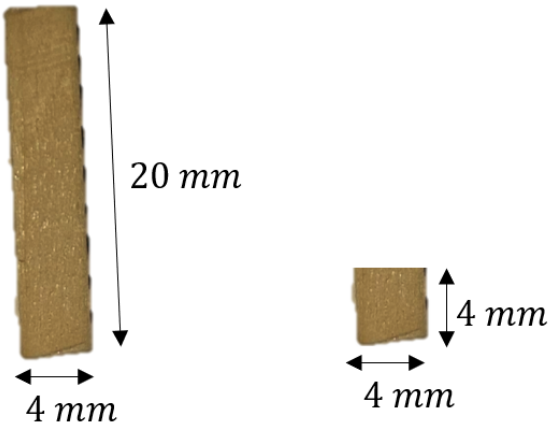


Figure 2.10 – *Échantillons DMA testés en tension et en cisaillement.*

température. Ensuite, il est refroidi par azote liquide jusqu'à la température ambiante. La vitesse de chauffage et de refroidissement est fixée à 3°C/min (figure 2.11). Les échantillons ont été testés à une fréquence de 1Hz, une pré-charge de 3N et une amplitude de 1N.

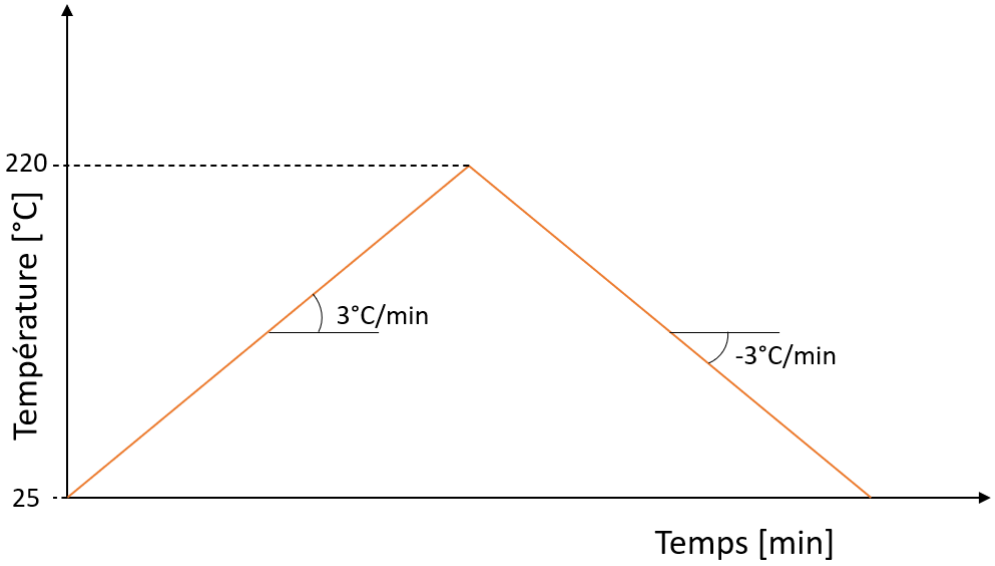


Figure 2.11 – *Température en fonction du temps pour les expériences en DMA.*

3 | Résultats expérimentaux et discussion

Dans le chapitre ci-dessous, les résultats expérimentaux des manipulations décrites dans le chapitre précédent sont présentés, analysés et discutés. Certains de ces résultats serviront à la mise en place de la simulation numérique. D'autres, serviront à la validation des modèles utilisés.

3.1 Diffusion de l'eau liée et de la température

Dans cette section, les résultats de l'évolution du taux d'humidité dans le bois, pour le procédé de séchage et d'humidification, sont d'abord présentés. Finalement, les résultats de l'expérience thermique seront étudiés. La section finit sur une discussion de ces résultats par rapport à la littérature.

3.1.1 Séchage

Dans cette sous-section, trois échantillons "cube" et neuf échantillons "bâton"s ont été placés dans l'étuve. La densité, le coefficient de retrait, le coefficient de convection de l'humidité et la courbe de séchage sont déterminées.

La densité et le coefficient de retrait du bois ont été étudié sur les échantillons "bâton". Après séchage à 104°C, la densité à sec, ρ_0 des échantillons varie entre 490 $\frac{kg}{m^3}$ et 541 $\frac{kg}{m^3}$, pour une moyenne de 512 $\frac{kg}{m^3}$. L'évolution des dimensions d'un échantillon d'ambiant à sec, placé dans l'étuve, donne également une idée des coefficients de retrait (tableau 3.2).

$\alpha_{\phi z}$	$\alpha_{\phi r}$	$\alpha_{\phi \theta}$	$\alpha_{\phi V}$
0.04±0.015	0.17±0.03	0.35±0.02	0.0057±0.0003

Table 3.1 *– Moyenne des coefficients de retrait sur les 9 échantillons de géométrie "bâton".*

On observe que le retrait dans la direction transversale vaut à peu près le double de celui dans la direction radiale. Le retrait dans la direction longitudinale quant à lui reste faible comparé aux deux autres.

En séchage, à 104°C, l'évolution du taux d'humidité en fonction du temps est représentée sur la figure 3.3 pour une géométrie "bâton". Cette évolution est uniquement due à l'évacuation de l'eau liée.

Après un temps de 350 minutes, il reste moins d'1 % d'humidité. La courbe décrit une évolution rapide en début de séchage.

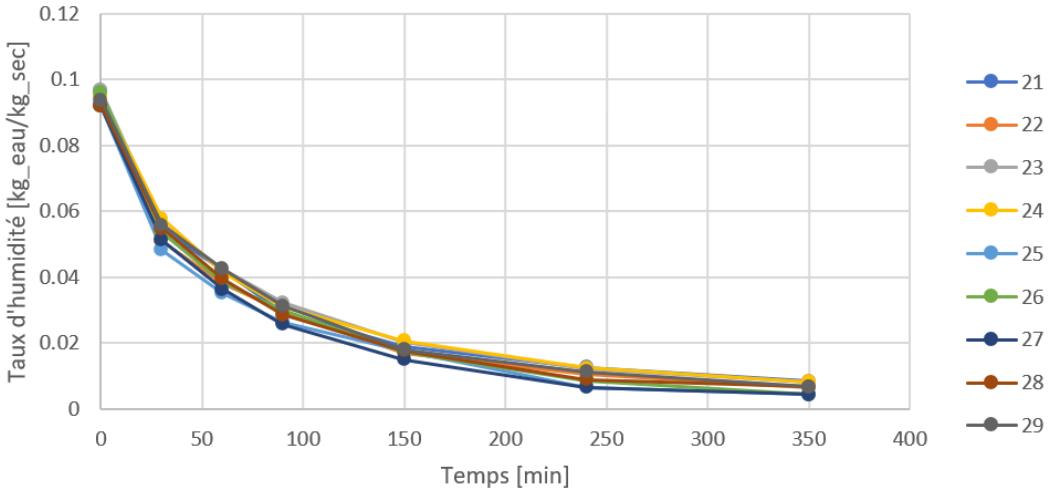


Figure 3.1 – *Évolution du taux d'humidité en fonction du temps en séchage pour un échantillon "bâton".*

La figure 3.2 compare l'évolution du taux d'humidité lors du séchage à 104°C pour les géométries "cube" et "bâton". Le coefficient de convection sera déterminé exactement par simulation. Une limite inférieure pour k_v est trouvée par l'équation 2.3, $k_v > 0.029 \frac{1}{m^2 s}$.

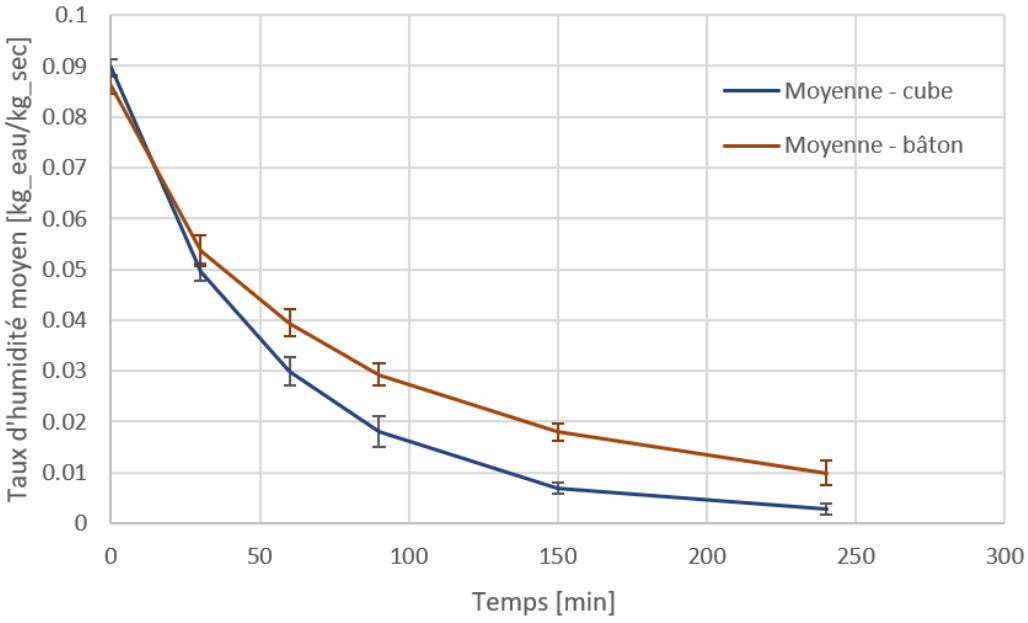


Figure 3.2 – *Évolution du taux d'humidité pour différentes géométries.*

3.1.2 Humidification

Lors d'une humidification, les échantillons sont placés dans l'enceinte climatique (T=95 °C, R_h=98%) pour une durée de 12 heures. Cinq échantillons "bâton" ont été placés dans l'enceinte. Les coefficients de gonflement, la courbe d'humidification et l'EMC du bois sont déterminés.

À nouveau, l'évolution des dimensions de trois échantillons "bâton" de sec à humide donne une idée des coefficients de gonflement (tableau 3.2).

$\alpha_{\phi z}$	$\alpha_{\phi r}$	$\alpha_{\phi \theta}$	$\alpha_{\phi V}$
0.016±0.001	0.13±0.02	0.35±0.01	0.0049±0.0001

Table 3.2 *– Moyenne des coefficients de gonflement sur 3 échantillons de géométrie "bâton".*

Ces coefficients sont proches des coefficients obtenus en séchage. Pour $\alpha_{\phi z}$, la différence provient certainement de sa faible valeur induisant de larges erreurs.

L'évolution du taux d'humidité est donnée sur la figure 3.3. Elle est d'abord marquée par une courbe similaire à celle observée en séchage, suivie d'une nouvelle tendance marquée par un changement de courbure.

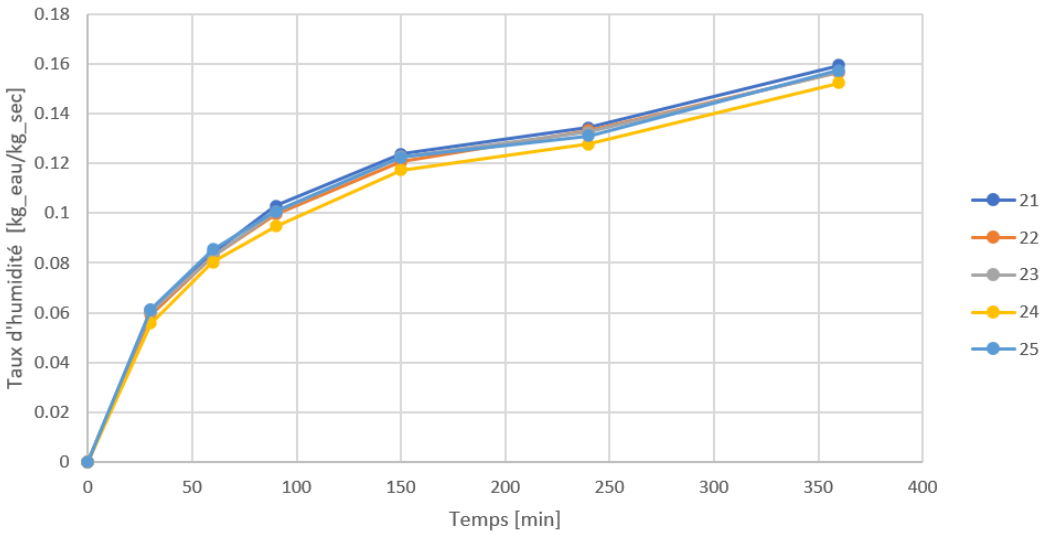


Figure 3.3 *– Évolution de la masse en fonction du temps en humidification dans une enceinte climatique à 98% pour cinq échantillons de géométrie "bâton".*

L'EMC mesurée expérimentalement et selon l'équation 1.15 sont données pour différents taux d'humidité tableau 3.3.

R_h	Expérience	Hailwood-Horrobin
65 %	5%	7.7%
95 %	22.5%	19.8%

Table 3.3 *– EMC du bois selon différents taux d'humidité pour une géométrie "bâton" (95%) et "plaque" (65%).*

3.1.3 Diffusion de la chaleur

Pour l'analyse de la diffusion de chaleur, l'expérience a été menée dans l'étuve à 104°C. La mesure de la température s'est faite à partir de la température ambiante (26 °C) pour

une durée de 2h. La courbe expérimentale de l'évolution de la température avec le temps est donnée sur la figure 3.4.

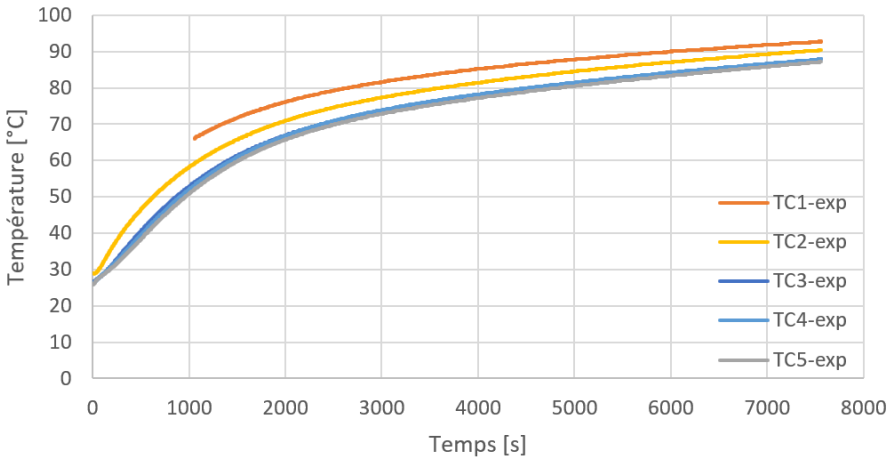


Figure 3.4 – *Évolution de la température à l'intérieur de l'échantillon.*

La température augmente plus rapidement dans les thermocouples situés près de la surface. Pour les thermocouples éloignés de la surface (TC3, TC4, TC5), leur température est similaire tout au long de l'expérience.

3.1.4 Discussion intermédiaire

Premièrement, concernant la densité, il est intéressant de remarquer la variation importante de la densité en fonction des échantillons. Cette première observation permet d'avoir une première vision sur la non-homogénéité du bois utilisé. Il existe des parties du tronc plus denses que d'autres [95], ce qui est le cas pour tous les bois. La densité moyenne de 512 $\frac{kg}{m^3}$ permet aussi de poser une hypothèse sur l'espèce de notre bois. Il n'existe que trois espèces bien implantées de peuplier en Belgique et cette densité se rapproche plus de l'espèce la plus commune, le peuplier blanc (Populus Alba L.) d'une densité moyenne de 515 $\frac{kg}{m^3}$ [34]. La densité de 512 $\frac{kg}{m^3}$ sera utilisée pour les simulations.

Deuxièmement, les coefficients de retrait et de gonflement sont différents selon les directions. La direction θ possède le coefficient le plus élevé. C'est aussi le cas d'après la littérature. La figure A.4 dans les annexes reprend un grand nombre d'espèces de bois et le taux de retrait de vert à sec (30%->0%). En comparant les données recueillies et celles représentées dans la tableau 3.2, on remarque bien que le retrait dans la direction tangentielle vaut le double par rapport à celui dans la direction radiale. En ce qui concerne le retrait dans la direction longitudinale, il est très faible et est souvent négligé [96]. Cette faible valeur explique pourquoi l'écart type est assez élevé comparé aux valeurs obtenues. Les variations étant faibles, les erreurs de mesures sont importantes. La variation des dimensions dans la direction radiale n'est pas la même en séchage et en humidification. Cette différence peut être due au cycle de séchage-humidification qui peut dégrader certaines propriétés. Les valeurs obtenues peuvent être comparées à celle du Populus Alba L., qui donne les coefficients de retraits suivants, $\alpha_{\phi\theta} = 0.34$, $\alpha_{\phi r} = 0.19$ [96]. Ces valeurs correspondent bien à celles obtenues en séchage, mais il persiste une différence en humidification. Les coefficients obtenus en séchage seront utilisés pour les simulations.

Troisièmement, l'évolution du taux d'humidité en séchage en fonction du temps montre que les échantillons suivent une tendance assez claire. L'impact de la géométrie est assez contre-intuitif. En effet, c'est la géométrie "cube" ayant une surface de contact inférieure à celle de la géométrie "bâton" qui sèche plus vite. Cette tendance est liée au coefficient de diffusion de l'humidité qui est différent selon les directions. Toutes les surfaces des échantillons ne s'équivalent pas. Les surfaces de normale z, voient leur taux d'humidité ϕ_w en moyenne supérieur dû à cette diffusion, ce qui implique un flux d'humidité supérieur selon équation 2.2. L'échantillon "cube" ayant une surface de normale z cinq fois plus grande que la surface de normale z de l'échantillon "bâton", elle mène à une diffusion plus rapide (équation 1.5.3).

Quatrièmement, l'évolution du taux d'humidité en humidification en fonction du temps montre que les échantillons suivent également une tendance. Celle-ci est cependant différente de celle en séchage. Elle est due au fait que la diffusion de l'eau suit en réalité une loi non-Fickienne lorsque le taux d'humidité s'approche du PSF (point de saturation des fibres) [97].

Cinquièmement, l'EMC du bois en fonction de l'humidité relative montre que l'équation d'Hailwood-Horrobin donne une EMC différente à celle observée expérimentalement. Pour l'échantillon placé à une humidité relative de 65%, cette différence peut être expliquée par les arrêts fréquents de l'enceinte climatique à ce taux d'humidité, ce qui peut engendrer une non-homogénéité à l'intérieur de l'échantillon. Pour l'échantillon placé à une humidité

relative de 98%, la différence peut être expliquée par la limite de validité de la loi. En effet, celle-ci est valable jusqu'à une humidité relative de 100%. Dès lors, 98% est assez proche de la limite pour qu'on puisse supposer que l'erreur est due à cette proximité. À un tel taux d'humidité, les défauts sur le bois condensent l'eau sous forme de vapeur. L'humidité ressentie par le bois est alors supérieure, ce qui engendre une EMC légèrement plus élevée. Un échantillon de bois trempé dans de l'eau liquide peut atteindre une EMC de plus de 100%, soit bien au-dessus du PSF.

Finalement, concernant la diffusion de la chaleur, la température augmente de façon rapide au début de l'expérience. S'ensuit un changement de pente et une croissance presque linéaire de la température. Ces résultats seront comparés à ceux de la simulation numérique et discuté plus loin.

3.2 Essais mécaniques

Les essais mécaniques présentés dans la section suivante permettent d'obtenir des données expérimentales essentielles dans la mise en place de la simulation numérique. Le module de Young, la limite au flambement et la courbe déformation-contrainte sont déterminés pour différentes températures et taux d'humidités.

3.2.1 Compression

Six tests de compression ont été réalisés avec des échantillons sortants de l'enceinte climatique à une température de 95°C et un taux d'humidité ϕ (0%, 5%, 22.5%). Les essais ont été effectués dans la presse à des températures de 140°C et 170°C. L'évolution de la contrainte vraie en fonction de la déformation vraie est représentée sur la figure 3.5.

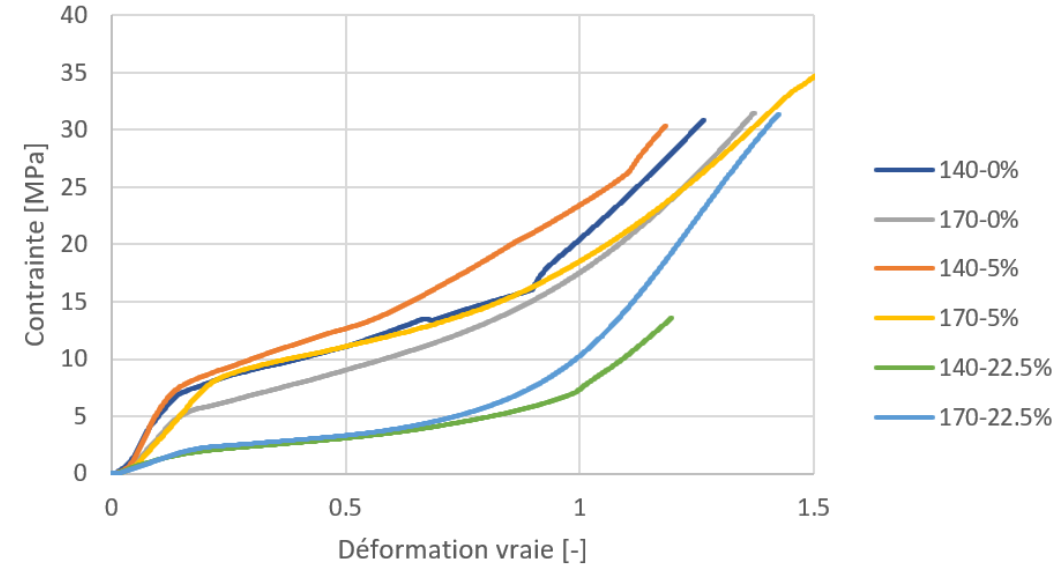


Figure 3.5 – *Courbe de compression de différents échantillons.*

Conformément au comportement attendu (figure 1.33), il apparaît 3 phases :

- La première est la phase élastique. Cette phase est caractérisée par le module de Young E. Pour ces expériences, le module de Young est plus élevé lorsque la température est faible et le taux d'humidité élevé.

- La seconde est la phase de flambement. La pente de la phase de flambement semble également assez variable selon l'échantillon. Cependant, pour un taux d'humidité élevé, elle est assez faible, ce qui définit une résistance moindre des parois au flambement.

- La transition entre la phase élastique et la phase de flambement est marquée par un changement de pente. Le σ_b auquel le flambement apparaît est assez différents en fonction des échantillons. σ_b diminue avec le taux d'humidité.

- La dernière phase est la phase de densification. Le changement de pente dû à l'apparition de cette phase est plus marquée lorsque le bois est humide.

Dans cette expérience, la température n'est pas censée jouer un rôle important. En effet, la compression est assez rapide pour que la chaleur n'ait pas le temps de diffuser de manière significative. Cette hypothèse sera étudiée par la suite par le biais de la simulation.

Il n'existe pas de différence marquante entre un bois sec et un bois à 5 % d'humidité. Le bois étant assez inhomogène, les différences entre les courbes peuvent s'expliquer par ces inhomogénéités. Par contre, à 22.5% d'humidité, le bois passe au-dessus de sa température de transition vitreuse, ce qui explique la grosse différence entre les courbes.

Le maximum de contrainte n'est pas le même suivant les différents échantillons. Ceci peut à nouveau s'expliquer par leur inhomogénéité, mais aussi par un défaut d'alignement de la presse. En effet, après chaque essai, il est nécessaire de paralléliser à nouveau les "plaque" de la presse, car elles ne sont plus parallèles. Une inhomogénéité s'observe également dans la mesure des dimensions des composants après compression. Ceci est peut être dû à une force trop élevée mise en œuvre.

Module d'élasticité

En zoomant sur la phase élastique, il est possible de déterminer le module de Young des différentes courbes.

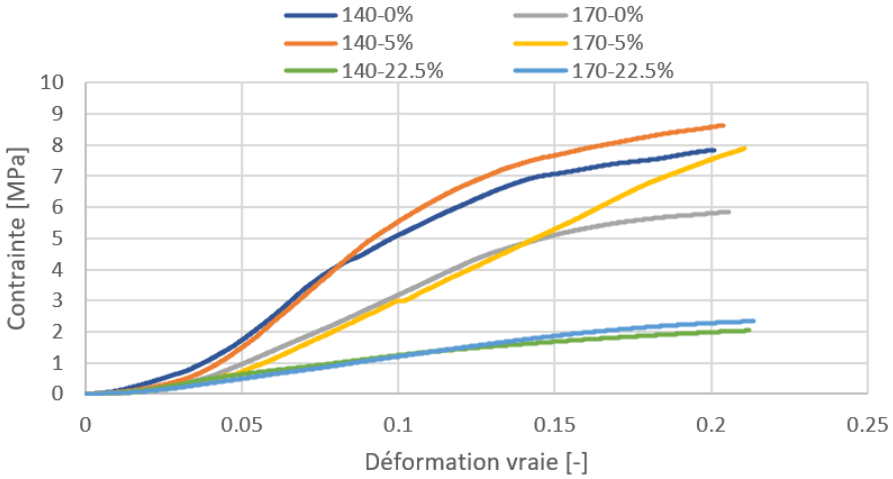


Figure 3.6 *– Phase élastique de la compression.*

La pente change en fonction de l'échantillon. Pour un échantillon saturé, elle est beaucoup plus faible que pour un échantillon sec (tableau 3.4). On observe également que le module de Young est plus faible avec la température (tableau 3.5). Même s'il semble y avoir une tendance de cette pente avec la température, il est probable que l'échantillon à cette étape soit toujours à la température de l'enceinte climatique (95°C), ce qui impliquerait que la tendance observée est une coïncidence. Ceci sera étudié plus tard.

Échantillon	0%	5 %	22.5%
E [MPa]	60.6	61.7	13.5

Table 3.4 *– Module d'élasticité E moyen pour des échantillons "plaque" compressés dans la direction radiale.*

Échantillon	140°C	170°C
E [MPa]	73.3	45.9

Table 3.5 *– Module d'élasticité E moyen en fonction de la température pour des échantillons "plaque" secs compressés dans la direction radiale.*

La forme de la courbe est à comparer avec celle présentée dans la section matériel et méthodes (figure 2.8). Expérimentalement, lorsque les mesures commencent, la courbe n'a pas directement la pente définie par le module de Young. Dès lors, il faut considérer une certaine déformation avant de mesurer le module de Young. De plus, sur la courbe de la figure 2.8, les phases sont clairement démarquées.

Limite de flambement

La limite de flambement change également, le flambement apparaît à plus faible contrainte pour un échantillon saturé.

Échantillon	0%	5%	22.5%
σ_b [MPa]	5.9	8.2	1.9

Table 3.6 *– Limite de flambement σ_b moyenne en fonction de la température pour des échantillons "plaque" compressés dans la direction radiale.*

À nouveau, la différence entre les échantillons à 0% et 5% devrait être confirmée par un échantillonnage plus important. Cependant, il existe une différence claire entre le σ_b à faible ϕ et celui à un ϕ qui mène le bois au-dessus de sa température de transition vitreuse. Cette observation a également été observée par certains auteurs [98], qui ont remarqué que σ_b diminue avec l'augmentation de la température et du taux d'humidité.

Échantillon	140°C	170°C
σ_b [MPa]	7.5	6.7

Table 3.7 *– Limite de flambement σ_b moyenne en fonction de la température pour des échantillons "plaque" secs compressés dans la direction radiale.*

3.2.2 Relaxation

Les échantillons "plaque" dont les courbes de compression ont été précédemment présentées ont ensuite été maintenus pendant 5000 secondes à une déformation constante.

Les graphiques aux figure 3.7 et figure 3.8 présentent la relaxation des contraintes sous compression à 140°C et 170°C pour des échantillons "plaque" respectivement, secs (0%) et humide (22.5%). Le σ_b est également représenté.
On observe que la relaxation des contraintes est non nulle pour un échantillon sec (figure 3.7). Il persiste encore de nombreuses contraintes dans le bois et même après 5000 secondes de relaxation, la relaxation est partielle. Étant donné qu'une fois relâché, le bois possède une contrainte résiduelle conséquente, un retour de forme non négligeable est observé également (3-4 mm). La même tendance est observée pour un échantillon d'un

taux d'humidité à 5%.

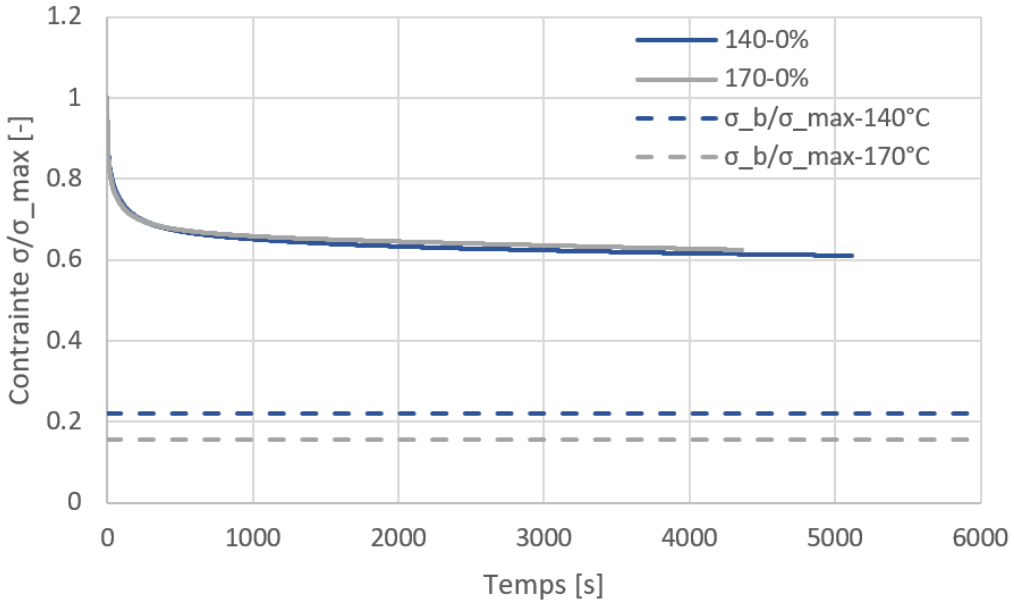


Figure 3.7 – *Relaxation des contraintes à sec pour une géométrie "plaque".*

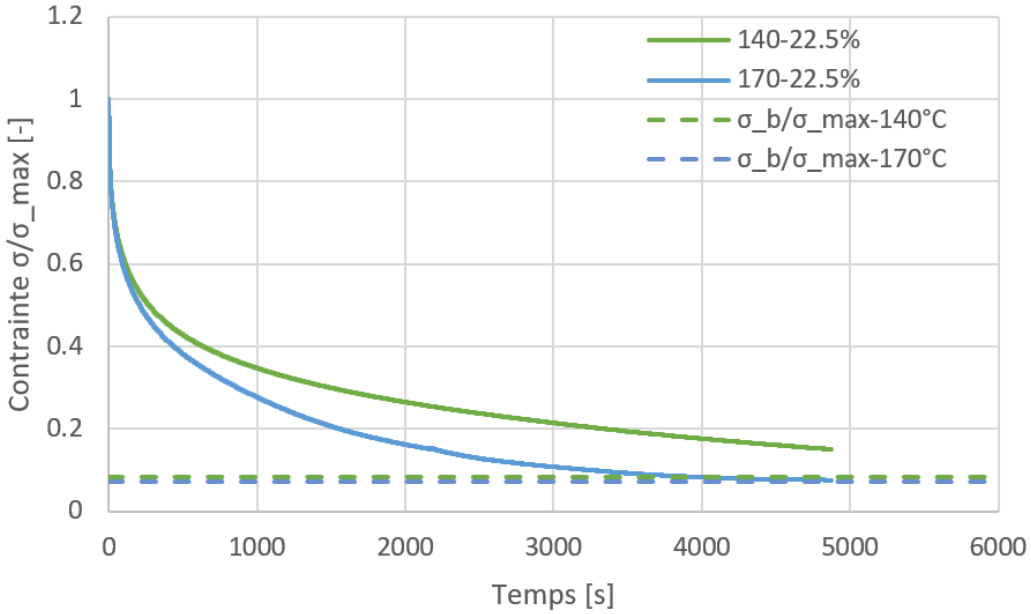


Figure 3.8 – *Relaxation des contraintes pour une géométrie "bâton" et un taux d'humidité de 22.5%.*

À haut taux d'humidité, la relaxation des contraintes est plus élevée. La température joue également un rôle. Lorsqu'elle augmente, la relaxation est plus importante. Il persiste après relaxation des contraintes résiduelles plus faibles qui se traduisent, par un plus faible retour de forme, une fois la presse relâchée (1-2 mm).
La figure 3.9 étudie la relaxation des contraintes en fonction de la géométrie. On observe que cette relaxation est plus rapide pour un échantillon "bâton" comparé à un échantillon

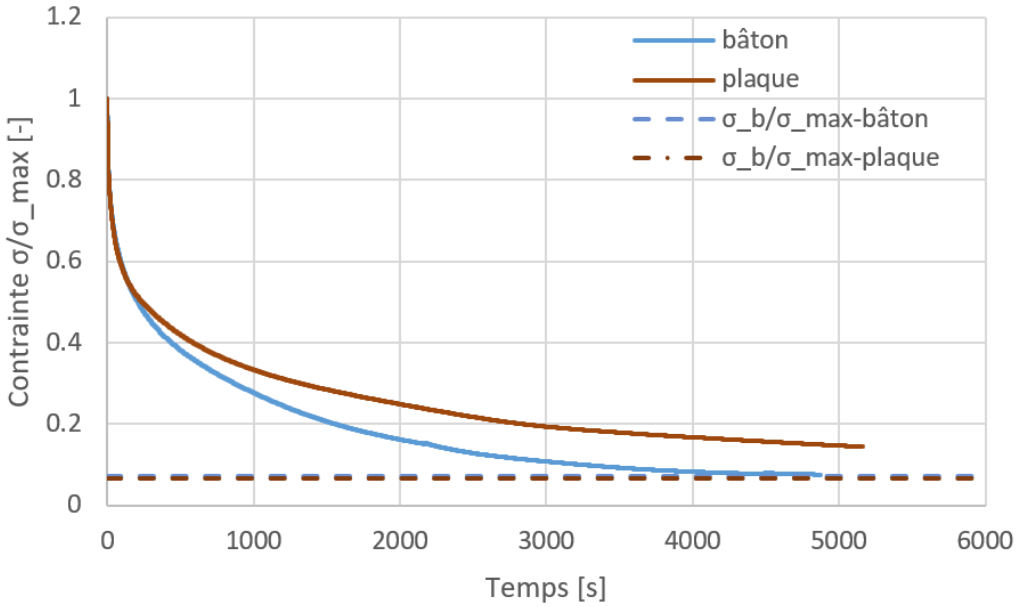


Figure 3.9 – *Relaxation des contraintes à 170°C pour différentes géométries et à un taux d'humidité de 22.5% .*

"plaque".

En mesurant les dimensions avant et après compression et relaxation, il est aussi possible d'avoir une idée du coefficient de Poisson moyen. À sec, il est égal aux valeurs suivantes.

Échantillon	0%-140°C	0%-170°C	22.5%-140°C	22.5%-170°C
$\nu_{r\theta}$ [MPa]	0.28	0.23	0.11	0.178482023
ν_{rz} [MPa]	0.019	0.013	/	/

Table 3.8 – *Coefficient de Poisson moyen.*

En fonction de l'humidité, le coefficient de Poisson décroît, ce qui est en accord avec la littérature [99]. Il dépend également de la température. Sous la T_g, lorsque la température augmente, le coefficient de Poisson aura tendance à diminuer. On observe que la direction majeure de relaxation est la direction tangentielle. Les valeurs du coefficient de Poisson à l'ambiante pour le peuplier sont $\nu_{r\theta} = 0.33$ et $\nu_{rz} = 0.02$ [100], ceux-ci confortent l'idée d'une diminution avec la température. Par contre, au-dessus de la T_g, la croissance du coefficient de Poisson avec la température peut être expliquée par le comportement visqueux qui prime dans ces conditions.

À sec, le bois n'est pas viscoélastique. Effectuer de larges déformations entraîne une déformation plastique [41]. Le coefficient de Poisson a été calculé avec les lois de l'élasticité pour un matériau orthotrope, ce qui peut engendrer des problèmes dans les résultats. Lors du relâchement de la charge, le retour de forme se fait majoritairement dans la direction d'application de la charge. Le bois étant poreux, des pores se créent à nouveau. Les dimensions ne sont que peu affectées dans la direction tangentielle, mais augmentent dans la direction radiale (retour de forme). Le retour de forme observé est supérieur lors d'un test mené à 140°C, ce qui définit que plus de pores se sont créés. La température a

pour effet de réorganiser les chaînes du bois. En résumé, en dessous de T_g, le coefficient de Poisson ne peut être déterminé par les équations de l'élasticité orthotrope.

Au-dessus de la température de transition vitreuse, les chaînes se sont tellement réorganisées, que plus aucun pore ne se créée lors du retour de forme et le bois se voit doté d'un comportement élastique dont les lois précédemment mentionnées sont applicables. L'augmentation du coefficient de Poisson avec la température au-dessus de la T_g indique alors que la viscosité augmente avec la température, ce qui est un comportement classique de la plupart des matériaux [101]. D'un autre côté, le coefficient de Poisson plus faible au-dessus de la T_g comparé à en dessous est dû au fait que le coefficient de Poisson diminue avec l'humidité. Il se peut également qu'en s'évacuant, l'eau entraîne une diminution des dimensions dans la direction tangentielle, entraînant une diminution du coefficient de Poisson.

En prenant le test de relaxation d'un échantillon de 170°C et 22.5% d'humidité, la libération des contraintes maximale est définie par le σ_b et E_∞ pour une température de 170°C et un taux d'humidité de 22.5%. σ_b initial est représenté sur les figures et définit le σ_b d'un échantillon à 95°C et 22.5% d'humidité, soit celui du bois dans les conditions supposées où a eu lieu la compression. On observe alors que la relaxation tend vers σ_b initial et vient même à le dépasser pour une température de 170°C et un taux d'humidité de 22.5%. Si l'échantillon est plus large, il aura plus de difficulté à se relaxer. Cela se traduit, comme représenté sur la figure 3.9, par une libération des contraintes plus lente. De plus, en regardant le coefficient de Poisson, il est plus facile pour l'échantillon de s'écouler dans certaines directions plutôt que d'autres. L'échantillon "bâton" possède une géométrie plus favorable à la relaxation.

En conclusion, les résultats obtenus ci-dessus permettent de souligner l'importance du taux d'humidité et de la température sur le procédé de compression. La présence d'un haut taux d'humidité avant compression est un nécessaire afin d'obtenir une relaxation des contraintes suffisante. Le temps et la température sont deux paramètres couplés, permettant de relaxer au mieux l'échantillon. Le bois étant un matériau orthotrope, la géométrie est également un point important. Une géométrie favorisant des dimensions plus fines et un coefficient de Poisson plus élevé (au-dessus de la T_g) se relaxera plus facilement.

3.3 Analyse DMA

Les résultats et la discussion de l'analyse DMA sont présentés dans la section suivante. Ceux-ci seront mis en parallèle avec les résultats obtenus lors des essais de compression ainsi qu'avec la littérature.

3.3.1 Direction radiale

Le module de stockage E'_r ainsi que le facteur de perte mesuré par DMA pour un test en tension dans la direction radiale sont donnés en fonction de la température à la figure 3.10,

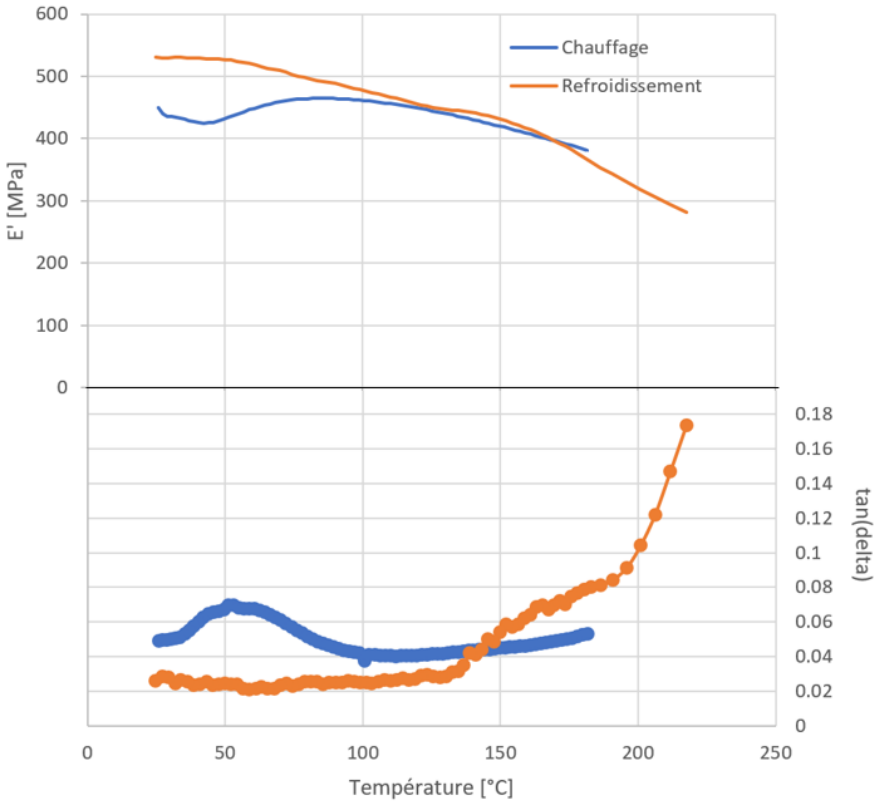


Figure 3.10 – *Module de stockage E'_r et facteur de perte dans la direction radiale.*

Le module de **stockage** dans la direction radiale est de l'ordre de 500 MPa à température ambiante. Il est plus élevé lors du refroidissement que lors du chauffage. Pour $tan(\delta)$, la tendance en chauffage montre un maximum. Au refroidissement, il est assez élevé au début et tend vers une valeur constante.
Le module de **cisaillement** $G'_{r\theta}$ ainsi que le facteur de perte mesuré par DMA en cisaillement dans la direction radiale sont donnés en fonction de la température à la figure 3.11,

3.3.2 Direction longitudinale

Le module de **stockage** E'_z ainsi que le facteur de perte mesuré par DMA pour un test en tension dans la direction radiale sont donnés en fonction de la température à la figure 3.12,

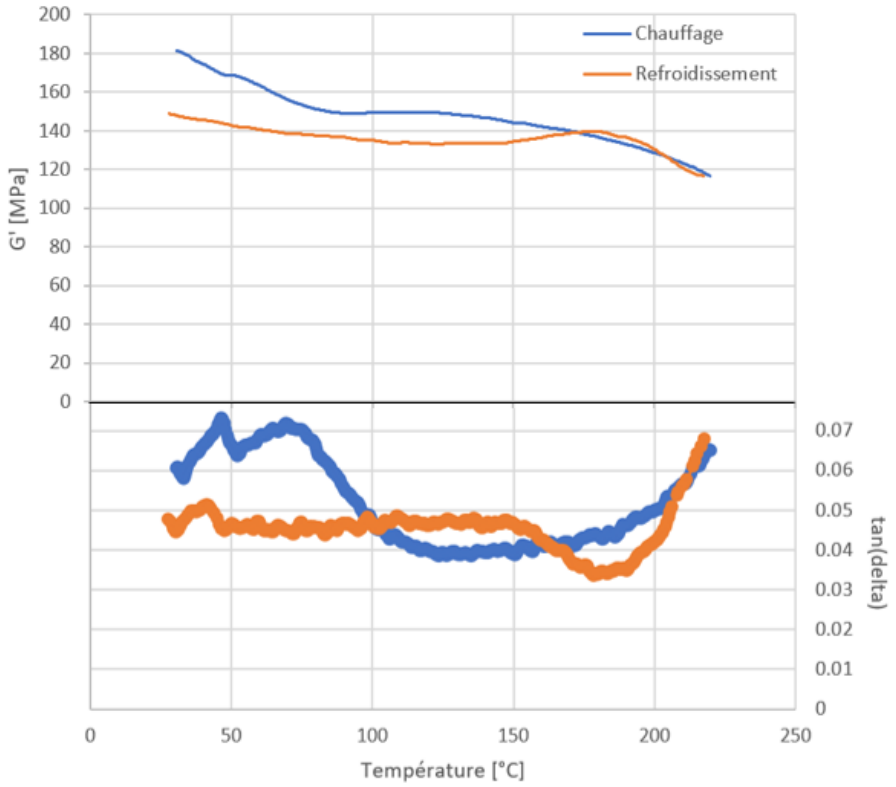


Figure 3.11 – *Module de cisaillement $G_{r\theta}$ et facteur de perte dans la direction radiale.*

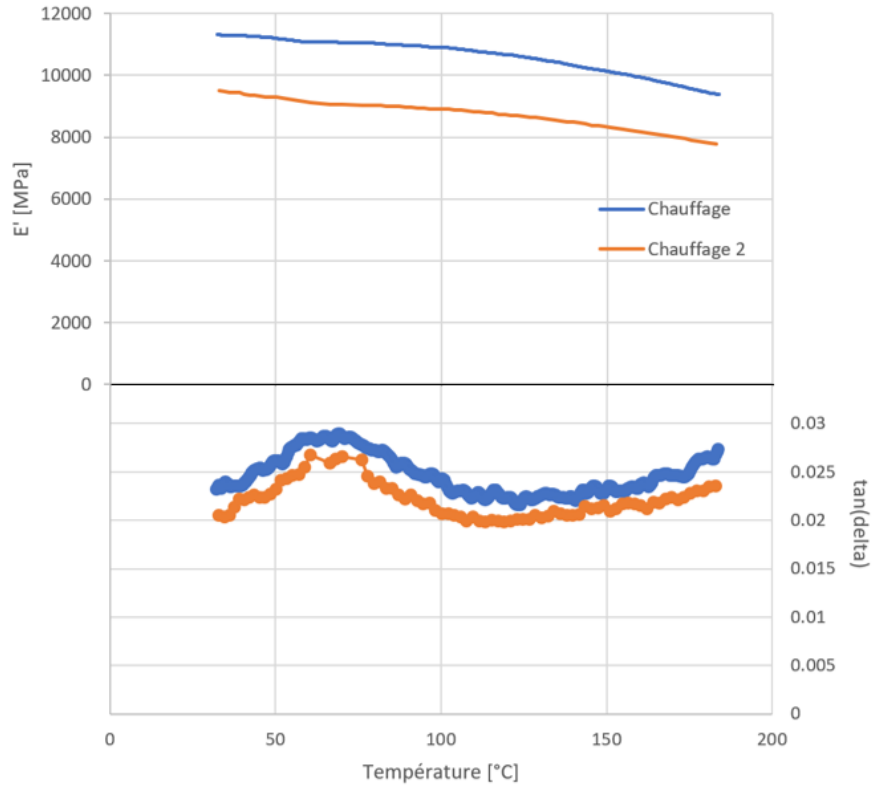


Figure 3.12 – *Module de stockage E_z et facteur de perte dans la direction longitudinale.*

La mesure du module de stockage dans la direction longitudinale E_z a été réalisée, contrairement aux autres paramètres, pour 2 essais en chauffage sur 2 échantillons différents. Le module de Young est alors approximativement de 10 GPa.

Le plus particulier avec ces tendances est la présence, en chauffage, d'un maximum dans $tan(\delta)$. Ceci est dû au séchage de l'échantillon. Lorsqu'il est placé dans la machine DMA (qui est une enceinte fermée), son taux d'humidité est de l'ordre de 8.5%. Lorsqu'il chauffe, l'humidité relative de l'enceinte DMA baisse fortement (la pression partielle maximale d'eau augmentant avec la température dans l'air), il s'ensuit alors une diffusion de l'eau de l'échantillon dans l'enceinte. La perte en humidité induit une augmentation du module de stockage. Lors du refroidissement, $tan(\delta)$ se voit constant à partir d'une certaine température. La température de transition prédite par figure 1.17 est approximativement de l'ordre de 210°C. Il est observé, pour chacune des expériences, que $tan(\delta)$ commence à fortement augmenter pour une température supérieure à 200 °C. Ceci confirme que la figure 1.17 est un bon atout pour déterminer la température de transition vitreuse.

Les valeurs prédites des modules de Young E'_r, $G'_{r\theta}$ et E'_z peuvent être comparées à la littérature. Le module de Young dans la direction longitudinale est assez proche de ce que l'on trouve dans la base de donnée de [46] $\approx$ 10 GPa. [100] reprend les quotients entre les modules élastiques pour un bon nombre d'espèces à l'ambiante. En supposant E'_z correct, les autres valeurs de modules élastiques peuvent être déterminées. Ce qui donne la tableau 3.9.

Paramètres	E'_z [GPa]	E'_r [GPa]	$G'_{r\theta}$ [GPa]
Expérience	10	0.6	0.16
[102]	10	0.92	0.11

Table 3.9 *– Paramètres obtenus à l'ambiant comparé à la littérature.*

Il existe de grandes différences entre les modules élastiques. L'explication la plus crédible est celle du facteur de géométrie. En effet, les échantillons utilisés pour ce type ont des dimensions très petites. Les erreurs de mesures sont alors plus fréquentes. De plus, des défauts dans le bois, qui se confondent macroscopiquement, peuvent fragiliser le bois (présences de cernes), notamment lors d'un test en tension dans la direction radiale. Dans la figure 3.11, on observe deux maximums. Le premier est certainement un glissement de l'échantillon sous l'appareil DMA. En effet, l'eau s'évacuant, les dimensions changent selon les coefficients de retraits. Ceci explique également pourquoi la courbe de refroidissement se situe en dessous de la courbe de chauffage. Normalement, comme observé dans [103], l'échantillon est plus rigide en refroidissement.

Pour la suite, les tendances en température des modules de Young et de cisaillement inspireront la mise en place de la simulation numérique. Les propriétés manquantes ($G_{\theta z}$, $\nu_{\theta z}$) sont fixées par [100]. Les coefficients de Poisson obtenus lors de la compression sont utilisés. On peut également remarquer que le module de Young déterminé en compression dans la direction radiale ($\approx$ 40 MPa) est de 10 fois inférieur à celui en tension à la même température ($\approx$ 400 MPa).

En conclusion, l'analyse DMA, qui est une analyse utilisée principalement pour des polymères, montre ses limites pour le bois, du moins, dans cette gamme de dimension. Les

propriétés en compression ne peuvent pas être reliées à celles d'un essai en tension. De plus, le taux d'humidité du bois ne peut être géré à l'intérieur de l'appareil. Finalement, les paramètres viscoélastiques ont pu être définis, sans pour autant être applicables pour une compression à grande déformation.

4 | Simulation numérique - Modèles et mise en place

Les équations de diffusion présentées dans l'état de l'art sont constituées d'équations aux dérivées partielles (EDP).
Deux simulations numériques ont été réalisées afin de les résoudre, la première utilise un code en C, modélisant l'équation de diffusion de la chaleur simultanément avec l'équation de diffusion de l'humidité. La seconde prend en compte le comportement du bois en compression, couplé avec la diffusion de l'humidité ainsi que la relaxation des contraintes.

4.1 Équation de diffusion chaleur-humidité

La première idée était d'utiliser le logiciel Abaqus CAE afin de réaliser cette tâche. Malheureusement, il s'avère qu'Abaqus ne permet pas de réaliser deux types d'analyses simultanément [104]. Il a donc été choisi de réaliser un code accomplissant cette tâche sur base d'un code présent sur Github, mit au point par Derek Harrison [105]. L'auteur de ce code l'a baptisé "heat3Dflex". Il résout l'équation de la chaleur en 3 dimensions, seulement pour la température. Il prend également en compte la différence entre les coefficients de conductivité dans les 3 directions de l'espace. Une série de modifications ont dès lors été effectuées pour arriver au code suivant.

4.1.1 Mise en place

Maillage

Le code est basé sur la création d'un objet de dimension de l'échantillon étudié, $L_x \mathrm{X} L_y \mathrm{X} L_z$. Le maillage ensuite créé est fait de parallélépipèdes rectangles de dimensions $\frac{L_x}{n_x}\mathrm{X}\frac{L_y}{n_y}\mathrm{X}\frac{L_z}{n_z}$ où n_x, n_y et n_z définissent le nombre de coupes à réaliser sur la longueur considérée. Pour une pièce de bois, les variables x et y sont remplacées par les variables r et θ. Ce maillage est donc composé d'un ensemble de nœuds dont la position est enregistrée. Afin de simplifier les choses, ce maillage est fixe durant toute étude.

Étape

Après création du maillage, l'intervention du temps et des incréments de calculs se font par le biais de 3 variables,

- t_i : temps initial
- t_f : temps final
- $time_step$: nombre d'incréments sur l'analyse

Un incrément de temps est de taille

$$\Delta t = \frac{t_f - t_i}{time_step} \tag{4.1}$$

Pour chaque incrément, le code résout les équations de diffusion de l'humidité et de la chaleur.

Système d'équations

Le système d'équations à résoudre est le suivant,

$$\rho c_p \frac{\delta T}{\delta t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \tag{4.2}$$

$$\frac{\delta \phi}{\delta t} = \nabla \cdot (D \nabla \phi) \tag{4.3}$$

En 3 dimensions, cela correspond à,

$$\rho C_p \frac{\delta T}{\delta t} = (\frac{\delta k_x}{\delta x}\frac{\delta T}{\delta x} + \frac{\delta k_y}{\delta y}\frac{\delta T}{\delta y} + \frac{\delta k_z}{\delta z}\frac{\delta T}{\delta z}) + k_x \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + k_y \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + k_z \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \tag{4.4}$$

$$\frac{\delta \phi}{\delta t} = (\frac{\delta D_x}{\delta x}\frac{\delta \phi}{\delta x} + \frac{\delta D_y}{\delta y}\frac{\delta \phi}{\delta y} + \frac{\delta D_z}{\delta z}\frac{\delta \phi}{\delta z}) + D_x \frac{\delta^2 \phi}{\delta x^2} + D_y \frac{\delta^2 \phi}{\delta y^2} + D_z \frac{\delta^2 \phi}{\delta z^2} \tag{4.5}$$

Avec les conditions initiales et aux frontières,

$$\phi(x, y, z, T, \phi, f, t) \;\; ou \;\; \frac{\delta \phi}{\delta t}(x, y, z, T, \phi, f, t) \;\; sur \;\; S \tag{4.6}$$

$$T(x, y, z, T, \phi, f, t) \;\; ou \;\; \frac{\delta T}{\delta t}(x, y, z, T, \phi, f, t) \;\; sur \;\; S \tag{4.7}$$

$$\phi(x, y, z, T, \phi, f, t = t_0) \;\; sur \;\; V \tag{4.8}$$

$$T(x, y, z, T, \phi, f, t = t_0) \;\; sur \;\; V \tag{4.9}$$

$$\tag{4.10}$$

où f représente une variable au choix. S représente l'ensemble composé de la frontière de l'objet créé et V l'ensemble composé de l'entièreté du volume.

Afin de simplifier les équations, les dérivées des coefficients $k(\rho_{sec}, T, \phi)$ et $D(\rho_{sec}, T, \phi)$ peuvent être découplées comme,

$$\frac{\delta k_x}{\delta x} = \frac{\delta k_x}{\delta T}\frac{\delta T}{\delta x} + \frac{\delta k_x}{\delta \phi}\frac{\delta \phi}{\delta x} \tag{4.11}$$

$$\frac{\delta D_x}{\delta x} = \frac{\delta D_x}{\delta T}\frac{\delta T}{\delta x} + \frac{\delta D_x}{\delta \phi}\frac{\delta \phi}{\delta x} \tag{4.12}$$

Solveur

Le solveur est basé sur la méthode des différences finies d'ordre 1. Pour chaque nœud composant l'objet, deux équations sont créées, une pour la diffusion de la chaleur et une autre pour la diffusion de l'humidité. Les dérivées et dérivées secondes sont alors dépendantes de celles des voisins directs des nœuds, tel que,

$$\frac{\delta^2 T(x,y,z,t)}{\delta x^2} = \frac{T(x-dx,y,z,t) - 2T(x,y,z,t) + T(x+dx,y,z,t)}{dx^2} \tag{4.13}$$

$$\frac{\delta T(x,y,z,t)}{\delta t} = \frac{T(x,y,z,t) - T(x,y,z,t-dt)}{dt} \tag{4.14}$$

$$\tag{4.15}$$

Afin de réduire le temps de calcul et d'obtenir un système plus simple, les équations de l'humidité et de la chaleur sont supposées découplées de sorte que deux systèmes indépendants sont créés. Ainsi, le solveur est appelé deux fois. Le solveur cherche d'abord à résoudre un système à $N = n_x * n_y * n_z$ inconnues pour la chaleur, puis, pour l'humidité. Les inconnues sont les valeurs des températures (premier appel) et de la concentration d'humidité (deuxième appel) en chaque nœud.

Cette première **hypothèse** de découplage est correcte, seulement si, dans l'équation 4.11, les termes $\frac{\delta k_x}{\delta \phi}\frac{\delta \phi}{\delta x}$ et $\frac{\delta D_x}{\delta T}\frac{\delta T}{\delta x}$ sont négligeables par rapport aux autres termes de l'équation. L'équation finale devient alors,

$$\rho C_p \frac{\delta T}{\delta t} = (k_x + \frac{\delta k_x}{\delta T})\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + (k_y + \frac{\delta k_y}{\delta T})\frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + (k_z + \frac{\delta k_z}{\delta T})\frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \tag{4.16}$$

$$\frac{\delta \phi}{\delta t} = (D_x + \frac{\delta D_x}{\delta \phi})\frac{\delta^2 \phi}{\delta x^2} + (D_y + \frac{\delta D_y}{\delta \phi})\frac{\delta^2 \phi}{\delta y^2} + (D_z + \frac{\delta D_z}{\delta \phi})\frac{\delta^2 \phi}{\delta z^2} \tag{4.17}$$

Une autre **hypothèse** est appliquée sur les coefficients k_i et D_i. Leur valeur ainsi que celle de leur dérivée est fixe durant tout incrément de temps et vaut celle donnée par les résultats en température et taux d'humidité de l'incrément précédent.

De l'équation 4.16 et de l'équation 4.17, il est possible de vectoriser les équations auxquelles les différences finies sont appliquées. L'application de l'équation de la chaleur au nœud de coordonnées (x,y,z) et à un temps t, donne une équation dont les coefficients multipliant l'inconnue (température ou taux d'humidité) sont vectorisés. La matrice A est alors définie par les N vecteurs comprenant les coefficients multipliant le vecteur composé des inconnues, x.
La résolution du système est basée sur la méthode des gradients conjugués. Elle résout l'équation suivante,

$$Ax = b \tag{4.18}$$

Ce vecteur x est constitué des valeurs de température ou de taux d'humidité recherchées au temps donné. Le vecteur b correspond aux valeurs connues, soit, le terme source (éventuel, non représenté dans les équations de ce TFE mais présent dans le code) ainsi que le terme de température ou d'humidité du temps précédent. Par exemple, pour la température, x vaut

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_{nt} \end{pmatrix} \tag{4.19}$$

Les deux hypothèses précédemment décrites induisent un avantage sur la matrice des coefficients A. En effet, n'ayant aucun termes de température ou de taux d'humidité en dérivée simple, la matrice A est symétrique. Afin de minimiser l'espace mémoire, la matrice A est stockée sous forme de matrice vectorisée.

Aux frontières, le code prend en compte les conditions aux frontières (valeur ou flux).

On résout ensuite le système par la méthode du gradient conjugué [106]. Cette méthode est basée sur la minimisation du résidu, donnée comme,

$$r = Ax - b \tag{4.20}$$

Une fois convergé, la solution pour ce temps est déterminée. Ensuite, les coefficients k_i, c_p et D_i sont mis à jour en fonction de la solution.

Le code originalement conçu crée alors, à la fin de l'analyse, un fichier vtk contenant la position de chacun des nœuds ainsi que la température associée. Il a été modifié dans le but de télécharger un fichier vtk toutes les 1000 secondes. De plus, le taux d'humidité associé au nœud est ajouté. Ainsi, l'évolution de l'humidité et de la température est enregistrée toutes les 1000 secondes. Le logiciel *Paraview* est utilisé afin de le visualiser et de post-traiter les informations venant des fichiers vtk.

Densité

La densité du bois ρ est considérée constante et égale à celle du bois sec.

Conductivité thermique

Dans cette section, une équation analytique est déterminée pour k $[\frac{W}{mK}]$ afin d'alimenter la simulation numérique. De par l'état de l'art, (figure 1.20), il est possible de déterminer une équation pour k dépendant de la température et de l'humidité. En utilisant une régression linéaire,

$$k = A * T * \phi + B * T + C * \phi + D \tag{4.21}$$

Avec,

A	B	C	D
8.3E-06	0.00021	0.0021	0.11

En comparant les résultats donnés par cette équation avec les conductivités données dans *Granta Edupack* pour le peuplier[46], on obtient la figure 4.1.

Les équations pour les conductivités thermiques radiale et longitudinale utilisées pour la simulation sont alors multipliées par un coefficient tel que leur valeur égale celle donnée par Granta. Granta évalue les conductivités à un taux d'humidité de 12% et une température de 23°C. Ce qui donne que $k_z = k * 1.2$ et $k_r = k_\theta = k * 0.79$, où k est donné par équation 4.21.

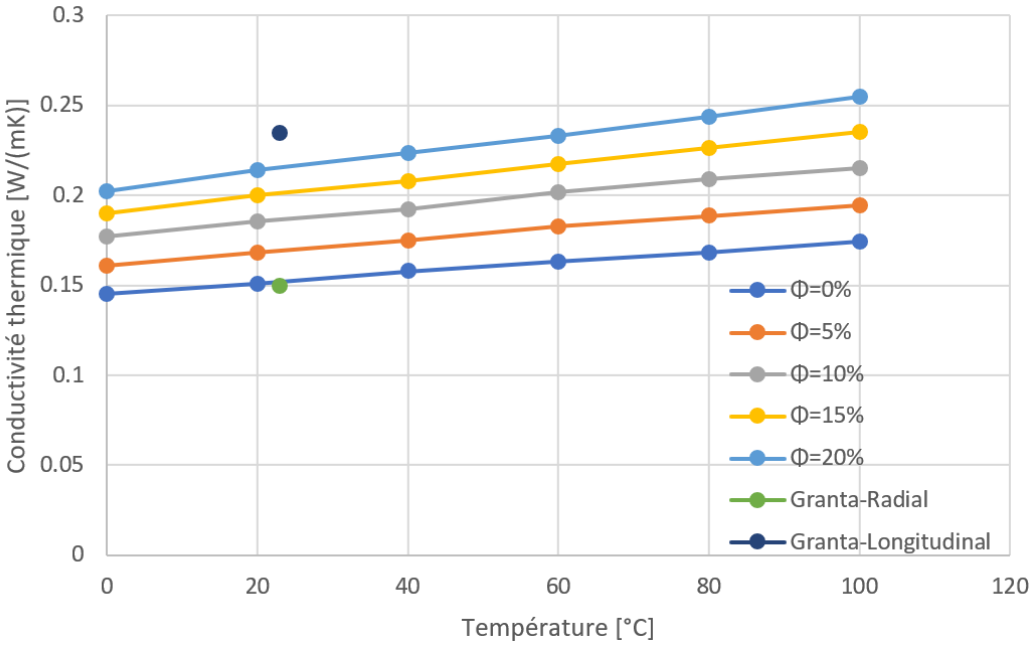


Figure 4.1 – *Conductivité thermique donnée par l'équation 4.21 en fonction de la température pour différents taux d'humidité.*

Chaleur spécifique

De la même manière qu'avec la conductivité thermique, de la figure 1.21, il est possible de déterminer une équation pour c_p $[\frac{J}{kgK}]$ en fonction de la température et de l'humidité.

$$c_p = A * T * \phi + B * T + C * \phi + D \tag{4.22}$$

Avec,

A	B	C	D
0.078	3	27.5	1535

Dilatation thermique

Le coefficient de dilatation thermique est supposé négligeable par rapport aux autres déformations qui persistent dans le procédé THM.

Coefficient de convection

À la frontière de l'échantillon, la température est définie par les effets de convection primant dans l'étuve. Le flux de chaleur aux frontières est dès lors définit comme,

$$q = h(T_\infty - T_w) \tag{4.23}$$

Avec q $[\frac{W}{m^2}]$ le flux de chaleur, h $[\frac{W}{m^2K}]$, le coefficient de convection de la chaleur, T_w la température à la frontière et T_∞ la température dans l'étuve.
Le coefficient de convection dépend du type de convection du système. Dans le cas de l'expérience réalisée, l'air chauffé est mis en mouvement à faible vitesse par un compresseur

à l'intérieur de l'étuve. La convection est dès lors forcée et le coefficient h est compris entre 20 et 300 $\frac{W}{K}$. Dans le cadre de l'expérience, il est fixé à 40 $\frac{W}{m^2K}$ [107].

4.1.2 Hygro

Coefficient de diffusion

Comme mentionné au chapitre 1, le coefficient de diffusion peut être calculé selon une loi d'Arrhénius. De par la figure 1.26, l'énergie d'activation E_b y est déterminée, comme une fonction de la chaleur et de l'humidité. Cette équation est valide au-delà de 0°C et est supposée correcte jusqu'à une température de 170°C. Le coefficient D_0 a un impact important lors de la simulation. Il est dès lors posé comme un paramètre à fixer.

$$D = D_0 \exp\left(AT^2 + BT + C\right)\phi + DT^2 + ET + F \tag{4.24}$$

A	B	C	D	E	F	D_0
8.2E-04	-0.17	0.16	0.00034	-0.093	6.6	D_0

Table 4.1 – *Table des paramètres définissant D.*

Selon [66], le ratio entre le coefficient de diffusion longitudinal et radial de l'eau libre est de 15 :1. Pour l'eau liée, il est indiqué un ratio de 2.5 :1. Cependant, ces publications ne prennent pas en compte les conditions de haute température. Pour l'expérience, il est alors défini comme un paramètre, D_z/D_r à déterminer par la simulation.

Coefficient de convection

La convection définissant le flux d'humidité sortant au bord de l'échantillon est assez faible. Il est possible de définir un coefficient convectif obéissant à l'équation suivante,

$$j = k_v(\phi_\infty - \phi_w) \tag{4.25}$$

Où j $[\frac{kg}{m^2 s}]$ est le flux à la surface. ϕ_w est le taux d'humidité à la surface, ϕ_∞ est défini par l'humidité relative de l'air remis au taux d'humidité du bois. k_v $[\frac{kg}{m^2 s}]$ est le coefficient de convection de l'humidité. Une limite inférieure pour ce coefficient a été trouvée dans la section section 3.1. Il est également défini comme un paramètre à déterminer lors de la simulation.

Dilatation due à l'humidité

Si aucune dégradation du bois n'est considérée, le coefficient de retrait est simplement dépendant de la densité du bois. Celui considéré a été trouvé dans la partie expérimentale pour le séchage, cependant, il ne sera pas implémenté pour des raisons d'incompatibilités avec le modèle de diffusion.

4.1.3 Les analyses

Maintenant que les paramètres sont définis, voici les simulations menées. Suivant les expériences réalisées au laboratoire, les conditions initiales, aux frontières et la géométrie de l'échantillon sont variables.

Diffusion de l'humidité et de la chaleur - séchage

La première est une expérience en séchage où l'échantillon, placé dans un domaine chaud, voit sa température augmenter jusqu'à la température de séchage et voit son taux d'humidité réduire.

Les conditions initiales sont de l'ordre de l'ambiante :

$$\phi_0 = 8.5 \ \frac{kg_{eau}}{kg_{sec}} \tag{4.26}$$

$$T_0 = 22°C \tag{4.27}$$

Les conditions aux frontières sont telles que toutes les surfaces sont libres :

$$q = h(T_\infty - T_w) \tag{4.28}$$

$$j_i = k_{vi}(\phi_\infty - \phi_w) \tag{4.29}$$

Où $T_\infty = 104°C$, ${}_\phi\infty = 0 \ \frac{kg_{eau}}{kg_{sec}}$ et le coefficient i détermine la surface i.

Diffusion de l'humidité et de la chaleur - humidification

La seconde est une expérience en humidification, l'échantillon placé dans un domaine humide, son taux d'humidité augmente sous l'effet de l'humidification.
Les conditions initiales sont de l'ordre de celle se trouvant dans l'étuve :

$$\phi_0 = 0 \ \frac{kg_{eau}}{kg_{sec}} \tag{4.30}$$

$$T_0 = 104°C \tag{4.31}$$

Les conditions aux frontières sont telles que toutes les surfaces sont libres :

$$q = h(T_\infty - T_w) \tag{4.32}$$

$$j_i = k_{vi}(\phi_\infty - \phi_w) \tag{4.33}$$

Où $T_\infty = 95°C$,$h = 40 \ \frac{W}{m^2K}$ et $\phi_\infty = f(RH = 98\%, T = 95°C) \ \frac{kg_{eau}}{kg_{sec}}$. La fonction $f(R_h, T)$ renvoie l'EMC du bois sous des certaines conditions de température et d'humidité relative de l'air.

Diffusion du taux d'humidité et de la chaleur - expérience en température

L'expérience suivante repose sur la mesure de la température en 5 nœuds distincts, se trouvant selon la direction radiale. Cette simulation fait écho à l'expérience menée avec les thermocouples.
Les conditions initiales sont de l'ordre de celle se trouvant dans la pièce :

$$\phi_0 = 8.5 \ \frac{kg_{eau}}{kg_{sec}} \tag{4.34}$$

$$T_0 = 26°C \tag{4.35}$$

Les conditions aux frontières sont telles que les surfaces du dessus et du dessous sont libres et les 4 autres surfaces sont contraintes par un isolant (flux de chaleur nul). La diffusion de l'humidité à travers cette surface est supposée possible :

$$j_i = k_{vi}(\phi_\infty - \phi_w) \tag{4.36}$$

$$q_{top} = q_{bottom} = h(T_\infty - T_w) \tag{4.37}$$

$$q_{west} = q_{est} = q_{north} = q_{south} = 0 \tag{4.38}$$

$$\tag{4.39}$$

Les termes "top" et "bottom" réfèrent aux surfaces de normale radiale, les termes "west" et "est", aux surfaces de normales tangentielles aux cernes et les termes "north" et "south", aux surfaces de normales longitudinales.

Diffusion de l'humidité et de la chaleur - presse

Une dernière simulation, simulant l'échantillon placé dans la presse a été réalisée afin d'observer après combien de temps la température des plaques est atteinte.
L'expérience suivante repose sur la mesure de la température en 5 nœuds distincts, se trouvant selon la direction radiale. Cette simulation fait écho à l'expérience menée avec les thermocouples.
Les conditions initiales sont de l'ordre de celle se trouvant dans l'enceinte :

$$\phi_0 = 22.5 \ \frac{kg_{eau}}{kg_{sec}} \tag{4.40}$$

$$T_0 = 95°C \tag{4.41}$$

Les conditions aux frontières sont telles que les surfaces du dessus et du dessous sont à température de la presse et les 4 autres surfaces sont libres. Seul la diffusion de l'humidité à travers ces 4 surfaces est possible :

$$j_{top} = j_{bottom} = 0 \tag{4.42}$$

$$j_{west} = j_{est} = j_{north} = j_{south} = k_{vi}(\phi_\infty - \phi_w) \tag{4.43}$$

$$T_{top} = T_{bottom} = 170°C \tag{4.44}$$

$$q_{west} = q_{est} = q_{north} = q_{south} = h(T_\infty - T_w) \tag{4.45}$$

$$\tag{4.46}$$

4.2 Abaqus

Abaqus est un logiciel de calcul par éléments finis basé sur la modélisation et l'analyse de composants mécaniques et d'assemblages. Il offre une large gamme de lois et de modèles pouvant décrire les matériaux [108].

Abaqus a été utilisé dans ce TFE afin de modéliser le comportement du bois sous l'action d'une contrainte, couplée à un changement de température ou d'humidité. Toutes les données introduites sont dans les unités du système international (SI(mm)),

Longueur	Force	Masse	Temps	Contrainte	Énergie	Densité
mm	N	$tonne$	s	MPa	mJ	$\frac{tonne}{mm^3}$

Table 4.2 *– Unités de base pour les simulations.*

Diffusion de la température et de l'humidité

Tout d'abord, une seconde analyse fut réalisée sur le transfert de l'humidité et de chaleur, par les modèles proposés par Abaqus et ce, dans le but de comparer ces résultats à ceux obtenus par le code en C modifié. L'avantage principal que possède Abaqus est la capacité à pouvoir changer les dimensions de l'échantillon par dilatation thermique et par retrait/gonflement. Cependant, ces options ne seront pas utilisées ici.

Matériau

En température, le matériau étudié est spécifié par les propriétés du peuplier à un taux d'humidité de $\phi = 0.085$. De la première simulation, il a été mis en évidence que la température diffuse bien plus vite que l'eau. C'est pourquoi le taux d'humidité à l'ambiante est choisi.

- La densité est celle déterminée expérimentalement, supposée constante, $\rho = 512\ [\frac{kg}{m^3}]$.
- La conductivité thermique k est la même que celle définie précédemment, pour $\phi = 0.085$. Elle est indiquée dépendante à la température et plusieurs valeurs sont introduites. Elle est également introduite dépendante de la direction.
- La chaleur spécifique c_p du bois est déterminée par équation 4.22, pour $\phi = 0.085$. Elle est indiquée dépendante à la température et plusieurs valeurs sont introduites.
- La dilatation thermique est ignorée.

En humidité, le matériau est spécifié par les propriétés du peuplier à une température de $T = 104°C$, pour la même raison. La loi de diffusion de l'humidité dans Abaqus prend en compte la solubilité du bois, soit, la quantité d'eau maximale qu'il peut contenir.

- La densité est celle déterminée expérimentalement, supposée constante, $\rho = 512\ [\frac{kg}{m^3}]$.

- La solubilité du bois est mise à 1 par soucis de simplicité. Cela ne change en rien les résultats.

- Le coefficient de diffusion D est celui déterminé par l'équation 4.24 pour la direction radiale et transverse, multiplié par le coefficient D_0 déterminé par le code en C. Pour la direction longitudinale, il est fixé par le quotient $\frac{D_z}{D_r}$, qui est un paramètre également déterminé par le code en C.

- Le coefficient de retrait ne peut être défini dans ce type d'analyse.

Analyse

Abaqus possède un certain nombre de types d'analyses, possibles [104].

L'analyse utilisée pour le transfert de chaleur est celle nommée "Uncoupled heat transfer analysis". Un temps de 8000 secondes avec un pas de temps maximum de 10 secondes est imposé. Les conditions initiales et aux frontières sont les suivantes,

$$T_{t=0s} = 26°C \tag{4.47}$$
$$q_{top} = q_{bottom} = h(T_\infty - T_w) \tag{4.48}$$
$$q_{west} = q_{est} = q_{north} = q_{south} = 0 \tag{4.49}$$
$$\tag{4.50}$$

Avec $h = 40\ \frac{W}{m^2K}$. L'imposition d'une formule telle que donnée pour q_{top} et q_{bottom} a nécessité l'utilisation de la subroutine Abaqus *DFLUX [109], afin de prendre en compte T_w à chaque incrément.

L'analyse utilisée pour le transfert de l'humidité est celle nommée "Mass diffusion analysis". Un temps de 15000 secondes avec un pas de temps maximum de 20 secondes est imposé. Les conditions initiales et aux frontières sont les suivantes,

$$\phi_{t=0s} = 0.085 \tag{4.51}$$
$$j_{bottom} = j_{top} = j_{west} = j_{est} = k_{v1}(\phi_\infty - \phi_w) \tag{4.52}$$
$$j_{north} = j_{south} = k_{v2}(\phi_\infty - \phi_w) \tag{4.53}$$
$$\tag{4.54}$$

Avec k_{v1} et k_{v2} déterminés par le code en C. De même, l'imposition d'une formule a nécessité l'utilisation de la subroutine Abaqus *DFLUX.

Les éléments utilisés pour les deux types d'analyses sont les DC3D8, acceptant la diffusion.

4.2.1 Contrainte

La seconde simulation prend en compte l'effet d'une déformation par le biais d'une contrainte appliquée. Pour cette simulation, il a été nécessaire d'utiliser un maillage déformable. Le modèle développé en C se base sur des nœuds et non des éléments, dès lors, il n'est pas possible de l'utiliser en déformation. Le logiciel Abaqus a alors été à nouveau choisi.

Abaqus propose des modèles de matériaux applicables au comportement qu'est celui du bois (large déformations, courbe déformation-contrainte comme décrite dans la sectionsous-section 3.2.1). Les prochaines sections se consacrent à la description de ces modèles.

4.2.2 Hyperfoam

Le premier est le modèle "Hyperfoam" ou d'hyperélasticité pour mousse élastomérique. Ce modèle peut convenir au bois, le comportement de la courbe en compression donné dans la section sous-section 3.2.1 correspond avec celle décrite dans le modèle [75]. Physiquement, au vu des nombreuses cavités que possède le bois et de sa nature polymérique, c'est un modèle qui lui peut bien lui convenir, pour autant que le bois sois Hyperélastique. Ceci est le cas au-dessus de la température de transition vitreuse. L'avantage du modèle Hyperfoam comparé aux autres modèles Hyperélastique est qu'il accepte une grande compressibilité du matériau.

Le modèle Hyperfoam, tout comme les autres modèles d'hyperélasticité disponibles, peut se mettre en place de deux manières différentes :

Premièrement, par le biais de données expérimentales, par les points de la courbe de déformation-contrainte. Cependant, Abaqus demande à ce que les données suivent des types de tests en particulier (figure 4.2). Ainsi, les données extraites d'un "Planar Test" ne sont pas suffisantes pour que le modèle Hyperfoam caractérise le matériau. Tous les autres tests, cependant, le sont. Pour un test uniaxial (celui utilisé), il nécessite alors de définir les déformations et contraintes nominales ainsi que les déformations latérales nominales (ou, si pas disponible, un coefficient de Poisson constant de 0.5 maximum). Pour être le plus précis possible sur la définition du modèle, un test uniaxial doit être accompagné d'un test en cisaillement [110].

Deuxièmement, en spécifiant les paramètres hyperélastiques. Comme tout matériau hyperélastique, il possède une fonction d'énergie de déformation (strain energy function). Cette fonction est définie, pour le modèle Hyperfoam, comme,

$$U = \sum_{i=1}^{N} \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2}\left[\widehat{\lambda}_1^{\alpha_i} + \widehat{\lambda}_2^{\alpha_i} + \widehat{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i}\Big(\big(J^{el}\big)^{-\alpha_i\beta_i} - 1\Big)\right] \tag{4.55}$$

Avec les coefficients ν_i, α_i, β_i et N, liés aux propriétés du matériau tels que,

$$G_0 = \sum_{i=1}^{N} \mu_i \tag{4.56}$$

$$K_0 = \sum_{i=1}^{N} 2\nu_i\Big(\frac{1}{3} + \beta_i\Big) \tag{4.57}$$

$$\beta_i = \frac{\nu_i}{1 - 2\nu_i} \tag{4.58}$$

Où ν_i est le coefficient de Poisson, K_0 est le module de masse initial, G_0 est le module de cisaillement initial, β_i est la compressibilité. Les paramètres N et α_i de l'équation 4.55 sont également dépendants du matériau. $\hat{\lambda}_i$ sont les déformations principales.

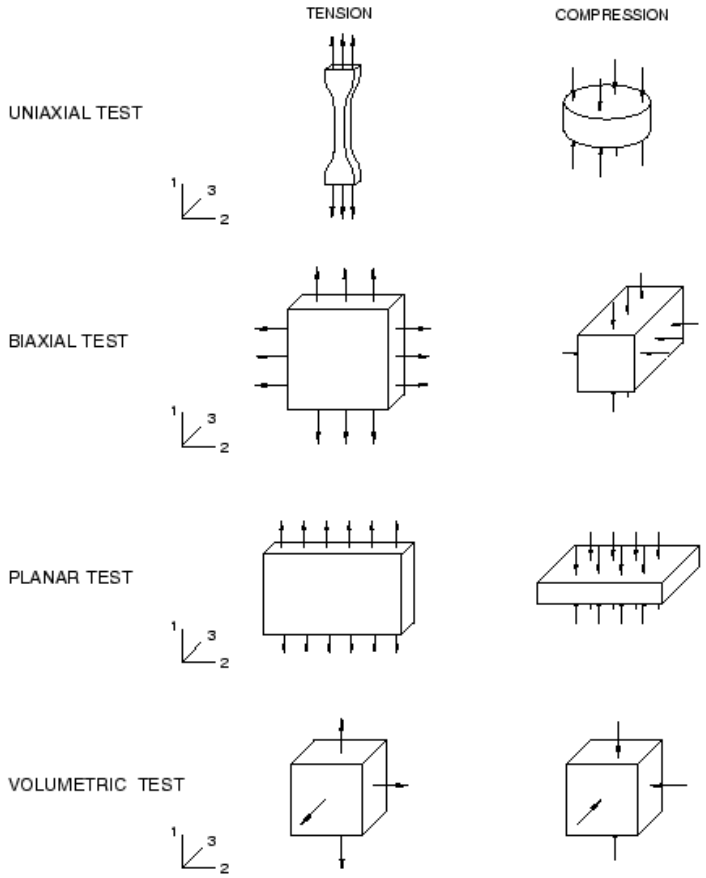


Figure 4.2 – *Type de test pour données expérimentales [111].*

L'analyse DMA a permis de mettre en mesure les modules d'élasticité initiaux à sec, E_0 et G_0 en fonction de la température. Pour un matériau isotrope, K_0 s'exprime en fonction du coefficient de Poisson ν et du module de Young initial E_0 comme [112],

$$K_0 = \frac{1}{3}\frac{E_0}{1-2\nu} \tag{4.59}$$

$$G_0 = \frac{E_0}{2*(1+\nu)} \tag{4.60}$$

Comme le matériau est hautement orthotrope, l'utilisation de cette relation semble compromise. En utilisant l'équation 4.60, le coefficient de Poisson obtenu est supérieur à 1, ce qui confirme l'impossibilité d'utiliser cette formule **à sec**.

Le modèle Hyperfoam ne prend pas en compte l'anisotropie et impose un coefficient de Poisson et un module de cisaillement unique. Les coefficients de Poisson et modules de cisaillement intervenant majoritairement dans la simulation pour une compression plane dans la direction radiale sont $\nu_{r\theta}$ et ν_{rL}, $G_{r\theta}$ et G_{zr}. Dès lors, celui choisi pour la simulation est celui qui définit la dimension la plus longue. Pour les échantillons testés dans la presse ("bâton", "plaque"), la direction de cisaillement majoritaire est la direction tangentielle θ. Dès lors, les coefficients de Poisson $\nu_{r\theta}$ ainsi que les modules de cisaillement $G_{r\theta}$ sont utilisés.

Quant à l'évolution de ces propriétés avec l'humidité et la température, peu de références en parlent, cependant, l'analyse DMA a permis d'avoir une idée de l'évolution de ces propriétés avec la température à sec.

L'analyse du modèle Hyperfoam se concentrera sur la reproduction des courbes de compressions et la détermination des paramètres par l'outil d'évaluation d'Abaqus.

4.2.3 Hyperelasticity

D'autres modèles adaptés aux matériaux polymères sont implémentés dans Abaqus. Ces autres modèles sont regroupés dans la gamme "Hyperelastic behavior of rubberlike materials" [113]. Les fonctions d'énergie de déformations sont décrites pour différents modèles dans les annexes (figure A.6). Ces modèles ont été créés afin de représenter des matériaux caoutchouteux, étant presque incompressible. Le modèle Hyperfoam est basé sur le modèle d'Ogden, dont l'équation est donnée ci-dessous.

$$U = \sum_{i=1}^{N} \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2}(\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i}) + \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{D_i}(J^{el} - 1)^{2i}) \tag{4.61}$$

En comparant l'équation d'Ogden à celle de l'Hyperfoam, on remarque que seul le terme final change. Celui-ci décrit la compressibilité. Dans ce cas-ci, c'est le coefficient $D_1 = \frac{2}{K_0}$, directement relié au module de masse K_0, qui représente la compressibilité. Abaqus considère cette compressibilité, seulement si le coefficient de Poisson est inférieur à 0.5. Une équation importante du modèle relie le coefficient de Poisson, le module de masse et le module de cisaillement,

$$\nu_{r\theta} = \frac{3K_0/\mu_0 - 1}{6K_0/\mu_0 + 2} \tag{4.62}$$

Il est possible de créer sa propre fonction U avec la subroutine *UHYPER [114]. Il existe également une série de modèles dans cette catégorie hyperélastique prenant en compte l'anisotropie et une subroutine permet également de créer sa propre fonction anisotrope U. Ces modèles anisotropes demandent une connaissance accrue du matériau et Abaqus, pour ces modèles, n'est pas capable d'évaluer les paramètres de leurs équations à partir de données expérimentales.
Les modèles d'Ogden et polynomial seront utilisés et comparés au modèle Hyperfoam pour différents ordres N.

4.2.4 Crushable foam

Le modèle Crushable foam est un modèle de durcissement d'un matériau mousse. Dans ce modèle, le matériau compressé est déformé plastiquement, contrairement au modèle hyperfoam [115].

Il nécessite la connaissance du coefficient de Poisson plastique, élastique ainsi que du ratio,

$$k = \frac{\sigma_{0b}}{p_{0b}} \tag{4.63}$$

Où σ_{b0} est la limite d'élasticité initiale en compression uniaxiale et p_{0b}, la limite d'élasticité en compression hydrostatique. Ce ratio est ici fixé à 1. En effet, pour du peuplier, le flambement apparaît en premier dans la direction radiale, on présume alors que $p_{0b} = \sigma_{0b}$. Ce n'est cependant pas le cas pour tous les bois. Le coefficient de Poisson est fixé, comme dans le modèle Hyperfoam, selon la dimension de cisaillement la plus longue pour les échantillons utilisés, soit, $\nu_{r\theta}$.

La suite du modèle demande des données sur le durcissement, soit un ensemble de données de déformations plastiques ϵ_{pl} - limite d'élasticité σ_b. Le modèle Crushable foam n'est applicable qu'avec le modèle d'élasticité linéaire isotrope présent dans Abaqus.
Ce modèle sera également comparé au modèle Hyperfoam.

4.2.5 Viscoélasticité

Les modèles d'Hyperelasticity et d'Hyperfoam peuvent être utilisé de pairs, sur Abaqus, avec de la viscoélasticité. Ce type de viscoélasticité accepte de larges déformations. Dans la section sous-section 3.2.2, il a été mis en évidence que, même à sec, le bois possède un comportement visqueux. À nouveau, il est possible de l'implémenter de plusieurs manières : La première, en spécifiant directement les paramètres de la série de Prony décrivant le matériau. Ceux-ci peuvent être calculés par le biais de données expérimentales. Il existe une librairie Python *pyvisco* capable de calculer et d'optimiser le nombre de termes en minimisant l'erreur.

La deuxième, en utilisant directement les données expérimentales. Abaqus est également capable d'évaluer le nombre de termes optimal d'une série de Prony ainsi que les valeurs des paramètres afin de minimiser l'erreur obtenue. Ces données expérimentales peuvent être, soit les données d'un test de relaxation du matériau, soit les données d'un test de fluage. Les données doivent alors être des données de relaxation pour le module de cisaillement $G(t)$, ou pour le module de masse $K(t)$. Pour le modèle Hyperfoam, Abaqus suppose que ces modules en fonction du temps sont couplés [116]. Dès lors, le module de cisaillement adimensionnel (voir équation 1.5.4) doit être égal au module de masse normalisé et les constantes de relaxations τ_i sont égales également. Pour les autres modèles Hyperélastique, cette contrainte n'est pas nécessaire.

Dans le modèle, les courbes de relaxations expérimentales, présentées dans la section sous-section 3.2.2 ont été utilisées pour les courbes du bois au-dessus de sa température de transition vitreuse. L' équation 4.59 et équation 4.60 sont alors supposées correctes et permettent de passer de la courbe contrainte-temps à une courbe module de cisaillement-temps. Le coefficient de Poisson est toujours considéré constant et égal à celui calculé dans l'expérience correspondante. L'avantage de Abaqus Standard est sa rapidité comparée à celle d'Abaqus Explicit.

4.2.6 Modèles Abaqus

Abaqus propose un type d'analyse permettant l'application d'une contrainte et la diffusion de la chaleur, "Fully coupled thermal-stress". Une limitation importante est celle imposant que le matériau Hyperfoam ou Hyperelastic ne peut être utilisé qu'avec un coefficient

d'expansion thermique isotrope. L'ensemble des simulations sous contraintes décrites plus haut seront définies selon ce type d'analyse.

Dans la simulation, la presse est composée de deux plateaux rigides en 3D. Deux types d'essais en compressions sur Abaqus se font. Le premier, sur un cylindre de dimensions 20x20 mm pour imiter un essai de compression uniaxiale. Le second type de géométrie compressée est la géométrie "plaque". Un coefficient de frottement de 0.1 est imposé entre l'échantillon compressé et les plaques rigides de la presse. Ce coefficient reste faible étant donné que le bois a été raboté et les plaques de la presse ont été machinées sans trop de rugosités. [117]

Abaqus Explicit est utilisé pour les expériences de viscoélasticité et de contraintes couplées. Pour toutes les autres expériences, là où c'est possible, on utilisera Abaqus Standard par souci de rapidité. Lors d'un essai de compression, la plaque supérieure se déplace d'une distance de 13.33 mm afin d'obtenir un rapport de compression de 3. La relaxation a ensuite lieu pendant 5000 secondes.

5 | Simulation Numérique - Résultats et discussion

Dans ce chapitre, les résultats des simulations numériques sont présentés et discutés. Un résumé des points importants se trouve à chaque fin de section.

5.1 Diffusion de l'humidité et de la chaleur - séchage

Taux d'humidité

Cette simulation retrace les expériences effectuées en séchage. L'effet du coefficient de convection k_v, rapport $\frac{D_z}{D_r}$ ainsi que du coefficient D_0 sont étudiés sur le transfert d'humidité afin de paramétrer au mieux le modèle.
Dans un premier temps, les paramètres sont fixés comme $D_0 = 3.510^{-3}$ $\frac{mm^2}{s}$, $k_v = 1.510^{-7}$ $\frac{1}{mm^2 s}$ et $\frac{D_z}{D_r} = 20$. L'évolution du taux d'humidité moyen de l'échantillon "bâton" en séchage à 104°C est comparé à celle de 3 expériences de laboratoire sur la figure 5.1.

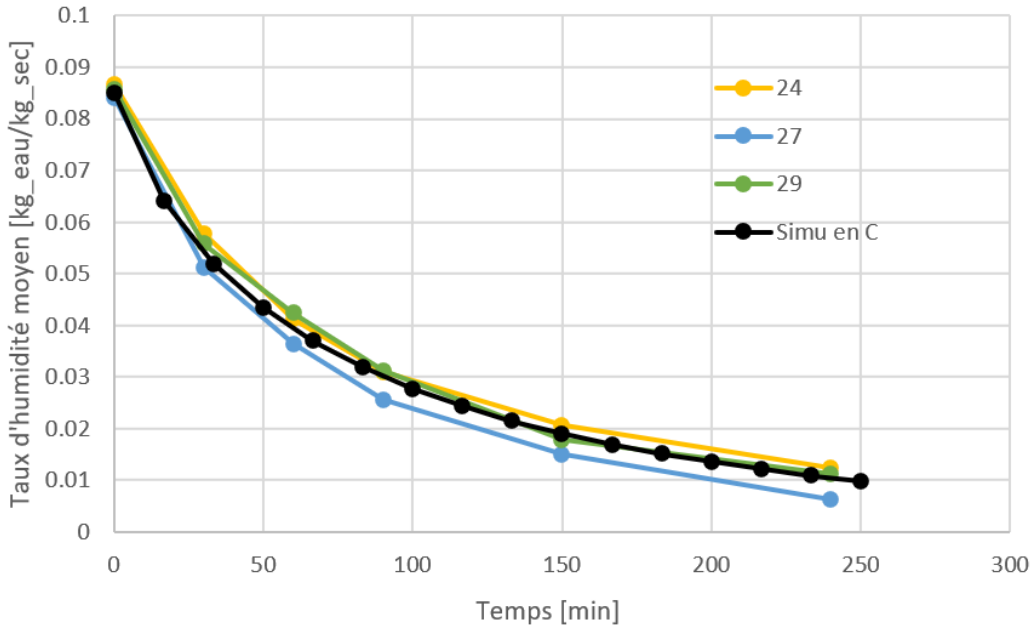


Figure 5.1 *– Évolution du taux d'humidité moyen pour un échantillon "bâton" en séchage à 104°C.*

On observe que la simulation suit bien la courbe de perte en humidité. Le coefficient de convection k_v est bien supérieur à la limite de $2.9 * 10^{-8}$ $\frac{1}{mm^2 s}$ déterminée graphiquement dans la partie résultat. Il faut tout de même rester critique, le coefficient de convection joue un grand rôle dans l'évolution de l'humidité. Plusieurs d'entre eux ont été testés afin

de prédire au mieux le comportement. Différents résultats en fonction de ce coefficient sont représentés sur la figure 5.2. À l'heure actuelle, aucune littérature ne porte sur le coefficient de convection de l'eau d'un milieu solide tel que le bois, à l'extérieur. C'est pourquoi il a été déterminé dans ce travail.

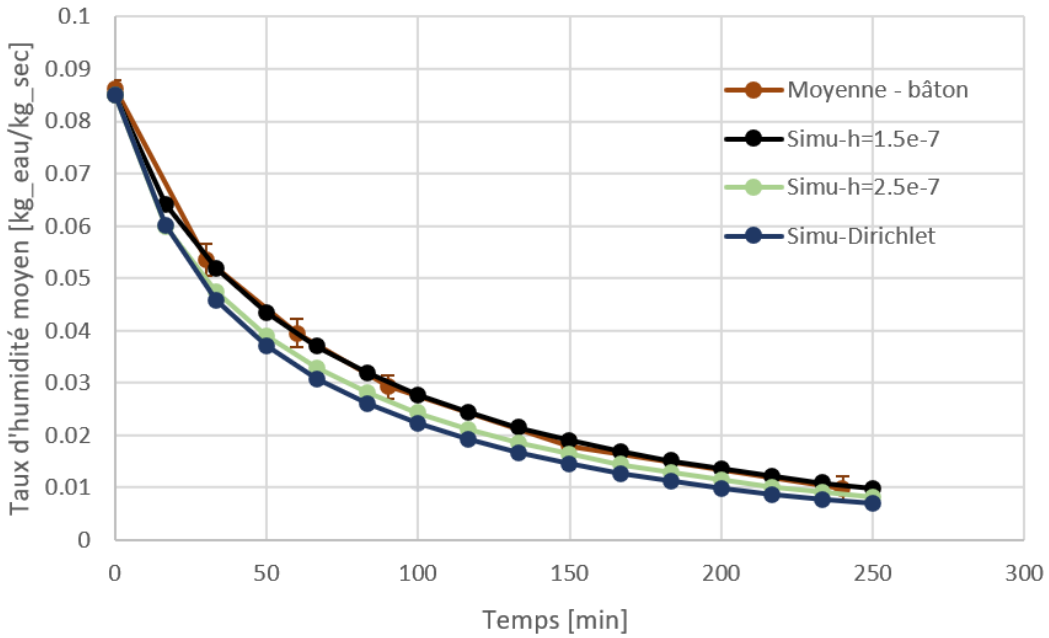


Figure 5.2 – *Simulation pour différents coefficients de convection k_v d'un échantillon "bâton" en séchage.*

Le terme "Dirichlet" évoque une surface où le taux d'humidité est automatiquement égal à celui de l'extérieur. Il n'y a alors pas de convection et l'évacuation du taux d'humidité est entièrement définie par la diffusion. Une différence s'observe entre les courbes en début d'expérience. Ensuite, l'écart se réduit et elles semblent toutes stagner vers une même valeur.

L'impact du terme D_0 sur la courbe donne l'évolution représentée sur la figure 5.3.

La valeur à laquelle les courbes de séchage simulées tendent après 150 minutes est dépendante du terme D_0 de l'équation 4.24. En diminuant D_0, le séchage sera beaucoup plus long.

En résumé, là où k_v, soit la convection, a un impact direct sur la vitesse de la perte en humidité au début de l'expérience, c'est D_0, soit la diffusion, qui marque un impact important sur le long terme.

L'évolution du taux d'humidité en fonction du temps, le long d'un axe traversant l'échantillon "bâton" en son centre selon la direction z, donne la figure 5.4.
Elle indique qu'aux frontières de l'échantillon, la diffusion est plus intense qu'au centre. Ceci est dû au coefficient de diffusion D_z qui est bien supérieur aux deux autres.

L'évolution du taux d'humidité pour un échantillon "cube" donne la figure 5.5.

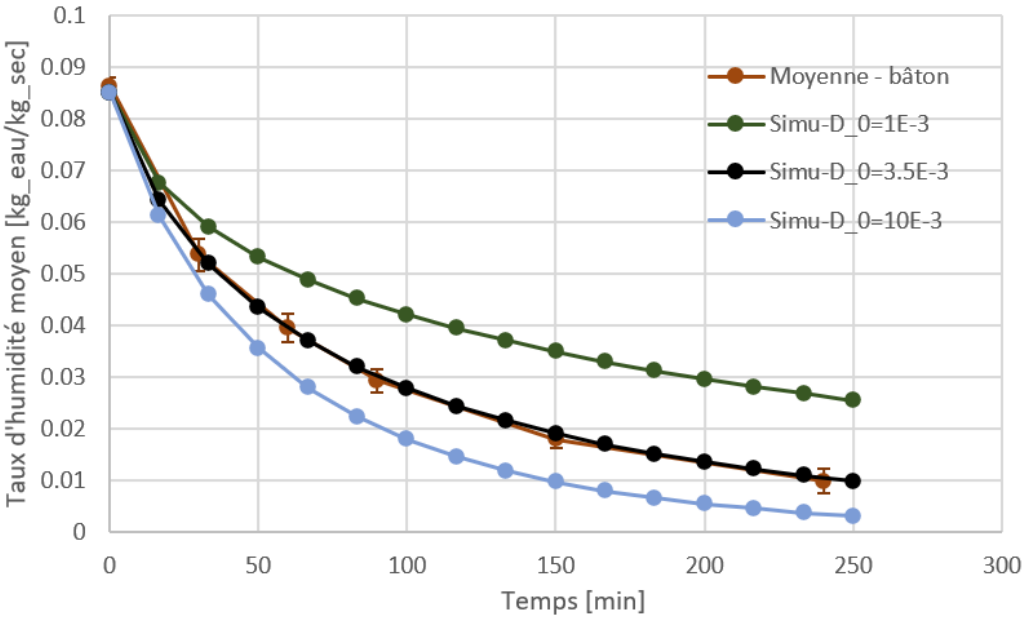


Figure 5.3 – *Simulation pour différents coefficients de diffusions D_0 d'un échantillon "bâton" en séchage.*

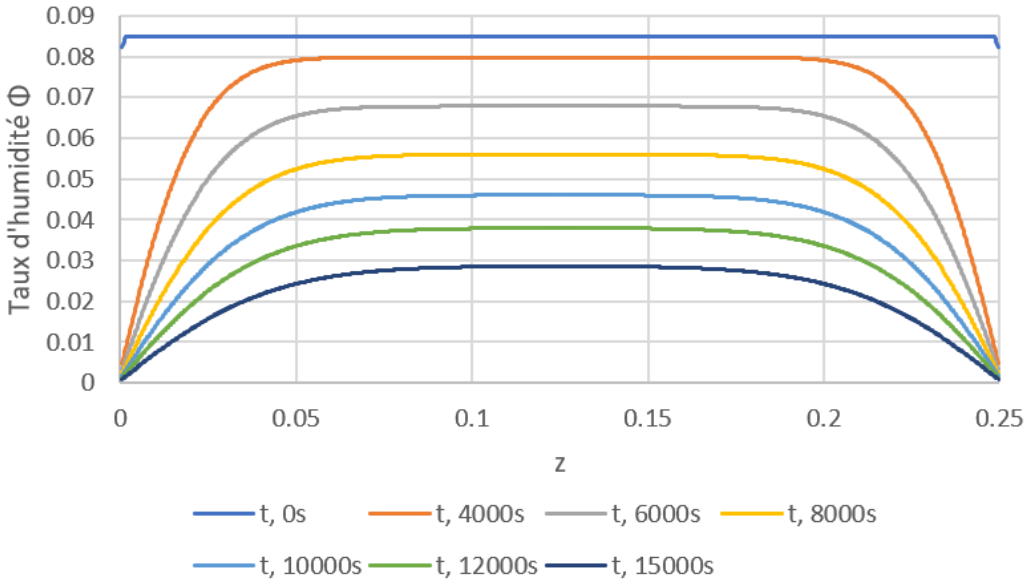


Figure 5.4 – *Évolution du taux d'humidité selon un axe de direction longitudinale passant par le centre de l'échantillon pour différents temps.*

À nouveau, la simulation semble bien fonctionner, sauf peut-être au début de l'expérience où l'évolution de la simulation semble plus rapide comparée à la réalité. Pour cette expérience, c'est le dernier paramètre, D_z/D_r qui a permis d'arriver à ce résultat. En effet, dans le cas de l'échantillon "bâton", l'aire de la surface longitudinale est assez faible comparée au flux dans les directions radiales et transverses. Dès lors, la valeur de D_z/D_r n'importe pas tellement. Pour ce qui est de l'échantillon "cube", il possède une aire de surface longitudinale cinq fois supérieure à l'échantillon "bâton". Celle-ci détermine alors la diffusion plus importante comparée à l'échantillon "bâton". En fixant ce ratio à 20, la

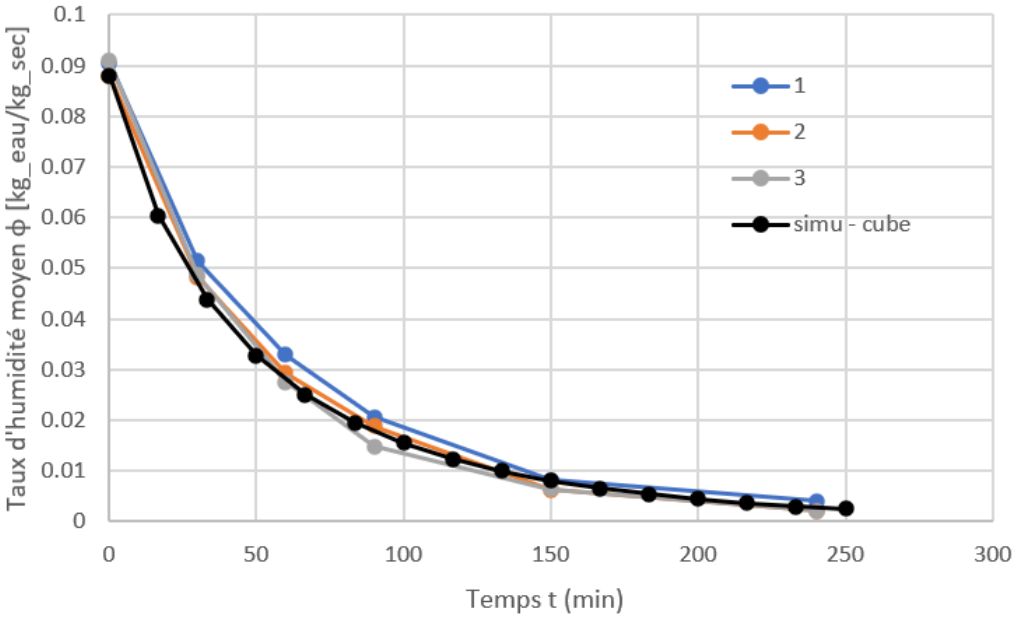


Figure 5.5 – *Évolution du taux d'humidité moyen pour un échantillon "cube".*

courbe de simulation suit assez bien la courbe expérimentale.

Si l'on effectue une coupe dans l'échantillon ((figure 5.6 et figure 5.7), on observe à nouveau que la diffusion est bien plus rapide dans la direction longitudinale comparée aux deux autres.

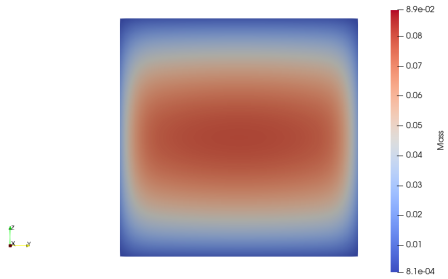


Figure 5.6 – *Coupe radiale de l'échantillon "cube" après 2000 secondes dans l'étuve (évaluation du taux d'humidité).*

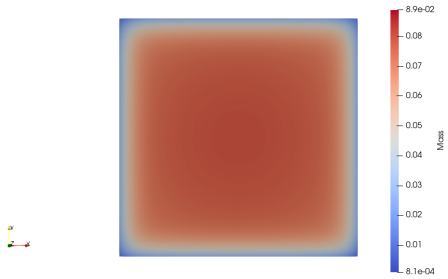


Figure 5.7 – *Coupe longitudinale de l'échantillon "cube" après 2000 secondes dans l'étuve (évaluation du taux d'humidité).*

Dans la section ci-dessus, les paramètres k_v, D_0 et $\frac{D_z}{D_r}$ régissant la loi de diffusion de l'humidité ont été déterminés pour que le modèle s'adapte au mieux aux courbes expérimentales du peuplier. Ceux-ci seront maintenus fixes durant les prochaines simulations. Afin de vérifier la cinétique de la diffusion, le profil de l'humidités de différents échantillons devraient être analysé.

Température

La suite de la simulation se concentre sur l'évolution de la température en séchage à 104°C. Pour un échantillon "bâton" et un échantillon "cube", le programme prédit l'évolution de la température moyenne et au centre de l'échantillon visible sur la figure 5.8.

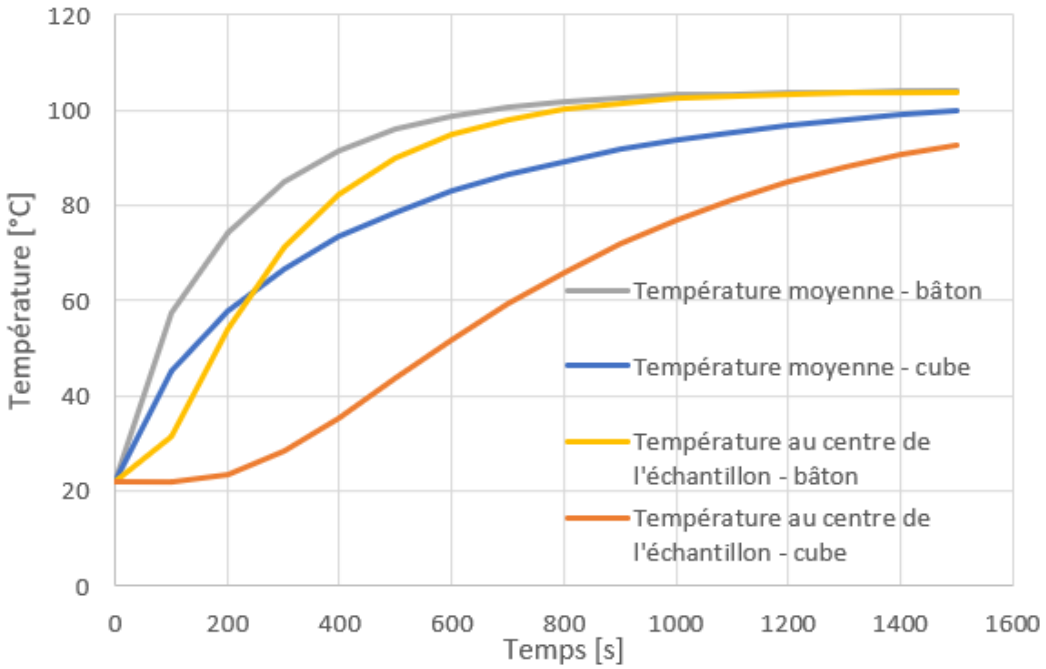


Figure 5.8 – *Simulation - Évolution de la température en fonction du temps pour un échantillon "cube" et "bâton" placé dans l'étuve à 104°C.*

Il est intéressant de remarquer deux choses. La première, la température moyenne atteint son maximum pour l'échantillon "bâton" aux alentours de 800s. Pour le "cube", cela prend 800s de plus. La deuxième, l'échelle de temps n'est pas la même que pour les figures regardant au taux d'humidité. En effet, en comparant les deux, un état de stabilité est atteint au bout de 15-20 minutes pour la température, ce qui est plus de 10 fois plus rapide que la diffusion de l'humidité.

Il peut être également intéressant d'effectuer une coupe selon les plans radiaux et longitudinaux, comme effectué précédemment (figure 5.9 et figure 5.6).

Même si le coefficient de conductivité thermique est supérieur pour la direction longitudinale, l'impact n'est pas très visible comparé à celui de la diffusion de l'humidité. De plus, on pourrait s'attendre à ce que la perte d'humidité, plus rapide dans la direction longitudinale, fasse baisser k_z en bordure d'échantillon. Afin de réaliser la différence entre les deux directions de diffusion, le profil de la température selon un axe de direction radiale et selon un axe de direction longitudinale, les deux passants au centre de l'échantillon, est tracé sur la figure 5.11.
On observe de cette figure que la différence de température aux bordures de l'échantillon n'est que de 5°C. La température est plus élevée à la bordure de la surface de normale radiale par rapport à la longitudinale. Ceci garantit donc que la diffusion de l'humidité a un impact sur le profil de température.

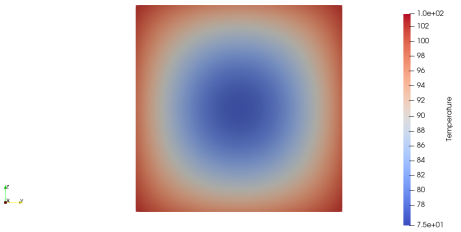


Figure 5.9 – *Coupe radiale de l'échantillon "cube" après 200 secondes dans l'étuve (évaluation de la température).*

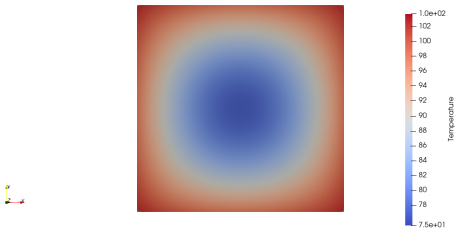


Figure 5.10 – *Coupe longitudinale de l'échantillon "cube" après 200 secondes dans l'étuve (évaluation de la température).*

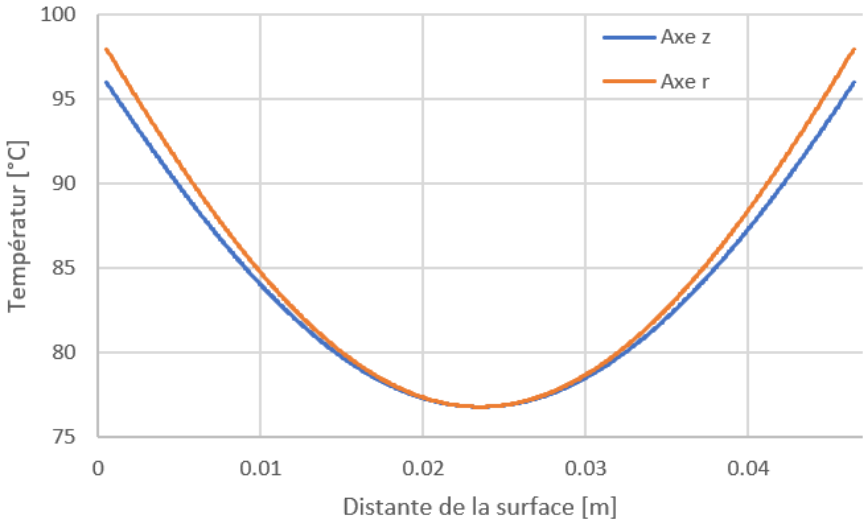


Figure 5.11 – *Comparaison entre l'état de température sur un axe radial et longitudinal à 200s.*

De cette seconde partie, il est possible de conclure que l'évolution de la température est affectée par la diffusion de l'humidité directionnelle du bois. Même si, à l'ambiante, le coefficient de conductivité thermique est supérieur dans la direction longitudinale, il diminue rapidement sous le coefficient de conductivité thermique radial, ce qui engendre un transfert de chaleur moins rapide dans la direction longitudinale.

5.2 Diffusion de l'humidité et de la chaleur - humidification

Cette simulation se concentre sur l'évolution du taux d'humidité d'un échantillon "bâton" sortant de l'étuve (104°C, $\phi = 0\%$) et placé dans l'enceinte climatique (95°C, 98%). L'évolution du taux d'humidité prédit par la simulation, dans l'enceinte climatique et comparée aux résultats expérimentaux, est présentée à la figure 5.12.

On observe que la courbe en humidification ne suit pas la même tendance qu'en séchage. La prédiction du modèle diverge de la courbe expérimentale au-delà de 10% d'humidité. Au-delà de ce taux d'humidité, le bois ne suit plus la courbe prédite par la loi de Fick. Ceci

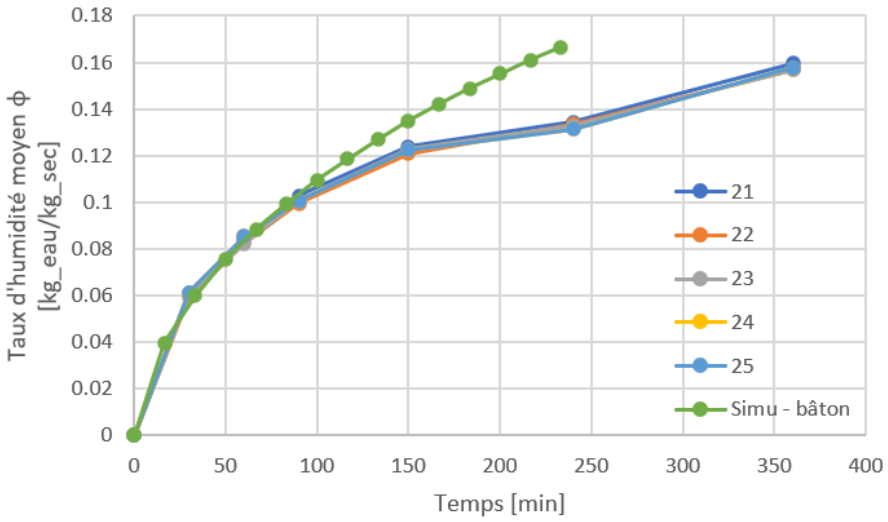


Figure 5.12 – *Évolution du taux d'humidité moyen pour un échantillon "bâton".*

est dû au comportement d'absorption du bois. En effet, lorsqu'il s'approche du PSF, le bois devient non-Fickien. Il nécessite alors d'utiliser d'autres modèles pour prédire l'évolution. Ce phénomène apparaît également en désorption [97]. Même si la forme des courbes est différente, il serait intéressant de vérifier si les deux courbes atteignent l'équilibre en même temps. Pour la suite, le modèle en C est quand même considéré, même s'il décrit un comportement incorrect pour des hauts taux d'humidités.

Le comportement non-Fickien peut être modélisé par des logiciels d'éléments finis. Ce ne sera pas fait dans ce travail. Cependant, Abaqus possède un modèle de matériau décrivant des matériaux poreux. Il serait intéressant d'étudier ce modèle dans un travail futur [118].

5.3 Diffusion de l'humidité et de la chaleur - expérience en température

Dans cette section, l'expérience du "cube" dont cinq thermocouples ont été placés à l'intérieur est reproduite (voir équation 4.1.3). La température moyenne simulée, pour deux coefficients de convection thermique, est comparée à la température lue expérimentalement par les thermocouples.

Sur la figure 5.13, on observe que la température moyenne simulée augmente plus rapidement que celle prédite par les thermocouples. Même si les courbes n'ont pas les mêmes valeurs, les tendances observées sont similaires. En effet, dans les deux cas, la température augmente rapidement pour ensuite stagner. L'hypothèse exposée est que les thermocouples n'ont pas la capacité de lire correctement la température du bois. Cette erreur de lecture serait due à la présence de porosité. De plus, les thermocouples sont placés dans une cavité perforée, il est probable que le thermocouple lisent alors la température de l'air plutôt que celle du bois. La cavité étant fermée, il existe une convection faible entre cet air et ce bois, ce qui définit le comportement de température augmentant linéairement et assez lentement dans les thermocouples.

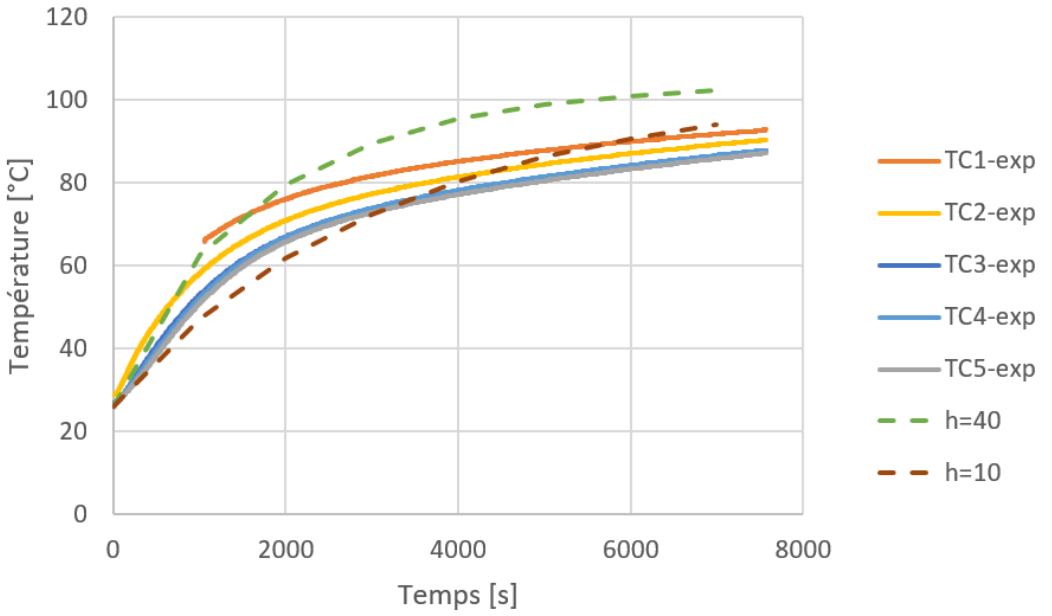


Figure 5.13 – *Évolution de la température moyenne simulée et expérimentale aux thermocouples pour deux coefficients de convection différents.*

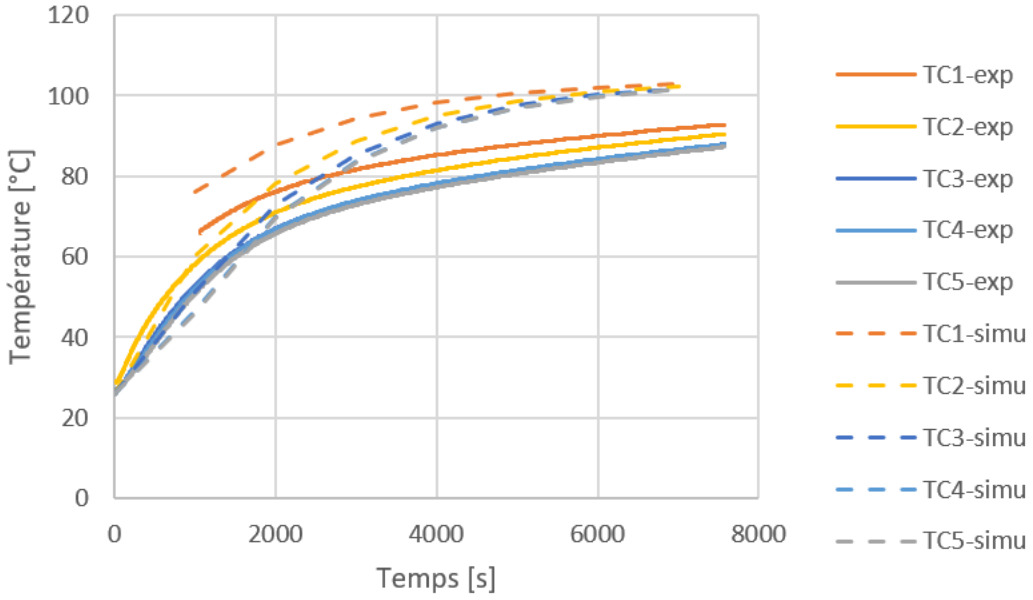


Figure 5.14 – *Évolution de la température aux thermocouples pour la simulation et l'expérience.*

Sur la figure 5.14, l'évolution de la température aux positions des thermocouples dans la simulation est comparée à celle de l'expérience. Une tendance similaire à celle de la température moyenne précédemment décrite est observée. Les thermocouples les plus éloignés de la surface montrent, en simulation, une augmentation de température plus lente que celle mesurée. Dans un article sur un programme de simulation d'un traitement thermique sur le bois [119], Jiali Zhang a réalisé une expérience très similaire à celle menée dans ce travail. Il a ensuite comparé ses résultats à une simulation numérique et observe exactement le même comportement. Lui, suppose que ce sont les inclusions à l'intérieur du bois qui freinent le transfert de chaleur, mais déclare également que le coefficient de convec-

tion thermique h, diminue à force que la température désirée est atteinte. Finalement, la mesure de la température du bois par thermocouple serait un procédé complexe, entraînant facilement des erreurs. Schmid [120] explique la méthodologie correcte à appliquer pour minimiser les erreurs. Un coefficient de correction peut être utilisé pour pallier à ces erreurs.

5.4 Diffusion de l'humidité et de la chaleur - presse

Afin de vérifier certaines données présentées dans la partie compression des résultats, le temps d'établissement de la température dans l'échantillon de bois placé dans la presse est étudié ci-dessous.

Il est possible de faire une prédiction de la vitesse de propagation de la température dans le bois chauffé par la presse. Si le bois humide ($\phi = 22.5\%$) est placé dans la presse, avec les plateaux contre les faces de normales radiales, pour un temps de 1500s, on obtient la figure 5.15.

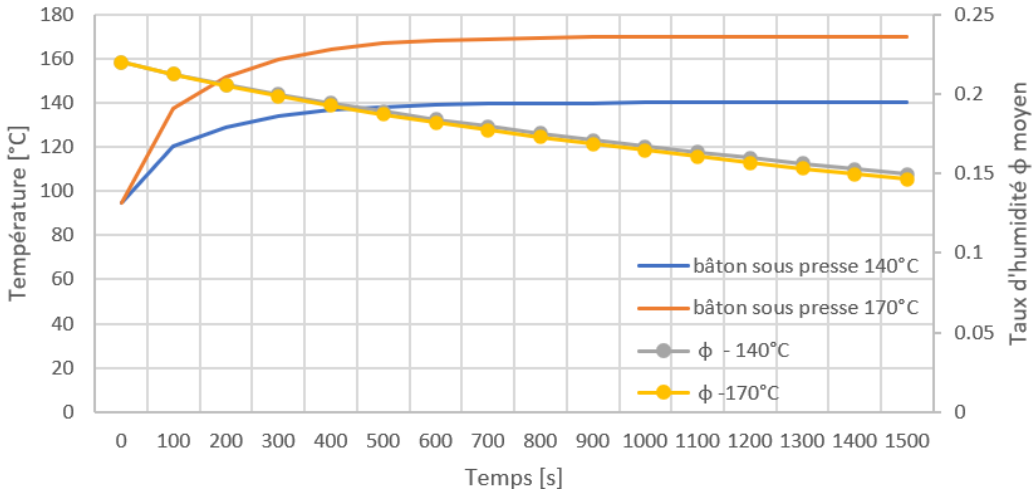


Figure 5.15 – *Diffusion de l'humidité et de la température et de la température de l'échantillon dans la presse.*

On observe sur la figure 5.15 que la température atteint son maximum après 600s. Durant ce temps, l'échantillon a perdu 4% d'humidité, ce qui garantit toujours un échantillon est au-dessus de la T_g.

Dans la section sous-section 3.2.1, les courbes de compression montraient que la température pouvait avoir un rôle sur la courbe de compression, notamment sur le module de Young à sec. Une vitesse de compression de 20 mm/min défini un test d'une durée de 39 secondes. En supposant en plus que le temps d'installation dans la presse est d'une vingtaine de secondes, on observe une différence de 15°C entre l'échantillon en fin de compression à 140°C et 170°C. Pour rappel, le module de Young était 1.6 fois supérieur durant le test à 140°C comparé au test à 170°C. De par l'analyse DMA, un échantillon à sec à 110°C, se verra perdre au grand maximum 10% de ses propriétés en passant à 135°C. Dès lors, il n'est pas possible de poser une conclusion sur l'observation faite dans la section

résultat. Il faudrait investiguer un peu plus sur le sujet.

Finalement, le comportement de la figure 5.15 est à nuancer pour les raisons suivantes,

- Les équations des coefficients de conductivité, chaleur spécifique et de diffusion ont été déterminées sur base de donnée allant à maximum 100°C.
- Comme observé précédemment, le code ne peut prédire correctement le comportement du bois au-delà de 10% d'humidité.

De cette expérience, un autre point intéressant à observer le profil du taux d'humidité couvrant la surface en contact avec la presse (figure 5.16).



Figure 5.16 – *Taux d'humidité sur la face de normale radiale en contact avec la presse après 3000s.*

On observe que le taux d'humidité est plus important au centre et est fort diminué proche des coins, notamment proches des surfaces longitudinales. Lorsqu'une expérience de compression est menée sur un bois humide où une relaxation des contraintes est effectuée pendant 30 minutes, Lucas Bosman a démontré que le bois subit un retour de forme majoritaire au centre de l'échantillon. Le profil de ce retour de forme coïncide assez bien avec le taux d'humidité de l'échantillon à cet endroit. Intuitivement, cela peut s'expliquer par deux choses. Premièrement, les propriétés du bois en ces points. En effet, là où le bois est faible en humidité, il est passé sous la température de transition vitreuse, dès lors, il démontrerait une plus grande rigidité comparé au bois visqueux. Deuxièmement, l'eau étant incompressible, elle va intervenir dans le retour de forme.

5.5 Abaqus

5.5.1 Diffusion de la chaleur et de l'humidité

Les premières expériences menées avec Abaqus sont celles de la diffusion de la chaleur et de l'humidité de manière découplée. Pour la température, l'expérience du "cube" et des

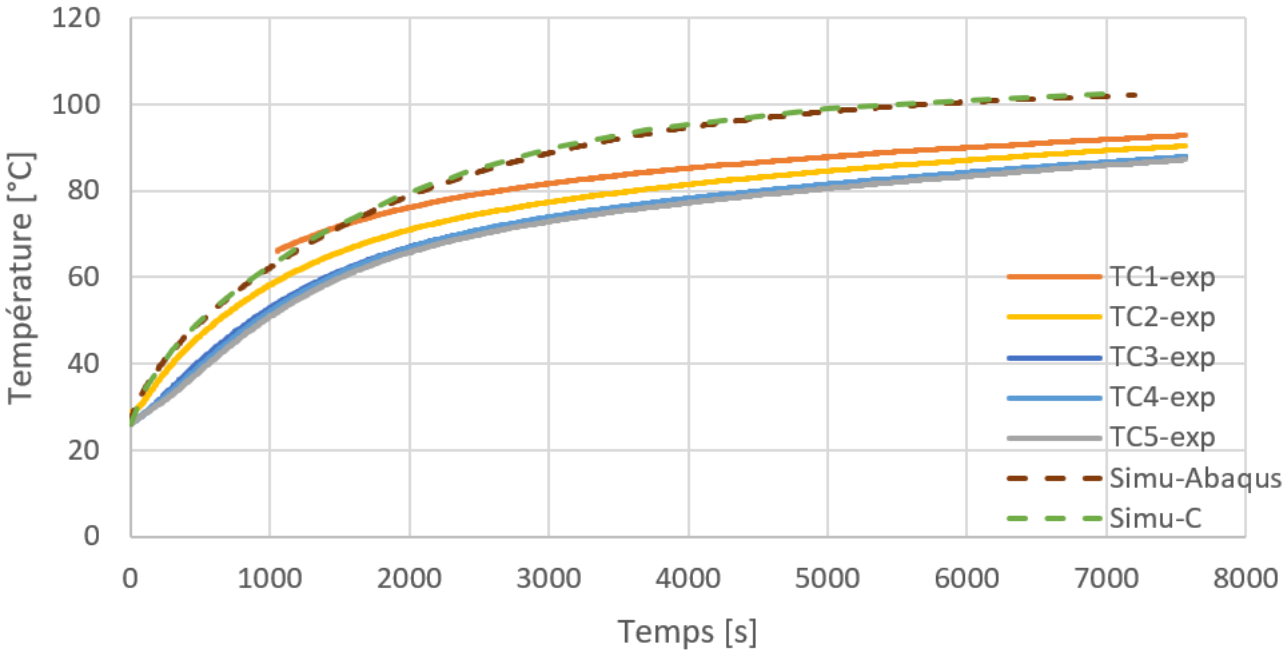


Figure 5.17 – *Évolution de la température moyenne de l'échantillon "cube", comparaison avec Abaqus.*

thermocouples a été reproduite avec Abaqus. Cela donne, pour la température moyenne, la figure 5.17.

Deux choses peuvent être relevées. La première, les valeurs de température moyenne pour le code en C et Abaqus diffèrent très peu. Cette faible différence peut tout de même s'expliquer par la valeur des coefficients de conductivités dans Abaqus. Contrairement à la simulation en C, ils ne prennent pas en compte la diffusion de l'humidité, mais seulement celle de la température. Cependant, étant fixés, pour $\phi = 0.085$, ils sont censés être supérieurs à ceux définis dans le code en C, tout au long de la simulation. Si Abaqus démontre une température inférieure, c'est certainement dû à la diffusion de l'humidité qui, même si elle induit une baisse dans les coefficients de conductivité thermique, fait apparaître le terme $\frac{\delta k}{\delta T}$ dans l'équation de diffusion.

D'un autre côté, c'est assez rassurant de voir que les courbes sont proches. En effet, cela signifie que le code en C fonctionne bien.

Pour l'humidité, c'est l'expérience du séchage d'un échantillon "bâton" dans l'étuve qui a été reproduit. Cela donne la figure 5.18.

Dans ce cas-ci, il y a une nette différence entre les deux courbes. Cette différence se concentre surtout en début d'expérience, ensuite, les pentes sont similaires. Contrairement au coefficient de conductivité thermique, le coefficient de diffusion de l'eau a une variation exponentielle en fonction de la température. Cela implique un effet plus prononcé sur l'évolution de l'humidité. Cependant, comment expliquer que l'évolution prédite est plus faible avec Abaqus ? Comme abordé dans la mise en place du programme en C, il existe un terme non nul, $\frac{\delta D}{\delta \phi}$. Celui-ci apporte alors une contribution positive au transport d'humidité dans le code en C.

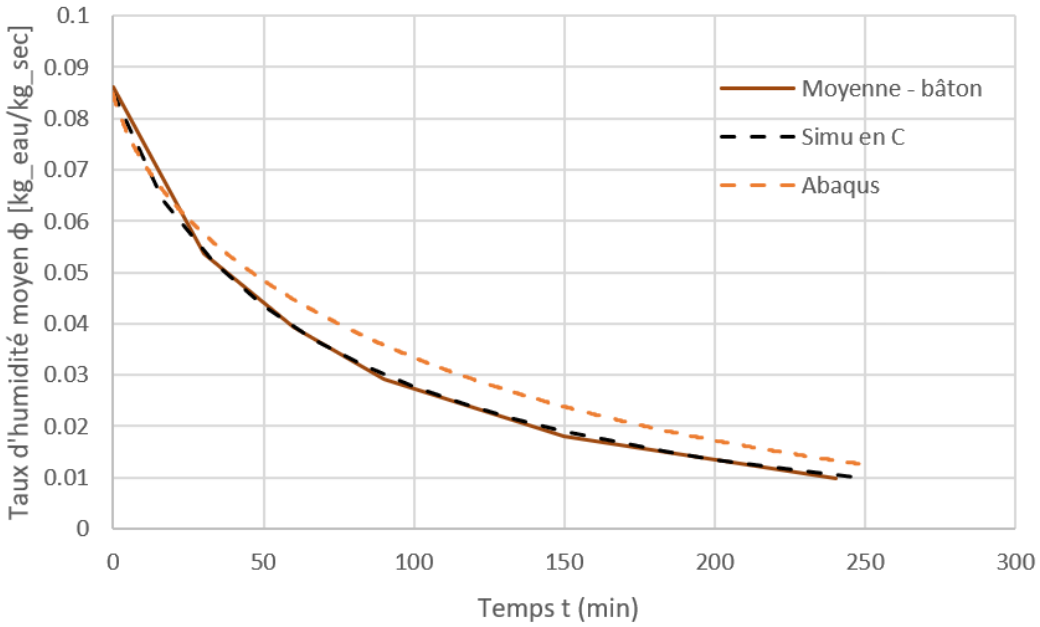


Figure 5.18 – *Évolution du taux d'humidité dans l'étuve en fonction du temps.*

5.5.2 Modèles Hyperfoam

La section suivante étudie l'application du modèle Hyperfoam, sur base de la courbe de compression et des propriétés de l'échantillon à 170 °C et 22.5% (voir sous-section 3.2.1).

Pour les simulations impliquant une déformation et une contrainte, les contraintes présentées, contre toute indication, sont décrites par une comme vraie si la déformation est vraie et comme nominale si la déformation est nominale.

Évaluation

L'**outil d'évaluation** d'Abaqus permet d'obtenir les coefficients de la fonction d'énergie de déformation. Le coefficient de Poisson trouvé expérimentalement pour ce test était de $\nu_{r\theta} = 0.18$. En entrant la courbe de déformation - contrainte nominale, Abaqus donne, pour différents degrés N de la fonction, les approximations représentées sur la figure 5.19. On observe que la précision du modèle augmente avec le degré de la fonction.

La stabilité du modèle est un point important. L'évaluation permet d'étudier si les paramètres donnés conduisent à un matériau stable ou non. Lorsque $N = 1$, le matériau est stable en toute circonstance. Lorsque les degrés montent, les modes dans lesquels le matériau devient instable augmentent. À partir de $N = 4$, une déformation nominale en compression de -0.75 suffit pour avoir une instabilité, ce qui s'observe sur figure 5.19. Pour $N = 5$ et $N = 6$, il n'est jamais stable. Les quelques conseils qui permettent d'augmenter la stabilité du matériau obtenu pour le modèle Hyperfoam, dans les cas testés sont les suivants,

- Ne pas utiliser la courbe brute, éloigner les points divergent.
- Lisser la courbe par une régression linéaire d'ordre p au préalable peut augmenter

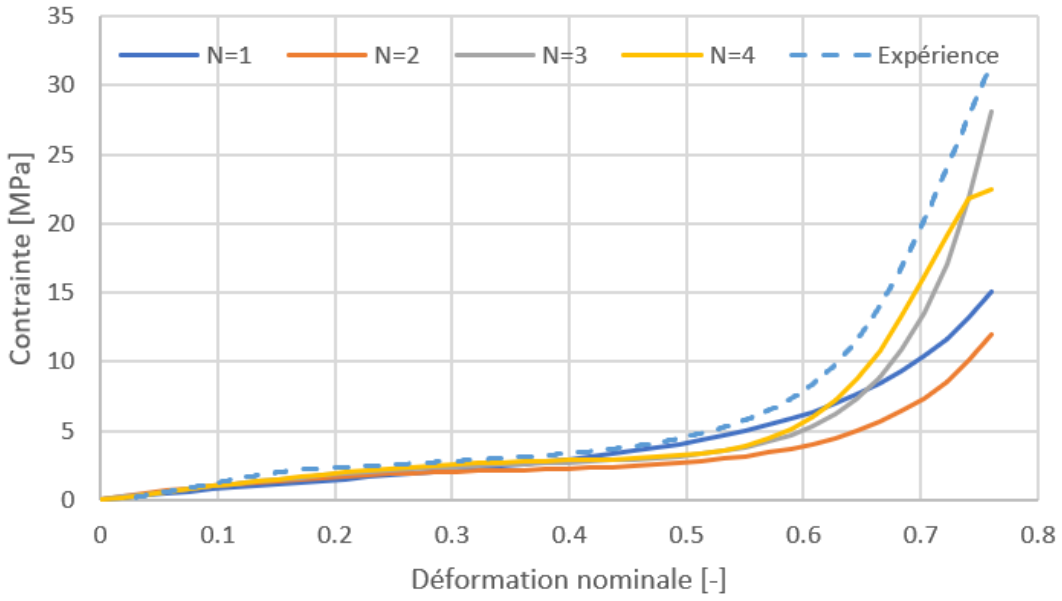


Figure 5.19 – *Courbe de déformation-contrainte évaluée pour plusieurs degrés de U.*

la stabilité.

- Ne pas utiliser les premiers points de l'essai, mais commencer au-delà d'une déformation nominale de $\epsilon_n \approx 0.03$.

- Utiliser un maximum de points entrant dans les conditions citées précédemment.

Concernant les résultats, il s'avère que le modèle stable le plus précis est celui d'ordre $N = 3$. La divergence qui existe entre la courbe expérimentale et cette dernière peut être due aux conditions expérimentales. Pour rappel, les plaques de la presse ont un souci d'alignement pour les forces misent en jeu. De plus, l'essai de compression est un essai de compression plane dont les données ont été utilisées dans Abaqus comme compression uniaxiale. Il faudrait alors réitérer des tests dans la presse avec des échantillons machinés pour de la compression uniaxiale et du cisaillement simple. Un outil de mesure des déformations latérales serait également plus précis que d'utiliser un coefficient de Poisson moyen.

Les modules de cisaillements initiaux prédits par Abaqus sont décrits à la tableau 5.1.

N	1	2	3	4
G_0 $[MPa]$	4.1	5.8	5.1	4.8

Table 5.1 – *Modules de cisaillement prédits par le modèle Hyperfoam pour l'évaluation de l'essai de compression à 170°C et $\phi = 22.5\%$.*

Pour rappel, aucunes données n'existent pour le module de cisaillement du peuplier dans ces conditions. Cependant, des données expérimentales, il avait été estimé un module de Young (figure 3.2.1) ainsi qu'un coefficient de Poisson (sous-section 3.2.2). En supposant l'équation 4.60 correcte pour un bois au-dessus de sa température de transition vitreuse, il est possible d'extraire un module de cisaillement. Celui-ci est alors de 6.11 $[MPa]$. Cette valeur n'est pas si éloignée de celle donnée par Abaqus.

Toujours pour l'échantillon de 170°C et $\phi = 22.5\%$, le rôle joué par le coefficient de Poisson est représenté sur la figure 5.20. La valeur de $\nu_{r\theta} = 0$ définit une compressibilité maximale, $\nu_{r\theta} = 0.33$ [100] est le coefficient de Poisson du peuplier aux conditions ambiantes et $\nu_{r\theta} = 0.18$ est le coefficient de Poisson déterminé expérimentalement.

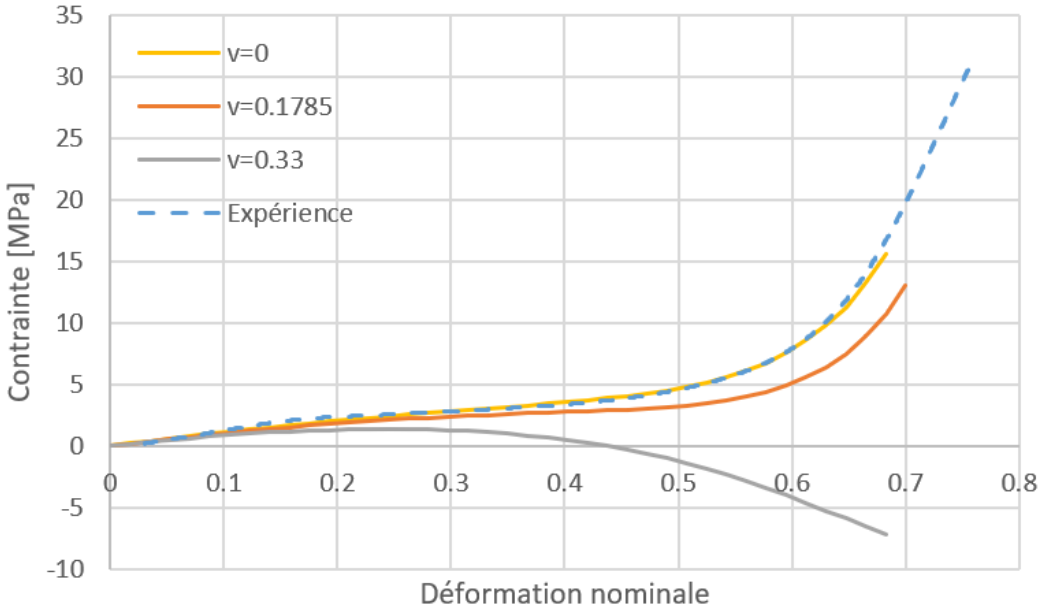


Figure 5.20 – *Courbe de déformation-contrainte évaluée pour différents coefficients de Poisson pour* $N = 3$.

On observe que lorsque le coefficient de Poisson diminue, le modèle s'adapte mieux à la courbe expérimentale. Pour un haut coefficient de Poisson, le modèle ne prédit plus du tout la courbe. Concernant la stabilité du modèle Hyperfoam, elle augmente lorsque le coefficient de Poisson diminue.

Cette tendance s'explique du fait que le modèle a été conçu pour des matériaux ayant un coefficient de Poisson en dessous de 0.5 [75]. Au vu que le coefficient de Poisson, d'après [100], augmente selon la densité à sec de l'espèce de bois considérée, on peut s'attendre à ce que le modèle Hyperfoam ne puissent prédire tout à fait le comportement de bois à plus haute densité.

Sur la tableau 5.2, le module de cisaillement prédit par le modèle Hyperfoam est représenté. Il augmente avec le coefficient de Poisson. En utilisant à nouveau l'équation 4.60, il est possible de faire un lien entre ce module de cisaillement et le coefficient de Poisson correspondant pour déterminer le module de Young E_0. Ce module de Young est assez proche de celui calculé à partir de la pente dans la section figure 3.2.1, où il était de 14.41 MPa. Abaqus prédit que ce module de Young est égal à 12 MPa, peu importe le coefficient de Poisson utilisé. On peut conclure que l'application des lois élastiques orthotropes est valable pour le bois au-dessus de sa température de transition vitreuse, d'où sa définition de matériau hyperélastique.

$\nu_{r\theta}$	0	0.18	0.33
$G_0\ [MPa]$	6	5.1	4.5
$E_0\ [MPa]$	12	12	12

Table 5.2 *– Modules de cisaillement prédits par le modèle Hyperfoam en fonction de différents coefficients de Poisson, pour l'évaluation de l'essai de compression à 170°C et $\phi = 22.5\%$.*

Essais de compression

Le premier essai simulé dans Abaqus représente l'essai de compression d'un cylindre suivant la norme ISO-604-2002[118], sur les essais de compression des polymères. La hauteur du cylindre de compression est fixée à 20 mm. Le diamètre, quant à lui, est fixé suivant la formule donnée dans la norme,

$$\epsilon_n <= 0.4\frac{d^2}{h^2} \tag{5.1}$$

ϵ_n étant la contrainte nominale maximale appliquée, h, la hauteur du cylindre et d son diamètre qui doit alors être inférieur à 27.4 [mm]. Il est fixé à 20 [mm]. Sur la figure 5.21, se trouve la mise en place du cylindre entre les plaques de compression. Les résultats sont comparés aux données de la compression introduites pour l'évaluation des paramètres et à un test de compression simulé d'un échantillon de géométrie "plaque" (figure 5.22). Les données de l'essai de compression de l'échantillon à 170°C et 22.5% d'humidité sont utilisées pour définir le matériau.

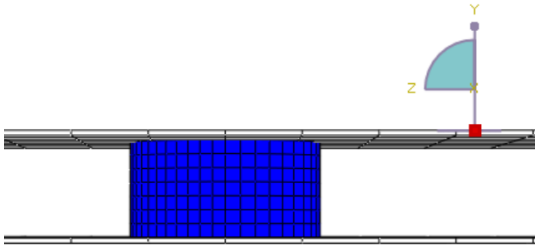


Figure 5.21 *– Cylindre du test de compression entre les plaques de la presse.*

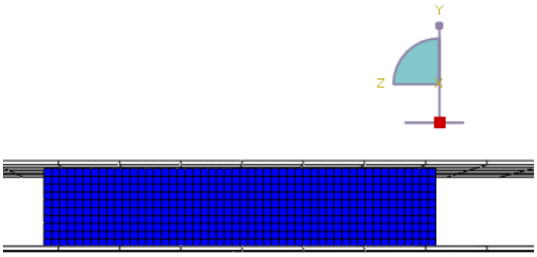


Figure 5.22 *– Échantillon "plaque" entre les plaques de la presse.*

Sur la figure 5.23, on peut observer que les courbes de compression prédites par Abaqus sont proches de l'expérimentale, mais ne se superposent pas totalement. Cette divergence peut disparaître en baissant le coefficient de Poisson, cependant, le comportement physique ne sera plus totalement avéré. Un autre point important, en comparant la courbe de compression simulée pour une géométrie d'un test de compression uniaxiale et la courbe expérimentale, les deux courbes ne sont pas si éloignées et se rejoignent même en fin de compression. C'est un point positif dans le sens où les données recueillies expérimentalement pour une compression plane peuvent être utilisées sur Abaqus comme un essai de compression uniaxial sans que l'erreur ne soit trop importante.
Les images simulées à différents moments de la compression sont disponibles dans les annexes. Comme l'interaction entre la presse et l'échantillon simulé engendre de la friction, il persiste des déformations importantes et non physiques aux coins de l'échantillon "plaque". Dès lors, pour cette géométrie, un maillage adaptatif (ALE adaptive meshing)

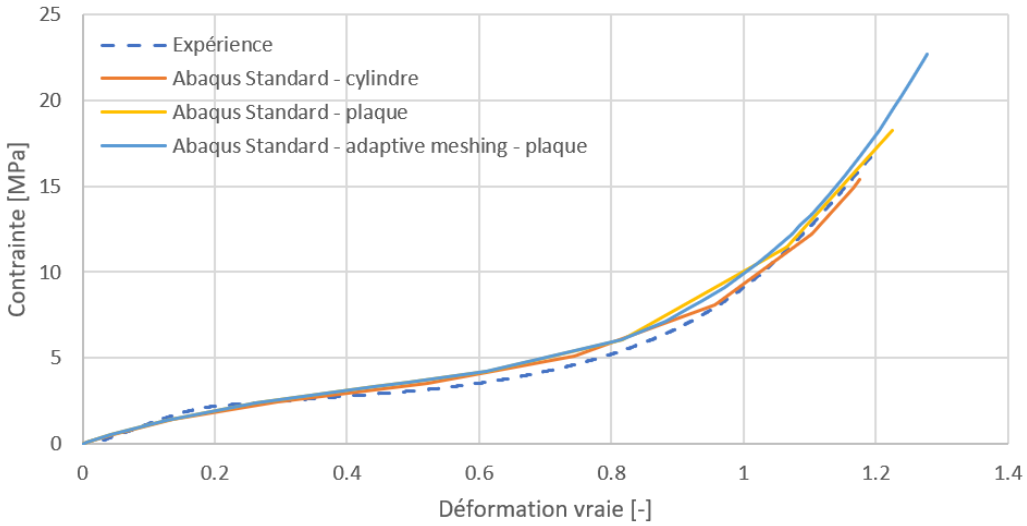


Figure 5.23 – *Essai de compression simulé pour différentes géométries et résultats expérimentaux pour la géométrie "plaque".*

a été mis en place [121]. Il est défini pour chaque incrément de calcul, il réduit alors les distorsions et permet d'avoir une simulation plus stable, mais un peu moins précise. L'utilisation de ce maillage adaptatif est possible avec un matériau Hyperfoam et une analyse température-déplacement seulement pour des éléments de la librairie Standard d'Abaqus.
En résumé, le modèle Hyperfoam est applicable à la courbe de compression d'un échantillon au-dessus de sa température de transition vitreuse. La stabilité et la précision du modèle dépendent du coefficient de Poisson et du degré de la fonction d'énergie de déformation. Un coefficient de Poisson bas favorisera un modèle stable et précis. Le degré de la fonction d'énergie de déformation qui consigne stabilité et précision est le degré 3. Contrairement à un bois sec, l'équation 4.60 est applicable pour le bois au-dessus de sa température de transition vitreuse. Afin d'augmenter la précision du modèle, il serait intéressant de performer un test de compression uniaxiale telle qu'Abaqus le définit [122] et de mesurer les déformations latérales.

5.5.3 Hyperelasticity

Dans cette section, l'utilisation du modèle d'hyperélasticité d'Ogden est étudiée sur les données obtenues de la compression de l'échantillon à 170°C et 22.5% d'humidité présenté dans la section sous-section 3.2.1.

Évaluation

De la même manière qu'avec le modèle Hyperfoam, l'évaluation à différents ordres de la fonction d'énergie de déformation est étudiée. Le coefficient de poisson est spécifié comme étant celui du test, 0.18. Les résultats sont représentés sur la figure 5.24.

L'évaluation des paramètres montre que seul le modèle d'Ogden d'ordre 1 est stable. Le modèle d'ordre 2 est stable, excepté pour de la compression plane à grande déformation, ce qui compromet son utilisation sur la géométrie "plaque" pour de grandes déformations.

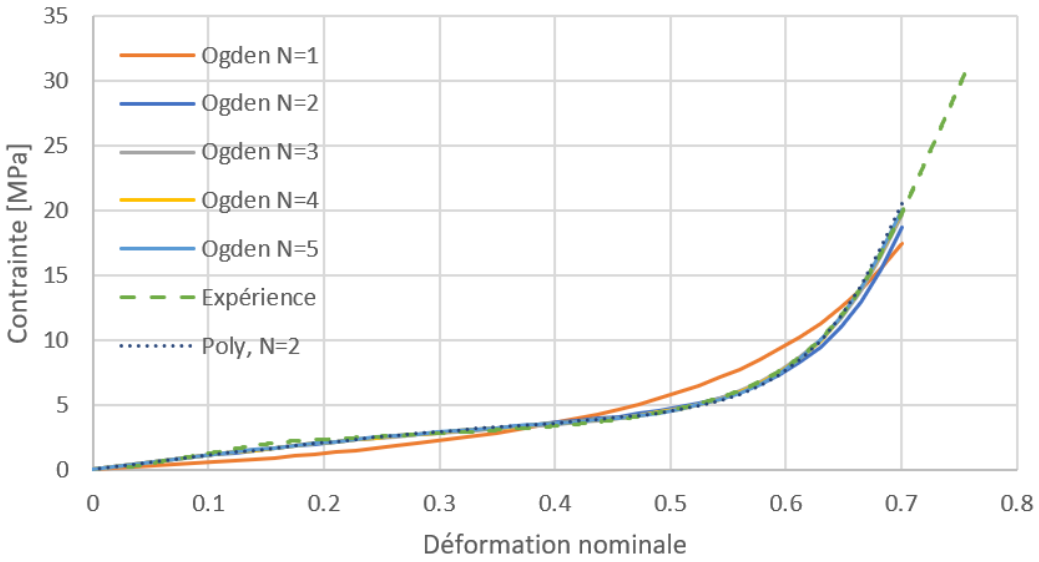


Figure 5.24 – *Modèles d'Ogden et Polynomial.*

À partir de l'ordre 3, le modèle n'est plus stable au-delà d'une compression de déformation nominale inférieure à $\epsilon_n = -0.75$. Plus l'ordre augmente, moins le matériau est stable.

Concernant la précision, le modèle montre une bonne précision à partir de $N = 2$. Dès lors, $N = 2$ semble être le meilleur choix pour le modèle de compression uniaxiale cylindrique créé. Dans ce modèle, le module de masse K_0 et de cisaillement G_0 sont reliés par la relation équation 4.62, directement dérivée de l'équation 4.59.

À l'ordre 2, le module de cisaillement est de $G_0 = 3.85\ MPa$ et définit alors un module de Young de $E_0 = 9.07\ MPa$ et un module de masse de $4.7\ MPa$. Contrairement au modèle Hyperfoam, ni la stabilité, ni le module de cisaillement ne varient avec le coefficient de Poisson. Seul le module de masse K_0 change selon équation 4.62.

Essai de compression

En utilisant Ogden à l'ordre 2 et en lançant une simulation du même cylindre et de la même géométrie "plaque" que ceux utilisés dans la loi Hyperfoam, la figure 5.25 est obtenue.

Le modèle d'Odgen semble ne pas prédire au mieux le comportement de la courbe de compression. Au-delà d'une déformation vraie de $\epsilon = 0.6$, la prédiction diverge. Concernant les distorsions, elles sont supérieures dans ce modèle également (figure E.2). L'utilisation d'un maillage adaptatif ne change pas la prédiction, mais permet de réduire les distorsions mieux, et ce, mieux que pour le modèle Hyperfoam. La divergence existant entre la courbe expérimentale et simulée montre que la phase de densification est retardée.

En conclusion, le modèle d'Ogden n'est pas adapté à la simulation de la compression du bois. En plus d'être moins stable que le modèle Hyperfoam, elle ne prédit pas correctement la courbe de compression.

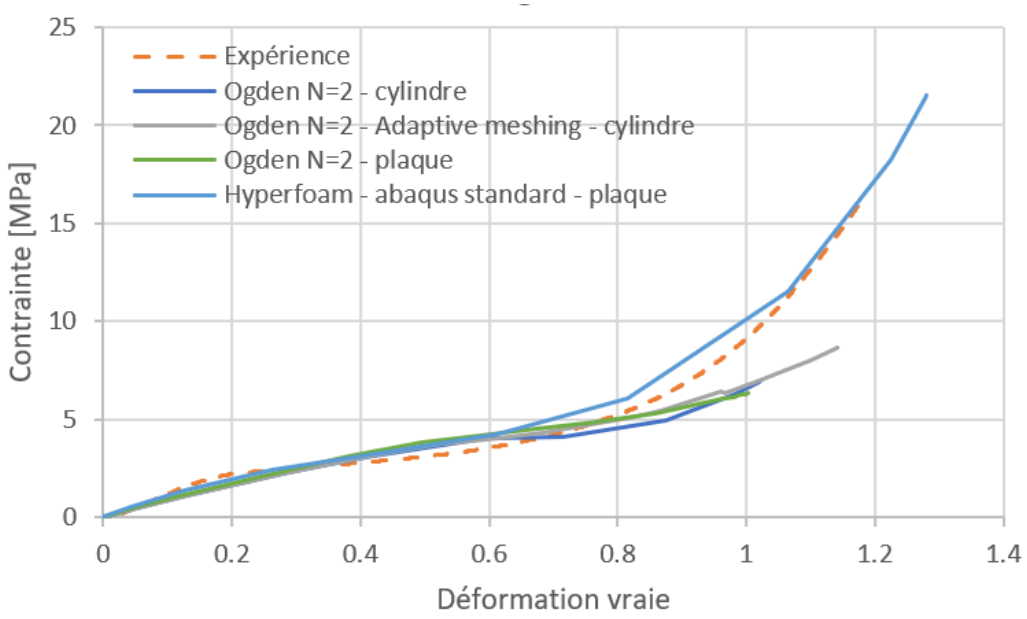


Figure 5.25 – *Modèle d'Ogden pour la compression simulée du cylindre et de la géométrie "plaque" comparé à l'expérience.*

5.5.4 Viscoelasticity

Pour l'étude de la viscoélasticité, le modèle Hyperfoam a été choisi au vu de ses meilleures prédictions comparé au modèle d'Ogden. La paramétrisation du modèle Hyperfoam se fait toujours par le biais des données obtenues lors de la compression d'un échantillon "plaque" à température de 170°C et taux d'humidité de 22.5%. Ce test de compression expérimental, supposé rapide comparé à la relaxation de l'échantillon, a été suivi par une relaxation de 5000 secondes. Les données de cette relaxation sont utilisées pour définir la viscoélasticité.

Évaluation

L'évaluation des paramètres donne pour optimum une série de Prony à $N = 3$. Les modules de relaxations et de Prony sont ceux définis sur la tableau 5.5.

Prony parameter	k_i [-]	τ_i [s]
I	0.191	4.45
II	0.273	76.62
III	0.3915	1445.1

Table 5.3 – *Paramètres de Prony.*

On peut observer que le temps de relaxation le plus court est de 4.45 secondes et représente 22% de la relaxation totale. Il est certain que l'hypothèse donnée à Abaqus selon laquelle les données de compression sont définies en instantané, n'est pas totalement exacte. L'effet de la relaxation des contraintes sur le bois pendant la phase compressive est tout de même important et a été négligé. Afin de mettre en évidence cet effet plus en détail, il serait intéressant de machiner des échantillons de bois de dimensions plus faibles et de compresser le bois à une vitesse supérieure.

Essai de compression

Afin d'observer son effet, le programme est lancé pour une vitesse de compression de 20 mm/min. Dans ce cas-ci, Abaqus Explicit a été utilisé, car Abaqus Standard ne prend pas en compte la viscoélasticité pendant la compression. La viscoélasticité influe sur les résultats de compression de la manière décrite sur la figure 5.26.

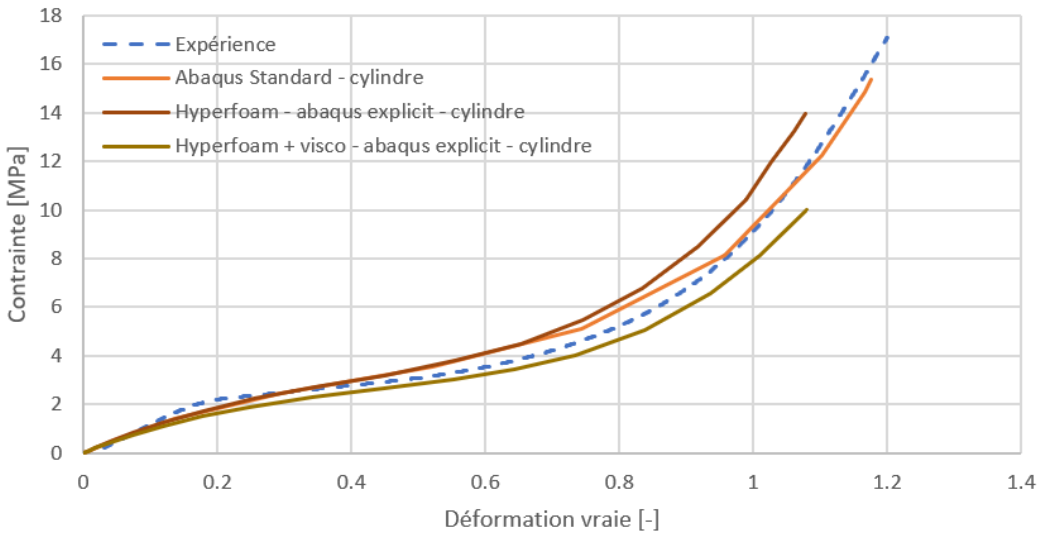


Figure 5.26 – *Prise en compte des paramètres viscoélastiques pour une vitesse de compression de 20 mm/min.*

On observe sur la figure 5.26 que le comportement viscoélastique influe sur la courbe de déformation-contrainte. La contrainte maximale à la fin de la compression est de 3.5 MPa, donc inférieure à celle effectuée sans. Il est possible de conclure que la vitesse de déformation a un impact significatif sur la courbe de compression.

Pour la suite de l'étude sur la viscoélasticité, son impact sur la courbe de compression sera négligé afin d'utiliser à nouveau Abaqus Standard (qui est plus rapide). La suite est de performer un test de relaxation. Si le programme tourne pour une simulation de 5000 secondes, cela donne la courbe de relaxation représentée à la figure 5.27, pour la géométrie "plaque".

Premièrement, la relaxation est supérieure pour l'expérience comparée à celle prédite par Abaqus. Deuxièmement, il démontre à nouveau une dépendance avec la géométrie. la relaxation supérieure pour un échantillon "plaque" comparé à un échantillon cylindrique montre qu'il est plus simple pour un échantillon "plaque" de se relaxer comparé à un échantillon cylindrique.
La première observation peut être analysée en prenant en compte que le matériau créé sur Abaqus est isotrope et le module de cisaillement l'est également. La seconde, Lors de l'expérience, l'effet de la relaxation des contraintes en fonction de la géométrie est aussi déterminée par l'évacuation de l'humidité hors de l'échantillon. Ici, il est à noter que la viscoélasticité définie sur Abaqus prend en compte, et la diffusion de l'humidité (qui induit une relaxation des contraintes), et la relaxation viscoélastique pure. L'impact de la géométrie est alors moins prononcé.

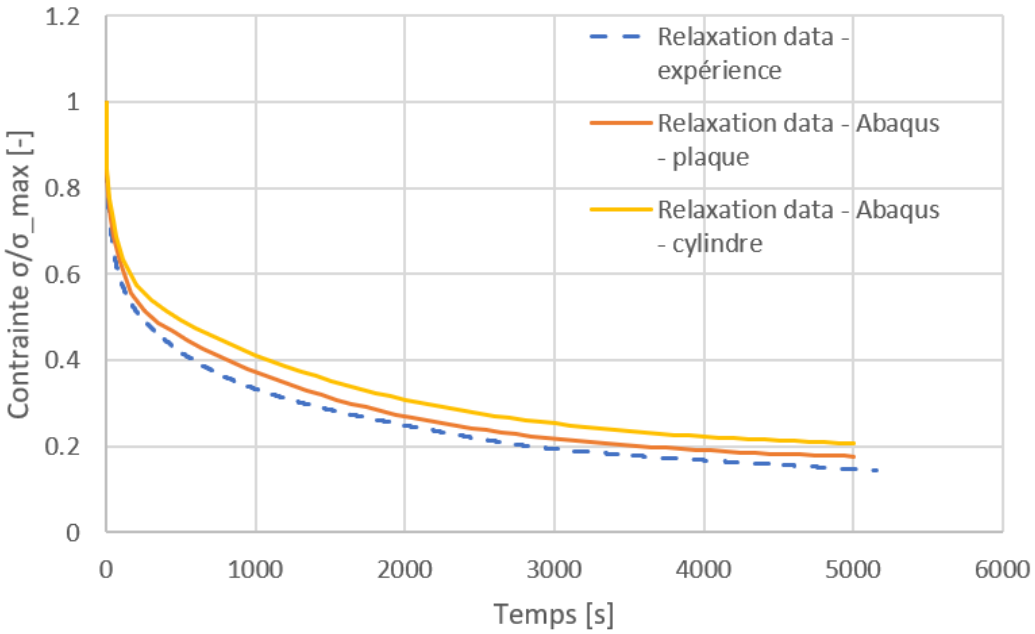


Figure 5.27 – *Relaxation des contraintes en fonction du temps pour différents échantillons.*

En résumé, le caractère viscoélastique du bois peut être prédit par Abaqus Explicit. La relaxation est assez rapide et induit alors des erreurs sur la courbe simulée. La vitesse de compression de l'échantillon est alors un point important. La géométrie a un impact sur la courbe de relaxation obtenue. Afin de prédire au mieux le caractère viscoélastique, un essai de relaxation des contraintes sur un échantillon relativement fin, où une vitesse de compression rapide par rapport aux temps de relaxation donnés ici, devra être effectué. Il serait également intéressant d'évaluer la relaxation due à l'évacuation de l'humidité par rapport à celle due à de la viscoélasticité pure.

5.5.5 Échantillon à sec

Maintenant qu'une méthode a été établie, les courbes de compression et de relaxation de l'échantillon à 170°C et 0% sont étudiées ci-dessous afin de voir si, à sec, le modèle est capable de prédire le comportement du bois. Les données de l'essai expérimental sont introduites grâce au modèle Hyperfoam. Le degré de la fonction d'énergie de déformation est fixé à $N = 3$. Le coefficient de Poisson est également spécifié comme étant celui calculé lors du test $\nu_{r\theta} = 0.23$. La courbe de relaxation est ensuite introduite dans la section viscoélastique.

L'évaluation des paramètres Hyperfoam donne les informations de la tableau 5.4. Le module de cisaillement est décrit de pair avec le module de Young, calculé par la relation équation 4.60. Le module de Young E_{0exp} est celui calculé dans la section résultats.

Paramètre	G_0 $[MPa]$	E_0 $[MPa]$	E_{0exp} $[MPa]$
Valeur	9.3	23	43

Table 5.4 – *Paramètres G_0 évalués par Abaqus pour l'essai d'un échantillon à 170°C et 0% d'humidité.*

On peut remarquer que le module en cisaillement est à peu près le double de celui de

l'échantillon à 22.5% d'humidité. De plus, le module de Young prédit par la simulation est bien inférieur à celui déterminé graphiquement. Ceci implique à nouveau que l'équation 4.60 n'est pas applicable pour un échantillon à sec. Pour rappel, l'échantillon à 170°C et 22.5% d'humidité obéissait relativement bien à cette loi.

En regardant à la stabilité donnée par l'évaluation des paramètres, le modèle Hyperfoam donné par Abaqus n'est plus stable au-delà de -0.84% de déformation nominale en compression uniaxiale. Aucun des autres modes de déformations (tension, compression plane, etc) n'est stable. Une solution pour arriver à un modèle stable en utilisant le modèle Hyperfoam est d'utiliser une fonction d'énergie de déformation de degré inférieur. Celle de degré 1 est stable pour toutes contraintes, mais une perte en précision conséquente est alors présente. En conclusion, étant donné que cet échantillon est en dessous de sa température de transition vitreuse, le modèle Hyperfoam a plus de mal à prédire son comportement. Afin de confirmer cette observation, il faudrait analyser la compression d'un échantillon fait pour de la compression uniaxiale tout en mesurant les déformations latérales.

Pour la viscoélasticité, les coefficients de la série de Prony évalués par Abaqus sont les suivants,

Prony parameter	k_i [-]	τ_i [s]
I	0.15	2.9
II	0.16	91.7
III	0.0083	1515

Table 5.5 *– Paramètres de Prony pour l'essai d'un échantillon à 170°C et 0% d'humidité.*

En comparant ces paramètres à ceux d'un échantillon à 22.5% d'humidité et 170°C, on remarque que la relaxation est assez rapide. En effet, la majorité de la relaxation a lieu dans les 100 premières secondes. S'ensuit alors une stagnation importante des propriétés. Le temps de relaxation important pour un échantillon humide peut être dû à l'évacuation de l'humidité dans le bois, continuant de s'échapper même après un temps long.

5.5.6 Crushable foam

Le dernier modèle étudié dans Abaqus est le modèle Crushable foam. La section suivante se concentrera sur l'application de ce modèle sur la courbe de déformation-contrainte d'un échantillon de bois "plaque" à 170°C et 0% d'humidité. Pour la partie élastique, le module de Young et le coefficient de Poisson trouvés dans la partie résultat ($\nu_{r\theta} = 0.23$) sont utilisés. Le modèle de Crushable foam définit le comportement de durcissement du bois au-delà de la plasticité. En supposant que la plasticité soit atteinte à partir du σ_{b0} lié à cette expérience, il est possible de calculer la courbe déformation plastique - σ_b où σ_b, dans ce modèle, défini la nouvelle limite d'élasticité du matériau. Le coefficient de Poisson plastique est imposé à la même valeur que l'élastique. L'impact du coefficient de Poisson est étudié également, en testant une valeur de $\nu_{r\theta} = 0.33$, soit, la valeur du coefficient de Poisson à l'ambiante pour le peuplier.

Sur la figure 5.28, on observe que la courbe expérimentale est située à plus faible contrainte par rapport aux résultats de la simulation. Globalement, la tendance des courbes de

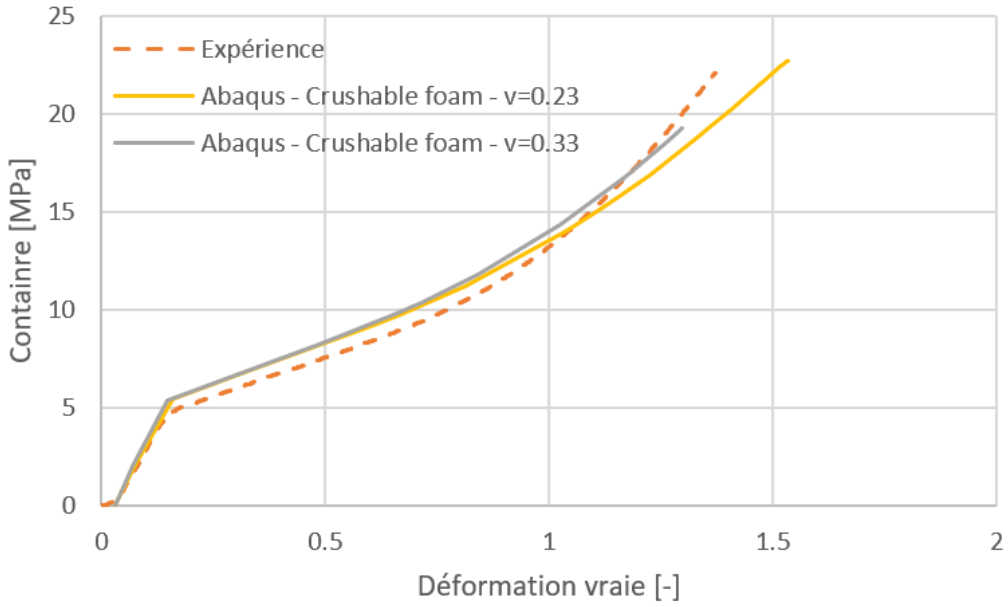


Figure 5.28 – *Résultat du modèle Crushable foam pour différents coefficients de Poisson, comparé à la courbe expérimentale d'un échantillon "plaque" à 170°C et 0% d'humidité.*

simulation suit celle de l'expérience. Au-delà d'une déformation vraie de 1, ces tendances semblent diverger, la courbure de l'expérimentale étant plus importante. Pour ce qui est du coefficient de Poisson, lorsqu'il augmente, la courbure augmente également. Ceci démarque une séparation entre les deux courbes simulées.

Le modèle prédit une courbe dont le σ_{b0} est supérieur au σ_{b0} introduit dans Abaqus. De plus, le module de Young introduit en élasticité linéaire n'est pas le même que celui observé pour dans les résultats de la simulation. Lorsque le coefficient de Poisson augmente, le matériau semble se raidir. Ce comportement doit être dû aux lois implémentées dans Abaqus. Lorsque le coefficient de Poisson augmente, le bois se voit alors moins compressible, ce qui engendre une déformation plastique plus importante et la phase de densification apparaît plus tôt. [123] a montré que, pour du caoutchouc, le coefficient de Poisson varie au cours d'un essai. Ceci peut également expliquer pourquoi la courbe expérimentale ne suit pas tout à fait a courbe simulée prenant en compte un coefficient de Poisson moyen.

Il faut se rappeler que le ratio σ_{b0}/p_{b0} avait été fixé à 1. L'effet de ce rapport est décrit sur la figure 5.29.

Décroître ce ratio a le même effet que d'augmenter le coefficient de Poisson.

Finalement, on peut observer que le modèle Crushable foam s'applique bien à la compression du bois. Malheureusement, il ne peut pas prendre en compte le caractère viscoélastique du bois. Ce modèle est applicable pour toute courbe de compression, seulement, il demande des données expérimentales de durcissement à chaque nouveau test, sans pouvoir créer la courbe à l'avance de par une loi spécifique.

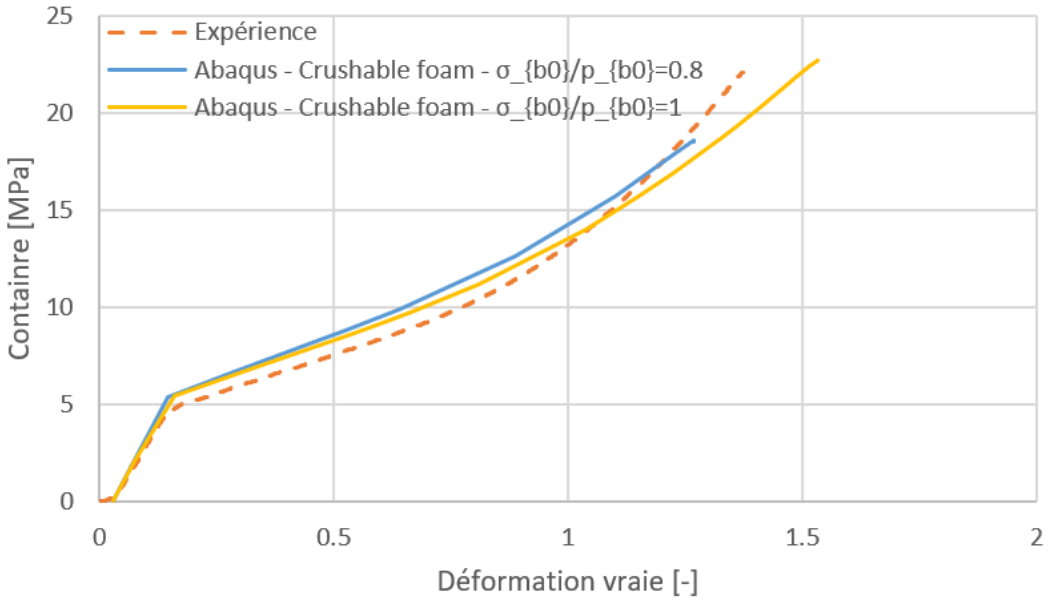


Figure 5.29 – *Résultat du modèle Crushable foam pour différents ratio de limite d'élasticité en compression uniaxiale et hydrostatique, comparé à la courbe expérimentale d'un échantillon "plaque" à 170°C et 0% d'humidité.*

5.6 Résumé de la discussion

Cette section reprend une synthèse des éléments importants relevés au cours du chapitre sur la simulation.

Tout d'abord, les résultats du code résolvant les équations de diffusion de l'humidité et de la chaleur montrent que la chaleur diffuse 10 fois plus vite que l'humidité. La diffusion de l'humidité dans la direction longitudinale se trouve être 20 fois supérieure à celle dans la direction radiale. Ce qui est légèrement supérieur à ce qui est trouvé dans la littérature [66], tout en restant cohérent. Les résultats du code sont ensuite comparés aux résultats donnés par Abaqus pour des analyses découplées de chaleur et d'humidité. Abaqus ne donne une différence que minime par rapport au code en C au niveau diffusion de la chaleur, impliquant que l'effet du transfert de l'humidité est négligeable le temps que la chaleur diffuse. Cependant, pour le transfert de l'humidité, il existe une influence importante de la température. Ces résultats permettent alors de définir quelle est la diffusion majoritaire en fonction du temps du procédé (temps court, chaleur, temps long, humidité). Le code ne prend cependant pas en compte les effets non-Fickien du bois au-delà de 10% d'humidité. Pour la suite, il est possible de modéliser des matériaux poreux avec Abaqus, ce qui prend en compte ce comportement non-Fickien ainsi que le retrait dû à l'évacuation de l'humidité.

Le modèle Hyperfoam a ensuite été étudié pour un bois au-dessus et en dessous de la température de transition vitreuse. Le premier donne des résultats concluants, montrant que le modèle Hyperfoam est applicable pour différentes géométries, tant avec Abaqus Standard qu'avec Abaqus Explicit. Afin d'améliorer l'utilisation du modèle Hyperfoam, il serait intéressant de mener des expériences de compression uniaxiale sur une géométrie précise, de dimension pas trop importante, tout en mesurant les déformations latérales. Pour le moment, il n'existe pas au laboratoire d'extensiomètre ou de jauge de déformations

capables de capter l'ampleur des déformations imposées au bois durant la compression. Avec ces conditions expérimentales, les paramètres du modèle pourraient alors être étudiés correctement en fonction de la température, du taux d'humidité et de la densité initiale du bois. Il faut aussi noter qu'en dessous de la température de transition vitreuse, le modèle Hyperfoam n'est pas stable et démontre alors que le bois n'est pas hyperélastique.

L'utilisation du modèle d'Ogden sur le bois montre un problème dans les déformations larges, induites par le caractère peu compressible du matériau défini avec ce modèle. Cependant, pour des bois plus denses, présentant un coefficient de Poisson supérieur, le modèle d'Ogden pourrait se montrer utile. De plus, Abaqus propose un modèle d'anysotropie hyperélastique, permettant à l'utilisateur de définir son matériau par le biais d'une subroutine [124]. Ce modèle nécessite cependant une bonne connaissance du bois en compression.

Le caractère viscoélastique du bois en compression montre que le bois possède différents temps de relaxation. Le temps de relaxation le plus faible est de l'ordre de 4.5 secondes pour un bois à 170°C et 22.5% d'humidité. Une grande partie de la relaxation se fait à long terme. Pour un bois à 170°C et 0% d'humidité, la majorité de la relaxation se fait dans les cent premières secondes après la compression. Pour la suite, le modèle Hyperfoam demande à ce que la courbe de compression soit introduite en instantané ou en long terme. L'instantané défini une compression rapide, avec une vitesse supérieure à 800 mm/min. Le long-terme n'est pas désiré pour un échantillon humide étant donné qu'on veut qu'il garde son caractère hyperélastique. La relaxation des contraintes et la diffusion de l'humidité sont des éléments essentiels afin de limiter le retour de forme qui affecte la densité finale et dès lors les propriétés mécaniques obtenues.

Le modèle Crushable foam se montre applicable afin de recréer la courbe de contrainte-déformation. Cependant, la mise en place de ce modèle demande des données expérimentales de durcissement. Il n'est dès lors pas possible de prédire quelle sera l'évolution d'un test en compression sans connaître les résultats à l'avance. De plus, il n'est pas conciliable avec les modèles viscoélastiques.

Finalement, deux modèles capables de décrire le comportement du bois dans des étapes différentes du procédé THM ont été créés. Un premier, réalisé en C, permet de décrire l'évolution de la température et du taux d'humidité en fonction du temps. Le second décrit l'action d'une contrainte sur le bois en utilisant le modèle Hyperfoam d'Abaqus, couplé à un modèle viscoélastique. Ce modèle prend également en compte la diffusion de la température durant la compression et la relaxation.

Conclusion

L'objectif de ce travail était de créer une simulation numérique capable de décrire le comportement du bois dans le procédé THM. Il s'inscrit plus globalement dans une politique d'exploitation plus durable des forêts, valorisant des espèces à faible densité en améliorant leurs propriétés mécaniques.

En vue de l'élaboration de cette simulation, deux étapes majeures ont été accomplies :

- La mise en place d'une série d'expériences capables de mettre en avant les propriétés du bois. Les données recueillies ont permis par la suite de valider ou d'alimenter le modèle informatique. Grâce aux expériences en humidité la cinétique de perte et de prise en humidité ont pu être déterminées, mais aussi la densité à sec et les coefficients de retraits. L'expérience en température a ensuite aidé à mettre en avant la cinétique de l'évolution de la température à l'intérieur du bois. Finalement, les expériences impliquant une contrainte ont permis d'obtenir des informations sur le comportement du bois sous compression, sur la relaxation des contraintes et sur les propriétés à sec par une analyse DMA.

- La mise en place d'une série de simulations capables de reproduire l'ensemble des expériences effectuées. Un premier code en C a été réalisé sur base d'un code existant, et permet de calculer l'évolution couplée de la température et du taux d'humidité dans le bois sous condition ambiante. Abaqus a ensuite été choisi pour étudier ces deux évolutions, mais de manière découplé. De là, il est possible de confirmer les prédictions du code en température. Une recherche a également été effectuée afin de déterminer le modèle le plus adéquat à la reproduction du comportement sous contrainte grâce à Abaqus. Il est finalement conclu que le modèle Hyperfoam, couplé à de la viscoélasticité, décrit suffisamment bien le comportement du bois au dessus de sa température de transition vitreuse.

En conclusion, la mise en place d'une simulation prenant à la fois en compte la température, le taux d'humidité et l'effet d'une contrainte n'est pas quelque chose de direct. Les résultats obtenus sont prometteurs cependant les hypothèses posées doivent être correctement réfléchies pour éviter de mener à des erreurs dans les résultats. D'autre part, il serait nécessaire de réaliser de nouveaux tests, afin de valider complètement les modèles.

Pistes d'amélioration

Il reste tout de même de nombreux points qui ont été négligés dans ce travail, beaucoup d'aspects méritent encore d'être explorés. Afin d'améliorer la compréhension du procédé, il serait judicieux d'améliorer les outils de la simulation de la manière suivante :

- Créer un code capable de prendre en compte la diffusion de l'humidité, de la chaleur et le comportement sous compression (voir DealII [125]).

- Caractériser le comportement viscoélastique du bois en fonction de l'humidité et de la température, au dessus de la T_g. Cela permettrait de prédire le comportement du bois en compression.

- Étudier et simuler les endommagements dûs à de grandes déformations (effet de Mullins), mais aussi les endommagements dus à la dégradation du matériau avec la chaleur.

- Étudier plus en profondeur l'impact de la température et de l'humidité sur la courbe de compression du bois en instantané. Cette étude permettrait de caractériser complètement le bois au dessus de sa T_g.

- Étudier l'impact de la densité initiale ainsi que la densité finale sur le coefficient de diffusion de l'eau liée. Cela permettrait d'évaluer la relaxation des contraintes dues à l'évacuation de l'humidité et déterminer le temps du procédé de compression.

- Créer une fonction d'énergie de déformation anisotrope, ce qui permettrait de définir de manière hyperélastique l'anisotropie du bois.

- Dans le but de passer à un procédé continu, la suite serait de créer un modèle de laminage avec Abaqus sur le matériau [121].

Bibliographie

[1] *Bois : Définition simple et facile du dictionnaire*. fr. Mars 2021. URL : https://www.linternaute.fr/dictionnaire/fr/definition/bois/ (visité le 09/07/2023).

[2] *Enquête sur la construction de bois, partie 1 : Histoire et techniques | Les Jardins de Noé*. fr-FR. URL : http://www.jardinsdenoe.org/enquete-sur-la-construction-de-bois-partie-1-histoire-et-techniques/ (visité le 09/07/2023).

[3] Manzolini Giampaolo. *Introduction to Solar and Biomass Power generation*. Cours. Politecnico di Milano, 2022.

[4] United Nations. *Les énergies renouvelables : qu'est-ce que c'est ? | Nations Unies*. fr. Publisher : United Nations. URL : https://www.un.org/fr/climatechange/what-is-renewable-energy (visité le 11/06/2023).

[5] *La forêt belge*. fr-FR. URL : https://www.houtinfobois.be/la-foret-et-le-bois/les-forets-dans-le-monde-et-en-belgique/la-foret/ (visité le 02/07/2023).

[6] *Les forêts de Belgique — Société Royale Forestière de Belgique*. fr-FR. URL : https://www.srfb.be/informations-sur-les-forets/les-forets-de-belgique/ (visité le 02/07/2023).

[7] SPW. *Forêts de chez nous*. http ://environnement.wallonie.be/publi/education/foret_de_chez_n 2011.

[8] SPW. *Ressources forestières - État de l'environnement wallon*. fr. URL : http://etat.environnement.wallonie.be/cms/render/live/fr_BE/sites/eew/contents/indicatorsheets/RESS%204.html (visité le 02/07/2023).

[9] *Angiosperme*. fr. Page Version ID : 204698841. Mai 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Angiosperme&oldid=204698841 (visité le 02/07/2023).

[10] *Gymnosperme*. fr. Page Version ID : 201648048. Fév. 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Gymnosperme&oldid=201648048 (visité le 09/07/2023).

[11] *Déclic - le tournant*. fr. URL : https://auvio.rtbf.be/widget/19987?context%5BprogramId%5D=20754 (visité le 17/08/2023).

[12] *PanoraBois | Office Economique Wallon du Bois*. fr. URL : https://www.oewb.be/la-filiere/panorabois (visité le 09/07/2023).

[13] Clara Joly. *Certification FSC® : qu'est-ce que c'est ?* fr-FR. Oct. 2020. URL : https://royal.cheerz.com/actualites/notre-certification-fsc/ (visité le 02/07/2023).

[14] *Les Principes et Critères FSC (P&C)*. fr. URL : https://be.fsc.org/be-fr/certification-forestiere/les-principes-et-criteres-fsc-pc (visité le 02/07/2023).

[15] *PEFC Belgique*. URL : https://www.pefc.be/fr/ (visité le 02/07/2023).

[16] ADMIN. *La transformation du bois*. fr-FR. Juin 2019. URL : https://www.livres-forums-construction.fr/wp/2019/06/05/la-transformation-du-bois/ (visité le 09/07/2023).

[17] *Scierie*. fr. Page Version ID : 202553037. Mars 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Scierie&oldid=202553037 (visité le 09/07/2023).

[18] *BOIS, Composition chimique - Encyclopædia Universalis*. URL : https://www.universalis.fr/encyclopedie/bois/2-composition-chimique/ (visité le 09/07/2023).

[19] *Bois*. fr. Page Version ID : 205055924. Juin 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Bois&oldid=205055924 (visité le 09/07/2023).

[20] *Écorce*. fr. Page Version ID : 203307284. Avr. 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89corce&oldid=203307284 (visité le 09/07/2023).

[21] *Cambium*. fr. Page Version ID : 197174716. Sept. 2022. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Cambium&oldid=197174716 (visité le 09/07/2023).

[22] *Aubier*. fr. Page Version ID : 204784501. Mai 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Aubier&oldid=204784501 (visité le 09/07/2023).

[23] *Duramen*. fr. Page Version ID : 202157886. Mars 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Duramen&oldid=202157886 (visité le 09/07/2023).

[24] *Cerne (botanique)*. fr. Page Version ID : 205450088. Juin 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Cerne_(botanique)&oldid=205450088 (visité le 09/07/2023).

[25] Serge BILLON. *Anatomie des éléments du système vasculaire des plantes*. fr-fr. URL : https://www.plantes-et-eau.fr/documentation/etats-et-transferts-hydriques-dans-et-a-travers-la-plante/19-anatomie-des-voies-de-transfert-de-l-eau-dans-la-plante/113-anatomie-des-elements-du-systeme-vasculaire-des-plantes (visité le 09/07/2023).

[26] Jérémy REBIERE. "Nouvelle méthodologie pour la caractérisation de distributions de masses molaires d'échantillons cellulosiques complexes". Thèse de doct. Mars 2017.

[27] *Hémicellulose*. fr. Page Version ID : 205613356. Juin 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=H%C3%A9micellulose&oldid=205613356 (visité le 09/07/2023).

[28] *Lignin - an overview | ScienceDirect Topics*. URL : https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/lignin (visité le 09/07/2023).

[29] *II.2. Anatomie des voies de transfert de l'eau dans la plante - Anatomie des éléments du système vasculaire des plantes*. URL : https://www.plantes-et-eau.fr/documentation/etats-et-transferts-hydriques-dans-et-a-travers-la-plante/19-anatomie-des-voies-de-transfert-de-l-eau-dans-la-plante/113-anatomie-des-elements-du-systeme-vasculaire-des-plantes (visité le 09/07/2023).

[30] Kévin Candelier. “Caractérisation des transformations physico-chimiques intervenant lors de la thermodégradation du bois. Influence de l’intensité de traitement, de l’essence et de l’atmosphère”. Thèse de doct. Déc. 2013. doi : 10.13140/RG.2.1.1083.0889.

[31] *(16) (PDF) Anthracologie et dendrologie*. url : https://www.researchgate.net/publication/274309880_Anthracologie_et_dendrologie/figures?lo=1 (visité le 09/07/2023).

[32] Yu Luan et al. “Wood mechanical densification : a review on processing”. In : *Materials and Manufacturing Processes* (déc. 2021), p. 1-13. doi : 10.1080/10426914.2021.2016816.

[33] Diego de Crombrugghe de Looringhe. “Densification viscoplastique du bois pour applications à performances structurales”. Thèse de doct. 2022.

[34] *Densité du bois*. fr. Page Version ID : 187782070. Nov. 2021. url : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Densit%C3%A9_du_bois&oldid=187782070 (visité le 09/07/2023).

[35] *Porosity*. en. Page Version ID : 1141983405. Fév. 2023. url : https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Porosity&oldid=1141983405 (visité le 09/07/2023).

[36] Elsa M. L. Ehrnrooth. “Change in Pulp Fibre Density With Acid-Chlorite Delignification”. In : *Journal of Wood Chemistry and Technology* 4.1 (mars 1984). Publisher : Taylor & Francis _eprint : https ://doi.org/10.1080/02773818408062285, p. 91-109. issn : 0277-3813. doi : 10.1080/02773818408062285. url : https://doi.org/10.1080/02773818408062285 (visité le 09/07/2023).

[37] Gernot Standfest et al. “Microstructure of viscoelastic thermal compressed (VTC) wood using computed microtomography”. In : *Wood Science and Technology* 47 (juill. 2013), p. 121-139. doi : 10.1007/s00226-012-0496-5.

[38] Samuel V. Glass et Samuel L. Zelinka. “Moisture relations and physical properties of wood”. en. In : *Wood handbook : wood as an engineering material : chapter 4. Centennial ed. General technical report FPL ; GTR-190. Madison, WI : U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010 : p. 4.1-4.19.* 190 (2010), p. 4.1-4. url : https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/37428 (visité le 09/07/2023).

[39] *Température de transition vitreuse*. fr. Page Version ID : 196392759. Août 2022. url : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Temp%C3%A9rature_de_transition_vitreuse&oldid=196392759 (visité le 09/07/2023).

[40] Benjamin Herzog et al. “Glass-transition temperature based on dynamic mechanical thermal analysis techniques as an indicator of the adhesive performance of vinyl ester resin”. In : *Journal of Applied Polymer Science* 97 (sept. 2005), p. 2221-2229. doi : 10.1002/app.21868.

[41] *Glass Transition Temperature (Tg) of Polymers*. en-US. url : https://www.protolabs.com/resources/design-tips/glass-transition-temperature-of-polymers/ (visité le 09/07/2023).

[42] Josef KUBÁT et Carel PATTYRANIE. “Transition in Cellulose in the Vicinity of 30° C”. en. In : *Nature* 215.5099 (juill. 1967). Number : 5099 Publisher : Nature Publishing Group, p. 390-391. ISSN : 1476-4687. DOI : 10.1038/215390a0. URL : https://www.nature.com/articles/215390a0 (visité le 09/07/2023).

[43] Lulu KONG et al. “Effects of steaming treatment on crystallinity and glass transition temperature of Eucalyptuses grandis×E. urophylla”. en. In : *Results in Physics* 7 (jan. 2017), p. 914-919. ISSN : 2211-3797. DOI : 10.1016/j.rinp.2017.02.017. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221137971630523X (visité le 09/07/2023).

[44] D. SANDBERG et P. NAVI. “Introduction to thermo-hydro-mechanical (THM) wood processing”. In : 2007. URL : https://www.semanticscholar.org/paper/Introduction-to-thermo-hydro-mechanical-(THM)-wood-Sandberg-Navi/f2b7708a922655cbc6eeb06fa63b477a1fe3ff84 (visité le 09/07/2023).

[45] *Conductivité thermique*. fr. Page Version ID : 205838136. Juill. 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Conductivit%C3%A9_thermique&oldid=205838136 (visité le 09/07/2023).

[46] *Ansys Granta EduPack | Software for Materials Education*. en-US. URL : https://www.ansys.com/products/materials/granta-edupack (visité le 09/07/2023).

[47] *Thermal properties of wood*. en-US. URL : https://puuinfo.fi/puutieto/wood-as-a-material/thermal-properties-of-wood/?lang=en (visité le 09/07/2023).

[48] John HUNT et Hongmei GU. “Two-dimensional finite element heat transfer model of softwood. Part 1. Effective thermal conductivity”. In : *Wood and fiber science : journal of the Society of Wood Science and Technology* 38 (oct. 2006), p. 592-598.

[49] *Capacité thermique massique*. fr. Page Version ID : 205085161. Juin 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Capacit%C3%A9_thermique_massique&oldid=205085161 (visité le 09/07/2023).

[50] P. STEINHAGEN. “THERMAL CONDUCTIVE PROPERTIES OF WOOD, GREEN OR DRY, FROM -40° TO +100° C : A LITERATURE REVIEW”. In : 1998. URL : https://www.semanticscholar.org/paper/THERMAL-CONDUCTIVE-PROPERTIES-OF-WOOD%2C-GREEN-OR-40%C2%B0-Steinhagen/c1f00079376ca56a9f8117ca0f4c033cf59cb49 (visité le 09/07/2023).

[51] W. P. GOSS. “Thermal Properties of Wood and Wood Products”. In : URL : https://www.semanticscholar.org/paper/Thermal-Properties-of-Wood-and-Wood-Products-Goss/fc704903c8196894acfd4618fb48946d6927905b (visité le 09/07/2023).

[52] *Dilatation thermique*. fr. Page Version ID : 203816310. Avr. 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Dilatation_thermique&oldid=203816310 (visité le 09/07/2023).

[53] Eric PRADIER. *Le_bois_procedes-generaux-de-construction*. URL : http://www.cours-genie-civil.com/wp-content/uploads/Le_bois_procedes-generaux-de-construction.pdf.

[54] *Eau lié — Wikipédia*. fr. URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Eau_li%C3%A9 (visité le 09/07/2023).

[55] *Eau libre*. fr. Page Version ID : 198165411. Oct. 2022. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Eau_libre&oldid=198165411 (visité le 09/07/2023).

[56] Leandro PASSARINI. "Étude du comportement physique des bois au-dessus et au-dessous du point de saturation des fibres". In : 2015. URL : https://www.semanticscholar.org/paper/%C3%89tude-du-comportement-physique-des-bois-au-dessus-Passarini/bd37bafdf5c46f2fa8dfa4d14a96e49eb6badbfc (visité le 09/07/2023).

[57] *Humidité du bois*. fr. Page Version ID : 204888347. Juin 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Humidit%C3%A9_du_bois&oldid=204888347 (visité le 09/07/2023).

[58] *Point de saturation des fibres*. fr. Page Version ID : 170755684. Mai 2020. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Point_de_saturation_des_fibres&oldid=170755684 (visité le 09/07/2023).

[59] *Traitement Bois - SAPA spécialiste du traitement des bois de charpente contre les insectes à larves xylophages*. URL : https://www.sapa-traitement.com/traitement-bois.html (visité le 09/07/2023).

[60] *Équilibre hygrométrique*. fr. Page Version ID : 204889883. Juin 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89quilibre_hygrom%C3%A9trique&oldid=204889883 (visité le 09/07/2023).

[61] *Retrait du bois*. fr. Page Version ID : 203946952. Mai 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Retrait_du_bois&oldid=203946952 (visité le 09/07/2023).

[62] *[PDF] Densification of Wood. : The influence of hygrothermal treatment on compression of beech perpendicular to gain | Semantic Scholar*. URL : https://www.semanticscholar.org/paper/Densification-of-Wood.%3A-The-influence-of-treatment-Morsing/b73c49cce1c4b553d2522faf8e31444a4c91a4f4 (visité le 09/07/2023).

[63] Parviz NAVI et heger FRÉDÉRIC. *Comportement thermo-hydromécanique du bois*.

[64] *Lois de Fick*. fr. Page Version ID : 200536072. Jan. 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Lois_de_Fick&oldid=200536072 (visité le 09/07/2023).

[65] Stavros AVRAMIDIS. "Bound water migration in wood". In : juin 2018.

[66] H. K. BURR et A. J. STAMM. "Diffusion in wood". eng. In : *The Journal of Physical and Colloid Chemistry* 51.1 (jan. 1947), p. 240-261. ISSN : 0092-7023. DOI : 10.1021/j150451a019.

[67] Lars WADSÖ. "Describing non-Fickian water-vapour sorption in wood". In : *Journal of Materials Science* 29 (oct. 1994), p. 2367-2372. DOI : 10.1007/BF00363428.

[68] *Abaqus Analysis User's Guide (2016)*. URL : http://130.149.89.49:2080/v2016/books/usb/default.htm?startat=pt03ch06s09at28.html#usb-anl-amassdiffusion (visité le 09/07/2023).

[69] *Viscoelasticity*. en. Page Version ID : 1159155319. Juin 2023. URL : https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Viscoelasticity&oldid=1159155319 (visité le 09/07/2023).

[70] Frédéric Dubois et al. “Modeling of the viscoelastic mechano-sorptive behavior in wood”. en. In : *Mechanics of Time-Dependent Materials* 16.4 (nov. 2012), p. 439-460. issn : 1573-2738. doi : 10.1007/s11043-012-9171-3. url : https://doi.org/10.1007/s11043-012-9171-3 (visité le 09/07/2023).

[71] Andreja Kutnar et Milan Sernek. “Densification of wood”. In : *Zbornik Gozdarstva in Lesarstva* 82 (jan. 2007), p. 53-62.

[72] Jorgen Bergstrom. “Calculation of Prony Series Parameters From Dynamic Frequency Data”. en. In : ().

[73] *Williams-Landel-Ferry Equation - an overview | ScienceDirect Topics*. url : https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/williams-landel-ferry-equation (visité le 09/07/2023).

[74] Rong Luo et Qiang Hou. “Development of time-temperature-humidity superposition principle for asphalt mixtures”. en. In : *Mechanics of Materials* 156 (mai 2021), p. 103792. issn : 0167-6636. doi : 10.1016/j.mechmat.2021.103792. url : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016766362100048X (visité le 09/07/2023).

[75] *Hyperelastic behavior in elastomeric foams*. en. concept. url : https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEMATRefMap/simamat-c-hyperfoam.htm (visité le 09/07/2023).

[76] Shi Yan, Stephen J. Eichhorn et Eleni Toumpanaki. “Numerical simulation of transverse compression and densification of wood”. en. In : *Wood Science and Technology* 56.4 (juill. 2022), p. 1007-1027. issn : 1432-5225. doi : 10.1007/s00226-022-01388-9. url : https://doi.org/10.1007/s00226-022-01388-9 (visité le 09/07/2023).

[77] Parviz Navi et Frédéric Heger. “Combined Densification and Thermo-Hydro-Mechanical Processing of Wood”. en. In : *MRS Bulletin* 29.5 (mai 2004), p. 332-336. issn : 1938-1425. doi : 10.1557/mrs2004.100. url : https://doi.org/10.1557/mrs2004.100 (visité le 09/07/2023).

[78] A. Dorfmann et R. W. Ogden. “A constitutive model for the Mullins effect with permanent set in particle-reinforced rubber”. en. In : *International Journal of Solids and Structures* 41.7 (avr. 2004), p. 1855-1878. issn : 0020-7683. doi : 10.1016/j.ijsolstr.2003.11.014. url : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768303006504 (visité le 09/07/2023).

[79] Waldemar Moliński et al. “Mechanical parameters of thermally modified ash wood determined on compression in tangential direction”. en. In : *Maderas. Ciencia y tecnología* 20.2 (), p. 267-276. url : https://www.redalyc.org/journal/485/48557615010/html/ (visité le 09/07/2023).

[80] *Analysis of volumetric swelling and shrinkage of heat treated woods : Experimental and artificial neural network modeling approach*. url : https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2016000300008 (visité le 09/07/2023).

[81] R. Sargent. “Evaluating dimensional stability in solid wood : a review of current practice”. In : *Journal of Wood Science* 65.1 (juill. 2019), p. 36. issn : 1611-4663. doi : 10.1186/s10086-019-1817-1. url : https://doi.org/10.1186/s10086-019-1817-1 (visité le 09/07/2023).

[82] Florence Avat. “Contribution à l’étude des traitements thermiques du bois jusqu’à 300°C : Transformations chimiques et caractérisations physico-chimiques”. fr. In : (1993).

[83] Changjun Liu et al. “Catalytic fast pyrolysis of lignocellulosic biomass”. In : *Chemical Society reviews* 43 (mai 2014). doi : 10.1039/c3cs60414d.

[84] Vasiliki Fragkia et Isak Foged. *Exergy-Based Responsive Building Composites For Thermal Control Stimuli of an Adaptive Envelope*. Sept. 2020.

[85] *Protimeter TimberMaster - PROTIMETER - Catalogue PDF | Documentation technique | Brochure*. url : https://pdf.directindustry.fr/pdf/protimeter/protimeter-timbermaster/16798-958670.html (visité le 14/08/2023).

[86] “UT 6760 Double Door Oven”. en. In : ().

[87] *Type T Thermocouple - TC Ltd.* url : https://www.tc.co.uk/thermocouples/type-t-thermocouple.html (visité le 17/08/2023).

[88] *Keysight / Agilent 34972A LXI Data Acquisition / Data Logger Switch Unit*. en. url : https://www.bellnw.com/products/keysight-34972a (visité le 01/08/2023).

[89] *VT³/VC³ - Vötsch Industrietechnik - PDF Catalogs | Technical Documentation | Brochure*. url : https://pdf.directindustry.com/pdf/voetsch-industrietechnik/vt-vc/16219-166435.html (visité le 17/08/2023).

[90] *(17) (PDF) Numerical Simulations of Transverse Compression and Densification in Wood*. url : https://www.researchgate.net/publication/266499784_Numerical_Simulations_of_Transverse_Compression_and_Densification_in_Wood (visité le 14/08/2023).

[91] *Orthotropic material*. en. Page Version ID : 1139788628. Fév. 2023. url : https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Orthotropic_material&oldid=1139788628 (visité le 14/08/2023).

[92] *Analyse mécanique dynamique*. fr. Page Version ID : 197507611. Oct. 2022. url : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Analyse_m%C3%A9canique_dynamique&oldid=197507611 (visité le 09/07/2023).

[93] Nom. *English : Sinusoidal stress and corresponding out of phase strain, in DMA*. Juin 2008. url : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DMA_curves.png (visité le 09/07/2023).

[94] *Dynamic modulus*. en. Page Version ID : 1042691933. Sept. 2021. url : https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Dynamic_modulus&oldid=1042691933 (visité le 09/07/2023).

[95] I. McIvor, B. Metral et G. Douglas. “Variation in root density of poplar trees at different plant densities”. In : 2005. url : https://www.semanticscholar.org/paper/Variation-in-root-density-of-poplar-trees-at-plant-McIvor-Metral/2316adaff0b5a3034daf89932894524ffd56591d (visité le 15/08/2023).

[96] Paola MAZZANTI, Marco TOGNI et Luca UZIELLI. "Drying shrinkage and mechanical properties of poplar wood (Populus alba L.) across the grain". In : *Journal of Cultural Heritage*. Wood Science for Conservation 13.3, Supplement (sept. 2012), S85-S89. ISSN : 1296-2074. DOI : 10.1016/j.culher.2012.03.015. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207412000647 (visité le 15/08/2023).

[97] Kristofer GAMSTEDT. "Moisture induced softening and swelling of natural cellulose fibres in composite applications". In : *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering* 139 (juill. 2016), p. 012003. DOI : 10.1088/1757-899X/139/1/012003.

[98] Chen HUANG et al. "Mechanical behaviour of wood compressed in radial direction-part I. New method of determining the yield stress of wood on the stress-strain curve". In : *Journal of Bioresources and Bioproducts* 5.3 (août 2020), p. 186-195. ISSN : 2369-9698. DOI : 10.1016/j.jobab.2020.07.004. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2369969820300967 (visité le 17/08/2023).

[99] Mayu MIZUTANI et Kosei ANDO. "Influence of a wide range of moisture contents on the Poisson's ratio of wood". en. In : *Journal of Wood Science* 61.1 (fév. 2015). Number : 1 Publisher : SpringerOpen, p. 81-85. ISSN : 1611-4663. DOI : 10.1007/s10086-014-1438-7. URL : https://jwoodscience.springeropen.com/articles/10.1007/s10086-014-1438-7 (visité le 15/08/2023).

[100] "Poisson's ratio bounds in orthotropic materials. Application to natural composites : wood, bamboo and Arundo donax". en-US. In : *Composites Part B : Engineering* 209 (mars 2021). Publisher : Elsevier, p. 108612. ISSN : 1359-8368. DOI : 10.1016/j.compositesb.2021.108612. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836821000093 (visité le 17/08/2023).

[101] *Module de Young, module de rigidité et coefficient de Poisson*. fr. URL : https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/sciences-fondamentales-th8/introduction-aux-constantes-physico-chimiques-42342210/constantes-mecaniques-k486/module-de-young-module-de-rigidite-et-coefficient-de-poisson-k486forniv10001.html (visité le 17/08/2023).

[102] *Structural Wood Lumber Engineering Properties Table Chart*. URL : https://www.engineersedge.com/lumber.htm (visité le 17/08/2023).

[103] Sudip CHOWDHURY, James FABIYI et Charles E. FRAZIER. "Advancing the dynamic mechanical analysis of biomass : comparison of tensile-torsion and compressive-torsion wood DMA". In : *Holzforschung*. T. 64. ISSN : 1437-434X, 0018-3830 Issue : 6. Oct. 2010. DOI : 10.1515/hf.2010.123. URL : https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/hf.2010.123/html (visité le 17/08/2023).

[104] *Defining an analysis*. en. concept. URL : https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEANLRefMap/simaanl-c-over.htm (visité le 18/08/2023).

[105] DEREK. *heat3D-flex*. original-date : 2018-10-16T18 :54 :12Z. Mars 2023. URL : https://github.com/derekharrison/heat3D-flex (visité le 10/07/2023).

[106] *Méthode du gradient conjugué*. fr. Page Version ID : 204958635. Juin 2023. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=M%C3%A9thode_du_gradient_conjugu%C3%A9&oldid=204958635 (visité le 10/07/2023).

[107] *Coefficient de transfert thermique par convection - 2012 - Aide de SOLIDWORKS*. URL : https://help.solidworks.com/2012/french/solidworks/cworks/Convection_Heat_Coefficient.htm (visité le 10/07/2023).

[108] *Abaqus*. en. Page Version ID : 1151060670. Avr. 2023. URL : https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Abaqus&oldid=1151060670 (visité le 11/07/2023).

[109] **DFLUX*. URL : https://web.mit.edu/calculix_v2.7/CalculiX/ccx_2.7/doc/ccx/node188.html (visité le 18/08/2023).

[110] *Fitting of elastomeric foam test data*. en. concept. URL : https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEBMKRefMap/simabmk-c-foamdatafitting.htm (visité le 18/08/2023).

[111] *Defining hyperelastic behavior using test data*. en. concept. URL : https://docs.software.vt.edu/abaqusv2022/English/SIMACAEGSARefMap/simagsa-c-matdefinehyper.htm (visité le 18/08/2023).

[112] *Elasticity/Constitutive relations - Wikiversity*. en. URL : https://en.wikiversity.org/wiki/Elasticity/Constitutive_relations (visité le 18/08/2023).

[113] *Hyperelastic behavior of rubberlike materials*. en. concept. URL : https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEMATRefMap/simamat-c-hyperelastic.htm (visité le 18/08/2023).

[114] *UHYPER*. en. concept. URL : https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAESUBRefMap/simasub-c-uhyper.htm (visité le 18/08/2023).

[115] *Crushable foam plasticity models*. en. concept. URL : https://docs.software.vt.edu/abaqusv2022/English/SIMACAEMATRefMap/simamat-c-crushfoam.htm (visité le 18/08/2023).

[116] *Time domain viscoelasticity*. en. concept. URL : https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEMATRefMap/simamat-c-timevisco.htm (visité le 18/08/2023).

[117] W. M. McKenzie et H. Karpovich. “The frictional behaviour of wood”. en. In : *Wood Science and Technology* 2.2 (juin 1968), p. 139-152. ISSN : 1432-5225. DOI : 10.1007/BF00394962. URL : https://doi.org/10.1007/BF00394962 (visité le 18/08/2023).

[118] *About pore fluid flow properties*. en. concept. URL : https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEMATRefMap/simamat-c-poreprop.htm (visité le 18/08/2023).

[119] Jiali Zhang et al. “Simulation and validation of heat transfer during wood heat treatment process”. In : *Results in Physics* 7 (jan. 2017), p. 3806-3812. ISSN : 2211-3797. DOI : 10.1016/j.rinp.2017.09.046. URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211379717302504 (visité le 17/08/2023).

[120] Reto Fahrni et al. “Correct temperature measurements in fire exposed wood”. en. In : *Proceedings of the 2018 World Conference on Timber Engineering*. Accepted : 2019-10-29T14 :44 :43Z. World Conference on Timber Engineering (WCTE), août 2018. ISBN : 979-11-6019-235-3. DOI : 10.3929/ethz-b-000289850. URL : https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/289850 (visité le 17/08/2023).

[121] *About ALE adaptive meshing*. en. concept. URL : https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEANLRefMap/simaanl-c-aleover.htm (visité le 18/08/2023).

[122] *ABAQUS Benchmarks Manual (v6.6)*. URL : https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/bmk/default.htm?startat=ch03s01ach153.html#bmk-mat-foamdatafitting (visité le 18/08/2023).

[123] Koh-hei NITTA et Masahiro YAMANA. "Poissons Ratio and Mechanical Nonlinearity Under Tensile Deformation in Crystalline Polymers". In : *Rheology*. Journal Abbreviation : Rheology. Mars 2012. ISBN : 978-953-51-0187-1. DOI : 10.5772/34881.

[124] *UANISOHYPER_STRAIN*. en. concept. URL : https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAESUBRefMap/simasub-c-uanisohyper_strain.htm#simasub-c-uanisohyper_strain (visité le 18/08/2023).

[125] *The deal.II Finite Element Library*. URL : https://www.dealii.org/ (visité le 19/08/2023).

[126] Bruno GODIN et al. "Détermination de la cellulose, des hémicelluloses, de la lignine et des cendres dans diverses cultures lignocellulosiques dédiées à la production de bioéthanol de deuxième génération". fr. In : *BASE* (jan. 2010). ISSN : 1370-6233, 1780-4507. URL : https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=6186%https://fr.wikipedia.org/wiki/Bois (visité le 09/07/2023).

A | État de l'art et modèles

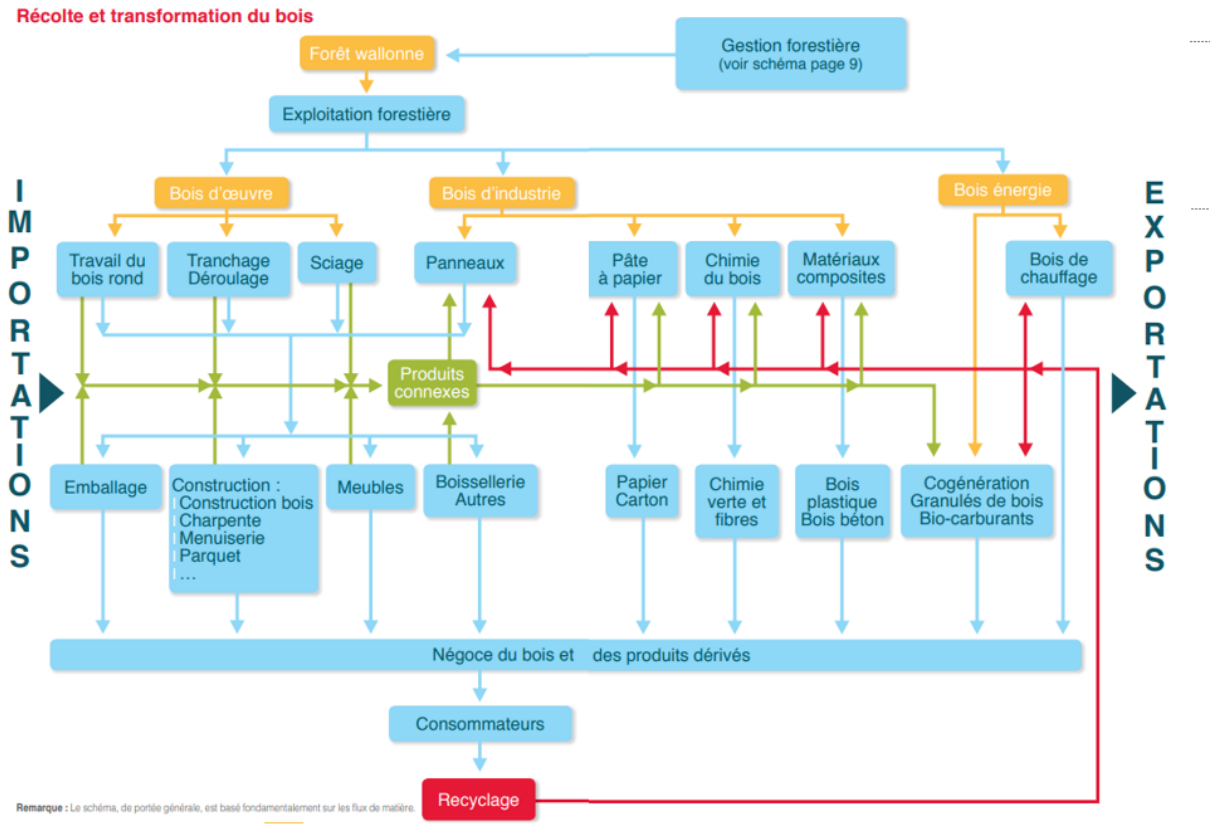


Figure A.1 – *Cycle du bois [12].*

A.0.1 Energy dissipation for elastomeric foam et Mullins effect

Les modèles "Energy dissipation for elastomeric foam" et "Mullins effect" sont deux modèles implémentés dans Abaqus. Ils décrivent l'endommagement et la relaxation qui peuvent apparaître dans les polymères sous l'action d'une contrainte (voir sous-section 1.5.6). Le premier peut être utilisé de pair avec le modèle Hyperfoam. Le second peut être utilisé de pair avec le modèle Hyperelasticity. Les endommagements qui surviennent dans ces modèles sont instantanés et nécessitent la connaissance des endommagements subits. Ce travail ne prend pas en compte cet effet. Il est également possible de coupler ces modèles avec les modèles de viscoélasticité dans Abaqus Explicit.
Material coupling :

Tableau 1. Teneurs en cellulose, hémicelluloses et lignine avec leurs écarts-types de diverses biomasses lignocellulosiques déterminées par la méthode de Van Soest d'après la littérature scientifique — *Content of cellulose, hemicelluloses and lignin with their standard deviation of various lignocellulosic biomass based on the scientific literature and quantified by the Van Soest method.*

Biomasse lignocellulosique	Nombre de valeurs*	Cellulose (kg·100 kg^{-1} MS)	Hémicelluloses (kg·100 kg^{-1} MS)	Lignine (kg·100 kg^{-1} MS)
Bagasse de canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.) (1)	10	40,1 ± 6,7	26,3 ± 6,3	17,9 ± 6,8
Fétuque (*Festuca arundinacea* Schreb.) (2)	5	33,3 ± 2,7	30,4 ± 1,8	6,5 ± 2,2
Maïs fibre (*Zea mays* L.) (3)	6	38,0 ± 3,8	27,4 ± 1,2	7,3 ± 1,6
Miscanthus (*Miscanthus* sp.) (4)	4	44,0 ± 4,8	25,4 ± 2,2	20,4 ± 4,8
Paille d'avoine (*Avena sativa* L.) (5)	5	35,5 ± 4,6	24,3 ± 6,5	13,7 ± 4,0
Paille de blé (*Triticum aestivum* L.) (6)	27	36,6 ± 5,7	29,8 ± 7,7	16,9 ± 4,7
Paille de maïs grain (*Zea mays* L.) (7)	12	37,3 ± 5,1	25,4 ± 4,3	15,8 ± 3,6
Paille d'orge (*Hordeum vulgare* L.) (8)	17	40,4 ± 7,8	25,6 ± 5,1	12,7 ± 3,6
Paille de riz (*Oryza sativa* L.) (9)	32	35,3 ± 4,5	26,7 ± 4,9	9,8 ± 5,5
Paille de seigle (*Secale cereale* L.) (10)	3	37,0 ± 3,0	28,9 ± 1,0	12,7 ± 9,6
Panic érigé (*Panicum virgatum* L.) (11)	36	38,3 ± 3,8	31,2 ± 2,9	8,4 ± 3,9
Ray-grass italien (*Lolium multiflorum* Lam.) (12)	4	23,1 ± 4,8	18,7 ± 6,3	4,3 ± 2,4
Sorgho fibre (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) (13)	7	42,3 ± 2,6	26,2 ± 0,6	8,0 ± 0,4
Sorgho fourrager (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) (14)	18	28,3 ± 4,6	22,8 ± 3,6	8,7 ± 3,9
Chanvre (*Cannabis sativa* L.) (15)	15	60,3 ± 6,2	16,8 ± 3,9	6,8 ± 3,4
Kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) (16)	6	53,2 ± 4,1	18,4 ± 1,4	7,9 ± 1,2
Hêtre (*Fagus sylvatica* L.) (17)	3	45,4 ± 1,9	27,9 ± 6,8	23,1 ± 1,3
Peuplier (*Populus* sp.) (18)	4	42,0 ± 2,9	22,0 ± 6,2	24,8 ± 3,8
Saule (*Salix* sp.) (19)	2	46,5 ± 13,5	18,5 ± 6,4	20,0 ± 1,4
Douglas (*Pseudotsuga* sp.) (20)	3	48,8 ± 7,6	21,1 ± 11,4	25,9 ± 2,2
Épicea (*Picea* sp.) (21)	4	44,3 ± 4,2	26,1 ± 3,7	28,4 ± 0,7

* Les références bibliographiques figurent dans l'**annexe 1** p 556 — *The bibliographic references are shown in the* ***appendix 1*** p 556.

Figure A.2 – *Proportions des composants selon différentes espèces [126].*

Moisture content of wood (%)	Density (kg m^{-3}) when the specific gravity G_s is																				
	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48	0.50	0.52	0.54	0.56	0.58	0.60	0.62	0.64	0.66	0.68	0.70
0	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680	700
4	312	333	354	374	395	416	437	458	478	499	520	541	562	582	603	624	645	666	686	707	728
8	324	346	367	389	410	432	454	475	497	518	540	562	583	605	626	648	670	691	713	734	756
12	336	358	381	403	426	448	470	493	515	538	560	582	605	627	650	672	694	717	739	762	784
16	348	371	394	418	441	464	487	510	534	557	580	603	626	650	673	696	719	742	766	789	812
20	360	384	408	432	456	480	504	528	552	576	600	624	648	672	696	720	744	768	792	816	840
24	372	397	422	446	471	496	521	546	570	595	620	645	670	694	719	744	769	794	818	843	868
28	384	410	435	461	486	512	538	563	589	614	640	666	691	717	742	768	794	819	845	870	896
32	396	422	449	475	502	528	554	581	607	634	660	686	713	739	766	792	818	845	871	898	924
36	408	435	462	490	517	544	571	598	626	653	680	707	734	762	789	816	843	870	898	925	952
40	420	448	476	504	532	560	588	616	644	672	700	728	756	784	812	840	868	896	924	952	980
44	432	461	490	518	547	576	605	634	662	691	720	749	778	806	835	864	893	922	950	979	1,008
48	444	474	503	533	562	592	622	651	681	710	740	770	799	829	858	888	918	947	977	1,006	1,036
52	456	486	517	547	578	608	638	669	699	730	760	790	821	851	882	912	942	973	1,003	1,034	1,064
56	468	499	530	562	593	624	655	686	718	749	780	811	842	874	905	936	967	998	1,030	1,061	1,092
60	480	512	544	576	608	640	672	704	736	768	800	832	864	896	928	960	992	1,024	1,056	1,088	1,120
64	492	525	558	590	623	656	689	722	754	787	820	853	886	918	951	984	1,017	1,050	1,082	1,115	1,148
68	504	538	571	605	638	672	706	739	773	806	840	874	907	941	974	1,008	1,042	1,075	1,109	1,142	1,176
72	516	550	585	619	654	688	722	757	791	826	860	894	929	963	998	1,032	1,066	1,101	1,135	1,170	1,204
76	528	563	598	634	669	704	739	774	810	845	880	915	950	986	1,021	1,056	1,091	1,126	1,162	1,197	
80	540	576	612	648	684	720	756	792	828	864	900	936	972	1,008	1,044	1,080	1,116	1,152	1,188		
84	552	589	626	662	699	736	773	810	846	883	920	957	994	1,030	1,067	1,104	1,141	1,178			
88	564	602	639	677	714	752	790	827	865	902	940	978	1,015	1,053	1,090	1,128	1,166				
92	576	614	653	691	730	768	806	845	883	922	960	998	1,037	1,075	1,114	1,152	1,190				
96	588	627	666	706	745	784	823	862	902	941	980	1,019	1,058	1,098	1,137	1,176					
100	600	640	680	720	760	800	840	880	920	960	1,000	1,040	1,080	1,120	1,160	1,200					
110	630	672	714	756	798	840	832	924	966	1,008	1,050	1,092	1,134	1,176	1,218						
120	660	704	748	792	836	880	924	968	1,012	1,056	1,100	1,144	1,188	1,232							
130	690	736	782	828	874	920	966	1,012	1,058	1,104	1,150	1,196	1,242	1,288							
140	720	768	816	864	912	960	1,008	1,056	1,104	1,152	1,200	1,248	1,296								
150	750	800	850	900	950	1,000	1,050	1,100	1,150	1,200	1,250	1,300	1,350								

Figure A.3 – *Volume d'eau pour une densité de bois donnée [38].*

Species	Shrinkage[b] from green to ovendry moisture content (%) Radial	Tan-gential	Volu-metric	Loca-tion[c]	Species	Shrinkage[b] from green to ovendry moisture content (%) Radial	Tan-gential	Volu-metric	Loca-tion[c]
Afrormosia (*Pericopsis elata*)	3.0	6.4	10.7	AF	Lauan, white (*Pentacme contorta*)	4.0	7.7	11.7	AS
Albarco (*Cariniana* spp.)	2.8	5.4	9.0	AM	Limba (*Terminalia superba*)	4.5	6.2	10.8	AF
Andiroba (*Carapa guianensis*)	3.1	7.6	10.4	AM	Macawood (*Platymiscium* spp.)	2.7	3.5	6.5	AM
Angelin (*Andira inermis*)	4.6	9.8	12.5	AM	Mahogany, African (*Khaya* spp.)	2.5	4.5	8.8	AF
Angelique (*Dicorynia guianensis*)	5.2	8.8	14.0	AM	Mahogany, true (*Swietenia macrophylla*)	3.0	4.1	7.8	AM
Apitong (*Dipterocarpus* spp.)	5.2	10.9	16.1	AS	Manbarklak (*Eschweilera* spp.)	5.8	10.3	15.9	AM
Avodire (*Turreanthus africanus*)	4.6	6.7	12.0	AF	Manni (*Symphonia globulifera*)	5.7	9.7	15.6	AM
Azobe (*Lophira alata*)	8.4	11.0	17.0	AM	Marishballi (*Licania* spp.)	7.5	11.7	17.2	AM
Balata (*Manilkara bidentata*)	6.3	9.4	16.9	AM	Meranti, white (*Shorea* spp.)	3.0	6.6	7.7	AS
Balsa (*Ochroma pyramidale*)	3.0	7.6	10.8	AM	Meranti, yellow (*Shorea* spp.)	3.4	8.0	10.4	AS
Banak (*Virola* spp.)	4.6	8.8	13.7	AM	Merbau (*Intsia bijuga* and *I. palembanica*)	2.7	4.6	7.8	AS
Benge (*Guibourtia arnoldiana*)	5.2	8.6	13.8	AF	Mersawa (*Anisoptera* spp.)	4.0	9.0	14.6	AS
Bubinga (*Guibourtia* spp.)	5.8	8.4	14.2	AF	Mora (*Mora* spp.)	6.9	9.8	18.8	AM
Bulletwood (*Manilkara bidentata*)	6.3	9.4	16.9	AM	Obeche (*Triplochiton scleroxylon*)	3.0	5.4	9.2	AF
Caribbean pine (*Pinus caribaea*)	6.3	7.8	12.9	AM	Ocota pine (*Pinus oocarpa*)	4.6	7.5	12.3	AM
Cativo (*Prioria copaifera*)	2.4	5.3	8.9	AM	Okoume (*Aucoumea klaineana*)	4.1	6.1	11.3	AF
Ceiba (*Ceiba pentandra*)	2.1	4.1	10.4	AM	Opepe (*Nauclea* spp.)	4.5	8.4	12.6	AF
Cocobolo (*Dalbergia retusa*)	2.7	4.3	7.0	AM	Ovangkol (*Guibourta ehie*)	4.5	8.2	12	AF
Courbaril (*Hymenaea courbaril*)	4.5	8.5	12.7	AM	Para-angelium (*Hymenolobium excelsum*)	4.4	7.1	10.2	AM
Cuangare (*Dialyanthera* spp.)	4.2	9.4	12.0	AM	Parana pine (*Araucaria angustifolia*)	4.0	7.9	11.6	AS
Degame (*Calycophyllum candidissimum*)	4.8	8.6	13.2	AM	Pau Marfim (*Balfourodendron riedelianum*)	4.6	8.8	13.4	AM
Determa (*Ocotea rubra*)	3.7	7.6	10.4	AM	Peroba de campos (*Paratecoma peroba*)	3.8	6.6	10.5	AM
Ebony, East Indian (*Diospyros* spp.)	5.4	8.8	14.2	AS	Peroba Rosa (*Aspidosperma* spp.)	3.8	6.4	11.6	AM
Ebony, African (*Diospyros* spp.)	9.2	10.8	20.0	AF	Piquia (*Caryocar* spp.)	5.0	8.0	13.0	AM
Ekop (*Tetraberlinia tubmaniana*)	5.6	10.2	15.8	AF	Pilon (*Hyeronima* spp.)	5.4	11.7	17.0	AM
Gmelina (*Gmelina arborea*)	2.4	4.9	8.8	AS	Primavera (*Cybistax donnell-smithii*)	3.1	5.1	9.1	AM
Goncalo alves (*Astronium graveolens*)	4.0	7.6	10.0	AM	Purpleheart (*Peltogyne* spp.)	3.2	6.1	9.9	AM
Greenheart (*Ocotea rodiaei*)	8.8	9.6	17.1	AM	Ramin (*Gonystylus* spp.)	4.3	8.7	13.4	AS
Hura (*Hura crepitans*)	2.7	4.5	7.3	AM	Roble (*Quercus* spp.)	6.4	11.7	18.5	AM
Ilomba (*Pycnanthus angolensis*)	4.6	8.4	12.8	AF	Roble (*Tabebuia* spp. Roble group)	3.6	6.1	9.5	AM
Imbuia (*Phoebe porosa*)	2.7	6.0	9.0	AM	Rosewood, Brazilian (*Dalbergia nigra*)	2.9	4.6	8.5	AM
Ipe (*Tabebuia* spp.)	6.6	8.0	13.2	AM	Rosewood, Indian (*Dalbergia latifolia*)	2.7	5.8	8.5	AS
Iroko (*Chlorophora excelsa* and *C. regia*)	2.8	3.8	8.8	AF	Rubberwood (*Hevea brasiliensis*)	2.3	5.1	7.4	AM
Jarrah (*Eucalyptus marginata*)	7.7	11.0	18.7	AS	Sande (*Brosimum* spp. Utile group)	4.6	8.0	13.6	AM
Jelutong (*Dyera costulata*)	2.3	5.5	7.8	AS	Sapele (*Entandrophragma cylindricum*)	4.6	7.4	14.0	AF
Kaneelhart (*Licaria* spp.)	5.4	7.9	12.5	AM	Sepetir (*Pseudosindora* spp. and *Sindora* spp.)	3.7	7.0	10.5	AS
Kapur (*Dryobalanops* spp.)	4.6	10.2	14.8	AS	Spanish-cedar (*Cedrela* spp.)	4.2	6.3	10.3	AM
Karri (*Eucalyptus diversicolor*)	7.8	12.4	20.2	AS	Sucupira (*Diplotropis purpurea*)	4.6	7.0	11.8	AM
Kempas (*Koompassia malaccensis*)	6.0	7.4	14.5	AS	Teak (*Tectona grandis*)	2.5	5.8	7.0	AS
Keruing (*Dipterocarpus* spp.)	5.2	10.9	16.1	AS	Wallaba (*Eperua* spp.)	3.6	6.9	10.0	AM
Lauan, light red and red (*Shorea* spp.)	4.6	8.5	14.3	AS					
Lauan, dark red (*Shorea* spp.)	3.8	7.9	13.1	AS					

Figure A.4 – *Retrait du bois en fonction de l'espèce [38].*

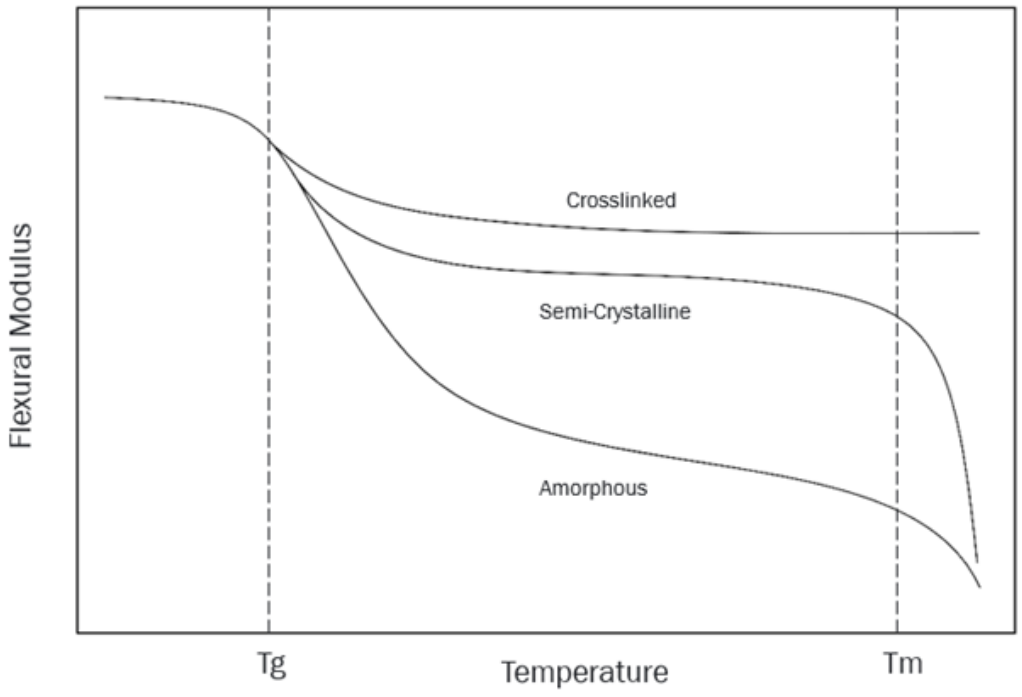


Figure A.5 – *Caractère viscoélastique en fonction du taux de cristallinité*

Model	Strain Energy Potential	Material Parameters
Marlow	$U = U_{dev}\left(\bar{I}_1\right) + U_{vol}\left(J_{el}\right)$	-
Mooney Rivlin	$U = C_{10}\left(\bar{I}_1 - 3\right) + C_{01}\left(\bar{I}_2 - 3\right) + \frac{1}{D_1}\left(J^{el} - 1\right)^2$	C_{10}, C_{01}, D_1
Neo-Hookean	$U = C_{10}\left(\bar{I}_1 - 3\right) + \frac{1}{D_1}\left(J^{el} - 1\right)^2$	C_{10}, D_1
Ogden	$U = \sum_{i=1}^{N} \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2}\left(\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3\right) + \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{D_i}\left(J^{el} - 1\right)^{2i}$	N, μ_i, α_i, D_i
Polynomial	$U = \sum_{i+j=1}^{N} C_{ij}\left(\bar{I}_1 - 3\right)^i\left(\bar{I}_2 - 3\right)^j + \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{D_i}\left(J^{el} - 1\right)^{2i}$	N, C_{ij}, D_i
Reduced Polynomial	$U = \sum_{i=1}^{N} C_{i0}\left(\bar{I}_1 - 3\right)^i + \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{D_i}\left(J^{el} - 1\right)^{2i}$	N, C_{i0}, D_i
Yeoh	$U = C_{10}\left(\bar{I}_1 - 3\right) + C_{20}\left(\bar{I}_1 - 3\right)^2 + C_{30}\left(\bar{I}_1 - 3\right)^3 + \frac{1}{D_1}\left(J^{el} - 1\right)^2 + \frac{1}{D_2}\left(J^{el} - 1\right)^4 + \frac{1}{D_3}\left(J^{el} - 1\right)^6$	C_{i0}, D_i

Figure A.6 – *Fonction d'énergie de déformations pour différents modèles*

B | Matériel



Figure B.1 – *Bois de peuplier entreposé dans le Lemsc*



Figure B.2 – *Balance - sartorius 1501 MP8.*



Figure B.3 – *Pied à coulisse - Mitutoyo DIGIMATIC Caliper*



Figure B.4 – *Humidimètre - GE Protimeter timbermaster*



Figure B.5 – *Étuve - Heraeus UT 6760*



Figure B.6 – *Enceinte climatique - vötsch-technik VC3 4018*



Figure B.7 – *Lecteur de thermocouples - l'Agilent 34972A LXI Data Acquisition*



Figure B.8 – *Résine thermo-hygro résistante.*

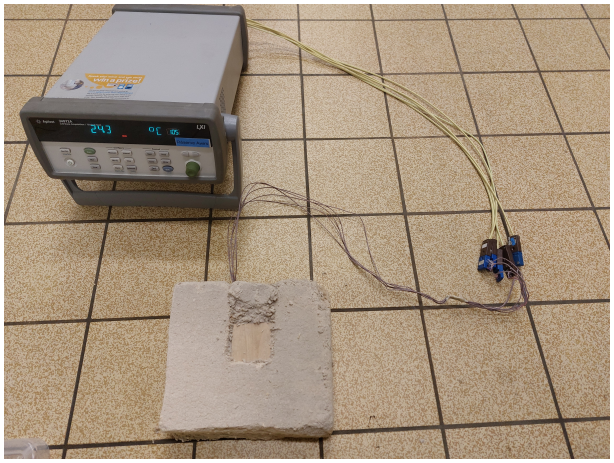


Figure B.9 – *Expérience de diffusion de la température - mise en place.*



Figure B.10 – *Machine de DMA - DMA/SDTA861 Mettler Todeo*

C | Application à d'autres bois

Les équations présentées ci-dessous sont des équations prenant en compte la **densité initiale** du bois compressé pour différents paramètres. N'ayant pas participé à la simulation, elles sont décrites dans les annexes et pourront être utiles pour un prochain travail.

C.1 Conductivité thermique

D'après l'équation 1.5, prenant en compte l'impact de ρ_{sec} et de ϕ sur la conductivité thermique,

$$k = E * \rho_{sec} * \phi + F * \rho_{sec} + G \tag{C.1}$$

Les coefficients E, F et G varient grandement selon les auteurs. Une idée afin de obtenir une fonction de k est de déterminer ces coefficients grâce à l'équation 4.21. En effet, cette dernière est définie pour un bois de 515 kg/m^3. L'équation 1.5, quant à elle, a été définie à 20°C. Dès lors,

$$k = 515E\phi + 515F + G = (20A + C)\phi + 20B + D \tag{C.2}$$

Avec A, B, C, D les coefficients définis dans la mise en place de la simulation numérique. Dès lors, le système finit avec 2 équations à 3 inconnues. E peut être trouvé directement. Les coefficients E et G nécessitent la connaissance d'un des deux. En fixant G à la valeur donnée dans la littérature, on obtient E. On vérifie que E, F, G sont très proches de ceux donnés dans la littérature.

$$515E = 20A + C \tag{C.3}$$
$$515F + G = 20B + D \tag{C.4}$$
$$\tag{C.5}$$

Ensuite, De ces deux équations, il est possible d'en construire une seule, une équation linéaire non vérifiable pour le moment, prenant en compte la densité, l'humidité et la température, tel que,

$$k = A' + B'T + C'\phi + D'\rho + E'T\phi + F'T\rho + G'\rho\phi + H'T\rho\phi \tag{C.6}$$

Après paramétrage,

A'	B'	C'	D'	E'	F'	G'	H'
0.022	0.00021	0	0.00017	8.34E-06	-7.2E-08	0.0000044	0

Table C.1 – *Table des paramètres définissant k en fonction de la température, humidité et densité.*

C.2 Chaleur spécifique

La chaleur spécifique ne dépend pas de la densité du bois considéré, seulement de la température et du taux d'humidité.

C.3 Diffusion de l'eau

Le coefficient de diffusion D varie avec la densité à sec du bois ρ_{sec} du bois. D'après la figure 1.27, le coefficient de diffusion de l'eau dans la direction radiale et tangentielle ne varient pas pareilles.
En effet, le coefficient de diffusion longitudinale D_z peut être supposé comme décroissant linéairement avec la densité. Ceci s'explique intuitivement par le fait que lorsque la densité augmente, il y a moins de place pour l'eau de se déplacer longitudinalement. D'un autre côté, les coefficients de diffusion tangentiels et radiaux sont supposés constant et égaux. En effet, la diffusion dans ces directions est dues aux micro-pores (voir Chapitre 1).

C.4 Retrait et gonflement

D'après (figure 1.25), il est possible de créer une régression linéaire déterminant la variation de $\alpha_{\phi V}$, le coefficient de retrait volumétrique en fonction de la densité. Dès lors,

$$\alpha_{\phi V} = A\rho_{sec} + B \tag{C.7}$$

A	B
-0.0019	1.9

Une autre possibilité est d'utiliser la figure A.4 de manière brut ou en définissant un lien plus précis entre les coefficients de retraits et la densité de l'arbre, la famille, etc.

C.5 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques du bois en compression, dépendent de la densité du bois considéré. N'étant pas encore tout à fait déterminée pour le peuplier en fonction de la température et du taux d'humidité, un premier pas serait de déterminer des lois pour le peuplier. Ainsi, les courbes données à la figure 1.36 pourraient être reproduites.

D | Résultats de la simulation - Hyperfoam

D.1 Cylindre

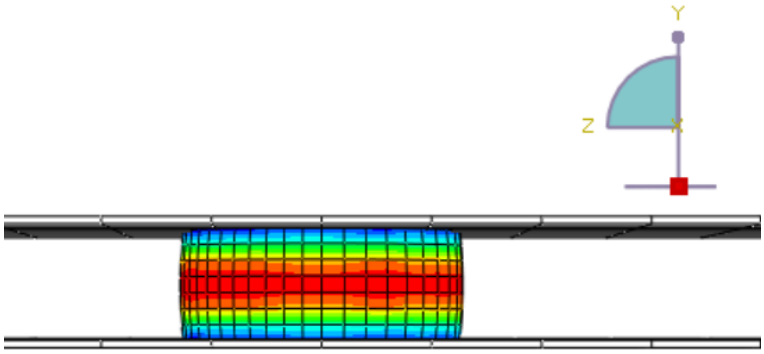


Figure D.1 – *Abaqus Hyperfoam - contrainte, test de compression du cylindre à une déformation de -0.5.*

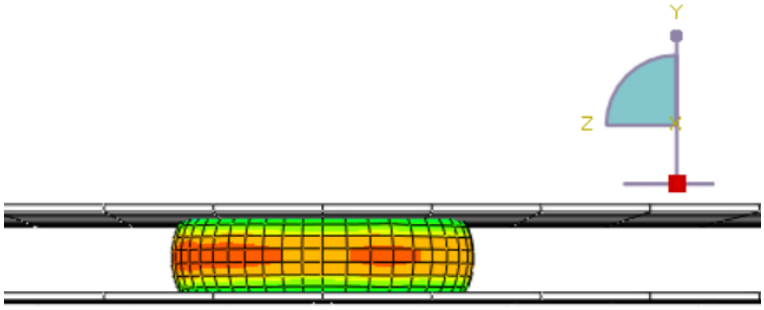


Figure D.2 – *Abaqus Hyperfoam - contrainte, test de compression du cylindre à une déformation de -0.9.*

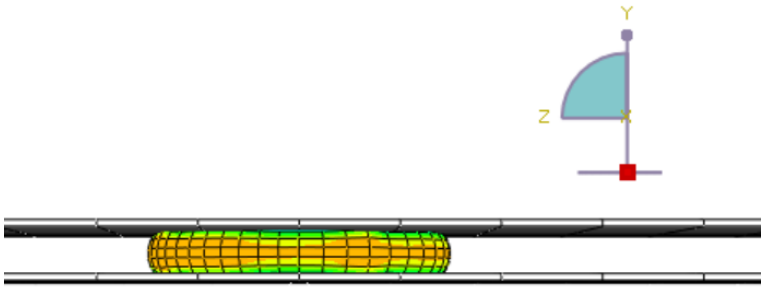


Figure D.3 – *Abaqus Hyperfoam - contrainte, test de compression du cylindre à une déformation de -1.2.*

D.1.1 Plaque

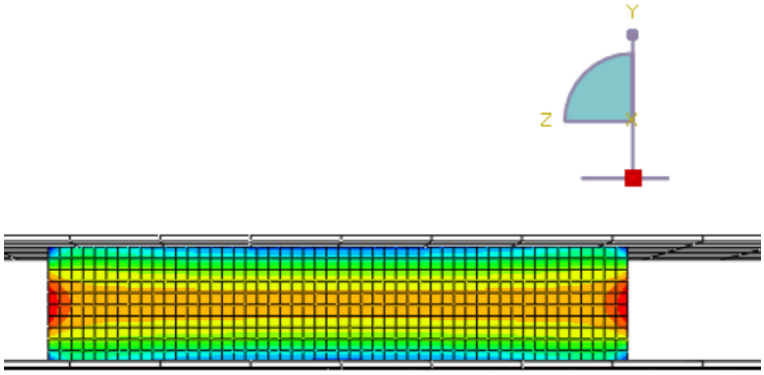


Figure D.4 – *Abaqus Hyperfoam - contrainte, test de compression de la géométrie "plaque" à une déformation de -0.3.*

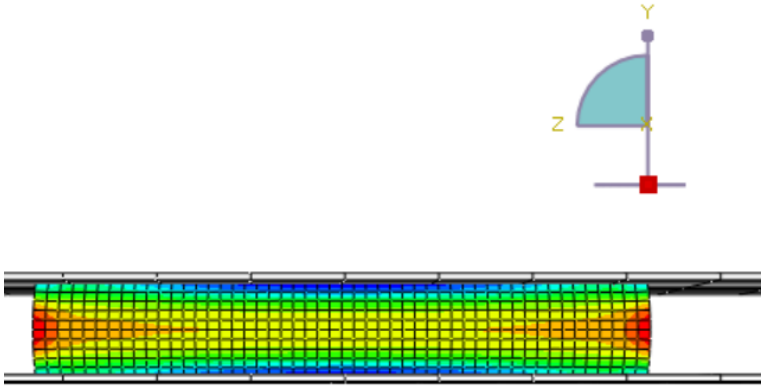


Figure D.5 – *Abaqus Hyperfoam - contrainte, test de compression de la géométrie "plaqueé à une déformation de -0.5.*

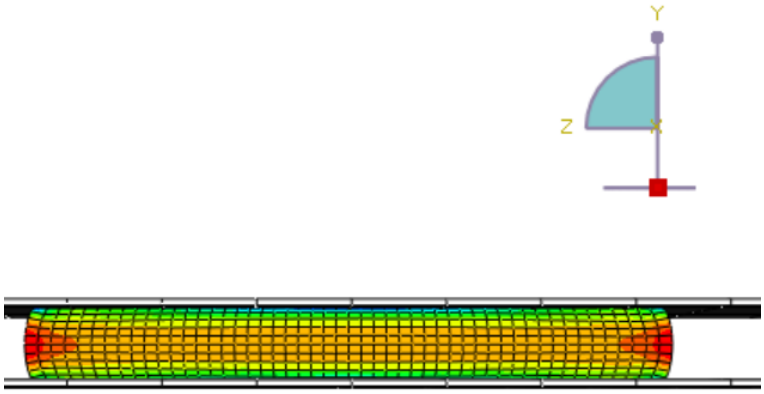


Figure D.6 – *Abaqus Hyperfoam - contrainte, test de compression de la géométrie "plaque" à une déformation de -0.8.*

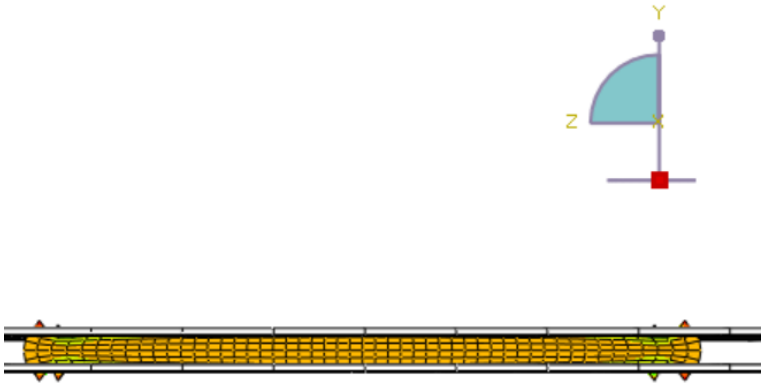


Figure D.7 – *Abaqus Hyperfoam - contrainte, test de compression de la géométrie "plaque" à une déformation de -1.2.*

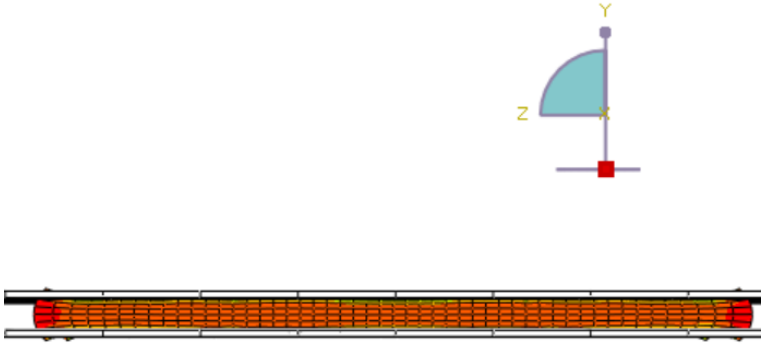


Figure D.8 – *Abaqus Hyperfoam - contrainte, test de compression de la géométrie "plaque" à une déformation de -1.2 - Adaptive meshing*

E | Résultats de la simulation - Ogden

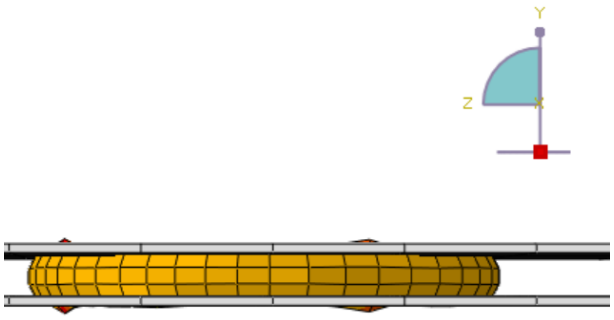


Figure E.1 – *Abaqus Ogden - contrainte, test de compression de la géométrie "cylindre" à une déformation de -1.2*

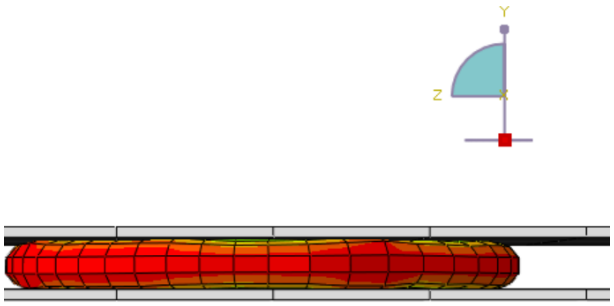


Figure E.2 – *Abaqus Ogden - contrainte, test de compression de la géométrie "cylindre" à une déformation de -1.2 - Adaptive meshing*

F | Résultats de la simulation - Viscoelasticité

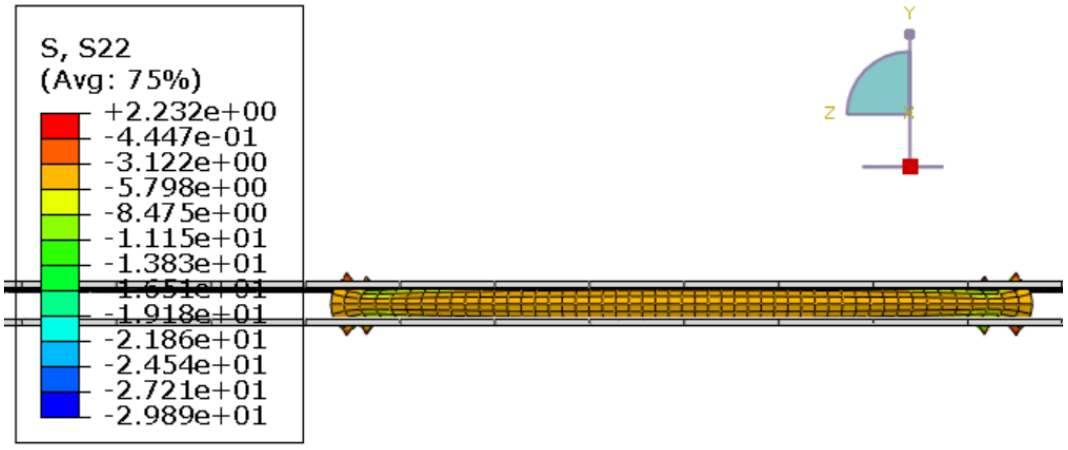


Figure F.1 – *Abaqus Visco - contrainte, test de relaxation de la géométrie "plaque" à une déformation de -1.2, t=0s*

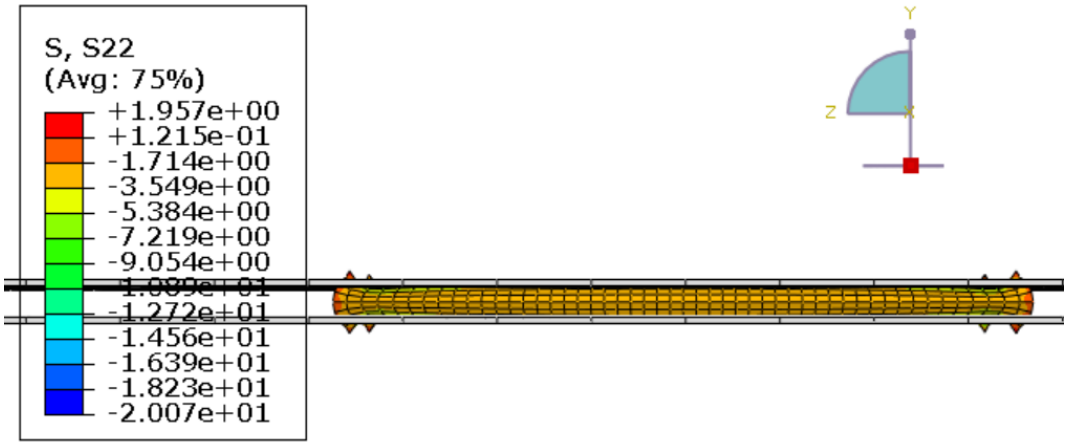


Figure F.2 – *Abaqus Visco - contrainte, test de relaxation de la géométrie "plaque" à une déformation de -1.2, t=200s*

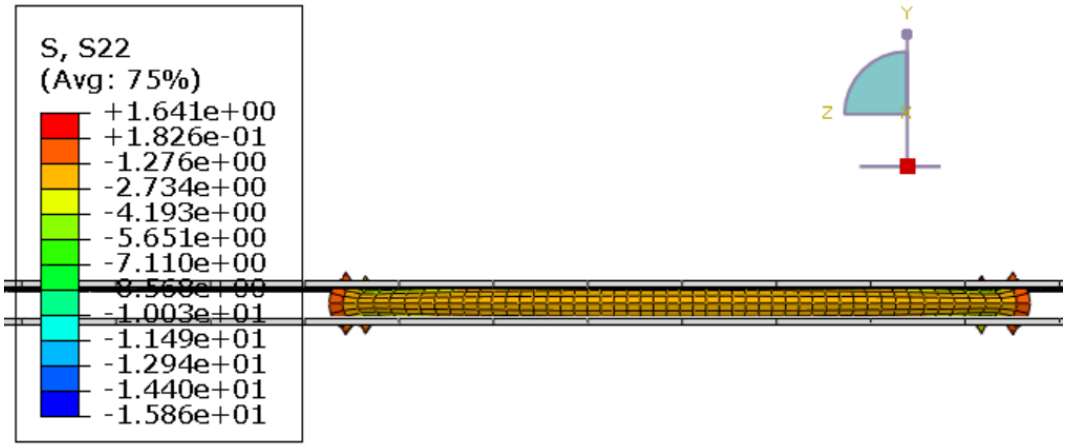


Figure F.3 – *Abaqus Visco - contrainte, test de relaxation de la géométrie "plaque" à une déformation de -1.2, t=1000s*

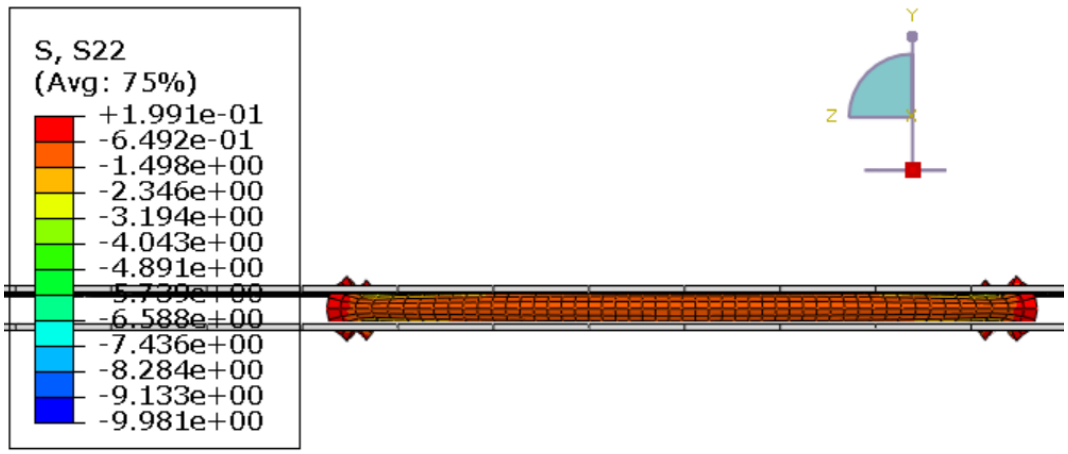


Figure F.4 – *Abaqus Visco - contrainte, test de relaxation de la géométrie "plaque" à une déformation de -1.2, t=5000s*

G | Résultats de la simulation - Crushable foam

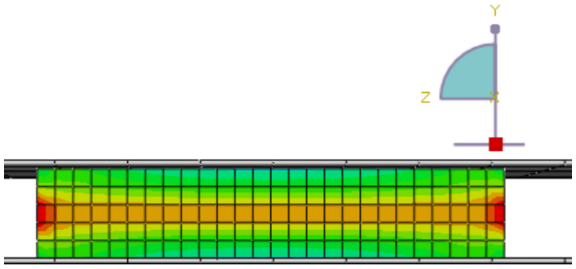


Figure G.1 – *Abaqus Crushable foam - contrainte, test de compression de la géométrie "plaque" à sec, 170°C à une déformation de -0.3*

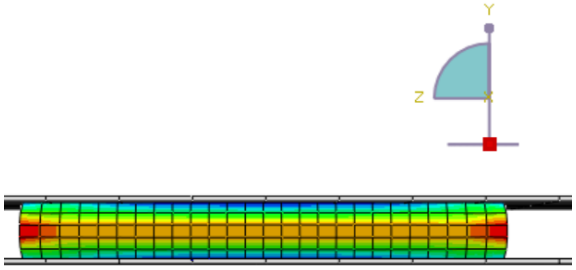


Figure G.2 – *Abaqus Crushable foam - contrainte, test de compression de la géométrie "plaque" à sec, 170°C à une déformation de -0.6*

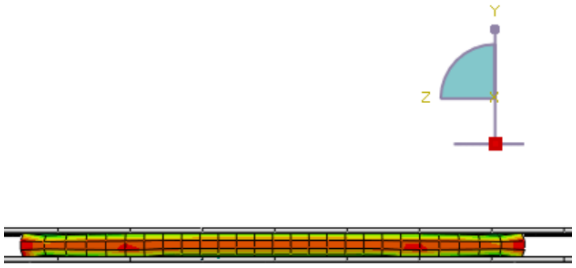


Figure G.3 – *Abaqus Crushable foam - contrainte, test de compression de la géométrie "plaque" à sec, 170°C à une déformation de -1.2*

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain
Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | **www.uclouvain.be/epl**