



المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة – عنابة
National Higher School of Technology and Engineering. Annaba
Département Génie des Procédés et Énergétique (GPE)

THESE

En vue de l'obtention du grade de Docteur en Troisième Cycle

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energétique

Présentée par

Marwa BEDJAOU

Modélisation du comportement thermomécanique des produits déformables au cours d'un procédé de séchage

Soutenue le : 13 / 07 / 2025

Devant le Jury composé de :

Farid MECHIGHEL	Professeur	Président	BADJI MOKHTAR Annaba
Salaheddine AZZOUZ	Professeur	Directeur de thèse	ENSTI Annaba
Soufien AZZOUZ	Professeur	Co-Directeur de thèse	F.S. Tunis
Slimane NIOU	MCA	Examineur	ENSTI Annaba
Mahdi BELHANI	MCA	Examineur	ENSTI Annaba

Année Universitaire : 2024/2025

Dédicaces

*À la mémoire de mon père **Mohamed Bachir**,
qui continue de vivre dans mes pensées et d'inspirer chacun de mes pas.*

*À ma mère **Salima**, pilier de ma vie,
pour son amour, sa force et ses encouragements infinis.*

*À ma grand-mère **Fatma**,
pour ses prières et sa tendresse, témoins d'un amour discret mais profond.*

*À mes sœurs **Maïssa** et **Madjeda**,
À mon mari **Djillali**,
pour leur amour sincère, leur soutien indéfectible
et leurs mots réconfortants dans les moments les plus difficiles.*

*À tous ceux qui me sont chers,
qui m'ont constamment encouragée et soutenue tout au long de ces années.*

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur **AZZOUZ Salaheddine**, Professeur à l'École Nationale Supérieure de Technologie et d'Ingénierie (ENSTI) d'Annaba et Directeur du Laboratoire de Thermique et Systèmes Énergétiques (LTSE), pour la direction de cette thèse, la qualité de son encadrement, ses conseils avisés et la confiance qu'il m'a témoignée tout au long de ce travail.

Mes sincères remerciements vont également à Monsieur **AZZOUZ Soufien**, Professeur à la Faculté des Sciences de Tunis et co-directeur de cette thèse, pour son suivi attentif, sa disponibilité et ses orientations scientifiques pertinentes, ainsi que pour m'avoir accueillie au sein du Laboratoire d'Énergétique et des Transferts Thermiques et Massiques (LETTM) pour la réalisation de la partie expérimentale. Dans ce même cadre, j'exprime ma vive gratitude à Madame **KADHI Karima**, responsable au LETTM, pour son aide précieuse, sa serviabilité et sa grande gentillesse.

J'adresse mes remerciements à Monsieur **ELAIEB Mohamed Taher**, Maître de conférences et chercheur responsable de l'équipe de recherche Technologie et Valorisation du Bois à l'Institut (INRGREF), collaborant avec le LETTM dans le cadre d'une convention de recherche bilatérale. Je le remercie pour sa disponibilité et ses précieuses directives tout au long de la réalisation de ce travail. Ma reconnaissance s'adresse également à Madame **GHARIANI Sarra**, technicienne à l'INRGREF, pour son aide, sa disponibilité et son professionnalisme au cours de la phase expérimentale.

Je remercie également Monsieur **JOMAA Wahbi**, Professeur à l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), département Transferts, Écoulements, Fluides et Énergétique (TREFLE) de Bordeaux (France), pour son accueil, son aide scientifique, ses conseils approfondis et pour le temps qu'il m'a consacré tout au long de ce travail.

Je souhaite également exprimer toute ma reconnaissance à l'ensemble du personnel des laboratoires LTSE (ENSTI, Annaba), LETTM (Faculté des Sciences de Tunis) et I2M (Bordeaux), pour leur accueil, leur aide technique et la mise à disposition des moyens matériels nécessaires à la réalisation de cette recherche.

Enfin, j'adresse mes remerciements à toutes les personnes, enseignants, chercheurs et techniciens, qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce travail.

Résumé

*Cette thèse porte sur la modélisation du comportement thermomécanique des matériaux naturels déformables, tels que le bois d'eucalyptus et les feuilles de myrte, dans le cadre de procédés de séchage optimisés. Le bois d'eucalyptus, en raison de sa densité élevée et de sa forte teneur initiale en eau, présente des défis significatifs lors du séchage, notamment le risque de fissuration et de déformation. Pour remédier à ces contraintes, des expérimentations de séchage par micro-ondes en mode intermittent, alternant phases de séchage et de repos, ont été réalisées. Cette méthode permet un séchage homogène et rapide, tout en réduisant les gradients thermiques et hygrométriques responsables des contraintes internes. Concernant les feuilles de myrte, le séchage convectif à l'air chaud a été étudié à différentes températures pour déterminer la diffusivité effective et analyser l'influence des paramètres thermiques sur la cinétique de séchage. **L'ensemble des travaux contribue à une meilleure compréhension des phénomènes de transfert de chaleur et de masse dans ces matériaux déformables, tout en proposant des solutions innovantes pour optimiser leurs procédés de séchage.***

Le travail expérimental a été réalisé au Laboratoire LETTM à Tunis, avec des essais mécaniques complémentaires effectués à l'INRGREF de Tunis, tandis que la modélisation numérique des transferts thermiques et de masse a été développée au LTSE d'Annaba et au laboratoire I2M de Bordeaux. Une simulation tridimensionnelle sous COMSOL Multiphysics a été élaborée pour suivre en détail l'évolution de la température, de la pression et de la teneur en eau au sein du bois durant le séchage par micro-ondes intermittent. Les résultats obtenus fournissent des indications précieuses pour optimiser les paramètres de séchage en fonction des propriétés spécifiques du matériau, dans le but de minimiser les défauts structurels et de réduire les coûts énergétiques.

Cette recherche apporte une contribution innovante à la compréhension et à l'amélioration du séchage des matériaux déformables, en combinant des méthodes expérimentales avancées et des outils numériques performants. Elle répond aux exigences de qualité, de durabilité et d'efficacité énergétique, tout en ouvrant la voie à des procédés industriels plus durables et efficaces.

Abstract

*This thesis focuses on modeling the thermomechanical behavior of natural deformable materials, such as eucalyptus wood and myrtle leaves, within the framework of optimized drying processes. Eucalyptus wood, due to its high density and initial moisture content, poses significant challenges during drying, particularly the risk of cracking and deformation. To address these issues, microwave drying experiments in an intermittent mode, alternating drying and resting phases, were conducted. This method enables uniform and rapid drying while reducing the thermal and hygrometric gradients responsible for internal stresses. For myrtle leaves, hot-air convective drying was studied at different temperatures to determine the effective diffusivity and analyze the influence of thermal parameters on drying kinetics. **The overall work contributes to a better understanding of heat and mass transfer phenomena in these deformable materials while proposing innovative solutions to optimize their drying processes.***

The experimental work was carried out at the Laboratory LETTM in Tunis, with complementary mechanical tests performed at the INRGREF in Tunis. Meanwhile, the numerical modeling of heat and mass transfers was developed at the LTSE in Annaba and the I2M laboratory in Bordeaux. A three-dimensional simulation using COMSOL Multiphysics was developed to track in detail the evolution of temperature, pressure, and moisture content within the wood during intermittent microwave drying.

The results provide valuable insights for optimizing drying parameters based on the specific properties of the material, aiming to minimize structural defects and reduce energy costs. This research offers an innovative contribution to understanding and improving the drying of deformable materials by combining advanced experimental methods and powerful numerical tools. It addresses the demands for quality, durability, and energy efficiency, paving the way for more sustainable and efficient industrial processes.

Table des matières

Table des matières	II
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	XI
Nomenclatures	XII
INTRODUCTION GENERALE	1

PARTIE A: SÉCHAGE CONVECTIF DES FEUILLES DE MYRTE

Chapitre I SÉCHAGE CONVECTIF PAR L’AIR CHAUD DES FEUILLES DE MYRTE (MYRTUS COMMUNIS)	6
1 INTRODUCTION	6
2 APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES FEUILLES DE MYRTE	6
2.1 Généralités sur les myrtes	6
2.2 Les myrtes en Tunisie	7
2.2.1 Composition chimique	8
2.2.2 Huile essentielle	8
2.2.3 Facteurs influents	9
3 APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE SÉCHAGE CONVECTIF	9
4 CINÉTIQUE DE SÉCHAGE	10
4.1 Procédure de séchage	10
4.2 Courbe caractéristique de séchage de la CSC	12
4.3 Modélisation mathématique de la diffusivité effective	13
5 RESULTATS ET DISCUSSIONS	14
5.1 Courbes des cinétique de séchage	14
5.2 Courbe caractéristique de séchage	15
5.3 Diffusivité effective	17
6 CONCLUSION	21

PARTIE B: SÉCHAGE PAR MICROONDES DU BOIS D'EUCALYPTUS

Chapitre II REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE SÉCHAGE DU BOIS	23
1 INTRODUCTION	23
2 APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE BOIS	23
2.1 La filière bois	23
2.1 Généralités sur les eucalyptus	24
2.1.1 Eucalyptus dans le monde.....	24
2.1.2 Eucalyptus en Algérie	24
2.1.3 Emplois du bois d'eucalyptus	25
2.1.4 Anatomie du bois d'eucalyptus.....	25
2.1.5 Propriétés hydro-thermiques du bois d'eucalyptus.....	29
2.1.6 Propriétés physico-mécaniques du bois d'eucalyptus.....	29
2.1.7 Comportement mécanique du bois au cours du séchage.....	31
3 LES PROCÉDES DE SÉCHAGE DES PRODUITS DÉFORMABLES	33
3.1 Séchage à l'air libre.....	33
3.2 Séchage en étuve	33
3.3 Séchage sous vide	33
3.4 Séchage par déshumidification	34
3.5 Séchage par contact.....	34
3.6 Séchage convectif forcé à l'air	34
3.7 Séchage par micro-ondes	35
3.7.1 Propriétés diélectriques	36
4 APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE SÉCHAGE PAR MICRO-ONDES	37
4.1 Etudes expérimentales.....	37
4.2 Modélisation numérique.....	40
5 CONCLUSION	42

Chapitre III CARACTÉRISATION HYDRO-THERMIQUE DU BOIS

D'EUCALYPTUS GLOBULUS 43

1 INTRODUCTION	43
2 ISOTHERMES DE SORPTION	43
2.1 Equilibre hygroscopique	43
2.1.1 Activité de l'eau dans un produit	43
2.1.2 Détermination des isothermes de désorption	44
2.1.3 Description de la méthode d'échantillonnage.....	44
2.1.4 Mesure de la teneur en eau à l'équilibre	46
2.1.5 Méthode gravimétrique statique.....	47
2.1.6 Modélisation des isothermes de désorption	48
2.2 Résultats et discussions	49
2.2.1 Isothermes de désorption	49
2.2.2 Ajustement des données expérimentales avec des modèles mathématiques	50
2.3 Chaleur isostérique nette de désorption et entropie différentielle.....	54
2.4 Résultats et discussions	55
2.5 Théorie de compensation enthalpie-entropie.....	59
2.6 Résultats et discussions	59
2.7 Pression de propagation	61
2.8 Résultats et discussions	61
3 DENSITÉ ET RETRAIT VOLUMIQUE.....	62
3.1 Densité du bois	62
3.1.1 Protocol expérimental	62
3.1.2 Résultats et discussions	64
3.2 Point de saturation des fibres (PSF)	65
3.3 Modifications dimensionnelles du bois (Retrait et gonflement).....	66
3.3.1 Protocol expérimental	66
3.3.2 Résultats et discussions	67
4 CONDUCTIVITÉ THERMIQUE	69
4.1 Protocol expérimental	69
4.2 Résultats et discussions	70
5 CONCLUSION	71

**Chapitre IV INFLUENCE SÉCHAGE PAR MICRO-ONDES SUR LES PROPRIETES
MECANIQUES DU BOIS D'EUCALYPTUS..... 72**

1	INTRODUCTION	72
2	MATÉRIELS ET MÉTHODES	73
2.1	Préparation des échantillons.....	73
2.2	Four à microondes.....	74
2.3	Configuration expérimentale pour les essais mécaniques.....	75
2.4	Propriétés mécaniques du bois	76
2.4.1	Essai de flexion statique.....	76
2.4.2	Essai de compression axiale.....	76
3	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	77
3.1	Cinétique de séchage par micro-ondes.....	77
3.1.1	Séchage en mode continu.....	77
3.1.2	Séchage en mode intermittent	80
3.1.3	Qualité des échantillons après séchage	89
3.2	Propriétés mécaniques du bois	92
3.2.1	Effet de deux méthodes de séchage par micro-ondes sur les propriétés mécaniques du bois d'Eucalyptus globulus	92
3.2.2	Effet des différents processus de séchage sur les propriétés mécaniques du bois d'Eucalyptus globulus.....	98
4	CONCLUSION	104

**Chapitre V ANALYSE NUMÉRIQUE DES TRANSFERTS DE CHALEUR ET DE
MASSE LORS DU SÉCHAGE PAR MICRO-ONDES INTERMITTENT DU BOIS . 105**

1	INTRODUCTION	105
2	MATÉRIELS ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES.....	106
2.1	Configuration géométrique	106
3	MODÉLISATION MATHÉMATIQUE	107
3.1	Hypothèses simplificatrices du problème	107
3.2	Saturation du bois.....	107
3.3	Équations fondamentales	108
3.3.1	Propriétés diélectriques	109
3.3.2	Équation de transfert de chaleur dans le solide.....	109
3.3.3	Equations de conservation de masse.....	109
3.3.4	Équation de conservation de la pression totale dans la phase gazeuse	113
3.4	Conditions initiales et aux limites	114
3.4.1	Conditions initiales	114
3.4.2	Conditions aux limites	114
4	PARAMÈTRES ET PROPRIÉTÉS	115
4.1	Intermittence	116
4.2	Résolution numérique	116
5	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	117
5.1	Validation du modèle	117
5.2	Effet de la puissance des micro-ondes sur l'évolution de la température dans le bois 119	
5.3	Influence de la puissance des micro-ondes sur l'évolution de la teneur en humidité et de la pression interne de gaz dans le bois.	119
5.4	Distribution de la teneur en eau et de la température à travers l'épaisseur du bois .	122
5.5	Évolution de la température, de la teneur en eau et de la pression en fonction du temps de séchage pour différents niveaux de puissance.	127
6	CONCLUSION	129
	CONCLUSION GENERALE	- 130 -

Liste des figures

Figure I.1 Feuilles de myrte (<i>Myrtus communis</i>), LETTM-Tunis.	8
Figure I.2 Schéma de la boucle de séchage pour la mesure des paramètres des feuilles de myrte (Benmakhlouf et al. 2017).....	11
Figure I.3 Evolution de la teneur en eau dans les feuilles de myrte.....	15
Figure I.4 Courbe caractéristique de séchage des feuilles de myrte obtenue pour différentes expériences de séchage.....	16
Figure I.5 Variation du logarithme de la teneur en eau dans les feuilles de myrte en fonction du temps pour cinq températures de séchage, à humidité relative RH = 20%.....	18
Figure I.6 Relation de type Arrhenius entre la diffusivité effective et la température pour les feuilles de myrte.	19
Figure I.7 Diffusivité effective des feuilles de myrte pour le séchage convectif à différentes températures d'air.....	20
Figure II.1 Coupe d'un tronc.....	26
Figure II.2 Eléments histologiques constitutifs du bois feuillu (Almeida 2006).....	27
Figure II.3 Schéma simplifié des composants chimiques du bois (Mateus et al. 2017).....	28
Figure II.4 Variation de la contrainte en fonction de la déformation du matériau ligneux.....	31
Figure II.5 Contraintes transversales de séchage (Moutee 2006).	32
Figure II.6 Différents types de défauts de séchage (Haque 2011).	33
Figure II.7 Spectre électromagnétique (Ouertani 2014).....	35
Figure II.8 (a) Constante diélectrique complexe et mécanisme de polarisation des matériaux absorbant les micro-ondes à perte diélectrique; (b) La perméabilité complexe des matériaux absorbant les micro-ondes à perte magnétique (Si et al. 2022).....	37
Figure III.1 Préparation des échantillons de bois d'eucalyptus globulus pour les expériences de désorption.	45
Figure III.2 Dispositif expérimental pour la mesure des isothermes de désorption (LETTM-FST).....	46
Figure III.3 Teneur en eau à l'équilibre en fonction de l'humidité relative.....	49
Figure III.4 Graphique des résidus pour X_{eq} prédite à différentes températures en utilisant le modèle « Thermodynamique ».....	52

Figure III.5 Validation du modèle de désorption « Thermodynamique » à différentes températures.	53
Figure III.6 Courbe isostérique de désorption du bois d'eucalyptus globulus.	55
Figure III.7 Variation de la chaleur isostérique nette de désorption en fonction de X_{eq}	56
Figure III.8 Variation de l'entropie différentielle en fonction de la teneur en eau d'équilibre.	58
Figure III.9 Variation de l'enthalpie en fonction de l'entropie du bois d'eucalyptus globulus.	60
Figure III.10 Influence de la température sur l'isotherme de désorption de la pression de propagation.	62
Figure III.11 Dispositif expérimental pour mesurer de la densité au LETTM-FST.	64
Figure III.12 Variation de la densité du bois d'eucalyptus globulus en fonction de la teneur en eau.	65
Figure III.13 Le dessiccateur pour l'étude du changement dimensionnel (LETTM-FST).	67
Figure III.14 Évolution du retrait volumique.	68
Figure III.15 Dispositif expérimental de la méthode Hot Disk (CRTE- Borj Cédria).	69
Figure III.16 L'augmentation de la température.	70
Figure IV.1 Échantillonnage du bois d'eucalyptus globulus.	73
Figure IV.2 Four à micro-ondes au LETTM.	74
Figure IV.3 Appareil de test mécanique de flexion statique en trois points et de compression axiale.	75
Figure IV.3. Évolution simultanée de la température interne et de la teneur en eau à $P = 500$ W.	79
Figure IV.4 Évolution temporelle de la température interne du bois pour trois puissances des micro-ondes – séchage continu.	80
Figure IV.5 Évolution de la température interne du bois pour trois puissances des micro-ondes-séchage intermittent.	82
Figure IV.6 Profil simultané de la température interne et la teneur en eau lors du séchage intermittent à 800 W.	83
Figure IV.7 Effet de l'épaisseur sur la distribution et l'évolution de la température au cours du temps - Séchage intermittent à 300 W.	84
Figure IV.8 Effet de l'épaisseur sur la distribution et l'évolution de la température au cours du temps - Séchage intermittent à 500 W.	85

Figure IV.9 Effet de l'épaisseur sur la distribution et l'évolution de la température au cours du temps - Séchage intermittent.	86
Figure IV.12 Comparaison du temps de séchage par micro-ondes pour deux procédés.....	89
Figure IV.13 Influence du séchage continu sur le comportement final du bois séché sous différentes puissances de micro-ondes.	90
Figure IV.14 Influence du séchage intermittent sur le comportement final du bois séché sous différentes puissances de micro-ondes : (a) P =800W, (b) P =500W et (c) P =300W.....	91
Figure IV.15 Module d'élasticité on flexion statique du bois d'eucalyptus en fonction du mode de séchage par microondes.....	93
Figure IV.16 Contraintes maximales en flexion statique du bois d'eucalyptus en fonction de la méthode de séchage.....	94
Figure IV.17 Échantillons d' <i>Eucalyptus globulus</i> après les essais de compression axiale.....	94
Figure IV.18 Module d'élasticité en compression axiale du bois d'eucalyptus en fonction de la méthode de séchage.....	95
Figure IV.19 Contraintes maximales en compression axiale du bois d'eucalyptus en fonction de la méthode de séchage.....	96
Figure IV.20 Effet des différents processus de séchage sur le module d'élasticité en flexion statique.	99
Figure IV.21 Effet des différents processus de séchage sur la contrainte de rupture en flexion statique.	100
Figure IV.22 Effet des différents modes de séchage sur le module d'élasticité en compression axiale.	101
Figure IV.23 Effet des différents modes de séchage sur la contrainte de rupture en compression axiale.	101
Figure V.1 Configuration géométrique du problème simulé et maillage.....	106
Figure V.2 Stratégie de la modélisation dans COMSOL Multiphysics.	116
Figure V.3 Validation du modèle mathématique par l'expérimentation - Teneur en eau.....	118
Figure V.4 Validation du modèle mathématique par l'expérimentation - Température.....	118
Figure V.5 Profil de température du bois à la fin du séchage intermittent pour trois niveaux de puissance.	119
Figure V.6 Profil de la teneur en eau dans le bois après séchage intermittent à trois niveaux de puissance de micro-ondes.....	120
Figure V.7 Évolution de la pression relative interne de la phase gazeuse après 300, 6300 et 9000 secondes de séchage intermittent à P=300W.	121

Figures V.8 Évolution de la pression relative interne de la phase gazeuse après 300, 3300 et 5400 secondes de séchage intermittent à P=500W.	121
Figure V.9 Évolution de la pression relative interne de la phase gazeuse après 300, 2700 et 3600 secondes de séchage intermittent à P=800W.	122
Figure V.10 Profil de la teneur en eau durant le séchage par micro-ondes intermittent à trois niveaux de puissance.	123
Figure V.11 Profil de température durant le séchage par micro-ondes intermittent à trois niveaux de puissance.	124
Figure V.12 Profil de pression durant le séchage par micro-ondes intermittent à trois niveaux de puissance.	126
Figure V.13 Effet de la puissance incidente des micro-ondes sur l'évolution de la température interne du bois.	127
Figure V.14 Effet de la puissance incidente des micro-ondes sur l'évolution de la teneur moyenne en eau du bois.	128
Figure V.15 Influence de la puissance incidente des micro-ondes sur l'évolution de la pression du gaz dans le bois.	128

Liste des tableaux

Tableau I.1 Le classement botanique du myrte.	7
Tableau I.2 Valeurs de la diffusivité, de l'énergie d'activation apparente E_a et facteur de diffusion D_0 à différentes températures de flux d'air.	18
Tableau I.3 Valeurs de l'énergie d'activation pour différents produits similaires.	20
Tableau III.1. Humidité relative de chaque solution saline saturée.	47
Tableau III.2 Modèles mathématiques utilisés pour ajuster les isothermes de sorption d'humidité du bois d'eucalyptus globulus.	48
Tableau III.4 Analyse comparative des propriétés thermodynamiques dans les isothermes de désorption de l'eau parmi différentes espèces de bois (Bedjaoui et al. 2024).	60
Tableau III.5. Variation de la densité en fonction de la teneur en eau.	65
Tableau III.6 Classification du retrait volumique du bois.	66
Tableau III.7 Variation du retrait volumétrique en fonction de la teneur en eau du bois.	67
Tableau III.8 Valeurs de la conductivité thermique.	71
Tableau IV.1 Effet de la puissance sur la teneur en eau au cours de séchage continu.	77
Tableau IV.2 Effet de la puissance sur la teneur en eau au cours séchage intermittent.	81
Tableau IV.3 Moyennes et écarts types du module d'élasticité et du module de rupture en flexion et en compression axiale selon les conditions de séchage par micro-ondes.	92
Tableau IV.4 Analyse ANOVA – Influence du mode de séchage micro-ondes (continu et intermittent) sur les propriétés mécaniques du bois d' <i>Eucalyptus globulus</i>	97
Tableau IV.5 Valeurs moyennes du module d'élasticité (E) et module de rupture (σ) lors des essais de flexion statique et de compression axiale.	99
Tableau IV.6 Analyse ANOVA – Influence des méthodes de séchage sur les propriétés mécaniques de l' <i>Eucalyptus globulus</i>	103
Tableau V.1 Propriétés thermo-physiques utilisées dans le modèle.	115

Nomenclatures

Lettre latine	Définition	Unité
a, b, c	Paramètres des modèles de sorption	–
a_w	Activité de l'eau	–
C_p	Capacité calorifique	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
D_b	Diffusivité de l'eau liée	$m^2 \cdot s^{-1}$
e	Épaisseur de l'échantillon	m
\vec{E}	Champ électrique	$V \cdot m^{-1}$
h_m	Coefficient de transfert de masse	$m \cdot s^{-1}$
h_t	Coefficient de transfert thermique	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
HR	Humidité relative de l'air	%
N	Nombre d'observations	–
P_c	Pression capillaire	Pa
P_g	Pression de gaz	Pa
P_v	Pression de la vapeur d'eau	Pa
P_{vs}	Pression de vapeur de saturation	Pa
π	Pression d'étalonnage	Pa
Q_m	Chaleur générée par les micro-ondes	$W \cdot m^{-3}$
$Q_{st,n}$	Chaleur de sorption	$J \cdot mol^{-1}$
R	Constante des gaz parfaits	$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
R_v	Retrait volumique	–
S	Saturation	–
S	Surface	m^2
t	Temps	s
T	Température	°C (ou K)
T_β	Température isocénitique	K
T_{inf}	Température de l'environnement	K
V	Volume	m^3
X	Teneur en eau au temps t	$kg \text{ H}_2\text{O} \cdot kg^{-1} \text{ MS}$
X_0	Teneur en eau initiale	$kg \text{ H}_2\text{O} \cdot kg^{-1} \text{ MS}$
Z	Nombre de constantes dans le modèle de séchage	–
ΔG_β	Énergie de Gibbs	$J \cdot mol^{-1}$
ΔS	Entropie différentielle de sorption	$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$

Lettres grecques	Définition	Unité
ε	Porosité	–
ε'	Constante diélectrique	–
ε''	Facteur de pertes diélectriques	–
ε_0	Permittivité du vide	–
λ	Conductivité thermique	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
μ_g	Viscosité dynamique du gaz	Pa·s
μ_l	Viscosité dynamique du liquide	Pa·s
ρ	Masse volumique	$kg \cdot m^{-3}$

Indice	Signification
b	liée
c	capillaire
g	gaz
s	solide
v	vapeur

Abréviation	Signification
eff	Effective
ini	Initiale
MS	Matière sèche
PSF	Point de saturation des fibres
Sorp	Sorption
Surf	Surface

INTRODUCTION GENERALE

Dans le contexte de l'optimisation des procédés industriels, le séchage des matériaux naturels déformables présente un intérêt majeur: il permet de conserver leurs qualités fonctionnelles et d'assurer leur durabilité tout en réduisant les coûts énergétiques associés au processus. Parmi ces matériaux, le bois d'eucalyptus et les feuilles de myrte suscitent un intérêt particulier.

Les plantes médicinales et aromatiques, comme le myrte (*Myrtus Communis*), jouent un rôle important dans divers secteurs, tels que la parfumerie, la savonnerie et la pharmacie, en raison de leurs composés bioactifs. Ces plantes, saisonnières par nature, nécessitent un séchage adapté pour garantir leur disponibilité tout au long de l'année tout en conservant leurs propriétés biochimiques. Le séchage convectif à l'air chaud, ajusté en fonction de la température et de la vitesse de l'air, est particulièrement efficace pour préserver l'intégrité structurelle des feuilles de myrte tout en réduisant leur teneur en eau. Cette étude se concentre sur l'évaluation de la diffusivité effective du myrte et l'influence de la température sur ses cinétiques de séchage, des données qui permettent d'optimiser le séchage convectif et de prolonger la conservation de ce produit.

Le bois d'eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) attire particulièrement l'attention en raison de sa robustesse et de ses longues fibres, qui en font un matériau prisé dans l'industrie du bois et de la pâte à papier. Cependant, sa structure dense et sa forte teneur en eau initiale rendent son séchage complexe, exposant à des défauts tels que des fissures ou des déformations structurelles lorsque le processus est mal contrôlé. Afin d'atténuer ces risques, des techniques de séchage contrôlé, réduisant les gradients de température et d'humidité, sont indispensables. Dans ce contexte, la technique innovante de séchage par micro-ondes émerge comme une solution prometteuse : elle permet un séchage rapide et homogène, réduisant ainsi les défauts internes tout en améliorant l'efficacité énergétique.

Cette recherche s'est appuyée sur une collaboration interdisciplinaire entre plusieurs laboratoires, chacun contribuant à une étape clé du projet. Les expériences de séchage ont été conduites au Laboratoire d'Énergétique et des Transferts Thermiques et Massiques (LETTM) de la Faculté des Sciences de Tunis, équipé d'un four à micro-ondes de précision et de soufflerie climatique. Les propriétés mécaniques du bois séché ont été étudiées au Laboratoire

Technologie du Bois et Valorisation des Produits Forestiers de l'INRGREF et au Centre Technique de l'Industrie du Bois et de l'Ameublement (CETIBA). Parallèlement, la modélisation mathématique des transferts de chaleur et de masse a été développée au Laboratoire de Technologie des Systèmes Energétiques (LTSE) à Annaba, en Algérie, et enrichie par des simulations tridimensionnelles réalisées à l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux (I2M) avec le logiciel COMSOL Multiphysics.

Cette thèse s'intitule « Modélisation du comportement thermomécanique des produits déformables au cours d'un procédé de séchage » et s'articule en deux grandes parties :

La première partie est consacrée aux feuilles de myrte, un matériau végétal fin, homogène et sensible aux conditions thermiques. Elle repose sur un chapitre unique combinant une recherche bibliographique, une étude expérimentale du séchage convectif à l'air chaud, l'analyse des cinétiques de séchage et la détermination de paramètres de transfert tels que la diffusivité effective, l'énergie d'activation et le facteur de diffusion. Une modélisation mathématique est également proposée afin de représenter le comportement de ce matériau au cours du séchage et d'optimiser le procédé. Cette première phase méthodologique a permis de valider les outils expérimentaux et analytiques nécessaires à l'étude de produits déformables.

La seconde partie est dédiée au bois d'eucalyptus (*Eucalyptus globulus*), un matériau robuste et prisé dans l'industrie pour ses longues fibres, mais dont le séchage reste complexe en raison de sa forte teneur en eau initiale et de sa structure anisotrope. Mal maîtrisé, ce procédé peut engendrer des défauts tels que fissures, déformations ou collapsus. Afin d'y remédier, des techniques de séchage contrôlé sont nécessaires, en particulier le séchage par micro-ondes, qui se distingue par sa capacité à chauffer le matériau de manière volumique, homogène et rapide, tout en limitant les gradients internes.

Le travail sur le bois d'eucalyptus est réparti en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, (Deuxième dans la thèse), une revue bibliographique sur les méthodes de séchage des produits déformables est présentée, situant notre travail dans le contexte des recherches actuelles. Ce chapitre propose une analyse approfondie des méthodes actuelles de séchage adaptées aux matériaux déformables. Il met en lumière les défis particuliers posés par le bois d'eucalyptus. Les particularités de ce matériau sont détaillées pour expliquer les difficultés de séchage. Ce chapitre examine diverses techniques de séchage, leurs avantages et limites, en fonction des propriétés thermiques des matériaux et de leur sensibilité aux traitements thermiques. Cette

recherche bibliographique pose les fondations théoriques pour les analyses expérimentales et numériques des chapitres suivants.

Dans le deuxième chapitre, (Troisième dans la thèse), nous nous intéressons à la caractérisation des propriétés thermo-physiques du bois d'eucalyptus, essentielles pour anticiper son comportement au séchage. Les propriétés comme les isothermes de désorption, la densité et le retrait volumétrique sont analysées pour mieux comprendre les transformations internes du matériau pendant le séchage. Ces résultats fournissent une base solide pour les modélisations plus avancées des transferts de chaleur et de masse abordées dans le quatrième chapitre.

Dans le troisième chapitre, (Quatrième dans la thèse) nous étudions la cinétique de séchage par micro-ondes du bois d'eucalyptus ainsi que son influence sur les propriétés mécaniques du matériau. Cette partie analyse les mécanismes de transfert et les paramètres déterminants pour l'efficacité du procédé, notamment la puissance des micro-ondes et le mode de fonctionnement (continu ou intermittent). L'objectif est de réduire le temps de séchage, de limiter les défauts mécaniques et de préserver la qualité structurelle du bois. Une attention particulière est portée aux phénomènes internes de transfert de chaleur et de masse, permettant d'identifier des conditions opératoires optimales. Parallèlement, l'impact du séchage sur les propriétés mécaniques est évalué à travers des essais de flexion statique et de compression axiale, afin de quantifier les contraintes induites par le traitement thermique. Les résultats obtenus offrent des recommandations concrètes pour optimiser la résistance du bois séché et en garantir la durabilité, renforçant ainsi son potentiel pour des applications industrielles exigeantes.

Dans le quatrième chapitre, (Cinquième dans la thèse) une modélisation tridimensionnelle avancée des transferts de chaleur, de masse et de pression de gaz dans le bois d'eucalyptus soumis à un séchage par micro-ondes intermittent est proposée. Grâce au logiciel COMSOL Multiphysics, le modèle développé suit l'évolution de la teneur en eau, de la température et de la pression de gaz dans bois. Cette simulation permet d'optimiser les paramètres de séchage pour minimiser les contraintes internes et assurer la qualité du produit fini.

Objectifs de recherche

Cette thèse a pour objectif principal d'exploiter les résultats expérimentaux pour optimiser les techniques de séchage appliquées à des matériaux naturels déformables, comme le bois d'eucalyptus et les feuilles de myrte. La plus grande partie de ce travail sera consacrée à l'étude du bois d'eucalyptus, avec pour objectifs spécifiques de limiter les chocs thermiques, réduire les risques de déformations de surface causées par les variations de température, et améliorer la qualité finale en assurant des propriétés mécaniques supérieures ainsi qu'un état de surface optimal. Cela inclut le développement et l'optimisation d'un programme de séchage spécifique adapté à ce bois feuillu, en prenant en compte ses propriétés thermomécaniques. En ce qui concerne les feuilles de myrte, l'étude se concentre sur l'analyse des cinétiques de séchage en fonction de la température de l'air. Elle a pour objectif de caractériser la diffusivité effective, le facteur de diffusion et l'énergie d'activation à différentes températures, en utilisant un modèle mathématique appelé méthode de la pente. Cette approche vise à approfondir la compréhension des mécanismes thermiques et diffusifs régissant le séchage convectif de ce matériau.

Cette double approche aspire à fournir des solutions innovantes et adaptées pour chaque type de matériau étudié, contribuant ainsi à une amélioration significative des processus de séchage en termes d'efficacité, de qualité et de durabilité.

**PARTIE A: SÉCHAGE CONVECTIF DES FEUILLES
DE MYRTE**

Chapitre I SÉCHAGE CONVECTIF PAR L'AIR CHAUD DES FEUILLES DE MYRTE (MYRTUS COMMUNIS)

1 INTRODUCTION

Les feuilles de myrte (*Myrtus Communis*) sont largement valorisées pour leurs propriétés aromatiques et médicinales, notamment en Tunisie. Le séchage est une étape cruciale de leur transformation, visant à assurer leur conservation tout en préservant leurs qualités.

En raison de leur structure fine et de leur sensibilité thermique, le séchage des feuilles de myrte nécessite une approche adaptée. Ce chapitre porte sur le séchage convectif à air chaud, en étudiant la cinétique de perte d'humidité à différentes températures. L'analyse permet de déterminer la diffusivité effective par la méthode de la pente, et de construire une courbe caractéristique de séchage (CCS) pour décrire le comportement du produit.

L'objectif est d'identifier les conditions optimales de séchage permettant de concilier efficacité énergétique et préservation de la qualité du produit.

2 APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES FEUILLES DE MYRTE

2.1 Généralités sur les myrtes

Le myrte (*Myrtus communis*) appartient à la famille des myrtacées et est originaire de la région méditerranéenne, englobant l'Afrique du Nord, l'Europe du Sud et le Moyen-Orient. Le terme « myrte » provient du latin *Myrtus communis*, dérivé du grec, qui signifie « parfum » (Kadioğlu Yaman *et al.*, 2020). Le classement botanique du myrte est synthétisé dans le Tableau I.1 (Mimica-Dukic *et al.*, 2010; Aleksic and Knezevic, 2014).

Tableau I.1 Le classement botanique du myrte.

Règne	Plante
Sous-règne	Tracheobionta
Embranchement	Magnoliophyta
Sous- Embranchement	Magnoliophytina
Sous-classe	Rosidae
Ordre	Myrtales
Famille	Mytaceae
Genre	Myrtus
Espèce	communis L.
Variétés	M. communis var. italica L. M. communis var. baetica L. M. communis var. lusitanica L.

2.2 Les myrtes en Tunisie

Le myrte (*Myrtus communis*) est une plante aromatique et médicinale qui occupe une place importante dans la flore méditerranéenne, y compris en Tunisie. Le climat méditerranéen, avec ses étés secs et chauds et ses hivers doux et humides, est particulièrement favorable à la croissance du myrte (Rahimi *et al.*, 2015). En Tunisie, cette plante est largement répandue dans les régions côtières et les zones de maquis, où elle pousse de manière spontanée (Figure I.1) (Berka-Zougali *et al.*, 2010). Le myrte est valorisé pour ses feuilles, ses baies, et ses fleurs, qui contiennent des huiles essentielles riches en composés bioactifs (Mimica-Dukic *et al.*, 2010). Traditionnellement, il est utilisé en médecine populaire pour ses vertus thérapeutiques, notamment comme antiseptique, antispasmodique, et anti-inflammatoire. Ses applications s'étendent également à la parfumerie, à la cosmétique, et à la gastronomie (Mimica-Dukic *et al.*, 2010; Aleksic and Knezevic, 2014; Kadioğlu Yaman *et al.*, 2020). En Tunisie, les feuilles et les baies de myrte sont couramment employées pour préparer des infusions, des liqueurs, et des extraits aromatiques.

De plus, le myrte revêt une importance économique pour les communautés locales, qui récoltent cette plante à des fins commerciales. L'exploitation du myrte pour la production d'huiles essentielles est un secteur en croissance, et la demande internationale pour ces produits renforce l'intérêt pour une exploitation durable et optimisée de cette ressource naturelle (Mimica-Dukic *et al.*, 2010; Rahimi *et al.*, 2015). Dans ce contexte, le séchage joue un rôle clé en permettant

de conserver les propriétés aromatiques et médicinales des feuilles de myrte, assurant ainsi une qualité constante du produit destiné à l'exportation et à l'utilisation locale (Bedjaoui *et al.*, 2023).



Figure I.1 Feuilles de myrte (*Myrtus communis*), LETTM-Tunis.

En Tunisie, la collecte et la transformation du myrte s'inscrivent souvent dans des pratiques artisanales, mais des initiatives de modernisation cherchent à améliorer les techniques de récolte et de séchage afin d'augmenter la rentabilité et la qualité des produits finis. L'optimisation des méthodes de séchage, comme le séchage convectif, est essentielle pour maximiser le rendement en huiles essentielles tout en préservant les qualités bioactives du myrte tunisien (Berka-Zougali *et al.*, 2010; Aleksic and Knezevic, 2014; Bedjaoui *et al.*, 2023).

2.2.1 Composition chimique

La composition de l'huile essentielle de *Myrtus communis* L., obtenue par hydrodistillation des feuilles, est dominée par les monoterpènes, avec l' α -pinène et le 1,8-cinéole comme composants principaux (Senatore *et al.*, 2006; Bouzabata *et al.*, 2013; Aleksic and Knezevic, 2014). Les extraits méthanoliques des feuilles, tiges et fleurs révèlent une riche présence de composés phénoliques, comprenant des acides phénoliques, des flavonoïdes et des gallotanins (Aleksic and Knezevic, 2014).

2.2.2 Huile essentielle

Les huiles essentielles sont des extraits volatils et odorants obtenus par distillation à la vapeur d'eau, pressage ou incision des plantes. L'huile essentielle de myrte est extraite par distillation des fleurs, des feuilles et des tiges de myrte (Rahimi *et al.*, 2015).

2.2.3 Facteurs influents

Divers facteurs, tels que la température, l'humidité, la composition du sol, la partie de la plante utilisée, le cycle de croissance et la méthode d'extraction, influencent la composition chimique de l'huile essentielle de myrte et sa teneur (Senatore *et al.*, 2006).

3 APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE SÉCHAGE CONVECTIF

Grâce à ses conditions contrôlables, le séchage à l'air conventionnel est l'opération de déshydratation la plus souvent employée dans les industries alimentaire et chimique (Nicoletti, Telis-Romero and Telis, 2001). Dans la littérature, plusieurs chercheurs ont étudié le séchage convectif et son impact sur la diffusivité effective ainsi que sur les propriétés biochimiques essentielles. Parmi ces travaux, citons :

(Panchariya, Popovic and Sharma, 2002) ont examiné la cinétique de séchage du thé noir à différentes températures et vitesses d'air, en utilisant divers modèles semi-théoriques. Le modèle de Lewis a montré une meilleure précision pour décrire le séchage en couche mince du thé. Le séchage du thé s'est essentiellement produit pendant la période de taux décroissant, avec une énergie d'activation de 406,02 kJ/mol. Les résultats soulignent l'influence de la température et de la vitesse de l'air sur les constantes de séchage, et offrent une base pour la simulation du séchage en lit profond des particules de thé.

(Jin Park, Vohnikova and Pedro Reis Brod, 2002) ont étudié les isothermes de désorption des feuilles de menthe à trois températures pour mieux conserver cette plante médicinale et aromatique. Les courbes expérimentales ont été ajustées à divers modèles, dont BET, GAB, Oswin et Peleg, pour représenter les isothermes de désorption de la menthe. Les données de séchage, obtenues à différentes températures et vitesses d'air, ont été analysées via le modèle diffusif afin de calculer la diffusivité effective. La valeur de l'énergie d'activation a été estimée à 82928.5 J/mol, suivant une relation de type Arrhenius. Le modèle empirique de Page a montré un meilleur ajustement par rapport au modèle de Fick, à l'exception de certaines conditions spécifiques.

(Doymaz, 2014) a étudié le séchage des feuilles de laurier dans un séchoir à convection de type armoire à l'échelle pilote, en utilisant une vitesse d'air constante de 2 m/s à des températures de 50, 60 et 70 °C. L'augmentation de la température de l'air a accéléré le taux de séchage et réduit le temps de séchage. Les données expérimentales de séchage ont été appliquées à 14

modèles de séchage en couche mince, et une analyse de régression non linéaire a permis de relier les paramètres des modèles aux conditions de séchage.

(Rahimi *et al.*, 2015) ont étudié l'impact des conditions de séchage par convection sur le rendement et la composition chimique de l'huile essentielle des feuilles de *Myrtus communis*. Les résultats ont montré que l'augmentation de la température de séchage réduisait de manière significative la teneur en huile essentielle, soulignant ainsi une variation du rendement et de la composition chimique en fonction des différentes méthodes de séchage.

(Benmakhlouf *et al.*, 2017) ont étudié la diffusion de l'humidité pendant le séchage convectif du cuir. Ils ont estimé le coefficient de diffusion efficace à l'aide d'une méthode dérivée de la loi de Fick. Les expériences ont été menées à des températures de l'air chaud variant de 40 à 60 °C, avec une vitesse de l'air de 1 m/s. Les résultats ont montré que la température de l'air a un impact significatif sur la diffusivité hydrique dans l'échantillon de cuir, avec une diffusivité moyenne variant de $5,87 \times 10^{-11}$ à $14,48 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$. L'énergie d'activation pour le séchage convectif a été déterminée à 38,46 kJ/mol. Les résultats confirment une relation exponentielle entre la diffusivité effective et la température.

4 CINÉTIQUE DE SÉCHAGE

4.1 Procédure de séchage

L'unité de séchage utilisée est une soufflerie climatique, à grille horizontale, et à circuit fermé, disponible au Laboratoire des Transferts Energétiques et Thermiques et Massifs à la Faculté des Sciences de Tunis (figure I.2). Il permet le contrôle de la température, de l'humidité relative et de la vitesse de l'air de séchage les plus couramment utilisés dans les processus de séchage par convection pour les basses et moyennes températures. Le flux d'air est produit par un ventilateur centrifuge, passant par des résistances chauffantes pour maintenir son élévation de température. L'humidité relative de l'air est fournie par un générateur de vapeur (Benmakhlouf *et al.*, 2017).

L'air est brassé par un ventilateur centrifuge, qui passe par des résistances chauffantes pour maintenir la température. Un générateur de vapeur assure le maintien de l'humidité relative de l'air. Lorsque vous arrivez dans la veine d'essai, la température et l'humidité relative sont contrôlées automatiquement par un automate programmable (PLC) relié à un capteur sensible piloté par un ordinateur. A l'aide d'un variateur de vitesse, le taux d'évaporation peut être

contrôlé. Un condenseur placé directement devant la veine d'essai condense l'eau contenue dans le flux. L'air retourne au ventilateur à travers un joint, ce qui permet d'économiser l'énergie de séchage. La perte de masse du produit est suivie dans le temps par un pesage continu, à l'aide d'une balance numérique d'une précision de $\pm 0,001$ g (Mettler Toledo), placée à l'extérieur du séchoir et reliée à un système d'acquisition et de traitement des données, permettant l'enregistrement de l'évolution de la masse du produit à intervalles réguliers. Les échantillons sont exposés à de l'air chaud de séchage dirigé verticalement (Figure I.2). Nous avons utilisé des échantillons de feuilles de myrte tunisien, placés sur une grille perforée. Tous les échantillons de feuilles de myrte ont été fournis par les techniciens du centre de recherche tunisien : "Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF)" l'épaisseur des échantillons était de 5×10^{-3} m. La masse initiale des échantillons était d'environ 20 g et la teneur en eau sèche initiale était de 1,22 à 1,24 (kg H₂O/kg de matière sèche). Les essais ont été réalisés à cinq températures différentes : 40, 45, 50, 55 et 60 °C, avec une vitesse de 2 m/s et une humidité de l'air de 20 %. Un micro-ordinateur a enregistré le processus de séchage tout en mesurant en continu la masse du produit à intervalles de temps constants.

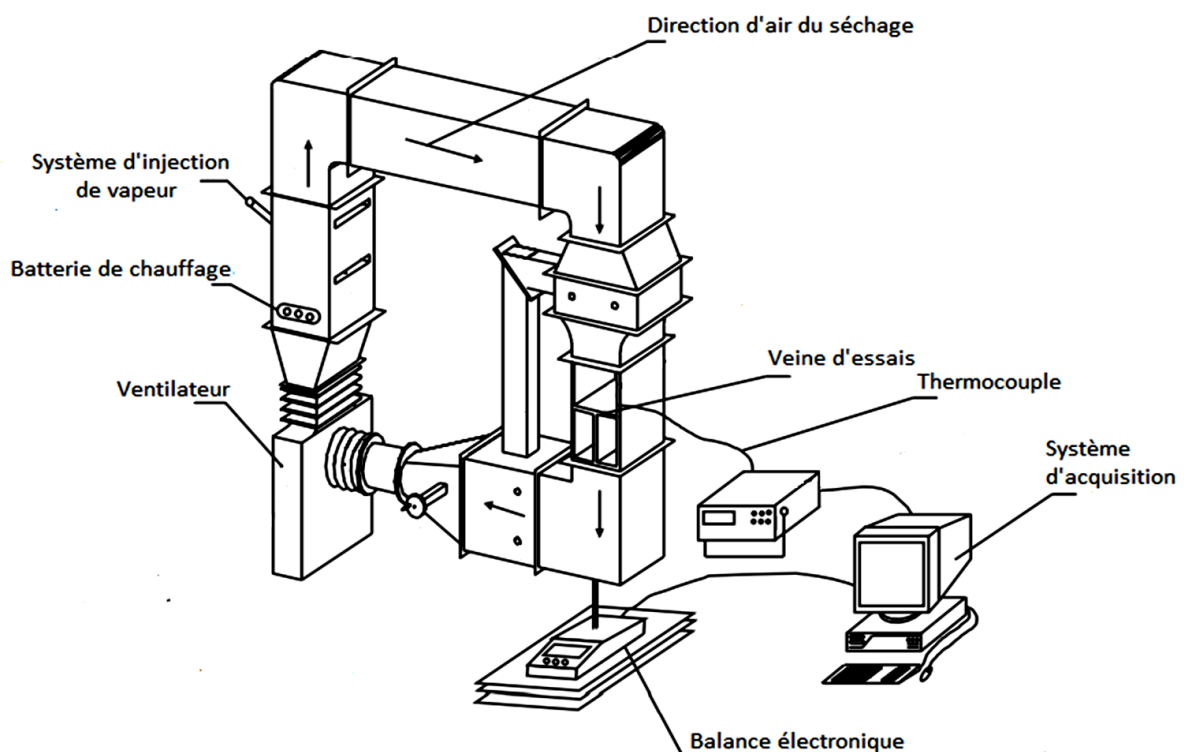


Figure I.2 Schéma de la boucle de séchage pour la mesure des paramètres des feuilles de myrte (Benmakhlouf *et al.*, 2017).

4.2 Courbe caractéristique de séchage de la CSC

La courbe caractéristique de séchage CCS est définie par une courbe de vitesse de séchage normalisée qui combine les différentes courbes d'évolution de la teneur en eau et qui est valable pour toutes les conditions de fonctionnement (Rahimi *et al.*, 2015). Des modèles ont été développés qui peuvent être utilisés pour analyser le processus de séchage d'une variété de produits et de conditions d'air en utilisant seulement quelques expériences de séchage en laboratoire. Elle est déterminée en fonction de la teneur en eau réduite en traçant la vitesse de séchage normalisée en fonction de la vitesse de séchage au cours de la première période (Rafiee *et al.*, 2010).

$$XR = \frac{X - X_{eq}}{X_{cr} - X_{eq}} \quad (I.1)$$

$$f = \frac{\left(\frac{dX}{dt}\right)_t}{\left(\frac{dX}{dt}\right)_i} \quad (I.2)$$

Pour les produits agricoles, la détermination de la teneur en eau critique X_{cr} et la vitesse de séchage $\left(\frac{dX}{dt}\right)_0$ pendant la première phase est difficile. La courte période où la vitesse de séchage est maximale, et qui est souvent considérée comme la première période car la période de séchage à vitesse constante n'est pas évidente pour notre produit. Cette dernière transformation permet de regrouper toutes les cinétiques sur un même graphique, appelé courbe caractéristique de séchage CCS, comme le montre la figure I.4.

$$XR = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (I.3)$$

$$f = \frac{\left(\frac{dX}{dt}\right)_t}{\left(\frac{dX}{dt}\right)_0} \quad (I.4)$$

Ainsi, en employant la courbe de séchage typique, une seule courbe de vitesse de séchage normalisée peut être utilisée pour représenter les courbes de vitesse de séchage d'un produit donné recueillies dans différentes conditions d'air. Cette courbe peut être utilisée pour extrapoler les données de la cinétique de séchage des feuilles de myrte dans un séchoir à convection.

4.3 Modélisation mathématique de la diffusivité effective

La teneur en eau réduite XR des feuilles de myrte dans les expériences de séchage est donnée par l'équation (I.1). Pour le cas unidimensionnel en coordonnées cartésiennes, la deuxième loi de diffusion de Fick (Grossel, 1998), l'équation (I.5), peut être utilisée pour décrire le comportement de séchage des feuilles de myrte.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (I.5)$$

Cette équation a été utilisée en supposant un mouvement d'humidité unidimensionnel sans changement de volume, une diffusivité constante, une distribution uniforme de l'humidité et une résistance externe négligeable. L'équation a la solution suivante proposée par Crank (1975) dans le cas d'une géométrie plane (Goyal *et al.*, 2006):

$$XR = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 * \pi^2 * D_{eff}}{e^2}(t)\right) \quad (I.6)$$

L'équation (I.6) peut être simplifiée en ne prenant que le premier terme de la somme, de sorte qu'elle peut être exprimée comme suit :

$$XR = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 * D_{eff}}{e^2}(t)\right) \quad (I.7)$$

La diffusivité effective a été obtenue lorsque $\ln(XR)$ a été tracé en fonction de t.

$$\ln(XR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 * D_{eff}}{e^2}(t) \quad (I.8)$$

Dans le cas du séchage convectif des feuilles de myrte, nous supposons que la teneur en eau d'équilibre à la surface est nulle. Or, il est démontré dans la littérature que les peaux peuvent être totalement séchées lorsque la convection est utilisée (Belghit, Kouhila and Boutaleb, 2000). Par conséquent, $X_{eq} = 0$ sera supposé dans cette situation. La diffusivité peut être déterminée à l'aide de l'équation (I.8) en traçant le logarithme de la courbe de séchage normalisée en fonction du temps. La pente de cette courbe est proportionnelle à la diffusivité, comme l'indique l'équation (I.9).

$$La\ pente = -\frac{\pi^2 * D_{eff}}{e^2} \quad (I.9)$$

La diffusivité effective de l'eau estimée à partir des données de séchage représente une propriété

globale de transport de masse de l'humidité dans le matériau, qui peut inclure la diffusion de liquide et de vapeur, la vaporisation, la condensation et d'autres mécanismes possibles de transfert de masse (Belghit, Kouhila and Boutaleb, 2000). La variation de la diffusivité effective en fonction de la teneur en eau peut toutefois être assez complexe, en particulier dans les produits poreux. La diffusivité effective peut être liée à la variation de la température par l'expression d'Arrhenius (Equation I.10).

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (\text{I.10})$$

Où D_0 est le facteur de diffusion (m^2/s), E_a est l'énergie d'activation (kJ/mol), T est la température de l'air de séchage (K), R est la constante des gaz parfaits $8,314$ (J/mol K). L'équation (I.10) peut être linéarisée sous forme logarithmique comme suit (Belghit, Kouhila and Boutaleb, 2000; Benmakhlouf *et al.*, 2017) :

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{RT} \quad (\text{I.11})$$

E_a et D_0 peuvent être déterminées en traçant $\ln(D_{eff})$ en fonction de $\frac{1}{T}$.

5 RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.1 Courbes des cinétique de séchage

Les courbes de séchage de tous les essais de séchage effectués sont présentées dans la figure I.3. Dans ces figures, le taux d'humidité XR a été tracé en fonction du temps, pour différentes valeurs de la température de l'air et pour la valeur de la vitesse de l'air maintenue constante. L'appareil utilisé pour enregistrer la masse de l'échantillon au cours du temps et l'évolution temporelle de la température de l'échantillon. Nous utiliserons les résultats des tests pour différentes températures, tous effectués à la même vitesse et à la même humidité relative. Les courbes de séchage normalisées en fonction du temps sont présentées dans la figure I.3 pour différentes températures à une vitesse d'air de 2 m/s. Ainsi, la température est considérée comme le principal facteur contrôlant la vitesse de séchage, comme cela a été mentionné dans de nombreuses études (Lahsasni *et al.*, 2003; Sander, 2007; Rahimi *et al.*, 2015). Le séchage pour la phase de vitesse décroissante est contrôlé par la diffusion de l'eau dans le solide. Il s'agit d'un mécanisme complexe impliquant l'eau à l'état de vapeur et à l'état liquide, qui est très

souvent caractérisé par une diffusivité effective. La température de l'air de séchage a une grande influence sur le processus de séchage, de sorte que lorsque la température de l'air augmente, la teneur en eau des feuilles diminue. Cet effet est dû à l'apport de chaleur au produit, qui augmente avec la température de l'air. Par conséquent, la vitesse de diffusion de l'eau dans le produit augmente avec la température.



Figure I.3 Evolution de la teneur en eau dans les feuilles de myrte.

5.2 Courbe caractéristique de séchage

L'équation caractéristique du taux de séchage des feuilles de myrte (*Myrtus Communis*) a été obtenue avec le programme "Origin 9.0" (Equation I.12), en lissant les points expérimentaux avec une fonction polynomiale de degré 3 ($R^2=0,998$) :

$$f = 0.01475 + 0.92622 * X + 0.13525 * X^2 - 0.03814 * X^3 \quad (I.12)$$

Le taux de séchage est le plus élevé au cours de la première phase et diminue progressivement avec le temps. Ceci est dû à la faible résistance à l'humidité interne du matériau au début du processus de séchage. Ces résultats correspondent à ceux de plusieurs autres chercheurs (Belghit, Kouhila and Boutaleb, 2000; Azzouz *et al.*, 2002; Babalis and Belessiotis, 2004; Benmakhlouf *et al.*, 2017). Cette constatation fournit des informations sur l'augmentation

progressive de la résistance interne à la chaleur et au déplacement de la masse. Ainsi, la diffusion de l'eau dans le solide est le mécanisme physique le plus plausible qui domine le mouvement de l'humidité dans les échantillons de myrte.

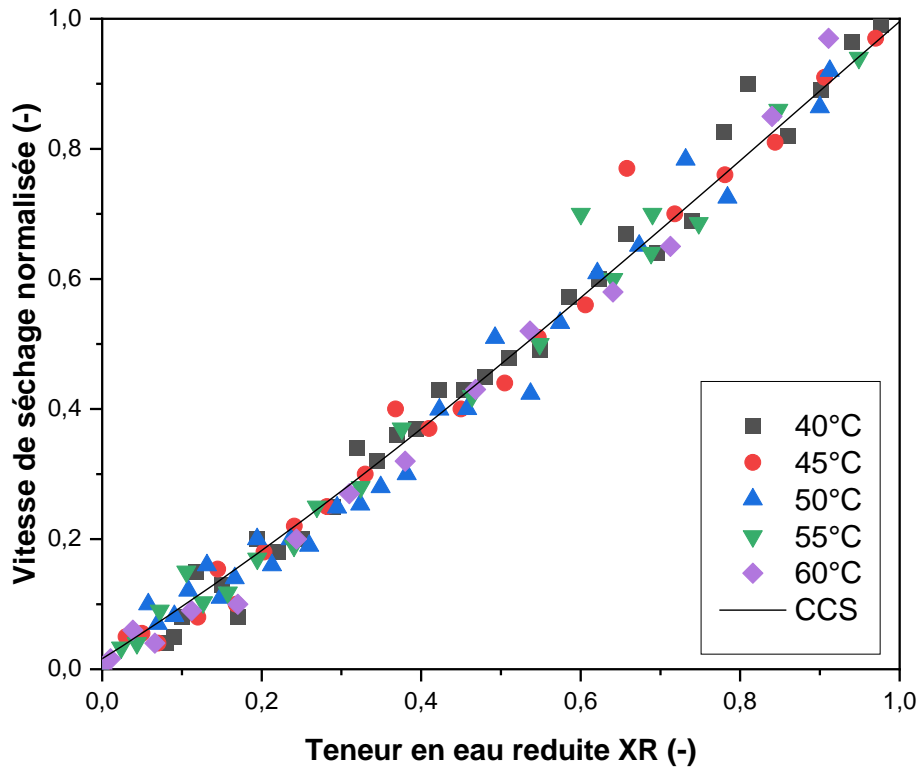


Figure I.4 Courbe caractéristique de séchage des feuilles de myrte obtenue pour différentes expériences de séchage.

Par conséquent, une température élevée nécessite un effort important pour le transfert de chaleur et accélère le processus de séchage car la température entraîne une grande différence de pression de vapeur (loi de Hertz Knudsen). La différence entre la pression partielle et la pression de vapeur saturée de l'eau dans l'air diminue à mesure que la température augmente, ce qui constitue l'un des principaux facteurs de séchage. En outre, la quantité d'eau libérée au début est très importante, car le taux d'élimination de l'eau est élevé pendant cette phase. Au cours du processus de séchage, l'eau libre est rapidement éliminée du produit. Ainsi, dans les phases finales, l'eau est à peine éliminée, ce qui ralentit le processus de séchage. C'est pourquoi la température de l'air est considérée comme le principal paramètre influençant le séchage des produits à l'air.

5.3 Diffusivité effective

Les données obtenues lors des opérations de séchage ont été utilisées pour calculer la diffusivité effective de l'eau D_{eff} dans les feuilles de myrte (*Myrtus Communis*). Les courbes ont montré un comportement de séchage cohérent contrôlé par la diffusion dans toutes les conditions de fonctionnement. En outre, une influence significative de la température de l'air sur le séchage a pu être observée dans ces courbes. Comme le montre la figure I.2, le temps de séchage diminue considérablement à mesure que la température de séchage augmente (Hasatani, Itaya and Hayakawa, 1992). L'effet de la température sur les diffusivités effectives de l'eau est illustré dans le tableau I.2.

Par conséquent, nous avons utilisé les courbes $\ln(XR)$ en fonction du temps, comme indiqué dans l'équation (I.8), pour extraire les valeurs des diffusivités effectives de l'eau dans les échantillons de myrte au cours du processus de séchage pour cinq températures de flux d'air (40, 45, 50, 55 et 60 °C). Selon une loi de type Arrhenius, le coefficient D_0 augmente avec la température de l'air, l'énergie d'activation E_a est un paramètre à ajuster, en supposant que l'énergie d'activation est constante. Cela devrait être dû au transfert d'énergie élevé du flux d'air lorsque la température est augmentée. Le volume des pores augmente avec la température (Madamba, Driscoll and Buckle, 1996), ce qui pourrait également favoriser l'élimination des molécules d'eau (Hasatani, Itaya and Hayakawa, 1992).

La figure I.5 montre des courbes de séchage normalisées ajustées à des fonctions linéaires qui minimisent l'erreur quadratique moyenne. La théorie de la diffusion de l'eau peut expliquer le mécanisme moteur de la période de chute du taux de séchage dans le séchage par convection des feuilles de myrte, sur la base de l'excellente concordance entre les lignes et les courbes ajustées. L'équation (I.10) de type Arrhenius décrit l'effet de la température sur la diffusivité effective. Cela correspond aux relations décrites dans la littérature (Grossel, 1998; Azzouz *et al.*, 2002). Les diffusivités effectives présentées dans cette étude se situent dans la fourchette des diffusivités mentionnées pour d'autres produits, à savoir de 10^{-8} à 10^{-11} m²/s (Hermassi *et al.*, 2017; Ghnimi, Hassini and Bagane, 2019). Les valeurs moyennes D_{eff} pour le myrte dans notre étude se situent entre $1.266 \cdot 10^{-10}$ et $13.06 \cdot 10^{-10}$ m²/s.

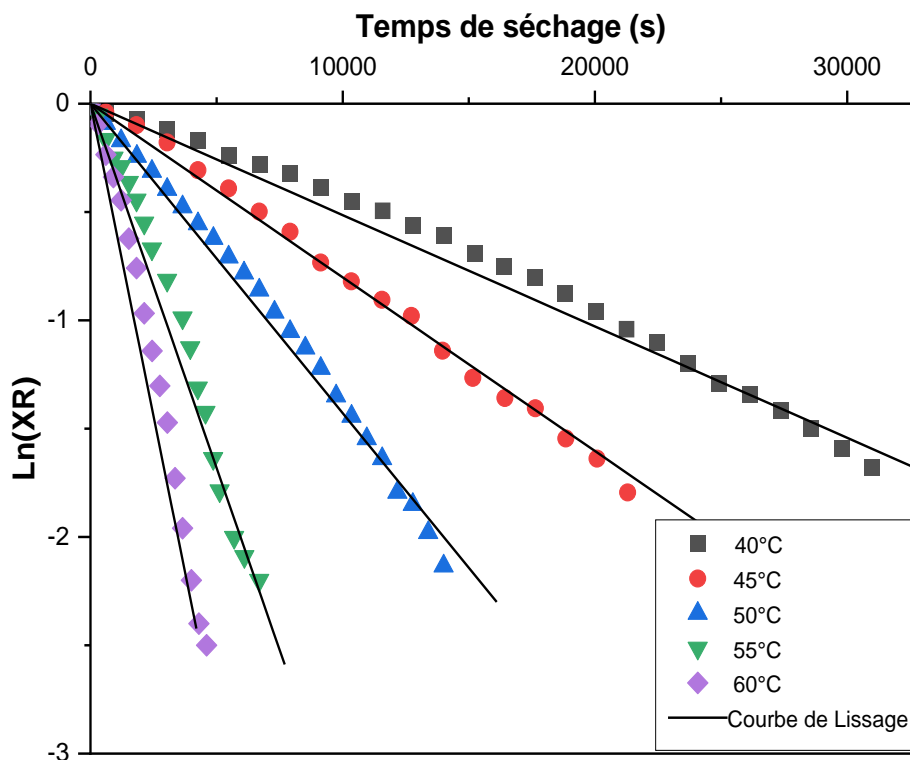


Figure I.5 Variation du logarithme de la teneur en eau dans les feuilles de myrte en fonction du temps pour cinq températures de séchage, à humidité relative $RH = 20\%$.

Tableau I.2 Valeurs de la diffusivité, de l'énergie d'activation apparente E_a et facteur de diffusion D_0 à différentes températures de flux d'air.

T(°C)	40	45	50	55	60
D_{eff} ($\times 10^{-10}$ m ² /s)	1,266	2,052	3,57	8,121	13,06
E_a (kJ/mol)	104,63				
D_0 ($\times 10^{-2}$ m ² /s)	5,1				
X_0	0,545				

L'équation (I.13) décrit l'influence de la température sur la diffusivité effective dans les feuilles de myrte. L'ajustement linéaire de $\ln(D_{eff})$ en fonction $\frac{1}{T}$ est représenté par cette équation de type Arrhenius. Cela correspond aux corrélations décrites dans la littérature (T. Sabarez and E. Price, 1999; Azzouz *et al.*, 2002; Doymaz, 2005). $R^2 = 0.995$ indique une forte corrélation entre les coefficients et les données expérimentales, ce qui est un résultat très acceptable. A

partir de la relation de régression linéaire de l'équation (I.13), déduite de l'ajustement de la figure I.6, et par identification avec l'équation (I.11), nous obtenons l'énergie d'activation de la diffusion de l'eau dans les feuilles de myrte $E_a = 104,63 \text{ kJ/mol}$, et le facteur de diffusion $D_0 = 5,1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. La valeur de l'énergie d'activation est du même ordre que les valeurs obtenues dans les processus de séchage des bioproduits (Azzouz *et al.*, 2002; Mueller and Jungbauer, 2009). Il a donc été confirmé que le coefficient de diffusivité effective dans les échantillons de feuilles de myrte dépend de la température de l'air de séchage avec une fonction exponentielle de type Arrhenius.

$$\ln(D_{\text{eff}}) = 17,334 - 12584,9 \frac{1}{T} \quad (\text{II.13})$$

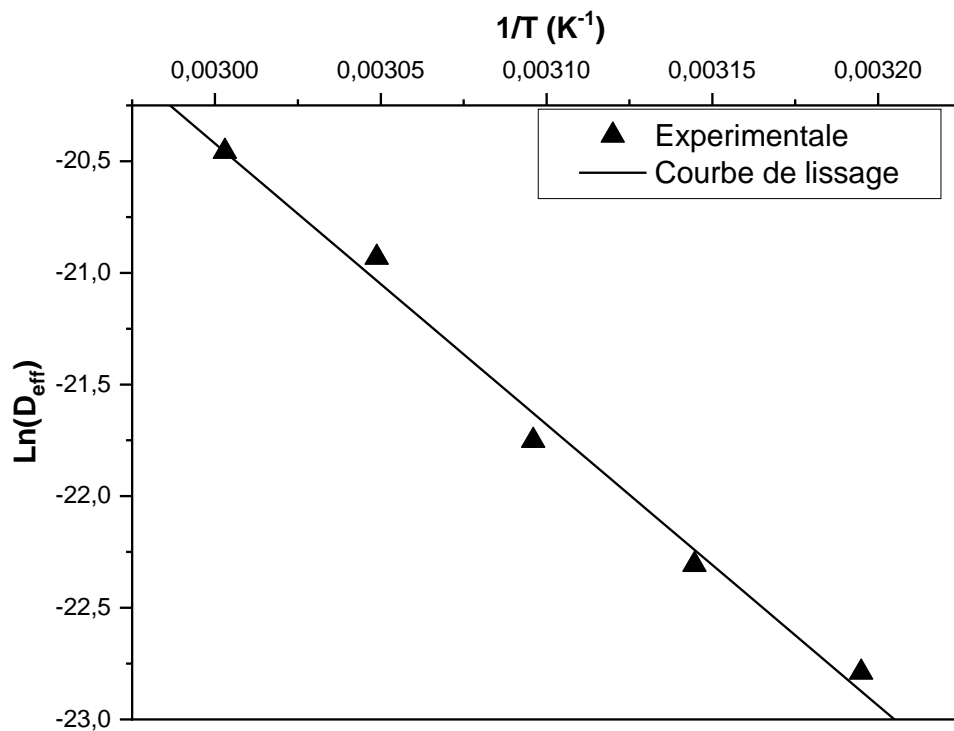


Figure I.6 Relation de type Arrhenius entre la diffusivité effective et la température pour les feuilles de myrte.

Les résultats expérimentaux de diffusivité effective es pour différentes températures de séchage par convection sont présentés à la figure I.7. La fonction d'ajustement utilisée dans ces études était une fonction exponentielle qui dépendait principalement de la température du flux d'air, comme indiqué dans l'équation (I.14). Les résultats sont toujours en accord avec ceux obtenus par d'autres produits similaires (Salmas *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2013; Hermassi *et al.*, 2017).

L'expression de la diffusivité effective de l'humidité, en fonction de la température, obtenue à partir de l'ajustement des données expérimentales est donnée par l'équation (I.14) :

$$D_{\text{eff}} = 0,01123 \exp(T/8,479) * 10^{-10} \quad (\text{I.14})$$

Tableau I.3 Valeurs de l'énergie d'activation pour différents produits similaires.

Produit	Energie d'activation	Références
Myrtus Communis	104,63	Le travail présent
Menthe	82,93	Park et al, (Jin Park, Vohnikova and Pedro Reis Brod, 2002)
Thé noir	406,02	Panchariya et al (Panchariya, Popovic and Sharma, 2002)
Laurier noble	36,48	I, Doymaz (Doymaz, 2014)

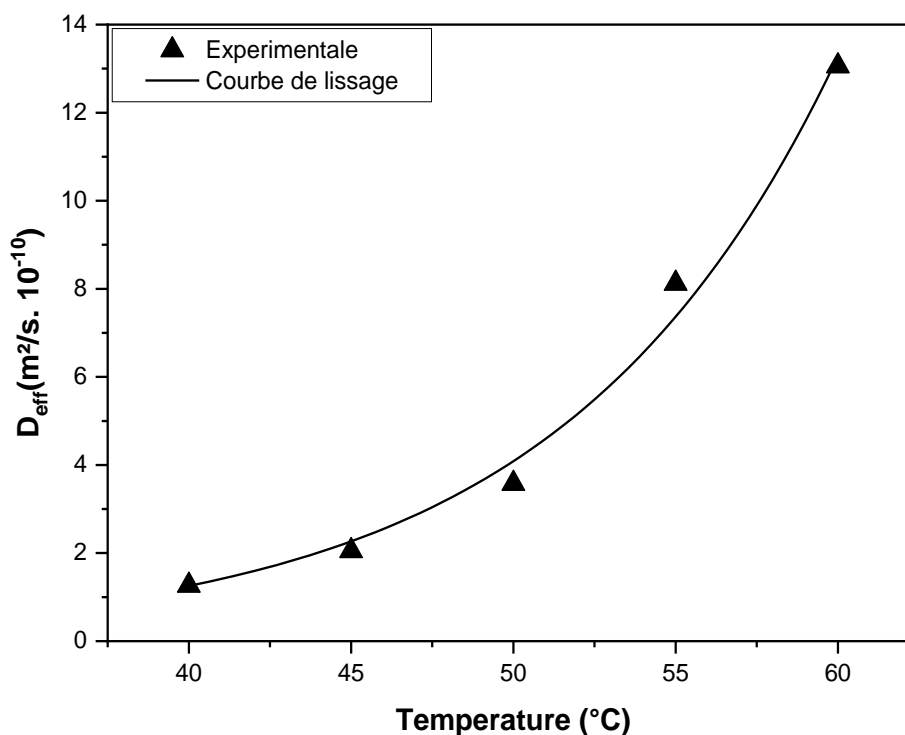


Figure I.7 Diffusivité effective des feuilles de myrte pour le séchage convectif à différentes températures d'air.

Les résultats révèlent que la diffusivité effective dans les feuilles de myrte pendant le séchage par convection est proportionnelle à la température de l'air de séchage, ce qui signifie que lorsque la température de l'air augmente, la diffusivité effective augmente également, en raison de l'énergie supplémentaire reçue par l'eau interne. Par conséquent, à mesure que la quantité

d'énergie consommée dans le processus augmente, l'évaporation de l'eau s'accroît, associée à un degré élevé de mobilité de l'humidité, ce qui affecte la diffusivité (Joachim Müller, 2007). En outre, l'utilisation de l'énergie convective tout au long du processus de séchage avec des températures de flux d'air allant jusqu'à 60 °C a permis d'améliorer les taux de séchage sans affecter la qualité finale des produits. En ce qui concerne les paramètres de séchage, le tableau I.3 présente les valeurs de l'énergie d'activation pour différents produits, dont les feuilles de myrte de notre étude et d'autres produits similaires de la littérature. L'ordre de grandeur entre nos résultats et ceux trouvés dans la littérature (Mueller and Jungbauer, 2009; Hermassi *et al.*, 2017; Ghnimi, Hassini and Bagane, 2019) est cohérent.

6 CONCLUSION

Ce chapitre a combiné une revue bibliographique sur les caractéristiques des feuilles de myrte et les procédés de séchage adaptés, avec une étude expérimentale du séchage convectif à air chaud, menée à des températures comprises entre 40 et 60 °C.

Les résultats ont mis en évidence que le processus de séchage se déroule uniquement en phase à vitesse décroissante, en raison de l'absence d'eau libre dans la structure du produit. L'analyse des cinétiques a permis de déterminer la diffusivité effective de l'humidité, qui augmente avec la température selon une relation de type Arrhenius. Une énergie d'activation constante de 104,63 kJ/mol a été obtenue, confirmant la sensibilité du processus à la température et la réduction significative du temps de séchage à mesure que celle-ci augmente.

La construction d'une courbe caractéristique de séchage (CCS) a permis de représenter de manière généralisée le comportement de séchage des feuilles de myrte, fournissant ainsi des éléments utiles pour l'optimisation du procédé et d'éventuelles modélisations futures.

**PARTIE B: SÉCHAGE PAR MICROONDES DU BOIS
D'EUCALYPTUS**

Chapitre II REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE SÉCHAGE DU BOIS

1 INTRODUCTION

Une recherche bibliographique approfondie explore les connaissances actuelles sur le séchage des produits déformables, avec un intérêt particulier pour le bois d'eucalyptus (*Eucalyptus globulus*). Ce matériau, doté de propriétés physiques spécifiques, présente un comportement complexe pendant le séchage, ce qui nécessite l'utilisation de méthodes adaptées pour préserver son intégrité structurelle et ses caractéristiques fonctionnelles. La recherche commence par une introduction à la filière bois et aux caractéristiques des eucalyptus, permettant de comprendre comment la structure et la composition de ce bois influencent son comportement au séchage, ainsi que les défis liés à son traitement dans l'industrie.

L'analyse se poursuit par une présentation des procédés de séchage couramment utilisés pour les matériaux déformables. Chaque technique est examinée afin d'identifier les avantages et les limitations spécifiques dans le traitement du bois d'eucalyptus, en tenant compte de sa sensibilité au traitement thermique. Le séchage par micro-ondes, une méthode prometteuse, est également analysé pour sa capacité à réduire les défauts tels que les fissures et les déformations, tout en diminuant le temps de séchage et en préservant la qualité du matériau. Ce chapitre fournit ainsi une base essentielle pour les travaux expérimentaux et les simulations numériques qui seront développés dans les chapitres ultérieurs, avec pour ambition de proposer des solutions innovantes pour optimiser les procédés de séchage du bois d'eucalyptus.

2 APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE BOIS

2.1 La filière bois

La filière bois en Algérie est divisée en deux branches selon les dimensions des bois exploités : l'industrie du bois d'œuvre (bâtiment, ameublement) et le bois de trituration (papier, panneaux). (Lévêque and Péguret, 1988) ont analysé la situation économique de la filière en la séparant en différents « acteurs » avec une distinction sectorielle primaire, secondaire et tertiaire, et dans le secteur industriel, une distinction entre industries du bois-matériau et celles du bois-papier.

En Algérie, un accroissement notable des plantations forestières a été observé au cours des dernières décennies (FAO, 2009). Selon les données disponibles, la superficie des plantations forestières a considérablement augmenté, reflétant les efforts déployés pour la reforestation et la lutte contre la désertification. Par exemple, le Programme National de Reboisement (PNR) lancé en 2000 a pour objectif de planter un million d’hectares de forêts sur une période de 20 ans. En 2019, il a été rapporté que plus de 800 000 hectares avaient déjà été reboisés dans le cadre de ce programme (Direction Générale des Forêts, 2019). Ces efforts sont soutenus par diverses organisations nationales et internationales avec des projets de reboisement ciblant principalement les régions vulnérables à la désertification (FAO, 2009; Direction Générale des Forêts, 2019).

2.1 Généralités sur les eucalyptus

2.1.1 *Eucalyptus dans le monde*

L’eucalyptus est un genre d’arbres originaires d’Australie, mais il est maintenant cultivé dans le monde entier pour ses nombreux avantages économiques et écologiques. On compte plus de 700 espèces d’eucalyptus, chacune ayant des caractéristiques et des usages spécifiques. Les eucalyptus sont largement utilisés dans l’industrie du bois, de la pâte à papier, et comme source de combustible. Les eucalyptus ont été introduits en Afrique entre le milieu et la fin du XIXe siècle : en Algérie en 1854, à Madagascar vers 1890-1895, et en Éthiopie en 1895. Leur introduction a ensuite suivi au Rwanda au début des années 1900 et au Burundi en 1901, principalement par des missionnaires (Loupe and Depommier, 2010).

2.1.2 *Eucalyptus en Algérie*

Un grand nombre d’espèces d’eucalyptus ont été introduites en Algérie, notamment par M. Cordier à la fin du 19e siècle. M. Cordier, ancien Président de la Société botanique de France, avait constitué, dans son domaine d’El Alia, à Maison Carrée, la plus importante collection d’eucalyptus : 130 espèces étaient représentées par 10 000 arbres. D’un autre côté, M. Cordier avait planté 10 000 eucalyptus dans un autre domaine, à la Réghaia. Les graines récoltées dans ces belles plantations ont été largement distribuées (Trabut, 1914). L’eucalyptus joue un rôle crucial dans l’économie rurale, en fournissant du bois pour diverses utilisations (Kanabahita, 2001).

L’eucalyptus en Algérie, réintroduit au début du 20ème siècle pour lutter contre l’érosion des sols et pour la production de bois, Les principales espèces plantées sont *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus gomphocephala*, et *Eucalyptus globulus*. Ce dernier, également

connu sous le nom d'eucalyptus bleu, s'est bien adapté aux conditions climatiques locales, notamment dans les régions côtières et les zones de basse altitude. L'Eucalyptus globulus est particulièrement apprécié pour ses propriétés médicinales et ses utilisations dans l'industrie du papier, grâce à ses fibres longues et résistantes qui produisent une pâte de haute qualité (FAO, 2009). Bien que l'introduction de l'eucalyptus ait contribué à la reforestation et à la protection des sols, elle a également eu des impacts négatifs sur la biodiversité locale en raison de la croissance rapide et de la forte consommation d'eau de l'arbre, ce qui peut affecter les écosystèmes locaux (Louppe and Depommier, 2010). Néanmoins, l'eucalyptus joue un rôle important dans l'économie rurale algérienne, en fournissant du bois pour diverses utilisations et en soutenant les communautés rurales. Sa gestion durable reste essentielle pour maximiser ses bénéfices tout en minimisant ses impacts négatifs sur l'environnement (FAO, 2009).

2.1.3 Emplois du bois d'eucalyptus

2.1.3.1 Source d'énergie ou bois de feu

Le bois d'eucalyptus est utilisé comme source de combustible en raison de sa densité énergétique élevée. Il brûle lentement et produit une chaleur constante, ce qui le rend idéal pour le séchage domestique et industriel (Yang, Zheng and Huang, 2022).

2.1.3.2 Bois industriel

L'eucalyptus est largement utilisé dans l'industrie du bois pour la production de meubles, de structures en bois et de panneaux. Sa rapidité de croissance et sa densité élevée en font un matériau de choix pour de nombreuses applications industrielles (Yang, Zheng and Huang, 2022).

2.1.3.3 Pâte à papier

L'eucalyptus est également une source importante de fibres pour la production de pâte à papier. Ses fibres longues et résistantes améliorent la qualité du papier produit, ce qui est particulièrement apprécié dans l'industrie papetière (Ouertani, 2014).

2.1.4 Anatomie du bois d'eucalyptus

2.1.4.1 À l'échelle macroscopique

Le bois, issu de l'arbre, est un matériau complexe. Il est produit par le biais de la photosynthèse. Les feuilles produisent du glucose à partir du CO₂ de l'air et de la lumière du soleil. Ce glucose est ensuite transporté jusqu'aux cellules où il sert de nourriture et de matière pour la construction de nouvelles cellules. Ce mode de croissance est très sensible aux conditions climatiques, c'est pourquoi le bois est un matériau naturellement très hétérogène (Bahar, 2017).

À l'échelle macroscopique, le bois d'eucalyptus présente des caractéristiques distinctives (Almeida, 2006) (Figure II.1) telles que :

Le rhytidome est la partie externe et morte de l'écorce, composée de couches de tissus rejetées par le cambium. Il protège l'arbre contre les attaques biologiques (insectes), les gelures, le dessèchement (coup de soleil) et les blessures (chutes de pierres).

Le liber est la partie interne de l'écorce. C'est l'appareil conducteur de la sève élaborée (descendante), composée principalement de sucres dissous comme le saccharose, produits lors de la photosynthèse.

Le cambium est un tissu méristématique situé entre le bois et le liber, responsable de la croissance en épaisseur de l'arbre. Il produit le xylème (bois) vers l'intérieur et le phloème (liber) vers l'extérieur.

L'aubier est la partie jeune et active du xylème. Il assure le transport de la sève brute (montante), un mélange d'eau et de sels minéraux absorbés par les racines. En outre, il joue un rôle mécanique en soutenant l'arbre face aux charges dues aux vents, à la neige, et au poids de la couronne.

Le bois de cœur (ou duramen) est la partie centrale et inerte de l'arbre. Il ne joue plus de rôle conducteur, mais il assure le soutien mécanique grâce à sa densité élevée et sa résistance naturelle aux agents biologiques (insectes, champignons) grâce à l'accumulation de tanins et d'autres substances.



Figure II.1 Coupe d'un tronc.

2.1.4.2 À l'échelle microscopique

a. Structure cellulaire

Le bois d'eucalyptus est principalement composé de trois types de cellules : les fibres, les vaisseaux et le parenchyme Figure II.2.

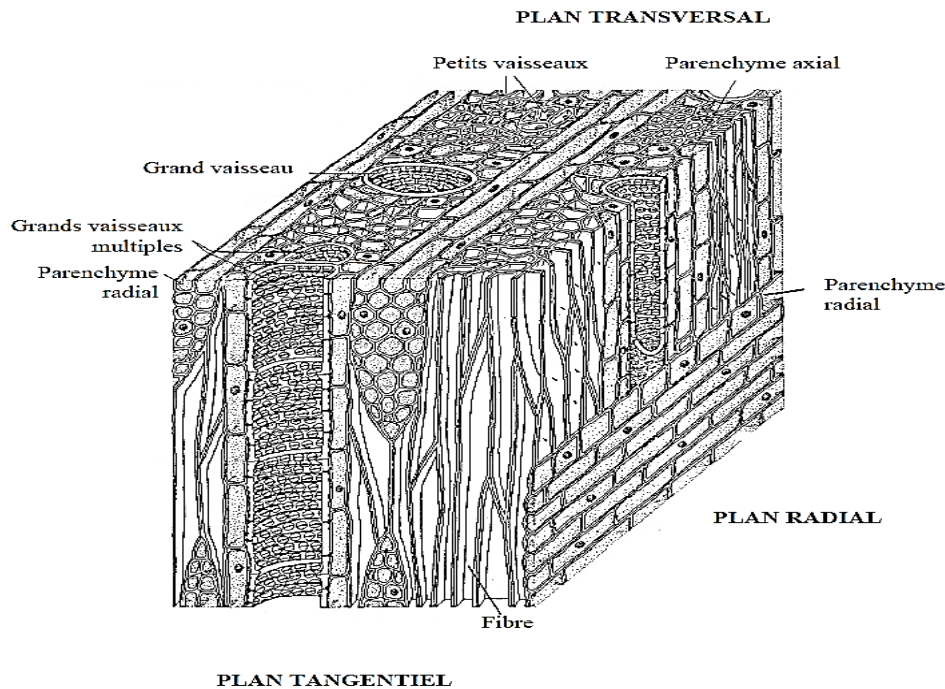


Figure II.2 Eléments histologiques constitutifs du bois feuillu (Almeida, 2006).

Fibres : Longues et épaisses, les fibres confèrent au bois sa résistance mécanique, influençant directement sa solidité, sa rigidité et sa flexibilité en fonction de leur densité et orientation.

Vaisseaux : Responsables du transport de l'eau, les vaisseaux varient en taille et disposition selon les espèces. Leur fréquence et taille influencent la porosité et la capacité du bois à retenir l'eau.

Parenchyme : Composé de cellules vivantes, le parenchyme stocke et transporte les nutriments. Il intervient également dans la réparation des tissus et la défense contre les infections (Repellin, 2006).

b. Distribution des vaisseaux

Les vaisseaux dans le bois d'eucalyptus sont souvent de grande taille et dispersés de manière diffuse. Cette distribution permet un transport efficace de l'eau et des nutriments, mais influence également les propriétés physiques du bois, comme sa densité et sa porosité. La disposition des vaisseaux peut également affecter la résistance du bois aux contraintes mécaniques et à la dessiccation.

c. Composition chimique

La composition chimique du bois d'eucalyptus comprend des composants tels que la cellulose, l'hémicellulose et la lignine (Figure II.3).

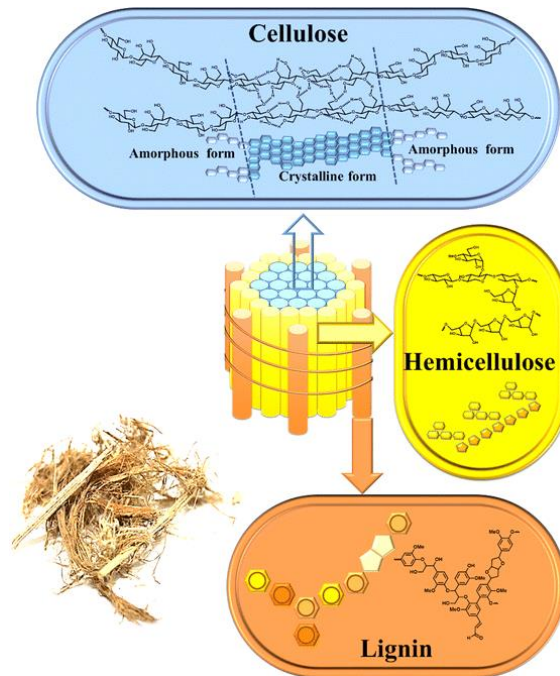


Figure II.3 Schéma simplifié des composants chimiques du bois (Mateus *et al.*, 2017).

- **Cellulose et hémicellulose** : La cellulose et l'hémicellulose sont les principaux constituants des parois cellulaires (Merakeb, 2006; Bahar, 2017; N'Guessan *et al.*, 2023). La cellulose est un polymère de haut poids moléculaire ($C_6H_{10}O_5$). C'est le composant majeur du bois et représente 40 à 45% de la masse anhydre du bois. La cellulose confère au bois sa structure et sa résistance à la traction, tandis que l'hémicellulose présente des chaînes moléculaires plus courtes que celle de cellulose. Leur quantité varie de 20 à 30% en masse anhydre selon les essences du bois. Elle possède des propriétés hydrophiles induisant des caractéristiques de retrait et de gonflement hydriques importantes (Merakeb, 2006). L'hémicellulose joue un rôle dans la liaison des fibres de cellulose et la flexibilité de la paroi cellulaire.
- **Lignine** : La lignine confère rigidité et résistance au bois. Elle agit comme une colle qui lie les fibres de cellulose, augmentant ainsi la durabilité et la résistance à la décomposition (Almeida, 2006).

- **Extraits solubles** : Les extraits solubles, comme les tanins et les huiles essentielles, peuvent également influencer les propriétés du bois, notamment sa durabilité et sa résistance aux insectes. Les tanins sont des composés phénoliques qui peuvent inhiber la croissance de microorganismes et protéger le bois contre les dégradations biologiques. Les huiles essentielles peuvent également avoir des propriétés insectifuges et antifongiques (N'Guessan *et al.*, 2023).

2.1.5 *Propriétés hydro-thermiques du bois d'eucalyptus*

Les propriétés hydro-thermiques du bois d'eucalyptus sont essentielles pour comprendre son comportement lors du séchage. Le bois d'eucalyptus a une capacité élevée à absorber et à libérer de l'eau, influençant sa densité et sa conductivité thermique (Habouria, 2022; Yang, Zheng and Huang, 2022). La teneur en eau affecte directement la stabilité dimensionnelle du bois, ce qui est crucial pour les applications industrielles.

2.1.6 *Propriétés physico-mécaniques du bois d'eucalyptus*

Elaieb et al. (Elaieb *et al.*, 2017) indiquent que diverses propriétés physico-mécaniques du bois sont affectées par des facteurs tels que la densité, la largeur des cernes, la quantité d'extractibles et la proportion de bois juvénile. (Elaieb, Khaldi and Candelier, 2015) soulignent que la complexité de la structure interne du bois peut également influencer ses propriétés. Les caractéristiques du bois varient en fonction de l'environnement. Ainsi, le bois d'une même essence cultivée dans des régions différentes peut présenter des propriétés physico-mécaniques variées. En outre, il est largement reconnu que l'humidité joue un rôle crucial dans les propriétés physico-mécaniques du bois. Le bois humide est moins résistant et plus flexible que le bois sec, ce qui est exploité dans les procédés de mise en forme et de déroulage du bois (Elaieb, Khaldi and Candelier, 2015).

2.1.6.1 *Propriétés physiques du bois*

a. Densité du bois

La densité du bois d'eucalyptus varie en fonction de l'espèce et de la teneur en eau. En général, le bois d'eucalyptus est considéré comme dense, ce qui contribue à sa résistance mécanique et à sa durabilité (Bahar, 2017; Elaieb *et al.*, 2017).

b. L'eau dans le bois

L'eau dans le bois d'eucalyptus se trouve sous forme libre dans les cavités cellulaires et sous forme liée dans les parois cellulaires. La gestion de cette eau est nécessaire pour le processus

de séchage, car une teneur élevée en humidité peut entraîner des déformations et des fissures (Almeida, 2006).

c. Point de saturation des fibres (PFS)

Le PFS du bois d'eucalyptus est le point où toutes les cavités cellulaires sont vides d'eau libre, mais les parois cellulaires sont encore saturées. La connaissance du PFS est importante pour déterminer les conditions optimales de séchage (Ouertani, 2014).

d. Variation du retrait du bois

Le retrait du bois d'eucalyptus est la réduction de ses dimensions en raison de la perte d'eau. Ce phénomène peut causer des déformations et des fissures si le séchage n'est pas contrôlé correctement (Elaieb *et al.*, 2017). La variation du retrait doit être prise en compte pour garantir la stabilité dimensionnelle des produits finis (Elaieb, Khaldi and Candelier, 2015).

2.1.6.2 Propriétés mécaniques du bois

La rhéologie est une science qui se concentre sur le comportement mécanique des matériaux et l'étude de leur déformation sous l'influence des contraintes. Fondamentalement, la contrainte représente une force appliquée à une surface, équivalente à la pression, et elle est mesurée en Pascals (N/mm²). La déformation, également appelée allongement relatif, est une grandeur sans dimension égale à l'allongement divisé par la longueur initiale. L'élasticité se réfère à la propriété de certains matériaux de retrouver leur forme ou dimensions d'origine lorsque la force qui tente de les déformer est supprimée. La déformation élastique est instantanée et réversible (Rémond, 2004), et cette propriété reste valable tant que la contrainte ne dépasse pas la limite proportionnelle ou limite élastique (Moutee, 2006).

L'analyse des courbes contrainte-déformation des matériaux ligneux révèle deux domaines de comportement distincts. Le premier domaine, délimité par la limite élastique, est de forme linéaire et représente la zone de déformation élastique du matériau. Le deuxième domaine de comportement est de nature non linéaire et caractérise la zone de déformation plastique du matériau, délimitée par la contrainte de rupture. Le module d'élasticité, communément appelé module de Young, est dérivé du premier domaine de déformation élastique (Guitard and Polge, 1987). Graphiquement, il correspond à la pente de la variation linéaire de la contrainte avec la déformation du matériau sous charge, comme illustrée dans la figure II.4. Ce module est mathématiquement décrit par la loi de Hooke (Moutee, 2006; Mariella and Sanchez, 2013).

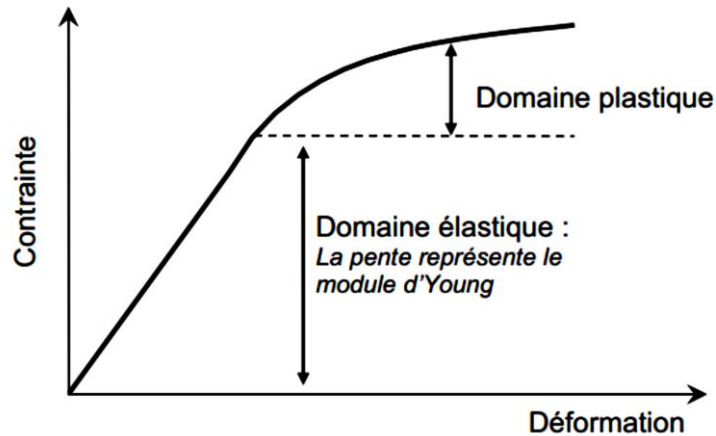


Figure II.4 Variation de la contrainte en fonction de la déformation du matériau ligneux.

2.1.7 Comportement mécanique du bois au cours du séchage

Les propriétés élastiques du bois dépendent de sa teneur en eau, de la température et de sa densité. Pendant le processus de séchage, l'impact de la température et de la teneur en eau, ainsi que leur interaction, influencent de manière significative son comportement mécanique (Elaieb *et al.*, 2017). L'anisotropie du bois entraîne des variations distinctes des propriétés élastiques dans les directions longitudinale (L), radiale (R) et tangentielle (T). Les modules d'élasticité présentent des valeurs différentes dans chacune de ces directions. La mesure des modules de Young dans ces trois directions montre que $E_L \gg E_R > E_T$ (Repellin, 2006).

L'apparition de fissures en surface se produit lorsque les contraintes de traction sur la surface dépassent la contrainte de rupture du bois. Par la suite, la teneur en eau au centre des pièces atteint le point de saturation des fibres (FSP), ce qui déclenche le retrait. En raison de la déformation permanente par compression au centre, son retrait dépasse le niveau normal. Initialement, la contrainte de traction à la surface favorise le retrait du centre. Cependant, à mesure que la surface subit une déformation permanente par tension, son retrait devient inférieur au niveau normal, ce qui tend à freiner le retrait central. Cela entraîne une inversion du champ de contraintes, avec la surface désormais en compression et le centre en tension (Figure II.5).

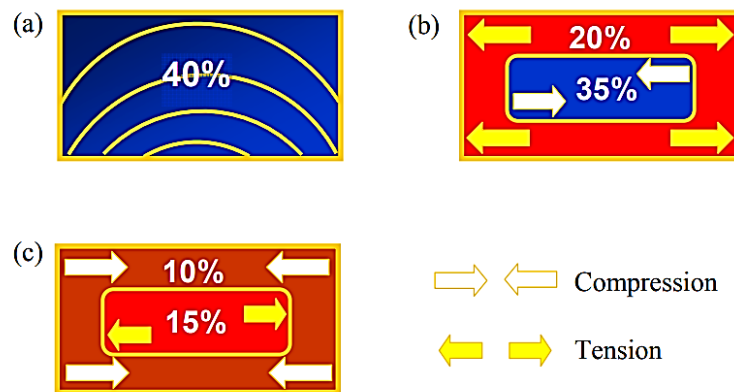


Figure II.5 Contraintes transversales de séchage (Moutee, 2006).

Ces contraintes donnent lieu à divers défauts dans le bois sec. Cependant, ce problème peut être évité en utilisant des conditions de séchage appropriées. Les principales déformations résultant d'un séchage mal effectué pour l'espèce de bois concernée comprennent le gauchissement et les fissures, principalement attribués aux processus de retrait et d'effondrement. L'hétérogénéité du matériau soumis au séchage entraîne une différence interne dans le retrait longitudinal, ce qui conduit à l'apparition de déformations de gauchissement le long de l'axe longitudinal du bois. Les principaux types de gauchissement comprennent le cintrage, le gondolement de la face, le gondolement du chant et le vrillage (Moutee, 2006). Les contraintes peuvent atteindre un niveau suffisamment élevé pour provoquer des ruptures dans les structures du bois, prenant la forme de gerces en bout, de gerces internes et de fissures en surface (Figure II.6).

Le gauchissement est intrinsèquement lié aux caractéristiques physiques du bois, et par conséquent, ne peut fondamentalement pas être attribué au processus de séchage. Le bois, en tant que matériau polymère semi-cristallin, présente un comportement mécanique complexe résultant de multiples interactions. Tout au long de la durée de vie d'une structure en bois, deux propriétés distinctes, à savoir le gonflement-retrait hygroscopique et le fluage (Merakeb, Dubois and Petit, 2009), entrent en jeu. Les déformations observées résultent du couplage entre les variations d'humidité et les contraintes mécaniques, représentant la réponse du matériau bois aux sollicitations mécano-sorptives. Pour évaluer les propriétés viscoélastiques du bois, certains choisissent de réaliser des essais de compression, de traction et de flexion statique sur des échantillons de dimensions appropriées, soumis à une charge constante et à des conditions hygrométriques variables.

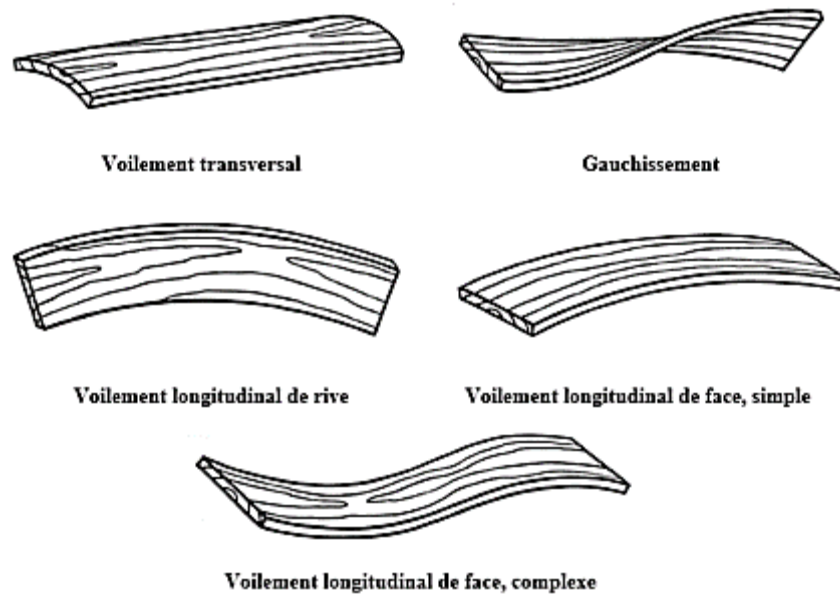


Figure II.6 Différents types de défauts de séchage (Haque, 2011).

3 LES PROCÉDES DE SÉCHAGE DES PRODUITS DÉFORMABLES

3.1 Séchage à l'air libre

Le séchage à l'air libre est une méthode traditionnelle où les produits déformables, comme le bois ou les feuilles, sont exposés à l'extérieur pour sécher naturellement sous l'effet du vent et du soleil. Cette méthode est peu coûteuse mais prend beaucoup de temps, souvent plusieurs mois, et dépend fortement des conditions climatiques. Elle est idéale pour les matériaux qui ne nécessitent pas un séchage rapide (Gendron, 2023).

3.2 Séchage en étuve

Le séchage en étuve est une méthode plus contrôlée où le bois est placé dans une chambre fermée où la température, l'humidité et la circulation de l'air sont régulées. Cette méthode permet un séchage plus rapide et uniforme par rapport au séchage à l'air libre. Les paramètres de séchage peuvent être ajustés en fonction des caractéristiques du matériau et des exigences de qualité (Bahar, 2017).

3.3 Séchage sous vide

Le séchage sous vide utilise une pression réduite pour abaisser le point d'ébullition de l'eau, permettant ainsi un séchage à des températures plus basses (Ouertani, Koubaa, *et al.*, 2015).

Cette méthode est idéale pour les produits de grande qualité ou les matériaux épais, car elle minimise les risques de déformation. Elle est cependant plus coûteuse à mettre en œuvre que le séchage en étuve (Ouertani, Koubaa, *et al.*, 2015).

3.4 Séchage par déshumidification

Le séchage par déshumidification utilise un déshumidificateur pour extraire l'humidité de l'air autour des matériaux. Cette méthode est économe en énergie et permet un contrôle précis des conditions de séchage (Esteves *et al.*, 2014). Elle est souvent utilisée pour les produits de haute qualité où la préservation des propriétés mécaniques et esthétiques est essentielle.

3.5 Séchage par contact

Le séchage par contact, aussi appelé séchage par plaque chauffante, repose sur le contact direct avec des surfaces chauffantes. Cette méthode permet un transfert rapide de chaleur et une évaporation accélérée de l'eau. Elle est principalement adaptée aux produits déformables plats et de faible épaisseur (Ouertani, 2014).

3.6 Séchage convectif forcé à l'air

Le séchage convectif est une méthode couramment utilisée pour le traitement des produits déformables. Ce procédé implique le transfert de chaleur par convection de l'air chaud à la surface du produit, provoquant l'évaporation de l'eau contenue dans le matériau (Doymaz, 2006). Ce type de séchage est largement employé pour les feuilles aromatiques et médicinales en raison de son efficacité et de sa capacité à préserver certaines propriétés biochimiques essentielles (Bedjaoui *et al.*, 2023). Dans le séchage convectif, l'air chauffé est utilisé pour transférer de la chaleur à la surface des feuilles, ce qui accélère le processus d'évaporation de l'humidité. L'eau qui migre de l'intérieur vers leur surface est ensuite évaporée dans l'air ambiant. Ce phénomène repose sur deux mécanismes principaux (Bahar, 2017) :

Transfert de chaleur : La chaleur est transmise à la surface des matériaux, provoquant l'évaporation de l'humidité.

Transfert de masse : L'eau se déplace de l'intérieur des matériaux vers la surface, d'où elle s'évapore ensuite dans l'air.

Le séchage convectif présente plusieurs avantages pour les f matériaux déformables, en particulier les feuilles aromatiques

Préservation des propriétés organoleptiques et médicinales (Rahimi *et al.*, 2015) : En contrôlant la température et la vitesse de l'air, il est possible de minimiser la dégradation des composés bioactifs et de préserver les huiles essentielles.

Rendement amélioré en huiles essentielles (Joachim Müller, 2007) : Le séchage convectif permet d'atteindre des niveaux de séchage optimaux qui augmentent le rendement en huiles essentielles extraites.

Flexibilité du procédé (Bedjaoui *et al.*, 2023) : Les paramètres du séchage, tels que la température, l'humidité relative de l'air, et la vitesse de l'air, peuvent être ajustés en fonction des caractéristiques spécifiques des feuilles, ce qui rend cette technique adaptable à divers types de produits déformables.

3.7 Séchage par micro-ondes

Les particularités du séchage micro-ondes sont liées au caractère volumique de l'apport micro-onde. Par rapport à un séchage convectif, les flux de masses diffusif et thermo-diffusif sont dans le même sens. Ceci entraîne d'une part, une accélération du transfert de masse au sein du produit, et d'autre part, une distribution plus uniforme de teneur en eau et ainsi des contraintes de déformations plus faibles que dans le cas convectif (Ouertani, Hassini, *et al.*, 2015).

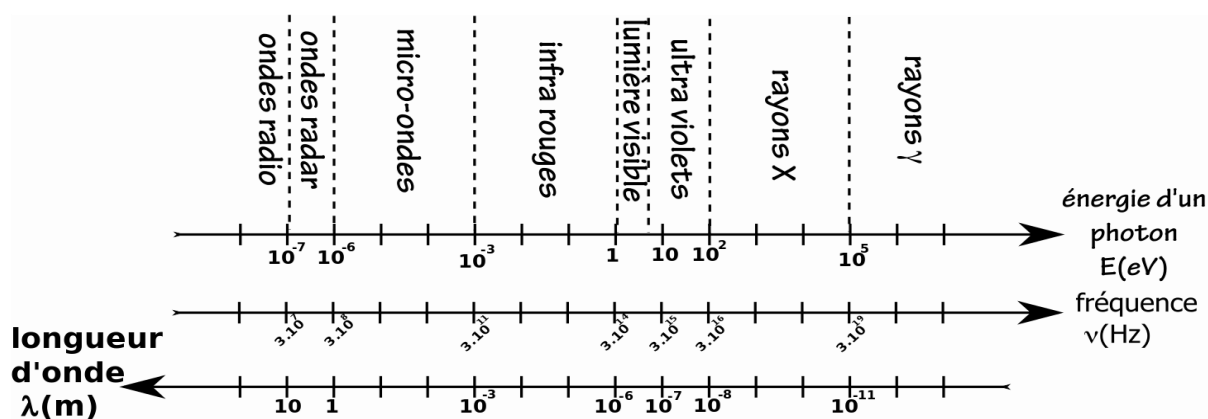


Figure II.7 Spectre électromagnétique (Ouertani, 2014).

Microondes sont des ondes constituées d'un champ magnétique $H(M, t)$, et d'un champ électrique $E(M, t)$ qui oscillent en même temps. De nombreuses sources artificielles émettent de l'énergie sous la forme d'ondes électromagnétiques. Une onde électromagnétique est caractérisée par sa longueur d'onde λ (m) et par sa fréquence (Hz) (Ouertani, 2014) (Figure II.7).

3.7.1 Propriétés diélectriques

3.7.1.1 Matériaux diélectriques

Les matériaux diélectriques, comme le bois, ont la capacité de stocker de l'énergie sous forme de champ électrique lorsque soumis à une tension. Cette capacité est quantifiée par une constante appelée la permittivité diélectrique (ϵ). Les matériaux avec une permittivité diélectrique élevée peuvent stocker plus d'énergie. De plus, les matériaux diélectriques dissipent une partie de l'énergie sous forme de chaleur, un processus essentiel dans diverses applications, dont le séchage par micro-ondes.

3.7.1.2 Profondeur de pénétration

La conversion de l'énergie portée par l'onde électromagnétique en chaleur implique une atténuation de cette énergie à mesure qu'elle traverse la matière. La profondeur de pénétration est définie comme la distance parcourue par l'onde lorsqu'elle a perdu 63 % de son énergie (Ouertani, Hassini, *et al.*, 2015). Cette distance D est égale à :

$$D = \frac{\lambda_0 \sqrt{2}}{2\pi} \left[\epsilon' \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\alpha}{\epsilon'} \right)^2} \right) - 1 \right]^{-0,5} \quad (\text{II.1})$$

Avec λ_0 : longueur d'onde dans l'air.

3.7.1.3 Polarisation diélectrique

La polarisation diélectrique est le processus par lequel les molécules polaires, telles que les molécules d'eau, s'alignent avec un champ électrique externe. Lorsqu'un matériau diélectrique, comme le bois, est exposé au champ électrique des micro-ondes, les molécules d'eau à l'intérieur du matériau tentent de s'orienter selon la direction de ce champ électrique (Kraszewski, 1996). Les molécules d'eau, étant dipolaires, possèdent une charge positive et une charge négative distinctes. Sous l'influence du champ électrique des micro-ondes, ces molécules s'alignent en fonction de la polarité du champ (Torgovnikov and Vinden, 2010).

Ce réalignement constant, dû aux oscillations rapides du champ électrique des micro-ondes, entraîne une friction interne au niveau moléculaire. La friction résultante de ce réalignement continu des molécules d'eau génère de la chaleur (Kraszewski, 1996; Kowalski and Pawlowski, 2011; Grinchik *et al.*, 2015; Ouertani *et al.*, 2018). Ce phénomène est essentiel pour le séchage rapide et efficace du bois. L'énergie électromagnétique des micro-ondes est ainsi convertie en énergie thermique à l'intérieur du matériau (Kraszewski, 1996). La chaleur générée par la polarisation diélectrique provoque l'évaporation de l'eau présente dans le bois. Ce processus est nécessaire pour le séchage, car il permet d'éliminer l'humidité interne de manière

uniforme et rapide. La polarisation diélectrique facilite donc l'évaporation en augmentant la température interne du bois, ce qui accélère le processus de séchage (Decareau, 1985; Torgovnikov and Vinden, 2010).

3.7.1.4 *Relaxation et séchage diélectriques*

La relaxation diélectrique se produit lorsque les molécules d'eau reviennent à leur état non aligné, libérant de l'énergie sous forme de chaleur, comme le présente la figure II.8 Ce phénomène est essentiel pour le séchage par micro-ondes (Si *et al.*, 2022). Enfin, les propriétés diélectriques du matériau varient en fonction de sa teneur en eau, de sa densité et de la fréquence des micro-ondes utilisées (Ouertani, 2014).

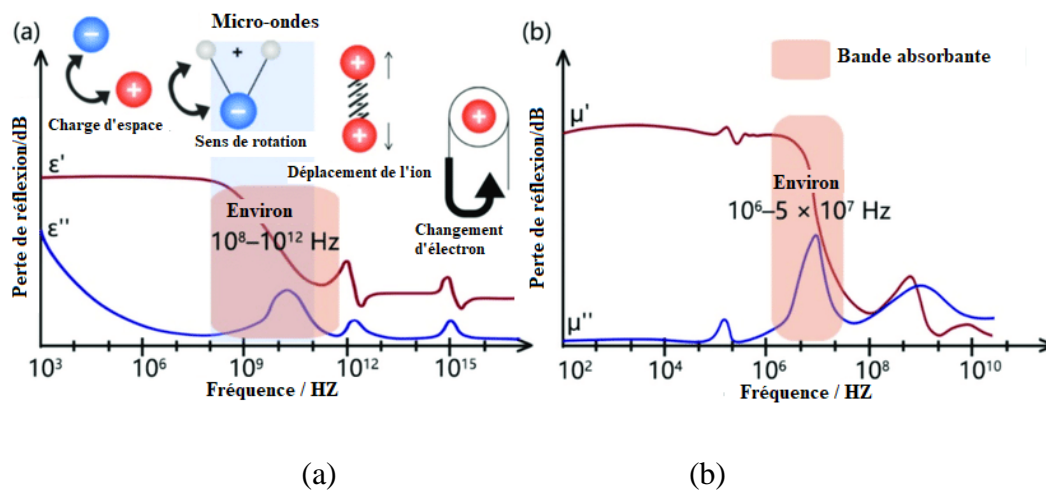


Figure II.8 (a) Constante diélectrique complexe et mécanisme de polarisation des matériaux absorbant les micro-ondes à perte diélectrique; (b) La perméabilité complexe des matériaux absorbant les micro-ondes à perte magnétique (Si *et al.*, 2022).

4 APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE SÉCHAGE PAR MICRO-ONDES

De nombreuses recherches ont examiné l'application des micro-ondes dans le processus de séchage des produits déformables.

4.1 Etudes expérimentales

Une étude de méthode de séchage sous vide assistée par énergie haute fréquence pour le bois frais d'eucalyptus globulus a été explorée par (Hansmann *et al.*, 2008), visant à réduire le temps de séchage et les niveaux de contraintes internes. L'eucalyptus globulus est couramment utilisé dans la production de pâte à papier, mais son utilisation comme bois massif est limitée à cause des problèmes de contraintes de croissance et de défauts de séchage. Les méthodes traditionnelles de séchage, y compris le séchage à haute température, ont produit des résultats

variés, souvent caractérisés par des temps de séchage prolongés et des risques de défauts tels que le collapse et le cas-hardening. Le séchage sous vide avec séchage par haute fréquence avait déjà montré des résultats prometteurs sur du bois prédéshydraté. Cette étude s'intéresse à appliquer cette technique sur du bois frais pour améliorer l'efficacité et la qualité du séchage de l'eucalyptus globulus.

(Torgovnikov and Vinden, 2010) ont exploré les technologies de traitement par micro-ondes (MW) pour améliorer la perméabilité du bois, ce qui résout les problèmes liés à la faible perméabilité des espèces de bois difficiles à traiter. Leur recherche montre que le traitement MW génère une pression de vapeur élevée qui rompt les membranes cellulaires, facilitant le transport des liquides et des vapeurs. Les applications commerciales incluent le traitement des bois réfractaires, le séchage rapide des feuillus et la fabrication de nouveaux matériaux à base de bois. Les résultats suggèrent que le traitement MW peut significativement améliorer la perméabilité du bois et offrir des solutions efficaces pour diverses problématiques industrielles.

Une étude menée par (Herrera-Díaz *et al.*, 2018) a examiné les changements dans les propriétés physiques et mécaniques du bois de pin radiata après des processus de séchage et de modification thermique. Les résultats indiquent que la densité du bois montrait une grande dispersion post-traitement, sans corrélation avec d'autres paramètres, bien que les valeurs minimales de densité soient restées constantes après la modification thermique. La perte de poids (WL) et le taux d'humidité (X) ont diminué proportionnellement à l'intensité du traitement, améliorant ainsi la stabilité dimensionnelle du bois tout en maintenant le même ordre d'anisotropie. La rigidité du bois n'a pas été affectée par la température de séchage, et les corrélations entre module d'élasticité E , X et WL étaient acceptables. Toutefois, le module de rupture a diminué de 59 % après la modification thermique.

Une étude menée par (Balboni *et al.*, 2018) a exploré les effets de deux intensités de traitement par micro-ondes sur les planches de bois vert d'eucalyptus macrohyncha. Les résultats ont révélé que le traitement à faible intensité réduit certains défauts de séchage sans affecter significativement les propriétés mécaniques, alors que des intensités plus élevées provoquent une diminution plus marquée de la résistance du bois.

Les effets du séchage par micro-ondes (MW) sur les cinétiques de séchage du bois de pin jack, ainsi que sur l'efficacité phytosanitaire, la consommation énergétique et les propriétés mécaniques du produit séché, ont été étudiés par (Ouertani *et al.*, 2018). Les expériences ont été réalisées à une fréquence de 2,45 GHz avec des puissances de micro-ondes variant de 300

à 1000 W. Les résultats ont montré que l'augmentation de la puissance des micro-ondes, de la température initiale du bois et la réduction de l'épaisseur de l'échantillon augmentaient la température interne, amélioraient le taux de séchage et réduisaient à la fois le temps de séchage et la consommation d'énergie. L'efficacité de l'irradiation des micro-ondes pour la désinfection des planches de pin jack a été déterminée en termes de combinaisons température/temps, basées sur les cinétiques de séchage réelles et selon les normes pour les mesures phytosanitaires. L'énergie requise pour sécher des échantillons de planches de bois de 12 mm d'épaisseur, avec une puissance de micro-ondes allant de 300 à 1000 W, variait de 36,4 à 12,3 MJ/kg d'eau, représentant jusqu'à 65 % d'économie d'énergie. L'impact de la puissance des micro-ondes sur les propriétés mécaniques n'était pas statistiquement significatif, bien que ces propriétés aient tendance à diminuer avec l'augmentation de la puissance.

Par ailleurs, (Qin *et al.*, 2022) ont évalué l'effet du séchage intermittent par micro-ondes (IMD) sur la qualité nutritionnelle et les caractéristiques de séchage des tranches de kaki. En traitant les tranches de kaki avec différentes puissances de micro-ondes (280 à 560 W), ils ont analysé les caractéristiques de séchage, les composants nutritionnels et les propriétés sensorielles. Les résultats ont montré que la puissance de micro-ondes influençait le temps de séchage, le taux de séchage et divers composants nutritionnels, avec une puissance optimale déterminée à 490 W pour améliorer le taux de séchage et la valeur nutritionnelle tout en conservant une bonne acceptabilité sensorielle.

Les lamelles de bambou traitées à l'alkali ont été séchées par différents procédés dans l'étude de (Wu *et al.*, 2023), qui ont comparés les effets du séchage à l'air chaud, du séchage par micro-ondes et du séchage par lyophilisation. Le séchage à l'air chaud et par micro-ondes a entraîné une structure de cellules parenchymateuses effondrées, tandis que la lyophilisation a bien préservé la structure originale. Les lamelles séchées à l'air chaud ont montré des augmentations significatives de la densité, de la résistance à la traction et du module de traction par rapport aux lamelles non traitées. Le séchage à l'air chaud a également amélioré la flexibilité des lamelles de bambou, attribuable à la formation de liaisons hydrogène et à des connexions denses entre les cellules parenchymateuses. Cette méthode de séchage est donc recommandée pour obtenir des lamelles de bambou à la fois solides et flexibles.

Les comportements de température et d'humidité pendant le séchage par micro-ondes du bois de pin maritime portugais (*Pinus pinaster* Aiton) ont été étudiés par (Fernando Júnior Resende Mascarenhas *et al.*, 2024). L'étude a identifié trois phases distinctes dans les taux de séchage,

avec une moyenne de 0,085 % d'eau retirée par seconde. Les températures ont suivi trois étapes : une augmentation rapide initiale, une période de température constante, puis une légère diminution vers la fin du séchage. Elles ont débuté sous 100 °C, avec des moyennes variant de 126 à 145 °C. Les échantillons avec une humidité initiale plus faible ont atteint des températures plus élevées. Le séchage par micro-ondes a amélioré l'imprégnabilité de l'eau de 65 %, mais a légèrement réduit la résistance à la compression de 11 %. Les résultats indiquent que les schémas de température et d'humidité observés avec de petits échantillons de bois sont représentatifs de spécimens de taille réelle, suggérant que cette technologie peut être largement utilisée pour le séchage du bois, y compris pour des spécimens de taille structurelle.

Les effets du traitement par micro-ondes sur la traitabilité et les propriétés mécaniques de l'eucalyptus portugais (*Eucalyptus globulus* Labill.) ont été évalués dans l'étude menée par (Fernando J.R. Mascarenhas *et al.*, 2024). Le traitement par micro-ondes a permis d'augmenter significativement la rétention des produits de préservation, une amélioration qui dépasse celle obtenue par les méthodes conventionnelles. Bien que les propriétés mécaniques aient montré une légère diminution, elles restaient comparables à celles du groupe témoin. Cette approche a donc amélioré l'imprégnabilité de l'eucalyptus sans compromettre ses propriétés mécaniques, ce qui le rend adéquat pour des applications structurelles globales.

4.2 Modélisation numérique

Un modèle numérique pour simuler le séchage combiné par micro-ondes et infrarouges est présenté dans l'étude de (Salagnac, Glouannec and Lecharpentier, 2004). Ce modèle physique décrit les transferts de chaleur et de masse dans un matériau poreux en tenant compte des apports énergétiques des deux types de radiations. Les simulations réalisées, validées par des tests expérimentaux sur du béton cellulaire, permettent de mieux comprendre et optimiser le séchage en combinant ces deux technologies.

Un modèle de transfert de chaleur et de masse en 2D développé pour simuler le séchage par micro-ondes des échantillons de chêne blanc a été présenté dans l'article de (Jia and Afzal, 2008). Ce modèle permet de suivre le mouvement des liquides libres, de la vapeur et de l'eau liée durant le processus de séchage. Les résultats expérimentaux et les simulations ont révélé que le mouvement de l'humidité dans le chêne blanc est considérablement entravé, entraînant un gradient élevé de pression interne de vapeur. La pression interne de vapeur est influencée par les dimensions de l'échantillon, notamment sa longueur et son épaisseur. À densité de puissance d'entrée constante, la pression interne générée dans le cœur de l'échantillon

augmente avec sa longueur et son épaisseur. Cependant, l'épaisseur de l'échantillon a un impact moindre sur le gradient de pression comparé à la longueur, en raison du rapport élevé de perméabilité entre les directions longitudinales et transversales.

Une recherche a été menée pour étudier l'impact du séchage mixte convectif et micro-ondes sur la qualité du bois de pin jack, comme exploré dans l'étude de (Ouertani, Hassini, *et al.*, 2015). Cette étude a conduit au développement d'un modèle détaillé de transfert de chaleur et de masse afin de simuler et analyser les phénomènes physiques dans le bois pendant ce processus combiné. Le modèle a été validé en utilisant des courbes de teneur en eau moyenne pour différents niveaux de puissance des micro-ondes. Les simulations ont montré que l'augmentation de la puissance des micro-ondes réduit considérablement le temps de séchage du bois de pin jack, mais augmente également la pression interne des gaz, ce qui accroît le risque de fissuration. En revanche, le séchage mixte convectif et micro-ondes, avec une puissance modérée des micro-ondes et une température de l'air contrôlée, permet de réduire le temps de séchage tout en maintenant la pression interne des gaz à des niveaux raisonnables, réduisant ainsi le risque de fissuration par rapport au séchage convectif pur. Ces résultats ont été corroborés par des mesures expérimentales de la résistance des échantillons séchés à différents niveaux de puissance des micro-ondes. L'étude révèle que le séchage combiné par convection et micro-ondes est plus performant pour le bois de pin jack que le séchage convectif classique.

L'étude menée par (Grinchik *et al.*, 2015) présente un modèle physico-mathématique pour le transfert de chaleur et d'humidité dans le séchage des matériaux, en tenant compte du séchage par l'énergie d'un champ micro-ondes. Le système d'équations développé a été résolu numériquement pour trois scénarios de séchage d'une plaque de bois : séchage convectif, séchage par énergie de champ micro-ondes, et séchage combiné des deux méthodes. Les résultats des calculs numériques ont permis de déterminer les distributions de température, de pression de vapeur et de teneur en eau dans la section transversale de la plaque à différents moments du temps, ainsi que les variations moyennes de la teneur en eau et de la température au cours du processus de séchage. L'analyse des résultats a conduit à des conclusions sur les différences et les caractéristiques distinctives du chauffage et du séchage convectif, par micro-ondes, et combiné.

Dans les travaux de **Kumar et al. (2016, 2018)**, Une exploration approfondie des mécanismes de transfert de chaleur et de masse dans le séchage convectif intermittent par micro-ondes (IMCD) des produits alimentaires a été réalisée à l'aide de modèles mathématiques avancés.

Dans une première étude (Kumar *et al.*, 2016), ils ont élaboré un modèle de milieu poreux multiphasique pour l'IMCD, prenant en compte l'eau liquide, les gaz et la matrice solide à l'intérieur des aliments pendant le séchage. Ce modèle a été validé expérimentalement en comparant les distributions de la teneur en eau et de la température après chaque période de séchage et de tempérage. Les résultats ont montré que les flux de vapeur et d'eau dus à la pression des gaz et à la diffusion étaient relativement plus élevés dans l'IMCD par rapport au séchage convectif, ce qui rend l'IMCD plus rapide et plus efficace.

Dans une seconde étude, (Kumar *et al.*, 2018) ont approfondi leur recherche en développant un modèle mathématique en 3D pour l'IMCD, intégrant les phénomènes électromagnétiques à l'aide des équations de Maxwell couplées avec le transport multiphasique. Cette étude a révélé que la distribution de la température dans le matériau était inégale, se redistribuant pendant la période de tempérage. Les flux d'eau et de vapeur ont montré un profil asymétrique en raison de la non-uniformité du séchage par micro-ondes. Une compréhension approfondie de ces mécanismes de transport permet de développer des processus de séchage appropriés pour améliorer la qualité des aliments, l'efficacité énergétique et l'optimisation du processus IMCD.

5 CONCLUSION

Ce chapitre a mis en évidence les particularités structurelles du bois d'eucalyptus et les défis associés à son séchage, notamment en raison de son anisotropie et de sa propension aux défauts. Les différentes techniques de séchage ont été passées en revue, avec une attention particulière portée au séchage par micro-ondes, qui se distingue par sa capacité à réduire les gradients internes, à raccourcir les temps de traitement et à améliorer l'homogénéité du produit final. Ces éléments bibliographiques permettront de guider l'approche expérimentale et la modélisation numérique du séchage du bois dans les chapitres suivants.

Chapitre III CARACTÉRISATION HYDRO-THERMIQUE DU BOIS D'EUCALYPTUS GLOBULUS

1 INTRODUCTION

Ce chapitre explore les caractéristiques et techniques de séchage appliquées au bois d'eucalyptus (*Eucalyptus globulus*), matériau aux propriétés uniques et aux applications industrielles spécifiques. Sa densité élevée et sa structure complexe posent des défis particuliers, notamment la maîtrise des risques de fissuration et de déformation au cours du séchage. Afin de mieux comprendre l'évolution de ses propriétés pendant ce processus, une étude approfondie a été menée sur les isothermes de désorption, la densité, le retrait volumique et la conductivité thermique du bois. Ces données ont été analysées à l'aide de modèles, notamment le modèle thermodynamique, afin d'explorer les relations entre température, humidité et propriétés structurales du matériau. Les corrélations établies dans ce chapitre constituent une base essentielle pour les modèles de transfert couplé de chaleur et de masse développés ultérieurement dans cette thèse, dans le but de prédire le comportement du bois d'eucalyptus au séchage

2 ISOTHERMES DE SORPTION

2.1 Equilibre hygroscopique

2.1.1 *Activité de l'eau dans un produit*

La stabilité des produits biologiques est liée à la disponibilité physico-chimique de l'eau pour les diverses réactions de dégradation que le produit peut subir (attaque par des micro-organismes, réactions chimiques enzymatiques et non enzymatiques) (Bimbenet, Gilles and Albert, 2002). Cette disponibilité est quantifiée par l'activité de l'eau (a_w) du produit (Equation. III.1), qui est le rapport entre la pression de vapeur d'eau (P_v) à la surface du produit et la pression de vapeur saturante $P_{vsat}(T)$ à la température du produit (T) :

$$a_w = \frac{P_v}{P_{vsat}(T)} = \frac{HR_{eq}}{100} \quad (III.1)$$

Le bois tend vers un état d'équilibre hygroscopique en raison de la sorption dans des conditions ambiantes. La variation de la quantité d'eau contenue dans le bois modifie plusieurs de ses

propriétés thermiques et mécaniques (LARTIGUE, 1987). La teneur en eau du bois se stabilise à une valeur inférieure au Point de Saturation des Fibres (PSF), définissant le domaine hygroscopique. La nature physique de l'hygroscopicité est appréciée à travers la nature thermodynamique de l'eau et la structure chimique de la cellulose, le principal constituant du bois. Il est donc nécessaire de présenter d'abord la nature de l'eau contenue dans le bois.

2.1.2 Détermination des isothermes de désorption

Les isothermes de désorption sont décrites par une courbe reliant la teneur en eau à l'équilibre du produit étudié avec l'humidité relative (HR) de l'air environnant à une température constante. Le principe de la méthode consiste à suivre la masse d'un échantillon exposé à une atmosphère avec une humidité relative et une température contrôlées. Actuellement, il existe deux méthodes disponibles sur le marché. La première, et la plus ancienne, est la méthode gravimétrique statique, basée sur des solutions salines saturées pour maintenir une humidité relative constante dans un espace clos, et un four pour contrôler la température. La seconde est la méthode gravimétrique dynamique utilisant une machine autonome permettant de contrôler les conditions climatiques, la transition vers les conditions d'équilibre, et la mesure de la masse. Dans ce travail, nous adoptons la méthode gravimétrique statique, disponible au LETTM. Il est à noter que des études comparatives sur les deux méthodes ont montré qu'il n'y avait pas d'influence sur les résultats (Simo-Tagne *et al.*, 2016).

2.1.3 Description de la méthode d'échantillonnage

2.1.3.1 Sélection de l'arbre

La sélection de l'arbre candidat s'est basée sur plusieurs critères, notamment un arbre sain et non fourchu, droit et non incliné pour éviter le bois de tension, absence de défauts (attaques parasitaires, champignons, pourriture et cavités), tronc bien proportionné sans déformations, et une hauteur totale significative (> 20 m). La figure III.1 illustre les principaux échantillons prélevés de l'arbre d'eucalyptus. À partir de la grume et des disques, des spécimens ont été façonnés pour réaliser divers essais et tests recommandés dans cette étude (caractérisation hydrothermique, propriétés mécaniques, et cinétiques de séchage).

2.1.3.2 Préparation des échantillons de bois

Les échantillons de bois frais d'eucalyptus globulus, collectés dans le nord-est de l'Algérie, ont été utilisés pour l'étude. Les échantillons ont été sciés à partir d'un seul arbre vert pour limiter la variabilité et se concentrer sur l'influence de la température et de l'humidité relative sur le

processus de désorption d'eau (Ouertani, 2014). Les isothermes de désorption ont été déterminées à l'aide d'échantillons ayant des dimensions de 10 mm de longueur, 10 mm de largeur, et 5 mm d'épaisseur, orientés dans les directions longitudinale (L), radiale (R) et tangentielle (T). Ces échantillons ont été spécialement découpés dans la direction des fibres du bois longitudinales aux planches. Ce dimensionnement a permis d'assurer une teneur en eau à l'équilibre uniforme, comme illustré dans la figure III.1. Cette méthode de sciage longitudinal a été choisie car elle entraîne généralement des variations inférieures des propriétés du bois par rapport au sciage transversal (Bahar *et al.*, 2017).

Les échantillons ont été dimensionnés de manière à garantir une teneur en eau à l'équilibre (X_{eq}) uniforme dans tout l'échantillon. Un disque de bois de 32 mm d'épaisseur a été découpé à 125 cm au-dessus du sol pour déterminer la teneur en eau initiale. À partir de ce disque, des échantillons mesurant 20 × 20 × 50 mm (R × T × L) ont été obtenus (Figure III.1). Seul le bois mature a été pris en compte pour cette étude. D'après les observations macroscopiques, il a été déterminé que la zone de bois juvénile se terminait entre les cernes 20 et 25 à partir de la moelle.

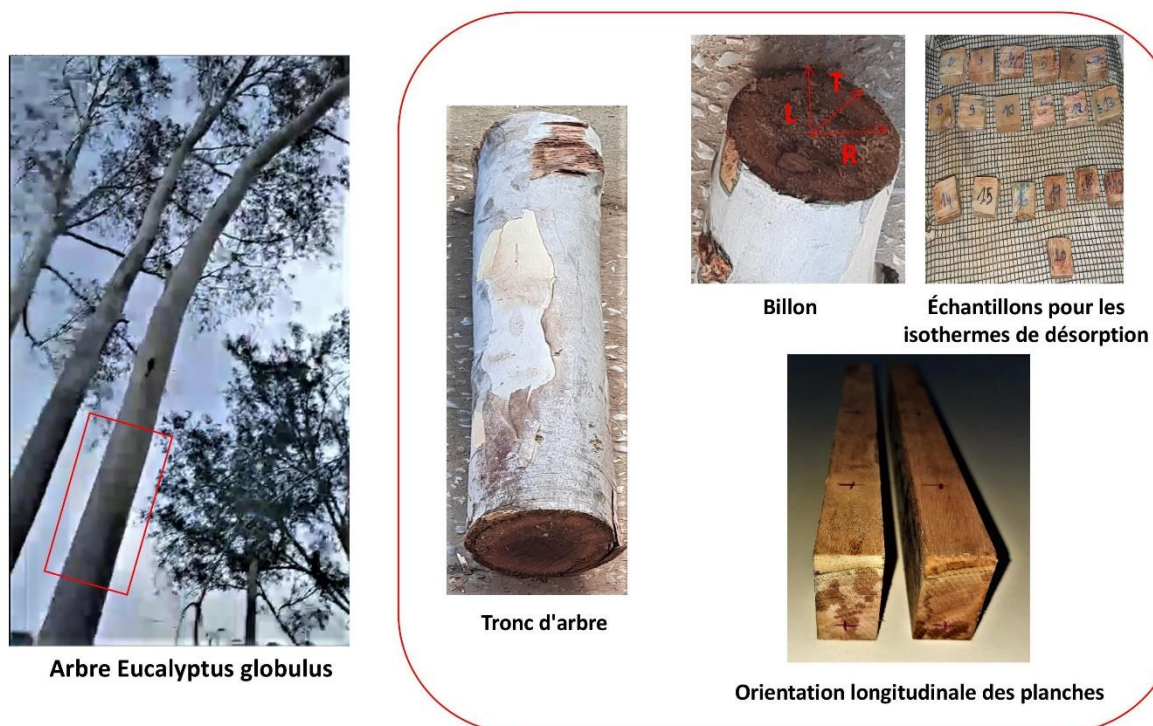


Figure III.1 Préparation des échantillons de bois d'eucalyptus globulus pour les expériences de désorption.

2.1.4 Mesure de la teneur en eau à l'équilibre

En utilisant des solutions salines saturées standards comme base, la méthode gravimétrique statique a été utilisée pour évaluer les isothermes de désorption des échantillons de bois d'eucalyptus globulus. Neuf solutions salines saturées différentes, y compris KOH, LiCl, MgCl₂, K₂CO₃, NaBr, NaNO₃, NaCl, KCl, et BaCl₂, ont été utilisées pour contrôler l'humidité relative (HR) à l'intérieur de bouteilles en verre hermétiques (Sémété *et al.*, 2017). Huit températures distinctes ont été utilisées pour les expériences de désorption : 40°C, 50°C, 55°C, 60°C, 65°C, 70°C, 75°C et 80°C. Un four de séchage avec une précision de $\pm 1^\circ\text{C}$ a été utilisé pour assurer un contrôle précis de la température (Figure III.2). Le tableau III.1 donne un aperçu des niveaux d'activité de l'eau des solutions salines saturées.



Figure III.2 Dispositif expérimental pour la mesure des isothermes de désorption (LETTM-FST).

Les mesures de poids des échantillons de bois ont été réalisées à l'aide d'une balance numérique avec une précision de $\pm 0,001$ g. Pour déterminer la teneur en eau à l'équilibre (X_{eq}), les échantillons étaient considérés comme ayant atteint l'équilibre lorsque la différence de masse ne dépassait pas 0,1 % après deux pesées consécutives effectuées à 24 heures d'intervalle (Ouertani *et al.*, 2011). La teneur en matière sèche des échantillons de bois a été obtenue en les plaçant dans un four de séchage à une température contrôlée de $103 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à ce qu'une masse constante soit atteinte. La teneur en matière sèche a été déterminée en fonction de la

masse sèche des échantillons (Bahar *et al.*, 2020). La teneur en eau à l'équilibre (X_{eq}) peut être calculée à l'aide de l'équation suivante (Equation. III.2) :

$$X_{eq}\% = \frac{M_{eq}-M_d}{M_d} * 100 \quad (\text{III.2})$$

Tableau III.1. Humidité relative de chaque solution saline saturée.

Solutions sels	T (°C)							
	40	50	55	60	65	70	75	80
KOH	0,062	0,057	0,056	0,055	0,056	0,056	0,056	0,056
LiCl	0,112	0,11	0,108	0,105	0,103	0,102	0,101	0,1082
MgCl ₂	0,19	0,183	0,18	0,177	0,175	0,173	0,17	0,166
K ₂ CO ₃	0,325	0,32	0,316	0,31	0,305	0,301	0,295	0,29
NaBr	0,431	0,425	0,42	0,42	0,413	0,41	0,41	0,402
NaNO ₃	0,589	0,58	0,571	0,565	0,561	0,556	0,552	0,55
NaCl	0,721	0,714	0,71	0,705	0,7	0,68	0,67	0,67
KCl	0,781	0,77	0,761	0,755	0,75	0,745	0,74	0,736
BaCl ₂	0,891	0,889	0,87	0,86	0,85	0,85	0,84	0,83

2.1.5 Méthode gravimétrique statique

La méthode gravimétrique statique est basée sur des solutions salines saturées (LARTIGUE, 1987; Ouertani *et al.*, 2014; Bahar *et al.*, 2017; Habouria *et al.*, 2023), qui imposent une pression de vapeur constante dans un espace clos appelé équilibre thermodynamique entre les phases liquide et gazeuse. En pratique, nous avons préparé neuf solutions salines dans des bocaux hermétiquement scellés pour obtenir une gamme d'humidité relative allant de 0,5 % à 88 %. Les valeurs d'humidité relative produites par chaque solution saline aqueuse sont présentées dans le Tableau III.2. Les solutions préparées sont placées dans un four à température régulée avec une précision de $\pm 0,1^\circ\text{C}$ (Figure III.2). La masse des échantillons est déterminée à l'aide d'une balance électronique de haute précision. L'équilibre hygroscopique est atteint lorsque la masse de l'échantillon reste constante selon le critère suivant : la différence de masse ne dépasse pas 0,1 % après deux pesées consécutives pendant 24 heures (Ouertani *et al.*, 2011). Une fois que les échantillons atteignent leur masse à l'équilibre, nous déterminons leur masse sèche en

les plaçant dans un four à $103 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 24 heures.

2.1.6 Modélisation des isothermes de désorption

Comme le montre le Tableau III.2, sept modèles de sorption différents ont été utilisés pour analyser les résultats de désorption issus des essais. Ces modèles, composés de deux ou trois paramètres, sont couramment utilisés dans la littérature pour décrire le comportement de sorption du bois (Simo-Tagne *et al.*, 2016; Zhang, Wu and Chen, 2017). Le logiciel Origin 9.0 a été employé pour réaliser une analyse de régression non linéaire sur les données expérimentales, permettant ainsi de déterminer les paramètres des modèles.

Tableau III.2 Modèles mathématiques utilisés pour ajuster les isothermes de sorption d'humidité du bois d'eucalyptus globulus.

Modèle	Equations
BET (1938)	$X_{eq} = \frac{a \cdot b \cdot aw}{(1 - aw)(1 + (b - 1)aw)}$
Oswin (1998)	$X_{eq} = a \left(\frac{aw}{1 - aw} \right)^b$
GAB (1987)	$X_{eq} = \frac{MC_m \times C_g \times K \times aw}{(1 - K \times aw)(1 - K \times aw + K \times C_g \times aw)}$
Henderson (1952)	$X_{eq} = \left(-\frac{\ln(1 - aw)}{a} \right)^{\frac{1}{b}}$
Thermodynamic	$X_{eq} = a(aw^c) + b(aw^d)$
Dent (1977)	$X_{eq} = \frac{aw}{A \times aw^2 + B * aw + C}$
Hailwood and Horrobin (1946)	$X_{eq} = MC_{fsp} \exp(\varphi \times \ln(aw) \times \exp(a * aw))$

Pour évaluer la capacité de chaque modèle à décrire avec précision les données de désorption, des mesures statistiques telles que le coefficient de corrélation (r) et l'erreur standard (s) ont été utilisées. Un coefficient de corrélation plus élevé et une erreur standard plus faible sont des indicateurs d'une meilleure adéquation du modèle aux données expérimentales, comme l'ont indiqué (Ouertani, 2014; Bahar, 2017; Habouria, 2022).

$$\chi^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (XR_{i,exp} - XR_{i,pre})^2}{N-z} \quad (III.3)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (XR_{i,exp} - XR_{i,pre})^2}{\sum_{i=1}^n (XR_{i,exp} - \overline{XR}_{i,exp})^2} \quad (III.4)$$

$$\overline{XR}_{i,exp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n XR_{i,exp} \quad (III.5)$$

2.2 Résultats et discussions

2.2.1 Isothermes de désorption

À des températures de 40 °C, 50 °C, 55 °C, 60 °C, 65 °C, 70 °C, 75 °C et 80 °C, la Figure III.3 illustre la variation de la teneur en eau à l'équilibre (X_{eq}) pour des échantillons de bois d'eucalyptus globulus en fonction de l'humidité relative (HR). Les courbes isothermes présentées dans la figure montrent une forme sigmoïdale, spécifiquement classée comme "Type III" selon la classification BET proposée par (Ben Abdelhamid *et al.*, 2016). Ce comportement sigmoïdal est couramment observé dans les produits lignocellulosiques et a été régulièrement documenté dans diverses études menées par (Tagne and Beguide, 2011). La forme sigmoïdale indique la présence de trois domaines distincts de fixation de l'eau au sein de la matrice solide, comme expliqué par (Wan *et al.*, 2016).

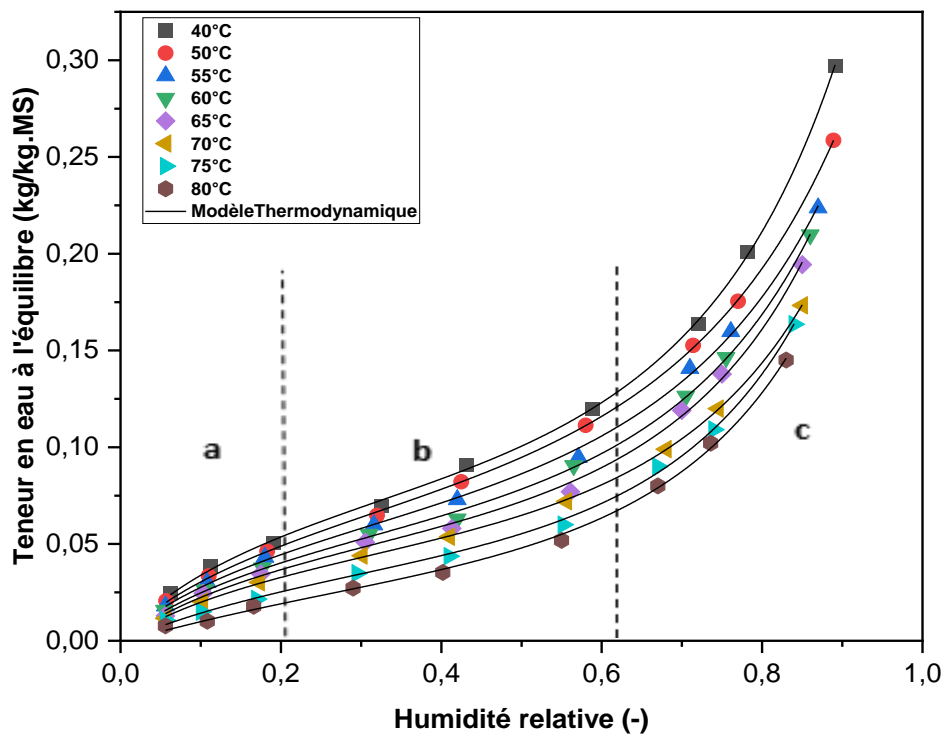


Figure III.3 Teneur en eau à l'équilibre en fonction de l'humidité relative.

Le premier domaine (Figure. III.3-a), à faible humidité relative, montre de l'eau en monocouche fortement attachée à la structure solide par des forces chimiques telles que les liaisons hydrogène et les forces de Van der Waals. Avec un niveau de fixation de l'eau inférieur à celui du premier domaine, le deuxième domaine, situé à humidité relative moyenne (Figure III.3-b), représente de l'eau en multicouche liée à la structure solide. Enfin, à haute humidité relative (Figure III.3-c), le troisième domaine englobe le phénomène de condensation capillaire, où l'eau s'accumule dans les macropores du bois. Les molécules d'eau dans cette région sont maintenues par des forces capillaires, permettant ainsi la présence d'eau libre dans les pores macroscopiques du bois. Il a été démontré que les forces capillaires dans cette zone sont plus faibles que les forces de Van der Waals.

Les résultats suggèrent que la teneur en eau à l'équilibre (X_{eq}) diminue lorsque la température augmente à une humidité relative (HR) constante ou lorsque la HR diminue à une température constante. Ce comportement est fréquemment observé dans le bois, les matériaux lignocellulosiques et les produits hygroscopiques, ce qui est cohérent avec les études menées par (Zhang, Wu and Chen, 2017), et (Habouria *et al.*, 2023). L'impact de la température sur les isothermes de sorption d'humidité (MSI) est significatif dans les domaines multicouches et capillaires, tandis que son effet est négligeable à de faibles niveaux d'activité de l'eau. Lorsque la température augmente, l'énergie d'activation des molécules d'eau augmente également, leur permettant de rompre les forces intermoléculaires entre les sites de sorption et la vapeur d'eau. Par conséquent, cela entraîne une diminution de la teneur en eau à l'équilibre (X_{eq}). Des observations similaires ont été rapportées dans les recherches de (Ouertani *et al.*, 2014; Bahar *et al.*, 2017; Hermassi *et al.*, 2017; Habouria *et al.*, 2023).

2.2.2 Ajustement des données expérimentales avec des modèles mathématiques

Les données expérimentales de la teneur en eau à l'équilibre (X_{eq}) obtenues à partir de la Figure III.3 ont été utilisées pour ajuster les modèles de sorption répertoriés dans le Tableau III.2. Les résultats de l'étude de régression non linéaire des isothermes de sorption à différentes températures sur des échantillons de bois d'eucalyptus globulus sont présentés dans le Tableau III.3.

Tableau III.3 Résultats de l'ajustement des isothermes de désorption du bois d'eucalyptus globulus.

Modèles	T°(C)	R ²	χ ²	Paramètres
GAB	40°C	0,97527	2,65209E-4	a=0,55222 b=0,09702 c=0,94266
	50°C	0,96926	2,51851E-4	a=0,5484 b=0,08832 c=0,93665
	55°C	0,96059	2,48932E-4	a=0,54331 b=0,0813 c=0,993612
	60°C	0,95327	2,64231E-4	a=0,53889 b=0,07407 c=0,94012
	65°C	0,95606	2,13423E-4	a=0,53717 b=0,06755 c=0,93323
	70°C	0,94938	2,01348E-4	a=0,5333 b=0,06166 c=0,9307
	75°C	0,9464	1,91128E-4	a=0,52531 b=0,05237 c=0,94757
	80°C	0,94931	1,47363E-4	a=0,52092 b=0,04486 c=0,95595
BET	40°C	0,919558	7,39377E-4	a=285,657 b=0,03686
	50°C	0,90419	6,72892E-4	a=204,173 b=0,033
	55°C	0,90254	5,27664E-4	a=113,049 b=0,0311
	60°C	0,90124	4,78659E-4	a=87,226 b=0,0286
	65°C	0,8832	4,8627E-4	a=140,8254 b=0,02472
	70°C	0,87064	4,41045E-4	a=202,095 b=0,0223
	75°C	0,90322	2,95806E-4	a=49,9669 b=0,02028
	80°C	0,92215	1,93962E-4	a=30,7208 b=0,01808
Hailwood et horrobin	40°C	0,99823	1,90222E-5	a=1,74776 b=13,47477 c=13,574225
	45°C	0,99788	1,73779E-5	a=2,05776 b=14,07198 c=14,10573
	50°C	0,99501	3,15261E-5	a=2,469761 b=14,23626 c=14,32989
	55°C	0,98771	6,95195E-5	a=2,94363 b=15,09056 c=15,54578
	60°C	0,99185	3,85943E-5	a=3,34592 b=16,19167 c=16,67715
	70°C	0,98457	6,1385E-5	a=3,8658 b=17,21994 c=17,85131
	75°C	0,9872	4,56547E-5	a=7,06541 b=13,09463 c=16,7276
	80°C	0,99361	1,85647E-5	a=9,0124 b=13,11575 c=18,42083
Thermodynamique	40°C	0,99837	1,74984E-5	a=0,51464 b=1,01276 c=1,72302
	50°C	0,999797	1,66348E-5	a=0,43195 b=0,99447 c=1,65288
	55°C	0,9952	3,03229E-5	a=0,37169 b=0,99206 c=1,56079
	60°C	0,9883	6,61844E-5	a=0,35091 b=1,02243 c=1,555318
	65°C	0,99275	3,5219E-5	a=0,31295 b=1,01459 c=1,5483
	70°C	0,98604	5,55175E-5	a=0,2772 b=1,02411 c=1,49948
	75°C	0,98916	3,86437E-5	a=0,26024 b=1,14604 c=1,41067
	80°C	0,99497	1,46262E-5	a=0,23818 b=1,18667 c=1,41764
Handerson	40°C	0,9783	1,74576E-4	a=9,22734 b=1,12784
	50°C	0,98449	1,08928E-4	a=11,43553 b=1,18613
	55°C	0,98532	7,95028E-5	a=13,68686 b=1,22168
	60°C	0,97818	1,05772E-4	a=13,76996 b=1,17446
	65°C	0,98263	7,23065E-5	a=15,78557 b=1,18267
	70°C	0,97638	8,05197E-5	a=17,67312 b=1,17915
	75°C	0,98292	5,21936E-5	a=15,40437 b=1,05964
	80°C	0,98972	2,56024E-5	a=15,97023 b=1,01906
DENT	40°C	0,99823	1,90009E-5	a=-13,65198 b=13,56698 c=1,72605
	50°C	0,99717	1,73689E-5	a=-14,17083 b=14,1492 c=2,03942
	55°C	0,99788	3,15153E-5	a=-14,42389 b=14,34747 c=2,44294
	60°C	0,98771	6,94998E-5	a=-15,70031 b=15,27812 c=2,8959
	65°C	0,99185	3,9583E-5	a=-16,81282 b=16,3579 c=3,30324
	70°C	0,98458	6,13549E-5	a=-18,13614 b=17,5759 c=3,77043
	75°C	0,98293	4,56466E-5	a=-17,05954 b=13,53735 c=6,93103
	80°C	0,99149	1,85596E-5	a=-18,75324 b=13,56826 c=8,87029

En évaluant les critères statistiques (χ^2) et (R^2), il est observé que l'équation de sorption « Thermodynamique » proposée par (Merakeb, Dubois and Petit, 2009) a donné des prédictions satisfaisantes et a montré un excellent ajustement aux données des isothermes de désorption aux températures étudiées. De plus, le graphique des résidus montre que la différence maximale entre X_{eq} prédite par le modèle de Merakeb (Merakeb, Dubois and Petit, 2009) et X_{eq} mesurée est inférieure à 0,4 % (Figure III.4). Le haut degré de concordance entre la teneur en eau à l'équilibre prédite et mesurée, comme illustré dans la Figure III.5, est une preuve solide que le modèle de Merakeb (2009) décrit avec précision les isothermes de désorption du bois d'eucalyptus globulus. Les paramètres utilisés dans ces modèles, tels que la teneur en eau (X) au point de saturation des fibres (FSP), ont des implications physiques importantes et permettent de caractériser certaines propriétés de sorption du bois, ainsi que la teneur en eau et l'énergie associée à la monocouche d'eau (GAB), parmi d'autres facteurs.

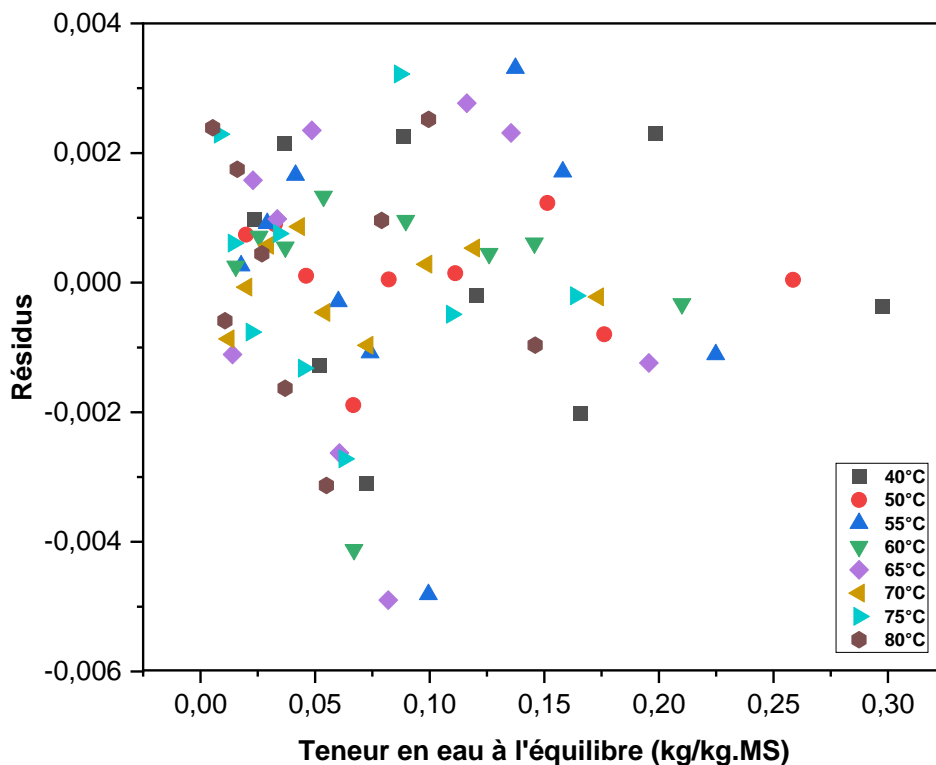


Figure III.4 Graphique des résidus pour X_{eq} prédite à différentes températures en utilisant le modèle « Thermodynamique ».

En appliquant le modèle de Merakeb pour déterminer la teneur en eau (X) au point de saturation des fibres (FSP) pour l'eucalyptus globulus, des valeurs comprises entre 36 % et 50 % ont été obtenues. Cette plage concorde avec les résultats rapportés par (Bengono Manga *et al.*, 2023) et (Koumoutsakos and Avramidis, 1999) dans leurs études sur l'eucalyptus globulus marocain et l'eucalyptus gomphocephala tunisien, respectivement. De plus, le paramètre thermodynamique « b » montre une tendance ascendante avec l'augmentation de la température, atteignant 1,19 à 80°C à partir de 0,99 à 40°C. Des tendances similaires ont été observées dans des études sur des essences de bois tendre et de bois dur, comme l'ont démontré (Bahar *et al.*, 2017) et (Merakeb, Dubois and Petit, 2009). Cette réduction peut être attribuée à la diminution du nombre de sites de sorption actifs, provoquée par les changements physiques et chimiques dus aux variations de température, comme expliqué par (McMinn, Khraisheh and Magee, 2003). Dans la présente étude, les données de sorption ont été ajustées à l'aide du modèle de Merakeb, permettant d'évaluer divers paramètres, notamment l'enthalpie, l'entropie et la pression de surface.

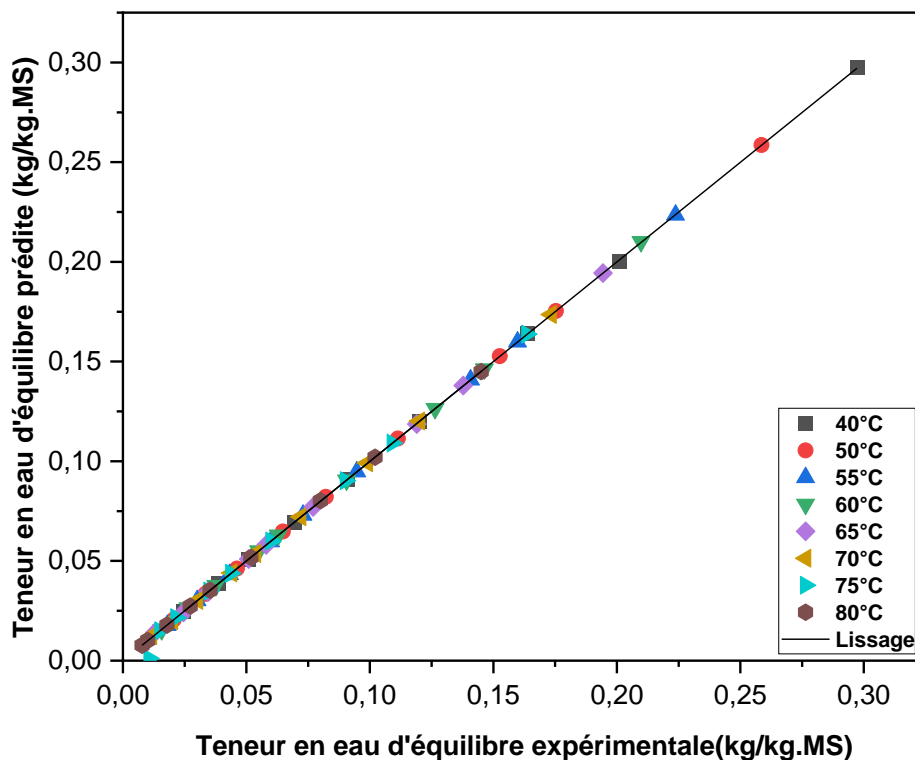


Figure III.5 Validation du modèle de désorption « Thermodynamique » à différentes températures.

2.3 Chaleur isostérique nette de désorption et entropie différentielle

La relation de Clausius-Clapeyron a été utilisée pour calculer la chaleur isostérique de désorption à partir des données ajustées de la teneur en eau à l'équilibre (X_{eq}) :

$$\frac{d(\ln(a_w))}{d\left(\frac{1}{T}\right)_{EMC}} = \frac{Q_{st,n}}{R} = \frac{q_{st}-L_v}{R} \quad (III.6)$$

$$\ln(a_w) = -\left(\frac{Q_{st,n}}{R}\right)\left(\frac{1}{T}\right) + cte \quad (III.7)$$

Dans cette équation, $Q_{st,n}$ symbolise la chaleur isostérique nette de désorption (J/mol), tandis que q_{st} représente la chaleur isostérique totale de désorption (J/mol). Le terme R correspond à la constante universelle des gaz (8,315 J/mol K), L_v désigne la chaleur latente de vaporisation, et a_w signifie l'activité de l'eau. La chaleur isostérique nette $Q_{st,n}$ est calculée en évaluant la pente dérivée d'une courbe traçant $\ln(a_w)$ en fonction de l'inverse de la température $1/T$ à une teneur en eau à l'équilibre (X_{eq}) constante. Ce processus est itéré pour différentes valeurs de X_{eq} afin d'examiner la corrélation entre la chaleur isostérique nette et X_{eq} , en supposant que $Q_{st,n}$ reste constant avec la température.

L'entropie est une mesure de l'ordre ou du désordre dans un système composé d'eau et de sorbant, ce qui aide à expliquer comment des processus tels que le gonflement, la cristallisation et la dissolution se produisent. L'équation de Gibbs-Helmholtz peut être utilisée pour calculer ce paramètre (Tsami, 1991) :

$$\Delta S = \frac{Q_{st,n}-\Delta G}{T} \quad (III.8)$$

Et l'énergie de Gibbs

$$\Delta G = -RT\ln(a_w) \quad (III.9)$$

L'entropie différentielle ΔS peut être calculée comme l'ordonnée à l'origine de la courbe expérimentale linéarisée sur l'axe a_w , à partir du tracé de $\ln(a_w)$ en fonction de $\frac{1}{T}$ pour différentes concentrations d'humidité à l'équilibre :

$$-\ln(a_w) = \frac{Q_{st,n}}{T} - \frac{\Delta S}{R} \quad (III.10)$$

2.4 Résultats et discussions

La Figure III.6 présente les courbes isostériques qui illustrent la relation entre la teneur en eau d'équilibre (X_{eq}) et le bois d'eucalyptus. La chaleur isostérique nette et l'entropie différentielle de désorption sont respectivement tracées en fonction de X_{eq} dans la Figure III.7 et la Figure III.8. D'après la Figure III.7, il est évident que la chaleur isostérique de désorption diminue à mesure que X_{eq} augmente. À 0,5 % de X_{eq} , les valeurs de chaleur sont de 36,62 kJ/mol, tandis qu'à 14 %, elles chutent à 5,49 kJ/mol. Cela signifie que moins d'énergie est nécessaire pour désorber l'eau à mesure que X_{eq} augmente, ce qui s'explique par la diminution des forces de liaison de l'eau avec les sites de sorption actifs à des niveaux plus élevés d'humidité.

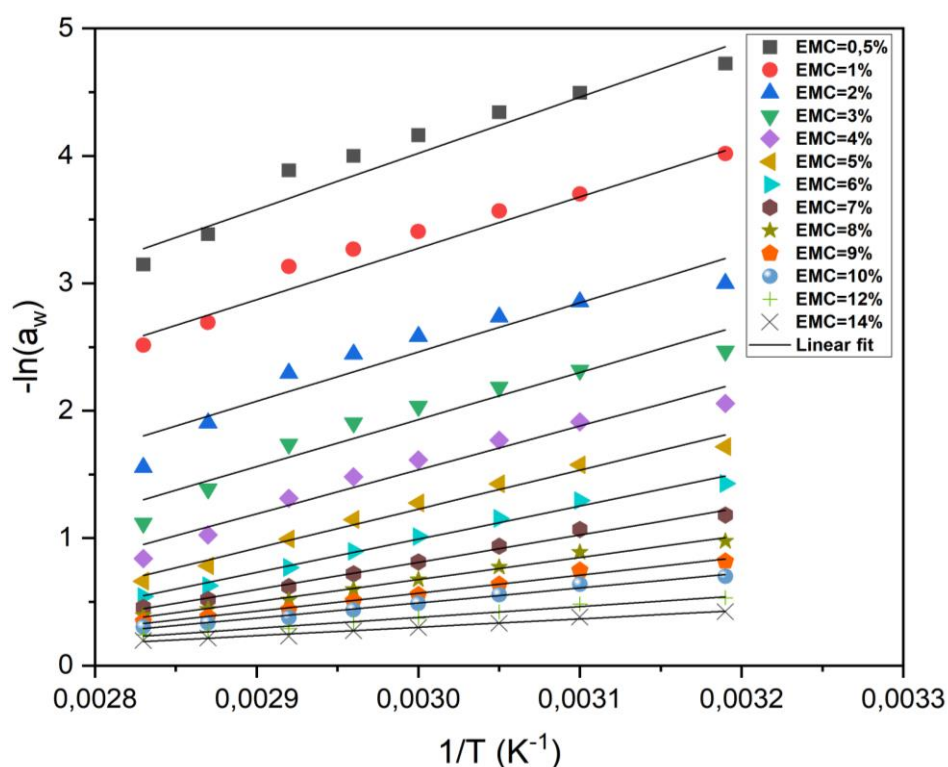


Figure III.6 Courbe isostérique de désorption du bois d'eucalyptus globulus.

Cette réduction de la chaleur isostérique à faible teneur en eau d'équilibre (X_{eq}) peut être attribuée à la présence de sites polaires très actifs à la surface du bois. Ces sites sont occupés par des molécules d'eau, formant une structure de monolayer et de multilayer, comme l'expliquent (Simo-Tagne *et al.*, 2016). À mesure que l'humidité augmente, les sites de sorption les plus actifs deviennent saturés, et la sorption se produit sur des sites moins actifs, ce qui entraîne une diminution de la chaleur de sorption. (Ouafi *et al.*, 2016) ont suggéré que la chaleur isostérique plus élevée observée à faible X_{eq} peut être due à une résistance accrue au

mouvement de l'eau à l'intérieur du matériau. Pour mieux comprendre le comportement de la chaleur isostérique en dessous de 4 % de teneur en eau à l'équilibre, correspondant à la teneur en eau du monolayer, des observations anatomiques sont nécessaires pour déterminer la proportion, le type et la taille des pores dans ce type spécifique de bois (Ouertani, Simo-Tagne and Rémond, 2022). Cependant, dans les processus de traitement thermique du bois, la teneur en eau cible est généralement inférieure à 4 %. Par conséquent, la chaleur isostérique de désorption a été modélisée à l'aide de la loi exponentielle de X_{eq} basée sur le modèle de (Tsami, 1991), intégrant la loi de puissance de la teneur en eau à l'équilibre pour des valeurs inférieures et supérieures à 4 % de X_{eq} , respectivement. La représentation mathématique est la suivante :

$$\text{Pour } X_{eq} > 4\% ; Q_{st,n} = 50,56 - 6,17 * X_{eq} + 0,21 * X_{eq}^2 \quad (r = 0,996) \quad (\text{III.11})$$

$$\text{Et } X_{eq} < 4\% ; Q_{st,n} = 30,80 + 10,77 \exp(-1,26 * X_{eq}) \quad (r = 0,977) \quad (\text{III.12})$$

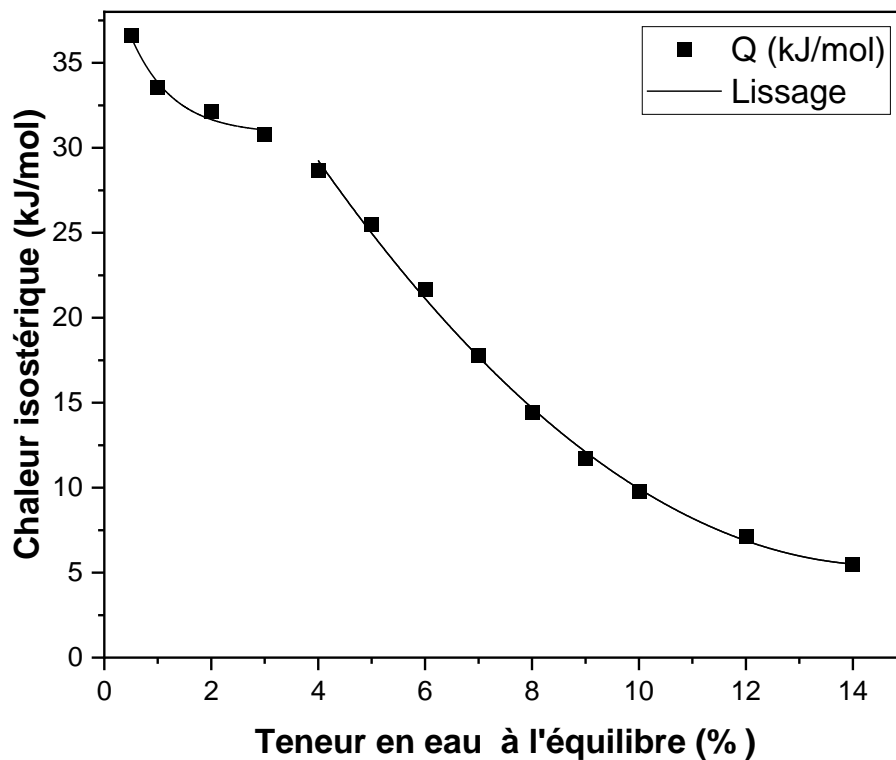


Figure III.7 Variation de la chaleur isostérique nette de désorption en fonction de X_{eq} .

La diminution de l'enthalpie de désorption, comme indiqué dans l'équation (III.12), est une caractéristique commune observée dans les matériaux lignocellulosiques tels que le pin gris et le bois de palmier (Ouertani *et al.*, 2011, 2014), le bois de chêne (Bahar *et al.*, 2017), et

l'eucalyptus gomphocephala (Habouria *et al.*, 2023). Le bois d'eucalyptus globulus présente une enthalpie de désorption plus élevée que celle de l'eucalyptus gomphocephala, du pin gris, du bois de palmier, et du bois de chêne. Étant donné cette valeur d'enthalpie plus élevée, un temps de séchage plus long sera probablement nécessaire pour évaporer l'eau hygroscopique présente dans le bois d'eucalyptus globulus. La relation entre la teneur en eau d'équilibre (X_{eq}), et l'entropie différentielle de désorption du bois d'eucalyptus globulus est illustrée dans la Figure III.7. Une fonction polynomiale a été utilisée pour ajuster les variations de l'entropie différentielle de désorption en fonction de la teneur en eau, ce qui est comparable au comportement observé pour l'enthalpie. Cette fonction tient compte de deux expressions distinctes, pour des teneurs en eau inférieures et supérieures à 4%, et est représentée comme suit :

$$\text{Pour } X_{eq} < 4\% ; \Delta S = 85,17 - 24,48 * X_{eq} + 15,51 * X_{eq}^2 \quad (r = 0,998) \quad (\text{III.13})$$

$$\text{Et } X_{eq} > 4\% ; \Delta S = 128,91 - 15,44 * X_{eq} + 0,515 * X_{eq}^2 \quad (r = 0,995) \quad (\text{III.14})$$

À une teneur en eau d'équilibre (X_{eq}) de 0,5%, l'entropie différentielle de désorption a diminué à 76,45 J/mol K, et à 14%, X_{eq} a chuté à 13,97 J/mol K. Une valeur plus élevée de l'entropie de désorption suggère une mobilité accrue de l'eau, ce qui peut être attribué à des interactions plus fortes entre les molécules d'eau et la surface adsorbante contenant des sites de sorption hautement actifs, comme l'expliquent McMinn & Magee (2003) (McMinn, Khraisheh and Magee, 2003). La diminution de l'entropie différentielle à mesure que X_{eq} augmente est due à la réduction de l'aléa des molécules d'eau lorsqu'elles forment la monocouche. Le nombre de sites de sorption accessibles à un niveau d'énergie particulier est directement corrélé à l'entropie différentielle de sorption. Par conséquent, à mesure que la teneur en eau augmente, les sites de sorption disponibles diminuent, car les sites actifs se couvrent progressivement de molécules d'eau, limitant ainsi leur mobilité.

Un schéma distinct a été observé dans l'évolution de l'entropie pour des valeurs de la teneur en eau d'équilibre inférieures à 4%. Initialement, il y a eu une diminution de l'entropie différentielle de 76,45 à 73,41 J/(mol·K) à $X_{eq} \% = 1\%$. Cependant, lorsque la teneur en eau a augmenté jusqu'à $X_{eq} \% = 4\%$, l'entropie a ensuite augmenté à 76 J/(mol·K). Par la suite, l'entropie a diminué jusqu'à 13 J/(mol·K) à mesure que la teneur en eau augmentait jusqu'à 14%.

(Santos and Martins, 2016) ont souligné l'hétérogénéité de la composition des groupes fonctionnels de surface et la distribution non uniforme de l'énergie sur la surface lorsque la teneur en eau diminue. Ces facteurs contribuent probablement au comportement complexe observé de l'entropie en fonction de la teneur en eau.

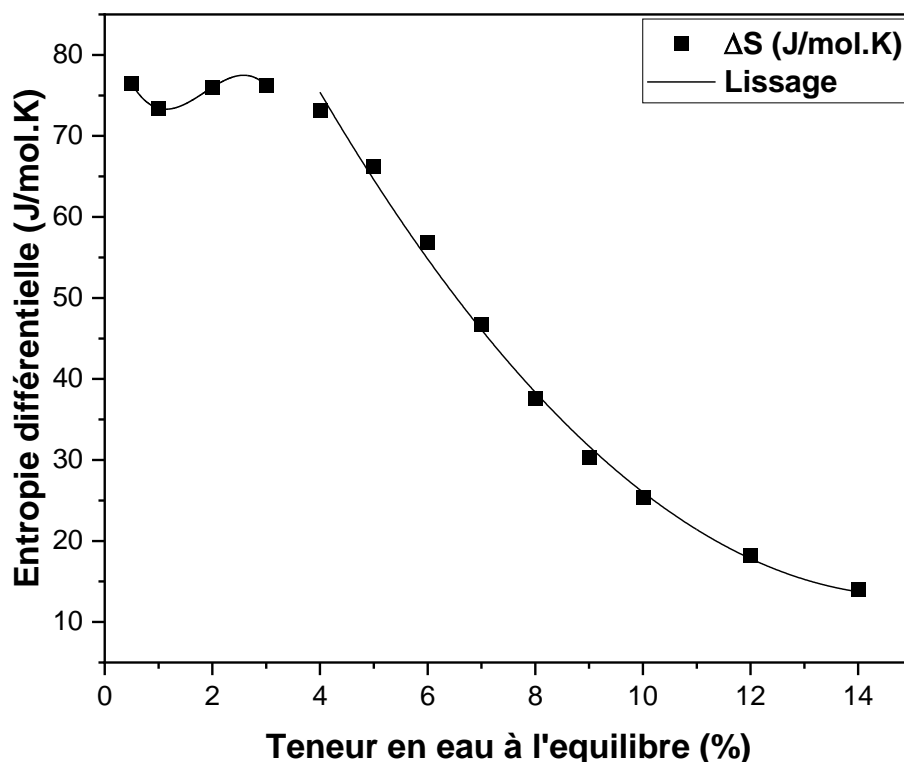


Figure III.8 Variation de l'entropie différentielle en fonction de la teneur en eau d'équilibre.

L'augmentation de l'entropie différentielle avec la hausse de la teneur en eau signifie l'adsorption d'eau sur des sites de surface accessibles avant la formation d'une monocouche. Ce processus entraîne le gonflement de la surface du matériau, créant ainsi des sites supplémentaires disponibles pour l'adsorption d'eau. Un comportement similaire de l'entropie différentielle de désorption au-delà d'une teneur en eau d'équilibre (X_{eq}) de 4% a été observé par (Tagne and Beguide, 2011) dans le bois d'Ayous et d'Ébène. De plus, la diminution à la fois de l'enthalpie et de l'entropie différentielle de désorption avec l'augmentation de la teneur en eau indique une réduction de la surface de désorption.

2.5 Théorie de compensation enthalpie–entropie

Un modèle linéaire de l'enthalpie et de l'entropie pour la réaction de désorption, comme dans l'équation (III.15), a été utilisé pour présenter la théorie de la compensation enthalpie-entropie (McMinn, Khraisheh and Magee, 2003).

$$Q_{st,n} = T_{\beta}\Delta S + \Delta G_B \quad (III.15)$$

L'équation (III.15) permet de calculer la température isocinétique T_{β} et l'énergie de Gibbs ΔG_B à une température spécifique à l'aide d'une régression linéaire basée sur des données expérimentales.

2.6 Résultats et discussions

Une forte relation linéaire a été observée dans la Figure III.9 entre la chaleur isostérique et l'entropie différentielle de désorption pour le bois d'eucalyptus globulus aux températures examinées. Cette tendance linéaire entre l'enthalpie et l'entropie de désorption soutient davantage la théorie de la compensation enthalpie-entropie régissant la réaction de désorption de l'eau dans le bois d'eucalyptus. Il a été supposé qu'à une teneur en eau (X) spécifique, l'enthalpie et l'entropie différentielle de désorption restent indépendantes de la température, comme noté par (Ouertani *et al.*, 2014). Pour calculer la température isokinétique (T_{β}) et l'énergie de Gibbs (ΔG_{β}) en utilisant l'équation (III.9), une approche de régression linéaire a été employée, donnant une forte corrélation linéaire comme suit :

$$Q_{st,n} = 0.443 * 10^3 \Delta S - 1,69 * 10^3 \quad (r = 0.97) \quad (III.16)$$

La valeur obtenue de l'énergie de Gibbs ΔG_{β} de -1690 J/mol indique un processus de désorption spontané. Cette observation appuie la théorie de la compensation enthalpie-entropie, comme en témoigne la différence entre les températures harmoniques et isokinétiques. Des résultats similaires ont été rapportés par (Koumoutsakos and Avramidis, 1999) dans leur étude sur le cœur du bois de Sapin de Douglas. La température isokinétique T_{β} était égale à 443 K tandis que la température harmonique T_{hm} , calculée était égale à 376,25 K. Nous avons conclu que la température isokinétique T_{β} était différente de la température harmonique T_{hm} ce qui corrobore la théorie de la compensation enthalpy-entropy. Comme la température isokinétique $T_{\beta} = 443 \text{ K} > T_{hm} = 376,25 \text{ K}$, le processus de désorption du bois d'eucalyptus globulus est dirigé par l'enthalpie (Ouertani *et al.*, 2014; Bahar *et al.*, 2017). Le tableau III.4 présente des résultats comparables mettant en évidence des résultats dirigés par l'enthalpie.

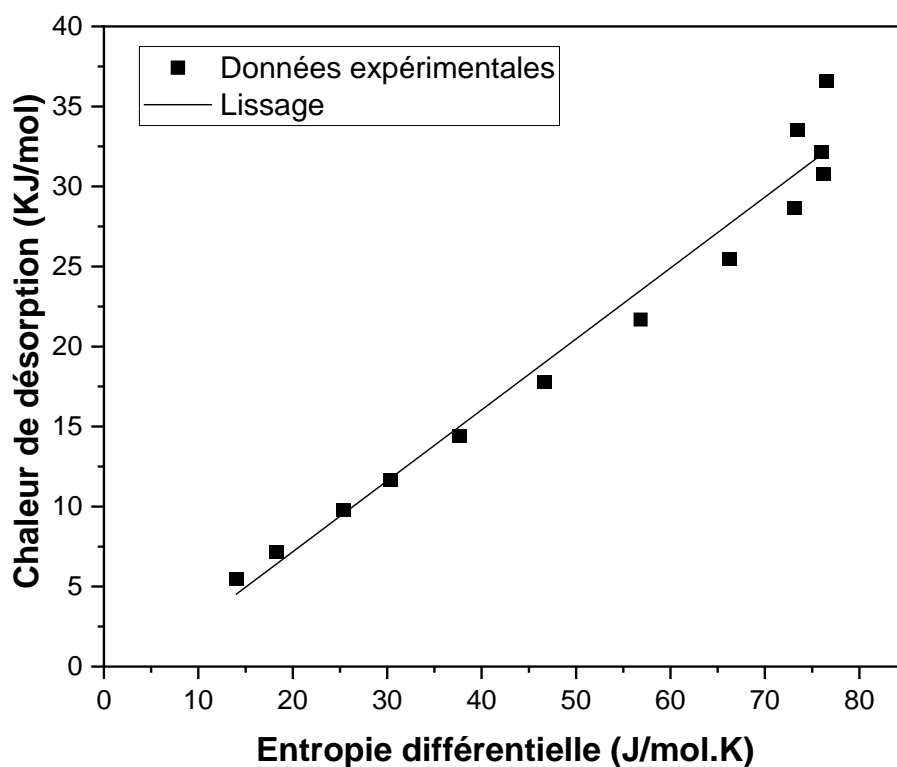


Figure III.9 Variation de l'enthalpie en fonction de l'entropie du bois d'eucalyptus globulus.

Tableau III.4 Analyse comparative des propriétés thermodynamiques dans les isothermes de désorption de l'eau parmi différentes espèces de bois (Bedjaoui *et al.*, 2024).

Espèces de bois	$T_{hm}(K)$	$T_{\beta}(K)$	$\Delta G_{\beta}(J/mol)$	Auteur
Eucalyptus globulus	376.25	443	-1690	Cette étude
Eucalyptus gomphocephala	332.5	486.9	-208.2	(Habouria <i>et al.</i> , 2023)
Oak (Quercus canariensis)	337.7	413	283	(Bahar <i>et al.</i> , 2017)
Oak (Quercus robur)	337.7	356	97	(Bahar <i>et al.</i> , 2017)
Jack pine	337.7	424	-552.9	(Ouertani <i>et al.</i> , 2014)
Limba	305.6	737.5	-4270	(Simón <i>et al.</i> , 2017)
Paulownia	303	335.3	-290	(Jiang <i>et al.</i> , 2019)
Tropical (Bubinga)	314.9	374.3	-1612	(Nkolo Meze'e, Noah Ngamveng and Bardet, 2008)

2.7 Pression de propagation

Le concept de pression de propagation ou de surface (π) se réfère à la force perpendiculaire exercée par unité de longueur du bord d'une surface pour empêcher sa propagation. Elle quantifie l'excès d'énergie de Gibbs présent à la surface, comme défini par (Ouertani *et al.*, 2014). Dans cette étude, l'approche proposée par Dent (1977) a été adoptée pour calculer la pression de propagation en utilisant l'équation (III.17), méthode également employée dans des études antérieures menées par (Ben Abdelhamid *et al.*, 2016; Bahar *et al.*, 2017).

$$\pi = \frac{K_B T}{A_m} \ln \left[\frac{1+A-Ba_w}{1-Ba_w} \right] \quad (\text{III.17})$$

Dans cette équation, la pression de propagation (π) est mesurée en J/m^2 , où K_B représente la constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$), A_m désigne la surface d'une molécule d'eau ($1.06 \times 10^{-19} \text{m}^2$), et T est la température absolue en Kelvin (K). Les paramètres A et B (Tableaux III.2 et III.3) ont été calculés en utilisant l'équation de BET. Cette équation présente l'avantage de décrire la teneur en eau de la monocouche du produit, une quantité importante pour la détermination de la pression de surface.

2.8 Résultats et discussions

La Figure III.10 illustre les variations de la pression de propagation du bois d'eucalyptus globulus algérien en fonction de la teneur en eau d'équilibre à différentes températures de séchage, en utilisant l'équation (III.17). Les résultats indiquent que la température a une influence plus importante sur la pression de propagation que l'humidité relative. Lorsque la température a augmenté de 40°C à 80°C , la pression de propagation a diminué de 2.47978 J/m^2 à 0.82328 J/m^2 . En revanche, elle a augmenté avec une activité de l'eau plus élevée, montrant une relation linéaire avec un taux moyen de $0.13\% \text{ J/m}^2$ par HR à toutes les températures. Ce comportement peut être attribué à la diminution de la teneur en eau et des molécules adsorbées dans le bois à mesure que la température augmente, comme le montre la Figure III.3. (Fasina, Ajibola and Tyler, 1999) ont établi que la pression de propagation sert d'indicateur de la tension superficielle élevée observée sur les sites d'adsorption nus à la suite des molécules adsorbées. Cette corrélation a également été observée dans le cas de l'eucalyptus gomphocephala, du pin gris et du bois de palmier (Ouertani *et al.*, 2014; Habouria *et al.*, 2023).

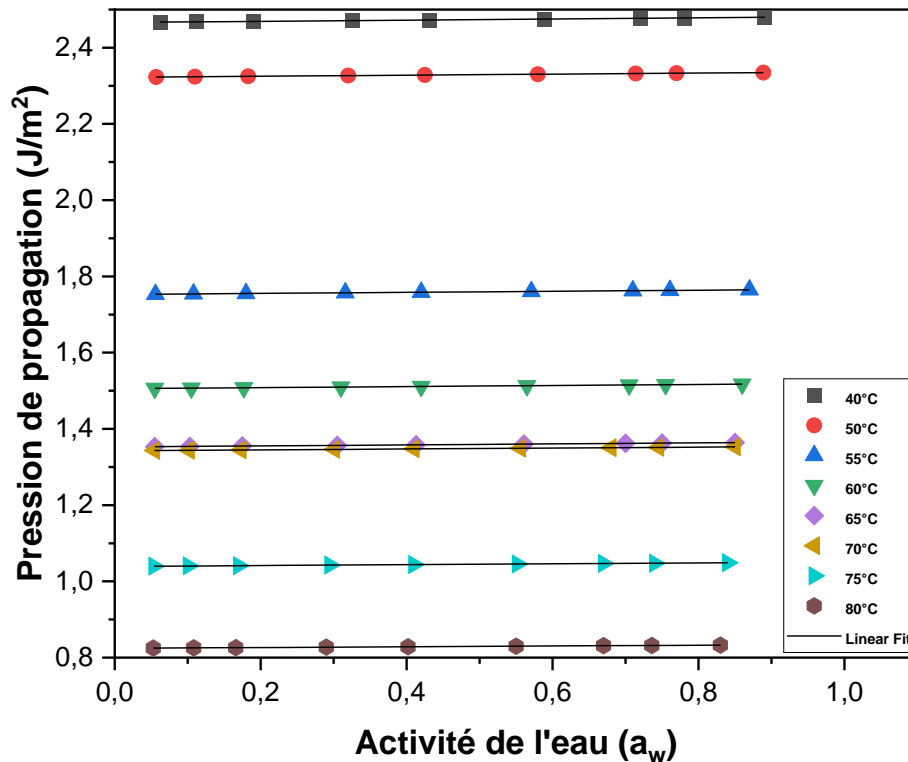


Figure III.10 Influence de la température sur l'isotherme de désorption de la pression de propagation.

3 DENSITÉ ET RETRAIT VOLUMIQUE

3.1 Densité du bois

3.1.1 Protocol expérimental

La masse volumique est une propriété essentielle des matériaux, elle reflète macroscopiquement la relation entre la masse et le volume. Elle joue un rôle dans le calcul de diverses caractéristiques des matériaux (conductivité thermique, coefficient de diffusion, etc.) (Baar, Tippner and Rademacher, 2015). La masse volumique dépend de deux facteurs : la masse de la structure ligneuse et la masse de l'eau retenue dans le bois. Dans le cadre des études de séchage, comprendre son évolution par rapport à la teneur en eau permet de caractériser le comportement de retrait ainsi que les mécanismes de transport au sein du produit. Pour les produits poreux, la masse volumique apparente, définie par l'équation (III.18), est utilisée (Holzbecher, 2016) :

$$\rho_{app} = \frac{m_l + m_s}{V_g + V_l + V_s} \quad (\text{III.18})$$

Le bois est également un matériau poreux, et les pores sont représentés par des cavités cellulaires remplies de vapeur d'eau, d'eau libre et d'eau liée. La masse volumique du bois dépend de deux facteurs : la masse de la structure ligneuse et la masse de l'eau retenue dans le bois humide (Benmakhlouf *et al.*, 2017). La quantité d'eau affecte à la fois la masse et le volume du bois. Pendant le processus de séchage, comprendre l'évolution de la masse volumique en fonction de la teneur en eau aide à caractériser le comportement thermo physique du bois. En effet, la masse volumique joue un rôle dans le calcul de diverses propriétés (conductivité thermique, coefficient de diffusion), et elle est essentielle dans toute approche de modélisation et de simulation des processus de séchage (Ouertani, 2014; Bahar *et al.*, 2017).

Le bois est connu pour sa nature hygroscopique (masse variable) et ses propriétés de retrait/gonflement (volume variable). Le test de détermination de la densité du bois à une teneur en eau donnée implique la mesure, en moyenne, de la masse relative au volume d'échantillons cubiques avec des arêtes de 20 mm. La méthode de mesure de la densité du bois est basée sur le principe d'Archimède (Azzouz *et al.*, 2018). Ce principe stipule qu'un solide immergé dans un liquide subit une force hydrostatique connue sous le nom de « poussée d'Archimède ». Physiquement, cette force représente le poids du volume de liquide déplacé par le volume émergé de l'échantillon de bois (Elaieb *et al.*, 2017). Expérimentalement, la méthode consiste à peser initialement l'échantillon de bois dans l'air puis dans un liquide de densité bien connue. Connaissant les masses du corps dans l'air et dans le liquide, il est possible de calculer directement la masse volumique de l'échantillon de bois en utilisant l'équation III.13.

Le dispositif expérimental utilisé dans notre laboratoire LETTM-FST comprend essentiellement un pont métallique sur lequel est placé un bécher contenant du toluène, une structure de suspension et un panier pour la pesée des échantillons. Le dispositif est monté sur une balance électronique avec une précision de 10^{-3} grammes (Figure III.11). Le toluène est un fluide qui n'interagit pas avec les constituants du bois.

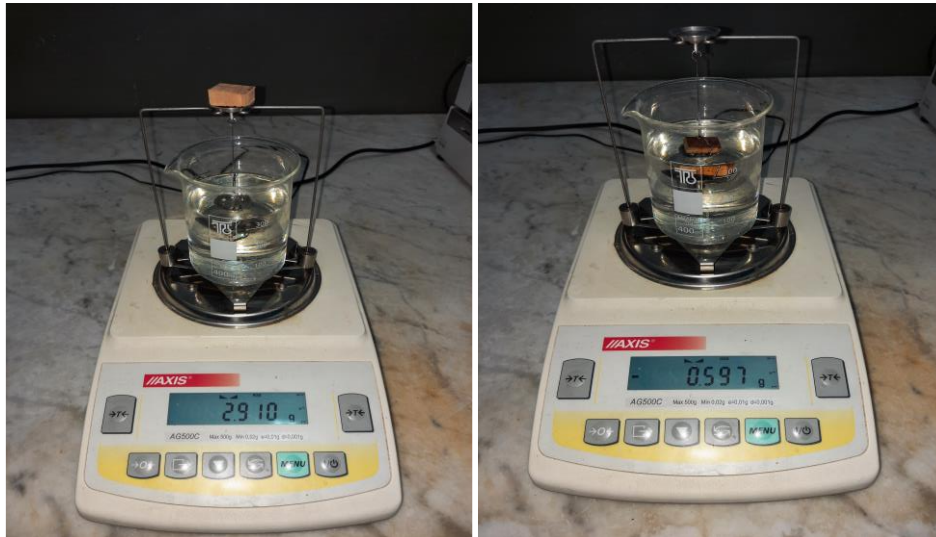


Figure III.11 Dispositif expérimental pour mesurer de la densité au LETTM-FST.

3.1.2 Résultats et discussions

Les Figures III.12 montrent l'évolution de la densité de l'eucalyptus globulus en fonction de la teneur en eau pour trois températures de séchage. Les résultats montrent que la densité du bois diminue avec la baisse de la teneur en eau. Deux phases peuvent être identifiées, avec une réduction plus marquée de la densité lors de la première phase. La valeur limite séparant les deux phases fournit des informations sur la transition du produit vers le domaine hygroscopique. Les résultats montrent que la densité du bois ne dépend pas des conditions de séchage utilisées. Au début du processus de séchage, la densité du bois est de 1747 kg/m^3 . Elle diminue à 1200 kg/m^3 à une teneur en eau de 32%. Cette plage d'humidité du bois est caractérisée par un taux d'évaporation significatif de l'eau libre, sans rétrécissement de la matrice solide (à volume constant). Au-delà de cette plage d'humidité, l'évaporation de l'eau liée entraîne un rétrécissement important de la matrice du bois (volume variable), et le bois entre dans le domaine hygroscopique.

La diminution de la densité du bois est constante jusqu'à la fin du processus de séchage. Les résultats montrent également que la densité du bois ne dépend pas des conditions de séchage ; elle dépend uniquement de la teneur en eau. L'indépendance de la densité du bois par rapport aux conditions de séchage a également été observée pour le bois de pin gris et le bois de palmier (Ouertani, 2014). La variation de la densité du bois en fonction de la teneur en eau est représentée par des fonctions polynomiales du premier degré de la teneur en eau (Tableau III.5).

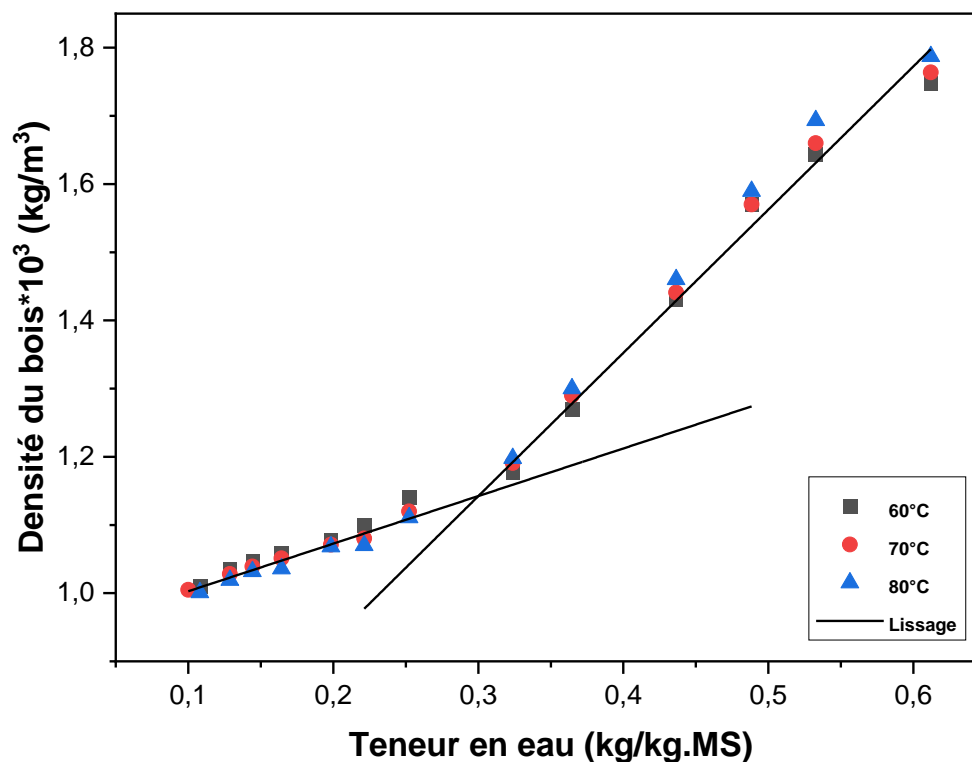


Figure III.12 Variation de la densité du bois d'eucalyptus globulus en fonction de la teneur en eau.

Tableau III.5. Variation de la densité en fonction de la teneur en eau.

Type du bois	Equation	Domaine
Eucalyptus globulus	$\rho(X) = 2.101 X + 0.512$	$X > 32\%$
	$\rho(X) = 0.698 X + 0.933$	$X < 32\%$

3.2 Point de saturation des fibres (PSF)

Les vides cellulaires du bois sont remplis d'eau libre (Dhib *et al.*, 2016). Pendant le séchage, l'eau libre s'évacue progressivement sans provoquer de retrait du matériau. L'eau liée est attachée aux membranes cellulaires, et sa migration par évaporation entraîne une contraction du squelette solide du bois : c'est le phénomène de retrait. Le retrait dépend des directions principales du bois. Il est très faible dans la direction longitudinale (<1 %), modéré dans la direction radiale (ne dépasse pas 20 %) et plus prononcé dans la direction tangentielle (environ 40 %) (Bahar *et al.*, 2017). La teneur en eau à l'équilibre, caractérisée par la saturation des parois cellulaires en eau liée et l'absence d'eau libre, est appelée le point de saturation des fibres

(PSF). Il met en évidence l'existence de deux domaines d'eau caractérisant le comportement du bois lors du séchage (Bahar *et al.*, 2017). Le domaine non hygroscopique se situe au-dessus du point de saturation des fibres. Il est caractérisé par la présence d'eau libre, dont l'élimination ne provoque pas d'altération structurelle du produit. Le domaine hygroscopique se situe en dessous du point de saturation des fibres. La variation de la quantité d'eau liée dans cette zone induit un changement dimensionnel du bois : un retrait dû à la désorption ou un gonflement dû à l'adsorption.

3.3 Modifications dimensionnelles du bois (Retrait et gonflement).

3.3.1 *Protocol expérimental*

Lors d'un traitement thermique, la structure des matériaux subit des modifications dimensionnelles. En raison de l'interaction avec l'environnement extérieur, certains matériaux peuvent connaître un retrait, un gonflement, une déformation, des fissures, une décoloration, etc. (Lahsasni *et al.*, 2003). Le bois est un matériau hygroscopique ; il tend à adsorber ou désorber l'humidité jusqu'à atteindre un état d'équilibre hygrothermique avec son environnement. Au-delà d'une teneur en eau d'équilibre critique, l'adsorption d'humidité provoque un gonflement, tandis que la désorption d'humidité entraîne une contraction de la matrice solide du bois. Ces changements de teneur en eau, accompagnés de modifications dimensionnelles, posent des défis importants pour la stabilité du matériau bois lors de son utilisation. Les changements dimensionnels du bois dépendent de l'espèce, de la variété et des directions principales (radiale, tangentielle et longitudinale). Plusieurs études dans la littérature ont été consacrées à la détermination du retrait dimensionnel de différents types de bois (LARTIGUE, 1987; Ouertani *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2023). La norme française « NF B 51002 » spécifie trois catégories pour la classification du retrait volumétrique du bois, allant de faible à élevé (Tableau III.6).

Tableau III.6 Classification du retrait volumique du bois.

Retrait volumique	Catégorie
$15\% < R_v < 20\%$	Retrait élevé
$10\% < R_v < 15\%$	Retrait moyen
$R_v < 10\%$	Retrait faible

L'étude de la nature et du comportement de l'eucalyptus au cours du processus de séchage nécessite un suivi de l'évolution du retrait volumique (Figure III.13). La méthode consiste à mesurer, pendant le processus de séchage, le volume d'un échantillon parallélépipédique ($4 \times$

4 × 3 mm) à chaque intervalle de temps (toutes les 10 minutes) en mesurant ses trois dimensions (longueur/largeur/épaisseur) à l'aide d'un pied à coulisse (précision de 0,001 mm) et sa masse avec une balance intégrée à la chambre de séchage (précision de 0,001 g). La procédure a été réalisée à deux températures différentes (60 et 70 °C), avec une humidité relative de 30 %.



Figure III.13 Le dessiccateur pour l'étude du changement dimensionnel (LETTM-FST).

3.3.2 Résultats et discussions

La Figure III.14 illustre l'évolution du retrait volumétrique en fonction de la teneur en eau dans l'eucalyptus. Le retrait volumétrique présente deux tendances distinctes de part et d'autre d'une teneur critique en eau. Au début de l'opération de séchage et pour des teneurs en eau élevées, le retrait volumétrique maintient une valeur constante de 38 % pour le bois d'eucalyptus globulus. Durant cette période de séchage, seule l'évaporation de l'eau libre se produit, sans variation structurelle dans l'échantillon de bois. Ensuite, et jusqu'à la fin du processus de séchage, la tendance du retrait volumétrique pour les deux types de bois devient linéaire en fonction de la teneur en eau, en moyenne (Tableau III.7).

Tableau III.7 Variation du retrait volumétrique en fonction de la teneur en eau du bois.

Type du bois	Equation	Domaine
Eucalyptus globulus	$Rv(X) = 0.09 X + 0.185$	$X > 38\%$
	$Rv(X) = 0.755 X - 0.074$	$X < 38\%$

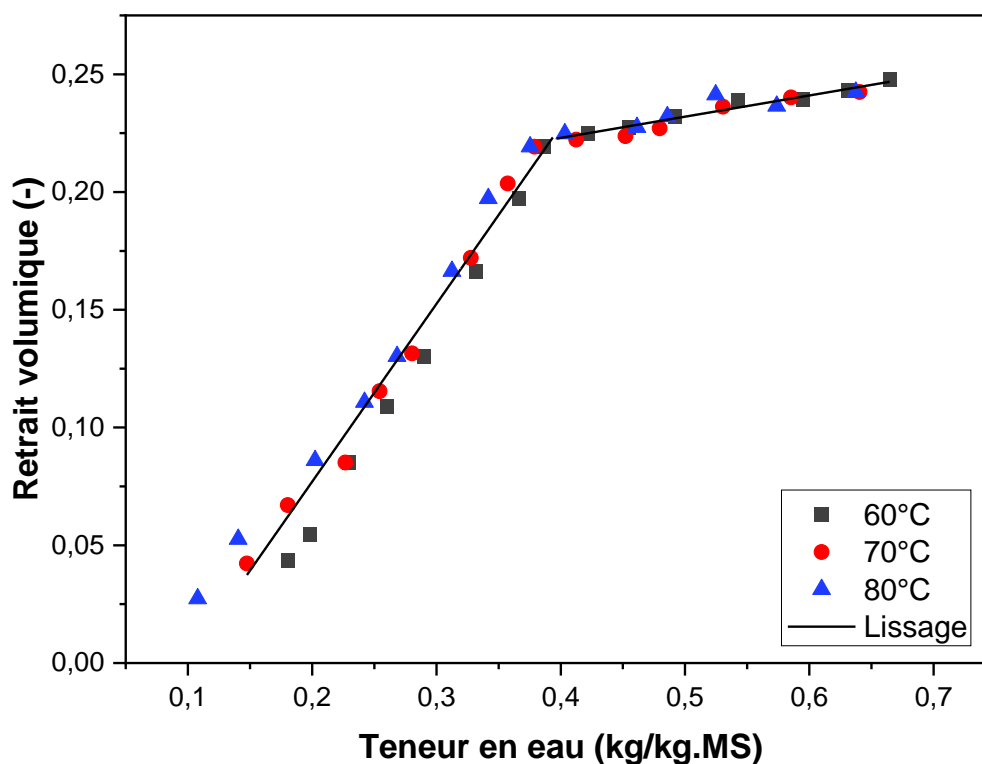


Figure III.14 Évolution du retrait volumique.

Au cours du processus de séchage, l'eau liée s'évapore dans la plage de teneur en eau à partir de 38 % pour le bois. La migration de l'eau liée provoque un rétrécissement structurel de l'échantillon de bois : c'est le phénomène de retrait volumique.

En effet, la teneur en eau délimitant les deux tendances de l'évolution du retrait volumique du bois est appelée Point de Saturation des Fibres (PSF). D'après les résultats du Tableau III.7, le Point de Saturation des Fibres (PSF) de l'eucalyptus est de 38 %. La connaissance du PSF est un très bon indicateur qui nous renseigne sur le comportement du bois lors du séchage et sa stabilité dimensionnelle après sa mise en œuvre, ainsi que lors des échanges d'humidité entre le matériau et l'environnement ambiant. Les résultats obtenus sont similaires à ceux déterminés par Lartigue (1987) (LARTIGUE, 1987) pour le bois de pin maritime, par Ouertani (2014) (Ouertani, 2014) pour le bois de pin gris. Selon la norme française de classification du retrait du bois 'NFB51002,' le bois d'eucalyptus appartient à la catégorie des bois à retrait moyen.

4 CONDUCTIVITÉ THERMIQUE

4.1 Protocol expérimental

La connaissance de la conductivité thermique d'une substance est essentielle lors de son utilisation. On parle souvent d'une substance ayant une haute conductivité thermique comme d'un bon conducteur thermique, et inversement, un bon isolant thermique (Liu *et al.*, 2024). En physique, la conductivité thermique est la grandeur utilisée pour quantifier la capacité d'une substance à conduire la chaleur. La conduction est le seul mécanisme permettant de transmettre la chaleur à l'intérieur d'un solide sous l'influence d'un gradient de température, sans mouvement de matière. Le processus de conduction thermique se produit spontanément des corps les plus chauds vers les corps plus froids, aidé par certains mécanismes à l'échelle microscopique (vibrations atomiques ou moléculaires, diffusion électronique, etc.) (He, 2005). Dans cette étude, Les expérimentations ont été réalisées au niveau du Centre de Recherches et des Technologies de l'Énergie (CRTEEn) à Borj Cédria, en Tunisie, en utilisant la méthode Hot Disk pour mesurer la conductivité thermique du bois d'eucalyptus algérien. Lors de la mesure par la méthode du disque chaud, un capteur de disque chaud (Figure III.15) a été inséré entre un ensemble d'échantillons, et les propriétés thermiques des échantillons ont été calculées à partir de la variation de température due à la génération de chaleur du capteur. Ce capteur est un fil en alliage de nickel à double spirale, recouvert d'un film isolant en polyimide. Pendant la mesure, une chaleur $P(W)$ a été générée à partir du capteur par son alimentation en énergie, et l'augmentation de la température de l'ensemble du capteur $\Delta T(t)$ a été calculée à partir de la variation de la résistance du capteur (He, 2005). La Figure III.15 présente le dispositif expérimental utilisé pour mesurer la conductivité thermique du bois d'eucalyptus globulus algérien (bois sec) en utilisant la méthode du disque chaud.



Figure III.15 Dispositif expérimental de la méthode Hot Disk (CRTEEn- Borj Cédria).

4.2 Résultats et discussions

Figure III.16 montre l'élévation de température du bois pendant une impulsion thermique imposée par le capteur Hot Disk sur les échantillons de bois.

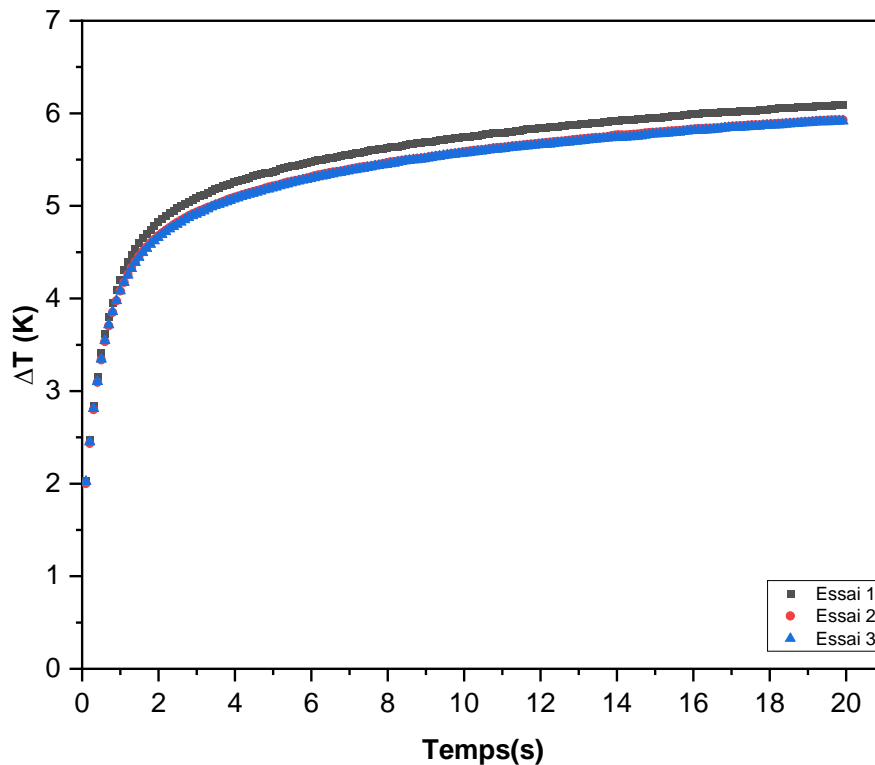


Figure III.16 L'augmentation de la température.

Dans la méthode Hot Disk pour mesurer la conductivité thermique du bois, les variations de température sont minutieusement enregistrées tout au long du processus. Lorsque le capteur Hot Disk déclenche une impulsion thermique contrôlée sur l'échantillon de bois, des capteurs de température hautement sensibles surveillent et enregistrent en continu les variations de température ΔT à des intervalles réguliers. Cette collecte systématique de données génère une courbe temps-température, offrant une représentation dynamique de la propagation de la chaleur dans le matériau au fil du temps. Les variations de température enregistrées fournissent des informations précieuses sur le comportement thermique transitoire de l'échantillon de bois, capturant les nuances du processus de transfert de chaleur. Bien que la mesure puisse atteindre un état stationnaire, l'accent est souvent mis sur la phase transitoire, qui est riche en informations pour une analyse complète.

Les données enregistrées sont ensuite examinées à l'aide de modèles mathématiques afin

d'extraire des paramètres clés tels que la diffusivité thermique. L'enregistrement des variations de température est essentiel pour obtenir des valeurs précises de conductivité thermique et une meilleure compréhension des propriétés thermiques du matériau bois. Le Tableau III.8 présente les valeurs de conductivité thermique pour le bois d'eucalyptus sec mesurées à l'aide de la méthode Hot Disk.

Tableau III.8 Valeurs de la conductivité thermique.

	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3
λ (W/(m.K))	0,244	0,239	0,239

Les résultats expérimentaux concernant la conductivité thermique du bois d'eucalyptus sont similaires à ceux obtenus par (LARTIGUE, 1987) pour le bois de pin maritime.

5 CONCLUSION

Ce chapitre est structuré autour de la caractérisation du bois d'eucalyptus Globulus. Les isothermes de désorption expérimentales du bois d'eucalyptus Globulus ont été déterminées à l'aide de la méthode gravimétrique statique sur une large gamme de niveaux d'humidité. Le modèle « Thermodynamique » décrit efficacement les données expérimentales des isothermes de désorption du bois. La chaleur et l'entropie de désorption sont importantes pour les faibles teneurs en eau et diminuent pour les taux d'humidité plus élevés. La relation linéaire entre l'enthalpie et l'entropie pour une réaction spécifique met en évidence la théorie de compensation enthalpie-entropie de la désorption. L'énergie de Gibbs a été déterminée en appliquant l'équation de Gibbs-Helmholtz.

La densité du bois d'eucalyptus a été déterminée en utilisant une méthode basée sur le principe d'Archimède. Le retrait volumique du bois est déterminé par une méthode suivant les variations de masse et de volume durant le séchage. L'évolution du retrait volumique démontre une indépendance vis-à-vis des conditions de séchage et suit une tendance linéaire par rapport à la teneur en eau en dessous du point de saturation des fibres (PSF). La conductivité thermique du bois d'eucalyptus Globulus a été déterminée à l'aide de la méthode Hot-Disk, avec une valeur moyenne de 0,24 W/m·K.

Chapitre IV INFLUENCE SÉCHAGE PAR MICRO-ONDES SUR LES PROPRIETES MECANIQUES DU BOIS D'EUCALYPTUS

1 INTRODUCTION

Le séchage constitue l'une des étapes les plus énergivores dans la transformation du bois en produit fini, destiné notamment à la construction, à l'isolation ou aux matériaux composites (Habouria *et al.*, 2023). L'efficacité de cette opération repose sur un compromis entre la qualité finale du bois, la durée du traitement et les coûts énergétiques. L'interdépendance entre ces trois critères rend leur optimisation complexe. Dans un contexte de transition énergétique et d'exigences industrielles accrues, le séchage par micro-ondes représente une alternative prometteuse. Ce procédé permet d'accélérer les transferts internes de chaleur et de masse, réduisant ainsi le temps de traitement (Ouertani, 2014; Ouertani, Hassini, *et al.*, 2015). Toutefois, le bois d'*Eucalyptus globulus*, en raison de sa densité élevée et de son anisotropie, présente une sensibilité particulière aux traitements thermiques, avec des risques d'effondrement, de fissuration ou de déformation (Yang and Liu, 2018).

La présente étude vise à analyser la cinétique de séchage par micro-ondes du bois d'eucalyptus globulus algérien, et à évaluer l'impact des conditions de traitement (puissance, durée, mode intermittent) sur ses propriétés mécaniques. Sous le point de saturation des fibres, l'évaporation de l'eau liée entraîne un retrait hygroscopique, qui modifie la structure interne du bois (Leggate *et al.*, 2021). Ce retrait, associé aux gradients d'humidité et de température et à l'anisotropie naturelle du matériau, engendre des contraintes internes susceptibles d'affecter ses performances mécaniques (Rakotovao *et al.*, 2012; Jirouš-Rajković and Miklečić, 2021).

Des essais ont été réalisés pour déterminer le module d'élasticité (E), la résistance à la flexion statique (σ) et la résistance à la compression, afin d'étudier l'effet des différentes conditions de séchage sur le comportement mécanique du bois. Ces essais, menés selon les normes en vigueur, ont été réalisés à l'Institut National de Recherche en Génie Rural, Eaux et Forêts (Tunisie), tandis que les traitements par micro-ondes ont été effectués au laboratoire LETTM-FST.

2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Préparation des échantillons

Les échantillons de bois d'eucalyptus globulus provenant d'Algérie utilisés dans cette étude ont été recommandés par le Laboratoire de Gestion et de Valorisation des Ressources Forestières à l'INRGREF-Tunis. L'étude se concentre sur l'impact du séchage par micro-ondes sur la cinétique de séchage et le comportement des échantillons de bois, en utilisant une espèce spécifique d'eucalyptus globulus. Cette espèce a été choisie en raison de sa représentativité au sein de la population d'eucalyptus dans l'arboretum, avec des arbres ayant un diamètre d'environ 40 cm à 1,30 m au-dessus du sol, dans une région semi-aride du nord-est de l'Algérie.

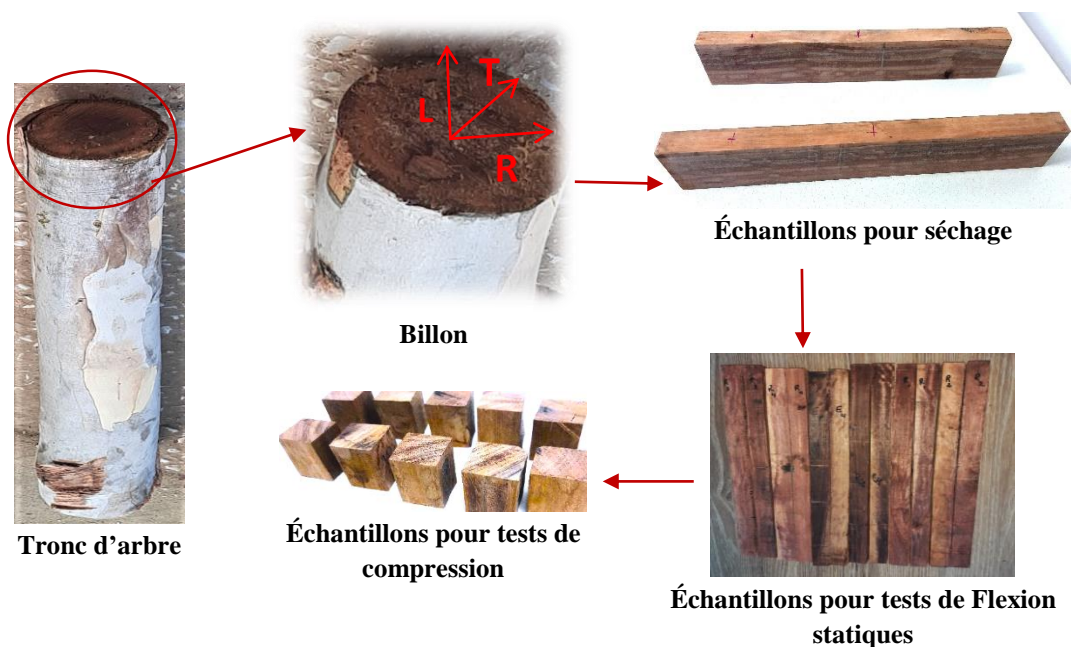


Figure IV.1 Échantillonnage du bois d'eucalyptus globulus.

Cette région se caractérise par des précipitations annuelles de 259 mm/an et des températures annuelles moyennes variant de 24 °C à 25,5 °C. Les températures maximales moyennes du mois le plus chaud dépassent 34 °C, tandis que la température maximale moyenne du mois le plus froid est d'environ 5,6 °C. Le sol est peu développé dans les dunes côtières. Les échantillons de bois ont été prélevés aléatoirement dans le duramen des billots, en respectant les directions anisotropes du bois (radiale, tangentielle et longitudinale), et leur taille initiale était de 300 * 50 * 20 mm³ (longueur * rayon * épaisseur). Un schéma d'échantillonnage est illustré dans la Figure IV.1

En vue des essais mécaniques, les spécimens ont été préparés conformément à la méthodologie standard. Pour la flexion statique, des prismes droits de section carrée $20 \times 20 \text{ mm}^2$ et d'une longueur supérieure à 260 mm ont été découpés parallèlement aux fibres, afin de respecter la portée entre les appuis. Pour les essais de compression axiale, les dimensions des échantillons étaient de $20 \times 20 \times 30 \text{ mm}^3$ (T \times R \times L).

2.2 Four à microondes

Les expériences cinétiques de séchage par micro-ondes ont été réalisées à l'aide du four à micro-ondes de laboratoire (BP-301) (Microwave Research and Applications, Inc.) (Figure IV.2), installé au LETTM de la Faculté des Sciences à Tunis. Les principales caractéristiques techniques de ce four à micro-ondes (BP-301) sont : une fréquence de 2,45 GHz, une puissance allant de 100 W à 1000 W, une cavité de travail de $340 \times 330 \times 200 \text{ mm}^3$, et un système d'extraction de vapeur d'eau. Pendant le processus de séchage, les échantillons de bois étaient placés au centre de la cavité du four à micro-ondes.



Figure IV.2 Four à micro-ondes au LETTM.

La mesure de la température des échantillons de bois a été effectuée à l'aide de trois capteurs à fibre optique (OTG-A) (Figure IV.2) placés à différentes positions et épaisseurs. Ces capteurs à fibre optique peuvent fonctionner dans une plage de température de $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ à $250 \text{ }^\circ\text{C}$ avec une précision de $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. La mesure de la perte de masse se terminera lorsque la masse d'équilibre sera atteinte, définie précisément dans le chapitre III. Tous les essais de séchage ont été réalisés

à trois niveaux de puissance micro-ondes : 300 W, 500 W et 800 W. Les puissances micro-ondes sélectionnées sont couramment utilisées dans la littérature pour traiter différentes espèces de bois (Rattanadecho, 2006; Ouertani, Hassini, *et al.*, 2015; Hermoso and Vega, 2016; Ouertani *et al.*, 2018; Rajewska, Smoczkiwicz-Wojciechowska and Majka, 2019).

2.3 Configuration expérimentale pour les essais mécaniques

Les propriétés mécaniques du bois ont été évaluées à l'aide de la machine universelle de flexion-compression UTS, disponible à l'Institut National de Recherche en Génie Rural, Eaux et Forêts à Tunis (INRGREF) (Figure IV.3). Cette machine permet de réaliser des essais de flexion, compression et traction, et est équipée des accessoires nécessaires pour chaque type de test. Elle garantit un taux d'application de charge constant et peut appliquer des forces allant jusqu'à un maximum de 20 kN. Les essais de flexion statique et de compression axiale ont été réalisés conformément aux normes ASTM D-143. Les essais mécaniques ont été effectués sur des échantillons dont la teneur en eau était comprise entre 10 % et 12 %. Les spécimens de bois d'eucalyptus globulus (mesurant 300 x 50 x 20 mm³) ont été obtenus par séchage aux micro-ondes à différents niveaux de puissance au laboratoire LETTM, ainsi que par séchage à l'air. Pour minimiser l'effet de la variabilité du bois sur les propriétés mécaniques, six essais de flexion statique et de compression axiale ont été réalisés pour chaque condition de séchage. Les essais ont été effectués à une vitesse de 2 mm/min.



Figure IV.3 Appareil de test mécanique de flexion statique en trois points et de compression axiale.

2.4 Propriétés mécaniques du bois

Douze planches ont été séchées à différents niveaux de puissance de micro-ondes, puis testées en résistance à l'aide d'essais de flexion statique en trois points et de compression axiale. De plus, un séchage à l'air a été réalisé dans un environnement de laboratoire à 20°C ±3°C et une humidité relative de 70% ±3%, jusqu'à ce que les échantillons de bois atteignent une teneur en eau stable de 10% à 12%. Les propriétés mécaniques du bois séché à l'air ont servi de référence pour comparaison avec celles du bois séché par micro-ondes.

En complément, des expériences ont également été réalisées dans une étuve de séchage conventionnelle à 60°C et par séchage convectif forcé à l'air chaud dans une soufflerie climatique. Deux planches ont été séchées pour chaque méthode. Ce protocole permet de comparer les effets de différentes techniques de séchage sur les propriétés mécaniques et physiques du bois.

2.4.1 Essai de flexion statique

L'essai de flexion évalue la réponse du bois aux contraintes combinées de traction, de compression et de cisaillement. Il est essentiel pour les applications dans les structures, les caisses, les planchers et les meubles (Ndukwu *et al.*, 2021; Yin and Liu, 2021). L'essai de flexion statique en trois points est une méthode courante, impliquant une poutre soutenue aux deux extrémités, avec une charge appliquée au centre (Baar, Tippner and Rademacher, 2015), provoquant la compression de la moitié supérieure et l'étirement de la moitié inférieure (Rajemison, 2013; Balboni *et al.*, 2018; Aksenov and Malyukov, 2020). La contrainte de rupture en flexion statique (σ_F), est calculée en utilisant :

$$\sigma_F = \frac{3F_{\max} \times l}{2 \times b \times h^2} \quad (\text{IV.1})$$

2.4.2 Essai de compression axiale

Le bois présente une grande résistance à la compression axiale le long de l'orientation des fibres. La longueur influe sur le risque de flambage (Baar, Tippner and Rademacher, 2015). La résistance à la compression transversale est plus faible, mais elle varie entre les directions radiale et tangentielle. La contrainte de rupture en compression axiale (σ_c), est calculée par :

$$\sigma_c = \frac{F_{\max}}{a \times b} \quad (\text{IV.2})$$

Dans cette étude, les échantillons destinés aux essais de flexion statique et de compression axiale sont illustrés dans la Figure IV.5. Les données nécessaires pour les calculs de contraintes sont directement collectées via un ordinateur.

3 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Cinétique de séchage par micro-ondes

3.1.1 Séchage en mode continu

3.1.1.1 Effet de la puissance micro-onde sur la teneur en eau du bois

Les expériences ont été menées avec des puissances micro-ondes de 300, 500 et 800 W. La Figure IV.3 présente l'impact de la puissance du four à micro-ondes sur la variation de la teneur en eau du bois d'eucalyptus globulus. L'analyse des résultats démontre que l'augmentation de la puissance micro-ondes entraîne une diminution significative du temps de séchage. Cette relation inverse entre l'intensité de la puissance micro-ondes et la teneur en eau du bois s'explique par l'excitation accrue des molécules polaires sous l'influence d'un champ électromagnétique plus intense. Cette agitation moléculaire induit des collisions intermoléculaires accompagnées d'un chauffage plus important du bois, favorisant ainsi une évaporation plus rapide de l'eau (Ouertani *et al.*, 2018).

Les résultats résumés sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.1 Effet de la puissance sur la teneur en eau au cours de séchage continu.

Puissance MO (W)	Temps de séchage (s)	X initiale %	X finale %
P=300W	7800	51,54	13,31
P=500W	2220	51,54	11,67
P=800W	1500	54,36	11,39

La teneur en eau à l'état vert des échantillons de bois d'eucalyptus testés se situait entre 51 % et 55 %. Les observations tirées du Tableau IV.1 mettent en évidence une réduction significative du temps de séchage à mesure que la puissance des micro-ondes augmente. Ces résultats s'alignent sur des études antérieures (Balboni *et al.*, 2018), confirmant que le séchage par micro-ondes est plus rapide que le séchage conventionnel. L'eau, en raison de sa configuration électronique, s'avère être un excellent absorbant de l'énergie micro-ondes. Lorsqu'elle est

soumise à un champ électrique, le dipôle électronique se réoriente, et sous un champ alternatif, les molécules oscillent dans une tentative de s'aligner avec les changements de direction du champ (Fernando Júnior Resende Mascarenhas *et al.*, 2024). Cette rotation dipolaire des molécules d'eau, accompagnée du changement rapide de la polarité du champ électrique, génère de la chaleur, comme mentionné dans le chapitre I.

Des champs électromagnétiques plus élevés accélèrent l'oscillation moléculaire, favorisant la rupture et la reformulation des liaisons intermoléculaires, entraînant un séchage rapide de l'échantillon de bois par friction. Sous une puissance micro-ondes accrue, la température et la pression interne des gaz dans le bois augmentent, accélérant ainsi le taux de séchage (Ouertani *et al.*, 2018). Cette augmentation de la puissance micro-ondes favorise la formation de pores étroits dans les plans radiaux et longitudinaux, modifiant la structure du bois et augmentant sa perméabilité aux liquides et aux gaz, ce qui accélère significativement la vitesse de séchage.

3.1.1.2 Évolution simultanée de la température et de la tenue en eau

Trois périodes distinctes de séchage continu peuvent être identifiées dans la Figure IV.3. Cette figure montre les changements simultanés de la température et de la teneur en eau pendant le séchage continu par micro-ondes (MW). Au début de l'opération de séchage, une période de préchauffage, la mise en température du produit, se caractérise par une élévation rapide de la température et une perte d'eau lente. Ce comportement indique que l'énergie micro-ondes totale est directement transférée à l'échantillon de bois humide (Ouertani, Hassini, *et al.*, 2015; Habouria, 2022).

Dans la deuxième période, connue sous le nom de période d'évaporation, la température du bois atteint un niveau où la plupart de l'eau s'évapore, et la teneur en eau diminue rapidement. La pression de vapeur interne élevée génère une action de pompage qui expulse le liquide du bois. Le facteur de perte diélectrique augmente considérablement avec l'élévation de la teneur en eau. Par conséquent, les zones plus humides à l'intérieur du bois peuvent être chauffées plus facilement, entraînant une évaporation plus rapide que dans les zones plus sèches. La présence d'eau introduit de forts moments dipolaires et augmente le facteur de perte efficace, faisant du bois humide un bon candidat pour un traitement avec de l'énergie haute fréquence (Torgovnikov and Vinden, 2010).

La troisième période, connue sous le nom de période de chauffage, se caractérise par une évaporation lente de l'eau et des augmentations rapides de la température à l'intérieur du bois. L'augmentation de la température est due à l'accumulation excessive de chaleur dans les

échantillons ainsi qu'à l'absence de refroidissement par évaporation dans le cœur sec.

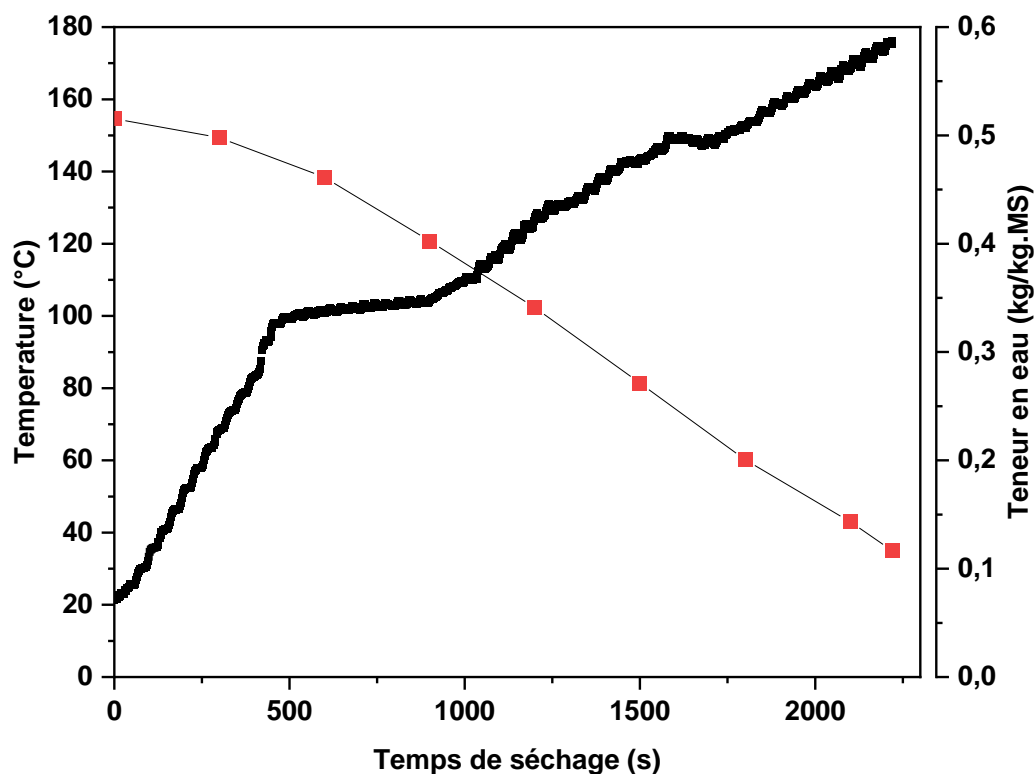


Figure IV.3. Évolution simultanée de la température interne et de la teneur en eau à $P = 500$ W.

3.1.1.3 *Effet de la puissance sur l'évolution de la température du bois*

L'observation de la Figure IV.4 met en évidence la corrélation entre la puissance délivrée par le four à micro-ondes et l'évolution de la température interne du bois d'eucalyptus. Cette relation est d'une importance capitale dans le processus de séchage, car le bois réagit de manière significative aux variations de la puissance incidente. Étant donné que le séchage est un processus volumétrique, la température interne du bois d'eucalyptus est directement proportionnelle à la puissance appliquée. En d'autres termes, plus la puissance du four à micro-ondes est élevée, plus la température interne du bois augmentera en conséquence (Ouertani, Hassini, *et al.*, 2015). Par conséquent, la relation entre la puissance du four à micro-ondes et la température interne du bois d'eucalyptus simplifie considérablement le contrôle du processus de séchage. En ajustant simplement la puissance du four à micro-ondes, il devient possible de réguler précisément la température interne du bois pendant le traitement de séchage (Du, Wang and Cai, 2005).

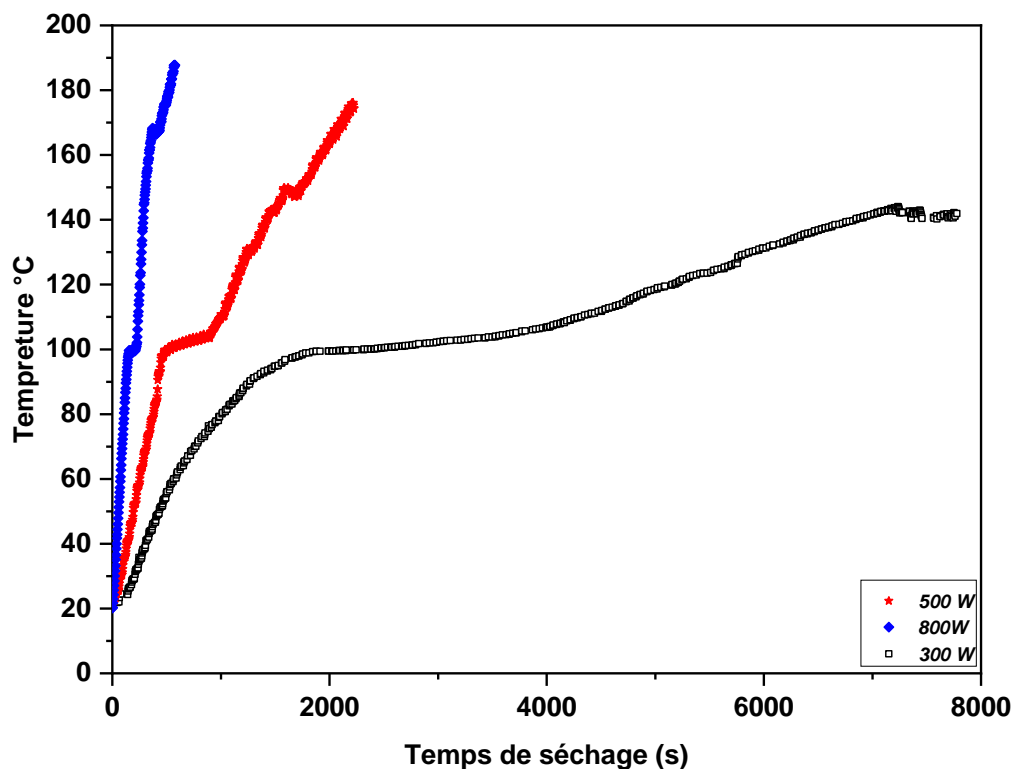


Figure IV.4 Évolution temporelle de la température interne du bois pour trois puissances des micro-ondes – séchage continu.

Un comportement similaire a été observé dans plusieurs études, y compris le séchage micro-ondes du bois de palmier (Ouertani, 2014) et le séchage micro-ondes du bois d'eucalyptus (Habouria, 2022).

3.1.2 Séchage en mode intermittent

La méthode proposée dans cette étude implique l'application d'un processus de séchage intermittent, avec une intermittence ciblée uniquement au niveau de la puissance des micro-ondes. Les conditions spécifiques du séchage intermittent sont détaillées dans le Tableau IV.2. Ce processus de séchage intermittent est basé sur un cycle On-Off, où la phase "On" correspond au séchage par micro-ondes, et la phase "Off" correspond à l'absence de séchage par micro-ondes pendant une durée définie (Tableau IV.2).

Tableau IV.2 Effet de la puissance sur la teneur en eau au cours séchage intermittent.

Puissance MO (W)	Temps de séchage (s)	X initiale %	X finale %	On-Off (s)
P=300W	11 100	62,81	12.71	300
P=500W	6 300	63,38	12.93	300
P=800W	2 700	54,36	10.75	300

3.1.2.1 *Effet de la puissance des micro-ondes sur l'évolution de la température au cœur des échantillons de bois*

La figure IV.5 illustre l'évolution temporelle de la température interne du bois et de la teneur en eau à différentes puissances de micro-ondes. Pendant le séchage intermittent, la température interne du bois augmente progressivement. Il est à noter que la température interne du bois oscille avec la puissance des micro-ondes incidente pendant les phases d'activation et de désactivation du séchage (Torgovnikov and Vinden, 2010; Habouria, 2022). La période de croissance de la température correspond à la phase de séchage par micro-ondes, tandis que la période de diminution correspond à la phase de repos sans micro-ondes.

L'observation des courbes de température au cours du temps de séchage révèle un phénomène notable durant le processus de séchage intermittent à différentes puissances de micro-ondes. À 500 W et 800 W, il y a une stabilité marquée de la température autour de 100 °C. Cette phase stable suggère la présence d'une étape d'évaporation, caractérisée par une température constante pendant l'élimination de l'humidité du matériau. Après cette période de stabilité, la température reprend son augmentation, indiquant probablement la poursuite du processus de séchage. Il est à noter que cette observation ne semble pas aussi évidente dans le cas du séchage intermittent à 300 W, où la courbe est tracée avant que la température n'atteigne 100 °C. Cette analyse souligne l'importance de la puissance des micro-ondes dans le contrôle du processus de séchage, avec des implications significatives pour la compréhension et l'optimisation de ce processus.

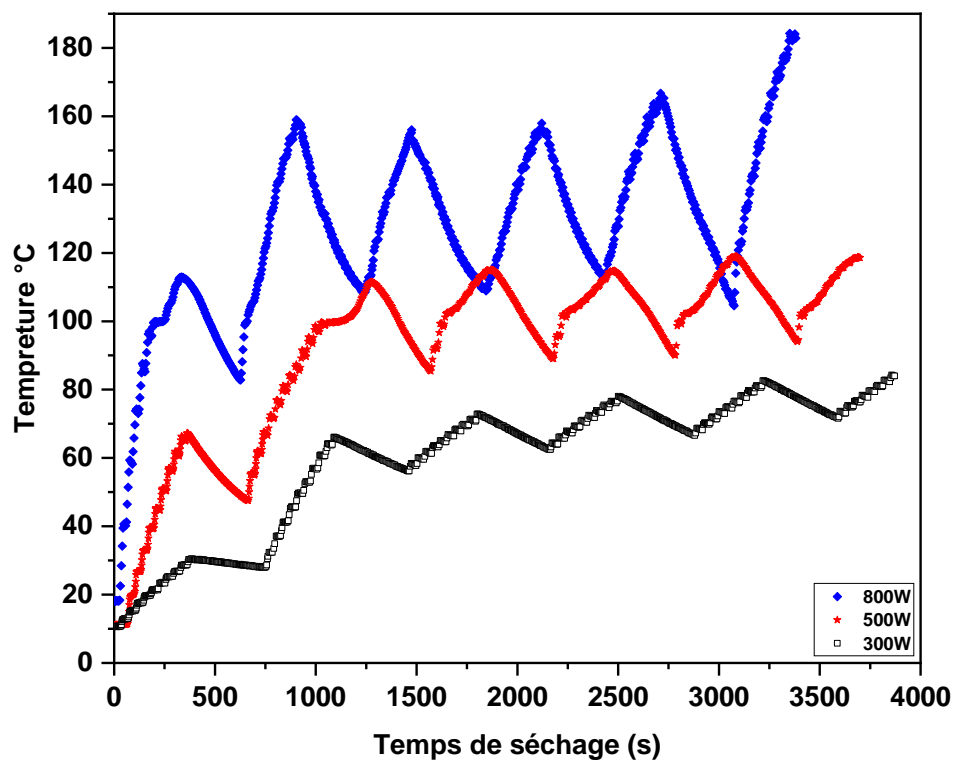


Figure IV.5 Évolution de la température interne du bois pour trois puissances des micro-ondes- séchage intermittent.

L'examen du profil simultané de la teneur en eau et de la température centrale pendant le séchage intermittent à 800 W révèle des résultats significatifs, comme illustré dans la Figure IV.6. Après 2700 secondes de séchage, la teneur en eau atteint un seuil de 12 %, démontrant l'efficacité du traitement par micro-ondes dans l'extraction de l'humidité du matériau. Thermiquement, la courbe de température atteint 100 °C, indiquant une phase d'évaporation potentielle où la chaleur est principalement absorbée par l'évaporation de l'eau. La stabilisation temporaire à ce niveau suggère une transition de phase dédiée à cette évaporation. Après cette période de stabilité, la température reprend sa progression, atteignant finalement une température de 160 °C après 2700 secondes.

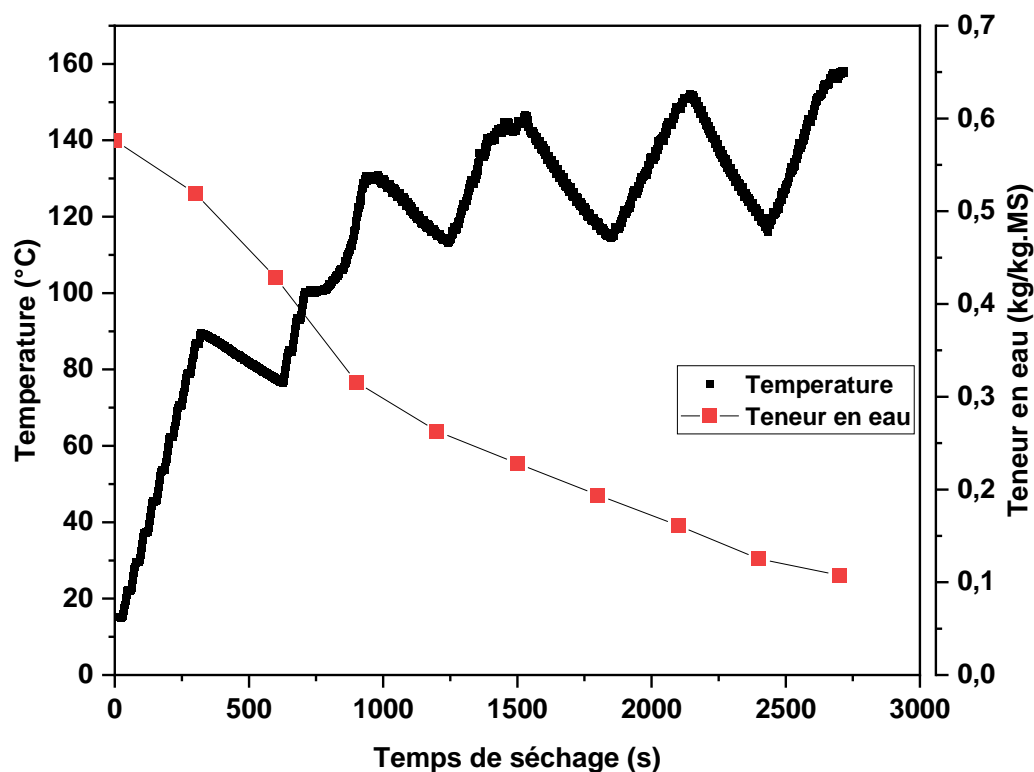


Figure IV.6 Profil simultané de la température interne et la teneur en eau lors du séchage intermittent à 800 W.

3.1.2.2 *Effet de l'épaisseur sur la distribution et l'évolution de la température pendant le séchage intermittent*

Les figures IV.7, IV.8, et IV.9 illustrent l'évolution des températures dans des échantillons de bois d'eucalyptus globulus soumis à un séchage intermittent à trois niveaux de puissance de micro-ondes, respectivement (300, 500 et 800 W). Les mesures ont été effectuées à l'aide de fibres optiques placées à des positions stratégiques. L'objectif principal est de suivre l'évolution thermique pendant le séchage, jusqu'à ce que la teneur en eau du bois atteigne 12 %.

La Figure IV.7 présente l'évolution des températures mesurées à trois positions distinctes dans un échantillon de bois soumis à un séchage intermittent à une puissance de 300 W. Ces positions incluent :

- Le centre de l'échantillon,
- Une profondeur (1 cm du centre),
- La surface supérieure.

Au début du processus, une augmentation progressive des températures est observée, avec une montée plus rapide en surface par rapport au centre. Ce gradient de température indique une dissipation thermique moins rapide au centre, en raison de la faible conductivité thermique du bois. Au fur et à mesure que le séchage progresse, des oscillations périodiques des températures se manifestent, caractéristiques de l'application intermittente des micro-ondes. À 300 W, l'amplitude de ces oscillations reste modérée, reflétant une montée en température relativement uniforme et contrôlée. Ce gradient thermique joue un rôle crucial dans la migration de l'humidité, favorisant un transfert de vapeur de l'intérieur vers l'extérieur. Ces observations corroborent les résultats de (Ouertani *et al.*, 2018), qui soulignent l'importance des gradients thermiques dans l'intensification des transferts hydriques.

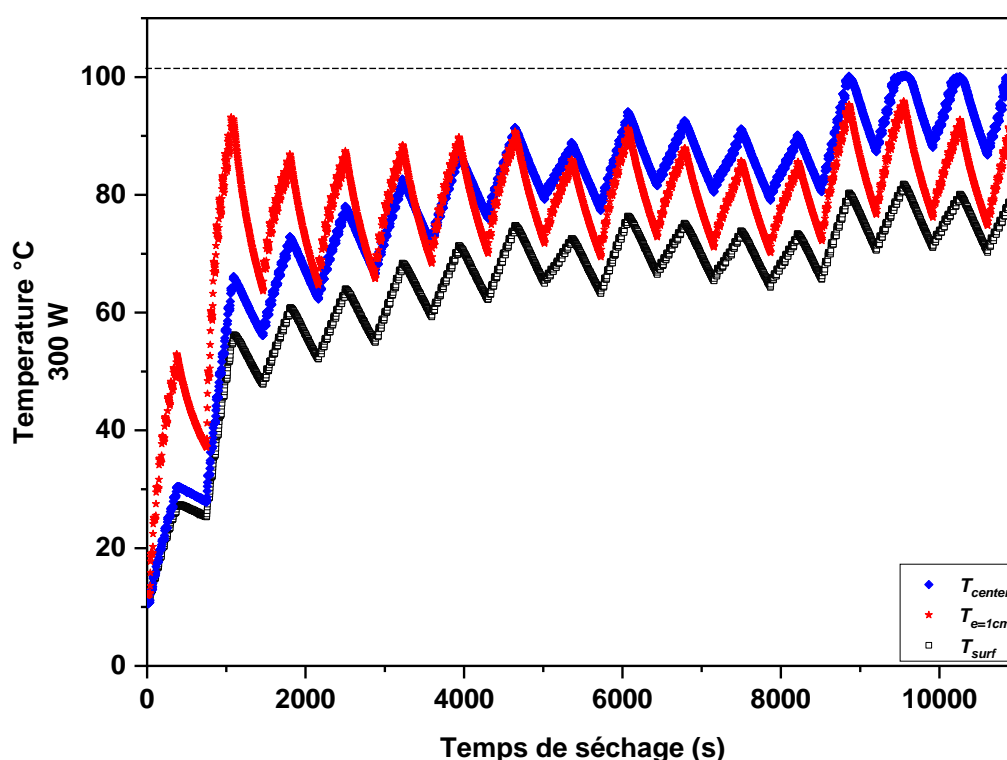


Figure IV.7 Effet de l'épaisseur sur la distribution et l'évolution de la température au cours du temps - Séchage intermittent à 300 W.

La Figure IV.8 illustre l'évolution des températures mesurées dans un échantillon de bois soumis à une puissance de 500 W. Comparativement à 300 W, la montée en température est plus rapide et le gradient thermique entre le centre et la surface est plus prononcé.

Dans cette condition, les oscillations thermiques sont également plus marquées, avec une amplitude accrue. Cela reflète une dissipation énergétique plus importante et une surpression accrue dans la phase gazeuse du bois, intensifiant ainsi la migration de l'humidité.

Le comportement observé à 500 W souligne l'équilibre entre l'intensité thermique et la préservation de la qualité du bois. Une application excessive de chaleur pourrait induire des contraintes thermomécaniques, mais à ce niveau de puissance, les résultats restent dans des limites acceptables pour la plupart des applications industrielles. Ces résultats sont conformes aux études de (Ouertani *et al.*, 2018; Habouria, 2022), qui mettent en évidence l'impact des puissances intermédiaires sur le processus de séchage, permettant une réduction significative du temps de traitement tout en maintenant un contrôle thermique adéquat.

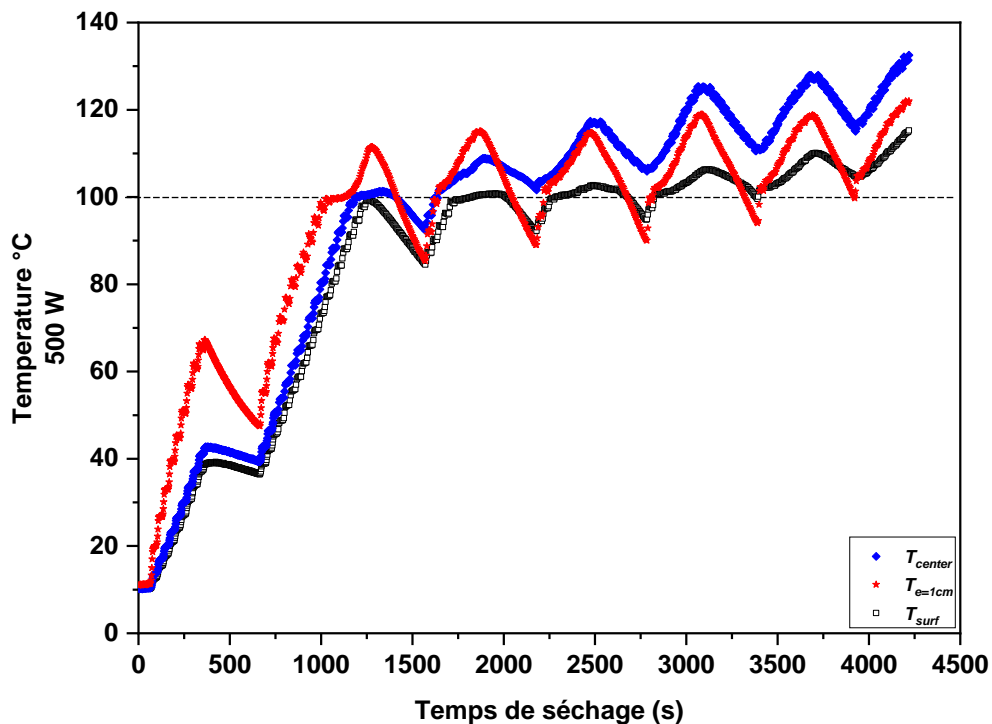


Figure IV.8 Effet de l'épaisseur sur la distribution et l'évolution de la température au cours du temps - Séchage intermittent à 500 W.

La Figure IV.9 présente l'évolution des températures dans le bois sous une puissance de 800 W, la plus élevée parmi les trois configurations. À ce niveau, la montée en température est extrêmement rapide, avec une différence significative entre les températures au centre et en surface. Cette forte dissipation thermique peut entraîner des gradients de surpression significatifs, accélérant considérablement le transfert de vapeur et la migration d'humidité.

Cependant, une puissance de 800 W peut également générer des effets indésirables, tels que des déformations thermomécaniques ou des fissurations, en raison des gradients thermiques et des tensions internes. Ces observations concordent avec les conclusions de (Hassini, Peczalski and Gelet, 2015; Ouertani *et al.*, 2018), qui soulignent les défis associés à l'application de puissances élevées dans les procédés de séchage par micro-ondes.

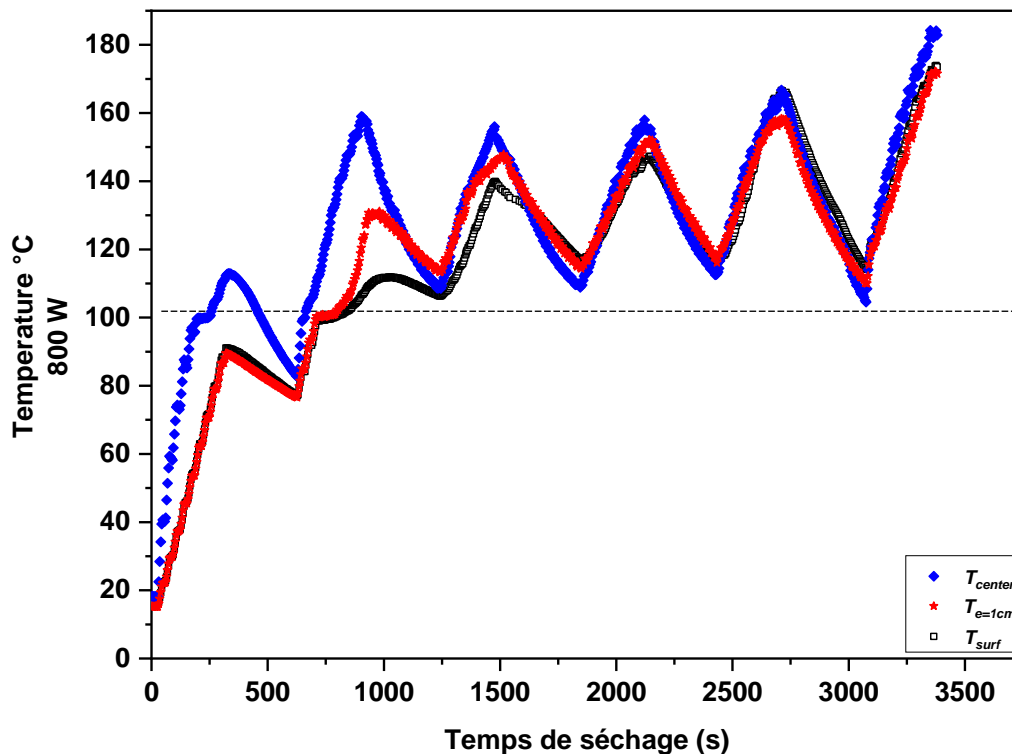


Figure IV.9 Effet de l'épaisseur sur la distribution et l'évolution de la température au cours du temps - Séchage intermittent.

3.1.2.3 *Effet de la puissance des micro-ondes sur la réduction de la teneur en eau du bois*

La teneur en eau au fil du temps sous différentes conditions de séchage est également un aspect nécessaire à considérer dans l'analyse du processus. Les deux types de séchage, à savoir le séchage continu par micro-ondes et le séchage intermittent par micro-ondes, présentent des profils distincts de variation de la teneur en eau au fil du temps, comme illustré dans les figures IV.10 et IV.11.

Le séchage continu par micro-ondes présente généralement une diminution linéaire de la teneur en eau au fil du temps en raison de l'application constante d'énergie micro-ondes (Figure IV.10). Cette méthode peut être préférable pour des applications où un séchage rapide et uniforme est

essentiel. Ce mode permet d'atteindre rapidement des niveaux faibles de teneur en eau (X finale % = 12%), ce qui en fait une méthode efficace pour un séchage rapide. Cependant, cette constance dans l'application d'énergie peut entraîner une accélération excessive de la migration d'eau, augmentant les risques d'apparition de gradients d'humidité prononcés entre la surface et le cœur du matériau.

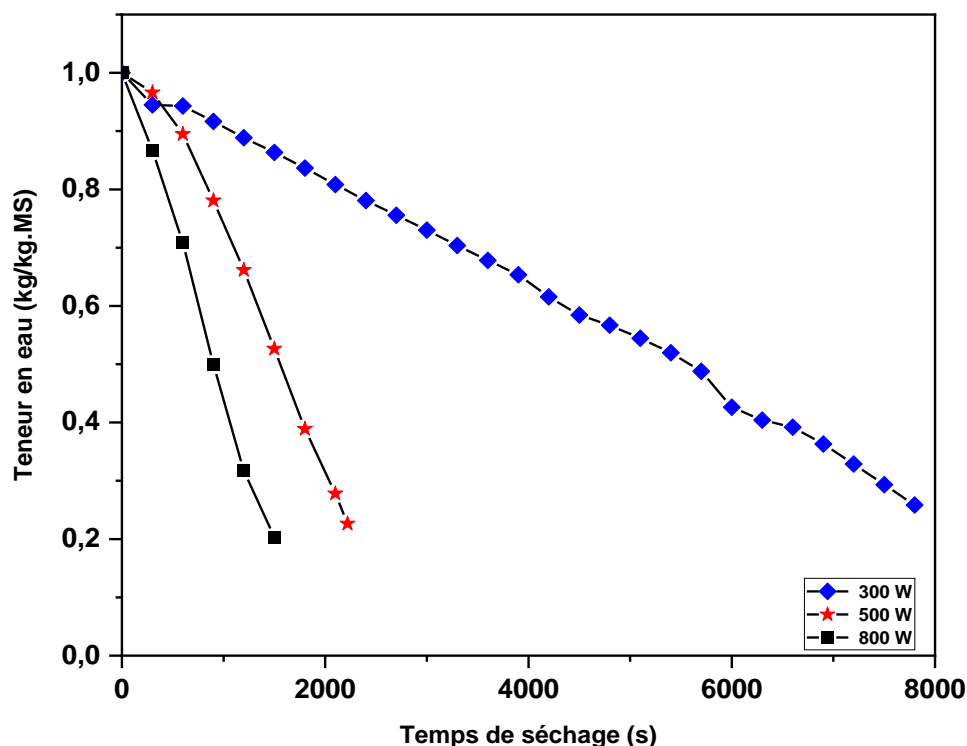


Figure IV.10 Évolution de la teneur en eau pour trois puissances - Séchage continu.

En revanche, le séchage intermittent par micro-ondes peut entraîner des fluctuations de la teneur en eau au fil du temps en raison de l'application intermittente de l'énergie micro-ondes (Figure IV.11). Ces fluctuations sont un effet direct du mode intermittent de séchage. Contrairement au séchage continu, où l'énergie est constamment appliquée et où la teneur en eau diminue de manière plus linéaire et régulière, le séchage intermittent crée des variations périodiques. Bien que ces fluctuations prolongent le temps total de séchage, elles permettent de limiter plusieurs phénomènes indésirables. L'un des avantages majeurs du séchage intermittent est qu'il réduit les risques de surchauffe du bois, en permettant à l'échantillon de se refroidir partiellement pendant les pauses. Sans cette pause, une application continue de micro-ondes pourrait entraîner une montée excessive de la température, particulièrement à l'intérieur du bois, où la chaleur pourrait ne pas être dissipée efficacement. Cette surchauffe interne pourrait causer des fissures

ou des déformations, endommageant ainsi la structure du bois.

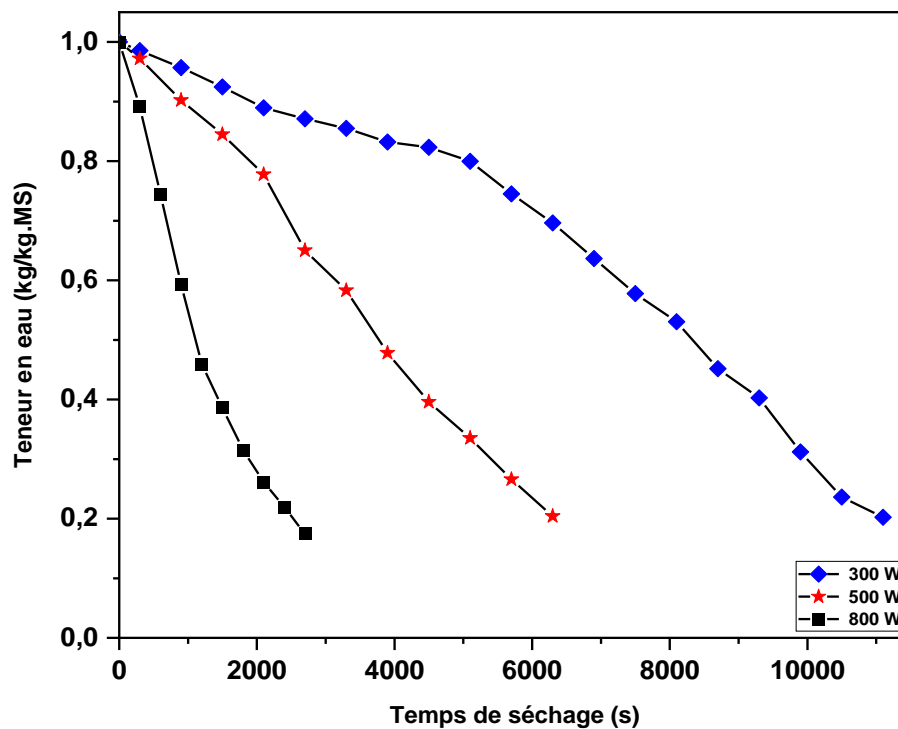


Figure IV.11 Évolution de la teneur en eau pour trois puissances - Séchage intermittent.

La Figure IV.12 présente des histogrammes relatifs aux durées de séchage en modes continu et intermittent, variant avec différentes puissances. L'analyse de ces données suggère que le séchage intermittent nécessite plus de temps pour atteindre une teneur en eau d'équilibre de 12 %. Plus précisément, les durées observées sont supérieures à 11 100 secondes pour une puissance de 300 W, 6 300 secondes pour 500 W, et 2 700 secondes pour 800 W.

En revanche, le séchage continu, pour les mêmes puissances, nécessite respectivement 7 800 secondes, 2 200 secondes et 1 500 secondes. Il est important de souligner que, malgré la durée relativement prolongée du séchage intermittent, le choix de ce processus est justifié par la quête d'une qualité optimale dans le produit final. Cette considération est essentielle dans un contexte où l'accent est mis sur la priorité à une qualité supérieure malgré la relative lenteur du processus.

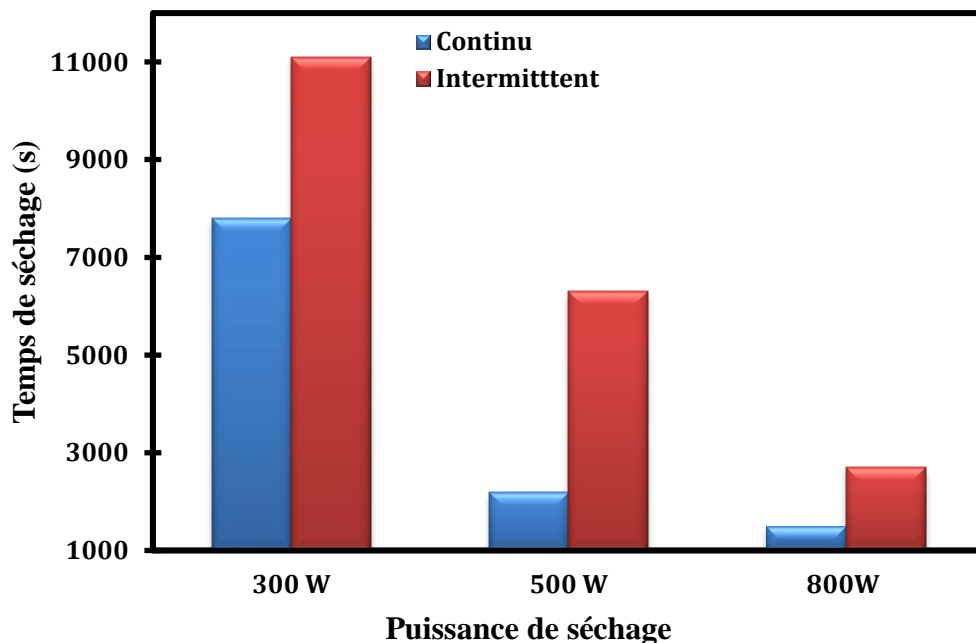


Figure IV.12 Comparaison du temps de séchage par micro-ondes pour deux procédés.

3.1.3 Qualité des échantillons après séchage

Obtenir un produit final de haute qualité dans un délai optimal est la principale préoccupation des professionnels de l'industrie. En effet, lors d'une opération de séchage, le produit peut subir des dommages, se manifestant par des fissures, des crevasses, un retrait volumique ou un noircissement.

3.1.3.1 *Influence du séchage micro-onde continu sur le comportement des échantillons*

Cette section de l'étude se concentre sur l'évaluation qualitative de l'impact du traitement thermique continu sur le comportement du bois d'eucalyptus séché, en examinant les déformations, l'apparition de fissures à la surface, ainsi que les changements de couleur, etc. Les critères d'évaluation qualitative sont illustrés par des photographies des planches correspondant à chaque condition de séchage. La Figure IV.13 (a) présente le comportement du bois séché de manière continue sous une puissance micro-ondes élevée de 800 W. Après 1500 secondes de séchage, une décoloration noire apparaît, signalant la carbonisation du matériau ligneux. De plus, le noircissement est localisé au centre de la planche, illustrant la génération de chaleur volumique interne dans le cas d'un traitement thermique par micro-ondes à 800 W. Des défauts de séchage sont également observés après 2220 et 7800 secondes de séchage à des puissances micro-ondes moyennes et faibles, respectivement 500 W et 300 W, comme illustré

dans les Figures IV.13 (b) et (c).

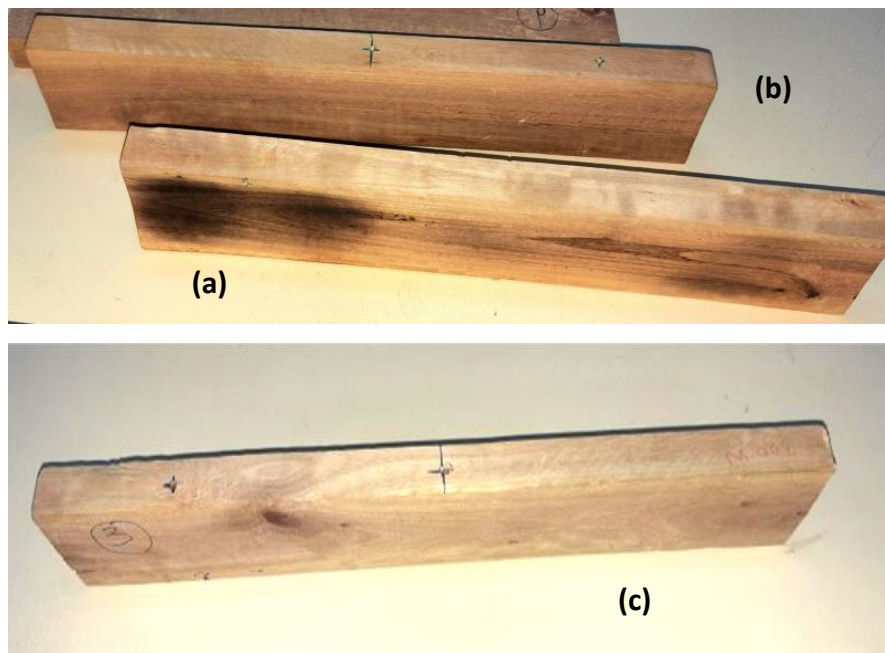


Figure IV.13 Influence du séchage continu sur le comportement final du bois séché sous différentes puissances de micro-ondes.

Selon ces expériences, il est observé que l'utilisation d'une puissance micro-ondes constante tout au long du processus de séchage, comme le pratiquent de nombreux auteurs (Hansson, 2007; Ouertani, 2014), peut entraîner des déformations et des problèmes de surchauffe localisée. Cela est dû au traitement intense inhérent au séchage par micro-ondes, qui se manifeste par l'apparition de zones carbonisées sur le bois.

De plus, l'augmentation incontrôlée de la température à l'intérieur du bois pendant le séchage intensif par micro-ondes provoque une surpression dans la phase gazeuse à l'intérieur du bois. Cela brise les liaisons intercellulaires, entraînant l'apparition de fissures à la surface du bois, causant ainsi des dommages mécaniques et structurels au bois séché (Elaieb, Khaldi and Candelier, 2015).

(Zhang *et al.*, 2020) ont signalé que le bois d'eucalyptus est particulièrement difficile à sécher sans dégradation, soulignant que la plupart des défauts de séchage sont plus graves lorsque les vitesses de séchage et les températures augmentent. Pour résoudre ce problème, il est essentiel de procéder à un séchage contrôlé par micro-ondes, en essayant de minimiser l'apport énergétique tout au long du processus de séchage, tout en bénéficiant de la rapidité offerte par la technologie des micro-ondes.

3.1.3.2 *Influence du séchage par micro-ondes intermittent sur le comportement des échantillons*

Des observations qualitatives du bois sont documentées à l'aide de photographies des planches séchées, comme illustré à la Figure IV.14. L'absence de défauts de séchage liés à la puissance des micro-ondes est observée lors d'un processus de séchage intermittent, contrairement au séchage continu. Cette absence de défauts peut être attribuée au refroidissement du bois pendant les phases intermittentes. L'oscillation de la puissance des micro-ondes entre zéro et 300 W, zéro et 500 W, et zéro et 800 W à intervalles réguliers pour les trois puissances de séchage permet au bois de se refroidir, réduisant ainsi à la fois la température et la pression interne des gaz. La diminution de ces deux paramètres d'état, à savoir la température et la pression interne du bois, au cours des échanges thermiques et de matière sous forme de vapeur d'eau avec l'environnement extérieur, détermine la qualité finale du bois séché. Des recherches antérieures ont démontré que le séchage par micro-ondes sous conditions contrôlées offre des avantages significatifs. (Hansson, 2007) a souligné que le séchage par micro-ondes à température contrôlée minimise les contraintes internes et empêche les fissures dans les échantillons. (Hansson and Antti, 2003) ont également mis en avant que le séchage par micro-ondes contrôlé peut améliorer la résistance du bois, atteignant des résultats comparables aux échantillons séchés à l'air chaud, mais avec un temps de séchage réduit.



Figure IV.14 Influence du séchage intermittent sur le comportement final du bois séché sous différentes puissances de micro-ondes : (a) P =800W, (b) P =500W et (c) P =300W.

3.2 Propriétés mécaniques du bois

3.2.1 Effet de deux méthodes de séchage par micro-ondes sur les propriétés mécaniques du bois d'*Eucalyptus globulus*

Les propriétés mécaniques du bois d'*Eucalyptus globulus* ont été évaluées par des essais de flexion statique et de compression axiale, après des traitements de séchage par micro-ondes en modes continu et intermittent. Les résultats relatifs au module d'élasticité (E) et au module de rupture (σ) sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau IV.3 Moyennes et écarts types du module d'élasticité et du module de rupture en flexion et en compression axiale selon les conditions de séchage par micro-ondes.

Mode de séchage	Puissance (W)	Flexion statique		Compression axiale	
		Module d'élasticité (MPa)	Module de rupture (MPa)	Module d'élasticité (MPa)	Module de rupture (MPa)
Séchage continu	300	8627 ± 297.64	55.34 ± 1.03	4301 ± 139.32	49.84 ± 0.87
	500	8005 ± 226.65	38.37 ± 1.01	4115 ± 84.23	48.46 ± 0.96
	800	7367 ± 256.95	31.98 ± 0.77	3733 ± 110.20	44.82 ± 0.71
Séchage intermittent	300	11663 ± 268.00	61.98 ± 0.63	4883 ± 87.56	58.20 ± 0.55
	500	11756 ± 247.65	61.08 ± 0.66	4994 ± 69.91	57.76 ± 0.65
	800	9571 ± 269.13	49.07 ± 0.64	4485 ± 75.61	51.90 ± 0.54

3.2.1.1 Flexion statique

Les essais de flexion en trois points ont révélé que le séchage intermittent produisait systématiquement des performances mécaniques supérieures à celles du séchage continu à des niveaux de puissance équivalents. La différence la plus significative a été observée à 500 W, où le séchage intermittent a atteint des valeurs du module d'élasticité (E) et du module de rupture (σ) de 11 756 MPa et 61,08 MPa, respectivement 47 % et 59 % supérieures à celles du séchage continu ($E = 8\ 005$ MPa, $\sigma = 38,37$ MPa). Cette amélioration résulte probablement de la relaxation des contraintes thermiques pendant les cycles d'arrêt, qui empêche l'accumulation de dommages microstructuraux (Liu, Li and Wang, 2018).

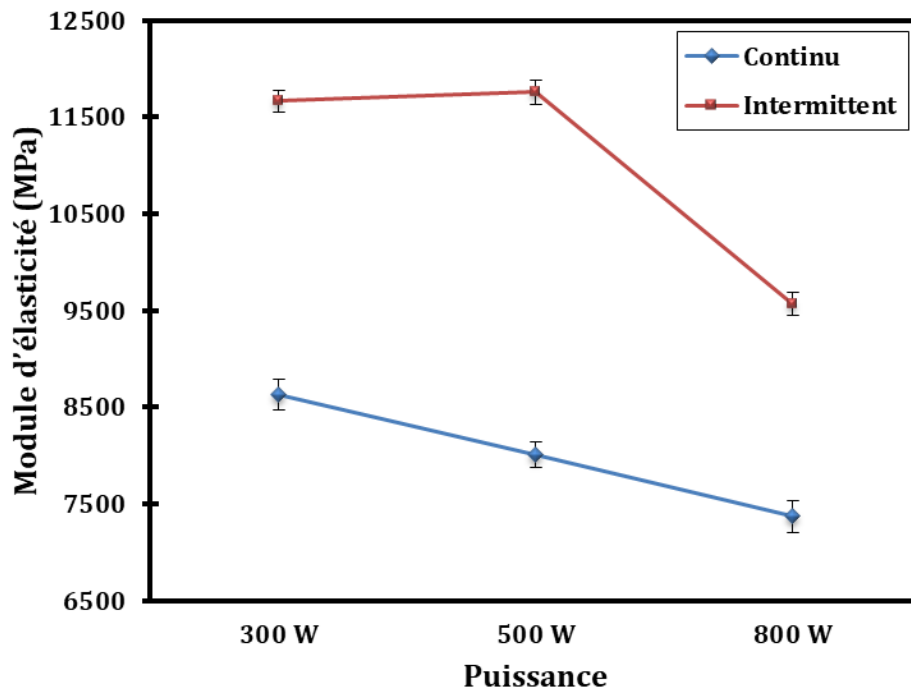


Figure IV.15 Module d'élasticité on flexion statique du bois d'eucalyptus en fonction du mode de séchage par microondes.

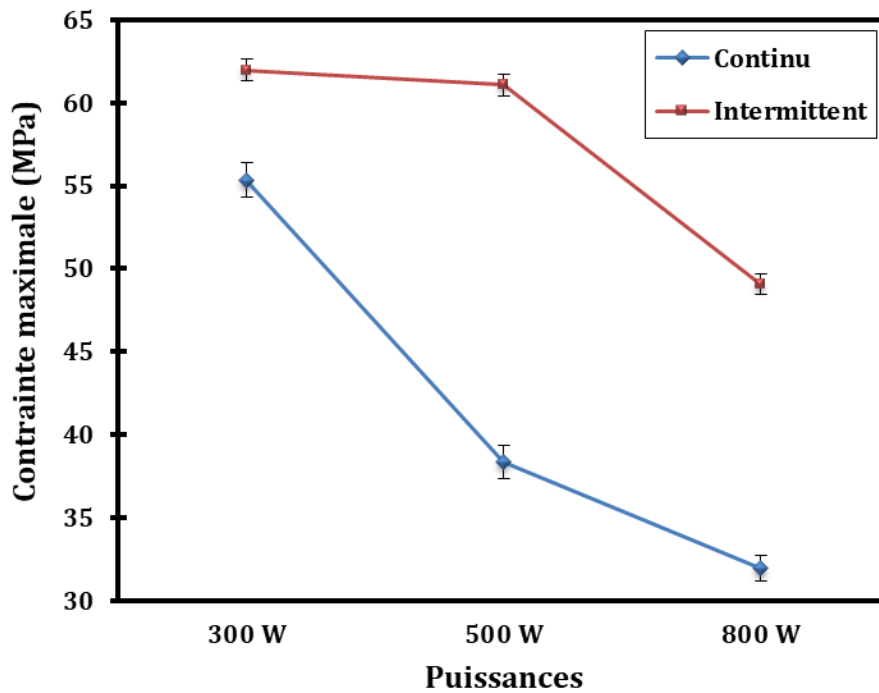


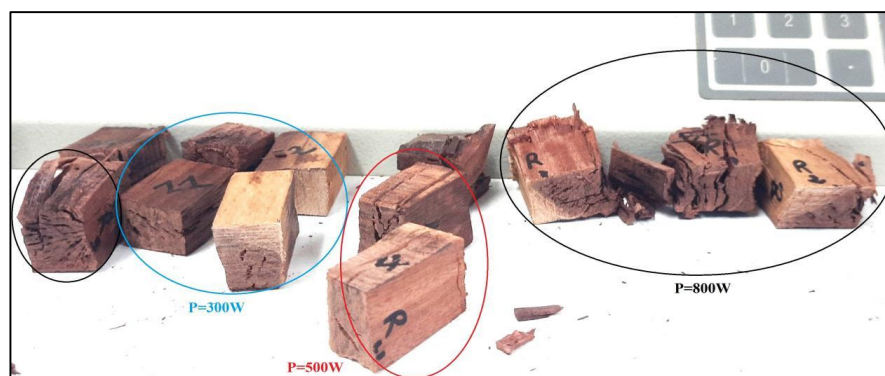
Figure IV.16 Contraintes maximales en flexion statique du bois d'eucalyptus en fonction de la méthode de séchage.

En revanche, l'apport énergétique ininterrompu du séchage continu favorise une surchauffe localisée (Figure IV.14), ce qui explique la réduction de 35 % du module de rupture à 800 W. Comme le montrent les figures IV.15 et IV.16, le séchage intermittent a maintenu des valeurs du module d'élasticité (E) et module de rupture (σ) plus élevées à tous les niveaux de puissance, tandis que le séchage continu a montré.

Des études précédentes, comme celles de Liu et al. (Liu, Li and Wang, 2018), ont démontré que le traitement intensif aux micro-ondes modifie la microstructure du bois et affecte ses propriétés mécaniques. D'autre part, Hansson et Antti (Hansson and Antti, 2006) ont indiqué que le séchage aux micro-ondes du bois d'épicéa de Norvège dans des plages de température de 60°C, 100°C et 110°C n'a pas d'influence significative sur sa dureté.

3.2.1.2 Axial compression

L'analyse des figures IV.17, IV.18 et IV.19 met en évidence l'influence significative du mode de séchage par micro-ondes et du niveau de puissance sur les performances mécaniques du bois d'*Eucalyptus globulus* sous compression axiale. Le séchage intermittent a permis de maintenir des performances mécaniques supérieures à tous les niveaux de puissance, avec un module d'élasticité ($4\,994 \pm 69,91$ MPa) à 500 W et un module de rupture maximal ($58,20 \pm 0,55$ MPa) à 300 W. L'avantage constant en termes de performances (module d'élasticité supérieur de 12 à 21 % ; un module de rupture supérieur de 16 à 19 % par rapport au séchage continu) suggère une préservation de la structure pendant le traitement intermittent (Balboni *et al.*, 2018; Aksenov and Malyukov, 2020).

**Figure IV.17 Échantillons d'*Eucalyptus globulus* après les essais de compression axiale.**

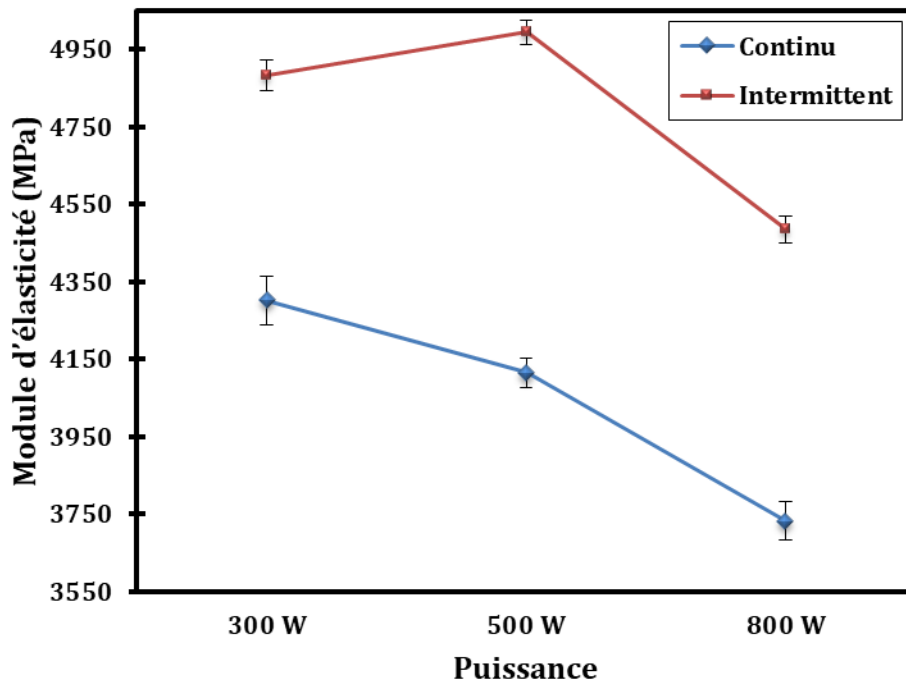


Figure IV.18 Module d'élasticité en compression axiale du bois d'eucalyptus en fonction de la méthode de séchage.

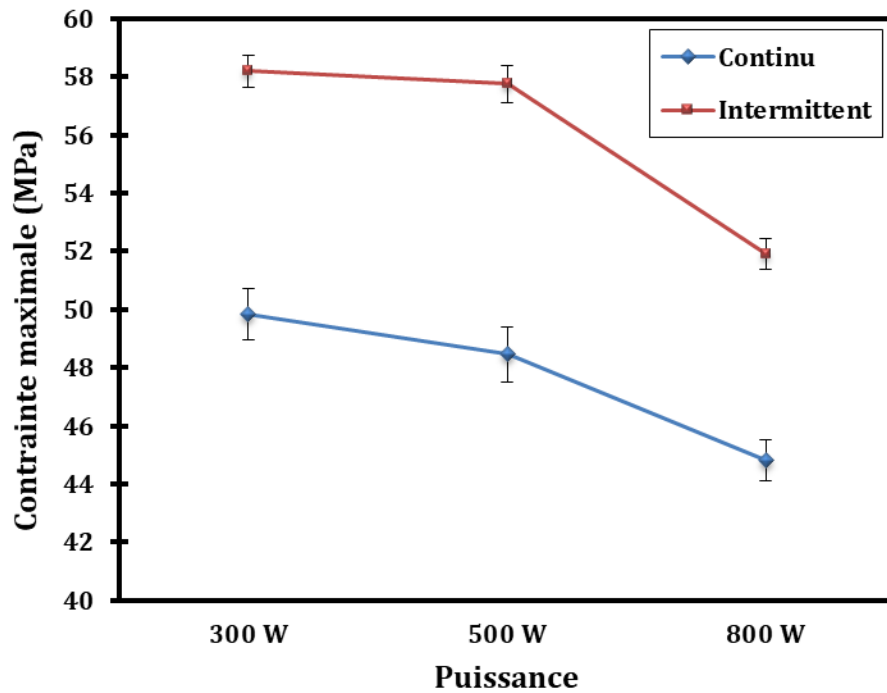


Figure IV.19 Contraintes maximales en compression axiale du bois d'eucalyptus en fonction de la méthode de séchage.

Tableau IV.4 Analyse ANOVA – Influence du mode de séchage micro-ondes (continu et intermittent) sur les propriétés mécaniques du bois d'*Eucalyptus globulus*.

Propriétés	Source de Variation	SC	ddl	CM	F	P-valeur	F_{crit}	Signification
Flexion statique								
Module d'élasticité (E)	Mode	6.7×10^{72}	1	6.7×10^7	699.86	2.89×10^{-19}	4.26	***
	Niveau de puissance	1.6×10^7	2	0.8×10^7	84.41	1.38×10^{-11}	3.40	***
	Interaction	2993461	2	1496730	15.55	4.65×10^{-5}	3.40	***
	Résidu (intra-groupes)	2309427	24	96226				
Module de rupture (σ)	Mode	1796	1	1796	546.41	5.06×10^{-18}	4.26	***
	Niveau de puissance	1644.03	2	822.02	250.04	8.51×10^{-17}	3.40	***
	Interaction	332.68	2	166.34	50.60	2.46×10^{-9}	3.40	***
	Résidu (intra-groupes)	78.90	24	3.29				
Compression axiale								
Module d'élasticité (E)	Mode	4079687	1	4079687	429.94	7.88×10^{-17}	4.26	***
	Niveau de puissance	1446054	2	723027	76.20	4.03×10^{-11}	3.40	***
	Interaction	111643	2	55821	5.88	0.0083	3.40	**
	Résidu (intra-groupes)	227738	24	9489				
Module de rupture (σ)	Mode	510.16	1	510.16	191.87	6.07×10^{-13}	4.26	***
	Niveau de puissance	184.39	2	92.20	34.68	8.34×10^{-8}	3.40	***
	Interaction	6.19	2	3.10	1.16	0.3290	3.40	ns
	Résidu (intra-groupes)	63.81	24	2.66				

NOTE. *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$, ns: non significatif.

L'analyse statistique par ANOVA à deux facteurs a confirmé que le mode de séchage et le niveau de puissance des micro-ondes ont une influence significative sur les performances mécaniques du bois d'*Eucalyptus globulus* (tableau IV.4). Pour les essais de flexion et de compression, le module d'élasticité (E) et le module de rupture (σ) ont été fortement influencés par les facteurs individuels (mode de séchage et niveau de puissance), comme l'indiquent les valeurs F très élevées et les valeurs p inférieures à 0,001.

Plus important encore, l'analyse a révélé des interactions significatives entre les deux facteurs pour la plupart des propriétés, en particulier en flexion. Cela implique que l'effet d'un facteur n'est pas indépendant de l'autre et qu'une optimisation combinée est nécessaire pour améliorer les performances mécaniques. La seule exception a été observée dans le module de rupture (σ) sous compression axiale, où l'effet d'interaction était statistiquement non significatif ($p = 0,329$), ce qui suggère que dans ce cas spécifique, le mode de séchage et la puissance agissent indépendamment.

3.2.2 *Effet des différents processus de séchage sur les propriétés mécaniques du bois d'Eucalyptus globulus.*

Quatre procédés de séchage ont été examinés dans cette étude : le séchage intermittent par micro-ondes à 500 W, le séchage par soufflerie climatique, le séchage conventionnel au four à 80 °C et le séchage naturel. Le tableau IV.5 résume les valeurs moyennes et les écarts-types des paramètres mécaniques pour chaque méthode.

L'évaluation complète de ces techniques de séchage sur le bois d'*Eucalyptus globulus* a révélé des différences statistiquement significatives en termes de performances mécaniques, le séchage intermittent par micro-ondes à 500 W s'imposant comme la méthode la plus performante. Afin de permettre une comparaison complète, les durées de séchage pour chaque méthode conventionnelle ont également été enregistrées au cours des expériences. Les durées moyennes nécessaires pour atteindre une teneur en humidité finale d'environ 12 % étaient les suivantes :

- Séchage naturel : environ 96 000 secondes,
- Séchage au four à 80 °C : environ 24 000 secondes,
- Soufflerie climatique : environ 18 000 secondes.

Tableau IV.5 Valeurs moyennes du module d'élasticité (E) et module de rupture (σ) lors des essais de flexion statique et de compression axiale.

Propriétés		Intermittent (500 W)	Four Conventionnel (80°C)	Soufflerie climatique	Séchage Naturel
Flexion statique	Module d'élasticité (E)	11755.96 ± 247.65 MPa	10183.66 ± 186.38 MPa	10908.84 ± 317.07 MPa	10005.08 ± 160.46 MPa
	Module de rupture (σ)	61.08 ± 0.66 MPa	56.47 ± 0.99 MPa	60.05 ± 1.15 MPa	46.19 ± 1.02 MPa
Compression axiale	Module d'élasticité (E)	4994 ± 69.91 MPa	4521.42 ± 68.42 MPa	4345.18 ± 42.27 MPa	4094.72 ± 87.65 MPa
	Module de rupture (σ)	57.76 ± 0.65 MPa	46.74 ± 0.62 MPa	48.76 ± 0.71 MPa	56.03 ± 0.87 MPa

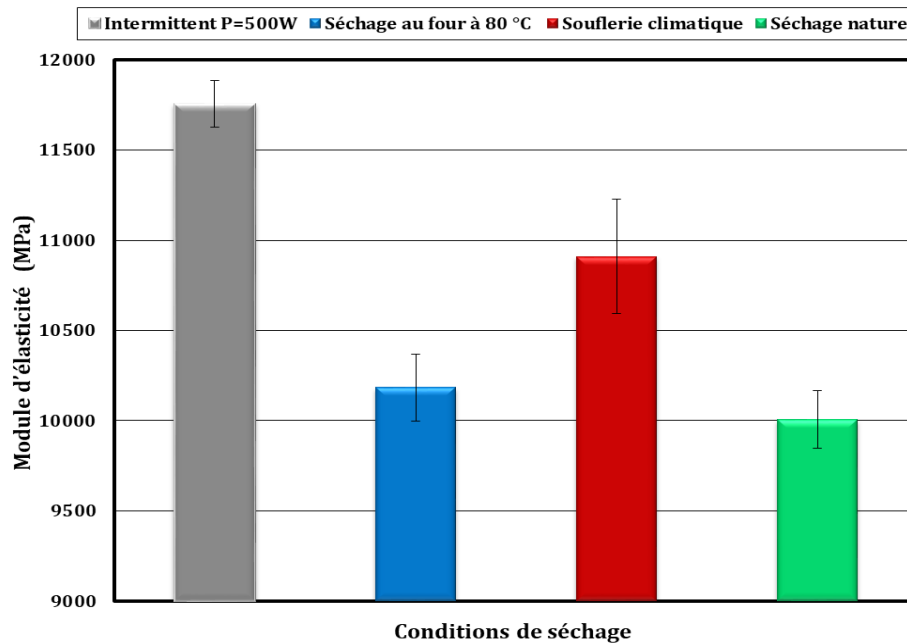


Figure IV.20 Effet des différents processus de séchage sur le module d'élasticité en flexion statique.

Les données expérimentales montrent que cette technique de séchage avancée permet d'obtenir des propriétés mécaniques optimales dans l'ensemble des configurations testées (figures IV.20 à IV.23 et tableau IV.5), avec des valeurs maximales du module d'élasticité (E) et du module de rupture (σ) en flexion statique ($11\,756 \pm 248$ MPa et $61,08 \pm 0,66$ MPa, respectivement) ainsi qu'en compression axiale ($4\,994 \pm 70$ MPa et $57,76 \pm 0,65$ MPa). Ces performances traduisent des améliorations substantielles, avec un gain d'environ 15 % du module d'élasticité par rapport au séchage conventionnel, jusqu'à 22 % en compression axiale par rapport au séchage naturel, et environ 17 à 18 % en flexion statique.

Les échantillons séchés par micro-ondes ont également démontré une meilleure cohérence du processus, comme en témoigne la fourchette d'écart type plus étroite ($\pm 0,55$ à ± 70 MPa). Par rapport à la référence industrielle du séchage climatique à ventilateur, la méthode intermittente par micro-ondes a montré des avantages évidents en termes de rigidité, avec des valeurs du module d'élasticité (E) en flexion environ 8 % plus élevées (11 756 contre 10 908 MPa). Si le ventilateur climatique a produit des résultats compétitifs en termes du module de rupture en flexion ($60,05 \pm 1,15$ MPa), ses performances lors des essais de compression ont été nettement inférieures à celles du bois traité par micro-ondes.

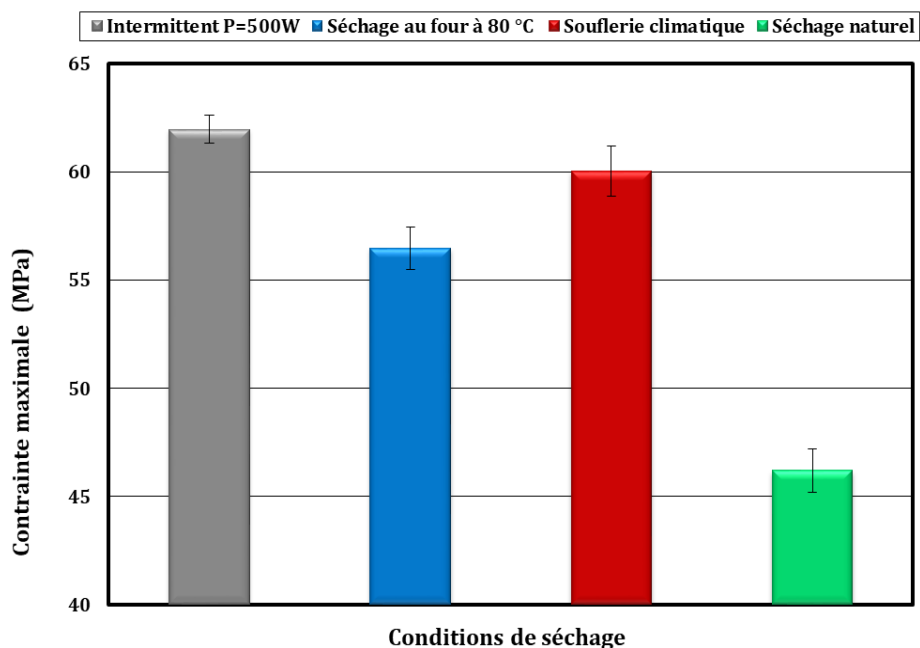


Figure IV.21 Effet des différents processus de séchage sur la contrainte de rupture en flexion statique.

Le séchage naturel a présenté les propriétés mécaniques les plus variables et généralement les plus faibles, en particulier en termes de résistance à la flexion, qui était environ 24 % inférieure

à celle des échantillons séchés au micro-ondes ($46,19 \pm 1,02$ MPa), probablement en raison de l'accumulation de contraintes internes lors d'un séchage prolongé et non contrôlé. (Herrera-Díaz *et al.*, 2018).

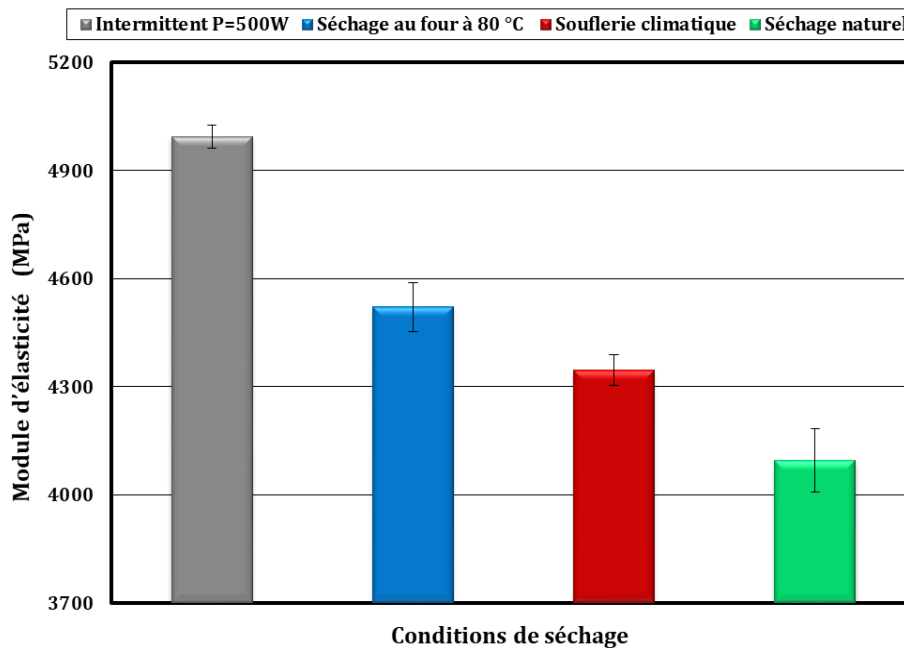


Figure IV.22 Effet des différents modes de séchage sur le module d'élasticité en compression axiale.

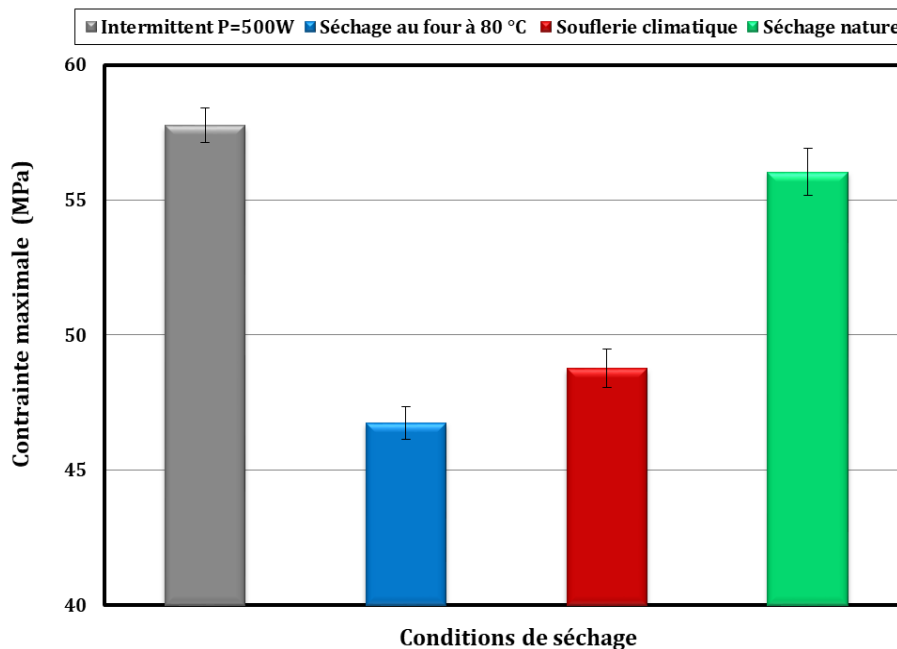


Figure IV.23 Effet des différents modes de séchage sur la contrainte de rupture en compression axiale.

Les résultats de l'ANOVA (Tableau IV.6) ont démontré que le processus de séchage (séchage intermittent par micro-ondes à 500 W, séchage au four à 80 °C, séchage par ventilateur climatique et séchage naturel) avait un effet statistiquement significatif sur le module d'élasticité (E) et le module de rupture (σ) du bois d'*Eucalyptus globulus*. Pour le module d'élasticité, la méthode de séchage a influencé de manière significative les résultats en flexion statique ($F = 14,33$, $p = 8,53 \times 10^{-5}$) et en compression axiale ($F = 38,07$, $p = 1,64 \times 10^{-7}$). De même, pour le module de rupture, les différences entre les techniques de séchage étaient très significatives en flexion statique ($F = 52,94$, $p = 1,57 \times 10^{-8}$) et en compression axiale ($F = 56,48$, $p = 9,85 \times 10^{-9}$). Ces résultats statistiques correspondent aux tendances observées en matière de performances mécaniques pour les différentes méthodes de séchage.

Le séchage intermittent par micro-ondes a systématiquement fourni les valeurs les plus élevées dans les deux configurations de charge, tandis que le séchage naturel a donné les valeurs les plus faibles. Les faibles valeurs p confirment que ces différences ne sont pas dues à une variation aléatoire, mais reflètent plutôt la forte influence de la méthode de séchage sur l'intégrité mécanique du matériau. En particulier, le séchage par micro-ondes, en favorisant une distribution uniforme de l'humidité et une libération contrôlée des contraintes, préserve la rigidité et la résistance plus efficacement que les méthodes conventionnelles ou naturelles. Dans tous les aspects mécaniques évalués, le séchage intermittent par micro-ondes à 500 W a systématiquement offert des performances supérieures ou comparables. Cela le présente comme une méthode optimale pour équilibrer l'efficacité du séchage et la préservation de la qualité mécanique. L'analyse statistique souligne que non seulement la présence de chaleur, mais aussi le mode et le contrôle de l'apport d'énergie, comme l'application intermittente par opposition à l'application continue, jouent un rôle essentiel dans la détermination des propriétés mécaniques finales du matériau.

Tableau IV.6 Analyse ANOVA – Influence des méthodes de séchage sur les propriétés mécaniques de l'Eucalyptus globulus.

Propriété	Source de Variation	SC	ddl	MC	F	P-valeur	F_{crit}	Signification
Flexion statique								
Module d'élasticité (E)	Procédé	9,50E	3	3,20E+06	14.33	8.53×10^{-5}	3.24	***
	de séchage	+06						
	Résidu	3,60E	16	2,20E+05				
	(intra-groupes)	+06						
Module de rupture (σ)	Procédé	741.88	3	247.29	52.94	1.57×10^{-8}	3.24	***
	de séchage							
	Résidu	74.74	16	4.67				
	(intra-groupes)							
Compression axiale								
Module d'élasticité (E)	Procédé	2,20E	3	7,20E+05	38.07	1.64×10^{-7}	3.24	***
	de séchage	+06						
	Résidu	3,00E	16	18911				
	(intra-groupes)	+05						
Module de rupture (σ)	Procédé	435.49	3	145.16	56.48	9.85×10^{-9}	3.24	***
	de séchage							
	Résidu	41.12	16	2.57				
	(intra-groupes)							

NOTE. *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$, ns: non significatif

Ces résultats ouvrent la voie à de futures recherches sur la stabilité dimensionnelle à long terme et l'intégrité microstructurale du bois séché aux micro-ondes. Des recherches supplémentaires devraient également explorer la scalabilité de cette méthode pour un usage industriel, en accordant une attention particulière à la durabilité, à l'efficacité énergétique et à la cohérence sur des volumes plus importants.

4 CONCLUSION

Ce chapitre fournit une quantification approfondie de l'impact des protocoles de séchage par micro-ondes optimisés sur la performance structurelle du bois d'Eucalyptus globulus algérien. Grâce à une évaluation systématique des modes de séchage intermittent et continu à différentes puissances (300 à 800 W), il a été établi que le traitement intermittent à 500 W permet d'atteindre un équilibre optimal entre efficacité du procédé et préservation des propriétés mécaniques, avec :

- Une amélioration de 15 à 22 % du module d'élasticité et du module de rupture par rapport au séchage conventionnel.
- Une réduction de 65 à 90 % du temps de traitement par rapport aux méthodes de séchage à l'air.

Les données expérimentales mettent en évidence deux mécanismes fondamentaux à l'origine de ces améliorations :

- L'effet de relaxation thermique pendant les cycles OFF intermittents, qui limite l'accumulation des dommages microstructuraux.
- Une maîtrise de l'apport énergétique à 500 W, permettant de maintenir la température interne en dessous du seuil critique de dégradation de la cellulose (120 °C).

Une validation statistique par analyse de la variance (ANOVA) a confirmé ces résultats avec un haut niveau de signification ($p < 0,001$), notamment pour les propriétés en flexion, où les effets d'interaction se sont révélés particulièrement marqués ($F > 500$).

Dans l'ensemble, cette recherche montre qu'un protocole de séchage par micro-ondes rigoureusement contrôlé peut constituer une alternative efficace aux techniques conventionnelles, notamment dans un contexte industriel visant à améliorer la qualité du bois tout en réduisant les durées de traitement.

Chapitre V ANALYSE NUMÉRIQUE DES TRANSFERTS DE CHALEUR ET DE MASSE LORS DU SÉCHAGE PAR MICRO-ONDES INTERMITTENT DU BOIS

1 INTRODUCTION

Une analyse des propriétés hydriques, thermiques et mécaniques du bois d'eucalyptus globulus, ainsi qu'une étude de la cinétique de son séchage, a été menée dans les chapitres précédents. Ce chapitre a pour objectif de modéliser et simuler les évolutions hydro-thermiques et mécaniques au cours du séchage intermittent par micro-ondes d'une planche d'eucalyptus globulus, considérée comme un milieu poreux.

En raison de la complexité des phénomènes impliquant des transferts couplés de chaleur, de masse et de pression de gaz, divers modèles théoriques ont été développés. Nous présentons d'abord une revue des principales avancées dans ce domaine, avant de détailler les fondements théoriques de notre propre modèle. Le code développé dans cette étude permet de suivre l'évolution temporelle de la teneur en eau, de la température et de la pression interne de la phase gazeuse au sein du bois, en fonction des propriétés de transfert du matériau et des conditions ambiantes.

Ce chapitre décrit également les hypothèses formulées, la modélisation mathématique des équations, ainsi que les conditions initiales et aux limites. Pour la simulation du séchage, nous avons utilisé COMSOL Multiphysics 6.1, qui intègre les équations de transfert de chaleur, de masse et de pression. Enfin, une optimisation des paramètres du procédé est proposée, basée sur la qualité mécanique du bois séché et la pression interne de la phase gazeuse.

2 MATÉRIELS ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

2.1 Configuration géométrique

La Figure V.1a présente la configuration géométrique du problème simulé, construite à l'aide de COMSOL Multiphysics 6.1. Une géométrie en forme de parallélépipède a été considérée pour le bois lors du développement des modèles de cette étude. L'échantillon a des dimensions de (30x5x2 cm³). La puissance micro-ondes incidente est injectée perpendiculairement à la surface de la planche (Figure V.1b).

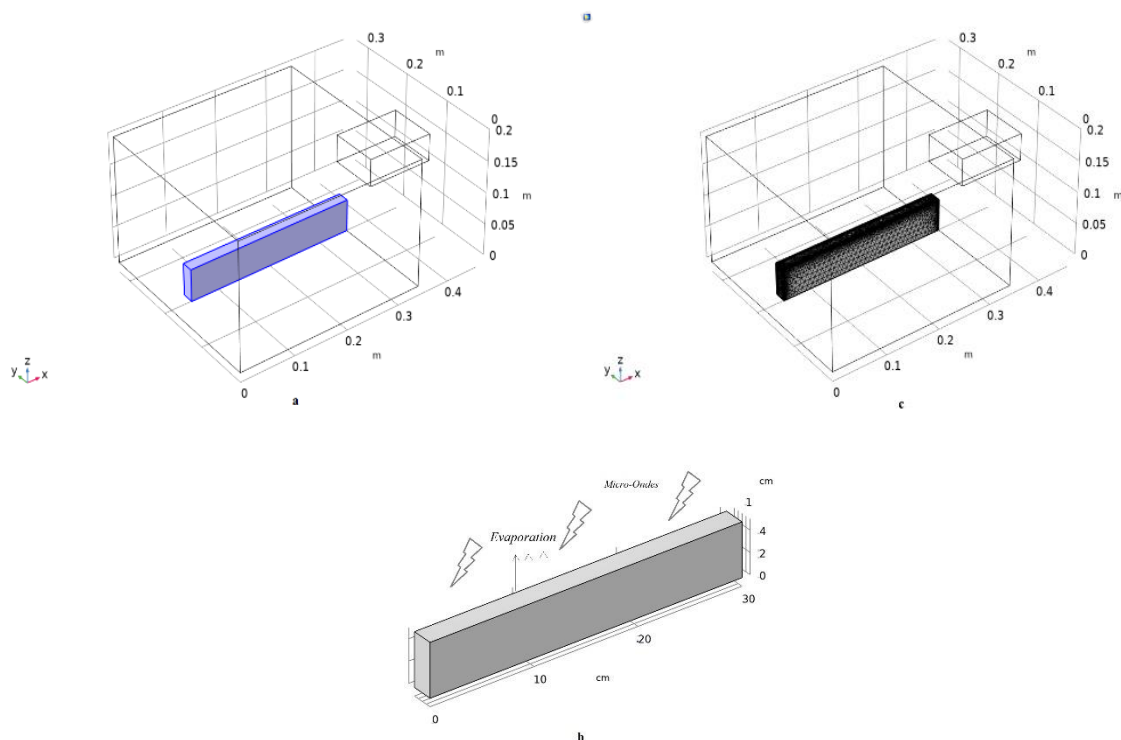


Figure V.1 Configuration géométrique du problème simulé et maillage.

Un maillage non uniforme avec une résolution de grille affinée au niveau de la frontière de transport, ayant une taille maximale d'élément de 0,1 mm, a été implémenté, comme le montre la **Figure V.1c**. Afin de confirmer l'indépendance des résultats vis-à-vis de la configuration de la grille, plusieurs évaluations de sensibilité à la grille ont été réalisées. Une durée de pas de temps d'une seconde (1 s) a été sélectionnée pour résoudre les équations. La simulation a été effectuée sur une plateforme Windows 10, équipée d'un processeur Intel Core i9 cadencé à 3,7 GHz et doté de 16 Go de RAM.

3 MODÉLISATION MATHÉMATIQUE

3.1 Hypothèses simplificatrices du problème

Ce modèle du processus de séchage suppose une répartition initiale uniforme de l'humidité et de la température. La phase liquide est considérée comme incompressible, et la phase gazeuse (mélange air-vapeur d'eau) se comporte comme un gaz parfait. Le milieu solide reste rigide avec une porosité constante, et des effets tels que la gravité, la dissipation visqueuse et les transformations réversibles sont négligés. La température et la pression sont supposées homogènes, sans réactions chimiques. Le produit est modélisé comme un isolant idéal, la loi de Darcy étant applicable à la phase gazeuse et à l'eau liée. À l'échelle des pores, l'équilibre thermodynamique local est supposé, avec des températures égales entre les phases et une pression de vapeur à l'équilibre.

3.2 Saturation du bois

La saturation du bois est définie comme le rapport du volume d'eau libre au volume des pores selon la relation suivante :

$$S = \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon} \quad (\text{V.1})$$

Où ε représente la porosité du milieu et ε_l est la fraction volumétrique de l'eau libre. Pour un milieu saturé en eau libre, la valeur de saturation est égale à 1, et elle diminue jusqu'à 0 lorsque cette eau est évacuée par le processus de séchage.

Dans notre modèle, nous utiliserons la relation suivante (Ernesto and Salazar, 2006) :

$$S = \frac{\rho_s}{\varepsilon \rho_l} (X - X_{\text{PFS}}) \quad (\text{V.2})$$

En fonction de la nature des constituants (gaz, eau libre, eau liée), le transport de masse entraîne différents processus de migration. Par conséquent, une formulation différente est appliquée à chaque composant, mais la loi de Darcy reste la base essentielle de ces processus :

$$\bar{V}_l = \frac{k_l k_{rl}}{\mu_l} (\nabla P_c + \nabla \bar{P}_g) \quad (\text{V.3})$$

$$\bar{V}_g = \frac{k_g k_{rg}}{\mu_g} (\nabla P_c - \nabla \bar{P}_l) \quad (\text{V.4})$$

Ce modèle décrit les vitesses du gaz \bar{V}_g et du liquide \bar{V}_l les perméabilités intrinsèques du milieu k_l et k_g , ainsi que la perméabilité relative Kr de chaque phase. Les viscosités dynamiques sont

représentées par μ_l et μ_g , et la pression capillaire est définie par $P_c = \bar{P}_g - \bar{P}_l$. Les effets de la gravité sont négligés dans ce modèle.

3.3 Équations fondamentales

Dans cette section, la formulation mathématique, la condition initiale, les conditions aux limites, ainsi que les paramètres d'entrée sont présentés.

Équation de Maxwell pour le champ électromagnétique et la génération de chaleur

Les équations de Maxwell fournissent le champ électromagnétique à tout point dans le domaine de calcul. Dans le domaine fréquentiel, l'équation de Maxwell peut être écrite comme suit (Chen *et al.*, 2016) :

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{E} \right) - \frac{2\pi f^2}{c} (\epsilon' - i\epsilon'') \vec{E} = 0 \quad (\text{V.5})$$

La force du champ électrique \vec{E} , est exprimée en volts par mètre (V/m), tandis que, f représente la fréquence des micro-ondes en hertz (Hz). La vitesse de la lumière, c est donnée en mètres par seconde (m/s). Les propriétés du matériau incluent le constant diélectrique, ϵ' le facteur de perte diélectrique ϵ'' , et la perméabilité électromagnétique μ .

La génération de chaleur due aux micro-ondes, Q_m est mesurée en watts par mètre cube (W/m^3), comme défini dans (Chen *et al.*, 2014).

$$Q_m = Q_{rh} + Q_{ml} \quad (\text{V.6})$$

Ici, Q_{rh} est la perte résistive (W/m^3) et Q_{ml} est la perte magnétique (W/m^3). Pour les produits en bois, les pertes magnétiques sont négligeables, c'est-à-dire $Q_{ml}=0$ (Chen *et al.*, 2014). La perte résistive peut être calculée comme suit (Wentworth, 2005; Chen *et al.*, 2014).

$$Q_{rh} = 0.5 \cdot \vec{J} \cdot \vec{E}^* \quad (\text{V.7})$$

Où \vec{E}^* est le conjugué de \vec{E} , et la densité de courant électrique \vec{J} (A/m^2) est donnée par :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' \vec{E} \quad (\text{V.8})$$

Dans ce contexte, σ représente la conductivité électrique (S/m), ϵ'' est le facteur de perte diélectrique, et ϵ_0 désigne la permittivité dans le vide. En substituant ces paramètres dans l'équation (V.6), la génération de chaleur par micro-ondes peut s'exprimer comme suit :

$$Q_m = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' |E^2| \quad (\text{V.9})$$

Cela correspond à l'équation de génération de chaleur dérivée par (Metaxas, 1996).

3.3.1 Propriétés diélectriques

Les caractéristiques les plus significatives dans les applications de chauffage et de séchage par micro-ondes sont la constante diélectrique du matériau et la perte diélectrique, qui décrivent respectivement comment les matériaux interagissent avec le rayonnement électromagnétique (Sosa-Morales *et al.*, 2010). L'évaluation des propriétés diélectriques est essentielle pour la modélisation et le développement de produits et de procédés (Ikediala *et al.*, 2000). Les données issues de (Martín-Esparza *et al.*, 2006) sont utilisées dans une analyse de régression quadratique, où l'interception du graphique traçant ε' et ε'' en fonction de X est fixée à 0,1 pour éviter une singularité numérique à X = 0. Les expressions quadratiques résultantes sont :

$$\varepsilon' = 36.638X^2 + 30.289X + 0.1 \quad (\text{V.10})$$

$$\varepsilon'' = -13.543X^2 + 26.815X + 0.1 \quad (\text{V.11})$$

Ici, X représente la teneur en eau.

3.3.2 Équation de transfert de chaleur dans le solide

Le transfert de chaleur est pris en compte par la loi de Fourier, donnée par,

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q_m f(t) \quad (\text{V.12})$$

Où T est la température de l'échantillon (°C), ρ est la densité de l'échantillon (kg/m^3). C_p est la chaleur spécifique (J/kg/K), et λ est la conductivité thermique (W/m/K). Le terme source de chaleur est ajouté à l'équation de transfert de chaleur lorsque le séchage électromagnétique est activé.

3.3.3 Equations de conservation de masse

3.3.3.1 Flux de transport de matière

L'équation de bilan massique comprend divers potentiels d'humidité qui reflètent le mouvement des différentes phases présentes dans les pores ainsi que le comportement hygroscopique du matériau (Kumar *et al.*, 2018). Dans ce cas, le bilan massique contient la proportion d'eau sous forme : liquide (liée, libre) et vapeur. Ces proportions se déplacent sous

l'effet des forces capillaires pour le transfert de liquide et par diffusion pour la phase vapeur. Cependant, une portion de la diffusion de l'air sec dans les pores est également prise en compte dans le bilan massique (Ouertani, 2014).

Où m est le taux de changement de phase de l'eau liquide (masse de liquide s'évaporant par unité de temps et de volume), m_b est le taux de changement de phase de l'eau liée. ρ_i et V_i désignent respectivement la densité massique et la vitesse du composant i .

Air sec

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}_a) + \nabla \cdot (\bar{\rho}_a \bar{V}_a) = 0 \quad (\text{V.13})$$

Vapeur d'eau

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}_v) + \nabla \cdot (\bar{\rho}_v \bar{V}_v) = m + m_b \quad (\text{V.14})$$

Eau liquide libre

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}_l) + \nabla \cdot (\bar{\rho}_l \bar{V}_l) = -m \quad (\text{V.15})$$

Eau liquide liée

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}_b) + \nabla \cdot (\bar{\rho}_b \bar{V}_b) = -m_b \quad (\text{V.16})$$

Matrice solide

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}_s) + \nabla \cdot (\bar{\rho}_s \bar{V}_s) = 0 \quad (\text{V.17})$$

Les flux de transport sont exprimés pour les trois variables du problème transitoire : la teneur en eau du bois (X), la température du bois (T) et la pression interne de la phase gazeuse (P).

a. Flux d'eau libre

L'expression du flux de liquide (J_l) est obtenue en introduisant l'expression de la pression capillaire dans l'équation (V.4) comme suit :

$$J_l = \bar{\rho}_l \bar{V}_l = \rho_l \frac{k_l k_{rl}}{\mu_l} (\nabla \bar{P}_c - \nabla \bar{P}_g) \quad (\text{V.18})$$

L'expression du flux de liquide (eau libre) est donnée par la relation suivante :

$$J_l = D_l^x \nabla X + D_l^P \nabla P_g + D_l^T \nabla T \quad (\text{V.19})$$

Avec :

$$D_1^P = \left[-\bar{\rho}_1 \frac{k_1 k_{r1}}{\mu_1} \right]$$

$$D_1^X = \left[\bar{\rho}_1 \frac{k_1 k_{r1}}{\mu_1} \frac{\partial P_c}{\partial X} \right]$$

$$D_1^T = \left[\bar{\rho}_1 \frac{k_1 k_{r1}}{\mu_1} \frac{\partial P_c}{\partial T} \right]$$

b. Flux de vapeur

Dans la phase gazeuse, l'équation de transfert de la vapeur d'eau se traduit par un flux total égal à la somme d'un flux diffusif de vapeur, décrit par la loi de Fick, et d'un flux convectif, décrit par la loi de Darcy généralisée (Herrera *et al.*, 2015):

$$J_v = \bar{\rho}_v \bar{V}_v = \bar{\rho}_g \bar{V}_g + \bar{\rho}_g D_{\text{eff}} \nabla C \quad (\text{V.20})$$

Où : $C = \frac{\bar{\rho}_v}{\bar{\rho}_g}$ est la fraction massique de la vapeur dans la phase gazeuse, $\bar{\rho}_v$ est la densité moyenne de la vapeur d'eau, \bar{V}_v est la vitesse moyenne de la vapeur d'eau, et \bar{V}_g est la vitesse moyenne du gaz régie par la loi de Darcy généralisée. Enfin, l'expression du flux de vapeur d'eau est donnée par l'expression suivante :

$$J_v = \bar{\rho}_v \bar{V}_v = D_v^X \nabla X + D_v^P \nabla P_g + D_v^T \nabla T \quad (\text{V.21})$$

Avec :

$$D_v^P = - \left[\rho_v^g \frac{k_g k_{rg}}{\mu_g} - D_{\text{eff}} \left(\frac{M_a M_v}{M_g RT} \right) \frac{P_v}{P_g} \right] = - \left[\rho_v^g \frac{k_g k_{rg}}{\mu_g} - D_{\text{eff}} \frac{M_a M_v P_v}{RT (M_a (P_g - P_v) + M_v P_v)} \right]$$

$$D_v^X = - \left[D_{\text{eff}} \left(\frac{M_a M_v}{M_g RT} \right) \frac{\partial P_v}{\partial X} \right] = - D_{\text{eff}} \frac{M_a M_v P_v}{RT (M_a P_g - P_v) + M_v P_v} \frac{\partial P_v}{\partial X}$$

$$D_v^T = - \left[D_{\text{eff}} \left(\frac{M_a M_v}{M_g RT} \right) \frac{\partial P_v}{\partial T} \right] = - D_{\text{eff}} \frac{M_a M_v P_v}{RT (M_a P_g - P_v) + M_v P_v} \frac{\partial P_v}{\partial T}$$

c. Flux d'eau liée

Le transport de l'eau liée est défini par la loi classique de Fick sans prendre en compte l'effet de thermo-diffusion :

$$J_b = -\bar{\rho}_s D_b \nabla X_b \quad (\text{V.22})$$

Où X_b est la teneur en eau du bois dans le domaine hygroscopique ($X \leq X_{psf}$). Le coefficient de diffusion de l'eau liée, qui est fonction de la température et de la teneur en eau moyenne dans la direction tangentielle du bois, est donné par la corrélation suivante (Kadem *et al.*, 2011) :

$$D_b^T(X, T) = \exp\left(-9,9 - \frac{4300}{T+273} + 9,8X_b\right) \quad (V.23)$$

d. Flux d'air sec

En supposant que l'air sec et la vapeur d'eau ont le même coefficient de diffusion dans la phase gazeuse $D_{effv} = D_{effa}$ et $\bar{\rho}_g = \bar{\rho}_v + \bar{\rho}_a$, l'expression du flux d'air sec est réduit à l'expression suivante:

$$J_a = \bar{\rho}_a \bar{V}_a = \bar{\rho}_a \bar{V}_g + \bar{\rho}_g D_{eff} \nabla C \quad (V.24)$$

Après un développement mathématique, l'expression du flux d'air sec est réduite à l'expression suivante :

$$J_a = \bar{\rho}_a \bar{V}_a = D_a^x \nabla X + D_a^P \nabla P_g + D_a^T \nabla T \quad (V.25)$$

Avec :

$$D_a^P = \left[\rho_v^g \frac{k_g k_{rg}}{\mu_g} - D_{eff} \left(\frac{M_a M_v}{M_g RT} \right) \frac{P_v}{P_g} \right] = \left[\rho_v^g \frac{k_g k_{rg}}{\mu_g} - D_{eff} \frac{M_a M_v P_v}{RT(M_a(P_g - P_v) + M_v P_v)} \right] = -D_v^P;$$

$$D_a^x = \left[D_{eff} \left(\frac{M_a M_v}{M_g RT} \right) \frac{\partial P_v}{\partial X} \right] = D_{eff} \frac{M_a M_v P_v}{RT(M_a P_g - P_v) + M_v P_v} \frac{\partial P_v}{\partial X} = -D_v^x$$

$$D_a^T = \left[D_{eff} \left(\frac{M_a M_v}{M_g RT} \right) \frac{\partial P_v}{\partial T} \right] = D_{eff} \frac{M_a M_v P_v}{RT(M_a P_g - P_v) + M_v P_v} \frac{\partial P_v}{\partial T} = -D_v^T$$

Équation de conservation

L'équation de conservation de la masse durant le séchage s'écrit de la manière suivante :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -\nabla \cdot \left\{ \frac{1}{\bar{\rho}_s} [(D_v^x + D_b + D_l^x) \nabla X + (D_v^T + D_l^T) \nabla T + (D_v^P + D_l^P) \nabla P] \right\} \quad (V.26)$$

3.3.4 Équation de conservation de la pression totale dans la phase gazeuse

L'équation de conservation de la pression totale dans la phase gazeuse est dérivée de l'équation de conservation de la masse pour la phase gazeuse inerte (air sec) en régime transitoire. Deux hypothèses sont prises en compte (Couture, 1995) : (1) La phase gazeuse, constituée d'un mélange d'air sec et de vapeur d'eau, se comporte comme un gaz idéal. (2) Il y a continuité dans la phase liquide jusqu'au point de saturation des fibres. Par conséquent, l'équation de conservation pour l'air sec peut s'exprimer comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_g \bar{\rho}_a) + \nabla \cdot (\bar{\rho}_a \bar{V}_a) = 0 \quad (\text{V.27})$$

Étant donné que la pression de la phase gazeuse est la somme de la pression de l'air et de la pression de la vapeur, nous obtenons l'égalité suivante :

$$P_g = P_v + P_a \quad (\text{V.28})$$

$$P_v(X, T) = a_w(X) P_{vsat}(T) \quad (\text{V.29})$$

Et en supposant que la phase gazeuse est un gaz idéal, nous obtenons :

$$\rho_a = \frac{M_a}{RT} P_a \ll == \gg P_a = \frac{RT}{M_a} \rho_a \quad (\text{V.30})$$

En introduisant la relation de saturation S dans l'équation (V.22), nous obtenons :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_g \frac{M_a}{RT} P_a) + \nabla \cdot (\bar{\rho}_a \bar{V}_a) = 0 \ll == \gg \frac{\varepsilon M_a}{R} \frac{\partial}{\partial t} (\frac{(1-S)P_a}{T}) + \nabla \cdot (\bar{\rho}_a \bar{V}_a) = 0 \quad (\text{V.31})$$

Après un certain nombre de développements des relations discutées ci-dessus, l'équation de conservation de la pression totale dans la phase gazeuse se réduit à l'expression suivante :

$$\gamma_1 \frac{\partial P_g}{\partial t} + \gamma_2 \frac{\partial X}{\partial t} + \gamma_3 \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot (D_a^x \nabla X + D_a^P \nabla P_g + D_a^T \nabla T) \quad (\text{V.32})$$

Avec :

$$\gamma_1 = \frac{\varepsilon M_a (1 - S)}{RT}$$

$$\gamma_2 = \left[\frac{\varepsilon M_a (1 - S)}{RT} \right] \left[\frac{\rho_s (P_v - P_g)}{\varepsilon \rho_l (1 - S)} - \frac{\partial P_v}{\partial X} \right]$$

$$\gamma_3 = \left[\frac{\varepsilon M_a (1 - S)}{RT} \right] \left[\frac{P_v - P_g}{RT} - \frac{\partial P_v}{\partial T} \right]$$

3.4 Conditions initiales et aux limites

3.4.1 Conditions initiales

Les conditions initiales adoptées dans notre modèle sont les suivantes :

$$\text{À } t=0 : \quad \begin{cases} \vec{E}|_{t=0} = 0 \\ T(x, y)|_{t=0} = T0 \\ X(x, y)|_{t=0} = X0 \\ P(x, y)|_{t=0} = P_{atm} \end{cases} \quad (\text{V.33})$$

3.4.2 Conditions aux limites

Les parois du four et du guide d'ondes ont été considérées comme des conducteurs électriques parfaits (PEC). Par conséquent, la composante tangentielle du champ électrique à ces limites est donnée par :

$$\vec{E} \times \vec{n} = 0 \quad (\text{V.34})$$

Conditions aux limites (CL) pour le transfert de chaleur et de masse aux faces d'échange ($x=0$ et $x=e$) de l'échantillon de bois :

$$\text{Condition de Dirichlet} \quad P_g = P_{atm} \quad (\text{V.35})$$

D'après la théorie de la couche limite, le flux de chaleur par unité de masse est :

$$Q = h_t(T_{surf} - T_{inf}) + h_m \rho_s (C_{surf} - C_{inf}) \Delta H_v \quad (\text{V.36})$$

h_t est le coefficient de transfert de chaleur ($\text{W/m}^2\text{K}$), qui dépend de l'épaisseur de la couche limite, ΔH_v est la chaleur latente de vaporisation (J/kg), C_{surf} est le facteur de transport d'eau à la surface de l'échantillon, C_{inf} est la fraction massique de vapeur d'eau à l'extérieur de la couche limite, T_{inf} est la température de l'environnement en dehors de la couche limite.

Flux massique

$$(\bar{\rho}_l \bar{V}_l + \bar{\rho}_v \bar{V}_v + \bar{\rho}_b \bar{V}_b) \cdot n = h_m (C_{surf} - C_{inf}) \quad (\text{V.37})$$

h_m est le coefficient de transfert de masse (m/s) :

$$C_{surf} = \frac{x_{surf}}{1+x_{surf}} \quad (\text{V.38})$$

4 PARAMÈTRES ET PROPRIÉTÉS

Tableau V.1 Propriétés thermo-physiques utilisées dans le modèle.

Propriétés du bois	Values et corrélations
Masse volumique anhydre	$\rho_s = 650 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
Masse volumique d'eau	$\rho_l = 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
Porosité	0,35
Teneur en eau initiale	$X_{ini} = 0,62$
Température initiale	293,15 [K]
Chaleur spécifique du solide	1400 [J/kg.K]
Chaleur spécifique du liquide	4184 [J/kg.K]
Conductivité thermique	$\lambda = 0,24 + 0,13 * X \text{ [W/mK]}$
Point de saturation des fibres	$X_{PFS} = 0,345$
Pression de saturation	$P_{vsat} = \exp\left(\frac{(25,5058 - 5204,9)}{T}\right) \text{ [Pa]}$
Pression Capillaire	$P_c = 1,36410 * 10^5 * \delta * (X_{liquide} + 1,2 * 10^{-4})^{-63} \text{ [Pa]}$ $\delta(T) = (77,5 - 0,185 * (T - 273,15)) * 10^{-3} \text{ [N/m]}$
Chaleur spécifique du bois	$\rho C_p = \rho_s * (1113 + 4,85 * T + 4185 * X) \text{ [J/kg.K]}$
Perméabilité relative liquide	$K_{rl} = S^3$
Perméabilité relative gaz	$K_{rg} = 1 + (2 * S - 3) * S^3$
Coefficient de diffusion de vapeur	$D_{eff} = B(m) * \left(8,92 * 10^{-5} * \frac{T^{1,81}}{P_g}\right) \text{ [m}^2\text{/s]}$ $B(m) = \varepsilon^6$
Diffusivité de l'eau liée	$D_b = \begin{cases} 0 & \text{si } X > X_{PFS} \\ \frac{1}{\rho_s} \exp\left[\left((11,954 - \frac{2590,1}{T}) * W - \frac{1046,63}{T} - 12,35\right)\right] & \text{sinon} \end{cases}$
Chaleur de vaporisation de l'eau liquide	$H_{vap} = (2503 - 2,46 * (T - 273)) * 10^3$
Chaleur de sorption	$H_{sorp} = 0,4 * H_{vap} \left(\frac{X_{PFS} - X}{X_{PFS}}\right) * 10^3$
Activité de l'eau	$a_w = \begin{cases} 1 & \text{si } X < X_{PFS} \\ 1 - \exp\left[\left(-0,76427 - \frac{X}{X_{PFS}} - 3,6787\left(\frac{X}{X_{PFS}}\right)^2\right)\right] & \text{si } X > X_{PFS} \end{cases}$
Fraction massique de vapeur	$X_{surf} = \frac{0,622 * a_w * P_{vsat}}{P_{atm} - a_w * P_{vsat}}$
Coefficient de transfert de masse	$h_m = 7 * 10^{-3} \text{ [m/s]}$
Coefficient de transfert de chaleur	$h_t = 10 \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K)]}$

Les propriétés hydrothermiques et les corrélations dérivées expérimentalement ont été utilisées dans la simulation. D'autres quantités, difficiles à déterminer expérimentalement avec les moyens disponibles au laboratoire LETTM, ont été extraites de la littérature (Tableau.V.1).

4.1 Intermittence

La méthode proposée dans cette étude repose sur un procédé de séchage intermittent, en appliquant l'intermittence au niveau de la puissance micro-ondes uniquement. Ce processus de séchage intermittent est basé sur un cycle "On-Off", où la phase "On" correspond au séchage par micro-ondes, et la phase "Off" à l'absence de séchage pour une durée définie de 300 secondes "On" suivies de 300 secondes "Off". Une fonction d'intermittence a été développée dans COMSOL Multiphysics en combinant une fonction rectangulaire avec une fonction analytique. L'expression mathématique de la fonction d'intermittence est présentée par :

$$f(x) = \begin{cases} 1 & t \leq n \leq t + 300 \\ 0 & t + 300 \leq n \leq t + 600 \end{cases} \quad (V.39)$$

Avec $n = 0, 300, 600, 900, \dots, 2700$.

4.2 Résolution numérique

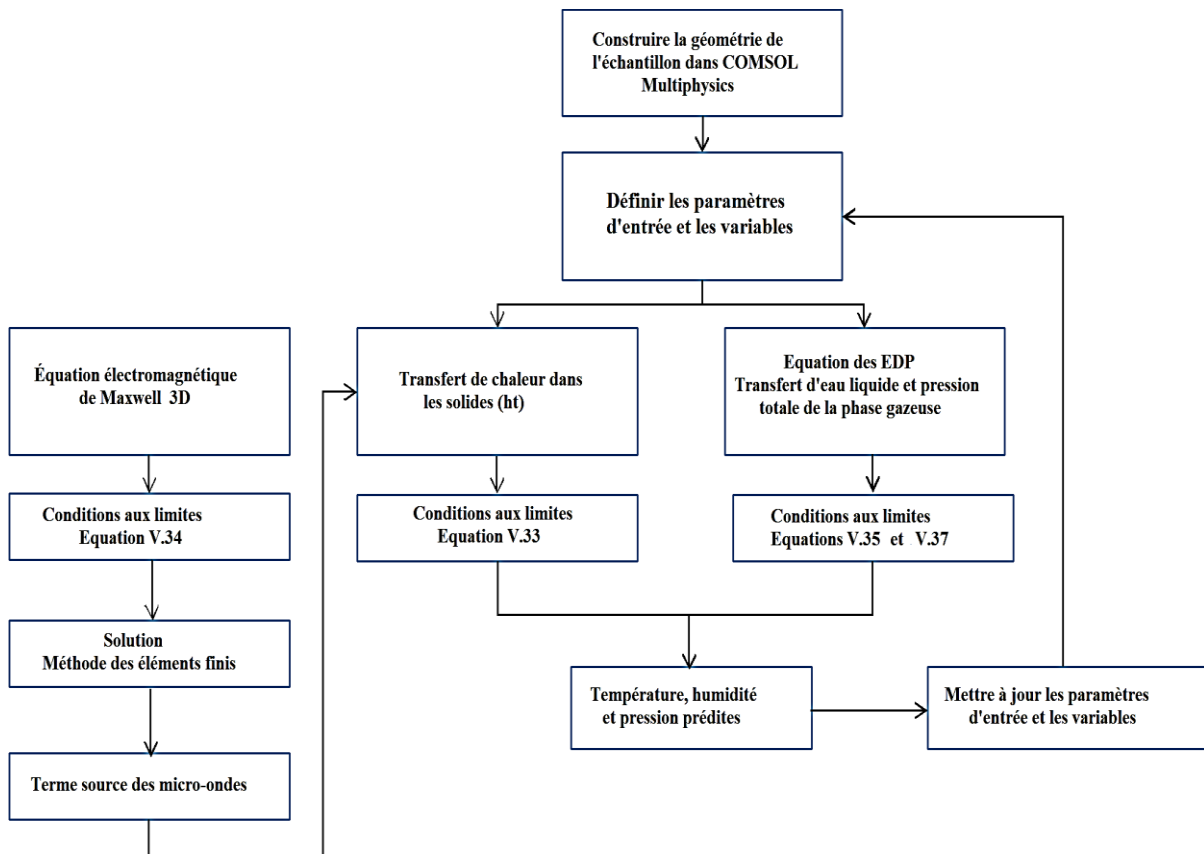


Figure V.2 Stratégie de la modélisation dans COMSOL Multiphysics.

Le logiciel de simulation d'ingénierie COMSOL Multiphysics 6.1 a été utilisé pour résoudre ces équations. Étant donné la complexité du problème étudié, la Figure V.2 ci-dessous illustre le schéma de la procédure de simulation.

5 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

5.1 Validation du modèle

Pour évaluer la précision du modèle, une comparaison a été réalisée entre les résultats expérimentaux et les simulations numériques pour le séchage intermittent par micro-ondes des planches de bois d'eucalyptus. La procédure expérimentale, la dimension et la forme géométrique des pièces du bois d'eucalyptus globulus sont bien détaillés au chapitre III.

Les propriétés hydrothermiques et les corrélations dérivées expérimentalement ont été utilisées dans la simulation. D'autres quantités, difficiles à déterminer expérimentalement avec les moyens disponibles au laboratoire LETTM, ont été extraites de la littérature, telles que la pression capillaire, la viscosité des phases liquide et gazeuse, ainsi que la porosité (Tableau.V.1).

Pour une validation plus précise, des mesures de température ont été effectuées dans une zone située approximativement à 2,5 cm sous la surface de l'échantillon. La position exacte de cette zone est estimée en raison des petites dimensions de l'échantillon et de l'épaisseur de la sonde à fibre optique. Notre modèle prédit avec précision les variations de la teneur moyenne en eau et de la température du matériau pendant le séchage par micro-ondes (Figure V.3 et Figure V.4), démontrant ainsi sa validité et sa capacité à anticiper le comportement hydrothermique du bois d'eucalyptus. Les paramètres de fonctionnement des tests de séchage sont détaillés dans le Tableau V.1.

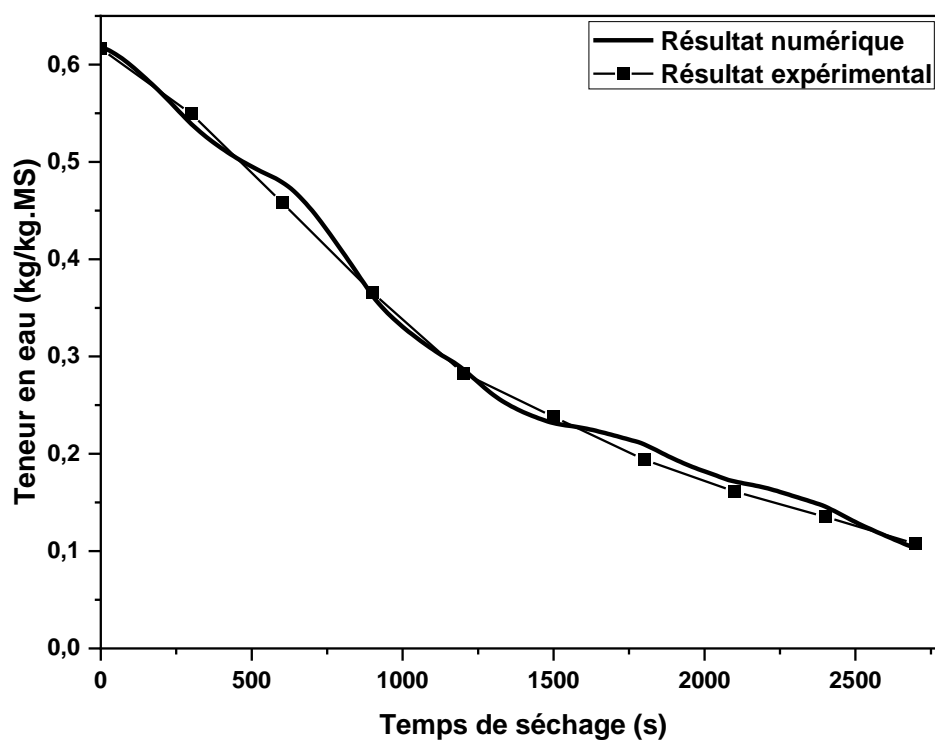


Figure V.3 Validation du modèle mathématique par l'expérimentation - Teneur en eau.

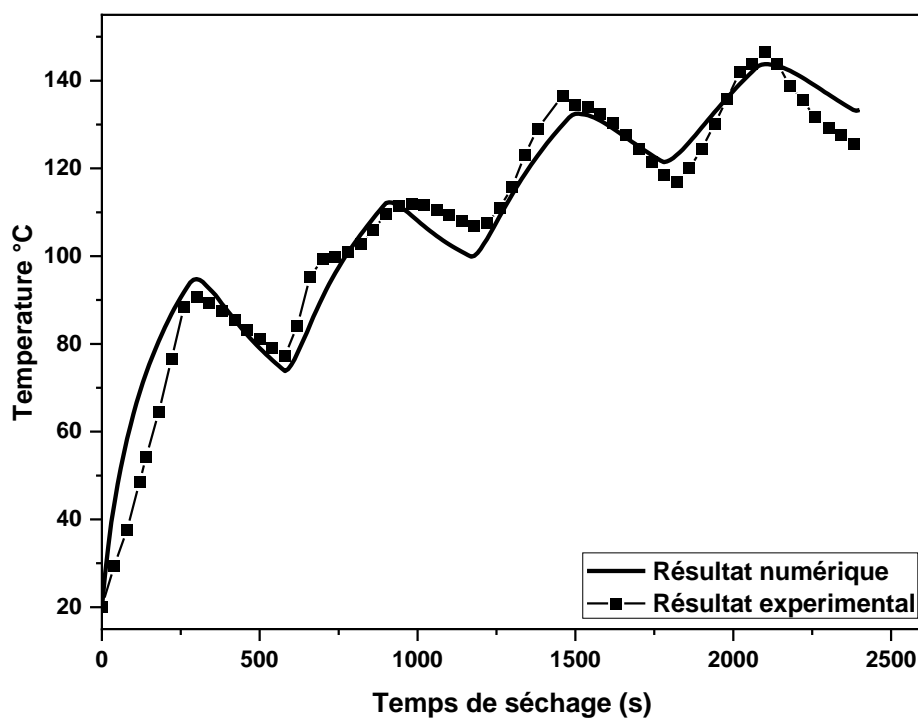


Figure V.4 Validation du modèle mathématique par l'expérimentation - Température.

5.2 Effet de la puissance des micro-ondes sur l'évolution de la température dans le bois

La distribution de la température dans la pièce de bois sous séchage intermittent aux puissances de 300, 500 et 800 Watts est présentée dans les figures V.5.a, V.5.b, et V.5.c respectivement. Ces figures montrent que la température la plus élevée correspond à la puissance la plus forte, soit 800 W, pouvant atteindre jusqu'à 150 °C. Pour les niveaux de puissance de 500 et 300 Watts, les températures en fin de séchage sont respectivement de 130 °C et 100 °C. Les régions de surface se dessèchent plus rapidement que les zones internes en raison de l'augmentation rapide de température. Pendant le séchage, la distribution de température est toujours plus élevée au centre de la pièce de bois qu'à la surface. Ce comportement s'explique par une élévation plus rapide de la température au cœur du matériau sous l'effet des micro-ondes, entraînant un séchage volumétrique (Shen *et al.*, 2018).

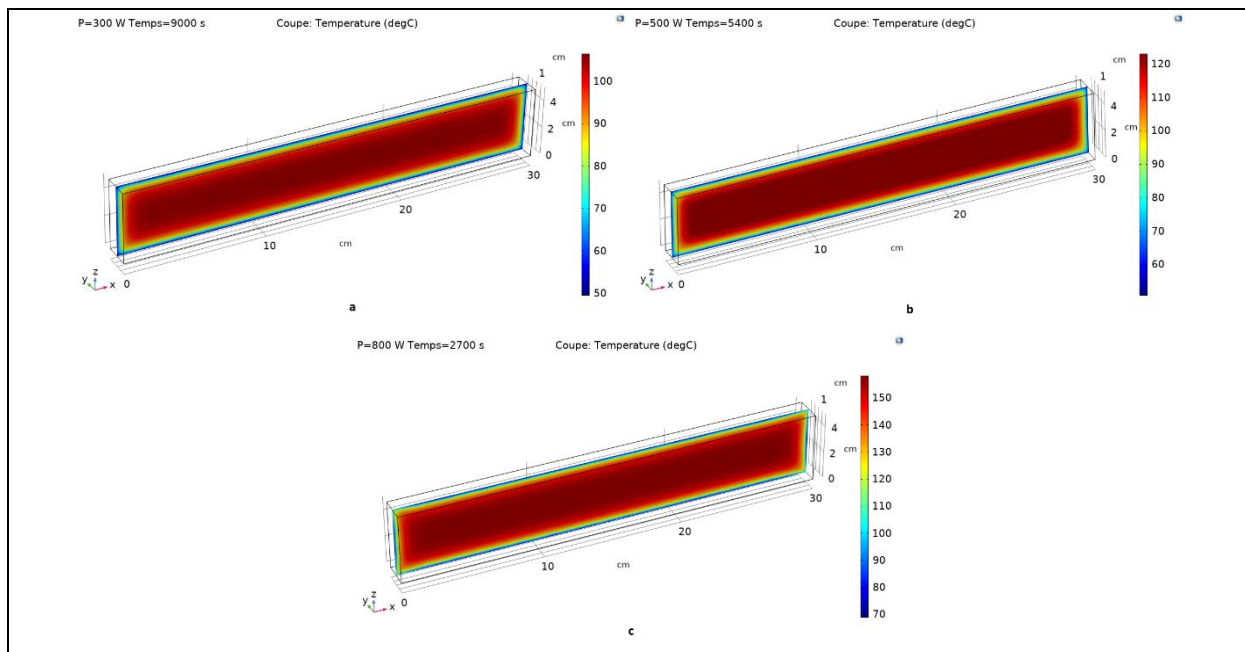


Figure V.5 Profil de température du bois à la fin du séchage intermittent pour trois niveaux de puissance.

5.3 Influence de la puissance des micro-ondes sur l'évolution de la teneur en humidité et de la pression interne de gaz dans le bois.

Les figures V.6.a, V.6.b, et V.6.c présentent le profil spatio-temporel de la teneur en eau selon la direction radiale des échantillons de bois durant le séchage à trois niveaux de puissance 300, 500 et 800 Watts respectivement. Ces figures montrent que la teneur en eau est initialement plus élevée près du centre du bois et diminue vers les surfaces externes au fur et à mesure de l'avancement du séchage. En raison des caractéristiques de séchage volumétrique du séchage

par micro-ondes, l'eau au centre est dirigée vers la surface. À des puissances plus élevées (500 W et 800 W), cette migration d'eau se produit plus rapidement, ce qui entraîne un gradient d'eau plus prononcé entre les régions intérieure et de surface.

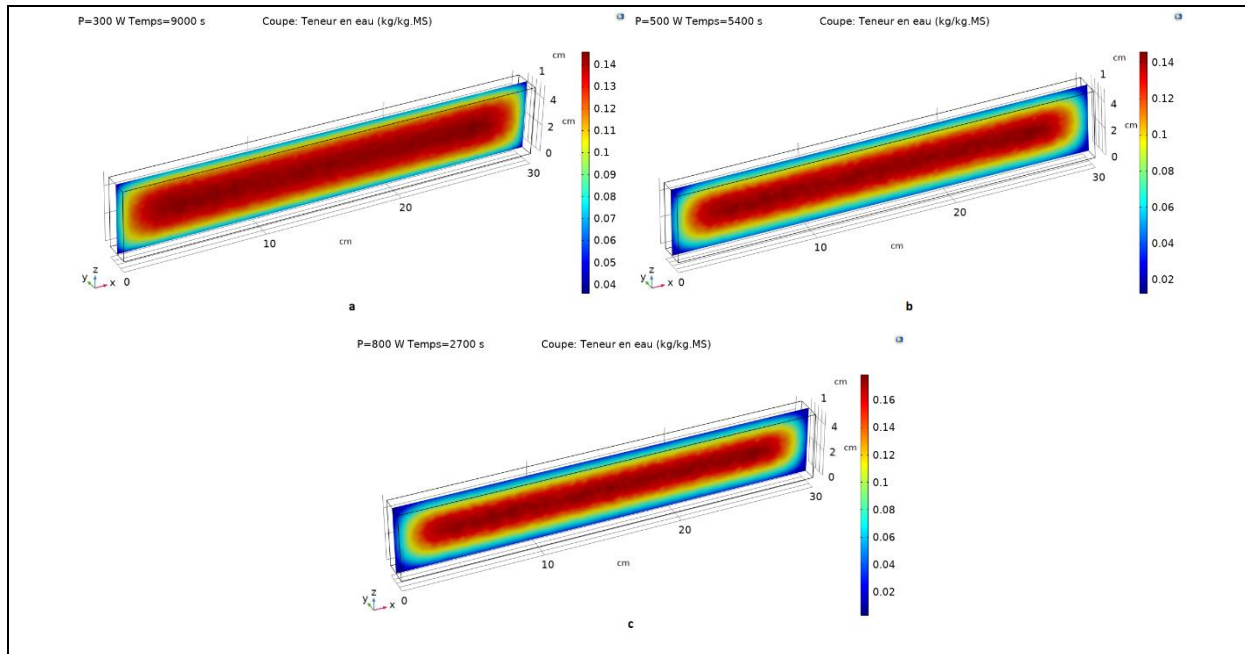


Figure V.6 Profil de la teneur en eau dans le bois après séchage intermittent à trois niveaux de puissance de micro-ondes.

La distribution de la pression interne de la phase gazeuse dans les pièces de bois à différents moments du séchage est illustrée dans les Figure V.7-V.9 à différentes puissances de micro-ondes. Au début du séchage, la distribution de pression est quasiment uniforme dans tout l'échantillon. À mesure que le séchage progresse, la pression augmente de manière significative, atteignant son pic au centre de l'échantillon en raison du séchage volumétrique rapide induit par l'énergie des micro-ondes. Cela est principalement dû à l'augmentation de température, qui accélère la formation et le déplacement de la vapeur d'eau. La pression la plus élevée est observée au centre, où l'accumulation de chaleur et de vapeur est la plus intense. À mesure que le séchage s'achève et que la teneur en eau s'approche de l'équilibre hygrique, la pression gazeuse se redistribue de façon plus uniforme dans l'échantillon, atteignant progressivement la pression atmosphérique.

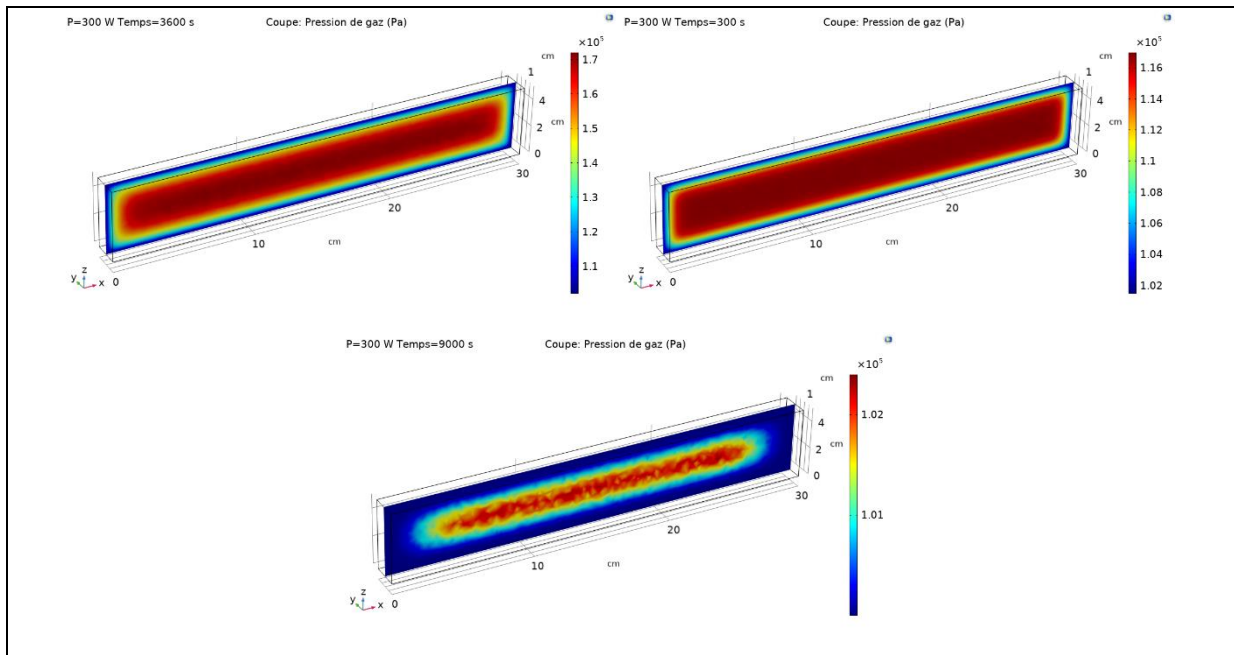
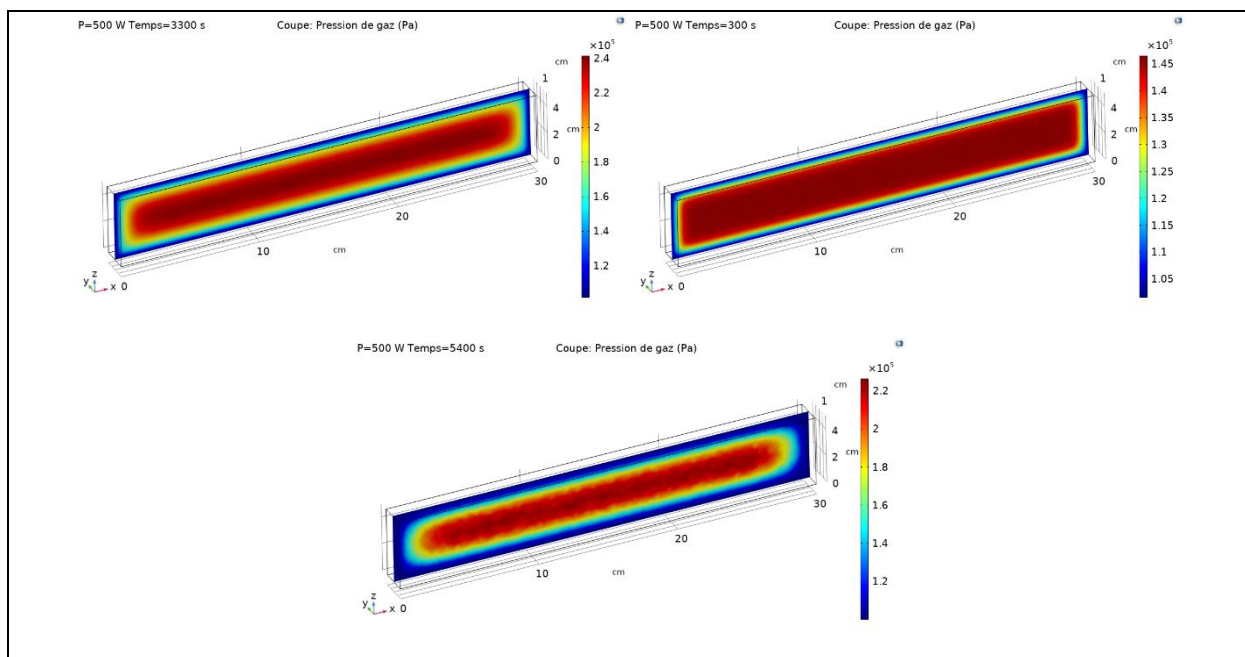


Figure V.7 Évolution de la pression relative interne de la phase gazeuse après 300, 6300 et 9000 secondes de séchage intermittent à P=300W.



Figures V.8 Évolution de la pression relative interne de la phase gazeuse après 300, 3300 et 5400 secondes de séchage intermittent à P=500W.

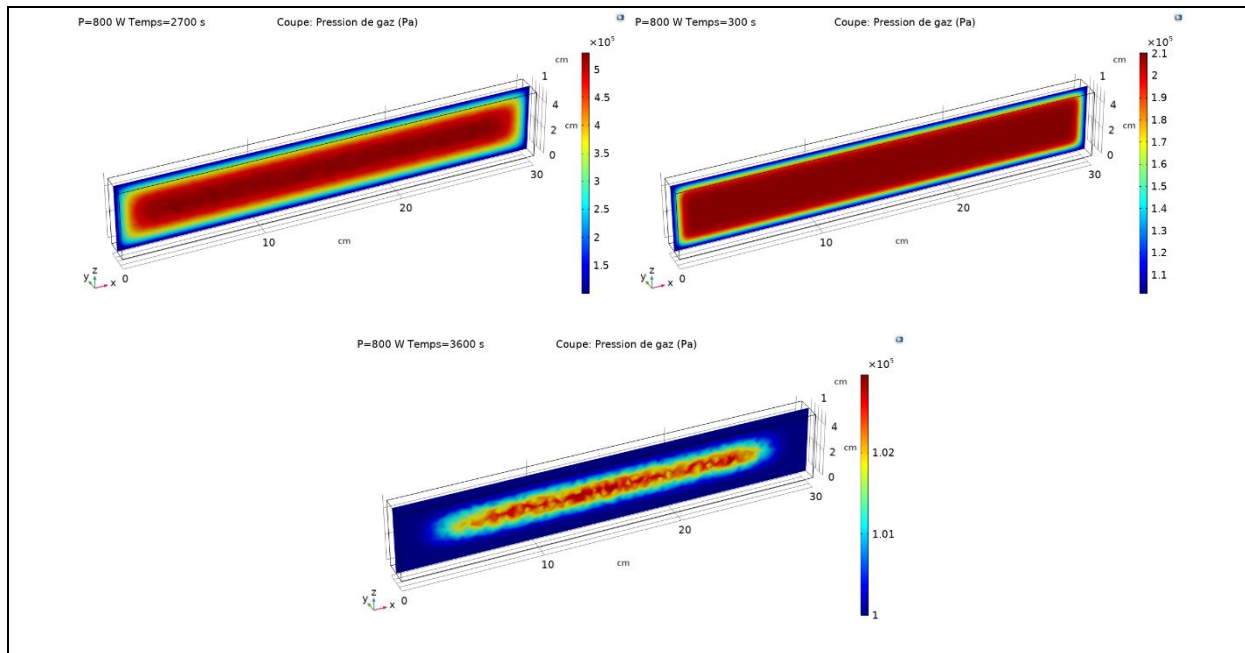


Figure V.9 Évolution de la pression relative interne de la phase gazeuse après 300, 2700 et 3600 secondes de séchage intermittent à P=800W.

5.4 Distribution de la teneur en eau et de la température à travers l'épaisseur du bois

Les Figures V.10, V.11, et V.12 montrent l'évolution spatio-temporelle de la température, de la pression de la phase gazeuse, de la teneur en eau et de la phase gazeuse dans l'échantillon de bois à différents moments du séchage par micro-ondes. L'analyse de ces figures montre qu'au début du séchage, la pression de la phase gazeuse, la température et la teneur en eau sont uniformes dans toute la masse de l'échantillon. Après quelques minutes de séchage, la pression interne de la phase gazeuse augmente et est plus élevée au centre du bois qu'à la surface. La teneur en eau diminue légèrement et est plus faible à la surface du bois qu'au centre. La température augmente dans toute la masse de l'échantillon et est plus élevée au centre qu'à la surface. La tendance parabolique est clairement observée pour les trois grandeurs simulées. Ce comportement de séchage correspond à la phase de chauffage du produit.

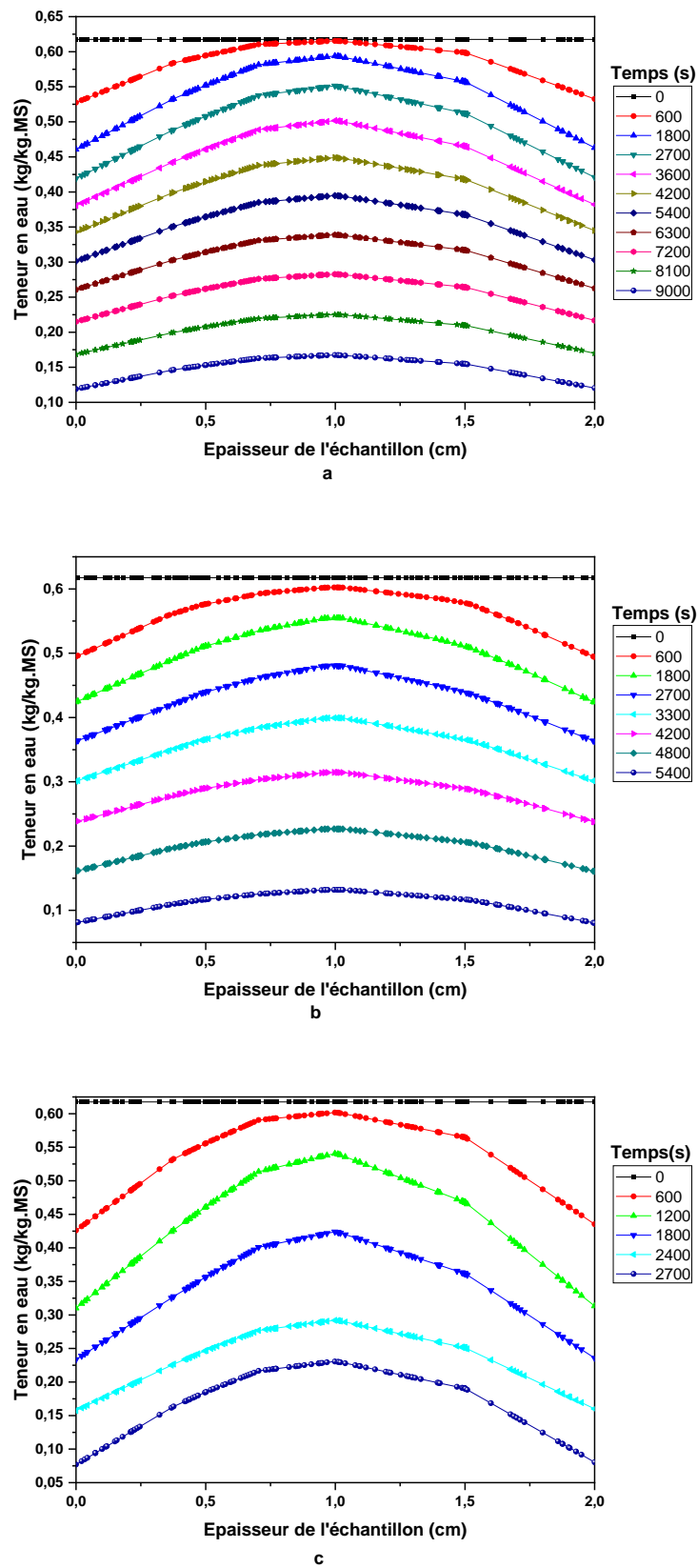


Figure V.10 Profil de la teneur en eau durant le séchage par micro-ondes intermittent à trois niveaux de puissance.

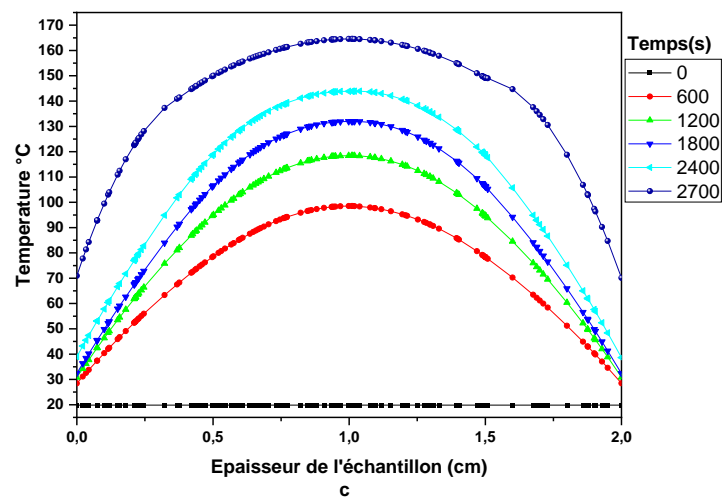
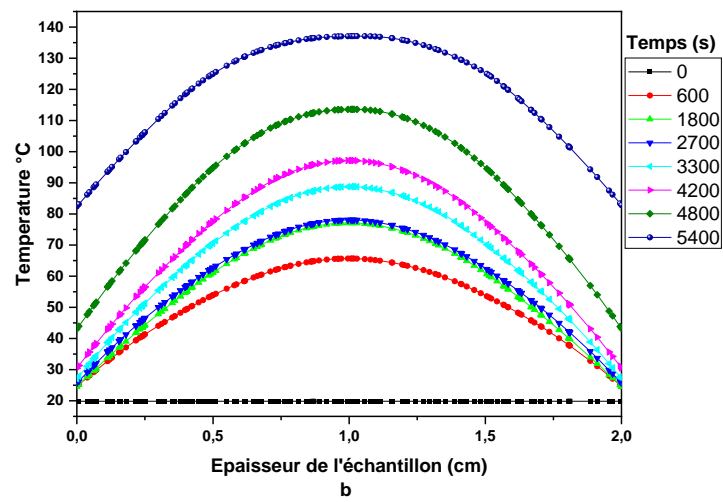
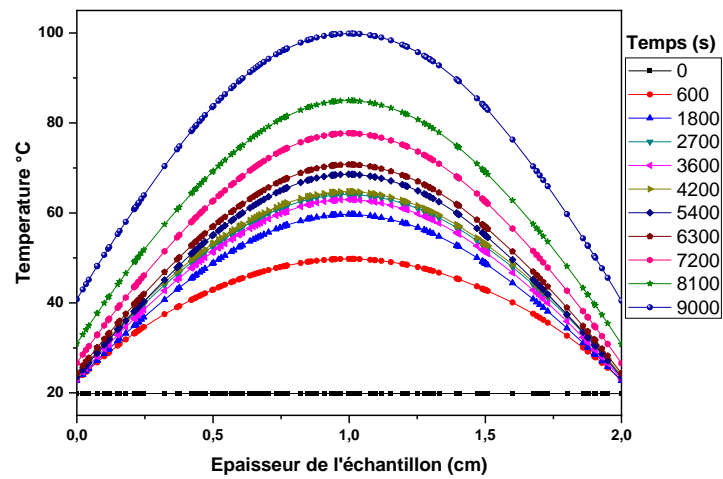


Figure V.11 Profil de température durant le séchage par micro-ondes intermittent à trois niveaux de puissance.

Dans les Figures V.10.a, V.10.b, et V.10.c, la distribution de la teneur en eau à travers l'épaisseur de l'échantillon de bois est présentée pour des puissances de 300, 500 et 800W respectivement. À partir de la Figure V.11, on observe que la température au cœur de l'échantillon de bois est initialement uniforme pour les trois puissances de séchage. Après 600 secondes de séchage, un gradient de température significatif apparaît entre le centre et la surface des échantillons. Le gradient de température le plus élevé est observé à une puissance de 800 W, avec une différence d'environ 50 °C, suivi de 35 °C pour 500 W et de 20 °C pour une puissance de 300 W. Ce gradient continue d'augmenter à mesure que le séchage progresse. La fin du séchage est déterminée par le temps nécessaire pour atteindre la teneur en eau d'équilibre, fixée à 12 %. Cet équilibre est atteint après 2700 secondes de séchage intermittent à 800 W, 5400 secondes pour une puissance de 500 W, et 9000 secondes pour une puissance de 300 W.

Au début du séchage, la pression du gaz (principalement de la vapeur d'eau) est uniforme dans tout l'échantillon de bois, comme le montre la Figure V.12. Cela signifie que la vapeur d'eau est distribuée de manière homogène, sans gradient de pression significatif. À mesure que le séchage progresse, la chaleur appliquée (via différentes puissances de séchage, par exemple 300 W, 500 W et 800 W) provoque l'évaporation de l'eau. Cette évaporation commence d'abord à la surface. La vapeur d'eau migre alors vers l'extérieur, créant un gradient de pression entre le centre (où la pression reste plus élevée car l'eau n'a pas encore évaporé) et la surface (où la pression est plus faible car l'eau a déjà évaporé).

Le gradient de pression continue d'augmenter à mesure que le séchage se poursuit, l'évaporation de l'eau se prolongeant du centre vers la surface. La migration de la vapeur d'eau vers la surface est influencée par le gradient de pression : la vapeur tend à se déplacer des zones à haute pression (centre) vers les zones à basse pression (surface). La valeur maximale de la pression de vapeur d'eau est atteinte au centre de l'échantillon pendant le séchage intermittent à une puissance incidente de 800 W, atteignant 5,5 kPa après 2700 secondes. Pour le séchage à 500 W, la pression maximale est de 2 kPa après 3300 secondes, et pour 300 W, elle est de 1,7 kPa, atteinte après 6300 secondes de séchage.

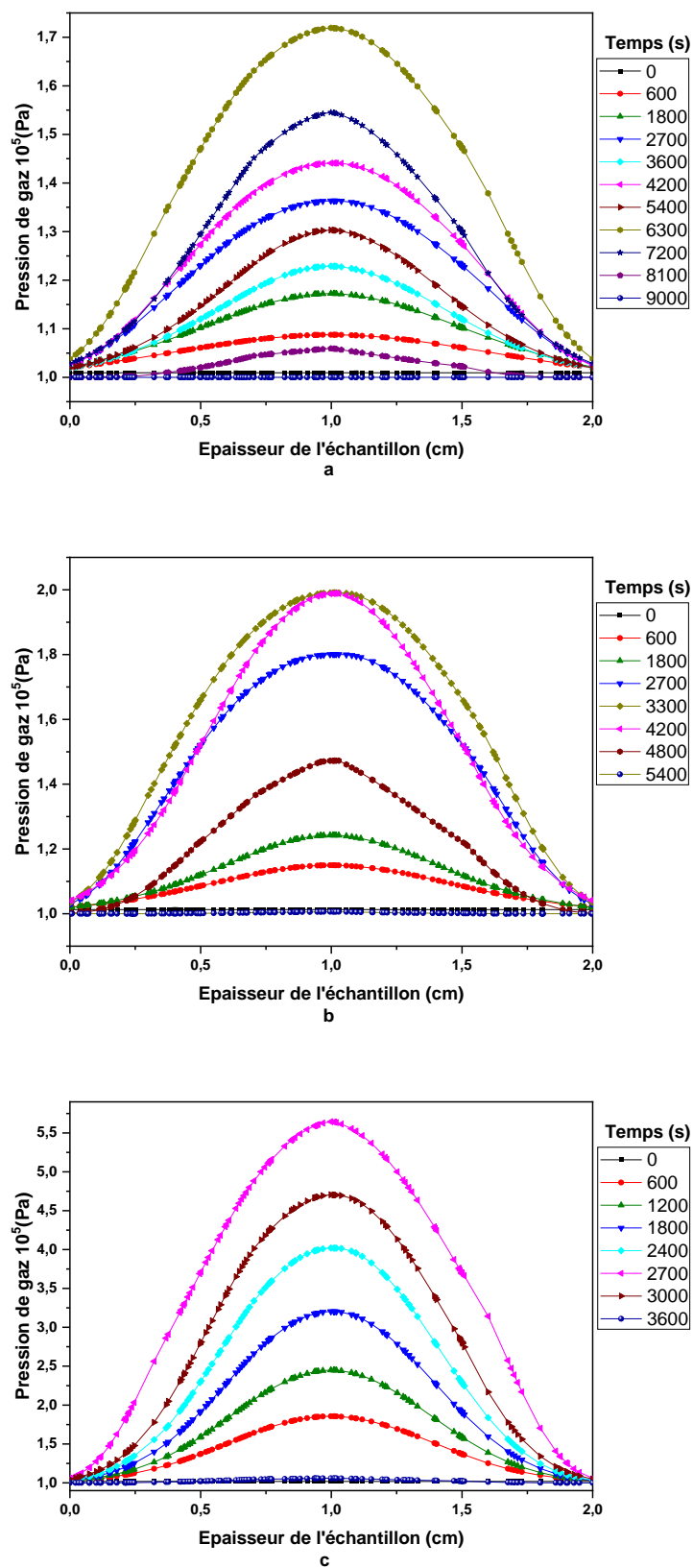


Figure V.12 Profil de pression durant le séchage par micro-ondes intermittent à trois niveaux de puissance.

5.5 Évolution de la température, de la teneur en eau et de la pression en fonction du temps de séchage pour différents niveaux de puissance.

Les résultats illustrés dans les Figures V.13-V.15 montrent que des niveaux de puissance micro-ondes plus élevés réduisent le temps de séchage tout en augmentant simultanément la température du cœur et la pression interne du gaz. Ce phénomène s'explique par le fait qu'une augmentation de la puissance du champ électromagnétique excite significativement les molécules polaires. L'agitation moléculaire qui en résulte accroît les collisions intermoléculaires, ce qui provoque un échauffement considérable du matériau. Dans les systèmes micro-ondes et diélectriques, la génération de chaleur interne stimule principalement le transfert de masse par le gradient de pression créé par la vaporisation rapide à l'intérieur de la substance.

Les Figures V.13, V.14 et V.15 présentent les courbes typiques représentant les variations de la température au cœur, de la teneur moyenne en eau et de la pression interne du gaz au cours du temps de séchage par micro-ondes intermittent. La montée en température est attribuée à l'accumulation excessive de chaleur dans l'échantillon de bois. Un comportement similaire a été observé dans des études portant sur des lamelles de bois (Du, Wang and Cai, 2005), le béton léger (Constant, Moyene and Perre, 1996), et le pin gris (Ouertani, 2014).

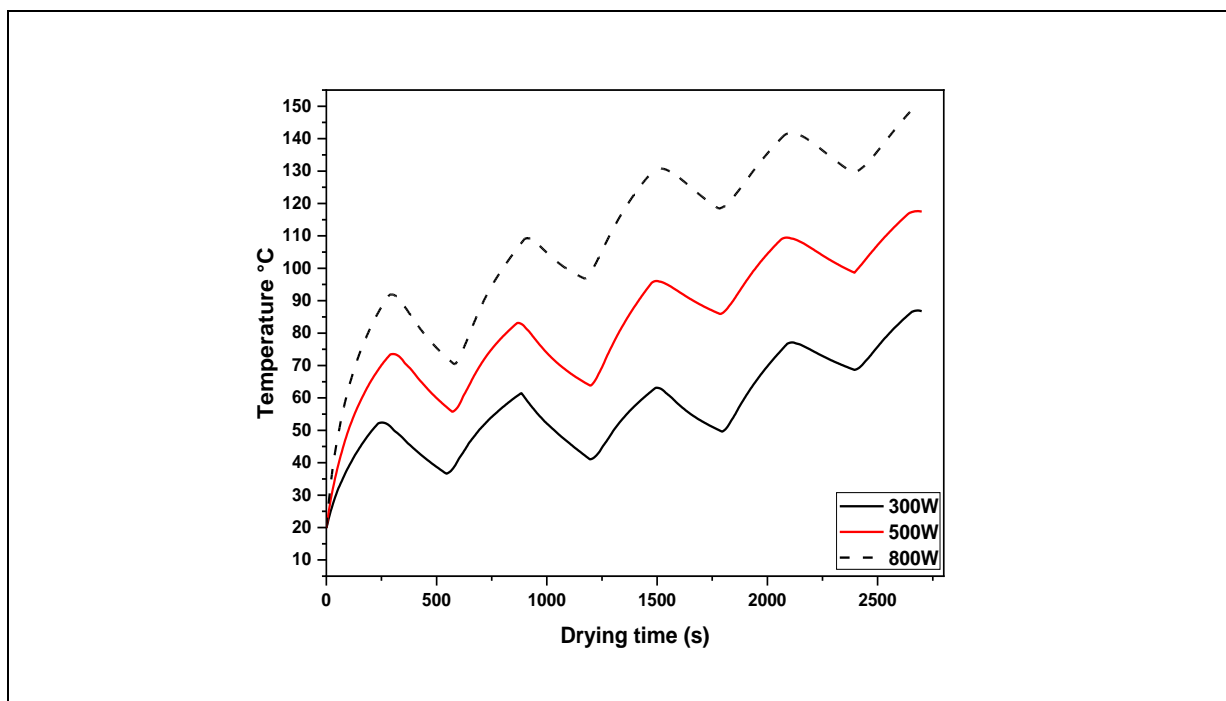


Figure V.13 Effet de la puissance incidente des micro-ondes sur l'évolution de la température interne du bois.

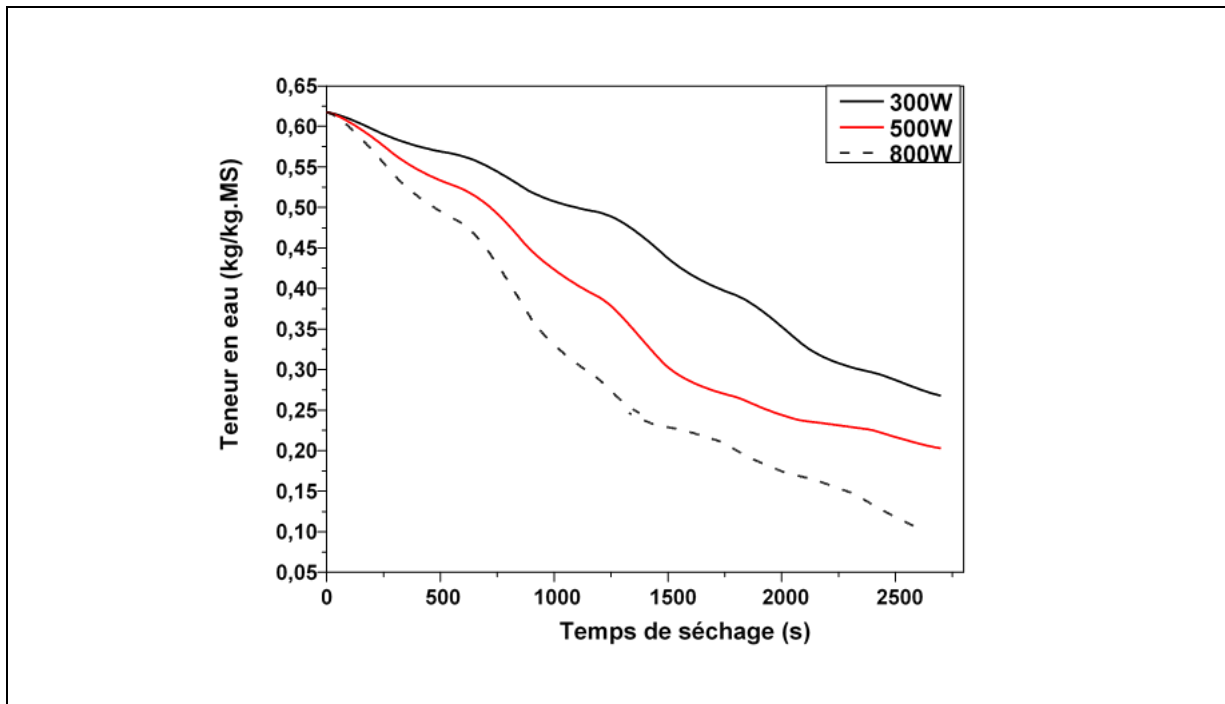


Figure V.14 Effet de la puissance incidente des micro-ondes sur l'évolution de la teneur moyenne en eau du bois.

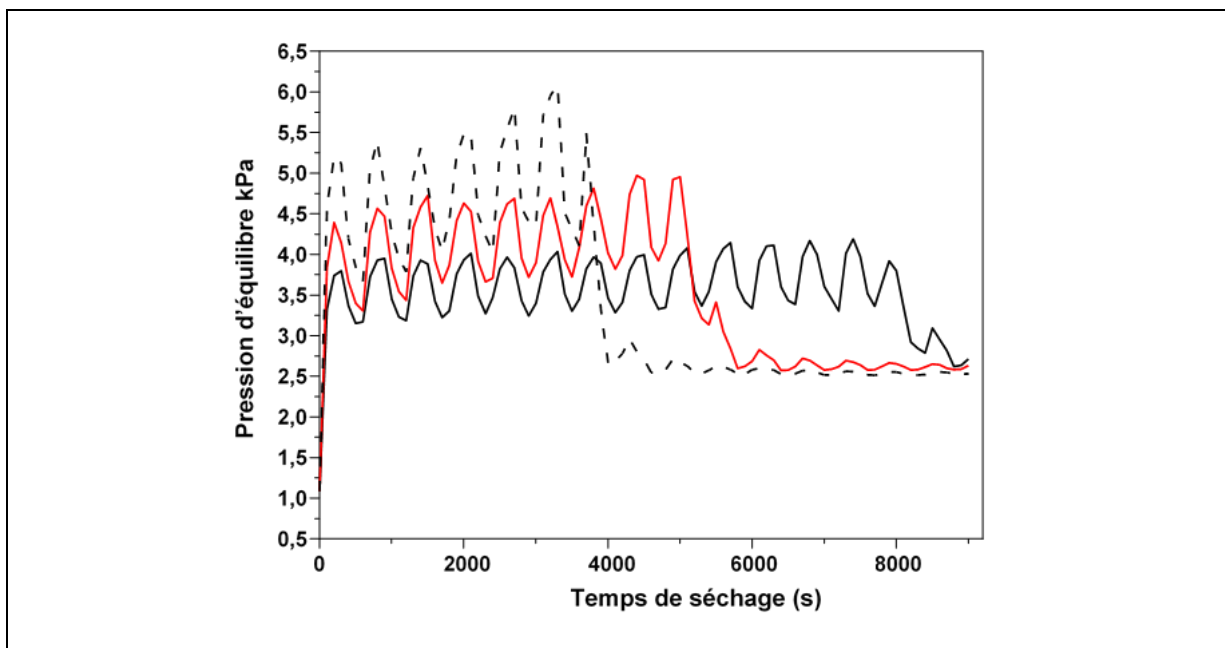


Figure V.15 Influence de la puissance incidente des micro-ondes sur l'évolution de la pression du gaz dans le bois.

6 CONCLUSION

Théoriquement, un modèle mathématique de séchage de type capillaire-poreux a été développé pour décrire les transferts de chaleur et de masse dans les milieux poreux hygroscopiques. Les transferts de masse sont générés par la migration capillaire de la phase liquide, la diffusion-convection de la phase gazeuse et la diffusion de l'eau liée. Les transferts thermiques intègrent la conduction, la chaleur latente de vaporisation et la chaleur de sorption différentielle. La résolution numérique du système d'équations est effectuée à l'aide de la méthode des éléments finis avec le solveur 'COMSOL Multiphysics'. Des simulations 3D de séchage par micro-ondes intermittent sont réalisées pour déterminer les profils spatio-temporels de la teneur en eau, de la température et de la pression de la phase gazeuse interne dans le matériau. Les résultats expérimentaux obtenus lors du séchage du bois d'eucalyptus globulus algérien ont été utilisés pour valider le modèle de transfert hydrothermique. La validation du modèle a été effectuée à partir de nos expériences de séchage et appliquée à un échantillon de bois d'eucalyptus globulus de forme parallélépipédique.

CONCLUSION GENERALE

Les travaux de thèse présentés dans ce manuscrit s'inscrivent dans une collaboration entre l'École nationale d'ingénierie et technologies d'Annaba (ENSTI) au laboratoire LTSE et l'équipe de séchage du Laboratoire d'Énergétique et des Transferts Thermiques et Massiques (LETTM) de la Faculté des Sciences de Tunis. Cette collaboration a permis de mettre en œuvre une approche intégrée pour l'étude du séchage de matériaux naturels déformables, en combinant des analyses expérimentales rigoureuses à une modélisation numérique avancée.

La première partie de cette recherche a porté sur les feuilles de myrte tunisiennes. Une étude expérimentale de séchage convectif à l'air chaud, conduite à différentes températures (de 40 à 60 °C), a permis de caractériser les cinétiques de séchage et de mieux comprendre les transferts d'humidité dans ce type de matériau végétal. L'exploitation des courbes expérimentales a conduit à la détermination de paramètres thermophysiques essentiels tels que la diffusivité effective, l'énergie d'activation et le facteur de diffusion. Une modélisation mathématique, fondée sur l'approche des pentes, a ensuite été développée afin de décrire avec précision le comportement de séchage des feuilles et d'optimiser les conditions opératoires. Ce travail a posé les bases méthodologiques de l'étude du séchage de produits déformables, en particulier les matériaux à géométrie mince et structure sensible.

Dans un second temps, l'attention s'est portée sur le bois d'eucalyptus, matériau dense et anisotrope, dont le séchage présente des défis majeurs en raison de sa forte teneur en eau initiale et des risques de déformations internes. Le recours au séchage par micro-ondes a permis d'évaluer l'impact de différents régimes de puissance et de fonctionnement sur la cinétique de séchage et la qualité du produit final. Les résultats ont mis en évidence l'efficacité du traitement par micro-ondes intermittent, en particulier à 500 W, qui permet un meilleur contrôle de la répartition thermique et de la teneur en eau, tout en limitant l'apparition de fissures ou de contraintes internes. Les essais mécaniques réalisés sur les échantillons séchés ont confirmé que ces conditions optimisées favorisent la préservation des propriétés mécaniques du bois, répondant ainsi aux exigences industrielles en matière de qualité et de performance.

Enfin, une modélisation tridimensionnelle a été élaborée sous COMSOL Multiphysics afin de simuler les transferts couplés de chaleur, d'humidité et de pression au sein du bois pendant le séchage par micro-ondes. Ce modèle, validé par les données expérimentales, offre une lecture

CONCLUSION GENERALE

précise des phénomènes internes et permet d'ajuster les paramètres du procédé pour optimiser à la fois l'efficacité énergétique et la qualité du produit. Il constitue également une base pour l'extension de cette démarche à d'autres matériaux naturels déformables soumis à des traitements thermiques.

En conclusion, cette recherche apporte des réponses aux défis du séchage des produits déformables en développant des procédés de séchage innovants et en intégrant des approches numériques de modélisation avancée. Les travaux réalisés offrent des perspectives d'applications industrielles qui permettront d'améliorer la qualité et la durabilité des matériaux tout en répondant aux enjeux de productivité et d'économie d'énergie. Les résultats de cette thèse ouvrent également des voies pour des recherches futures, notamment en appliquant les méthodes de séchage et de modélisation développées ici à d'autres matériaux naturels, avec pour objectif de contribuer à une gestion plus durable et plus efficace des ressources dans l'industrie.

Références Bibliographiques :

- Ben Abdelhamid, M. *et al.* (2016) 'Water Sorption Isotherms and Thermodynamic Characteristics of Hardened Cement Paste and Mortar', *Transport in Porous Media*, 113(2), pp. 283–301. doi: 10.1007/s11242-016-0694-y.
- Aksenov, A. A. and Malyukov, S. V. (2020) 'Microwave modification of wood: Determination of mechanical properties of softwood', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 595(1). doi: 10.1088/1755-1315/595/1/012012.
- Aleksic, V. and Knezevic, P. (2014) 'Antimicrobial and antioxidative activity of extracts and essential oils of *Myrtus communis* L.', *Microbiological Research*, 169(4), pp. 240–254. doi: 10.1016/J.MICRES.2013.10.003.
- Almeida, G. (2006) 'Influence de la structure du bois sur ses propriétés physico-mécaniques à des teneurs en humidité élevées', *Département des sciences du bois et de la forêt*, p. 232.
- Azzouz, S. *et al.* (2002) 'Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes', *Journal of Food Engineering*, 55(4), pp. 323–330. doi: 10.1016/S0260-8774(02)00109-7.
- Azzouz, S. *et al.* (2018) 'Mass diffusivity of different species of wood in convective drying', *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(2), pp. 573–582. doi: 10.1007/s00107-017-1212-9.
- Baar, J., Tippner, J. and Rademacher, P. (2015) 'Prediction of mechanical properties - modulus of rupture and modulus of elasticity - of five tropical species by nondestructive methods', *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, 17(2), pp. 239–252. doi: 10.4067/S0718-221X2015005000023.
- Babalis, S. J. and Belessiotis, V. G. (2004) 'Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs', *Journal of Food Engineering*, 65(3), pp. 449–458. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2004.02.005.
- Bahar, R. (2017) *Caractérisation expérimentale et modélisation du comportement hydro-thermique et mécanique au cours du séchage du bois*. Université de Tunis.
- Bahar, R. *et al.* (2017) 'Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of Oak wood (*Quercus robur* and *Quercus canariensis*): optimization of the processing parameters', *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, 53(5), pp. 1541–1552. doi: 10.1007/s00231-016-1916-0.
- Bahar, R. *et al.* (2020) 'Mechanical properties changes in oak (*Quercus canariensis*) and stone pine (*Pinus pinea*) wood subjected to various convective drying conditions', *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24(13), pp. 2117–2129. doi: 10.1080/19648189.2018.1500308.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Balboni, B. M. *et al.* (2018) 'Microwave treatment of Eucalyptus macrorhyncha timber for reducing drying defects and its impact on physical and mechanical wood properties', *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(3), pp. 861–870. doi: 10.1007/s00107-017-1260-1.
- Bedjaoui, M. *et al.* (2023) 'Moisture diffusivity of medicinal and aromatic plants during convective drying by hot air: Myrtle leaves.', *eupeanchemicalbulletin*, 12(10), pp. 2784–2800. doi: 10.48047/ecb/2023.12.10.192.
- Bedjaoui, M. *et al.* (2024) 'Moisture desorption isotherms and thermodynamic properties of eucalyptus globulus wood', *STUDIES IN ENGINEERING AND EXACT SCIENCES*, 5(2), p. e10240. doi: 10.54021/seesv5n2-442.
- Belghit, A., Kouhila, M. and Boutaleb, B. C. (2000) 'Experimental study of drying kinetics by forced convection of aromatic plants', *Energy Conversion and Management*, 41(12), pp. 1303–1321. doi: 10.1016/S0196-8904(99)00162-4.
- Bengono Manga, D. M. *et al.* (2023) 'Influence of the anatomical structure on the moisture sorption and thermodynamic properties of the African tropical woods', *Heat Mass Transfer*, 59, pp. 113–130. doi: <https://doi.org/10.1007/s00231-022-03242-x>.
- Benmakhlouf, N. *et al.* (2017) 'Controlling mechanisms of moisture diffusion in convective drying of leather', *Heat and Mass Transfer*, 53(4), pp. 1237–1245. doi: 10.1007/s00231-016-1900-8.
- Berka-Zougali, B. *et al.* (2010) 'Extraction of essential oils from Algerian myrtle leaves using instant controlled pressure drop technology', *Journal of Chromatography A*, 1217(40), pp. 6134–6142. doi: 10.1016/j.chroma.2010.07.080.
- Bimbenet, J.-J., Gilles, T. and Albert, D. (2002) *Génie des procédés alimentaires des bases aux applications*. Edited by J.-J. B. Gilles Trystram.
- Bouzabata, A. *et al.* (2013) 'Chemical Variability of Algerian Myrtus communis L.', *Chemistry & Biodiversity*, 10(1), pp. 129–137. doi: 10.1002/cbdv.201200150.
- Chen, J. *et al.* (2014) 'Heat and Mass Transport during Microwave Heating of Mashed Potato in Domestic Oven—Model Development, Validation, and Sensitivity Analysis', *Journal of Food Science*, 79(10). doi: 10.1111/1750-3841.12636.
- Chen, J. *et al.* (2016) 'Modeling heat and mass transport during microwave heating of frozen food rotating on a turntable', *Food and Bioproducts Processing*, 99, pp. 116–127. doi: 10.1016/j.fbp.2016.04.009.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Constant, T., Moyene, C. and Perre, P. (1996) 'Drying with internal heat generation: Theoretical aspects and application to microwave heating', *A.I.Ch.E. Journal*. doi: <https://doi.org/10.1002/aic.690420206>.
- Couture, F. (1995) *Modélisation fine d'un problème de séchage- développement d'outils adaptés*. Université bordeaux 1.
- Decareau, R. V (1985) *Microwaves in the food processing industry*.
- Dhib, K. Ben *et al.* (2016) 'Behavior of Tunisian Aleppo Pine (*Pinus halepensis* Mill) wood during convective drying: Identification of the diffusion coefficient taking into account shrinkage velocity', *Journal of Materials and Environmental Science*, 7(7), pp. 2561–2571.
- Direction Générale des Forêts (2019) *SYNTHESE SUR LE PLAN NATIONAL DE REBOISEMENT*. Available at: <http://www.dgf.org.dz/fr/content/reboisement-et-plantations-diverses>.
- Doymaz, I. (2006) 'Thin-layer drying behaviour of mint leaves', *Journal of Food Engineering*, 74(3), pp. 370–375. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.03.009.
- Doymaz, I. (2014) 'Thin-Layer Drying of Bay Laurel Leaves (*Laurus Nobilis* L.)', *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(1), pp. 449–456. doi: 10.1111/j.1745-4549.2012.00793.x.
- Doymaz, I. (2005) 'Drying behaviour of green beans', *Journal of Food Engineering*, 69(2), pp. 161–165. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2004.08.009.
- Du, G., Wang, S. and Cai, Z. (2005) 'Microwave drying of wood strands', *Drying Technology*, 23(12), pp. 2421–2436. doi: 10.1080/07373930500340494.
- Elaieb, M. . *et al.* (2017) 'Physical , mechanical and natural durability properties of wood from reforestation *Pinus halepensis* Mill . in the Mediterranean Basin', (November 2018). doi: 10.19182/bft2017.331.a31323.
- Elaieb, M. T., Khaldi, A. and Candelier, K. (2015) 'Impact of location and forestry conditions on some physical and mechanical properties of northern Tunisian *Pinus pinea* L. wood', *Bois et Forêts des Tropiques*, (324), pp. 65–74. doi: 10.19182/bft2015.324.a31267.
- Ernesto, G. and Salazar, C. (2006) 'MODÉLISATION DU SÉCHAGE D ' UN MILIEU POREUX SATURÉ DÉFORMABLE : PRISE EN To cite this version : HAL Id : tel-00077557 Ecole Nationale Supérieure d ' Arts et Métiers Centre de Bordeaux par'.
- Esteves, B. *et al.* (2014) 'Comparison between heat treated sapwood and heartwood from *Pinus pinaster*', *European Journal of Wood and Wood Products*, 72(1), pp. 53–60. doi: 10.1007/s00107-013-

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

0751-y.

FAO (2009) 'Eucalyptus in east Africa: the socioeconomic and environmental issues.', *FAO Sub-regional Office Eastern Africa, Addis Ababa*, (March), p. 40.

Fasina, O. O., Ajibola, O. O. and Tyler, R. T. (1999) 'Thermodynamics of moisture sorption in winged bean seed and gari', *Journal of Food Process Engineering*, 22(6), pp. 405–418. doi: 10.1111/j.1745-4530.1999.tb00496.x.

Gendron, S. (2023) *Modélisation et prédiction du séchage à l'air libre du bois d'œuvre*. Québec.

Ghniimi, T., Hassini, L. and Bagane, M. (2019) 'Intensification of the convective drying process of *Arthrospira (Spirulina) platensis* by capillary draining: effect of the draining support', *Journal of Applied Phycology*, 31(5), pp. 2921–2931. doi: 10.1007/s10811-019-01779-9.

Goyal, R. K. *et al.* (2006) 'Thin-layer Drying Kinetics of Raw Mango Slices', *Biosystems Engineering*, 95(1), pp. 43–49. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2006.05.001.

Grinchik, N. N. *et al.* (2015) 'Modeling of heat and moisture transfer in wood in finish drying by the energy of a microwave field', *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 88(1), pp. 35–41. doi: 10.1007/s10891-015-1165-y.

Grossel, S. S. (1998) 'Review of: "Handbook of Industrial Drying" Second Edition, Revised and Expanded Edited by Arun S. Mujumdar Marcel Dekker, Inc., New York, USA 1995, 1423 pages', *Drying Technology*, 16(8), pp. 1759–1760. doi: 10.1080/07373939808917492.

Guitard, D. and Polge, H. (1987) *Mécanique du matériau bois et composites*. Edited by Cépaduès-Editions.

Habouria, M. (2022) *Procédé de séchage par micro-ondes des matériaux déformables*. Université de Tunis El-Manar.

Habouria, M. *et al.* (2023) 'Analysis of thermodynamic properties of moisture-desorption isotherms of *Eucalyptus gomphocephala* wood', *Wood Material Science and Engineering*, 18(3), pp. 1094–1104. doi: 10.1080/17480272.2022.2108336.

Hansmann, C. *et al.* (2008) 'High-frequency energy-assisted vacuum drying of fresh eucalyptus globulus', *Drying Technology*, 26(5), pp. 611–616. doi: 10.1080/07373930801946759.

Hansson, L. (2007) 'Microwave Treatment of Wood', *Division of Wood Physics*, p. 137.

Hansson, L. and Antti, A. . (2003) 'The effect of microwave drying on Norway spruce woods strength:

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

a comparison with conventional drying', *Journal of Materials Processing Technology*, 141(1), pp. 41–50. doi: 10.1016/S0924-0136(02)01102-0.

Hansson, L. and Antti, A. L. (2006) 'The effect of drying method and temperature level on the hardness of wood', *Journal of Materials Processing Technology*, 171(3), pp. 467–470. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.08.007.

Haque, N. (2011) 'Delamination in Timber Induced by Drying.', in Bucur, V. (ed.) *Delamination in Wood, Wood Products and Wood-Based Composites*. Springer, Dordrecht, pp. 1–401. doi: 10.1007/978-90-481-9550-3.

Hasatani, M., Itaya, Y. and Hayakawa, K. (1992) '- VISCOELASTIC STRAIN-STRESS AND HEAT/MOISTURE TRANSFER -', *Drying Technology*, 10(4), pp. 1013–1036. doi: 10.1080/07373939208916493.

Hassini, L., Peczalski, R. and Gelet, J. L. (2015) 'Drying of granular medium by hot air and microwaves. Modeling and prediction of internal gas pressure and binder distribution', *Powder Technology*, 286, pp. 636–644. doi: 10.1016/j.powtec.2015.09.009.

He, Y. (2005) 'Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor', *Thermochimica Acta*, 436(1–2), pp. 122–129. doi: 10.1016/j.tca.2005.06.026.

Hermassi, I. *et al.* (2017) 'Moisture Diffusivity of Seedless Grape undergoing convective drying', *Chemical Product and Process Modeling*, 12(1). doi: 10.1515/cppm-2016-0074.

Hermoso, E. and Vega, A. (2016) 'Effect of microwave treatment on the impregnability and mechanical properties of eucalyptus globulus wood', *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, 18(1), pp. 55–64. doi: 10.4067/S0718-221X2016005000006.

Herrera-Díaz, R. *et al.* (2018) 'Effect of wood drying and heat modification on some physical and mechanical properties of radiata pine', *Drying Technology*, 36(5), pp. 537–544. doi: 10.1080/07373937.2017.1342094.

Herrera, R. *et al.* (2015) 'Chemical analysis of industrial-scale hydrothermal wood degraded by wood-rotting basidiomycetes and its action mechanisms', *Polymer Degradation and Stability*, 117, pp. 37–45. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2015.03.013.

Holzbecher, E. (2016) 'Numerical Modelling of CO₂-Storage', *Proceedings of the 2016 COMSOL Conference in Munich*, (1).

Ikediala, J. *et al.* (2000) 'Dielectric properties of apple cultivars and codling moth larvae.',

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Transactions of the ASAE-American Society of Agricultural Engineers*, 43. doi: doi: 10.13031/2013.3010.
- Jia, D. and Afzal, M. T. (2008) 'Modeling the heat and mass transfer in microwave drying of White Oak', *Drying Technology*, 26(9), pp. 1103–1111. doi: 10.1080/07373930802266058.
- Jiang, X. *et al.* (2019) 'Moisture sorption isotherms and isosteric heats of sorption of high-pressure treated paulownia wood under different storage conditions.', *Transactions of the ASABE*, 62(1), pp. 105–114. doi: <https://doi.org/10.13031/trans.12899>.
- Jin Park, K., Vohnikova, Z. and Pedro Reis Brod, F. (2002) 'Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.)', *Journal of Food Engineering*, 51(3), pp. 193–199. doi: 10.1016/S0260-8774(01)00055-3.
- Jirouš-Rajković, V. and Miklečić, J. (2021) 'Enhancing weathering resistance of wood—a review', *Polymers*, 13(12). doi: 10.3390/polym13121980.
- Joachim Müller (2007) 'Convective drying of medicinal, aromatic and spice plants: a review', *Stewart Postharvest Review*, 3(4), pp. 1–6. doi: 10.2212/spr.2007.4.2.
- Kadem, S. *et al.* (2011) '3d-Transient modeling of heat and mass transfer during heat treatment of wood', *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(6), pp. 717–722. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.03.026.
- Kadioğlu Yaman, B. *et al.* (2020) 'Myrtus communis subsp. communis improved cognitive functions in ovariectomized diabetic rats', *Gene*, 744, p. 144616. doi: 10.1016/j.gene.2020.144616.
- Kanabahita, C. (2001) *Forestry Outlook Studies in Africa: Uganda.*, FAO (Food and Agriculture Organization). Available at: <https://www.fao.org/4/ac427e/ac427e05.htm>.
- Koumoutsakos, A. and Avramidis, S. (1999) 'Enthalpy-entropy compensation in water sorption by various wood species', *Holz als Roh - und Werkstoff*, 57(5), pp. 379–382. doi: 10.1007/s001070050363.
- Kowalski, S. J. and Pawlowski, A. (2011) 'Intermittent drying: Energy expenditure and product quality', *Chemical Engineering and Technology*, 34(7), pp. 1123–1129. doi: 10.1002/ceat.201100025.
- Kraszewski, A. W. (1996) *Microwave aquametry : electromagnetic wave interaction with water-containing materials*. Edited by I. Press.
- Kumar, C. *et al.* (2016) 'Multiphase porous media model for intermittent microwave convective drying (IMCD) of food', *International Journal of Thermal Sciences*, 104, pp. 304–314. doi:

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

10.1016/j.ijthermalsci.2016.01.018.

Kumar, C. *et al.* (2018) 'Investigation of intermittent microwave convective drying (IMCD) of food materials by a coupled 3D electromagnetics and multiphase model', *Drying Technology*, 36(6), pp. 736–750. doi: 10.1080/07373937.2017.1354874.

Lahsasni, S. *et al.* (2003) 'Moisture adsorption–desorption isotherms of prickly pear cladode (*Opuntia ficus indica*) at different temperatures', *Energy Conversion and Management*, 44(6), pp. 923–936. doi: 10.1016/S0196-8904(02)00094-8.

LARTIGUE, C. (1987) *Mécanismes élémentaires mis en jeu lors du séchage du pin maritime*. Université Bordeaux I.

Leggate, W. *et al.* (2021) 'The Effects of Drying Method on the Wood Permeability, Wettability, Treatability, and Gluability of Southern Pine from Australia', *BioResources*, 16(1), pp. 698–720. doi: 10.15376/biores.16.1.698-720.

Lévêque, F. and Péguret, A. (1988) *Forêts et industries du bois : structures et performances*. Paris : Ec.

Liu, H. M. *et al.* (2013) 'Isothermal kinetics based on two-periods scheme for co-drying of biomass and lignite', *Thermochimica Acta*, 573, pp. 25–31. doi: 10.1016/j.tca.2013.08.030.

Liu, J. *et al.* (2024) 'Determination on the inherent thermal conductivity and thermal contact resistance of individual thin-layer materials in Li-ion batteries', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 230, p. 125741. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125741.

Liu, M., Li, C. and Wang, Q. (2018) 'Microstructural characteristics of larch wood treated by high-intensity microwave', *BioResources*, 14(1), pp. 1174–1184. doi: 10.15376/biores.14.1.1174-1184.

Louppe, D. and Depommier, D. (2010) 'Expansion, research and development of the Eucalyptus in Africa. Wood production, livelihoods and environmental issues: an unlikely reconciliation?', 2, pp. 1–9.

Madamba, P. S., Driscoll, R. H. and Buckle, K. A. (1996) 'The thin-layer drying characteristics of garlic slices', *Journal of Food Engineering*, 29(1), pp. 75–97. doi: 10.1016/0260-8774(95)00062-3.

Mariella, C. and Sanchez, C. (2013) 'Utilisation de conduites de séchage oscillantes pour réduire les contraintes liées au retrait du bois Carmen Mariella de la Cruz Sanchez To cite this version : HAL Id : pastel-00839297 L' Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l' Environnem'.

Martín-Esparza, M. E. *et al.* (2006) 'Dielectric behavior of apple (var. Granny Smith) at different moisture contents', *Journal of Food Engineering*, 77(1), pp. 51–56. doi:

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

10.1016/j.jfoodeng.2005.06.018.

Mascarenhas, Fernando J.R. *et al.* (2024) 'Experimental investigation on the influence of microwave technology on the treatability and mechanical properties of Portuguese southern blue gum wood', *Case Studies in Construction Materials*, 20, p. e02698. doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02698.

Mascarenhas, Fernando Júnior Resende *et al.* (2024) 'Moisture and Temperature Profiles of Heartwood Pinus pinaster Ait. Wood Specimens during Microwave Drying', *Forests*, 15(6), p. 944. doi: 10.3390/f15060944.

Mateus, M. M. *et al.* (2017) 'Heuristic analysis of Eucalyptus globulus bark depolymerization via acid-liquefaction', *Cellulose*, 24(2), pp. 659–668. doi: 10.1007/s10570-016-1175-8.

McMinn, W. A. M., Khraisheh, M. A. M. and Magee, T. R. A. (2003) 'Modelling the mass transfer during convective, microwave and combined microwave-convective drying of solid slabs and cylinders', *Food Research International*, 36(9–10), pp. 977–983. doi: 10.1016/S0963-9969(03)00118-2.

Merakeb, S. (2006) 'Modélisation des structures en bois en environnemnet variable', p. 162.

Merakeb, S., Dubois, F. and Petit, C. (2009) 'Modeling of the sorption hysteresis for wood', *Wood Science and Technology*, 43(7–8), pp. 575–589. doi: 10.1007/s00226-009-0249-2.

Metaxas, A. C. (1996) *Foundation and Electroheat: A Unified Approach*. Available at: <https://www.wiley.com/en-ie/Foundation+and+Electroheat%3A+A+Unified+Approach-p-9780471956440>.

Mimica-Dukic, N. *et al.* (2010) 'Essential oil of myrtus communis l. As a potential antioxidant and antimutagenic agents', *Molecules*, 15(4), pp. 2759–2770. doi: 10.3390/molecules15042759.

Moutee, M. (2006) 'Modélisation du comportement mécanique du bois au cours du séchage', *These doctorat, Université Laval, Québec, Canada*, pp. 1–194.

Mueller, M. and Jungbauer, A. (2009) 'Culinary plants, herbs and spices – A rich source of PPAR γ ligands', *Food Chemistry*, 117(4), pp. 660–667. doi: 10.1016/j.foodchem.2009.04.063.

N'Guessan, J. L. L. *et al.* (2023) 'Wood Extractives: Main Families, Functional Properties, Fields of Application and Interest of Wood Waste', *Forest Products Journal*, 73(3), pp. 194–208. doi: 10.13073/FPJ-D-23-00015.

Ndukwu, M. C. *et al.* (2021) 'Influence of drying applications on wood, brick and concrete used as building materials: a review', *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 6(1). doi:

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

10.1007/s41024-021-00119-0.

Nicoletti, J. F., Telis-Romero, J. and Telis, V. R. N. (2001) 'AIR-DRYING OF FRESH AND OSMOTICALLY PRE-TREATED PINEAPPLE SLICES: FIXED AIR TEMPERATURE VERSUS FIXED SLICE TEMPERATURE DRYING KINETICS', *Drying Technology*, 19(9), pp. 2175–2191. doi: 10.1081/DRT-100107493.

Nkolo Meze'e, Y. ., Noah Ngamveng, J. and Bardet, S. (2008) 'Effect of enthalpy–entropy compensation during sorption of water vapour in tropical woods: The case of Bubinga (Guibourtia Tessmanii J. Léonard; G. Pellegriniana J.L.)', *Thermochimica Acta*, 468(1–2), pp. 1–5. doi: 10.1016/j.tca.2007.11.002.

Ouafi, N. *et al.* (2016) 'Moisture sorption isotherms and heat of sorption of Algerian bay leaves (Laurus nobilis)', *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, 17(4), pp. 759–772. doi: 10.4067/S0718-221X2015005000066.

Ouertani, S. *et al.* (2011) 'Palm wood drying and optimization of the processing parameters', *Wood Material Science and Engineering*, 6(1–2), pp. 75–90. doi: 10.1080/17480272.2010.551546.

Ouertani, S. (2014) *Modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse et du comportement mécanique au cours du séchage du bois*. Université de tunis.

Ouertani, S. *et al.* (2014) 'Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of Jack pine and palm wood: Comparative study', *Industrial Crops and Products*, 56, pp. 200–210. doi: 10.1016/j.indcrop.2014.03.004.

Ouertani, S., Hassini, L., *et al.* (2015) 'Modeling of Combined Microwave and Convective Drying of Wood: Prediction of Mechanical Behavior via Internal Gas Pressure', *Drying Technology*, 33(10), pp. 1234–1242. doi: 10.1080/07373937.2015.1022828.

Ouertani, S., Koubaa, A., *et al.* (2015) 'Vacuum contact drying kinetics of Jack pine wood and its influence on mechanical properties: industrial applications', *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, 51(7), pp. 1029–1039. doi: 10.1007/s00231-014-1476-0.

Ouertani, S. *et al.* (2018) 'Microwave drying kinetics of jack pine wood: determination of phytosanitary efficacy, energy consumption, and mechanical properties', *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(4), pp. 1101–1111. doi: 10.1007/s00107-018-1316-x.

Ouertani, S., Simo-Tagne, M. and Rémond, R. (2022) 'Sorption isotherms and moisture transfer properties of seven Central Africa hardwood species.', *Wood Material Science & Engineering*, 18(2), pp. 507–516. doi: <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2051736>.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Panchariya, P. C., Popovic, D. and Sharma, A. L. (2002) 'Thin-layer modelling of black tea drying process', *Journal of Food Engineering*, 52(4), pp. 349–357. doi: 10.1016/S0260-8774(01)00126-1.
- Qin, Y. *et al.* (2022) 'Effect of intermittent microwave drying on nutritional quality and drying characteristics of persimmon slices', *Food Science and Technology (Brazil)*, 42, pp. 1–8. doi: 10.1590/fst.37422.
- Rafiee, S. *et al.* (2010) 'Modeling Effective Moisture Diffusivity of Orange Slice (Thompson Cv.)', *International Journal of Food Properties*, 13(1), pp. 32–40. doi: 10.1080/10942910802144345.
- Rahimi, M. R. *et al.* (2015) 'An Experimental Study of Different Drying Methods on the Quality and Quantity Essential Oil of *Myrtus communis* L. leaves', *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 18(6), pp. 1395–1405. doi: 10.1080/0972060X.2014.958564.
- Rajemison, A. H. (2013) *Proposition d'essences de substitution aux bois précieux en épuisement par la connaissance des propriétés du matériau bois : Cas du Palissandre de Madagascar - Application en ameublement*. Toulouse 3. Available at: <https://theses.fr/2013TOU30282>.
- Rajewska, K., Smoczkiwicz-Wojciechowska, A. and Majka, J. (2019) 'Intensification of beech wood drying process using microwaves', *Chemical and Process Engineering - Inzynieria Chemiczna i Procesowa*, 40(2), pp. 179–187. doi: 10.24425/cpe.2019.126110.
- Rakotovao, G. *et al.* (2012) 'Atlas des Bois de Madagascar', p. 418. Available at: <https://www.quae.com/produit/1138/9782759218721/atlas-des-bois-de-madagascar>.
- Rattanadecho, P. (2006) 'The simulation of microwave heating of wood using a rectangular wave guide: Influence of frequency and sample size', *Chemical Engineering Science*, 61(14), pp. 4798–4811. doi: 10.1016/j.ces.2006.03.001.
- Rémond, R. (2004) 'Approche déterministe du séchage des avivés de résineux de fortes épaisseurs pour proposer des conduites industrielles adaptées', p. 205. Available at: <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00001132/>.
- Repellin, V. (2006) *Optimisation des paramètres durée et température d'un traitement thermique du bois . Modifications des propriétés d'usage du bois en relation avec les modifications physico-chimiques et ultrastructurales occasionnées par le traitement thermique* . Available at: <https://theses.hal.science/tel-00012090/fr/>.
- Salagnac, P., Glouannec, P. and Lecharpentier, D. (2004) 'Numerical modeling of heat and mass transfer in porous medium during combined hot air, infrared and microwaves drying', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(19–20), pp. 4479–4489. doi:

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.04.015.

Salmas, C. E. *et al.* (2001) 'EVOLUTION LIGNITE MESOPORE STRUCTURE DURING DRYING. EFFECT OF TEMPERATURE AND HEATING TIME', *Drying Technology*, 19(1), pp. 35–64. doi: 10.1081/DRT-100001351.

Sander, A. (2007) 'Thin-layer drying of porous materials: Selection of the appropriate mathematical model and relationships between thin-layer models parameters', *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(12), pp. 1324–1331. doi: 10.1016/j.cep.2006.11.001.

Santos, S. B. and Martins, M. A. (2016) 'Equilibrium Moisture and Thermodynamic Properties on Desorption Process of Jatropha Seeds', *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*, 07(05). doi: 10.4172/2157-7048.1000318.

Sémété, P. *et al.* (2017) 'Concrete desorption isotherms and permeability determination: effects of the sample geometry', *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21(1), pp. 42–62. doi: 10.1080/19648189.2015.1090930.

Senatore, F. *et al.* (2006) 'Chemical Composition and Antibacterial Activity of Essential Oil of *Myrtus communis* L. Growing Wild in Italy and Turkey', *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 9(2), pp. 162–169. doi: 10.1080/0972060X.2006.10643489.

Shen, H. *et al.* (2018) 'Improving anti-weathering performance of thermally modified wood by TiO₂ sol or/and paraffin emulsion', *Construction and Building Materials*, 169, pp. 372–378. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.036.

Si, W. *et al.* (2022) 'Low-Frequency Broadband Absorbing Coatings Based on MOFs: Design, Fabrication, Microstructure and Properties', *Coatings*, 12(6), pp. 1–26. doi: 10.3390/coatings12060766.

Simo-Tagne, M. *et al.* (2016) 'Sorption behavior of four tropical woods using a dynamic vapor sorption standard analysis system', *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, 18(3), pp. 403–412. doi: 10.4067/S0718-221X2016005000036.

Simón, C. *et al.* (2017) 'Comparison of the saturated salt and dynamic vapor sorption methods in obtaining the sorption properties of *Pinus pinea* L', *European Journal of Wood and Wood Products*, 75(6), pp. 919–926. doi: 10.1007/s00107-016-1155-6.

Sosa-Morales, M. E. *et al.* (2010) 'Dielectric properties of foods: Reported data in the 21st Century and their potential applications', *LWT - Food Science and Technology*, 43(8), pp. 1169–1179. doi: 10.1016/j.lwt.2010.03.017.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- T. Sabarez, H. and E. Price, W. (1999) 'A diffusion model for prune dehydration', *Journal of Food Engineering*, 42(3), pp. 167–172. doi: 10.1016/S0260-8774(99)00115-6.
- Tagne, M. S. and Beguide, B. (2011) 'Modélisation du séchage convectif et symétrique des bois d'ayous, d'eucalyptus grandis et d'ébène : simulation numérique et validation expérimentale Résumé', 07(3), pp. 15–32.
- Torgovnikov, G. and Vinden, P. (2010) 'Microwave Wood Modification Technology and Its Applications', *Forest Products Journal*, 60(2), pp. 173–182. doi: 10.13073/0015-7473-60.2.173.
- Trabut, M. L. (1914) 'Naturalisation d'un Eucalyptus en Algérie: Eucalyptus algeriensis Trab.;', *Bulletin de la Societe Botanique de France*, 61(5), pp. XIII–XIV. doi: 10.1080/00378941.1914.10832605.
- Tsami, E. (1991) 'Net isosteric heat of sorption in dried fruits', *Journal of Food Engineering*, 14(4), pp. 327–335. doi: 10.1016/0260-8774(91)90022-K.
- Wan, K. et al. (2016) 'Water desorption isotherms and net isosteric heat of desorption on lignite', *Fuel*, 171, pp. 101–107. doi: 10.1016/j.fuel.2015.12.054.
- Wentworth, S. M. (2005) *Fundamentals of Electromagnetics with Engineering Applications*. 1st Editio.
- Wu, J. et al. (2023) 'Effect of drying processes and sampling positions on the microstructure and physical–mechanical properties of NaOH-treated bamboo (*Phyllostachys pubescens*) slivers', *European Journal of Wood and Wood Products*, 81(3), pp. 655–668. doi: 10.1007/s00107-022-01911-6.
- Yang, L. and Liu, H. (2018) 'A review of eucalyptus wood collapse and its control during drying', *BioResources*, 13(1), pp. 2171–2181. doi: 10.15376/biores.13.1.Yang.
- Yang, L., Zheng, J. and Huang, N. (2022) 'The Characteristics of Moisture and Shrinkage of Eucalyptus urophylla × E. Grandis Wood during Conventional Drying', *Materials*, 15(9), p. 3386. doi: 10.3390/ma15093386.
- Yin, Q. and Liu, H. H. (2021) 'Drying stress and strain of wood: A review', *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(11). doi: 10.3390/app11115023.
- Zhang, J. W. et al. (2020) 'Drying characteristics of Eucalyptus urophylla × E. grandis with supercritical CO₂', *Materials*, 13(18), pp. 1–13. doi: 10.3390/ma13183989.
- Zhang, J., Wu, J. and Chen, W. (2017) 'Special review paper: Applications of microwave in leather field: Further research for leather chemists and technologists', *Journal of the American Leather Chemists Association*, 112(9), pp. 311–318.

