

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉI	
REMERCEMENTS	III
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
LISTE DES FIGURES.....	IX
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I.....	3
REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	3
1.1 TRAITEMENT PHYTOSANITAIRE DU BOIS	3
1.1.1 Matériaux d'emballage en bois	4
1.1.2 La norme NIMP 15	4
1.1.3 Différents types de traitement phytosanitaire	6
1.1.3.1 <i>Traitement chimique</i>	6
1.1.3.2 <i>Traitement thermique</i>	7
1.1.4 Enjeux des réglementations en vigueur et à venir.....	8
1.2 PROPRIETES DU BOIS	9
1.2.1 Propriétés physiques	9
1.2.1.1 <i>Teneur en humidité</i>	9
1.2.1.2 <i>Retrait et gonflement</i>	10
1.2.1.3 <i>La masse volumique et la densité relative</i>	10
1.2.2 Propriétés mécaniques	11
1.2.2.1 <i>Elasticité</i>	11

1.2.2.2	<i>Influence de la densité sur les propriétés mécaniques du bois</i>	13
1.2.2.3	<i>Influence de la température et de la teneur en humidité sur les propriétés mécaniques du bois</i>	13
1.2.3	Propriétés diélectriques complexes	15
1.2.3.1	<i>Constante diélectrique</i>	17
1.2.3.2	<i>Angle de polarité</i>	21
1.2.3.3	<i>Profondeur de pénétration</i>	24
1.3	TRAITEMENT PHYTOSANITAIRE PAR MICRO-ONDES	25
1.3.1	Séchage aux micro-ondes	27
1.3.2	Efficacité des micro-ondes sur les micro-organismes	28
1.3.3	Cinétique de chauffage aux micro-ondes	29
1.3.4	Effet du traitement aux micro-ondes sur les propriétés mécaniques du bois	32
1.4	OBJECTIFS ET HYPOTHESES DE LA RECHERCHE	34
	CHAPITRE II	35
	MATÉRIEL ET MÉTHODES	35
2.1	MATERIEL	35
2.2	METHODES	36
2.2.1	Traitement thermique aux micro-ondes	36
2.2.2	Dispositif expérimental utilisé pour le traitement aux micro-ondes	39
2.2.3	Préparation et séchage des échantillons destinés aux essais mécaniques	40
2.2.4	Mesure des propriétés mécaniques	41
2.2.5	Effets du procédé du séchage sur les propriétés mécaniques du bois	44
	CHAPITRE III	45
	RESULTATS ET DISCUSSIONS	45
3.1	TRAITEMENT THERMIQUE AUX MICRO-ONDES	45
3.1.1	Variation de la température au centre des pièces	45
3.1.2	Variation de la teneur en humidité finale	45

3.1.3	Évolution de la température en fonction du temps de traitement aux micro-ondes ...	46
3.1.4	Évolution de la teneur en humidité en fonction du temps de traitement aux micro-ondes	57
3.2	EFFETS DU SECHAGE AUX MICRO-ONDES SUR LES PROPRIETES MECANIQUES DU BOIS	61
3.2.1	Effets du séchage aux micro-ondes sur les propriétés mécaniques du bois en compression parallèle et en compression perpendiculaire	62
3.2.2	Effets du séchage aux micro-ondes sur les propriétés mécaniques du bois en flexion simple.....	67
	CONCLUSION.....	69
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	71
	ANNEXES	75
	ANNEXE A RESULTATS DETAILLES DU TRAITEMENT THERMIQUE	75
	ANNEXE B EFFET DES DIFFERENTS TYPES DE SECHAGE SUR LES PROPRIETES MECANIQUES DU BOIS	95
	ANNEXE C RESULTATS DETAILLES DES EFFET DES DIFFERENTS TYPES DE SECHAGE SUR LES PROPRIETES MECANIQUES DU BOIS	98

LISTE DES TABLEAUX

Table 1.1 CT minimal sur 24 heures pour les matériaux d'emballage en bois traités par fumigation au bromure de méthyle (Normes Internationales pour les Mesures Phytosanitaires, 2009)	7
Table 2.1 Spécifications du four expérimental aux micro-ondes BP-111 de la compagnie Microwave Research Applications Inc.	38
Table 3.1 Analyse de variance des effets de l'essence, du temps de chauffage, de la densité et de la teneur en humidité initiale sur la température au centre des pièces et la teneur en humidité finale	46
Table 3.2 Analyse de variance de l'effet du mode de séchage sur les propriétés mécaniques du bois de 5 essences	63

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Courbe contrainte-déformation du bois	12
Figure 1.2 Évolution du module d'Young en fonction de la teneur en humidité (Goulet et al., 1968)	15
Figure 1.3 Variation de la constante diélectrique ϵ' du peuplier faux tremble, du bouleau blanc, du bouleau jaune et de l'érable à sucre en fonction de la teneur en humidité, mesurée à une température constante 24°C et une fréquence de 2,47GHz (Koubaa et al., 2008).....	18
Figure 1.4 Variation du facteur de perte ϵ'' du peuplier faux tremble, du bouleau blanc, du bouleau jaune et de l'érable à sucre en fonction de la teneur en humidité, mesurée à une température constante 24°C et une fréquence de 2,47GHz (Koubaa et al., 2008).....	19
Figure 1.5 Variation de la permittivité relative ϵ' du peuplier faux tremble en fonction de la teneur en humidité et de la fréquence, mesurée à une température constante 24°C (Koubaa et al., 2008).....	19
Figure 1.6 Variation du facteur de perte ϵ'' du peuplier faux tremble en fonction de la teneur en humidité et de la fréquence, mesurée à une température constante 24°C (Koubaa et al., 2008).....	20
Figure 1.7 Variation de la constante diélectrique ϵ' en fonction de la température initiale et l'essence du bois à une même fréquence (2,47MHz) (Koubaa et al., 2008).....	21
Figure 1.8 Variation de la tangente des pertes ($\tan\delta$) du peuplier faux tremble en fonction de la teneur en humidité et la fréquence à une température constante (24°C) (Koubaa et al., 2008).....	22

Figure 1.9 Variation de la tangente des pertes ($\tan\delta$) en fonction de la teneur en humidité et de l'essence à une température constante (24°C) et une fréquence constante (2,47 GHz) (Koubaa et al., 2008)	23
Figure 1.10 Variation de la tangente des pertes ($\tan\delta$) du peuplier faux tremble en fonction de la température initiale et la fréquence à une même teneur en humidité (115 %) (Koubaa et al., 2008)	23
Figure 1.11 Variation de la profondeur de pénétration du peuplier faux tremble en fonction de la teneur en humidité et la fréquence (température constante à 24°C) (Koubaa et al., 2008).....	24
Figure 1.12 Variation de la profondeur de pénétration en fonction de la teneur en humidité et de l'essence à une température constante (24°C) et une fréquence constante (2,47 GHz) (Koubaa et al., 2008)	25
Figure 1.13 Évolution de la température au centre des pièces en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes des pièces de 14 mm d'épaisseur pour le bois de l'érule à sucre et du peuplier faux-tremble (Koubaa et al., 2006).....	29
Figure 1.14 Évolution de la température au centre des pièces en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes du bois de peuplier faux-tremble de 30 mm d'épaisseur à trois températures initiales différentes (Koubaa et al., 2006)	30
Figure 1.15 Évolution de la teneur en humidité en fonction du temps de traitement aux micro-ondes pour différentes teneurs en humidité initiale (Koubaa et al., 2006).....	30
Figure 1.16 Évolution de la température, de la pression atmosphérique et de la teneur en humidité lors du séchage aux micro-ondes du bois de l'épinette noire (Perré, 2007)	31
Figure 2.1 Illustration du four aux micro-ondes modèle BP-111de la Compagnie Microwave Research Applications Inc. utilisé pour le chauffage du bois.	37

Figure 2.2 Illustration du dispositif utilisé pour la mesure de la température au centre d'une pièce de bois	38
Figure 2.3 Séchoir sous vide	41
Figure 2.4 Machine d'essais universelle de la Compagnie Zwick/Roel Z020	43
Figure 2.5 Essai de flexion simple d'une poutre de bois	43
Figure 3.1 Évolution de la température au centre des pièces du bois du pin gris en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes pour différentes classes d'humidité	48
Figure 3.2 Évolution de la température au centre des pièces du bois de l'érable à sucre en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes pour différentes classes d'humidité	49
Figure 3.3 Évolution de la température au centre des pièces du bois de l'épinette noire en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes pour différentes classes d'humidité	49
Figure 3.4 Évolution de la température au centre des pièces du bois du bouleau jaune en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes pour différentes classes d'humidité	50
Figure 3.5 Évolution de la température au centre des pièces du bois du peuplier faux- tremble en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes pour différentes classes d'humidité	50
Figure 3.6 Évolution de la température au centre des pièces en fonction de la durée de traitement aux micro-ondes des pièces de bois des cinq essences étudiées à une teneur en humidité 0-25%.....	52
Figure 3.7 Temps de traitement aux micro-ondes nécessaire des pièces de bois des cinq essences pour atteindre la température de 60°C en fonction de la masse volumique à une teneur en humidité de 20%.....	52

Figure 3.8 Temps de traitement aux micro-ondes nécessaire des pièces de bois du peuplier faux-tremble pour atteindre la température de 60°C en fonction de la teneur en humidité.....	54
Figure 3.9 Temps de traitement aux micro-ondes nécessaire des pièces de bois de l'épinette noire pour atteindre la température de 60°C en fonction de la teneur en humidité	54
Figure 3.10 Temps de traitement aux micro-ondes nécessaire des pièces de bois du pin gris pour atteindre la température de 60°C en fonction de la teneur en humidité	55
Figure 3.11 Temps de traitement aux micro-ondes nécessaire des pièces de bois du bouleau jaune pour atteindre la température de 60°C en fonction de la teneur en humidité	55
Figure 3.12 Temps de traitement aux micro-ondes nécessaire des pièces de bois de l'érable à sucre pour atteindre la température de 60°C en fonction de la teneur en humidité	56
Figure 3.13 Temps de traitement aux micro-ondes nécessaire du bois de cinq essences (peuplier faux-tremble, bouleau jaune, érable à sucre, épinette noire et le pin gris) pour atteindre la température de 60°C à une teneur en humidité de 70%.....	56
Figure 3.14 Évolution de la teneur en humidité en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes du bois du pin gris pour différentes teneurs en humidité initiale	58
Figure 3.15 Évolution de la teneur en humidité en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes du bois de l'érable à sucre à différentes teneurs en humidité initiale	58
Figure 3.16 Évolution de la teneur en humidité en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes du bois de l'épinette noire à différentes teneurs en humidité initiale	59

Figure 3.17 Évolution de la teneur en humidité en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes du bois du bouleau jaune à différentes teneurs en humidité initiale	59
Figure 3.18 Évolution de la teneur en humidité en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes du bois du peuplier faux-tremble à différentes teneurs en humidité initiale	60
Figure 3.19 Évolution de la teneur en humidité en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes du bois de cinq essences (peuplier faux-tremble, bouleau jaune, érable à sucre, épinette noire et du pin gris) pour une teneur en humidité initiale entre 25 et 40%.....	61
Figure 3.20 Effet du mode de séchage sur le MOE du bois en compression parallèle ...	65
Figure 3.21 Effet du mode de séchage sur le MOE spécifique du bois en compression parallèle.....	65
Figure 3.22 Effet du mode de séchage sur le MOE du bois en compression perpendiculaire.....	66
Figure 3.23 Effet du mode de séchage sur le MOE spécifique du bois en compression perpendiculaire.....	66
Figure 3.24 Effet du mode de séchage sur le MOE du bois en flexion.....	68
Figure 3.25 Effet du mode de séchage sur le MOE spécifique du bois en flexion	68

INTRODUCTION

Le groupe de travail de la Convention Internationale pour la Protection des Végétaux (CIPV) a développé une réglementation concernant les matériaux d'emballage en bois. Cette réglementation concerne toutes les essences de bois (feuillus et résineux) (Molina-Murillo *et al.*, 2005), et exige la désinfection des envois de végétaux et de produits végétaux faisant l'objet d'échanges internationaux, ainsi que tous les matériaux d'emballage en bois. Ces matériaux ont facilité l'introduction des pathogènes et des insectes qui menacent les forêts de l'Est de l'Amérique du Nord. Plusieurs méthodes sont utilisées pour le traitement phytosanitaire tels que le traitement thermique, la fumigation, etc. (USDA, 2003). L'irradiation aux micro-ondes est une alternative prometteuse étant donné qu'elle est plus rapide et plus facile à intégrer dans une ligne de production.

La technologie du traitement thermique aux micro-ondes a été utilisée depuis le début des années 60 dans l'industrie forestière. Le spectre de la fréquence des micro-ondes est approximativement entre 0,3 GHz et 30 GHz avec des longueurs d'ondes correspondantes de un centimètre et de un mètre, respectivement. Les fréquences les plus utilisées dans le chauffage sont 915 MHz et 2,45 GHz avec des longueurs d'ondes correspondantes de 33 cm et de 12 cm respectivement (Hansson, 2007b ; Hansson, 2007a). Avec une fréquence de 2,45 GHz, le traitement thermique aux micro-ondes a montré qu'une diminution de 40% de la teneur en humidité du bois de l'épinette et le hêtre est possible après un traitement d'une heure. Antti (2001) a montré que le séchage du pin et de l'épinette aux micro-ondes est 20-30 fois plus rapide que le séchage avec la méthode conventionnelle.

Cependant, plusieurs incertitudes sur l'efficacité d'un tel traitement à pénétrer le bois et à tuer les microorganismes et les insectes restent à vérifier. Par ailleurs, le pouvoir de pénétration du bois par les micro-ondes est limité et dépend de plusieurs facteurs dont la fréquence, la température, la teneur en humidité du bois. Ainsi, dans ce projet, nous avons étudié en premier lieu, la variation de la température et de la teneur en humidité au centre des pièces de bois traitées aux micro-ondes en fonction du temps et la teneur en humidité initiale du bois. En second lieu, afin de s'assurer qu'il n'y aura pas d'impact négatif sur les propriétés du bois, des essais mécaniques (flexion, compression parallèle et compression perpendiculaire) ont été réalisés sur des échantillons préalablement traités et séchés aux micro-ondes.

CHAPITRE I

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Traitement phytosanitaire du bois

Le but principal du traitement phytosanitaire du bois est la protection de l'environnement. Le traitement appliqué à l'emballage (palette du bois) a pour but d'éviter la propagation des organismes nuisibles qui, utilisant la palette comme véhicule, pourraient mettre en danger l'écosystème du pays de réception. Il ne s'agit pas seulement de protéger la palette en tant qu'objet, mais de la considérer comme "matériau végétal" et de lui appliquer des mesures semblables à celles concernant les végétaux sur pied (Aléon, 2004 ; Molina-Murillo *et al.*, 2005).

Malgré les efforts internationaux sur les exigences phytosanitaires, les espèces non indigènes ont un impact significatif sur les forêts nord-américaines. Il est difficile de quantifier les risques d'invasions de ces espèces dans la mesure où il y a plusieurs interactions entre plusieurs paramètres spatiaux et temporels : la transmission de ces organismes, leur propagation et leur établissement dans de nouveaux environnements (Yemshanov *et al.*, 2009) .

Les espèces non indigènes envahissantes présentent une préoccupation économique en Amérique du Nord et dans le monde entier. Des estimations récentes sur les impacts économiques de ces espèces sur les secteurs d'agriculture, de foresterie et de la santé publique dépassent les 120 milliard dollars américains annuellement. De façon

similaire, les coûts sur le secteur d'agriculture et de foresterie canadien ont été estimés à 7,5 milliard dollars canadiens (Yemshanov *et al.*, 2009).

1.1.1 Matériaux d'emballage en bois

Les matériaux d'emballage en bois associés au commerce international sont devenus une piste importante pour l'invasion des espèces non indigènes entre les pays (Haack, 2001; McCullough, 2006; Molina-Murillo *et al.*, 2005; USDA, 2003). D'importantes espèces envahissantes telles que le nématode du pin ou le longicorne asiatique, ont été transportés par des matériaux d'emballage en bois et ont colonisé de nouveaux habitats. Durant ces dernières décennies, les palettes de bois ont subi une hausse des prix suite aux exigences des normes internationales pour les mesures phytosanitaires, ceci n'a pas affecté l'utilisation de ces palettes comme matériaux d'emballage vue leurs bas prix comparativement aux prix excessifs des autres matériaux tels que le plastique (Molina-Murillo *et al.*, 2005).

1.1.2 La norme NIMP 15

Dans le but d'éradiquer l'invasion des parasites, la commission intérimaire sur les mesures phytosanitaires (Interim Commission on Phytosanitary Measures) et le conseil d'administration de la Convention Internationale pour la Protection des Végétaux (CIPV) (International Plant Protection Convention) ont développé le 15 Mars 2002 une Norme Internationale pour les Mesures Phytosanitaires (NIMP n°15) appelée «Directives pour la réglementation des matériaux d'emballage à base de bois dans le commerce international » (FAO 2002, Keiran et Allen 2004, Evans 2007) dans (Molina-Murillo *et al.*, 2005). En mars 2003, les pays de l'ALENA (États-Unis, Canada et Mexique) ont décidé qu'à partir du 2 janvier 2004, seule l'application de cette norme autoriserait l'entrée d'emballages en bois brut (palettes, bois de calage, bois d'emballage de toutes catégories). De même, l'Union Européenne a introduit cette norme en mars 2005.

Cette norme décrit des mesures phytosanitaires qui réduisent le risque d'introduction et de dissémination d'organismes de quarantaine associés aux échanges internationaux des matériaux d'emballage en bois réalisés à partir de bois brut de toutes essences, de conifères ou de feuillues et d'une épaisseur supérieure à 6 mm. Les matériaux d'emballage en bois auxquels s'applique cette norme incluent le bois de calage, les palettes, les caisses, les planches d'emballage, les tambours, les cageots, les plateaux de chargement, les caissons à anneau et les traineaux, mais excluent les emballages en bois transformé de telle sorte qu'il soit exempt d'organismes nuisibles.

Les mesures phytosanitaires approuvées décrites dans cette norme consistent en des procédures phytosanitaires, incluant des traitements et un marquage des matériaux d'emballage en bois. L'apposition de la marque rend l'emploi du certificat phytosanitaire superflu car elle indique que les mesures phytosanitaires acceptées sur le plan international ont été appliquées. Ces mesures phytosanitaires devraient être acceptées par toutes les Organisations Nationales de la Protection des Végétaux (ONPV) pour autoriser l'entrée de matériaux d'emballage en bois sans exigences spécifiques supplémentaires (Normes Internationales pour les Mesures Phytosanitaires, 2009).

Seulement deux traitements phytosanitaires sont approuvés par la NIMP 15. Le premier traitement est le traitement thermique qui consiste à soumettre les palettes de bois à une température de 56°C pendant une durée minimale de 30 minutes. Le second traitement est la fumigation au bromure de méthyle (Normes Internationales pour les Mesures Phytosanitaires, 2009). Une révision de cette norme a été réalisée pour deux raisons. D'une part, afin de répondre aux inquiétudes de la communauté au sujet de la présence d'écorce sur les matériaux d'emballage en bois dans le commerce international, d'autre part, pour augmenter les exigences quant à l'utilisation du bromure de méthyle dont les effets sur l'environnement sont néfastes (Henin *et al.*, 2008).

1.1.3 Différents types de traitement phytosanitaire

Parmi les différents types de traitement phytosanitaire du bois, deux seulement sont retenus par la norme NIMP 15 (Normes Internationales pour les Mesures Phytosanitaires, 2009):

- Le traitement chimique qui consiste à la fumigation au bromure de méthyle (gaz auparavant utilisé essentiellement dans l'agro-alimentaire pour protéger les céréales contre les insectes).

- Le traitement thermique qui consiste à élever la température au cœur du bois à un minimum de 56°C pendant une période d'au moins 30 minutes.

1.1.3.1 Traitement chimique

Le traitement chimique au bromure de méthyle est déconseillé selon la Convention Internationale pour la Protection des Végétaux (2008). Cette dernière recommande un remplacement ou une réduction de l'emploi du bromure de méthyle en tant que mesure phytosanitaire. Les ONPV devront encourager à promouvoir l'utilisation du traitement thermique approuvé par la norme.

On commence par définir le produit concentration-temps (CT), il s'agit de la somme des produits de la concentration (g/m^3) et du temps (h) pendant 24 heures. Les matériaux d'emballage en bois doivent être traités par fumigation au bromure de méthyle conformément à un programme permettant d'atteindre le produit concentration-temps minimal (CT) sur 24 heures, à la température et à la concentration finale résiduelle spécifiées dans le tableau 1.1. Ce CT doit être obtenu jusqu'au cœur du bois, bien que les concentrations soient mesurées dans l'atmosphère ambiante. La température minimale du bois et de l'atmosphère environnante ne doit pas être inférieure à 10 °C et la durée d'exposition minimale ne doit pas être inférieure à 24 heures. Le contrôle des concentrations de gaz doit être effectué au minimum après 2, 4 et 24 heures. En cas de

temps d'exposition plus long à des concentrations plus faibles, une mesure supplémentaire devrait être relevée à la fin de la fumigation.

Table 1.1 CT minimal sur 24 heures pour les matériaux d'emballage en bois traités par fumigation au bromure de méthyle (Normes Internationales pour les Mesures Phytosanitaires, 2009)

Température	CT (g.h/m ³) pendant 24 heures	Concentration finale minimale (g/m ³) au bout de 24 heures
21°C ou plus	650	24
16°C ou plus	800	28
10°C ou plus	900	32

1.1.3.2 Traitement thermique

Le matériau d'emballage en bois doit être chauffé selon une matrice temps/température précise permettant d'assurer une température minimale de 56 °C pendant une durée ininterrompue d'au moins 30 minutes dans la pièce du bois (y compris en son cœur). Pour respecter cette exigence, divers procédés de mesure de la température dans le cœur du bois ont été mis en œuvre. La plupart d'entre eux utilisent un dispositif basé sur l'introduction de sondes directement dans le cœur du bois, ce qui est préjudiciable du point de vue de la gestion de l'appareil industriel.

Plusieurs sources d'énergie ou procédés peuvent convenir pour atteindre ces paramètres. Par exemple, le séchage à l'étuve, l'imprégnation chimique sous pression favorisée par la chaleur, les micro-ondes ou d'autres traitements peuvent tous être considérés comme des traitements thermiques dans la mesure où ils répondent aux paramètres stipulés dans la présente norme (Normes Internationales pour les Mesures Phytosanitaires, 2009).

1.1.4 Enjeux des réglementations en vigueur et à venir

Comme mentionné précédemment, la norme NIMP 15 a approuvé seulement deux traitements phytosanitaires. Le traitement chimique par fumigation au bromure de méthyle et le traitement thermique. Le premier est en voie de disparition en raison de son effet néfaste sur la couche d'ozone (Henin *et al.*, 2008). Le second traitement présente plusieurs inconvénients (Henin *et al.*, 2008):

- Ce procédé exige une utilisation exhaustive d'énergie qui dégage une quantité importante de monoxyde de carbone (CO₂) (parfois l'énergie est produite par une unité de cogénération) et qui est coûteux. Lallemand (2004) a estimé que le coût de ce traitement pour les palettes de bois dépasse les 2\$ par unité.
- La durée du traitement qui est trop longue et nécessite plusieurs heures.
- L'efficacité du traitement peut être spatialement hétérogène et n'est pas toujours sûr pour l'ensemble du lot traité.
- Le contrôle du procédé est difficile (problème de traçabilité).

Par conséquent, l'identification d'autres alternatives pour le traitement phytosanitaire est nécessaire (Henin *et al.*, 2008). En effet, différentes approches ont été testées et proposées comme le traitement sous vide, le traitement à bain d'eau chaude, l'utilisation du bois reconstitué (Henin *et al.*, 2008) ou le traitement par micro-ondes. Durant les dernières décennies, plusieurs études ont été conduites sur l'efficacité des micro-ondes pour la désinfestation du bois (Fleming *et al.*, 2003 ; Fleming *et al.*, 2004 ; Nzokou *et al.*, 2008). Plusieurs appareils portatifs de micro-ondes pour la désinfestation de bois ont été récemment brevetés aux États-Unis. En 2009, la NIMP 15 a subi une révision qui approuve le traitement thermique par micro-ondes comme l'une des méthodes qui peuvent être approchées à condition qu'elle réponde aux paramètres stipulés dans la norme (Normes Internationales pour les Mesures Phytosanitaires, 2009).

Ces différentes méthodes présentent chacune des avantages et des inconvénients qu'il faut surmonter afin d'approuver ces méthodes selon la norme NIMP 15. Dans ce sens et jusqu'aujourd'hui, plusieurs incertitudes sont exposées quant à l'efficacité du traitement thermique par micro-ondes, c'est pour cette raison que plusieurs recherches sont nécessaires afin de prouver les avantages de ce traitement (IPPC, 2011).

1.2 Propriétés du bois

Le bois est un matériau particulier dont les propriétés varient en fonction de différents facteurs. Les arbres étant des êtres naturels, vivants et très diversifiés, les propriétés du bois varient également selon le type d'essence, les conditions de croissance et le taux d'humidité. Le bois est considéré comme étant un matériau anisotrope, c'est-à-dire que ses propriétés physiques et mécaniques varient selon les différentes directions (Bowyer *et al.*, 2005).

Pour être en mesure de traiter le bois d'emballage et en particulier les palettes aux micro-ondes, il est primordial de connaître les propriétés physiques et mécaniques du bois.

1.2.1 Propriétés physiques

1.2.1.1 Teneur en humidité

L'aptitude que possède le bois à absorber l'humidité (hygroscopicité) est une caractéristique majeure de ce matériau. Lorsqu'il varie, le taux d'humidité provoque des changements dimensionnels du matériau (retrait et gonflement). L'humidité favorise également la présence des microorganismes qui sont responsables de la pourriture du bois (Bowyer *et al.*, 2005).

La teneur en humidité est le rapport exprimé en pourcentage de la masse de l'eau présente dans le bois sur la masse du bois anhydre (sec) (Bowyer *et al.*, 2005). Le bois est un matériau qui contient de l'eau sous deux formes. Lorsque la teneur en humidité

est maximale, il y a présence d'eau absorbée (eau liée) à l'intérieur des parois cellulaires ainsi que de l'eau libre contenue dans les vides à l'intérieur des cellules (lumens). Quand le bois sèche, c'est l'eau libre à l'intérieur des cavités cellulaires qui s'évapore en premier, jusqu'à l'obtention du taux d'humidité correspondant au point de saturation des fibres. Ce dernier se situe à une teneur en humidité d'environ 30 % pour la plupart des essences de bois. Au-delà de cette teneur en humidité, il ne se produit plus de changements dimensionnels (Bowyer *et al.*, 2005).

En dessous du point de saturation des fibres, le bois perd ou absorbe de l'humidité jusqu'à ce que la teneur en humidité soit en équilibre avec celle de l'air ambiant. À cette teneur en humidité d'équilibre, le bois ne gagne ni ne perd d'humidité tant qu'il est exposé à la même température et à la même humidité relative de l'air ambiant (Bowyer *et al.*, 2005).

1.2.1.2 Retrait et gonflement

Les variations dimensionnelles hydriques du bois sous l'effet de la sorption d'eau sont considérables (Zhang *et al.*, 2006). Les parois cellulaires du bois gonflent d'environ 45 % lors du passage de l'état anhydre à l'état de saturation des fibres (Skaar, 1988). En plus, le bois se dilate différemment selon ses directions principales. Ceci peut déformer et même fissurer les pièces en bois au cours du séchage ainsi que durant leurs utilisations dans des applications structurales. Parmi les méthodes les plus pratiques et économiques pour réduire le gonflement et le retrait lors des variations de l'humidité on peut citer l'application d'enduits résistants à l'eau à l'extérieur et à l'intérieur du bois, les traitements chimiques pour désactiver les sites OH et les traitements chimiques avec des polymères, remplissant la paroi de la cellule et/ou le lumen.

1.2.1.3 La masse volumique et la densité relative

La densité relative est définie comme le rapport entre la masse complètement sec d'un échantillon (la masse à l'état anhydre) et la masse du volume d'eau égal au volume

de l'échantillon soit à l'état vert (densité basale), soit séché à l'air ambiant (densité nominale) ou complètement sec (densité anhydre). Le bois est un matériau hygroscopique qui peut changer de poids et de volume en fonction des pertes et des gains d'humidité (Bowyer *et al.*, 2005). La densité est la plus importante propriété physique du bois. En réalité, elle est en étroite relation avec la plupart des propriétés mécaniques du bois, la transmission de la chaleur dans le bois et la quantité de la chaleur qu'il dégage sont proportionnelles à la densité du bois (Bowyer *et al.*, 2005 ; Koubaa *et al.*, 2006).

La masse volumique est définie comme le rapport de la masse au volume. L'unité généralement utilisée pour cette propriété est le kilogramme par mètre cube (kg/m^3).

1.2.2 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques du bois caractérisent la rigidité et la résistance du bois face aux forces qui tendent à le déformer. En effet, le bois est un solide déformable qui réagit à l'application des charges en se déformant sous leurs effets (Bowyer *et al.*, 2005).

1.2.2.1 Élasticité

L'élasticité est la propriété qu'ont la plus part des matériaux comme le bois et qui leur permettent de reprendre leur forme ou leurs dimensions initiales lorsque la charge causant la déformation est enlevée. Ceci a lieu lorsque qu'on est en dessous de la limite proportionnelle ou élastique. Autrement, une partie de la déformation sera permanente, même après enlèvement de la charge. La limite proportionnelle est un paramètre indispensable pour distinguer le comportement élastique du comportement plastique. La courbe contrainte-déformation (Figure 1.1) permet de définir le module d'élasticité MOE ou module d'Young. Celui-ci n'est valable que jusqu'à la limite proportionnelle.

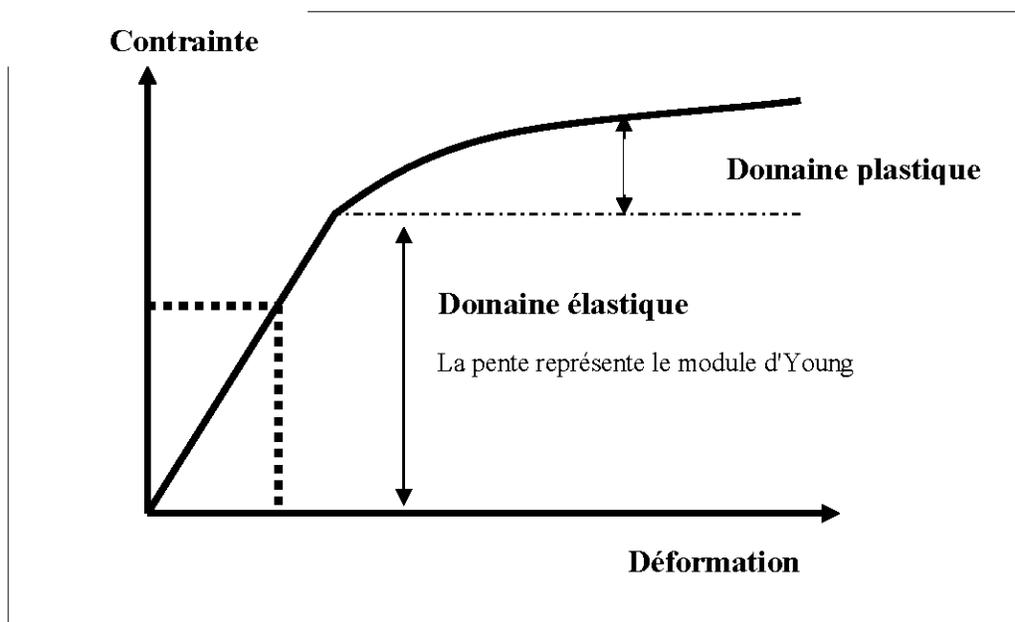


Figure 1.1 Courbe contrainte-déformation du bois

Dans le cas des essais de compression et de traction, on parle de module d'Young pour le différencier du module d'élasticité déterminé à l'aide d'un essai de flexion. La contrainte de rupture est l'effort maximal que peut supporter une pièce, à ce moment-là, la déformation du bois est permanente et il n'y a plus de retour possible.

Les propriétés élastiques du bois sont sensibles à la variation de son état physique. Parmi les influences physiques, les paramètres principaux sont la densité, la teneur en humidité et la température. Lors du séchage du bois, l'influence de la température et de la teneur en humidité sur le comportement mécanique du bois est très marquée. La complexité du comportement du bois est multipliée par les variations de ses propriétés mécaniques avec la température et la teneur en humidité et l'interaction entre elles. Plusieurs travaux ont été effectués sur ce sujet (Thunell 1941, Sulzberger 1953, Byvshykh 1960, Kollmann et Côté 1968, Bodig et Goodman 1973, Gerhards 1982, Bazant 1985, Koponen et al. 1991) dans (Bowyer *et al.*, 2005) et (Moutee *et al.*, 2007).

1.2.2.2 Influence de la densité sur les propriétés mécaniques du bois

L'influence de la densité sur les propriétés mécaniques du bois a été observée depuis longtemps. Ylinen (1942) et Bodig et Jayne (1982) ont mis en évidence que le module d'Young est fortement dépendant de la densité du bois. Bodig et Jayne (1982) relie les propriétés mécaniques à la densité du bois par la formule suivante:

$$Y = aD^b \quad [1.1]$$

Où Y est la propriété élastique, D est la densité du bois, a et b sont des constantes données dans des tables pour chaque espèce de bois.

Des études sur l'effet de la densité sur la limite d'élasticité montrent que la limite d'élasticité augmente proportionnellement avec la densité et que la relation entre ces deux paramètres peut être représentée par une fonction linéaire (Bodig *et al.*, 1981).

1.2.2.3 Influence de la température et de la teneur en humidité sur les propriétés mécaniques du bois

La résistance du bois est affectée par la teneur en humidité au-dessous du PSF (point de saturation des fibres) et la température. La température est un paramètre physique très important qui conditionne le comportement mécanique du bois. Thunell (1941) a publié une courbe montrant la diminution du module d'élasticité en fonction de l'augmentation de la température entre - 20°C et 50°C. L'étude la plus détaillée de cette période est celle de Sulzberger (1953). Les résultats obtenus montrent que de façon générale, les modules E de plusieurs espèces diminuent lorsque la température augmente. L'auteur y proposait de représenter la relation entre la température et le module d'élasticité comme suit:

$$E_2 = E_1[1 - \alpha(T_2 - T_1)] \quad [1.2]$$

Où : E_i est le module d'élasticité à la température T_i ($i = 1, 2$) et α une constante.

Hearmon (1948) remarquait qu'il est juste de présumer un lien linéaire entre le module d'élasticité et la différence de température tel que présenté à l'équation 1.2. Sano (1961) a observé la même tendance suite à des essais expérimentaux sur différentes espèces de bois et a utilisé l'équation 1.2 pour toutes les composantes de la matrice de complaisance. Le travail expérimental de Hisada (1981a) traitant de l'influence de la température sur les propriétés mécaniques conclut à une relation linéaire de la forme de l'équation 1.2. La même tendance a été rapportée par Gerhards (1982) qui a réalisé une synthèse des différentes études sur l'effet de la température et de la teneur en humidité sur les propriétés élastiques de différentes espèces (Guitard, 1987).

Au cours du séchage, la variable la plus importante est la teneur en humidité, particulièrement pour les valeurs comprises entre l'état anhydre et le point de saturation des fibres (PSF) puisqu'elle a un effet important sur les caractéristiques élastiques ainsi que la limite d'élasticité du bois. Par exemple, le module d'élasticité à la teneur en humidité de 25% peut être deux fois plus faible qu'à 12% H. La figure 1.2.2.2 illustre l'allure générale de l'effet de la teneur en humidité sur le module d'élasticité en direction tangentielle de différentes espèces.

Dans le cas unidimensionnel, Takemura (1972) et Kawai et al. (1979) ont étudié l'effet de la teneur en humidité sur les propriétés mécaniques du bois. Ils ont exprimé le module d'Young sous forme d'une fonction linéaire de la teneur en humidité comme suit :

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 - c\mathbf{H} \quad \text{avec } \mathbf{H} < \mathbf{H}_{\text{psf}} \quad [1.3]$$

Où E_0 le module d'élasticité du bois à l'état anhydre; H est la teneur en humidité et c une constante.

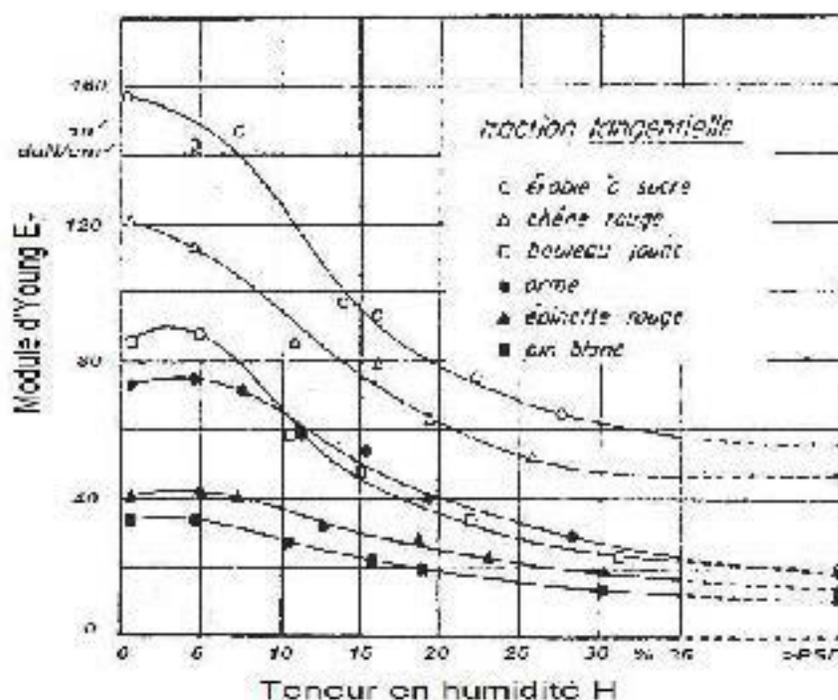


Figure 1.2 Évolution du module d'Young en fonction de la teneur en humidité (Goulet et al., 1968)

1.2.3 Propriétés diélectriques complexes

Le traitement par micro-ondes comporte plusieurs phénomènes physiques complexes, y compris l'absorption de l'énergie électromagnétique, le transport de la chaleur produite, le transport de l'eau à travers le bois et les changements dans les dimensions du bois. Pour un traitement efficace du bois à micro-ondes, il faut comprendre ces différents phénomènes. La variation des propriétés diélectriques du bois contribue à la compréhension de la structure moléculaire du bois, l'interaction entre le bois et l'eau et permet le calcul du taux d'énergie déposé par les micro-ondes. Les propriétés diélectriques du bois ont été étudiés sur une large gamme de fréquences, en utilisant plusieurs méthodes tel que la technique de mesure des perturbations de cavité (Koubaa et al., 2008).

Le paramètre électrique qui définit l'interaction du bois avec les champs magnétiques comme les micro-ondes, est la constante diélectrique ϵ^* . Ce paramètre est

constitué de deux composantes comme mentionné dans l'équation qui suit (Koubaa *et al.*, 2008):

$$\boldsymbol{\varepsilon}^* = \boldsymbol{\varepsilon}' - i\boldsymbol{\varepsilon}'' \quad [1.4]$$

Où $\boldsymbol{\varepsilon}'$ est la permittivité relative, elle représente la capacité du matériau d'emmagasiner l'énergie électrique. $\boldsymbol{\varepsilon}''$ est une composante imaginaire, soit l'absorption du matériau qui correspond aux pertes diélectriques dans le matériau, c'est-à-dire à sa capacité à dégrader l'énergie électromagnétique en chaleur.

L'angle de polarité est un autre paramètre important dans le traitement phytosanitaire du bois par les micro-ondes. Il s'agit de la tangente des pertes ($\tan\delta$) et il est calculé suivant la relation suivante (Koubaa *et al.*, 2008) :

$$\tan\delta = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}''}{\boldsymbol{\varepsilon}'} \quad [1.5]$$

La permittivité relative et la tangente des pertes varient en fonction de l'essence du bois, sa densité, sa teneur en humidité initiale, la direction du fil du bois et la fréquence du champ électrique appliqué. Lorsqu'une onde électromagnétique rencontre un milieu diélectrique (onde incidente verticalement dans la direction z), une partie de cette onde est réfléchiée et l'autre partie généralement plus importante y pénètre. L'énergie de cette onde est transformée en énergie calorifique et diminue au fur et à mesure que l'onde pénètre dans le matériau. La puissance transmise diminue exponentiellement selon la relation suivante (Koubaa *et al.*, 2008):

$$P_{\text{trans}}(z) = P_{\text{trans}}(z = 0)e^{-2\alpha z} \quad [1.6]$$

La constante d'atténuation α influe fortement sur le pouvoir d'absorption du bois. Cette constante peut être exprimée de la manière suivante (Koubaa *et al.*, 2008) :

$$\alpha = \frac{2 \times \pi \times f}{2,998 \times 10^8} \times \sqrt{\frac{\boldsymbol{\varepsilon}'}{2} \left[\sqrt{(1 + (\tan\delta)^2)} - 1 \right]} \quad [1.7]$$

Où $P_{trans}(z)$ est la puissance transmise par la surface dans la direction z (W/m^2), $P_{trans}(z = 0)$ est la puissance à la surface du matériau dans la direction z (W/m^2), f est la fréquence d'onde (MHz), α est la constante d'atténuation et z est la distance à partir de la surface du matériau (m).

Le terme le plus important et le plus significatif est la profondeur de pénétration, il représente la distance de la surface du matériau à partir duquel la puissance descend à une valeur définie (la distance à partir de laquelle ~63% de la puissance initialement transmise est dissipée sous forme de chaleur). Il est défini comme suit (Koubaa *et al.*, 2008):

$$d_p = \frac{1}{2\alpha} \quad [1.8]$$

Où d_p est exprimé en cm. À une valeur précise de fréquence 2,45 GHz, cette relation devient :

$$d_p = 1,974 \frac{\sqrt{\epsilon'}}{\epsilon} \quad [1.9]$$

On définit ensuite la puissance absorbée par unité de volume de bois (W/m^3) sous l'influence d'un champ magnétique comme suit (Koubaa *et al.*, 2008):

$$P_{abs} = \frac{1}{2} \omega \times \epsilon_0 \times \epsilon'' \times E_p^2 \quad [1.10]$$

Où ω est la fréquence angulaire ($2\pi f$, radian/s), ϵ_0 est la constante diélectrique dans le vide ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m), E_p est l'intensité maximale du champ électromagnétique (V/m).

1.2.3.1 Constante diélectrique

Les figures 1.3 et 1.4 présentent la variation de la permittivité relative (ϵ') diélectrique et la perte diélectrique (ϵ'') du bois de quatre en fonction de la teneur en humidité. Ces illustrations montrent que la constante diélectrique augmente linéairement

avec l'augmentation de la teneur en humidité. Cet effet est observé pour l'ensemble des essences étudiées (Koubaa *et al.*, 2008).

Les figures 1.5 à 1.6 présentent la variation de la constante diélectrique du bois du peuplier faux tremble en fonction de la fréquence des micro-ondes et la teneur en humidité initiale du bois. D'une façon générale, ϵ' tend à diminuer légèrement avec l'augmentation de la fréquence des micro-ondes (Koubaa *et al.*, 2008).

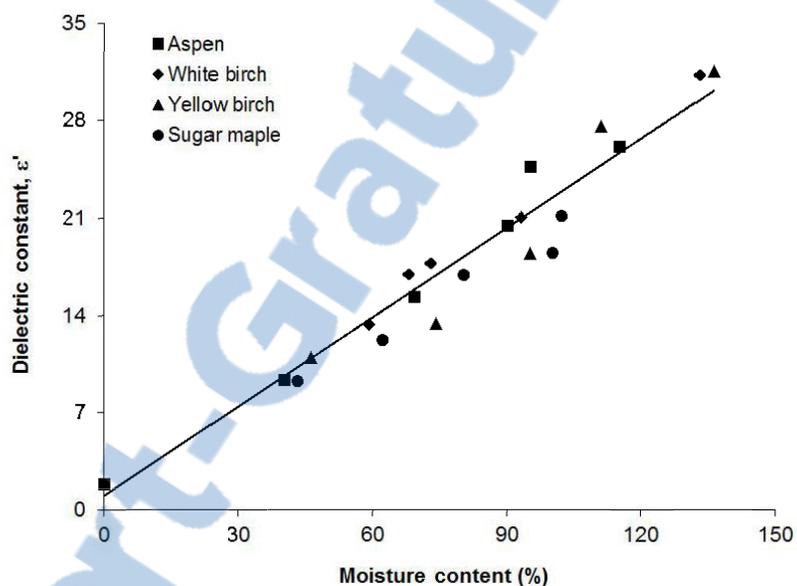


Figure 1.3 Variation de la constante diélectrique ϵ' du peuplier faux tremble, du bouleau blanc, du bouleau jaune et de l'érable à sucre en fonction de la teneur en humidité, mesurée à une température constante 24°C et une fréquence de 2,47GHz (Koubaa *et al.*, 2008)

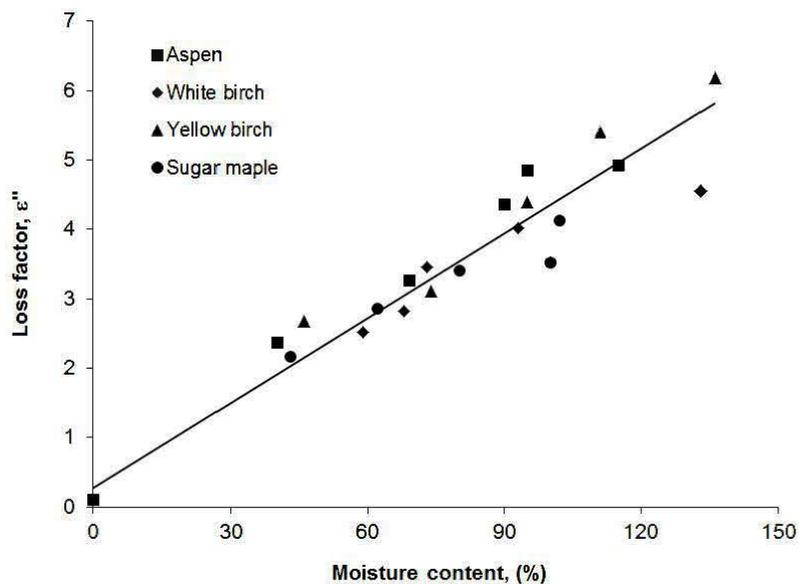


Figure 1.4 Variation du facteur de perte ϵ'' du peuplier faux tremble, du bouleau blanc, du bouleau jaune et de l'érable à sucre en fonction de la teneur en humidité, mesurée à une température constante 24°C et une fréquence de 2,47GHz (Koubaa et al., 2008)

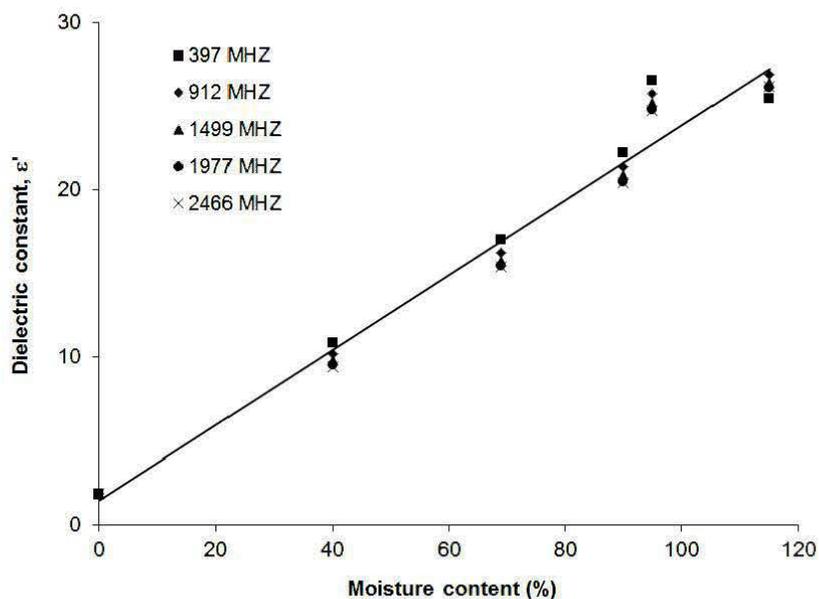


Figure 1.5 Variation de la permittivité relative ϵ' du peuplier faux tremble en fonction de la teneur en humidité et de la fréquence, mesurée à une température constante 24°C (Koubaa et al., 2008)

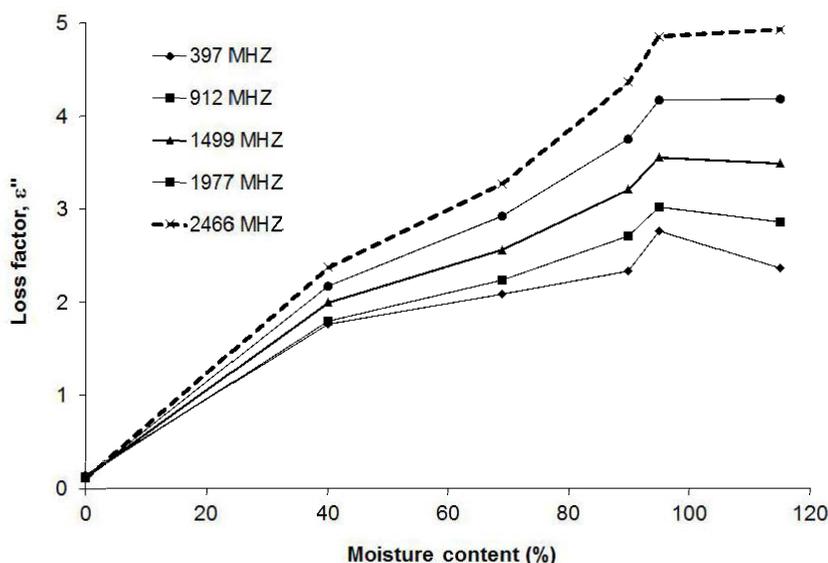


Figure 1.6 Variation du facteur de perte ϵ'' du peuplier faux tremble en fonction de la teneur en humidité et de la fréquence, mesurée à une température constante 24°C (Koubaa et al., 2008)

La variation de la permittivité relative du bois en fonction de la température initiale du bois est à une fréquence de 2,47 MHz est présentée à la figure 1.7 pour quatre essences de bois. Pour le peuplier faux-tremble, la permittivité relative n'a pas varié en fonction de la température. Pour les autres essences, la permittivité relative est plus faible pour le bois gelé, ce qui indique qu'il y a moins d'énergie emmagasinée que dans le bois non gelé. La figure 1.7 montre aussi la variation de la permittivité relative entre les essences. La complexité de la structure anatomique des bois feuillus et les différences de densité pourraient expliquer ces variations de (Koubaa et al., 2008).

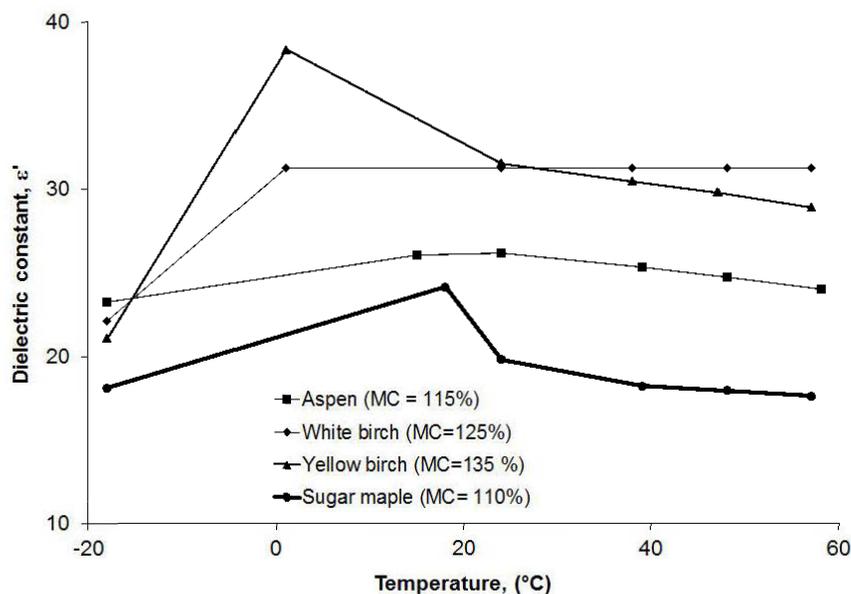


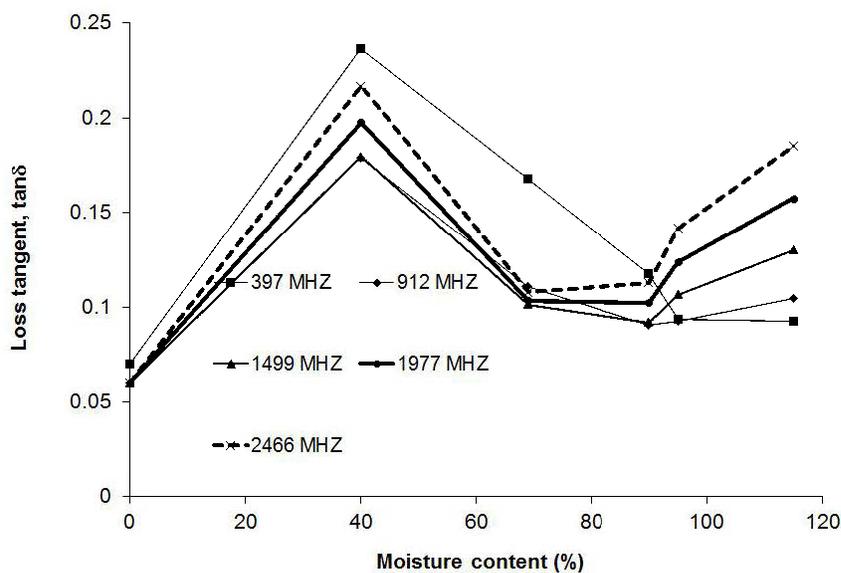
Figure 1.7 Variation de la constante diélectrique ϵ' en fonction de la température initiale et l'essence du bois à une même fréquence (2,47MHz) (Koubaa et al., 2008)

1.2.3.2 Angle de polarité

La figure 1.8 présente la variation de la tangente des pertes (angle de polarité) du peuplier faux tremble en fonction de la fréquence des micro-ondes et de la teneur en humidité initiale du bois. La tangente des pertes diminue avec l'augmentation de la teneur en humidité à partir d'une teneur en humidité de 40 %. Cet effet est observé pour toutes les fréquences. Par ailleurs, une fréquence plus élevée entraîne une augmentation de la tangente des pertes. La figure 1.9 présente la variation de la tangente des pertes avec la teneur en humidité et l'essence du bois pour une même fréquence et une même température. Cette illustration indique que cette propriété varie aussi en fonction de l'essence du bois (Koubaa et al., 2008).

La figure 1.10 indique aussi que la tangente des pertes varie en fonction de la fréquence et de la température initiale du bois, et elle est plus élevée quand le bois est à l'état gelé. Ce résultat suggère qu'il y a plus de pertes au niveau de la puissance du

champ électrique quand la température initiale est plus basse. Ce résultat est intéressant dans le sens où il serait recommandé de conditionner le bois à une température ambiante, surtout l'hiver, pour minimiser les pertes énergétiques lors du traitement aux micro-ondes (Koubaa *et al.*, 2008).



*Figure 1.8 Variation de la tangente des pertes ($\tan\delta$) du peuplier faux tremble en fonction de la teneur en humidité et la fréquence à une température constante (24°C) (Koubaa *et al.*, 2008)*

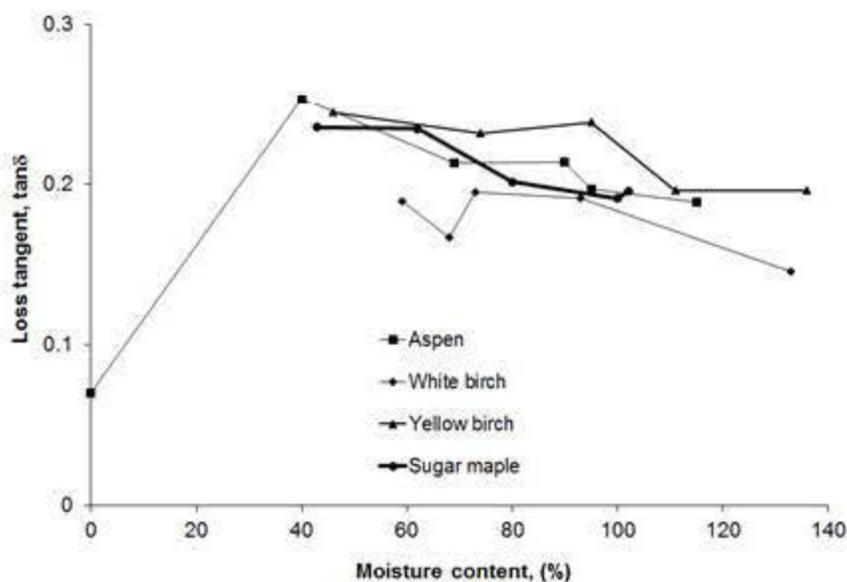


Figure 1.9 Variation de la tangente des pertes ($\tan\delta$) en fonction de la teneur en humidité et de l'essence à une température constante (24°C) et une fréquence constante (2,47 GHz) (Koubaa et al., 2008)

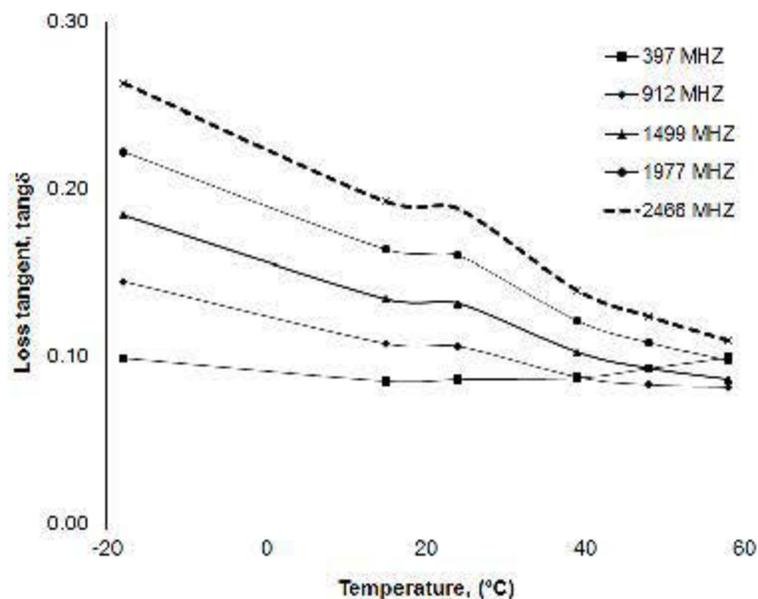


Figure 1.10 Variation de la tangente des pertes ($\tan\delta$) du peuplier faux tremble en fonction de la température initiale et la fréquence à une même teneur en humidité (115%) (Koubaa et al., 2008)

1.2.3.3 Profondeur de pénétration

La figure 1.11 présente la variation de la profondeur de pénétration du peuplier faux tremble en fonction de la fréquence du traitement aux micro-ondes et de la teneur en humidité. Cette illustration indique que la profondeur de pénétration diminue avec l'augmentation de la teneur en humidité. D'autre part, nous remarquons que la fréquence a un effet sur la profondeur de pénétration. Généralement, quand la teneur en humidité est faible, la profondeur de pénétration est élevée. Le peuplier faux tremble se démarque des autres essences, particulièrement au niveau d'une teneur en humidité nulle. Les variations entre les autres essences sont minimales (Koubaa *et al.*, 2008).

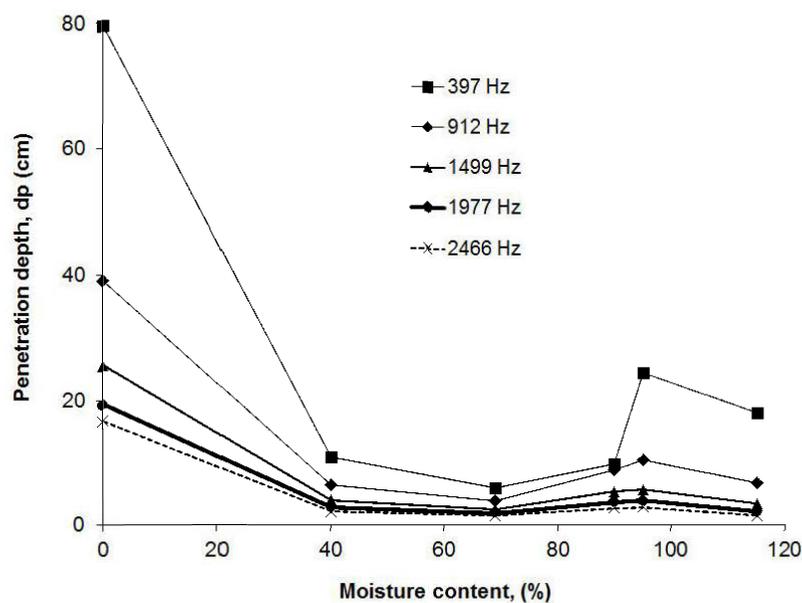


Figure 1.11 Variation de la profondeur de pénétration du peuplier faux tremble en fonction de la teneur en humidité et la fréquence (température constante à 24°C) (Koubaa et al., 2008)

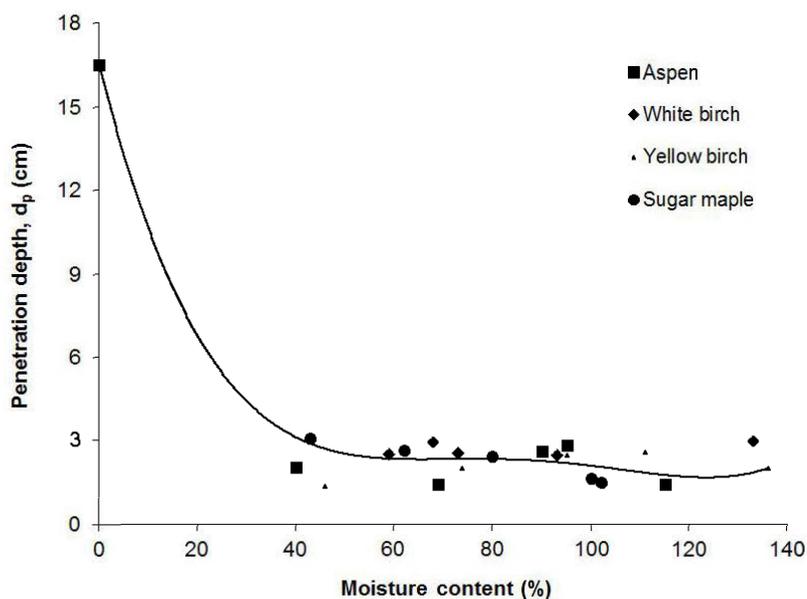


Figure 1.12 Variation de la profondeur de pénétration en fonction de la teneur en humidité et de l'essence à une température constante (24°C) et une fréquence constante (2,47 GHz) (Koubaa et al., 2008)

1.3 Traitement phytosanitaire par micro-ondes

Les micro-ondes sont utilisées pour des applications commerciales comme les céréales, le séchage des revêtements, la transformation des aliments, les produits pharmaceutiques et la vulcanisation du caoutchouc. Cependant, leur utilisation dans l'industrie du bois est limitée. Plusieurs chercheurs ont étudié le potentiel des micro-ondes tant pour le séchage que pour le traitement phytosanitaire du bois. La technologie des micro-ondes a présenté plusieurs avantages selon les recherches déjà appliqués :

- La désinfestation du bois vert est achevée dans quelques dizaines de secondes et pourrait être réduite à quelques secondes ce qui est le cas pour le bois sec (Fleming *et al.*, 2003).

- Toutes les espèces non indigènes peuvent être détruites avec une application d'une puissance adéquate des micro-ondes (Fleming *et al.*, 2004).
- Un traitement sécuritaire (avantage pour la main d'œuvre).
- Chaque composant peut être facilement étiqueté si un marqueur automatique est couplé avec le four à micro-ondes.

Malgré tous ses avantages, la normalisation de cette méthode a été accompagnée de plusieurs incertitudes quant à l'efficacité d'un tel traitement. Plusieurs problèmes restent à résoudre tels que :

- Une preuve expérimentale sur la nature des espèces envahissantes éliminées à travers ce traitement (y compris les insectes, les champignons et les nématodes) et des données statistiques sur l'efficacité du traitement sont encore en cours de validité.
- La recherche d'un paramètre physique facilement mesurable qui permet le suivi de l'efficacité d'un tel traitement tel que la teneur en humidité ou la masse volumique.

Etant donné que la marge bénéficiaire des matériaux d'emballage en bois est relativement faible, un calcul de la durée du traitement et de l'énergie introduite est nécessaire pour ne pas provoquer une surconsommation d'énergie et pour éviter les risques associés à l'endommagement du bois.

En dépit des résultats encourageants, des efforts doivent maintenant être consacrés à une évaluation complète de l'efficacité du traitement aux micro-ondes. Il faut évaluer l'influence de plusieurs paramètres tels que l'épaisseur et la teneur en humidité de la planche, la densité, la puissance des micro-ondes, la charge de four et la vitesse du convoyeur. En d'autres termes, il faut généraliser et prouver que la température de surface garantit des taux de mortalité de 100 % quel que soit l'essence des planches et les caractéristiques du séchoir (Henin *et al.*, 2008).

L'irradiation aux micro-ondes a l'avantage de permettre un traitement individuel des planches. L'efficacité du traitement peut être plus homogène comparée à la fumigation ou au traitement thermique, et la consommation d'énergie pourrait être optimisée ainsi. En outre, ce traitement rapide permet son intégration dans une chaîne de production de palette de bois équipée d'un four à micro-ondes sans une interruption du procédé.

Parmi les dernières étapes de la mise en œuvre du traitement aux micro-ondes, la rentabilité de ce processus devrait être évaluée.

1.3.1 Séchage aux micro-ondes

Le séchage aux micro-ondes est intéressant dans l'application de nombreux processus industriels. En effet, ce séchage permet de gagner beaucoup de temps comparativement au séchage conventionnel dans les fours qui nécessite plusieurs heures de traitement afin d'atteindre les objectifs en termes de qualité et teneur en humidité finale du bois. Le séchage dans les fours conventionnels nécessite une énorme consommation d'énergie afin de transporter l'eau du centre des pièces vers la surface. Cependant, le séchage aux micro-ondes permet un transport rapide et facile de l'eau de l'intérieure de la pièce vers la surface de celle-ci (Resch, 2009).

L'un des avantages des micro-ondes est la possibilité d'atteindre une intensité élevée de chauffage. Par contre, les micro-ondes ont une difficulté de pénétrer le bois et d'assurer un chauffage uniforme dans la pièce de bois. La profondeur de pénétration diminue avec l'augmentation de la densité du bois. La distribution de la température devient non uniforme lorsque la profondeur de pénétration est inférieure aux dimensions de la pièce de bois chauffée. De plus, en raison de l'intensité élevée de chauffage, des mesures de sécurité devront être prises en considération afin de limiter la pression au sein de la pièce de bois pour éviter la rupture de celle-ci. Un control du processus est

nécessaire afin d'optimiser le fonctionnement du chauffage aux micro-ondes des pièces de bois (Resch, 2009).

1.3.2 Efficacité des micro-ondes sur les micro-organismes

L'utilisation de l'irradiation par micro-ondes pour éliminer les insectes infestant le bois utilisé pour la fabrication de matériaux d'emballage tels que les palettes et les caisses d'emballage a été évaluée. Le traitement par micro-ondes des échantillons de bois dans les laboratoires a confirmé la mortalité du longicorne asiatique (*Anoplophora glabripennis*) (Fleming *et al.*, 2003). L'irradiation par les micro-ondes est aussi efficace pour éradiquer les termites et les larves de coléoptères dans le bois (Burdette *et al.* 1975, Jiang *et al.* 1991, Andreuccetti *et al.* 1994, Lewis *et al.* 2000) dans (Fleming *et al.*, 2004).

Pour déterminer la faisabilité de l'irradiation par les micro-ondes comme un traitement de substitution du traitement thermique, Fleming (2003) et ses collaborateurs ont effectué des expériences en laboratoire sur des échantillons de 10,16 x 10,16 x 10,16 cm (4x4x4 pouces) et 10,16 x 10,16 x 2,7 cm (4x4x1 pouces) de bois infestés artificiellement avec des larves vivantes (le longicorne asiatique) sous une fréquence d'irradiation de 2,45 GHz (Fleming *et al.*, 2003). Les températures générées à la fois par le traitement des micro-ondes et celui des fours conventionnels ont été enregistrées. Les résultats expérimentaux pour le peuplier faux-tremble, le pin blanc, le pin rouge et le pin à encens ont montré que les gradients de température ne sont pas conformes pendant de courtes périodes d'irradiation (<3 min). Cependant, tous les points de mesure ont atteint 60°C dans une durée de 0,5 à 5 minutes d'irradiation, comparativement à 70 à 123 minutes avec le traitement thermique conventionnel pour les échantillons de 10,16 x 10,16 x 10,16 cm; pour les échantillons de 10,16 x 10,16 x 2,7 cm, les temps étaient de 15 à 60 secondes avec le traitement à micro-ondes, contre 21 à 160 minutes avec le traitement conventionnel.

1.3.3 Cinétique de chauffage aux micro-ondes

Les études expérimentales pour évaluer la cinétique de chauffage sont très rares. Cependant, ces études ont prouvé que l'augmentation de la température au centre des pièces de bois est assez rapide. Une étude expérimentale faite sur des échantillons de 100 mm de longueur et 14 mm d'épaisseur de l'érable à sucre et du peuplier faux-tremble a montré que la température atteigne une valeur égale ou supérieure à 60 °C après seulement un traitement de 50 secondes aux micro-ondes (Figure 1.13). D'une autre part, cette étude a montré aussi que la température varie au centre des pièces de bois en fonction de la température initiale. Plus la température initiale est élevée, plus la température de 56 °C exigée par les normes phytosanitaires est atteinte rapidement (Figure 1.14). La même étude a montré aussi que pour atteindre une teneur en humidité de 20%, le temps de traitement aux micro-ondes est de l'ordre de 50 secondes pour le bois qui présente une teneur en humidité initiale de 25 à 30% (Figure 1.15). Alors que ce temps dépasse les 300 secondes quand la teneur en humidité est supérieure à 80% (Koubaa et al., 2006).

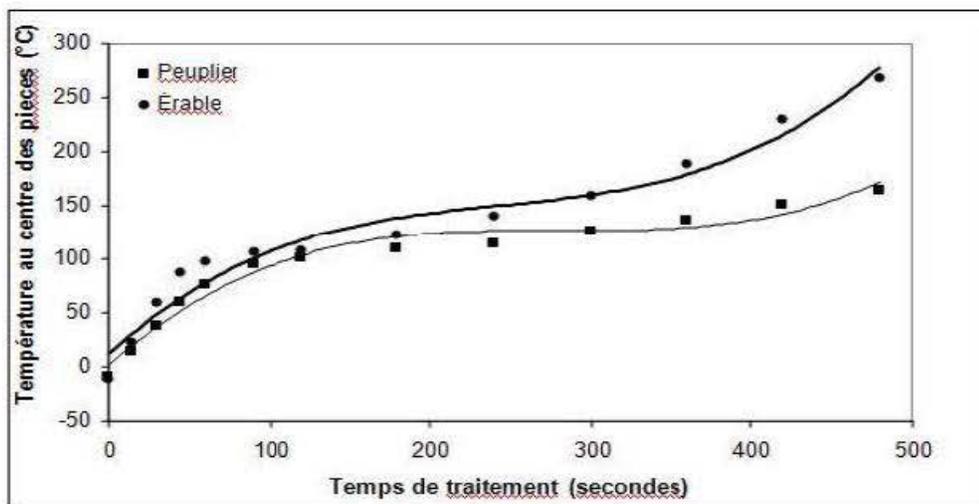


Figure 1.13 Évolution de la température au centre des pièces en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes des pièces de 14 mm d'épaisseur pour le bois de l'érable à sucre et du peuplier faux-tremble (Koubaa et al., 2006)

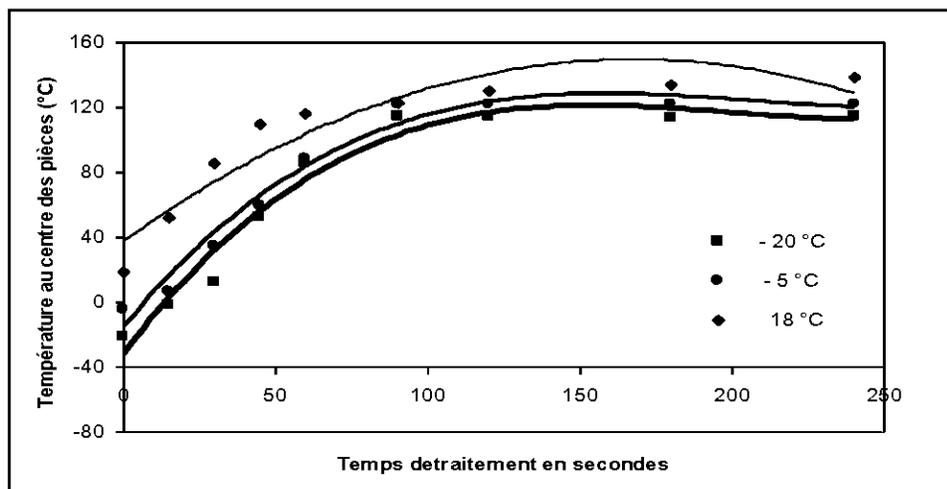


Figure 1.14 Évolution de la température au centre des pièces en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes du bois de peuplier faux-tremble de 30 mm d'épaisseur à trois températures initiales différentes (Koubaa et al., 2006)

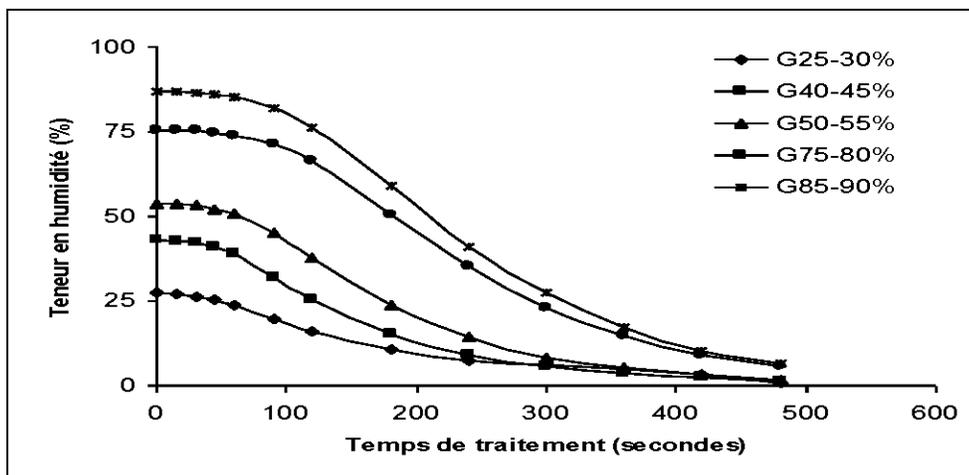


Figure 1.15 Évolution de la teneur en humidité en fonction du temps de traitement aux micro-ondes pour différentes teneurs en humidité initiale (Koubaa et al., 2006)

Une autre étude a montré que le contrôle de la température au centre des pièces de bois traitées aux micro-ondes est possible, et que l'évolution de la température puisse être contrôlée aussi. En effet, le but de cette étude était de voir la dispersion de la température dans les pièces de bois en contrôlant la température au centre des pièces.

L'étude expérimentale était faite sur des échantillons de bois du frêne ($25\text{mm} \times 25\text{mm} \times 350\text{mm}$) pour trois différentes classe d'humidité (20%, 35% et 80-120%). Deux types de chauffage aux micro-ondes ont été appliqués, un chauffage lent et un autre rapide. Le premier permettait d'atteindre une température de 85 à 105°C au centre des pièces de bois après 24 secondes de traitement. Le deuxième permettait d'atteindre la même température après seulement 12 secondes de traitement (Studhalter *et al.*, 2009).

La figure 1.16 montre clairement que le chauffage aux micro-ondes est assez rapide et pourra atteindre des hautes températures après une courte durée de traitement. La figure 1.16 montre aussi que pour atteindre une température de 100°C au centre des pièces du bois de l'épinette noire, il faut un traitement aux micro-ondes d'une durée qui ne dépasse pas 2 minutes avec un four aux micro-ondes d'une puissance de 100 W (Perré, 2007).

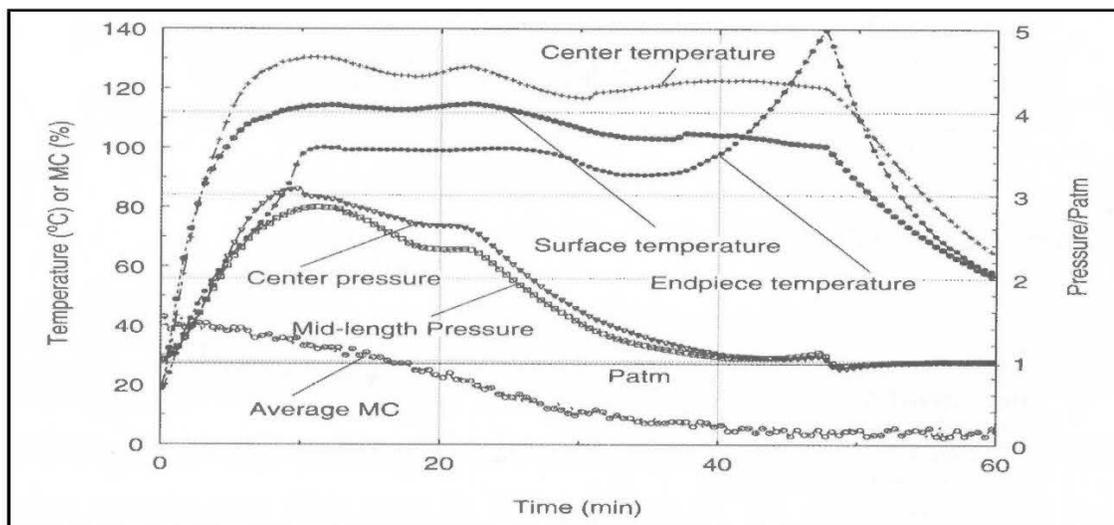


Figure 1.16 *Évolution de la température, de la pression atmosphérique et de la teneur en humidité lors du séchage aux micro-ondes du bois de l'épinette noire (Perré, 2007)*

Dans une étude expérimentale récente, Vongpradubchai et Rattanadecho (2011) ont traité la cinétique de chauffage du bois dans un dispositif expérimental combiné: un

four aux micro-ondes associé à l'air chaud. Les pièces de bois traitées avaient une température initiale et une teneur en humidité initiale de 28 °C et 90 %, respectivement. Le but de cette étude était de vérifier l'effet de trois paramètres sur la cinétique de chauffage de bois : la puissance du four aux micro-ondes, la température de l'air chaud et l'épaisseur des pièces de bois. Les résultats de cette étude ont montré que la vitesse de chauffage dépend fortement de la puissance du four aux micro-ondes et de la température de l'air chaud. En effet, la vitesse de chauffage augmente avec l'augmentation de celles-ci. L'effet de l'épaisseur de la pièce de bois est important aussi, les pièces de bois les plus épaisses (80 mm) sont capables d'absorber l'énergie électromagnétique pour une longue durée de chauffage comparativement aux pièces de bois les moins épaisses (50 mm). Ceci est expliqué par la quantité d'eau présente dans les pièces de bois, cette quantité est plus grande dans les pièces les plus épaisses (Vongpradubchai et Rattanadecho, 2011).

Les recherches antérieures ont montré que le chauffage du bois aux micro-ondes est assez rapide, et on peut atteindre une température élevée (> 60 °C) assez rapidement.

1.3.4 Effet du traitement aux micro-ondes sur les propriétés mécaniques du bois

D'après les recherches antérieures, le traitement aux micro-ondes du bois n'a pas d'effets appréciables sur les modules d'élasticité (MOE) et de rupture (MOR) en flexion simple. Une étude a été faite sur les propriétés mécaniques du bois après un traitement aux micro-ondes jusqu'à une teneur en humidité de 12 % a prouvé qu'il n'y a pas d'impacts sur les propriétés mécaniques du bois (Koubaa *et al.*, 2006). Ceci dit, un traitement thermique qui répond aux exigences de la réglementation sur le traitement phytosanitaire ne devrait pas entraîner un effet négatif sur les propriétés mécaniques du bois.

Dans une étude de comparaison entre le séchage traditionnel dans les fours conventionnels et le séchage aux micro-ondes (Antti *et al.*, 2001), le traitement au four

conventionnel donne un module d'élasticité (MOE) lors d'un essai de traction inférieur à celui fait aux micro-ondes de 2 à 50 %, alors que le module de rupture est de 5 % inférieur pour le traitement fait aux micro-ondes que celui fait au four conventionnel. Cependant, dans une autre étude de comparaison entre les mêmes types de séchage, les propriétés mécaniques du pin des caraïbes séché au four conventionnel lors d'un essai de traction étaient largement supérieures à celles du pin des caraïbes séché aux micro-ondes (Oloyede *et Groombridge*, 2000b). Dans la même étude, Oloyede et Groombridge (2000b) ont déclaré que la diminution des propriétés mécaniques du bois traité aux micro-ondes était de l'ordre de 60 % comparativement au chauffage conventionnel. Dans un autre article, ils ont mentionné que le résultat final aurait pu être meilleur si le traitement aux micro-ondes était contrôlé (Oloyede *et et Groombridge*, 2000a). Dans une troisième étude de comparaison entre les mêmes types de séchage, les propriétés mécaniques de l'épinette de la Norvège séchée au four conventionnel sont semblables à celles de la même essence du bois séchée aux micro-ondes pour une teneur en humidité finale de l'ordre de 12%. Par contre, si la teneur en humidité finale diminue en bas de 12%, les propriétés mécaniques du bois séché aux micro-ondes deviennent supérieures à celles du bois séché au four conventionnel (Hansson *et al.*, 2004).

Dans une autre étude faite sur le bois de chêne (Machado, 2006), le traitement aux micro-ondes affecte clairement les propriétés mécanique du bois lors d'un essai de compression parallèle. Cependant, il faut dire que l'exposition du bois aux micro-ondes n'était pas contrôlée, et ce manque de contrôle a affecté certainement les résultats (Antti *et al.*, 2001).

Il est évident que les recherches sur ce point ne sont pas très approfondies, ce qui nous oblige à établir plusieurs essais de traction, de flexion et de compression sur des échantillons séchés aux micro-ondes pour voir réellement la réaction du bois.

1.4 Objectifs et hypothèses de la recherche

L'analyse des travaux antérieurs a mis en évidence le fait que les traitements phytosanitaires actuels présentent plusieurs inconvénients. Ainsi, il est important d'évaluer le potentiel des nouvelles alternatives telles que le traitement aux micro-ondes. Dans ce sens, l'objectif général de notre travail est de vérifier le potentiel des micro-ondes pour le traitement phytosanitaire des produits d'emballage en bois. Les objectifs spécifiques du projet sont :

- Étudier l'évolution de la température et de la teneur en humidité dans le bois en fonction des paramètres du traitement aux micro-ondes.
- Évaluer l'impact du traitement aux micro-ondes sur les propriétés mécaniques du bois.

Les hypothèses du présent travail sont:

- Le traitement aux micro-ondes permet de respecter les exigences phytosanitaires de la convention internationale pour la protection des végétaux (CIPV).
- L'évolution de la température et de la teneur en humidité dans le bois traité aux micro-ondes est assez rapide.
- Le traitement aux micro-ondes n'a pas d'effets négatifs sur les propriétés mécaniques du bois.

CHAPITRE II

MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Matériel

Cette partie a pour but de définir les différents composants exploités dans l'élaboration des différents tests appliqués dans la partie expérimentale du projet. On procédera à définir les essences du bois utilisées dans le cadre de nos essais et les différents tests qu'on a appliqué dans le cadre de ce projet.

La matière première a été fournie sous forme de planches de bois de cinq essences différentes obtenues de la Scierie Bionor Inc. (Rouyn-Noranda, Québec, Canada) et de la compagnie Tembec (La Sarre, Québec, Canada). Les essences utilisées sont des essences feuillus et résineuses indigènes de l'Est du Canada utilisées pour la production de bois d'emballage notamment le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.), l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill) B.S.P.) , le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britt.), le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.) et l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.). Ce sont les essences généralement utilisées dans l'industrie de palettes de bois. Les planches étaient à l'état vert et avaient comme épaisseur 6,35 cm (2,5 pouce), 10,16 cm (4 pouce) de largeur et 2,44 m (8 pieds) de longueur. Un rabotage était nécessaire afin de les ramener à une épaisseur uniforme de 3,81 cm (1,5 pouce).

2.2 Méthodes

2.2.1 Traitement thermique aux micro-ondes

Afin de procéder au traitement thermique du bois aux micro-ondes, nous avons optimisé la coupe des planches de bois dans le but d'avoir des échantillons aux dimensions uniformes pour chaque type d'essence. Les dimensions sont: longueur de 10,16 cm (4 pouces), largeur de 8,89 cm (3,5 pouces) et épaisseur de 3,81 cm (1,5 pouces). Nous avons utilisé 20 échantillons de chaque essence pour étudier l'évolution de la température aux centres des pièces du bois séchées aux micro-ondes. On a percé trois trous à des intervalles constants dans chaque échantillon jusqu'à la mi-épaisseur afin de mesurer la température au centre de la pièce.

Nous avons utilisé un four expérimental aux micro-ondes sophistiqué qui permet de suivre l'évolution de la température en fonction du temps. Ce four (Figure 2. 1) de référence BP-111 de la compagnie Microwave Research Applications Inc. (Maryland, USA) a plusieurs avantages dont la variabilité de la puissance, la possibilité de programmer des cédules de chauffage et la facilité d'utilisation. Ces caractéristiques sont illustrées dans le tableau 2.1.

Des thermocouples de type K ont été introduits dans les trous préalablement percés afin de mesurer la température au centre de la pièce (Figure 2.2). Les mesures de température ont été réalisées à des intervalles fixes de 0 s, 15 s, 30 s, 45 s, 60 s, 90 s, 120 s, 180 s, 240 s, 360 s et 460 secondes. Pour évaluer l'évolution de la teneur en humidité en fonction du temps du traitement au x micro-ondes, nous avons mesuré la masse de l'échantillon à la fin de chaque étape ainsi que sa masse anhydre après la fin de l'expérience. La masse anhydre est obtenue après séchage de l'échantillon dans un four conventionnel à 103 °C pendant 24 heures. La teneur en humidité a été calculée selon la formule suivante (Équation 2.1) :

$$H(\%) = \frac{M_{H2O}}{M_0} = \frac{M_h - M_o}{M_o} \times 100 \quad [2.1]$$

Pour étudier la variation de l'évolution de la température en fonction de la teneur en humidité initiale du bois lors du processus de chauffage du bois par micro-ondes, nous avons varié la teneur en humidité initiale des échantillons en les plongeant pour différentes périodes de temps dans l'eau. Ceci dit, avant de les incorporer dans le four aux micro-ondes, les échantillons avaient des teneurs en humidité initiales différentes pour chaque essence.



Figure 2.1 Illustration du four aux micro-ondes modèle BP-111 de la Compagnie Microwave Research Applications Inc. utilisé pour le chauffage du bois

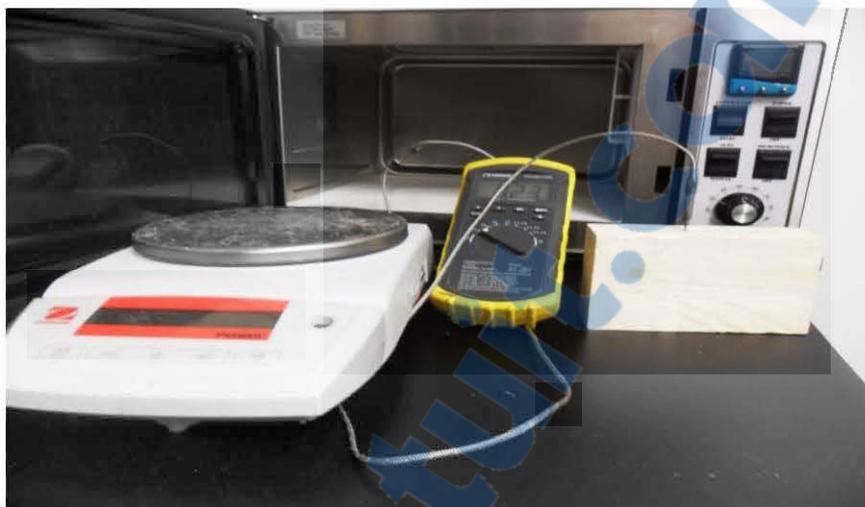


Figure 2.2 Illustration du dispositif utilisé pour la mesure de la température au centre d'une pièce de bois

Table 2.1 Spécifications du four expérimental aux micro-ondes BP-111 de la compagnie Microwave Research Applications Inc.

Spécifications du BP-111	
Électrique	
Tension d'entrée et fréquence	120 V, 60 Hz
Disjoncteur	15 A dédié
Échappement	Alimenté par ventilateur
Environnement	
Température ambiante de fonctionnement	35 à 85°F
Humidité relative	10% à 90% sans condensation
Physique	
Dimensions extérieures	20 ½" x 12 ⅛" x 16"
Dimensions intérieures	13 ⅞" x 8 ⅛" x 14 ⅝"
Poids	37 livres
Micro-ondes	
Fréquence	2.450 GHz
Puissance	variable de 20 Watts à 200 Watts

Afin de suivre l'évolution de la température au centre (cœur) des pièces, nous avons utilisé trois thermocouples introduits dans trois trous préalablement percés dans chaque échantillon. Nous avons utilisé pour ce test un programme manuel qui consiste à chauffer les pièces à puissance maximale du four aux micro-ondes (200 W) et une fréquence de 2,45 GHz. Nous avons pris la mesure de la température à des intervalles de temps bien précis. De plus, dans le but de suivre l'évolution de la teneur en humidité des pièces, après chaque 15 secondes nous avons sorti l'échantillon du four pour prendre la pesée et retourner rapidement l'échantillon au four micro-ondes pour continuer le processus.

2.2.2 Dispositif expérimental utilisé pour le traitement aux micro-ondes

Les expériences ont été réalisées selon un dispositif expérimental factoriel où les variables indépendantes sont : l'essence du bois et le temps du traitement. Les variables dépendantes sont la température au centre des pièces et la teneur en humidité du bois après le cycle du traitement. La masse volumique et la teneur en humidité initiale du bois sont introduites dans le modèle comme covariables compte tenu de la forte dépendance de la température au centre des pièces et de la teneur en humidité en fin de cycle de traitement de ces deux variables. Les effets des variables indépendantes et des covariables sur les variables dépendantes ont été étudiés par une analyse de variance selon le modèle linéaire présenté à l'équation 2.2. Le seuil de signification de 0,05 ($\alpha=0,05$) a été utilisé pour déclarer l'effet d'un facteur, une interaction ou une covariable significative.

$$M_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \chi_k + \delta_l + (\alpha\beta)_{ij} + (\beta\delta)_{il} + \epsilon_{ijkl} \quad [2.2]$$

Où :

M_{ijkl} est la moyenne de la température au centre de la pièce au temps i pour l'essence j dont la masse volumique initiale du bois est k et la teneur en humidité initiale est l .

μ : moyenne de la propriété;

α : effet du temps du traitement;

β : effet de l'essence

χ : effet dû à la masse volumique initiale du bois;

δ : effet dû à la teneur en humidité initiale du bois;

ε_{ijkl} : terme d'erreur.

2.2.3 Préparation et séchage des échantillons destinés aux essais mécaniques

Il est très important de vérifier si le traitement aux micro-ondes n'a pas d'impact négatif sur les propriétés mécaniques du bois. Pour cela, nous avons entrepris des essais de séchage selon 3 procédés : le séchage à l'air, le séchage aux micro-ondes et le séchage selon un procédé sous vide et sous pression. Ainsi, des éprouvettes normalisées selon les spécifications de la norme ASTM D143 pour les tests de compression parallèle, de compression perpendiculaire et de flexion ont été préparés. Les dimensions des échantillons pour les essais de flexion sont de 25mm*25mm avec une longueur de 410mm, ceux de compressions parallèles étaient de 25mm*25mm avec une longueur de 100mm et ceux de compression perpendiculaire étaient de 50mm*50mm avec une épaisseur de 25mm.

Pour chaque essai 30 échantillons de bois issus de chaque essence ont été préparés et séchés jusqu'à une teneur en humidité finale de 7% selon 3 procédés différents (10 échantillon par test par procédé de séchage):

- Séchage à l'air: ces échantillons ont été conditionnés pour atteindre une teneur en humidité finale de 7% :
- Séchage aux micro-ondes: Le même four utilisé pour l'étude du traitement thermique du bois aux micro-ondes (Section 2.2.1) a été utilisé pour d'autres

échantillons afin de vérifier l'effet de ce traitement sur les propriétés mécaniques du bois. Ces échantillons ont été conditionnés après le traitement aux micro-ondes pour avoir une humidité finale de l'ordre de 7%.

- Séchage sous vide et sous pression : les échantillons ont été séchés dans un séchoir pilote sous vide et sous pression (Figure 2.3): Le séchoir a été chauffé jusqu'à ce qu'il atteigne la température de 60 °C avec une pression de l'ordre de 0,33 atm. Les échantillons ont été insérés avec une température initiale de l'ordre de 20 °C et ont été traités pour une durée de 24h. Après traitement, les échantillons ont été conditionnés pour avoir une humidité finale de l'ordre de 7%. Le but de ce séchage est d'ajouter un comparatif sur l'incidence du traitement aux micro-ondes sur les propriétés mécaniques du bois.



Figure 2.3 Séchoir sous vide

2.2.4 Mesure des propriétés mécaniques

La résistance mécanique est l'une des propriétés les plus importantes dans la caractérisation d'un matériau. En effet, afin de vérifier si le traitement aux micro-ondes n'affectera pas négativement les propriétés mécaniques du bois, on a effectué des essais

mécaniques de flexion, de compression parallèle et de compression perpendiculaire selon les spécifications de la norme ASTM D143.

Les essais mécaniques ont été réalisés avec deux machines pour essais statiques de type Zwick/Roell Z020 et Z100 (Figure 2.4). Les essais de flexion ont été réalisés avec une machine à charge maximale de 20 KN (Zwick/Roell Z020), par contre les essais de compression parallèle et de compression perpendiculaire ont été réalisés avec une machine à charge maximale de 100 KN (Zwick/Roell Z100).

Les essais de flexion ont été réalisés sur des éprouvettes de dimensions 25mm*25mm avec une longueur de 410mm. On a maintenu la vitesse constante à 1,3 mm/min avec un espacement entre les appuis de 360 mm, tel qu'indiqué dans la norme ASTM D143.

Deux caractéristiques importantes sont mesurées à l'aide des tests de flexion (Figure 2.5); le module d'élasticité (MOE) et le module de rupture (MOR). Le module d'élasticité MOE est le rapport entre une charge σ appliqué à un échantillon de bois dans la zone élastique et la déformation ε correspondante dont l'expression est donnée par l'équation (2.3). En pratique, on calcule les MOE et MOR en flexion simple par les équations (2.4) et (2.5), respectivement.

$$MOE = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [2.3]$$

$$MOE = \frac{F L^3}{\delta 4bd^3} \quad [2.4]$$

$$MOR = \frac{1,5 F_{max}L}{bd^2} \quad [2.5]$$

Avec **F** : Charge mesurée à la limite proportionnelle

F_{max} : Charge maximale

δ : La déflexion

L : distance entre les appuis

b : épaisseur

d : largeur



Figure 2.4 Machine d'essais universelle de la Compagnie Zwick/Roel Z020

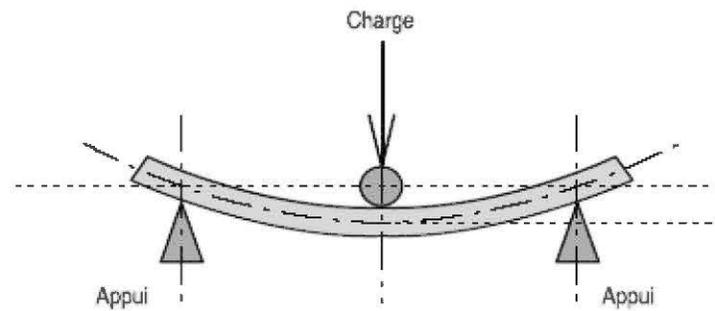


Figure 2.5 Essai de flexion simple d'une poutre de bois

Les tests de compression parallèle sont réalisés avec des éprouvettes de dimensions 25mm*25mm avec une longueur de 100mm. Cependant les tests de compression perpendiculaire sont réalisés avec des éprouvettes de dimensions 50mm*50mm avec une épaisseur de 25mm.

On a maintenu la vitesse constante à 0,305 mm/min pour les deux tests. La contrainte à la rupture durant ces deux tests se calcule selon l'équation suivante (équation 2.6) :

$$\sigma_{rup} = \frac{F_{max}}{bd} \quad [2.6]$$

Avec F_{max} : Charge mesurée à la rupture

b : épaisseur

d : largeur

2.2.5 Effets du procédé du séchage sur les propriétés mécaniques du bois

Pour vérifier si le séchage au four micro-ondes a des effets négatifs sur les propriétés mécaniques du bois, nous avons entrepris une analyse de variance où les variables dépendantes sont les propriétés mécaniques du bois et les variables indépendantes sont le procédé de séchage et l'essence du bois. La masse volumique a été utilisée comme covariable. L'analyse de variance a été réalisée selon le modèle de l'équation x. Le seuil de signification de 0,05 ($\alpha=0,05$) a été utilisé pour déclarer l'effet d'un facteur, une interaction ou une covariable significative.

$$M_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \chi_k + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad [2.7]$$

Où :

M_{ijk} est la propriété mécanique moyenne de l'essence i séchée par le procédé j dont la masse volumique initiale du bois est k ;

μ est la moyenne de la propriété mécanique;

α est l'effet l'essence;

β est l'effet du procédé du séchage;

χ est l'effet dû à la masse volumique initiale du bois;

ε_{ijk} est le terme d'erreur.

CHAPITRE III

RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Traitement thermique aux micro-ondes

3.1.1 Variation de la température au centre des pièces

L'analyse de variance (Tableau 3.1) montre que la température au centre des pièces varie d'une façon significative en fonction de l'essence. Ce résultat est prévu compte tenu des différences dans la structure et les propriétés physiques des essences. L'effet significatif du temps est également prévu puisque la température du matériau augmente toujours avec le temps du traitement aux micro-ondes. L'effet significatif de la covariable masse volumique de l'échantillon s'explique par la différence de la quantité de matière dans un même volume de bois. La teneur en humidité initiale affecte aussi d'une façon significative la température au centre des pièces. Les effets des interactions essence * temps et essence * teneur en humidité initiale sur la température au centre de la pièce suggèrent que la variation de cette dernière avec la teneur en humidité initiale et le temps de traitement varie d'une essence à l'autre.

3.1.2 Variation de la teneur en humidité finale

La teneur en humidité finale varie d'une façon significative en fonction de l'essence et du temps de traitement. L'effet de la densité est prévu compte tenu que pour une même teneur en humidité, un bois plus dense contient plus d'eau qu'un bois moins dense. L'effet du temps sur la teneur en humidité finale est également prévu puisqu'une exposition prolongée aux micro-ondes entraînera plus d'évaporation d'eau. Les effets

des interactions essence * temps et essence * teneur en humidité initiale sur la teneur en humidité finale suggèrent que la variation de cette dernière avec ces deux facteurs varie d'une essence à l'autre.

Table 3.1 Analyse de variance des effets de l'essence, du temps de chauffage, de la densité et de la teneur en humidité initiale sur la température au centre des pièces et la teneur en humidité finale

Source de variation	Degré de liberté	Valeur de F	
		Température au centre de la pièce	Teneur en humidité finale
Constante	1	1011,0**	164,3**
Essence	4	3,3**	8,4**
Temps	8	4204,8**	2590,7**
Densité	1	87,4**	41,7**
HI	1	1702,8**	1267982**
Essence * Densité	4	4,8**	8,0**
Essence * HI	4	2,6*	13,9**
Essence * Temps	25	11,7**	16,6**

* effet significatif au niveau de $\alpha = 0,05$; ** effet significatif au niveau de $\alpha = 0,01$

3.1.3 Évolution de la température en fonction du temps de traitement aux micro-ondes

Les résultats détaillés du traitement thermique dans le cadre de ce projet sont présentés dans l'annexe A. Nous présentons de la figure 3.1 à la figure 3.5 l'évolution de la température en fonction du temps de traitements aux micro-ondes des pièces de bois (10,16 x 8,89 x 3,81 cm) des différentes essences du bois étudiées pour différentes classes d'humidité. Ces illustrations indiquent clairement que la température de 60 °C recommandée pour le traitement phytosanitaire aux micro-ondes (Hoover *et al.*, 2010) est atteinte après seulement 70 secondes de traitement pour le bois de l'érable à sucre et le bouleau jaune et après seulement 60 secondes de traitement pour le bois des autres essences. La variation de la température au centre des pièces du bois n'évolue pas de la

même manière pour les différentes essences du bois. Dans le cas de l'érable à sucre, l'évolution de la température n'est pas assez rapide, ceci est expliqué par la haute densité de cette essence. Cependant, dans le cas du peuplier faux-tremble qui est un bois moins dense que l'érable, l'évolution de la température est assez rapide. Le facteur densité est validé par l'analyse de variance. Ces résultats confirment les recherches précédentes (Koubaa *et al.*, 2006). Ces illustrations indiquent aussi qu'au bout de 120 secondes, la température au centre des pièces du bois du peuplier faux-tremble, de l'épinette noire et du pin gris atteint une valeur supérieure à 100 °C. Dans le cas de l'érable à sucre et le bouleau jaune, il faut un traitement d'une durée d'environ 150 secondes pour dépasser la température de 100°C aux centres des pièces du bois. Cette durée est plus courte comparativement aux recherches de Perré (2007). En effet, selon les recherches de Perré, il faut un chauffage aux micro-ondes d'environ 2 minutes pour atteindre une température de 100 °C pour le cas de l'épinette noire avec une puissance du four de 100 W (Perré, 2007). Ceci est expliqué par la différence de puissance du four aux micro-ondes. Dans notre projet, nous avons appliqué une puissance de 200 W. La puissance du four aux micro-ondes est importante dans la cinétique de chauffage de bois. Ceci confirme les recherches de Vongpradubchai et Rattanadecho (2011). Ces derniers ont prouvé que la puissance du four aux micro-ondes joue un rôle important dans la cinétique du chauffage de bois. La température augmente plus rapidement avec une puissance appliquée plus importante (Vongpradubchai et Rattanadecho, 2011). Cependant, la puissance du four aux micro-ondes doit être contrôlée pour ne pas détériorer la qualité du bois (Resch, 2009).

Les figures ont montré aussi que la température tend à augmenter en fonction du temps de traitement. Plus la teneur en humidité est faible plus les pièces du bois atteignent rapidement la température de 60°C. Ceci confirme les recherches précédentes (Koubaa *et al.*, 2006). Vongpradubchai et Rattanadecho (2011) ont spécifié l'importance de la teneur en humidité des pièces de bois. Plus le bois est humide, plus la durée d'absorption de l'énergie électromagnétique est longue (Vongpradubchai et

Rattanadecho, 2011). Dans notre cas, les pièces de bois présentant une faible teneur en humidité initiale absorbent rapidement l'énergie électromagnétique. Cette énergie est transformée en énergie thermique qui favorise l'évaporation rapide de l'eau et par la suite l'augmentation rapide de la température au centre des pièces de bois. Ces illustrations supportent les résultats de l'analyse de variance (Tableau 3.1) et indiquent clairement que la teneur en humidité initiale influe d'une façon significative sur le temps de traitement. En effet, moins le bois est dense, plus l'évolution de la température est plus rapide. Dans le cas industriel, le contrôle de la température initiale et de la teneur en humidité initiale de bois selon l'essence est important afin d'optimiser le temps de chauffage.

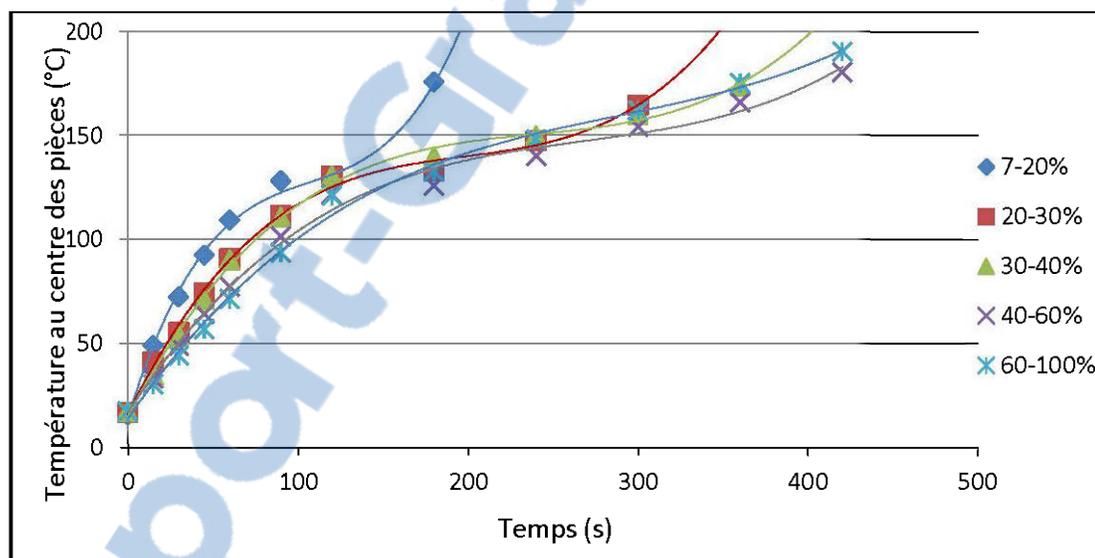


Figure 3.1 Évolution de la température au centre des pièces du bois du pin gris en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes pour différentes classes d'humidité

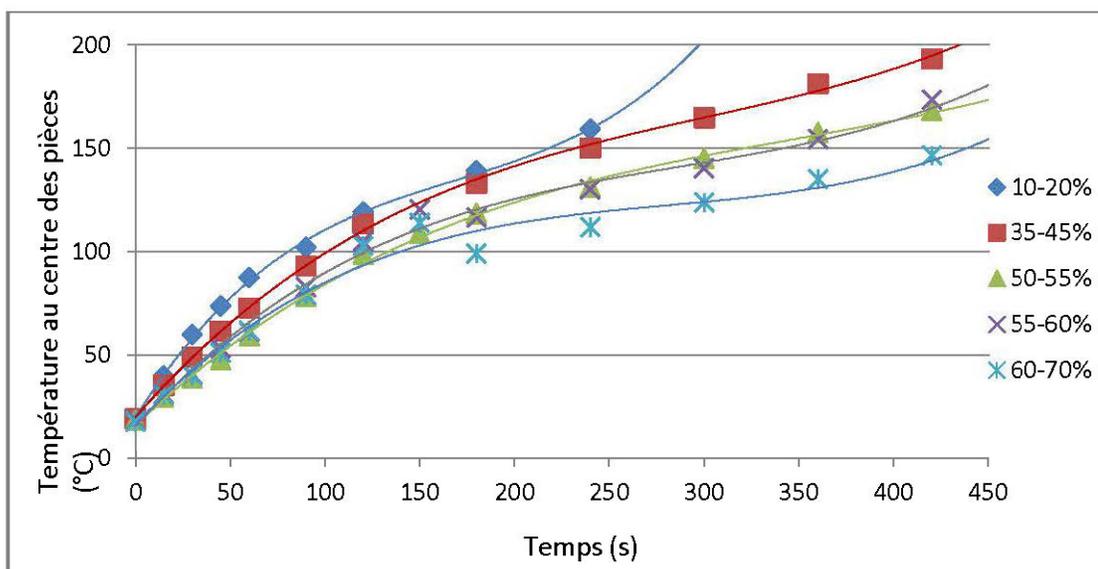


Figure 3.2 Évolution de la température au centre des pièces du bois de l'érable à sucre en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes pour différentes classes d'humidité

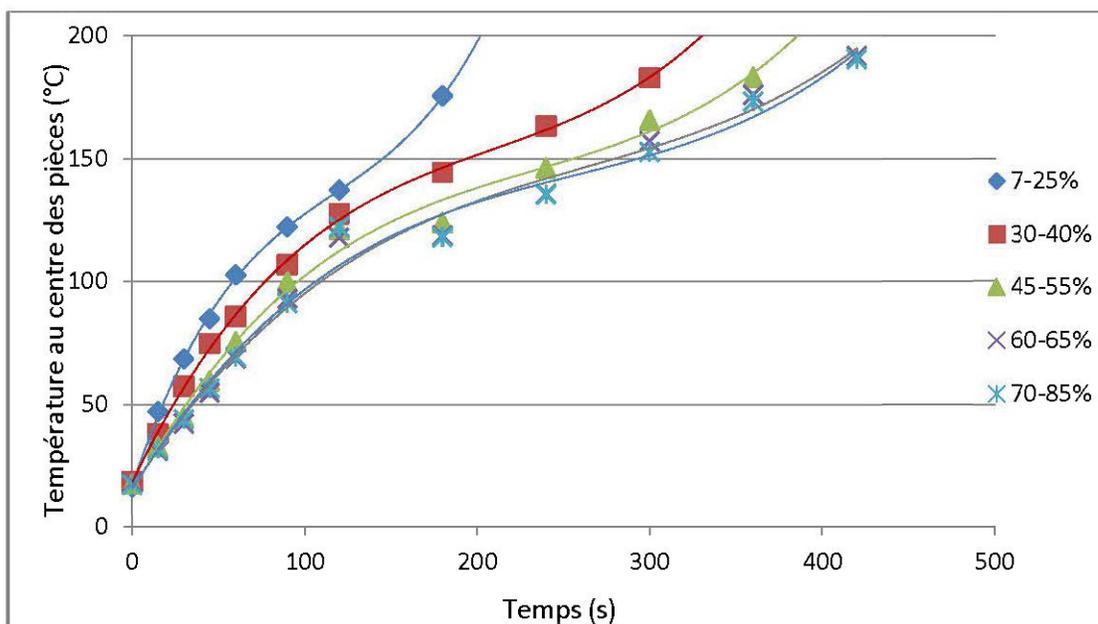


Figure 3.3 Évolution de la température au centre des pièces du bois de l'épinette noire en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes pour différentes classes d'humidité

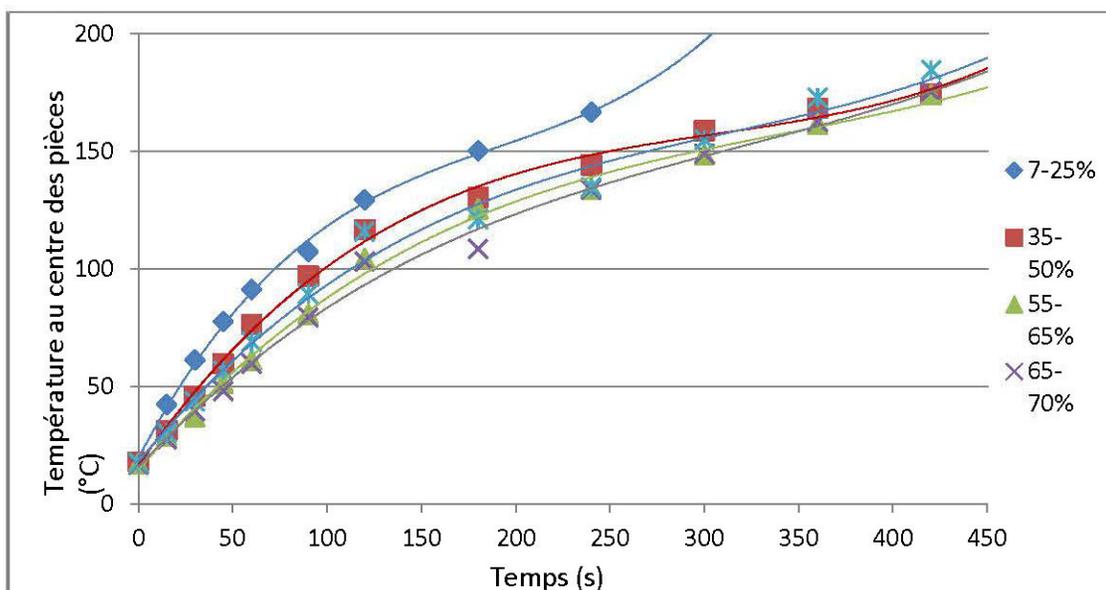


Figure 3.4 Évolution de la température au centre des pièces du bois du bouleau jaune en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes pour différentes classes d'humidité

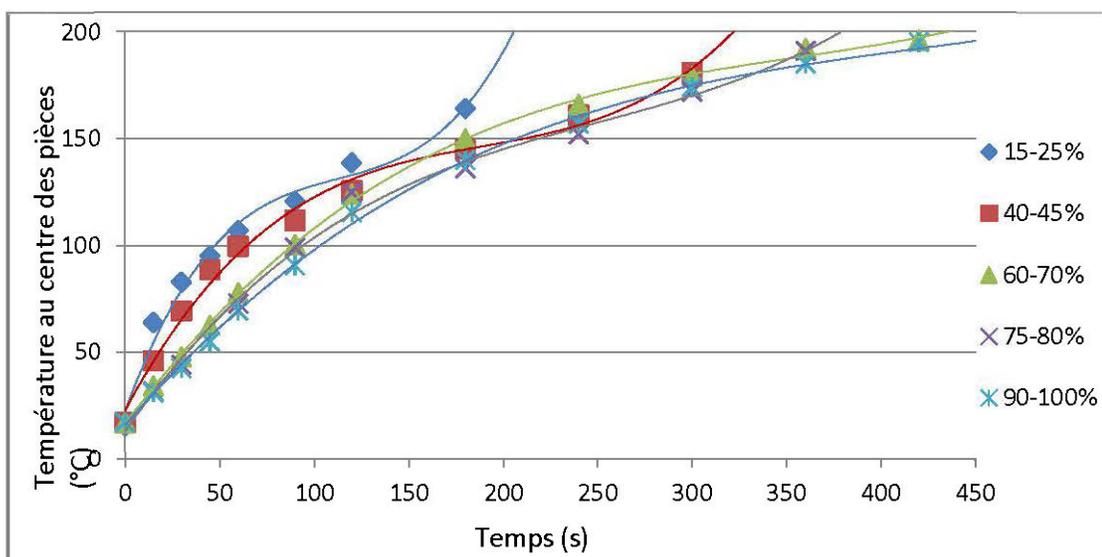


Figure 3.5 Évolution de la température au centre des pièces du bois du peuplier faux-tremble en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes pour différentes classes d'humidité

La figure 3.6 illustre l'évolution de la température en fonction du temps du traitement pour les différentes essences de bois traitées à une teneur en humidité entre 0 et 25%. Cette courbe indique une différence significative entre les températures à l'intérieur des pièces des différentes essences. Cette illustration indique aussi que le peuplier faux-tremble atteint le premier la température de 60°C suivi du pin gris, l'épinette noire, le bouleau jaune et enfin l'érable à sucre. Ceci peut être expliqué par la différence entre les densités des essences de bois étudiées et le pouvoir de pénétration de la chaleur au centre des pièces.

La figure 3.7 illustre le temps de traitement aux micro-ondes nécessaire pour les pièces de bois des cinq essences traitées afin d'atteindre la température de 60 °C en fonction de la masse volumique et à une teneur en humidité de 20%. On remarque que le peuplier faux tremble, le pin gris et l'épinette noire atteignent la température de 60 °C après environ 15 secondes de traitement alors que le bouleau jaune atteint cette température après 30 secondes de traitement et l'érable à sucre après 45 secondes de traitement.

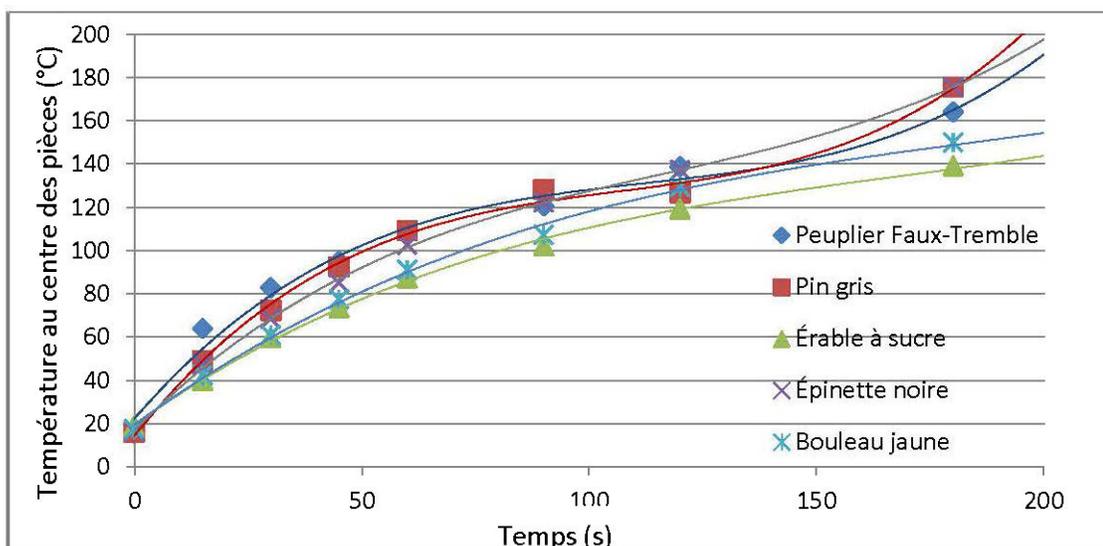


Figure 3.6 Évolution de la température au centre des pièces en fonction de la durée de traitement aux micro-ondes des pièces de bois des cinq essences étudiées à une teneur en humidité 0-25%

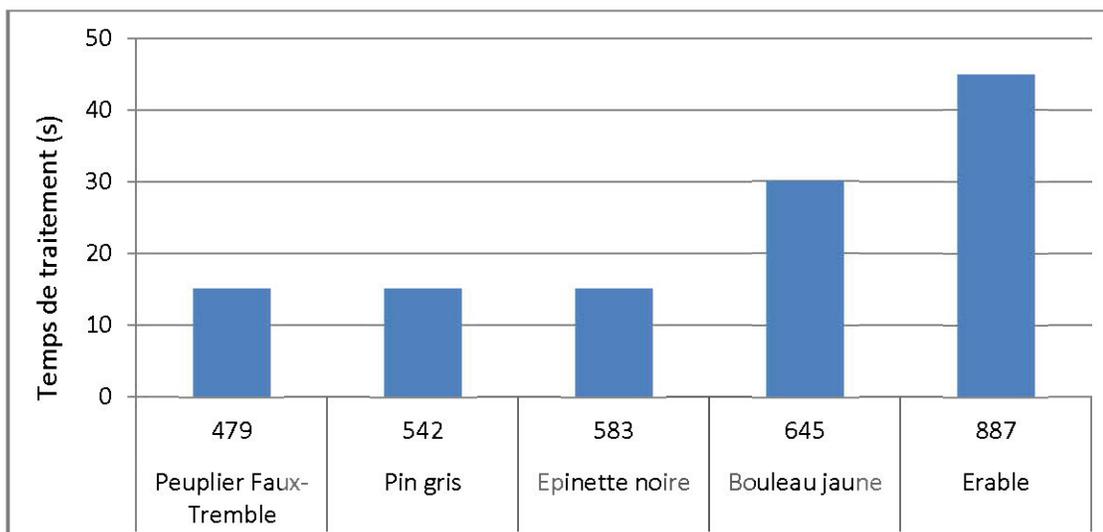


Figure 3.7 Temps de traitement aux micro-ondes nécessaire des pièces de bois des cinq essences pour atteindre la température de 60°C en fonction de la masse volumique à une teneur en humidité de 20%

Nous présentons de la figure 3.8 à la figure 3.12 le temps de traitement nécessaire aux micro-ondes des pièces de bois des différentes essences (peuplier faux-tremble, bouleau jaune, érable à sucre, pin gris et l'épinette noire) pour atteindre la température de 60°C pour différentes teneurs en humidité initiale. Ces figures indiquent qu'il faut seulement un traitement d'une durée de 30 secondes pour atteindre une température de 60°C pour les échantillons qui présentent une teneur en humidité initiale de l'ordre de 8% (le cas du bouleau jaune et l'érable à sucre). La figure 3.14 indique clairement que pour atteindre la température de 60°C au centre des pièces du bois qui présentent une humidité initiale de l'ordre de 70%, il faut un traitement aux micro-ondes d'une durée maximale de 70 secondes. On peut conclure que la température de 60°C recommandée (Hoover *et al.*, 2010) est atteinte au centre des pièces plus rapidement pour les pièces ayant une teneur en humidité initiale la plus faible. L'effet du facteur teneur en humidité est validé par l'analyse de variance.

Ces illustrations indiquent aussi clairement que le bouleau jaune et l'érable à sucre nécessitent un temps plus important que les autres essences pour atteindre la température voulue au centre de leurs pièces.

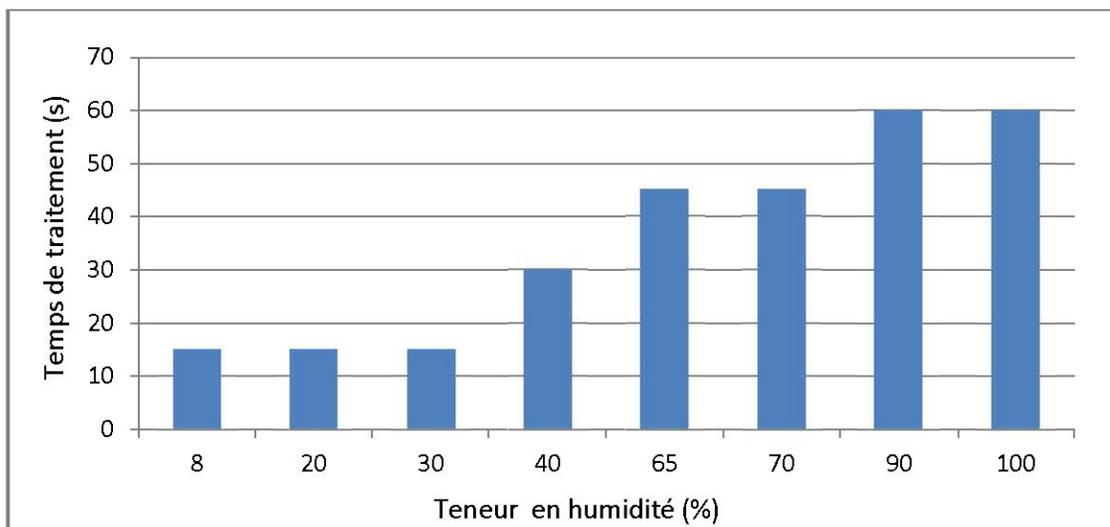


Figure 3.8 Temps de traitement aux micro-ondes nécessaire des pièces de bois du peuplier faux-tremble pour atteindre la température de 60°C en fonction de la teneur en humidité

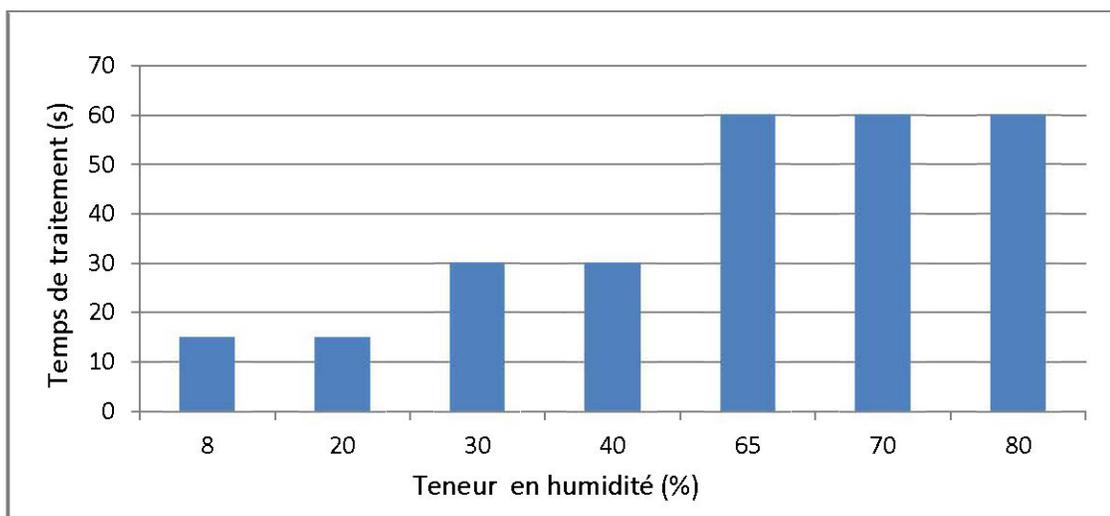


Figure 3.9 Temps de traitement aux micro-ondes nécessaire des pièces de bois de l'épinette noire pour atteindre la température de 60°C en fonction de la teneur en humidité

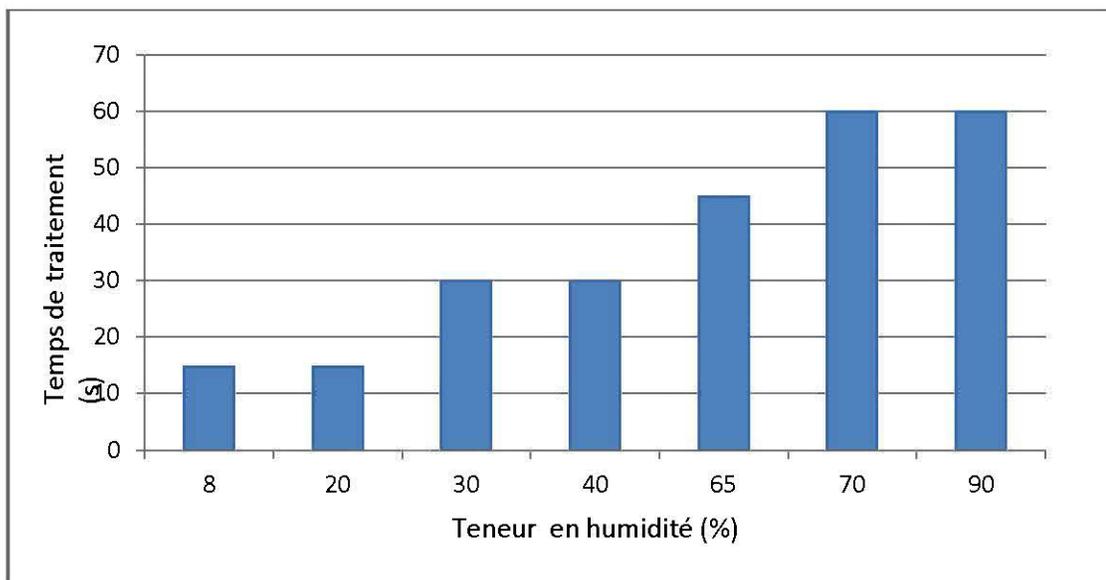


Figure 3.10 Temps de traitement aux micro-ondes nécessaire des pièces de bois du pin gris pour atteindre la température de 60°C en fonction de la teneur en humidité

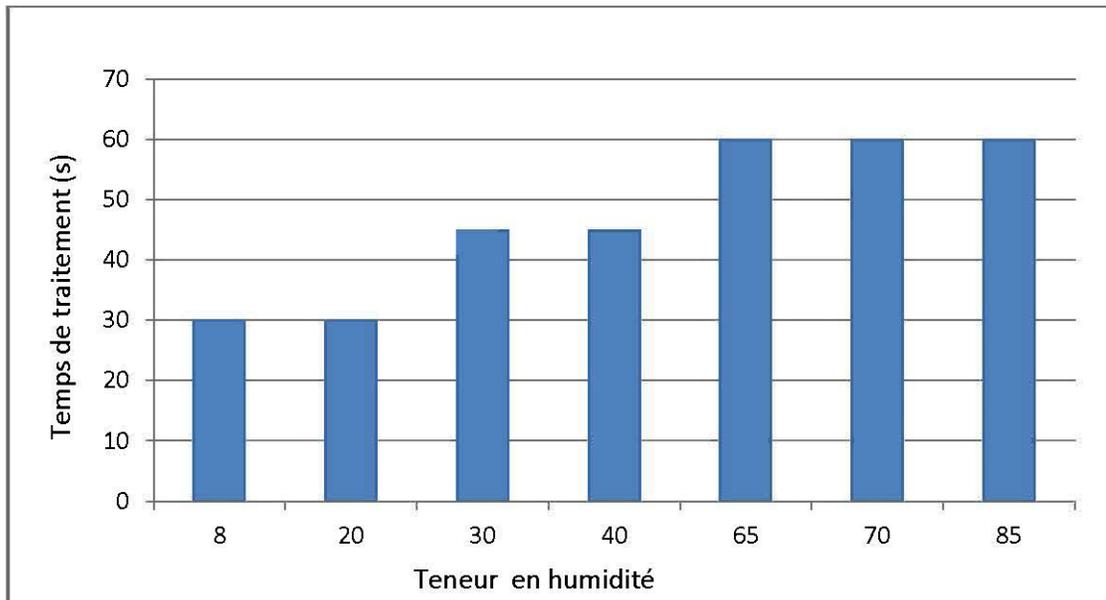


Figure 3.11 Temps de traitement aux micro-ondes nécessaire des pièces de bois du bouleau jaune pour atteindre la température de 60°C en fonction de la teneur en humidité

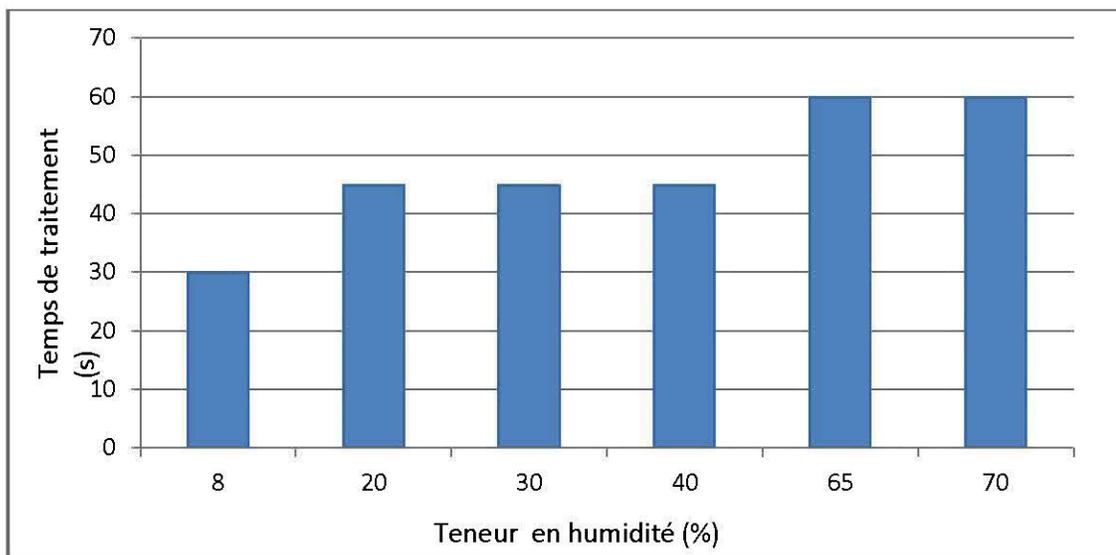


Figure 3.12 Temps de traitement aux micro-ondes nécessaire des pièces de bois de l'érable à sucre pour atteindre la température de 60°C en fonction de la teneur en humidité

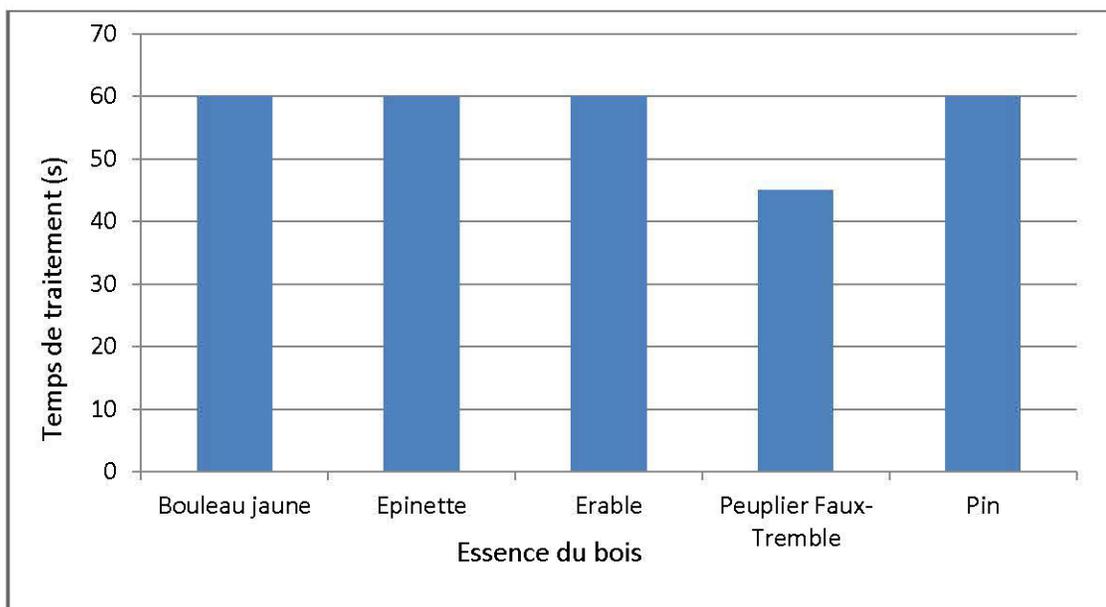


Figure 3.13 Temps de traitement aux micro-ondes nécessaire du bois de cinq essences (peuplier faux-tremble, bouleau jaune, érable à sucre, épinette noire et le pin gris) pour atteindre la température de 60°C à une teneur en humidité de 70%

3.1.4 Évolution de la teneur en humidité en fonction du temps de traitement aux micro-ondes

On présente aux figures 3.14 à 3.18 l'évolution de la teneur en humidité en fonction du temps de traitements aux micro-ondes pour les différentes essences du bois étudiées pour différentes teneurs en humidité initiale. Ces illustrations supportent les résultats de l'analyse de variance (Tableau 3.1) et indiquent clairement que la teneur en humidité initiale influe d'une façon significative sur la teneur en humidité finale des pièces. En effet, la teneur en humidité diminue d'environ 10% après une durée de traitement de 120 secondes pour les différentes essences du bois à différentes teneurs en humidité initiale. Ceci confirme les recherches précédentes (Koubaa *et al.*, 2006). Plus la teneur en humidité initiale est faible, plus on atteint une teneur en humidité faible à la fin du traitement. Ceci suggère qu'un pré-séchage ou un conditionnement des billes est recommandé pour la diminution de la teneur en humidité initiale et par conséquent on favorise l'atteinte d'une teneur en humidité finale plus basse suite au traitement aux micro-ondes. La diminution de la teneur en humidité est associée à la capacité des pièces de bois à absorber l'énergie électromagnétique et à la profondeur de pénétration de l'onde magnétique au sein de la pièce de bois (Vongpradubchai *et* Rattanadecho, 2011). L'épaisseur de la pièce de bois est un facteur important dans la variation de la teneur en humidité au sein de la pièce.

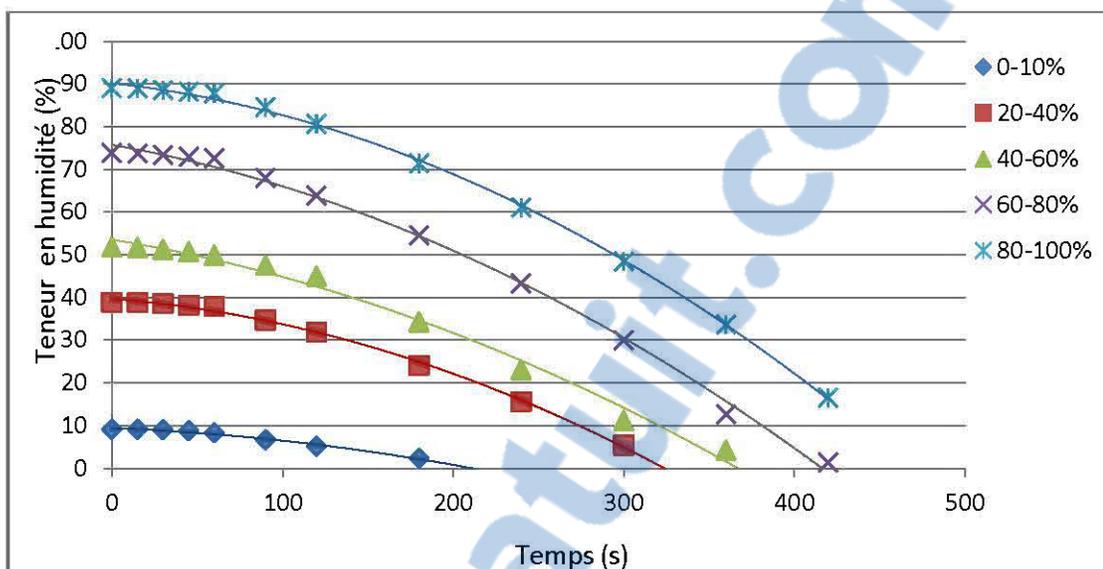


Figure 3.14 Évolution de la teneur en humidité en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes du bois du pin gris pour différentes teneurs en humidité initiale

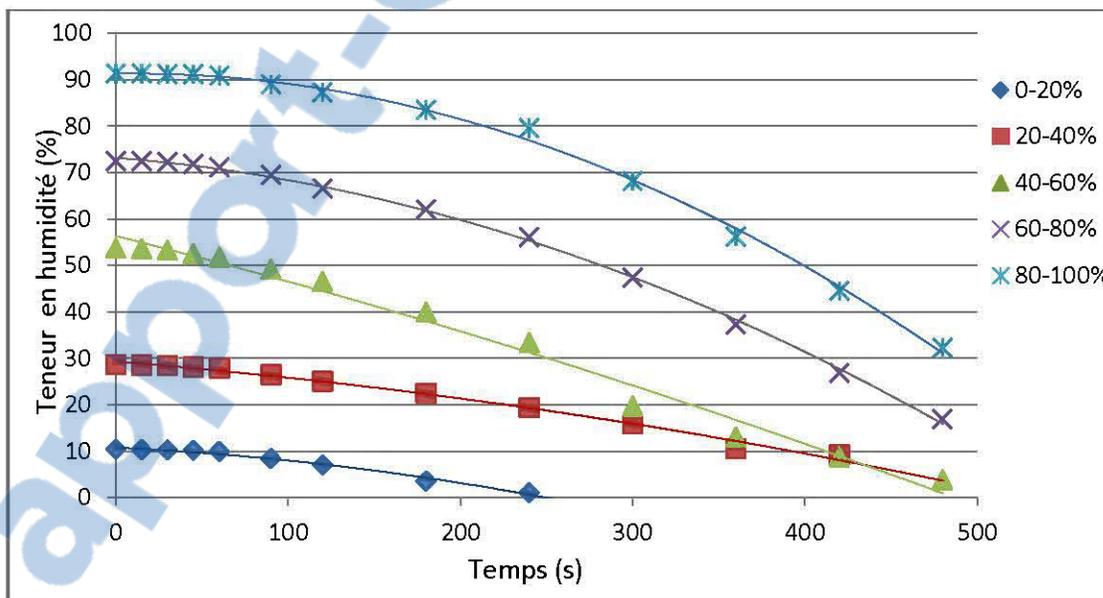


Figure 3.15 Évolution de la teneur en humidité en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes du bois de l'érable à sucre à différentes teneurs en humidité initiale

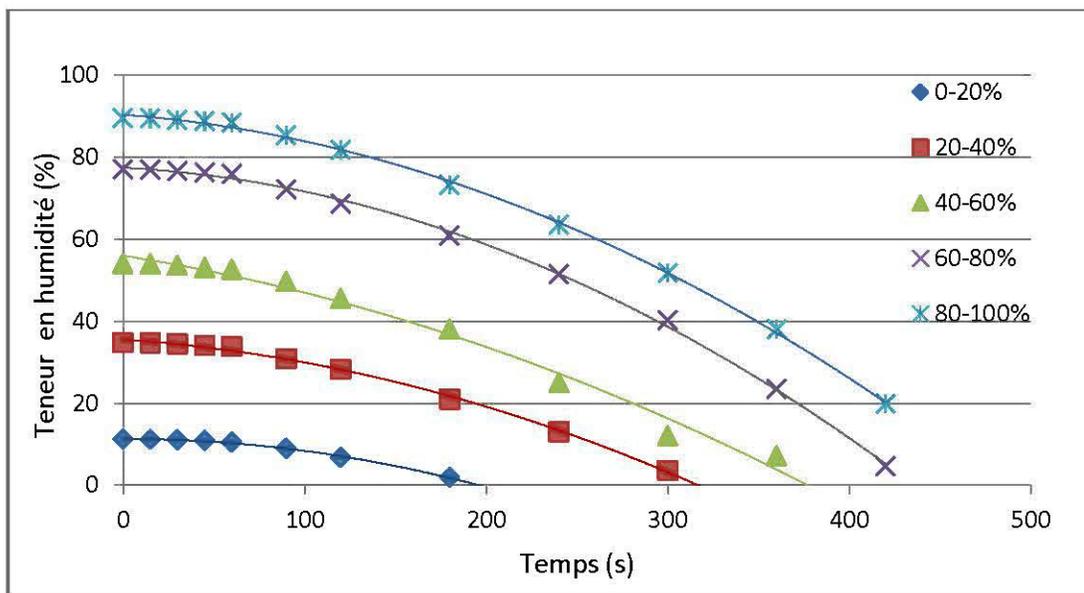


Figure 3.16 Évolution de la teneur en humidité en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes du bois de l'épinette noire à différentes teneurs en humidité initiale

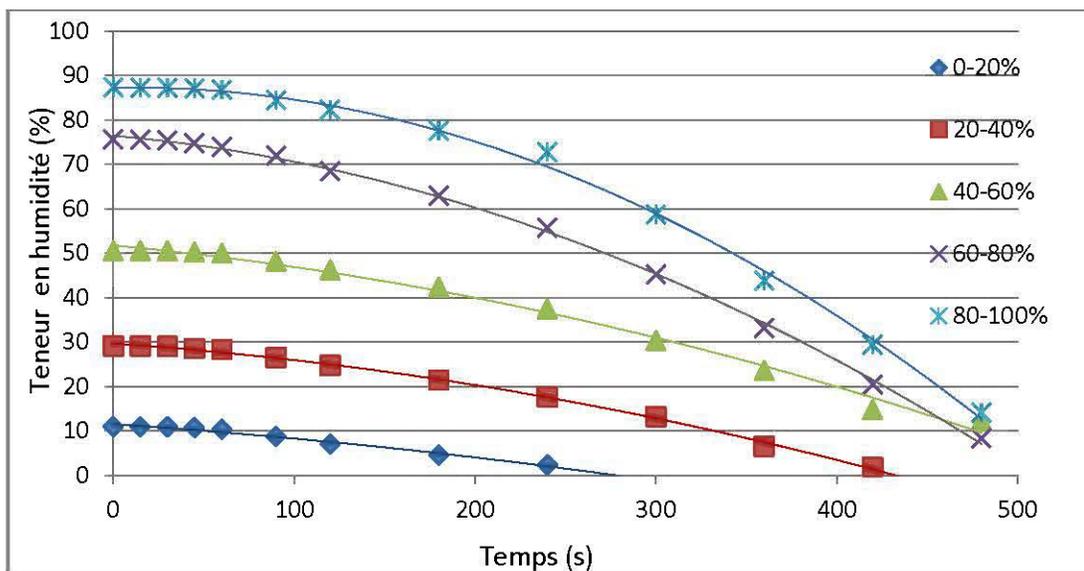


Figure 3.17 Évolution de la teneur en humidité en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes du bois du bouleau jaune à différentes teneurs en humidité initiale

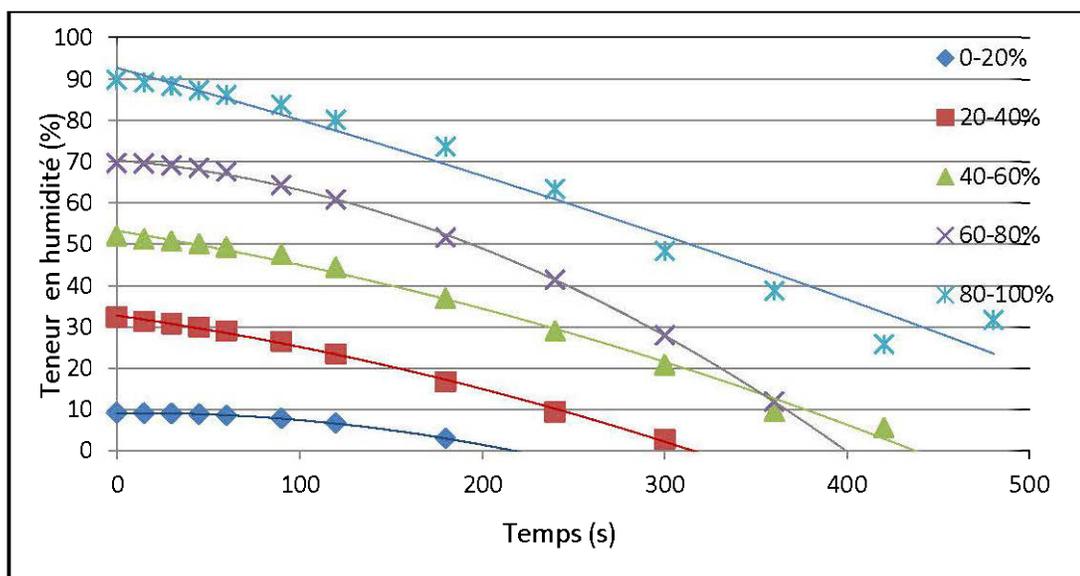


Figure 3.18 Évolution de la teneur en humidité en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes du bois du peuplier faux-tremble à différentes teneurs en humidité initiale

La figure 3.19 illustre l'évolution de la teneur en humidité en fonction du temps du traitement pour les différentes essences du bois traitées pour une humidité initiale qui varie entre 25 et 40%. Cette courbe indique une différence significative entre la variation des teneurs en humidité pour les pièces des différentes essences. On remarque que les tendances des courbes du peuplier faux tremble, du pin gris et de l'épinette noire sont plus accentuées que les courbes de l'érable à sucre et du bouleau jaune. Ceci est expliqué par la différence des densités entre les différentes essences du bois. La pénétration de la chaleur est plus facile dans les essences les moins denses.

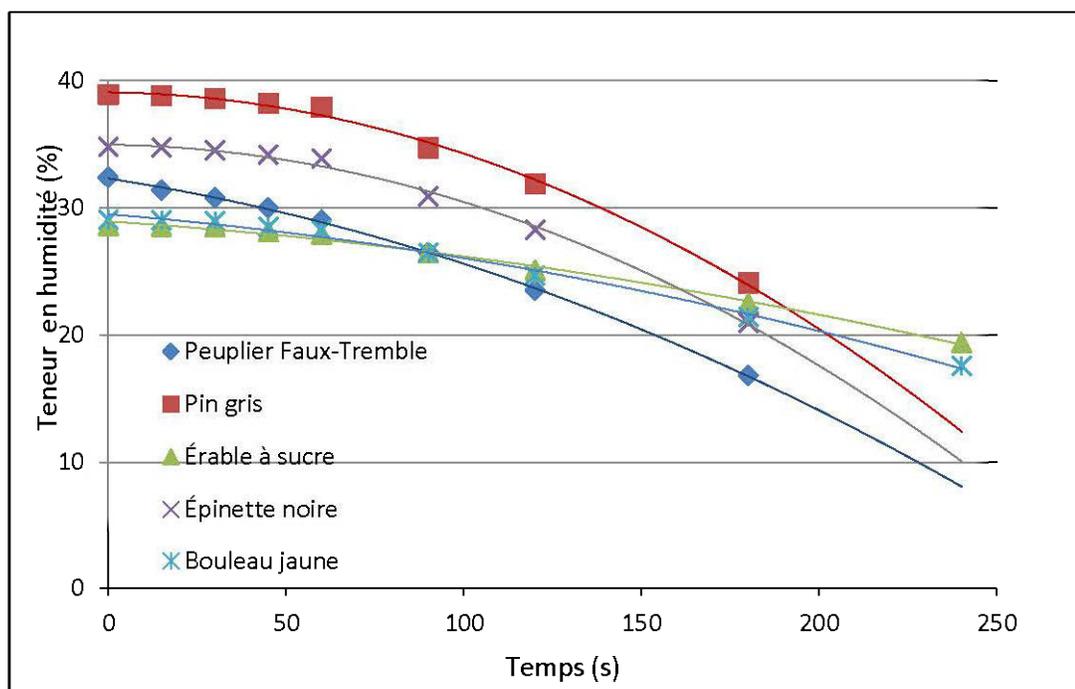


Figure 3.19 Évolution de la teneur en humidité en fonction de la durée du traitement aux micro-ondes du bois de cinq essences (peuplier faux-tremble, bouleau jaune, érable à sucre, épinette noire et du pin gris) pour une teneur en humidité initiale entre 25 et 40%

3.2 Effets du séchage aux micro-ondes sur les propriétés mécaniques du bois

Les résultats détaillés et les moyennes pour toutes les propriétés mécaniques mesurées dans le cadre de ce projet sont présentés aux annexes B et C, respectivement. On présente au tableau 3.2 les résultats de l'analyse de variance concernant l'effet de trois modes de séchage sur les propriétés mécaniques du bois de cinq essences. Dans cette analyse, la masse volumique a été introduite comme covariable. Les résultats indiquent un effet hautement significatif du mode de séchage sur l'ensemble des propriétés mécaniques mesurées. Les tests de comparaisons multiples indiquent généralement que les propriétés mécaniques du bois séché aux micro-ondes sont comparables à celles du bois séchés à l'air ambiant. Par contre, les propriétés

mécaniques du bois séchées sous vide et sous pression sont inférieures à celles du bois séché aux micro-ondes et à celles du bois séché à l'air. Ces résultats suggèrent que le chauffage et le séchage aux micro-ondes n'ont pas d'effets négatifs sur les propriétés mécaniques du bois.

Par ailleurs, le séchage sous vide et sous pression a entraîné une importante diminution des propriétés mécaniques du bois. L'explication de ce résultat ne fait pas partie des objectifs de ce projet. Des études approfondies seraient nécessaires pour mieux comprendre ce résultat.

3.2.1 Effets du séchage aux micro-ondes sur les propriétés mécaniques du bois en compression parallèle et en compression perpendiculaire

Les figures 3.20 au 3.23 présentent les résultats obtenus en termes de module d'élasticité et module spécifique en compression parallèle et perpendiculaire en fonction du mode de séchage. Ces figures indiquent que le traitement aux micro-ondes n'a pas d'effets négatifs sur les différentes propriétés mécaniques du bois en compression parallèle et en compression perpendiculaire comparativement aux deux autres méthodes de séchage: séchage à l'air ambiant et le séchage sous vide et sous pression. Pour toutes les essences, nous avons appliqué les différents essais mécaniques à une humidité d'équilibre de l'ordre de 7%. Les tableaux de l'Annexe B présentent les différentes caractéristiques mécaniques (le module d'élasticité MOE, la limite d'élasticité à 0.2% $R_{p0.2}$, la déformation maximale ε_{max} et le module d'élasticité spécifique $MOE_{spécifique}$) du bois en fonction de la nature du séchage.

Table 3.2 Analyse de variance de l'effet du mode de séchage sur les propriétés mécaniques du bois de 5 essences

Source de variation	ddl	Valeur de F			
		Propriétés en flexion			
		MOE	MOR	Déformation	Énergie
Modèle corrigé	15	16,8**	25,4**	12,8**	22,5**
Ordonnée à l'origine	1	14,5**	10,8**	19,9**	5,2*
Essence	4	10,3**	6,2**	9,9**	8,4**
Séchage	2	13,3**	7,9**	2,3ns	7,2**
Masse volumique	1	2,4ns	0,4ns	1,3ns	0,3ns
Essence * Séchage	8	2,8**	3,0**	1,1ns	2,7**
R ² ajusté		0,61	0,71	0,54	0,68
Propriétés en compression parallèle					
		E	σ_{max}	Déformation	Énergie
Modèle corrigé	15	18,9**	29,5**	20511,9**	39,0**
Ordonnée à l'origine	1	19254**	11859**	36506,6**	2882,0**
Essence	4	34,5**	86,7**	301,9**	142,4**
Séchage	2	9,7**	4,4*	3,5*	0,1ns
Masse volumique	1	2,3*	2,1*	1,8ns	0,7ns
Essence * Séchage	8	84,817	75,8**	278767**	9,1**
R ² ajusté		0,64	0,74	1,00	0,79
Propriétés en compression perpendiculaire					
		E	σ_{max}	Déformation	Énergie
Modèle corrigé	15	19,2**	342,4**	24,4**	138,1**
Ordonnée à l'origine	1	11,6**	18,8**	0,0ns	11,7**
Essence	4	8,9**	148,9**	15,0**	59,5**
Séchage	2	47,3**	1,1ns	26,9**	7,4**
Masse volumique	1	6,0**	3,2**	3,9**	0,7ns
Essence * Séchage	8	0,4ns	61,4**	8,1**	26,2**
R ² ajusté		0,67	0,97	0,72	0,94

* Significatif au niveau de $\alpha=0,05$

** Significatif au niveau de $\alpha=0,01$

ns Significatif au niveau de $\alpha=0,05$

En comparant les propriétés mécaniques des pièces traitées aux micro-ondes à celles traitées au séchoir sous vide et sous pression ou à l'air, nous notons des différences significatives entre les trois groupes. Dans ce cas et d'une façon générale, les propriétés mécaniques en compression parallèle et en compression perpendiculaire pour les pièces séchées aux micro-ondes sont supérieures à celles séchées au séchoir sous vide. La figure 3.20 nous montre que cette supériorité est nette pour le cas du peuplier faux tremble et du bouleau jaune. Cependant, le MOE de l'épinette noire est presque le même pour les pièces de bois traitées aux micro-ondes et les pièces traitées au séchoir sous vide. Ces résultats sont confirmés par l'analyse de variance (Tableau 3.2). Ces résultats confirment les études antérieures faites sur ce sujet. En effet, les propriétés mécaniques de l'épinette de Norvège séchée aux micro-ondes sont meilleures que celles du bois séché au four conventionnel lorsque la teneur en humidité est en bas de 12% (Hansson *et al.*, 2004), ce qui est notre cas puisque nos tests ont été effectués dans des conditions de teneur en humidité d'équilibre de l'ordre de 7%.

Les tableaux de l'Annexe B-1 et Annexe B-2 présentent les moyennes des différentes caractéristiques mécaniques (le module d'élasticité MOE, le module de rupture MOR, la déformation à la force maximale ϵ_{Fmax} , l'énergie appliquée à la résistance maximale W_{Rm} , la masse volumique $M_{volumique}$ et le module d'élasticité spécifique $MOE_{spécifique}$) du bois en fonction de la nature du séchage.

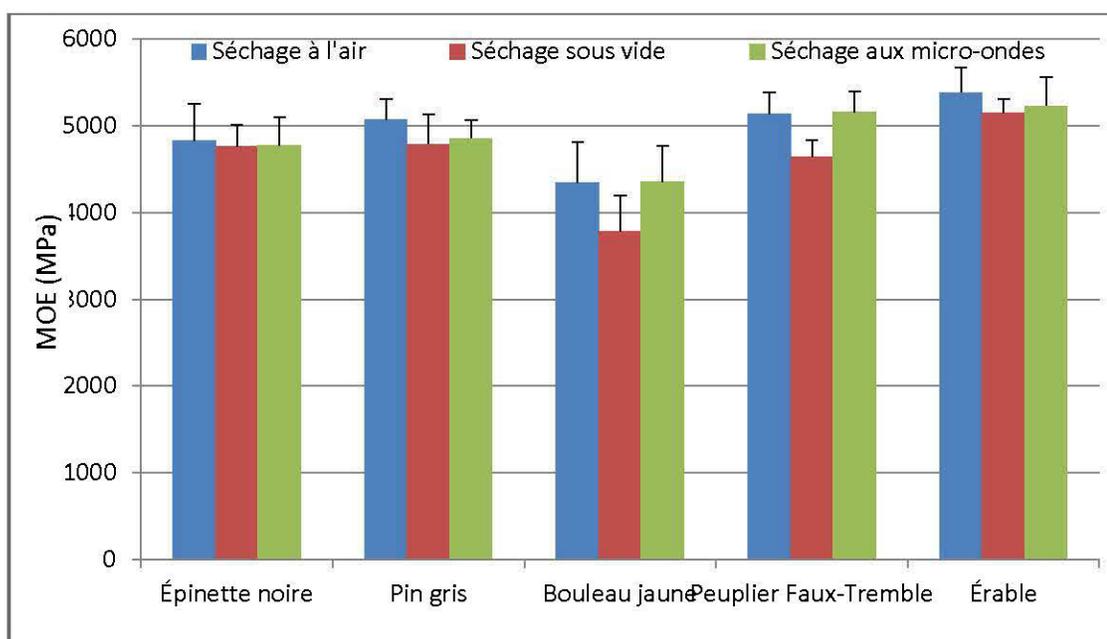


Figure 3.20 Effet du mode de séchage sur le MOE du bois en compression parallèle

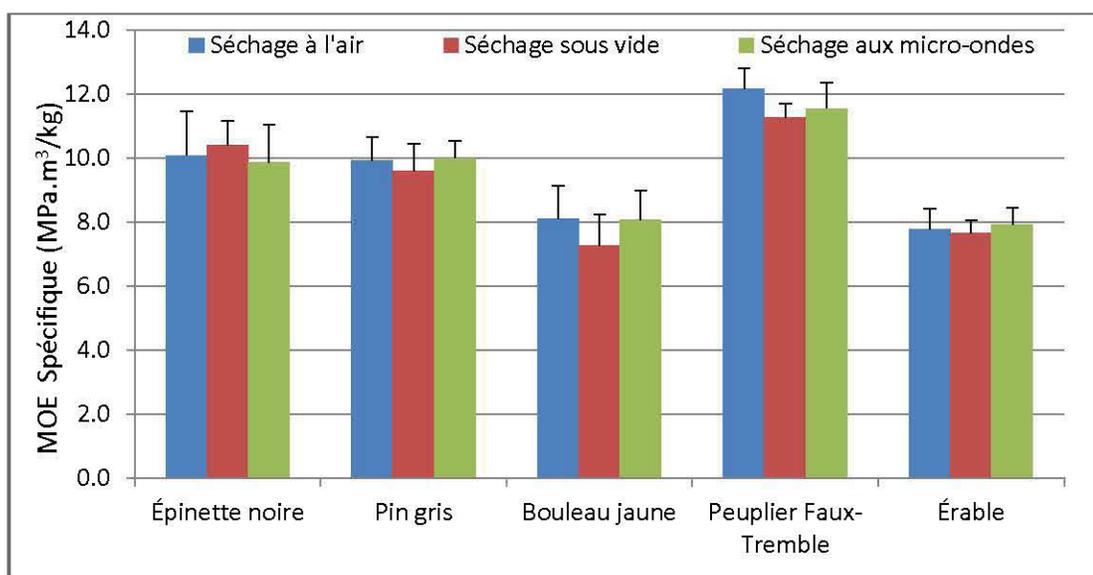


Figure 3.21 Effet du mode de séchage sur le MOE spécifique du bois en compression parallèle

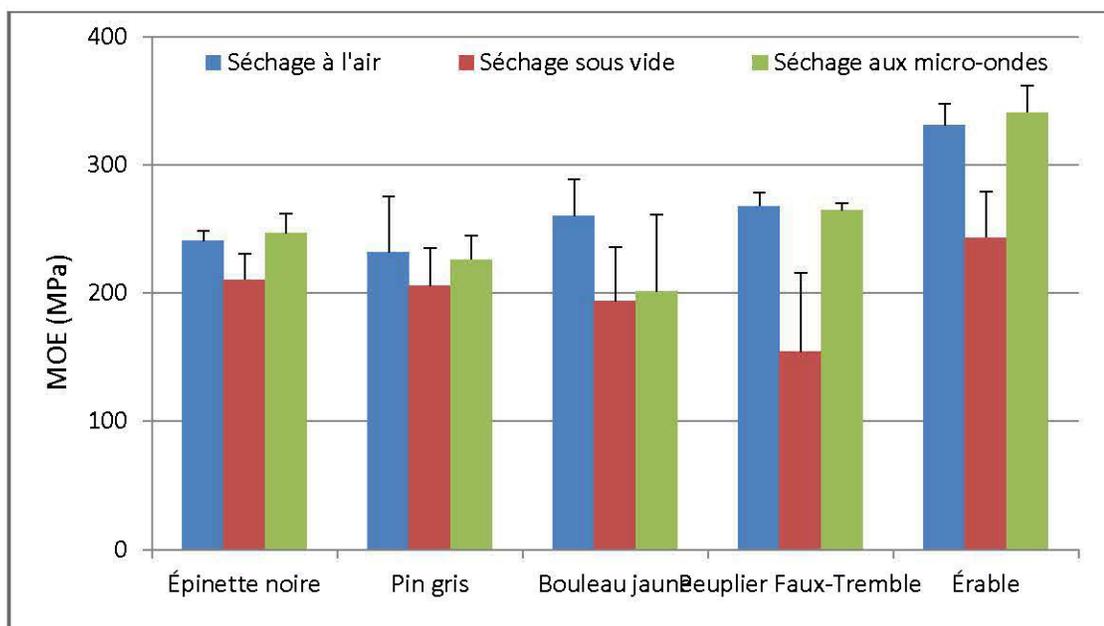


Figure 3.22 Effet du mode de séchage sur le MOE du bois en compression perpendiculaire

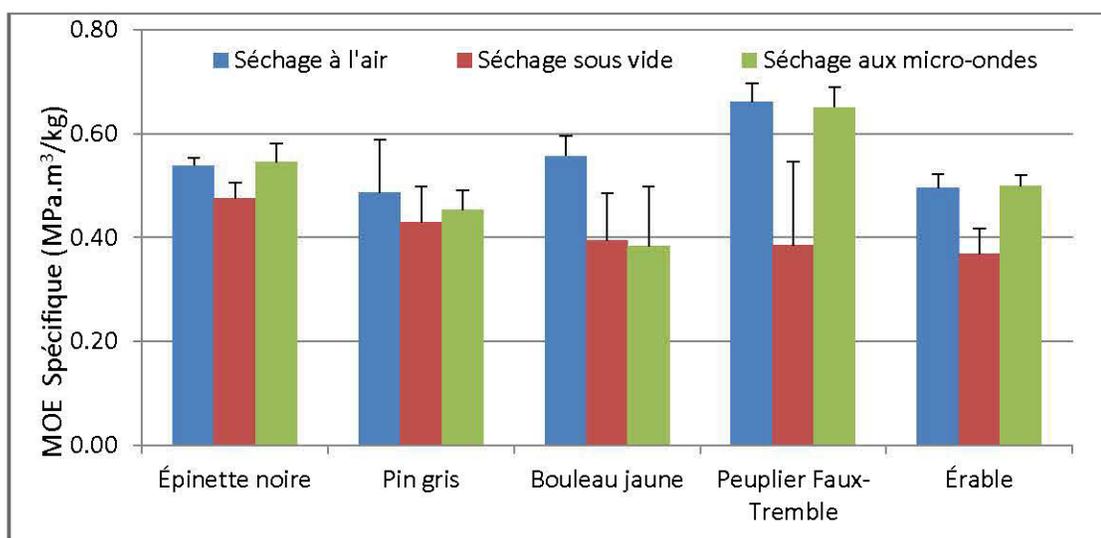


Figure 3.23 Effet du mode de séchage sur le MOE spécifique du bois en compression perpendiculaire

3.2.2 Effets du séchage aux micro-ondes sur les propriétés mécaniques du bois en flexion simple

Les figures 3.24 et 3.25 présentent l'effet des modes de séchage sur le MOE et le $MOE_{\text{spécifique}}$ du bois en flexion simple. Ces figures indiquent que le traitement aux micro-ondes n'a pas d'effets négatifs sur les différentes propriétés mécaniques du bois en flexion simple: le module d'élasticité (MOE) et le module d'élasticité spécifique ($MOE_{\text{spécifique}}$). Nous avons réalisé les différents essais mécaniques sous une humidité d'équilibre de l'ordre de 7% pour les différentes essences de bois traitées. Le tableau Annexe B-3 présente les différentes caractéristiques mécaniques (le module d'élasticité MOE, le module de rupture MOR, la déformation à la rupture $\varepsilon_{\text{Break}}$, l'énergie appliquée à la rupture W_{Break} , la masse volumique $M_{\text{volumique}}$ et le module d'élasticité spécifique $MOE_{\text{spécifique}}$) du bois en fonction de la nature du séchage.

En comparant les propriétés mécaniques des pièces traitées aux micro-ondes à celles traitées au séchoir sous vide ou à l'air, nous notons des différences significatives entre les trois groupes. Dans ce cas, les propriétés mécaniques en flexion simple pour les pièces séchées aux micro-ondes sont supérieures à celles séchées au séchoir sous vide ce qui a été prouvé par l'analyse de variance.

Ce résultat confirme les recherches antérieures. En effet, le traitement aux micro-ondes n'a pas d'impacts négatifs sur les propriétés mécaniques du bois lors d'un essai de flexion pour une teneur en humidité de 12% (Koubaa *et al.*, 2006). Ainsi, on peut conclure que le traitement phytosanitaire aux micro-ondes n'a pas d'impact négatif sur les propriétés mécaniques du bois.

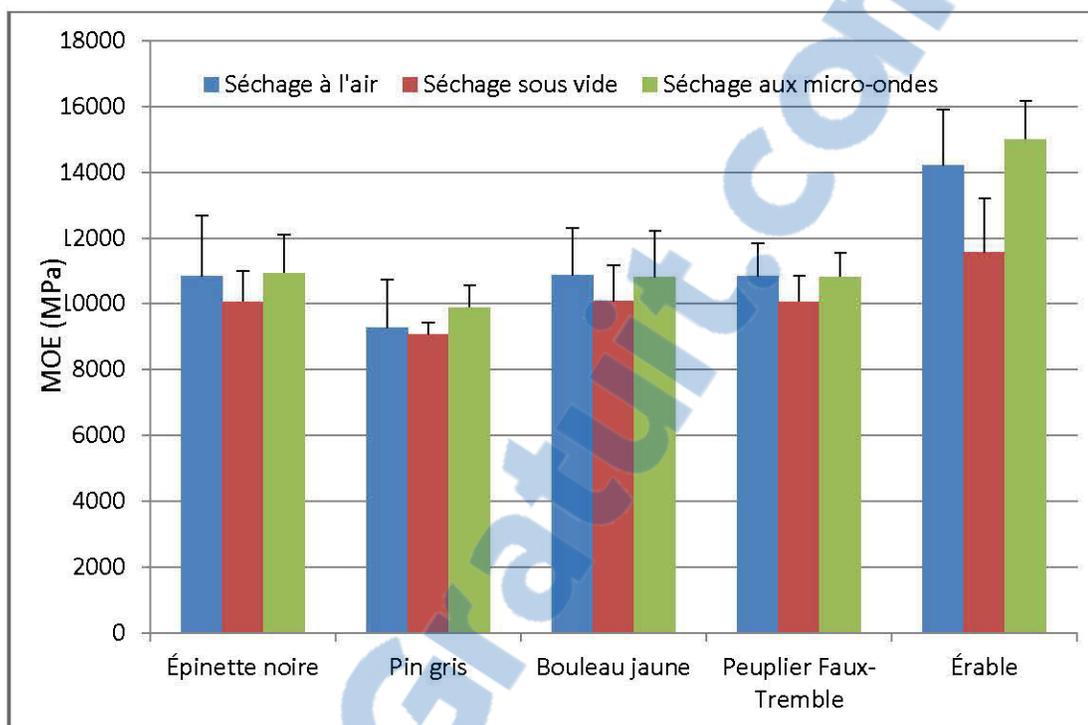


Figure 3.24 Effet du mode de séchage sur le MOE du bois en flexion

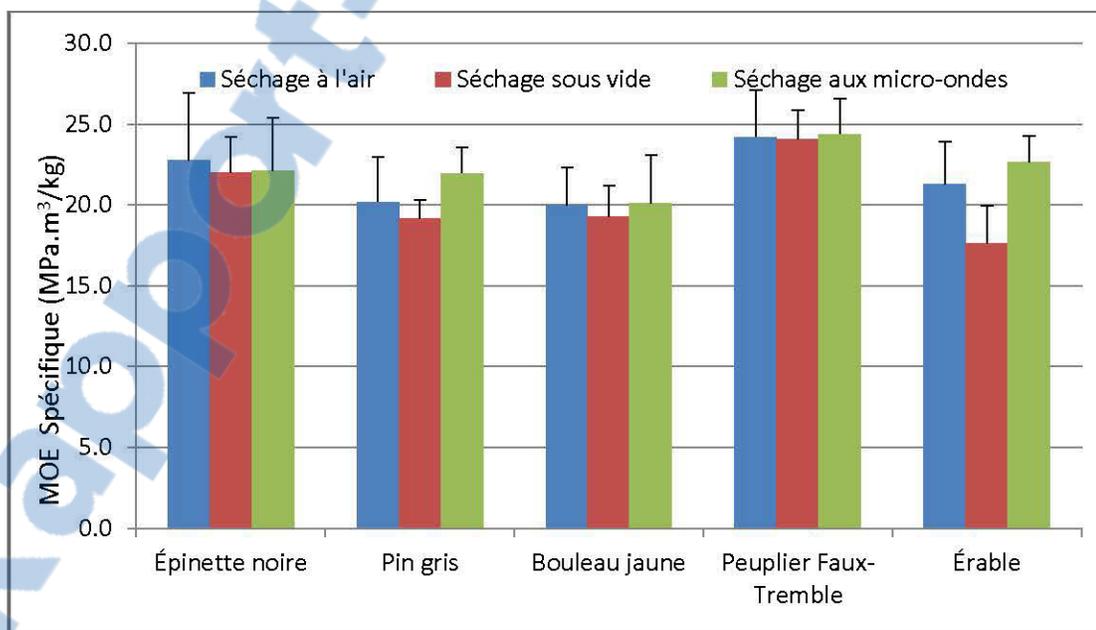


Figure 3.25 Effet du mode de séchage sur le MOE spécifique du bois en flexion

CONCLUSION

L'objectif de ce travail était d'évaluer le potentiel des micro-ondes pour le traitement phytosanitaire du bois. Pour ce faire, nous avons étudié l'évolution de la température et de la teneur en humidité au centre des pièces du bois traitées aux micro-ondes (200W), nous avons aussi réalisé des essais mécaniques sur des échantillons de bois préalablement séchés aux micro-ondes et nous avons établi une étude comparative par rapport à des échantillons séchés dans séchoir sous vide et sous pression et des échantillons séchés à l'air ambiant. Ces travaux nous ont permis de tirer les conclusions suivantes:

- L'évolution de la température est rapide au centre des pièces du bois traitées aux micro-ondes.

- La température de 60°C recommandée est atteinte après seulement un maximum de 70 secondes de traitement aux micro-ondes (200W). Cette durée pourra être moins longue pour les essences de bois les moins denses et pour les pièces de bois les moins humides.

- La teneur en humidité ne varie pas aussi rapidement que la température. En effet, la teneur en humidité diminue d'environ 10% après un traitement aux micro-ondes d'une durée d'environ 120 secondes.

- L'évolution de la température et de la teneur en humidité est plus rapide pour les échantillons de bois les moins denses et les moins humides.

- Le traitement du bois aux micro-ondes n'a pas d'effets négatifs sur les propriétés mécaniques. Mieux que ça, ce traitement présente des résultats meilleurs que le traitement au séchoir sous vide et sous pression et des résultats comparables au traitement à l'air ambiant.

En conclusion, les objectifs de ce projet ont été atteints. En effet, on sait aujourd'hui que l'utilisation des fours aux micro-ondes pourrait être une alternative efficace pour le traitement phytosanitaire. Cependant, quelques vérifications sont essentielles quant à l'efficacité d'un tel traitement pour le bois à l'état gelé, car les propriétés diélectriques du bois à l'état gelé sont totalement différentes de celles du bois à l'état vert ou sec (IPPC, 2011). Une autre étude sera nécessaire quant à la distribution de la température sur toute la surface de la pièce de bois. En effet, la température de 60 °C est atteinte rapidement au centre de la pièce, mais la durée minimale nécessaire de ce traitement pour atteindre cette température à la surface de la pièce n'est pas encore confirmée. Une évaluation de la rentabilité d'un tel traitement dans l'industrie sera nécessaire aussi afin d'encourager l'intégration des fours aux micro-ondes dans une ligne de production des palettes de bois.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aléon, D. 2004. «Traitement phytosanitaire du bois par chauffage à cœur». *Bulletin OEPP/EPPO*, vol. 34, p. 133-138.
- Antti, L. , Jonsson, A. et Nilsson, M. 2001. «The effects of drying method on the mechanical properties of wood: comparisons between conventional kiln and microwave dried scots pine». *Lulea University of Technology, Sweden*, p. 1-9.
- Bodig, J. et Jayne, B.A. . 1981. «Mechanics of wood and wood composites». *Van Nostrand Reinhold*, vol. xxi, p. 712.
- Bowyer, J., Shmulsky, R. et Haygreen, J. 2005. «Le bois et ses usages». *Bibliothèque nationale du Québec*, vol. 4th edition, p. 528.
- Fleming, M. R., Hoover, K., Janowiak, J. J., Fang, Y., Wang, X., Liu, W., Wang, Y., Hang, X., Agrawal, D., Mastro, V. C., Lance, D. R., Shield, J. E. et Roy, R. 2003. «Microwave irradiation of wood packing material to destroy the Asian longhorned beetle». *Forest Products Journal*, vol. 53, no 1, p. 46-52.
- Fleming, M. R., Janowiak, J. J., Kearns, J., Shield, J. E., Roy, R., Agrawal, D. K., Bauer, L. S., Miller, D. L. et Hoover, K. 2004. «Parameters for scale-up of lethal microwave treatment to eradicate cerambycid larvae infesting solid wood packing materials». *Forest Products Journal*, vol. 54, no 7-8, p. 80-84.
- Goulet, M. et Ouellet, E (1968). Effet de la teneur en humidité du bois sur sa résistance à la traction transversale. Notes de recherches N°1. Université Laval, Québec, Faculté de Foresterie et Géodésie
- Guitard, D. 1987. «Mecanique Du Materiau Bois Et Composites ». *Cepadues*, p. 238.
- Haack, R. A. 2001. «Intercepted Scolytidae (Coleoptera) at U.S. ports of entry: 1985–2000». *Integrated Pest Management Reviews*, vol. 6, p. 253-283.

- Hansson, L. 2007. «Microwave Treatment of Wood». Sweden, Lulea University of Technology, 137 p.
- Hansson, L. et Antti, A.L. 2004. «The effect of drying method and temperature level on the hardness of wood». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 171, no 2006, p. 467-470.
- Henin, J. M., Charron, S., Luybaert, P. J., Jourez, B. et Hébert, J. 2008. «Strategy to control the effectiveness of microwave treatment of wood in the framework of the implementation of ISPM 15». *Forest Products Journal*, vol. 58, no 12, p. 75-81.
- Hoover, K., Uzunovic, A., Gething, B., Dale, A., Leung, K., Ostiguy, N. et Janowiak, J.J. 2010. «Lethal Temperature For Pinewood Nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, in Infested Wood Using Microwave Energy». *The Society of Nematologists*, vol. 42, no 2, p. 101–110.
- IPPC. 2011. «Technical Panel on Phytosanitary Treatments-October 2011». p. 9.
- Koubaa, A., Lessard, J. et Mchachti, F. (2006). Évaluation du potentiel du séchage par micro-ondes pour le traitement phytosanitaire des produits d'emballage en bois. SEREX: 102 p
- Koubaa, A., Perré, P., Hutcheon, R. et Lessard, J. 2008. «Complex dielectric properties of the sapwood of aspen, white birch, yellow birch, and sugar maple». *Drying Technology*, vol. 26, no 5, p. 568-578.
- Machado, J. A. 2006. «Effect of Microwave Treatment on Oak Compression Strength». *Silva Lusitana 14(1)*, p. 8.
- McCullough, D. G. 2006. «Interceptions of nonindigenous plant pests at US ports of entry and border crossings over a 17-year period». *Biological Invasions*, vol. 8, p. 611-631.

- Molina-Murillo, S. A., Smith, T. M., Reichenbach, M. et Smith, R. 2005. «Impact of international phytosanitary standards on wood packaging material end users: Pre-implementation assessment». *Forest Products Journal*, vol. 55, no 9, p. 24-26.
- Moutee, M., Fortin, Y. et Fafard, M. 2007. «A global rheological model of wood cantilever as applied to wood drying». *Wood Sci. Technol.*, vol. 41(3), p. 209-234.
- Normes Internationales pour les Mesures Phytosanitaires, . (2009). Normes Internationales pour les Mesures Phytosanitaires. Révision de la NIMP n° 15 Réglementation des matériaux d'emballage en bois utilisés dans le commerce internationale 18 p
- Nzokou, P., Tourtellot, S. et Kamdem, D. P. 2008. «Kiln and microwave heat treatment of logs infested by the emerald ash borer (*Agrilus planipennis* Fairmaire) (Coleoptera: Buprestidae)». *Forest Products Journal*, vol. 58, no 7-8, p. 68-72.
- Oloyede, A. et Groombridge, P. 2000a. «A Control System for Microwave Processing of Materials». *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 122, p. 253-261.
- . 2000b. «Influence of microwave heating on the mechanical properties of wood». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 100, no 1, p. 67-73.
- Perré, Patrick. 2007. *Fundamentals of wood drying*, 2007. Coll. «COST E15». Nancy, 366 p.
- Resch, H. 2009. *Drying wood with high frequency electric current*. Austria, 84 p.
- Skaar, C. 1988. *Wood-water relations*. Coll. «Springer series in wood science ». Berlin; New York: Springer-Verlag GmbH & Co. KG; Springer-Verlag New York. Inc., 283 p.

- Studhalter, B., Ozarska, B. et Siemon, G. 2009. «Temperature and moisture content behaviour in microwave heated wood prior to bending –Mountain Ash (Eucalyptus regnans)». *Eur. J. Wood Prod.*, vol. 67, p. 237-239.
- USDA. 2003. «Importation of solid wood packaging material. Final environmental impact statement-Août 2003». p. 251.
- Vongpradubchai, S. et Rattanadecho, P. 2011. «Microwave and Hot Air Drying of Wood Using a Rectangular Waveguide». *Drying Technology*, vol. 29, p. 451-460.
- Yemshanov, D., Koch, F. H., McKenney, D. W., Downing, M. C. et Sapio, F. 2009. «Mapping invasive species risks with stochastic models: A cross-border United States-Canada application for *Sirex noctilio fabricius*». *Risk Analysis*, vol. 29, no 6, p. 868-884.
- Zhang, Y., Zhang, S. Y., Chui, Y. H. et Wan, H. . 2006. «Effect of impregnation and in-situ polymerization of methacrylates on hardness of sugar maple wood.». *J. Appl. Polym. Science*, vol. 99, p. 1674–1683.

ANNEXES

ANNEXE A Résultats détaillés du traitement thermique

Annexe A-1 Évolution de la température et de la teneur en humidité au centre des pièces de bois de l'érable à sucre en fonction du temps de traitement aux micro-ondes

Échantillon	Étape	Temps (s)	T1	T2	T3	Tmoy	Poids(g)	Poids sec (g)	H(%)
ER-HT-01	1	0	22	22	22	22	242,85	221,07	9,85
	2	15	47	42	38	42	242,77	221,07	9,82
	3	30	74	69	68	70	242,63	221,07	9,75
	4	45	92	87	86	88	242,51	221,07	9,70
	5	60	106	102	99	102	242,02	221,07	9,48
	6	90	120	119	116	118	239,12	221,07	8,16
	7	120	131	129	123	128	236,03	221,07	6,77
	8	180	149	142	141	144	229,12	221,07	3,64
	9	240	163	158	159	160	223,95	221,07	1,30
ER-HT-02	1	0	21	22	21	21	244,9	220,97	10,83
	2	15	41	40	32	38	244,83	220,97	10,80
	3	30	60	62	51	58	244,68	220,97	10,73
	4	45	68	69	65	67	244,54	220,97	10,67
	5	60	79	86	82	82	243,96	220,97	10,40
	6	90	99	103	96	99	240,12	220,97	8,67
	7	120	119	121	119	120	236,89	220,97	7,20
	8	180	131	133	138	134	228,78	220,97	3,53
	9	240	156	158	161	158	222,61	220,97	0,74
ER-HT-03	1	0	18	19	18	18	270,32	220,71	22,48
	2	15	33	44	36	38	270,21	220,71	22,43
	3	30	59	67	52	59	270,14	220,71	22,40
	4	45	73	77	67	72	270,01	220,71	22,34
	5	60	89	87	81	86	269,63	220,71	22,16

	6	90	93	97	96	95	266,32	220,71	20,67
	7	120	113	115	111	113	263,57	220,71	19,42
	8	180	135	134	129	133	257,94	220,71	16,87
	9	240	149	147	151	149	252,25	220,71	14,29
	10	300	163	161	168	164	245,45	220,71	11,21
	11	360	181	182	187	183	234,19	220,71	6,11
ER-HT-04	1	0	19	19	19	19	296,94	220,47	34,68
	2	15	43	37	34	38	296,87	220,47	34,65
	3	30	51	47	53	50	296,74	220,47	34,59
	4	45	62	55	62	60	295,22	220,47	33,90
	5	60	78	62	75	72	294,75	220,47	33,69
	6	90	93	81	92	89	291,67	220,47	32,29
	7	120	116	115	119	117	288,19	220,47	30,72
	8	180	132	133	135	133	282,32	220,47	28,05
	9	240	149	151	153	151	274,45	220,47	24,48
	10	300	163	165	168	165	265,64	220,47	20,49
	11	360	177	179	181	179	253,58	220,47	15,02
	12	420	196	191	193	193	240,81	220,47	9,23
ER-HT-05	1	0	18	18	19	18	345,27	221,87	55,62
	2	15	31	25	29	28	345,02	221,87	55,51
	3	30	43	35	38	39	344,45	221,87	55,25
	4	45	55	41	48	48	342,61	221,87	54,42
	5	60	63	57	63	61	341,21	221,87	53,79
	6	90	83	70	76	76	335,68	221,87	51,30
	7	120	98	90	92	93	328,12	221,87	47,89
	8	180	119	118	121	119	313,23	221,87	41,18
	9	240	132	136	141	136	298,43	221,87	34,51
	10	300	149	153	162	155	268,56	221,87	21,04
	11	360	162	171	179	171	253,67	221,87	14,33
	12	420	181	183	186	183	243,81	221,87	9,89
	13	480	193	191	199	194	233,14	221,87	5,08
ER-HT-06	1	0	19	18	18	18	346,48	228,23	51,81
	2	15	32	27	30	30	346,27	228,23	51,72
	3	30	41	34	38	38	345,51	228,23	51,39
	4	45	51	40	43	45	343,76	228,23	50,62
	5	60	70	67	55	64	342,05	228,23	49,87

	6	90	88	79	83	83	336,12	228,23	47,27
	7	120	112	99	107	106	331,41	228,23	45,21
	8	180	123	114	115	117	316,44	228,23	38,65
	9	240	131	123	124	126	301,78	228,23	32,23
	10	300	141	133	132	135	270,17	228,23	18,38
	11	360	149	142	143	145	255,21	228,23	11,82
	12	420	155	153	151	153	245,93	228,23	7,76
	13	480	163	164	171	166	234,14	228,23	2,59
ER-HT-07	1	0	17	17	17	17	378,36	228,12	65,86
	2	15	37	29	30	32	378,23	228,12	65,80
	3	30	48	39	40	42	377,89	228,12	65,65
	4	45	59	52	53	55	376,73	228,12	65,15
	5	60	69	63	64	65	375,23	228,12	64,49
	6	90	98	86	85	90	371,55	228,12	62,87
	7	120	121	114	116	117	365,54	228,12	60,24
	8	180	134	131	132	132	354,14	228,12	55,24
	9	240	145	146	143	145	339,35	228,12	48,76
	10	300	156	153	151	153	318,47	228,12	39,61
	11	360	163	163	161	162	296,87	228,12	30,14
	12	420	178	176	172	175	272,65	228,12	19,52
	13	480	191	192	195	193	250,12	228,12	9,64
ER-HT-08	1	0	19	20	18	19	396,14	221,12	79,15
	2	15	33	26	32	30	395,99	221,12	79,08
	3	30	46	36	45	42	395,63	221,12	78,92
	4	45	57	51	58	55	394,61	221,12	78,46
	5	60	63	61	65	63	393,05	221,12	77,75
	6	90	79	73	77	76	389,51	221,12	76,15
	7	120	93	85	91	90	382,21	221,12	72,85
	8	180	104	95	103	101	373,12	221,12	68,74
	9	240	113	116	117	115	361,25	221,12	63,37
	10	300	131	126	125	127	343,23	221,12	55,22
	11	360	151	142	146	146	319,58	221,12	44,53
	12	420	177	171	166	171	296,65	221,12	34,16
	13	480	199	193	189	194	274,54	221,12	24,16
ER-HT-09	1	0	18	18	18	18	419,65	223,57	87,70
	2	15	34	27	31	31	419,54	223,57	87,65

	3	30	45	37	42	41	419,46	223,57	87,62
	4	45	61	44	55	53	419,32	223,57	87,56
	5	60	70	57	65	64	418,56	223,57	87,22
	6	90	77	63	78	73	414,45	223,57	85,38
	7	120	94	77	95	89	410,89	223,57	83,79
	8	180	103	98	110	104	402,21	223,57	79,90
	9	240	117	115	119	117	393,65	223,57	76,07
	10	300	131	133	125	130	367,74	223,57	64,49
	11	360	144	151	136	144	340,76	223,57	52,42
	12	420	156	169	146	157	316,31	223,57	41,48
	13	480	171	188	166	175	288,26	223,57	28,94
ER-HT-10	1	0	20	20	20	20	441,42	226,45	94,93
	2	15	30	29	33	31	441,35	226,45	94,90
	3	30	39	41	40	40	441,24	226,45	94,85
	4	45	52	55	51	53	441,09	226,45	94,78
	5	60	65	64	63	64	440,54	226,45	94,54
	6	90	73	71	72	72	436,21	226,45	92,63
	7	120	86	87	85	86	431,91	226,45	90,73
	8	180	98	92	93	94	423,54	226,45	87,03
	9	240	106	108	106	107	414,56	226,45	83,07
	10	300	119	118	116	118	389,36	226,45	71,94
	11	360	126	128	125	126	362,19	226,45	59,94
	12	420	133	139	136	136	334,31	226,45	47,63
	13	480	152	158	161	157	306,84	226,45	35,50

Annexe A-2 Évolution de la température et de la teneur en humidité au centre des pièces de bois du bouleau jaune en fonction du temps de traitement aux micro-ondes

Échantillon	Étape	Temps (s)	T1	T2	T3	Tmoy	Poids(g)	Poids sec (g)	H(%)
BJ-HT-01	1	0	22	21	22	22	209,74	186,35	12,55
	2	15	49	44	41	45	209,63	186,35	12,49
	3	30	59	62	58	60	209,52	186,35	12,43
	4	45	75	78	74	76	209,28	186,35	12,30
	5	60	95	97	99	97	208,26	186,35	11,76
	6	90	118	115	120	118	205,21	186,35	10,12
	7	120	131	139	138	136	202,15	186,35	8,48
	8	180	149	151	153	151	197,53	186,35	6,00
	9	240	163	169	171	168	193,15	186,35	3,65
BJ-HT-02	1	0	22	22	22	22	213,76	195,61	9,28
	2	15	44	45	43	44	213,67	195,61	9,23
	3	30	57	61	61	60	213,54	195,61	9,17
	4	45	74	78	77	76	213,35	195,61	9,07
	5	60	93	97	99	96	212,61	195,61	8,69
	6	90	115	117	117	116	209,65	195,61	7,18
	7	120	132	133	138	134	206,28	195,61	5,45
	8	180	146	149	152	149	201,43	195,61	2,98
	9	240	160	165	170	165	197,55	195,61	0,99
BJ-HT-03	1	0	20	21	20	20	215,32	172,21	25,03
	2	15	36	49	39	41	215,21	172,21	24,97
	3	30	57	77	65	66	215,14	172,21	24,93
	4	45	67	85	82	78	215,01	172,21	24,85
	5	60	80	95	95	90	214,63	172,21	24,63
	6	90	98	110	103	104	211,32	172,21	22,71
	7	120	118	121	119	119	208,57	172,21	21,11
	8	180	133	139	131	134	202,94	172,21	17,84
	9	240	155	154	150	153	197,25	172,21	14,54
	10	300	167	171	166	168	190,45	172,21	10,59
	11	360	177	179	175	177	179,19	172,21	4,05
BJ-HT-04	1	0	19	20	19	19	238,94	179,54	33,08
	2	15	34	32	33	33	238,87	179,54	33,05
	3	30	49	51	52	51	238,74	179,54	32,97
	4	45	66	63	68	66	237,22	179,54	32,13

	5	60	84	79	83	82	236,75	179,54	31,86
	6	90	101	99	99	100	233,67	179,54	30,15
	7	120	112	117	111	113	230,19	179,54	28,21
	8	180	125	129	124	126	224,32	179,54	24,94
	9	240	134	138	133	135	216,45	179,54	20,56
	10	300	149	151	148	149	207,64	179,54	15,65
	11	360	158	163	157	159	195,58	179,54	8,93
	12	420	171	178	173	174	182,81	179,54	1,82
BJ-HT-05	1	0	18	19	19	19	271,85	188,01	44,59
	2	15	28	30	29	29	271,77	188,01	44,55
	3	30	39	41	42	41	271,65	188,01	44,49
	4	45	51	52	55	53	271,23	188,01	44,26
	5	60	67	70	69	69	270,71	188,01	43,99
	6	90	93	95	97	95	267,35	188,01	42,20
	7	120	108	105	108	107	263,46	188,01	40,13
	8	180	126	129	121	125	256,18	188,01	36,26
	9	240	134	137	132	134	247,24	188,01	31,50
	10	300	149	149	148	149	235,38	188,01	25,20
	11	360	161	163	161	162	222,91	188,01	18,56
	12	420	172	179	171	174	204,59	188,01	8,82
BJ-HT-06	1	0	18	19	18	18	282,64	180,71	56,41
	2	15	29	28	31	29	282,51	180,71	56,33
	3	30	36	37	39	37	282,43	180,71	56,29
	4	45	55	51	54	53	281,91	180,71	56,00
	5	60	67	58	67	64	281,46	180,71	55,75
	6	90	90	75	85	83	278,32	180,71	54,01
	7	120	103	97	103	101	274,98	180,71	52,17
	8	180	126	129	121	125	267,85	180,71	48,22
	9	240	133	135	132	133	258,69	180,71	43,15
	10	300	149	148	148	148	244,54	180,71	35,32
	11	360	160	163	160	161	231,87	180,71	28,31
	12	420	172	178	171	174	217,95	180,71	20,61
	13	480	185	184	180	183	202,75	180,71	12,20
BJ-HT-07	1	0	19	18	18	18	321,36	184,75	73,94
	2	15	27	25	27	26	321,23	184,75	73,87
	3	30	34	35	36	35	320,89	184,75	73,69

	4	45	51	46	51	49	319,73	184,75	73,06
	5	60	65	62	61	63	318,23	184,75	72,25
	6	90	86	79	82	82	314,55	184,75	70,26
	7	120	99	94	95	96	308,54	184,75	67,00
	8	180	111	109	111	110	297,14	184,75	60,83
	9	240	133	135	133	134	282,35	184,75	52,83
	10	300	151	148	147	149	261,47	184,75	41,53
	11	360	161	163	162	162	239,87	184,75	29,83
	12	420	175	178	174	176	215,65	184,75	16,73
	13	480	197	191	193	194	193,12	184,75	4,53
BJ-HT-08	1	0	19	18	18	18	331,14	186,89	77,18
	2	15	37	31	35	34	330,99	186,89	77,10
	3	30	55	41	46	47	330,63	186,89	76,91
	4	45	68	54	55	59	329,61	186,89	76,37
	5	60	71	64	65	67	328,05	186,89	75,53
	6	90	87	85	81	84	324,51	186,89	73,64
	7	120	92	94	93	93	317,21	186,89	69,73
	8	180	102	105	111	106	308,12	186,89	64,87
	9	240	132	135	133	133	296,25	186,89	58,52
	10	300	150	148	148	149	278,23	186,89	48,87
	11	360	163	163	162	163	254,58	186,89	36,22
	12	420	175	178	172	175	231,65	186,89	23,95
	13	480	197	190	193	193	209,54	186,89	12,12
BJ-HT-09	1	0	17	17	17	17	350,65	191,12	83,47
	2	15	29	27	27	28	350,54	191,12	83,41
	3	30	41	40	41	41	350,46	191,12	83,37
	4	45	54	52	56	54	350,32	191,12	83,30
	5	60	67	65	68	67	349,56	191,12	82,90
	6	90	89	89	81	86	345,45	191,12	80,75
	7	120	98	95	96	96	341,89	191,12	78,89
	8	180	115	114	113	114	333,21	191,12	74,35
	9	240	133	135	131	133	324,65	191,12	69,87
	10	300	155	154	156	155	298,74	191,12	56,31
	11	360	171	175	176	174	271,76	191,12	42,19
	12	420	182	183	189	185	247,31	191,12	29,40
	13	480	197	196	199	197	219,26	191,12	14,72

BJ-HT-10	1	0	17	17	17	17	331,42	173,52	91,00
	2	15	31	35	34	33	331,35	173,52	90,96
	3	30	53	56	49	53	331,24	173,52	90,89
	4	45	69	71	64	68	331,09	173,52	90,81
	5	60	79	85	78	81	330,54	173,52	90,49
	6	90	93	101	98	97	326,21	173,52	88,00
	7	120	115	116	119	117	321,91	173,52	85,52
	8	180	127	128	129	128	313,54	173,52	80,69
	9	240	136	139	133	136	304,56	173,52	75,52
	10	300	155	154	154	154	279,36	173,52	61,00
	11	360	169	173	171	171	252,19	173,52	45,34
	12	420	183	185	184	184	224,31	173,52	29,27
	13	480	198	197	196	197	196,84	173,52	13,44

Annexe A-3 Évolution de la température et de la teneur en humidité au centre des pièces de bois de l'épinette noire en fonction du temps de traitement aux micro-ondes

Échantillon	Étape	Temps (s)	T1	T2	T3	Tmoy	Poids(g)	Poids sec (g)	H(%)
EP-HT-01	1	0	22	22	22	22	171,65	153,32	11,96
	2	15	48	45	46	46	171,61	153,32	11,93
	3	30	68	65	61	65	171,47	153,32	11,84
	4	45	85	85	84	85	171,17	153,32	11,64
	5	60	104	106	111	107	170,55	153,32	11,24
	6	90	121	132	137	130	168,23	153,32	9,72
	7	120	148	157	159	155	164,34	153,32	7,19
	8	180	170	177	181	176	157,37	153,32	2,64
EP-HT-02	1	0	22	22	22	22	179	162,01	10,49
	2	15	43	49	48	47	178,95	162,01	10,46
	3	30	65	67	68	67	178,68	162,01	10,29
	4	45	82	85	89	85	178,28	162,01	10,04
	5	60	103	109	111	108	177,71	162,01	9,69
	6	90	119	124	129	124	175,43	162,01	8,28
	7	120	141	145	153	146	172,28	162,01	6,34
	8	180	169	171	185	175	163,86	162,01	1,14
EP-HT-03	1	0	20	20	20	20	201,58	148,37	35,86
	2	15	31	35	33	33	201,42	148,37	35,76
	3	30	45	48	51	48	201,18	148,37	35,59
	4	45	65	65	71	67	200,62	148,37	35,22
	5	60	81	79	81	80	200,09	148,37	34,86
	6	90	99	103	105	102	195,12	148,37	31,51
	7	120	118	121	125	121	191,89	148,37	29,33
	8	180	134	144	148	142	180,23	148,37	21,47

	9	240	154	161	163	159	168,56	148,37	13,61
	10	300	177	181	179	179	157,45	148,37	6,12
EP-HT-04	1	0	20	20	21	20	213	159,3	33,71
	2	15	35	38	35	36	212,91	159,3	33,65
	3	30	48	49	50	49	212,51	159,3	33,40
	4	45	67	67	69	68	212,03	159,3	33,10
	5	60	85	86	85	85	211,61	159,3	32,84
	6	90	105	106	109	107	207,45	159,3	30,23
	7	120	125	127	129	127	202,56	159,3	27,16
	8	180	145	146	149	147	191,85	159,3	20,43
	9	240	162	168	171	167	179,12	159,3	12,44
	10	300	182	185	193	187	161,23	159,3	1,21
EP-HT-05	1	0	18	18	18	18	232,96	152,51	52,75
	2	15	31	29	32	31	232,81	152,51	52,65
	3	30	45	48	50	48	232,23	152,51	52,27
	4	45	55	58	59	57	231,31	152,51	51,67
	5	60	71	69	75	72	230,78	152,51	51,32
	6	90	91	89	95	92	226,43	152,51	48,47
	7	120	111	105	109	108	219,81	152,51	44,13
	8	180	125	121	128	125	207,65	152,51	36,16
	9	240	143	148	151	147	187,01	152,51	22,62
	10	300	164	168	168	167	168,23	152,51	10,31
	11	360	181	179	185	182	161,87	152,51	6,14
EP-HT-06	1	0	18	18	18	18	233,82	150,46	55,40
	2	15	29	31	31	30	233,7	150,46	55,32
	3	30	46	49	43	46	233,29	150,46	55,05
	4	45	58	61	55	58	232,21	150,46	54,33
	5	60	75	79	71	75	231,72	150,46	54,01

	6	90	91	95	89	92	227,21	150,46	51,01
	7	120	111	110	101	107	221,12	150,46	46,96
	8	180	121	129	119	123	210,78	150,46	40,09
	9	240	145	151	139	145	191,65	150,46	27,38
	10	300	163	172	159	165	171,34	150,46	13,88
	11	360	182	191	181	185	162,89	150,46	8,26
EP-HT-07	1	0	17	17	17	17	271,12	153,78	76,30
	2	15	25	28	27	27	270,91	153,78	76,17
	3	30	43	42	41	42	270,42	153,78	75,85
	4	45	55	57	52	55	269,93	153,78	75,53
	5	60	72	75	69	72	269,32	153,78	75,13
	6	90	89	91	90	90	264,21	153,78	71,81
	7	120	101	99	103	101	258,89	153,78	68,35
	8	180	118	121	117	119	246,75	153,78	60,46
	9	240	131	141	135	136	232,78	153,78	51,37
	10	300	151	162	158	157	214,16	153,78	39,26
	11	360	171	182	175	176	192,45	153,78	25,15
	12	420	189	195	191	192	162,17	153,78	5,46
EP-HT-08	1	0	17	17	17	17	282,56	158,95	77,77
	2	15	25	28	27	27	282,42	158,95	77,68
	3	30	43	42	41	42	281,91	158,95	77,36
	4	45	55	57	52	55	281,45	158,95	77,07
	5	60	72	75	69	72	280,93	158,95	76,74
	6	90	89	91	90	90	274,12	158,95	72,46
	7	120	101	99	103	101	268,48	158,95	68,91
	8	180	118	121	117	119	256,37	158,95	61,29
	9	240	131	141	135	136	240,85	158,95	51,53
	10	300	151	162	158	157	224,36	158,95	41,15

	11	360	171	182	175	176	193,46	158,95	21,71
	12	420	189	195	191	192	164,98	158,95	3,79
EP-HT-09	1	0	17	18	17	17	298,12	157,69	89,05
	2	15	26	27	27	27	297,92	157,69	88,93
	3	30	41	42	41	41	297,45	157,69	88,63
	4	45	58	56	54	56	296,94	157,69	88,31
	5	60	69	71	70	70	296,41	157,69	87,97
	6	90	85	89	88	87	291,54	157,69	84,88
	7	120	105	103	106	105	285,78	157,69	81,23
	8	180	115	119	120	118	272,65	157,69	72,90
	9	240	133	135	138	135	257,65	157,69	63,39
	10	300	151	152	155	153	240,46	157,69	52,49
	11	360	171	174	175	173	219,45	157,69	39,17
	12	420	191	189	191	190	190,12	157,69	20,57
EP-HT-10	1	0	17	18	17	17	295,89	155,71	90,03
	2	15	26	27	27	27	295,75	155,71	89,94
	3	30	41	42	41	41	295,18	155,71	89,57
	4	45	58	56	54	56	294,65	155,71	89,23
	5	60	69	71	70	70	294,15	155,71	88,91
	6	90	85	89	88	87	289,35	155,71	85,83
	7	120	101	105	102	103	283,78	155,71	82,25
	8	180	115	119	120	118	270,13	155,71	73,48
	9	240	133	135	138	135	254,87	155,71	63,68
	10	300	151	152	155	153	235,34	155,71	51,14
	11	360	171	174	175	173	213,23	155,71	36,94
	12	420	191	189	191	190	185,51	155,71	19,14

Annexe A-4 Évolution de la température et de la teneur en humidité au centre des pièces de bois du peuplier faux tremble en fonction du temps de traitement aux micro-ondes

Échantillon	Étape	Temps (s)	T1	T2	T3	Tmoy	Poids(g)	Poids sec (g)	H(%)
PFT-HT-01	1	0	23	22	22	22	156,1	139,45	11,94
	2	15	59	61	60	60	156,04	139,45	11,90
	3	30	77	77	73	76	155,98	139,45	11,85
	4	45	99	96	87	94	155,85	139,45	11,76
	5	60	117	115	111	114	155,66	139,45	11,62
	6	90	132	131	127	130	154,46	139,45	10,76
	7	120	155	153	148	152	152,6	139,45	9,43
	8	180	168	162	161	164	147,5	139,45	5,77
PFT-HT-02	1	0	22	22	22	22	157,41	147,94	6,40
	2	15	58	62	60	60	157,37	147,94	6,37
	3	30	77	78	72	76	157,25	147,94	6,29
	4	45	100	96	89	95	156,97	147,94	6,10
	5	60	115	112	102	110	156,23	147,94	5,60
	6	90	135	129	123	129	155,12	147,94	4,85
	7	120	159	158	142	153	153,84	147,94	3,99
	8	180	165	169	161	165	148,32	147,94	0,26
PFT-HT-03	1	0	17	18	17	17	199,82	147,51	35,46
	2	15	45	52	58	52	198,52	147,51	34,58
	3	30	67	68	74	70	197,61	147,51	33,96
	4	45	89	80	89	86	196,41	147,51	33,15
	5	60	95	96	98	96	194,88	147,51	32,11
	6	90	109	106	111	109	191,69	147,51	29,95
	7	120	114	117	128	120	186,41	147,51	26,37
	8	180	131	134	142	136	176,65	147,51	19,75

	9	240	150	151	159	153	165,32	147,51	12,07
	10	300	171	169	175	172	153,45	147,51	4,03
PFT-HT-04	1	0	13	12	12	12	214,93	166,23	29,30
	2	15	62	74	67	68	213,05	166,23	28,17
	3	30	78	96	90	88	212,09	166,23	27,59
	4	45	89	99	96	95	210,81	166,23	26,82
	5	60	103	109	108	107	209,35	166,23	25,94
	6	90	115	115	119	116	204,45	166,23	22,99
	7	120	133	131	129	131	200,51	166,23	20,62
	8	180	155	159	149	154	189,23	166,23	13,84
	9	240	173	171	163	169	177,45	166,23	6,75
	10	300	191	192	185	189	168,87	166,23	1,59
PFT-HT-05	1	0	18	19	19	19	215,62	146,37	47,31
	2	15	43	45	43	44	215,37	146,37	47,14
	3	30	67	69	81	72	214,83	146,37	46,77
	4	45	84	88	95	89	213,91	146,37	46,14
	5	60	93	102	108	101	212,91	146,37	45,46
	6	90	107	117	121	115	210,54	146,37	43,84
	7	120	133	131	132	132	207,12	146,37	41,50
	8	180	156	155	154	155	197,21	146,37	34,73
	9	240	178	176	171	175	185,2	146,37	26,53
	10	300	185	189	184	186	173,56	146,37	18,58
	11	360	196	198	199	198	154,15	146,37	5,32
PFT-HT-06	1	0	17	17	17	17	240,15	153,23	56,73
	2	15	38	32	59	43	238,09	153,23	55,38
	3	30	78	52	62	64	237,04	153,23	54,70
	4	45	93	78	94	88	235,78	153,23	53,87
	5	60	109	91	103	101	234,56	153,23	53,08

	6	90	114	104	119	112	231,61	153,23	51,15
	7	120	133	123	134	130	225,81	153,23	47,37
	8	180	145	141	146	144	213,26	153,23	39,18
	9	240	158	156	158	157	201,45	153,23	31,47
	10	300	169	173	172	171	188,45	153,23	22,99
	11	360	185	189	185	186	174,34	153,23	13,78
	12	420	199	194	196	196	161,78	153,23	5,58
PFT-HT-07	1	0	17	18	17	17	248,11	148,19	67,43
	2	15	31	35	32	33	248,05	148,19	67,39
	3	30	42	41	45	43	247,48	148,19	67,00
	4	45	53	50	59	54	246,42	148,19	66,29
	5	60	72	67	87	75	245,15	148,19	65,43
	6	90	68	92	106	89	240,21	148,19	62,10
	7	120	121	123	124	123	235,11	148,19	58,65
	8	180	139	136	137	137	222,21	148,19	49,95
	9	240	151	152	157	153	208,21	148,19	40,50
	10	300	171	173	177	174	189,87	148,19	28,13
	11	360	192	193	190	192	165,11	148,19	11,42
PFT-HT-08	1	0	19	18	17	18	249,98	145,62	71,67
	2	15	33	29	31	31	249,81	145,62	71,55
	3	30	48	39	42	43	249,34	145,62	71,23
	4	45	61	49	58	56	248,41	145,62	70,59
	5	60	81	69	69	73	247,12	145,62	69,70
	6	90	103	89	97	96	242,34	145,62	66,42
	7	120	124	115	118	119	237,11	145,62	62,83
	8	180	138	131	133	134	223,15	145,62	53,24
	9	240	156	151	145	151	207,16	145,62	42,26
	10	300	174	173	165	171	186,14	145,62	27,83

	11	360	196	191	181	189	163,66	145,62	12,39
PFT-HT-09	1	0	18	17	17	17	280,47	142,45	96,89
	2	15	35	31	28	31	279,21	142,45	96,01
	3	30	44	36	43	41	278,21	142,45	95,30
	4	45	60	48	53	54	277,11	142,45	94,53
	5	60	72	60	73	68	275,81	142,45	93,62
	6	90	94	81	92	89	272,51	142,45	91,30
	7	120	125	117	126	123	266,25	142,45	86,91
	8	180	139	137	142	139	256,14	142,45	79,81
	9	240	156	159	162	159	245,45	142,45	72,31
	10	300	169	172	177	173	231,56	142,45	62,56
	11	360	175	185	186	182	219,98	142,45	54,43
	12	420	187	194	191	191	203,45	142,45	42,82
	13	480	198	199	198	198	187,56	142,45	31,67
PFT-HT-10	1	0	18	18	18	18	273,89	150,04	82,54
	2	15	30	30	34	31	273,25	150,04	82,12
	3	30	44	40	52	45	271,92	150,04	81,23
	4	45	56	50	62	56	269,7	150,04	79,75
	5	60	85	67	84	79	267,81	150,04	78,49
	6	90	106	86	106	99	264,21	150,04	76,09
	7	120	125	119	129	124	260,01	150,04	73,29
	8	180	139	134	147	140	251,15	150,04	67,39
	9	240	153	152	162	156	231,54	150,04	54,32
	10	300	174	172	178	175	201,26	150,04	34,14
	11	360	187	189	189	188	184,56	150,04	23,01
	12	420	199	197	199	198	163,12	150,04	8,72

Annexe A-5 Évolution de la température et de la teneur en humidité au centre des pièces de bois du pin gris en fonction du temps de traitement aux micro-ondes

Échantillon	Étape	Temps (s)	T1	T2	T3	Tmoy	Poids(g)	Poids sec (g)	H(%)
P-HT-01	1	0	22	23	22	22	145,02	131,58	10,21
	2	15	49	58	51	53	144,95	131,58	10,16
	3	30	68	78	72	73	144,83	131,58	10,07
	4	45	85	96	93	91	144,52	131,58	9,83
	5	60	104	114	115	111	143,87	131,58	9,34
	6	90	121	132	137	130	141,65	131,58	7,65
	7	120	148	157	159	155	139,51	131,58	6,03
	8	180	170	177	181	176	135,49	131,58	2,97
P-HT-02	1	0	22	22	22	22	152,12	140,82	8,02
	2	15	43	49	48	47	152,07	140,82	7,99
	3	30	65	67	68	67	151,95	140,82	7,90
	4	45	82	85	89	85	151,61	140,82	7,66
	5	60	103	109	111	108	151,03	140,82	7,25
	6	90	119	124	129	124	148,84	140,82	5,70
	7	120	141	145	153	146	146,57	140,82	4,08
	8	180	169	171	185	175	143,23	140,82	1,71
P-HT-03	1	0	18	18	18	18	204,58	146,34	39,80
	2	15	31	28	30	30	204,42	146,34	39,69
	3	30	36	37	37	37	204,18	146,34	39,52
	4	45	48	50	45	48	203,62	146,34	39,14
	5	60	58	62	60	60	203,09	146,34	38,78
	6	90	84	88	83	85	198,12	146,34	35,38
	7	120	106	102	107	105	194,89	146,34	33,18
	8	180	121	119	123	121	183,23	146,34	25,21
	9	240	135	136	138	136	171,56	146,34	17,23

	10	300	159	156	151	155	160,45	146,34	9,64
P-HT-04	1	0	18	18	18	18	194	140,59	37,99
	2	15	46	36	38	40	193,91	140,59	37,93
	3	30	63	51	57	57	193,51	140,59	37,64
	4	45	81	68	78	76	193,03	140,59	37,30
	5	60	93	83	86	87	192,61	140,59	37,00
	6	90	113	108	103	108	188,45	140,59	34,04
	7	120	133	127	123	128	183,56	140,59	30,56
	8	180	149	143	142	145	172,85	140,59	22,95
	9	240	160	157	158	158	160,12	140,59	13,89
	10	300	176	171	173	173	142,23	140,59	1,17
P-HT-05	1	0	18	18	18	18	215,94	143,1	50,90
	2	15	31	37	30	33	215,88	143,1	50,86
	3	30	45	55	45	48	215,23	143,1	50,41
	4	45	58	68	66	64	214,27	143,1	49,73
	5	60	72	89	85	82	213,09	143,1	48,91
	6	90	103	115	112	110	210,31	143,1	46,97
	7	120	121	134	129	128	206,21	143,1	44,10
	8	180	138	142	141	140	191,32	143,1	33,70
	9	240	149	151	151	150	174,53	143,1	21,96
	10	300	160	161	159	160	159,89	143,1	11,73
	11	360	173	172	173	173	146,21	143,1	2,17
P-HT-06	1	0	19	19	19	19	209,84	137,45	52,67
	2	15	36	36	34	35	209,66	137,45	52,54
	3	30	58	50	52	53	209,18	137,45	52,19
	4	45	68	65	68	67	208,48	137,45	51,68
	5	60	75	79	75	76	207,21	137,45	50,75
	6	90	101	108	105	105	203,59	137,45	48,12

	7	120	123	125	127	125	200,51	137,45	45,88
	8	180	138	140	139	139	185,21	137,45	34,75
	9	240	151	149	148	149	170,61	137,45	24,13
	10	300	162	160	158	160	152,12	137,45	10,67
	11	360	179	177	169	175	146,13	137,45	6,32
P-HT-07	1	0	19	18	20	19	239,12	135,89	75,97
	2	15	29	28	31	29	238,91	135,89	75,81
	3	30	45	43	46	45	238,42	135,89	75,45
	4	45	55	54	55	55	237,93	135,89	75,09
	5	60	72	68	65	68	237,32	135,89	74,64
	6	90	89	84	85	86	232,21	135,89	70,88
	7	120	105	106	101	104	226,89	135,89	66,97
	8	180	119	117	115	117	214,75	135,89	58,03
	9	240	131	132	129	131	200,78	135,89	47,75
	10	300	145	146	141	144	182,16	135,89	34,05
	11	360	156	158	152	155	160,45	135,89	18,07
	12	420	175	172	169	172	137,89	135,89	1,47
P-HT-08	1	0	18	18	18	18	217,56	126,64	71,79
	2	15	28	29	30	29	217,42	126,64	71,68
	3	30	42	42	44	43	216,91	126,64	71,28
	4	45	52	53	55	53	216,45	126,64	70,92
	5	60	70	66	64	67	215,93	126,64	70,51
	6	90	90	95	97	94	209,12	126,64	65,13
	7	120	113	121	125	120	203,48	126,64	60,68
	8	180	134	132	138	135	191,37	126,64	51,11
	9	240	149	147	152	149	175,85	126,64	38,86
	10	300	162	163	167	164	159,36	126,64	25,84
	11	360	175	174	179	176	135,69	126,64	7,15

	12	420	185	188	192	188	128,19	126,64	1,22
P-HT-09	1	0	19	19	19	19	286,12	148,54	92,62
	2	15	32	28	29	30	285,92	148,54	92,49
	3	30	45	44	46	45	285,45	148,54	92,17
	4	45	55	56	58	56	284,94	148,54	91,83
	5	60	70	67	71	69	284,41	148,54	91,47
	6	90	93	84	91	89	279,54	148,54	88,19
	7	120	118	115	119	117	273,78	148,54	84,31
	8	180	131	129	134	131	260,65	148,54	75,47
	9	240	148	149	151	149	245,65	148,54	65,38
	10	300	159	162	163	161	228,46	148,54	53,80
	11	360	171	175	179	175	207,45	148,54	39,66
	12	420	186	189	192	189	178,12	148,54	19,91
P-HT-10	1	0	19	20	19	19	264,89	142,84	85,45
	2	15	28	29	30	29	264,75	142,84	85,35
	3	30	42	42	44	43	264,18	142,84	84,95
	4	45	52	53	55	53	263,65	142,84	84,58
	5	60	70	66	64	67	263,15	142,84	84,23
	6	90	90	95	97	94	258,35	142,84	80,87
	7	120	113	121	125	120	252,78	142,84	76,97
	8	180	128	135	139	134	239,13	142,84	67,41
	9	240	141	148	151	147	223,87	142,84	56,73
	10	300	159	163	165	162	204,34	142,84	43,06
	11	360	171	175	179	175	182,23	142,84	27,58
	12	420	189	191	193	191	161,48	142,84	13,05

ANNEXE B Effet des différents types de séchage sur les propriétés mécaniques du bois

Annexe B-1 Effet des différents types de séchage sur les propriétés mécaniques du bois en compression parallèle

Essence du bois	MOE (MPa)			Rp _{0,2} (MPa)			ε _{F max}			W _{Rm} (K J/m ²)			M _{volumique} (kg/m ³)			MOE spécifique (MPa.m ³ /kg)		
	Air	SV	MW	Air	SV	MW	Air	SV	MW	Air	SV	MW	Air	SV	MW	Air	SV	MW
Épinette noire	4831 (425)	4760 (252)	4774 (325)	54 (6)	57 (9)	55 (9)	1,65 (0,41)	1,91 (0,18)	1,65 (0,20)	44 (10)	48 (13)	44 (15)	479 (56)	458 (12)	484 (31)	10,1 (1,4)	10,40 (0,76)	9,86 (1,16)
Pin gris	5074 (235)	4791 (341)	4856 (212)	65 (8)	62 (12)	59 (6)	1,82 (0,24)	2,07 (0,31)	1,88 (0,31)	64 (17)	68 (20)	64 (19)	512 (26)	500 (28)	486 (19)	9,9 (0,7)	9,59 (0,86)	9,99 (0,53)
Bouleau jaune	4344 (468)	3784 (408)	4359 (405)	53 (5)	45 (6)	54 (3)	2,16 (0,29)	2,39 (0,30)	2,28 (0,20)	71 (13)	66 (19)	76 (10)	536 (17)	522 (22)	540 (23)	8,1 (1)	7,25 (0,97)	8,08 (0,89)
Peuplier Faux-Tremble	5138 (243)	4645 (192)	5157 (243)	53 (3)	51 (4)	56 (3)	1,60 (0,18)	1,81 (0,11)	1,53 (0,08)	41 (5)	40 (5)	42 (4)	423 (20)	413 (21)	447 (23)	12,2 (0,6)	11,26 (0,44)	11,55 (0,8)
Érable	5387 (281)	5150 (158)	5232 (328)	78 (3)	72 (3)	77 (3)	2,48 (0,23)	2,69 (0,23)	2,42 (0,16)	119 (18)	124 (19)	114 (11)	693 (53)	673 (40)	660 (31)	7,8 (0,7)	7,65 (0,40)	7,92 (0,51)

(): Écart type

Air: Séchage à l'air

SV: Séchage sous-vide

MW: Séchage aux micro-ondes

Annexe B-2 Effet des différents types de séchage sur les propriétés mécaniques du bois en compression perpendiculaire

Essence du bois	MOE (MPa)			R _{p 0,2} (MPa)			ε _{F max}			W _{Rm} (K J/m ²)			M _{volumique} (kg/m ³)			MOE spécifique (Mpa.m ³ /kg)		
	Air	SV	MW	Air	SV	MW	Air	SV	MW	Air	SV	MW	Air	SV	MW	Air	SV	MW
Épinette noire	241 (8)	211 (20)	247 (16)	5,1 (0,4)	5,2 (0,5)	5,1 (0,6)	8,9 (0,3)	9,5 (0,4)	9,0 (0,3)	10,3 (0,9)	11,0 (0,9)	10,7 (1,2)	447 (7)	444 (9)	453 (8)	0,54 (0,02)	0,47 (0,03)	0,54 (0,04)
Pin gris	232 (44)	206 (29)	226 (19)	4,4 (0,1)	4,7 (0,7)	4,4 (0,6)	8,3 (0,4)	9,3 (0,8)	8,5 (0,6)	8,5 (0,4)	8,5 (0,2)	8,9 (1,8)	479 (16)	482 (15)	500 (32)	0,49 (0,10)	0,43 (0,07)	0,45 (0,04)
Bouleau jaune	261 (29)	194 (42)	201 (60)	8,4 (0,4)	8,4 (1,1)	8,7 (0,9)	9,9 (0,3)	11,7 (2,5)	12,0 (3)	17,7 (0,5)	17,4 (1,3)	20,4 (5,8)	488 (7)	493 (18)	524 (6)	0,56 (0,04)	0,39 (0,09)	0,38 (0,11)
Peuplier Faux-Tremble	268 (11)	154 (61)	265 (6)	6,2 (0,8)	6,9 (0,9)	6,0 (0,8)	8,4 (0,3)	12,5 (2,7)	8,7 (0,5)	10,1 (0,7)	16,8 (0,9)	10,8 (2)	406 (16)	403 (18)	408 (20)	0,66 (0,04)	0,39 (0,16)	0,65 (0,04)
Érable	331 (17)	244 (36)	341 (21)	21,9 (3,1)	20,3 (2,2)	23,1 (2,8)	13,2 (1,2)	15,7 (1,6)	13,4 (0,6)	56,6 (11,3)	65,8 (6,1)	58,6 (8,5)	669 (17)	660 (19)	684 (21)	0,50 (0,03)	0,37 (0,05)	0,50 (0,02)

(): Écart type

Air: Séchage à l'air

SV: Séchage sous-vide

MW: Séchage aux micro-ondes

Annexe B-3 Effet des différents types de séchage sur les propriétés mécaniques du bois en flexion simple

Essence du bois	MOE (MPa)			MOR (MPa)			$\varepsilon_{\text{Break}}$ (%)			W_{Break} (K J/m ²)			$M_{\text{volumique}}$ (kg/m ³)			MOE spécifique (Mpa.m ³ /kg)		
	Air	SV	MW	Air	SV	MW	Air	SV	MW	Air	SV	MW	Air	SV	MW	Air	SV	MW
Épinette noire	10834 (1852)	10069 (918)	10939 (1158)	83 (21)	78 (11)	83 (11)	1,3 (0,4)	1,5 (0,5)	1,3 (0,3)	33 (14)	26 (10)	24 (7)	477 (24)	459 (19)	499 (46)	22,7 (4,2)	22,0 (2,2)	22,1 (3,3)
Pin gris	9264 (1488)	9075 (341)	9901 (659)	77 (23)	87 (5)	88 (16)	1,4 (0,5)	1,2 (0,1)	1,4 (0,2)	30 (13)	25 (4)	32 (10)	458 (19)	474 (18)	452 (20)	20,2 (2,8)	19,2 (1,1)	22,0 (1,6)
Bouleau jaune	10874 (1437)	10093 (1090)	10813 (1422)	108 (14)	99 (10)	105 (17)	1,7 (0,2)	1,7 (0,2)	1,8 (0,3)	49 (12)	44 (8)	53 (16)	544 (19)	524 (27)	539 (26)	20,0 (2,4)	19,3 (1,9)	20,1 (3)
Peuplier Faux- Tremble	10837 (993)	10071 (791)	10826 (733)	84 (11)	81 (5)	85 (8)	1,2 (0,3)	1,0 (0,1)	1,1 (0,3)	26 (7)	19 (4)	24 (8)	450 (33)	418 (13)	445 (23)	24,2 (2,9)	24,1 (1,8)	24,4 (2,2)
Érable	14216 (1698)	11563 (1640)	15010 (1150)	131 (21)	107 (21)	128 (7)	2,2 (0,7)	2,0 (0,7)	2,5 (0,3)	97 (23)	93 (20)	122 (23)	668 (20)	657 (31)	664 (39)	21,3 (2,6)	17,6 (2,3)	22,6 (1,6)

(): Écart type

Air: Séchage à l'air

SV: Séchage sous-vide

MW: Séchage aux micro-ondes

ANNEXE C Résultats détaillés des effets des différents types de séchage sur les propriétés mécaniques du bois

Annexe C-1 Effet du séchage à l'air sur les propriétés mécaniques du bois en compression parallèle pour les différentes essences de bois

Arbre	Éch.	A (mm ²)	H (mm)	EMod (MPa)	Rp 0.1 (MPa)	Rp 0.2 (MPa)	F _{max} (MPa)	εF max	W _{Rm} (J/m ²)	M _{initiale} (g)	M _{anhvdre} (g)	M _{voil} (kg/m ³)
A-EP-01	1	640,50	102,02	5013,98	56,40	55,91	56,45	1,49	39903,57	31,94	29,48	451,2
A-EP-02	2	637,30	101,99	5147,52	58,43	57,22	58,58	1,53	41505,80	32,02	29,49	453,7
A-EP-03	3	637,50	102,12	5337,22	58,52	58,74	59,28	1,65	43303,78	31,99	29,64	455,3
A-EP-04	4	636,00	101,97	4221,75	42,41	45,16	47,28	2,16	63385,01	39,59	36,61	564,5
A-EP-05	5	626,20	102,04	5216,65	61,72	61,10	61,80	1,65	45936,64	31,79	29,53	462,1
A-EP-06	6	635,50	102,07	5158,00	56,39	53,15	56,76	1,44	36748,76	32,16	29,73	458,3
A-EP-07	7	642,40	102,11	4355,32	45,33	44,95	45,39	1,42	30166,58	34,02	31,68	483,0
A-EP-08	8	640,10	101,80	4546,18	55,51	57,54	57,95	1,92	54843,36	30,97	28,74	441,1
A-EP-09	9	651,60	101,87	2384,21	39,42	-	42,38	2,50	47100,68	41,24	38,37	578,0
A-EP-10	10	637,90	102,08	4483,98	52,06	52,12	52,38	1,60	39879,90	31,38	28,99	445,2
A-P-01	1	640,50	101,97	5371,65	73,09	74,47	74,84	1,93	77213,47	36,71	34,20	523,6
A-P-02	2	634,00	102,09	5232,69	64,13	65,52	65,53	1,69	56068,87	34,36	31,94	493,5
A-P-03	3	637,00	102,08	5096,04	64,90	66,43	66,98	1,89	67483,84	35,31	33,02	507,8
A-P-04	4	645,30	101,99	5119,33	58,78	65,65	71,73	2,19	87412,42	35,46	33,09	502,8
A-P-05	5	638,00	101,98	4968,27	50,30	50,61	50,89	1,39	35123,00	40,00	37,36	574,2
A-P-06	6	638,70	102,04	4783,73	65,35	66,94	67,62	2,09	73731,29	35,84	33,42	512,8
A-P-07	7	639,00	101,85	5136,76	61,48	63,63	63,96	1,70	57869,91	33,53	31,37	482,0
A-P-08	8	639,00	102,00	5428,30	75,00	76,30	76,64	1,95	81545,51	34,95	32,59	500,0
A-P-09	9	642,80	101,76	4841,23	63,27	65,18	65,37	1,79	61292,70	34,57	32,27	493,3
A-P-10	10	637,30	101,97	4758,23	49,84	51,49	51,51	1,54	39767,62	36,61	34,16	525,7
A-BJ-01	1	639,30	102,23	4331,76	43,08	46,16	47,14	1,59	40927,10	39,56	37,29	570,6
A-BJ-02	2	646,60	102,25	4254,96	45,81	50,31	55,92	2,29	75784,31	36,65	34,61	523,5
A-BJ-03	3	645,90	102,24	4881,01	54,03	56,82	58,70	1,85	61345,79	37,21	35,13	532,0

A-BJ-04	4	640,60	102,28	4985,72	56,23	59,06	61,76	2,05	77163,97	37,00	34,92	533,0
A-BJ-05	5	640,80	102,40	4786,04	54,34	57,04	59,81	2,17	77216,80	35,86	33,87	516,2
A-BJ-06	6	643,10	102,31	4661,25	54,91	57,45	59,25	2,02	68115,42	35,77	33,78	513,4
A-BJ-07	7	645,40	102,34	3973,92	41,16	44,64	49,38	2,32	68799,70	37,86	35,81	542,2
A-BJ-08	8	647,90	102,46	3587,45	48,13	51,53	55,39	2,58	77258,52	38,62	36,42	548,6
A-BJ-09	9	643,90	102,37	3925,71	46,36	49,49	53,30	2,29	73003,29	38,18	36,12	548,0
A-BJ-10	10	643,10	102,27	4055,13	49,58	52,52	56,67	2,46	89726,12	37,35	35,29	536,6
A-PF-01	1	610,30	102,19	5217,16	52,10	53,79	53,80	1,73	39087,72	29,35	27,77	445,3
A-PF-02	2	619,50	101,95	5122,48	52,44	54,49	54,49	1,56	40291,73	27,39	25,86	409,4
A-PF-03	3	623,50	101,94	5329,37	55,26	55,89	56,34	1,45	39164,63	28,17	26,61	418,7
A-PF-04	4	615,50	101,93	5286,91	51,98	54,52	54,56	1,44	38559,13	27,34	25,87	412,4
A-PF-05	5	612,60	102,15	5467,96	57,86	53,66	58,14	1,55	37064,84	30,26	28,62	457,4
A-PF-06	6	626,00	101,97	5232,97	54,30	56,07	56,08	1,52	41403,89	28,79	27,22	426,4
A-PF-07	7	622,80	101,97	5245,47	53,60	55,81	55,81	1,54	41009,83	27,83	26,30	414,1
A-PF-08	8	614,70	102,07	4706,18	49,06	48,61	49,33	1,50	33210,06	29,24	27,70	441,5
A-PF-09	9	625,50	101,94	4775,91	43,88	47,99	49,75	1,68	44023,52	26,44	25,03	392,5
A-PF-10	10	617,80	102,34	4997,07	48,37	51,14	52,21	2,03	52220,74	27,31	25,78	407,7
A-ER-01	1	645,00	102,27	4841,46	82,30	83,55	84,57	2,65	120748,64	49,40	46,47	704,5
A-ER-02	2	637,20	102,41	5290,56	72,25	76,52	83,90	2,97	157675,35	54,91	51,73	792,7
A-ER-03	3	641,00	102,38	5261,01	76,44	78,98	81,57	2,41	113986,85	49,09	46,18	703,7
A-ER-04	4	644,10	102,40	5510,25	77,88	80,29	82,36	2,33	110795,85	47,62	44,76	678,6
A-ER-05	5	638,70	102,31	5530,34	73,53	76,60	80,61	2,43	119820,54	50,09	47,09	720,6
A-ER-06	6	639,80	102,41	5757,68	76,32	79,21	81,89	2,28	109450,18	47,08	44,34	676,7
A-ER-07	7	640,50	102,16	5782,56	71,90	76,22	83,13	2,70	144334,44	52,43	49,23	752,4
A-ER-08	8	636,00	102,07	5429,91	75,27	77,68	79,71	2,26	102215,98	44,58	42,09	648,4
A-ER-09	9	639,40	102,28	5298,56	72,41	74,36	76,07	2,32	103530,14	43,13	40,84	624,5
A-ER-10	10	645,90	102,32	5164,80	71,26	73,30	75,46	2,45	104315,48	44,06	41,59	629,3

Annexe C-2 Effet du séchage aux micro-ondes sur les propriétés mécaniques du bois en compression parallèle pour les différentes essences de bois

Arbre	Éch.	A (mm ²)	H (mm)	E _{Mod} (MPa)	R _p 0.1 (MPa)	R _p 0.2 (MPa)	F _{max} (Mpa)	εF max	W _{Rm} (J/m ²)	M _{initiale} (g)	M _{anhydre} (g)	M _{volumique} (kg/m ³)
MW-P-01	1	634,30	101,81	5009,08	60,66	63,55	64,69	1,92	65885,97	33,90	31,83	492,9
MW-P-02	2	632,50	101,99	4809,28	58,62	61,37	63,15	2,00	72053,50	32,51	30,48	472,5
MW-P-03	3	637,60	101,96	4777,76	57,56	60,58	63,86	2,19	83389,69	32,97	31,04	477,5
MW-P-04	4	641,00	102,12	4675,55	57,25	60,30	64,35	2,49	98342,54	33,70	31,68	484,0
MW-P-05	5	636,20	101,86	4946,70	58,40	60,96	62,35	1,82	64488,03	32,39	30,44	469,7
MW-P-06	6	641,60	102,00	5287,41	63,35	60,28	65,29	1,51	45649,03	35,39	33,29	508,7
MW-P-07	7	635,00	101,92	4857,25	57,57	60,25	61,20	1,77	58955,51	33,57	31,57	487,8
MW-P-08	8	636,00	101,90	4965,83	60,03	61,62	61,69	1,65	50757,98	33,57	31,55	486,8
MW-P-09	9	639,60	102,04	4518,68	41,44	44,24	44,61	1,50	33752,25	36,26	34,03	521,4
MW-P-10	10	633,80	101,90	4712,64	52,38	55,52	58,36	1,95	66408,12	31,33	29,53	457,2
MW-EP-01	1	633,70	102,05	4915,38	56,77	54,87	57,12	1,57	38639,89	30,06	28,16	435,4
MW-EP-02	2	632,60	102,06	4388,49	40,27	41,18	41,19	1,57	28875,14	34,66	32,37	501,4
MW-EP-03	3	642,30	101,96	4700,84	63,28	65,83	67,32	2,14	76533,35	37,17	34,54	527,4
MW-EP-04	4	630,50	101,91	5315,39	68,58	66,22	68,58	1,69	52963,68	31,16	29,13	453,4
MW-EP-05	5	633,20	101,95	5374,16	68,54	69,76	69,85	1,80	63294,22	30,90	28,88	447,4
MW-EP-06	6	638,50	102,33	4824,21	53,78	51,03	55,21	1,62	34760,54	31,16	29,17	446,4
MW-EP-07	7	631,90	102,11	5203,99	51,02	50,85	51,26	1,46	33502,48	33,25	31,17	483,1
MW-EP-08	8	638,50	102,05	4927,82	58,79	57,98	58,88	1,61	44334,84	31,35	29,43	451,7
MW-EP-09	9	639,80	101,74	5238,87	64,52	61,61	65,68	1,52	44791,05	31,48	29,57	454,3
MW-EP-10	10	630,30	101,72	2851,86	28,92	30,60	30,67	1,50	23420,85	44,31	41,10	641,0
MW-BJ-01	1	621,20	102,04	4818,63	57,56	61,04	63,80	2,24	77756,99	37,29	35,46	559,4
MW-BJ-02	2	619,00	102,07	4247,65	59,57	61,67	62,14	2,13	63955,61	37,50	35,68	564,7
MW-BJ-03	3	625,00	101,83	4367,42	49,19	52,74	56,62	2,21	72590,65	36,81	34,96	549,3
MW-BJ-04	4	643,80	102,32	4798,07	56,20	59,29	62,23	2,24	82008,39	36,05	34,23	519,6
MW-BJ-05	5	632,70	102,36	4280,26	48,46	52,15	55,41	2,06	66154,78	37,06	35,23	544,0

MW-BJ-06	6	652,70	102,29	4437,18	47,53	51,15	55,17	2,15	70544,87	36,62	34,71	519,9
MW-BJ-07	7	624,70	101,71	4523,66	50,80	54,06	58,03	2,25	81927,99	34,76	32,96	518,7
MW-BJ-08	8	633,80	101,93	3695,15	38,24	41,92	47,25	2,36	64499,56	35,03	33,28	515,1
MW-BJ-09	9	626,50	102,04	3692,76	45,87	49,27	54,18	2,77	88020,36	38,91	37,00	578,8
MW-BJ-10	10	620,20	101,73	4728,83	53,88	57,09	61,38	2,37	93621,12	35,00	33,28	527,5
MW-PF-01	1	621,70	101,88	5023,13	52,27	54,81	54,97	1,55	43196,51	26,98	25,67	405,3
MW-PF-02	2	615,80	101,86	5145,13	54,73	56,51	56,52	1,51	43484,37	29,57	28,04	447,0
MW-PF-03	3	616,50	101,95	5228,45	57,27	58,21	58,45	1,53	43361,92	29,87	28,33	450,7
MW-PF-04	4	618,80	101,92	5429,31	58,21	57,32	58,37	1,40	39404,02	32,00	30,40	482,0
MW-PF-05	5	616,80	101,94	5169,97	56,49	57,94	57,94	1,64	44659,03	30,52	29,05	462,0
MW-PF-06	6	621,00	101,95	5265,31	57,19	58,79	58,79	1,53	44886,25	27,68	26,35	416,2
MW-PF-07	7	615,80	101,89	4536,77	49,56	48,20	49,89	1,64	34677,61	30,70	29,22	465,7
MW-PF-08	8	620,70	101,93	5213,18	56,50	57,77	57,79	1,55	43783,45	30,08	28,48	450,1
MW-PF-09	9	612,10	102,04	5321,38	50,89	52,08	53,01	1,40	34939,74	28,95	27,48	440,0
MW-PF-10	10	610,10	101,91	5241,68	55,65	58,09	58,12	1,55	45149,63	29,29	27,85	447,9
MW-ER-01	1	641,70	102,17	4704,91	75,33	76,72	77,39	2,29	98020,49	43,89	41,63	635,0
MW-ER-02	2	642,90	102,43	5350,60	74,25	77,57	81,37	2,46	118352,28	48,56	46,04	699,1
MW-ER-03	3	647,20	102,34	4879,92	69,96	74,18	80,33	2,78	138346,37	49,67	46,99	709,4
MW-ER-04	4	644,70	102,39	5370,06	70,93	73,77	77,49	2,48	117348,98	44,31	41,98	636,0
MW-ER-05	5	637,60	102,32	5625,51	80,43	83,18	85,59	2,36	118010,51	46,50	44,01	674,6
MW-ER-06	6	640,30	102,03	5774,52	80,32	83,41	86,59	2,30	119011,92	47,57	45,10	690,3
MW-ER-07	7	626,70	102,04	5324,45	75,66	77,71	79,85	2,25	108658,41	42,59	40,33	630,7
MW-ER-08	8	640,70	102,35	5051,84	75,96	77,96	80,12	2,55	111209,06	48,59	41,09	626,6
MW-ER-09	9	642,10	102,21	5025,54	73,14	75,27	77,80	2,41	111688,28	44,63	42,32	644,8
MW-ER-10	10	641,10	102,33	5214,19	70,87	74,18	77,34	2,30	103997,93	45,47	43,11	657,1

Annexe C-3 Effet du séchage au four sous vide sur les propriétés mécaniques du bois en compression parallèle pour les différentes essences de bois

Arbre	Éch.	A (mm ²)	H (mm)	EMod (MPa)	Rp 0.1 (MPa)	Rp 0.2 (MPa)	F _{max} (Mpa)	εF max	W _{Rm} (J/m ²)	M _{initiale} (g)	M _{anhydre} (g)	M _{volumique} (kg/m ³)
OV-P-01	1	645,90	102,12	5292,04	76,09	77,51	77,86	2,14	84749,18	36,53	33,91	514,1
OV-P-02	2	649,70	102,09	4714,54	57,13	59,30	60,13	1,96	59240,51	34,56	32,01	482,6
OV-P-03	3	642,60	102,28	5039,68	66,64	67,63	67,64	1,92	61923,95	34,92	32,55	495,2
OV-P-04	4	642,60	102,11	5098,06	68,07	69,70	70,41	2,08	77581,35	34,64	31,99	487,5
OV-P-05	5	654,50	102,08	4784,80	69,32	71,75	73,02	2,34	88853,71	35,95	33,49	501,3
OV-P-06	6	652,00	102,11	4306,80	35,75	38,41	38,54	1,40	25604,84	41,19	37,48	563,0
OV-P-07	7	648,20	102,15	4491,60	50,97	53,42	55,70	2,12	63540,11	34,35	31,70	478,8
OV-P-08	8	647,90	101,93	4416,24	48,32	51,76	57,18	2,63	92859,73	32,78	30,32	459,1
OV-P-09	9	652,50	102,34	4608,80	59,94	58,20	60,65	1,99	49841,35	37,46	34,79	521,0
OV-P-10	10	636,30	102,39	5160,37	67,60	69,48	70,18	2,15	74522,55	34,88	32,28	495,5
OV-EP-01	1	647,10	102,22	4304,38	37,08	39,30	39,63	1,65	25914,82	34,17	31,55	477,0
OV-EP-02	2	637,00	102,38	4611,47	42,04	43,72	43,78	1,74	29393,77	32,32	30,90	473,8
OV-EP-03	3	636,00	102,22	5082,45	64,96	65,10	65,16	1,98	55139,54	31,76	29,37	451,8
OV-EP-04	4	639,00	102,03	4642,38	67,02	67,80	67,81	2,18	67916,10	31,93	29,69	455,4
OV-EP-05	5	636,70	102,26	4823,10	63,36	64,20	64,21	2,06	59532,28	30,46	28,45	437,0
OV-EP-06	6	634,70	102,35	5090,60	62,24	61,77	62,27	1,91	47410,11	31,56	29,13	448,4
OV-EP-07	7	637,30	102,21	4929,05	59,24	56,83	60,03	1,69	40866,00	31,52	29,29	449,7
OV-EP-08	8	642,30	102,14	4506,66	53,94	56,33	57,11	2,06	55197,80	32,75	30,19	460,2
OV-EP-09	9	643,10	102,25	4723,87	58,88	57,12	59,08	1,83	43448,94	32,75	30,28	460,5
OV-EP-10	10	638,00	102,41	4883,40	61,96	62,50	62,53	2,04	53494,47	32,09	30,33	464,2
OV-BJ-01	1	666,40	102,54	3728,20	40,61	44,21	50,86	2,76	86214,96	39,43	36,85	539,3
OV-BJ-02	2	685,70	102,61	3531,99	38,07	41,33	45,15	2,21	52950,35	34,74	36,37	516,9
OV-BJ-03	3	677,50	102,68	3289,16	35,45	38,61	40,95	2,17	43845,88	39,35	36,58	525,8
OV-BJ-04	4	667,70	102,39	3677,33	41,47	44,69	49,10	2,68	71270,94	39,12	36,68	536,5

OV-BJ-05	5	663,50	102,45	4150,77	44,43	47,43	50,27	2,15	58706,07	36,34	34,15	502,4
OV-BJ-06	6	663,00	102,52	3747,38	40,80	44,01	48,31	2,44	66556,98	36,75	34,31	504,8
OV-BJ-07	7	683,30	102,47	3183,19	32,86	35,04	35,68	1,84	30790,11	42,46	39,73	567,4
OV-BJ-08	8	657,10	102,48	4487,31	52,73	55,02	57,81	2,42	83497,19	36,90	34,61	514,0
OV-BJ-09	9	669,50	102,55	4210,86	44,24	47,66	52,66	2,51	79833,25	37,63	35,43	516,0
OV-BJ-10	10	666,60	102,64	3831,44	47,53	50,07	53,58	2,76	85924,60	35,96	33,69	492,4
OV-PF-01	1	635,30	102,21	4338,61	44,74	46,98	46,99	1,76	35938,12	26,75	25,02	385,3
OV-PF-02	2	625,50	102,31	4416,79	44,49	44,12	44,59	1,66	29305,71	27,01	25,41	397,1
OV-PF-03	3	630,20	102,41	4725,43	53,46	53,72	53,85	1,81	40273,63	29,32	27,29	422,8
OV-PF-04	4	641,60	102,19	4667,56	47,81	51,14	52,19	1,90	45779,20	29,56	27,61	421,1
OV-PF-05	5	641,60	102,27	4681,22	46,60	50,30	51,24	1,91	43473,58	27,13	25,47	388,2
OV-PF-06	6	631,80	102,37	4955,19	54,88	56,45	56,47	1,92	45561,74	29,45	27,52	425,5
OV-PF-07	7	630,80	102,37	4480,26	43,90	46,28	46,78	1,87	40190,44	26,83	25,01	387,3
OV-PF-08	8	633,00	102,19	4834,60	54,73	56,18	56,19	1,82	44711,48	29,54	27,57	426,2
OV-PF-09	9	626,20	102,32	4587,33	45,16	46,76	46,95	1,61	36317,71	30,28	28,33	442,2
OV-PF-10	10	626,70	102,42	4760,66	55,46	53,09	55,47	1,86	39668,47	29,68	27,63	430,5
OV-ER-01	1	653,00	102,50	5038,55	68,83	71,93	77,25	2,95	138652,71	47,32	44,11	659,0
OV-ER-02	2	655,50	102,51	5167,61	63,83	66,47	69,02	2,47	99421,77	44,58	41,76	621,5
OV-ER-03	3	652,00	102,52	5124,14	68,34	71,26	75,87	2,73	122249,73	48,40	45,39	679,1
OV-ER-04	4	654,30	102,37	4818,36	68,48	70,76	73,63	2,57	112537,47	44,75	42,26	630,9
OV-ER-05	5	646,20	102,39	5039,84	76,17	78,50	82,00	2,78	139964,92	47,16	44,45	671,8
OV-ER-06	6	648,40	102,48	5159,96	70,63	74,31	81,45	3,12	158655,71	52,48	49,25	741,2
OV-ER-07	7	652,90	102,35	5189,90	69,65	72,29	75,16	2,55	110171,03	45,28	42,56	636,9
OV-ER-08	8	647,90	102,47	5317,56	69,71	73,72	79,65	2,84	135455,14	51,69	48,29	727,4
OV-ER-09	9	655,60	102,25	5316,64	64,80	68,37	72,77	2,46	107482,51	50,05	46,62	695,5
OV-ER-10	10	650,60	102,08	5327,76	65,36	68,44	72,41	2,46	110923,00	47,40	44,19	665,4

Annexe C-4 Effet du séchage à air sur les propriétés mécaniques du bois en compression perpendiculaire pour les différentes essences de bois

Arbre	Éch.	A (mm ²)	H (mm)	EMod (MPa)	Rp 0.1 (MPa)	Rp 0.2 (MPa)	F _{max} (Mpa)	εF max	W _{Rm} (J/m ²)	M _{initiale} (g)	M _{anhydre} (g)	M _{volumique} (kg/m ³)
A-EP-11	1	2592,00	24,12	77,99	8,22	8,25	9,19	18,69	25596,45	32,28	30,17	482,6
A-EP-12	2	2580,00	25,62	242,10	4,63	4,87	6,31	8,83	9618,20	31,62	29,44	445,4
A-EP-13	3	2541,00	25,47	243,00	4,41	5,00	6,41	8,89	10012,75	31,08	29,05	448,9
A-EP-14	4	2539,00	25,49	233,40	4,68	4,76	5,83	8,47	8705,94	30,28	28,28	437,0
A-EP-15	5	2576,00	25,59	252,23	5,31	5,55	7,10	9,17	11305,11	32,20	30,00	455,1
A-EP-16	6	2578,00	25,68	228,53	4,98	5,01	6,35	9,18	9844,13	31,45	29,26	442,0
A-EP-17	7	2567,00	25,54	236,53	4,87	5,40	6,62	8,87	10179,47	31,44	29,39	448,3
A-EP-18	8	2563,00	25,50	242,51	4,59	4,90	6,01	8,67	9335,91	30,95	28,84	441,3
A-EP-19	9	2561,00	25,42	251,45	4,51	4,67	6,48	8,68	10088,61	31,33	29,25	449,3
A-EP-20	10	2571,00	25,60	238,00	5,42	5,67	7,33	9,57	11974,20	32,38	30,28	460,1
A-P-11	1	2585,00	25,40	194,28	4,30	4,43	5,40	8,54	8550,30	32,38	30,53	465,0
A-P-12	2	2583,00	25,44	282,60	4,16	4,49	5,87	7,94	8767,76	32,96	31,04	472,4
A-P-13	3	2566,00	25,42	249,88	4,13	4,40	5,50	8,06	8295,81	32,85	30,94	474,3
A-P-14	4	2609,00	25,36	248,95	4,33	4,42	5,37	8,00	8093,09	32,52	30,75	464,8
A-P-15	5	2559,00	25,38	185,27	4,03	4,33	5,60	8,84	8983,08	35,76	33,43	514,7
A-P-16	6	2608,00	25,38	258,05	4,42	4,63	5,51	7,96	7861,93	32,80	30,92	467,1
A-P-17	7	2578,00	25,38	171,99	4,03	4,16	5,35	8,93	8599,76	34,31	32,32	494,0
A-P-18	8	2610,00	25,46	295,35	4,27	4,41	5,92	7,97	8756,12	33,36	31,47	473,6
A-P-19	9	2598,00	25,38	186,37	4,38	4,48	5,72	8,96	9221,46	34,64	32,59	494,3
A-P-20	10	2597,00	25,36	246,00	4,31	4,48	5,47	8,17	8256,08	33,08	30,97	470,2
A-BJ-11	1	2568,00	25,54	268,37	8,10	8,27	10,23	9,80	17691,95	33,66	31,86	485,8
A-BJ-12	2	2563,00	25,47	250,68	8,33	8,45	10,14	9,73	17841,31	34,33	32,50	497,9
A-BJ-13	3	2560,00	24,64	85,91	9,50	9,52	10,57	18,88	30997,84	34,03	32,21	510,6
A-BJ-14	4	2539,00	24,25	150,46	8,62	8,66	9,73	12,99	19929,59	33,75	31,99	519,6
A-BJ-15	5	2532,00	24,03	215,70	7,59	7,80	9,29	10,38	15926,64	33,36	31,64	520,0

A-BJ-16	6	2552,00	25,40	283,83	8,77	8,95	10,78	9,83	18753,97	33,02	31,28	482,6
A-BJ-17	7	2567,00	25,42	308,28	10,13	10,39	12,51	9,94	22196,10	35,54	33,66	515,8
A-BJ-18	8	2553,00	24,30	120,57	8,95	8,97	9,99	14,76	23174,66	34,01	32,16	518,4
A-BJ-19	9	2584,00	25,47	284,33	8,33	8,43	10,66	9,54	18316,16	33,88	32,05	487,0
A-BJ-20	10	2533,00	24,61	166,99	8,55	8,60	9,63	12,11	19097,40	33,89	32,14	515,6
A-PF-11	1	2513,00	25,37	272,57	6,06	5,97	6,51	7,95	9377,49	27,31	25,81	404,8
A-PF-12	2	2525,00	25,29	272,44	6,05	6,14	6,90	8,65	10979,02	27,00	25,58	400,6
A-PF-13	3	2512,00	25,08	166,30	7,55	7,58	7,81	11,00	14906,57	28,18	26,65	423,0
A-PF-14	4	2520,00	25,24	267,83	5,75	5,72	6,63	8,55	10397,84	26,66	25,27	397,3
A-PF-15	5	2524,00	25,30	248,00	6,87	7,12	7,91	7,99	10683,86	28,62	26,98	422,5
A-PF-16	6	2517,00	25,20	167,97	7,43	7,48	7,71	10,83	14596,64	28,03	26,44	416,8
A-PF-17	7	2522,00	25,00	203,89	7,03	7,21	7,88	9,89	13959,75	28,34	26,79	424,9
A-PF-18	8	2519,00	25,20	272,97	5,65	5,67	6,32	8,29	9840,30	26,29	24,84	391,3
A-PF-19	9	2523,00	25,28	281,37	7,08	7,54	8,08	8,73	12992,87	29,42	27,76	435,2
A-PF-20	10	2536,00	25,37	262,04	5,52	5,36	6,21	8,34	9420,92	26,65	25,28	392,9
A-ER-11	1	2604,00	24,67	332,67	17,76	17,96	20,34	11,73	41122,89	43,90	41,60	647,6
A-ER-12	2	2591,00	24,58	333,44	26,51	26,61	29,16	14,61	71149,24	47,27	44,63	700,8
A-ER-13	3	2606,00	24,78	296,01	22,40	22,56	24,86	14,03	59950,31	45,72	43,24	669,6
A-ER-14	4	2598,00	24,81	323,88	24,93	25,01	27,49	14,84	66465,13	46,46	43,49	674,7
A-ER-15	5	2613,00	24,69	353,98	22,63	22,75	25,26	12,70	54745,78	45,74	43,27	670,7
A-ER-16	6	2600,00	24,67	264,43	21,60	21,68	23,54	14,49	58416,82	45,12	42,67	665,2
A-ER-17	7	2604,00	24,87	345,65	23,40	23,50	26,21	13,37	59585,17	47,10	44,53	687,6
A-ER-18	8	2615,00	24,56	342,59	18,75	18,95	21,56	11,89	43876,70	44,29	41,89	652,2
A-ER-19	9	2599,00	24,82	328,17	22,02	22,17	24,55	13,38	55444,43	45,18	42,67	661,5
A-ER-20	10	2586,00	24,87	323,84	17,70	17,90	20,36	11,95	42142,04	44,56	42,23	656,6

Annexe C-5 Effet du séchage aux micro-ondes sur les propriétés mécaniques du bois en compression perpendiculaire pour les différentes essences de bois

Arbre	Éch.	A (mm ²)	H (mm)	EMod (MPa)	Rp 0.1 (MPa)	Rp 0.2 (MPa)	F _{max} (Mpa)	εF max	W _{Rm} (J/m ²)	M _{initiale} (g)	M _{anhydre} (g)	M _{volumique} (kg/m ³)
MW-P-11	1	2590,00	25,52	246,48	4,08	4,34	5,45	8,22	8155,70	33,48	31,50	476,6
MW-P-12	2	2576,00	25,45	211,24	3,86	4,11	5,32	8,85	8293,67	33,38	31,45	479,7
MW-P-13	3	2561,00	25,32	228,12	4,24	4,36	5,59	8,39	8550,80	34,85	32,59	502,6
MW-P-14	4	2576,00	25,41	241,79	4,00	4,07	5,55	8,07	8423,49	33,74	31,80	485,8
MW-P-15	5	2566,00	25,38	216,22	3,99	4,21	5,40	7,74	6978,46	32,71	30,80	472,9
MW-P-16	6	2551,00	25,36	219,34	4,01	4,16	5,38	8,44	8126,48	33,52	31,58	488,1
MW-P-17	7	2567,00	25,37	186,99	3,87	4,14	5,38	8,59	8538,87	34,11	32,09	492,7
MW-P-18	8	2554,00	25,49	243,28	4,68	4,93	6,57	9,33	10338,26	37,12	34,81	534,7
MW-P-19	9	2563,00	25,41	227,64	3,80	4,03	5,52	8,21	8427,04	33,98	31,95	490,6
MW-P-20	10	2576,00	25,42	243,55	5,94	6,13	8,08	9,50	13405,69	40,11	37,75	576,5
MW-EP-11	1	2579,00	25,54	255,14	5,23	5,59	6,86	8,99	10875,86	31,30	29,39	446,2
MW-EP-12	2	2580,00	25,59	237,00	4,90	5,13	6,60	9,20	10363,00	31,53	29,62	448,6
MW-EP-13	3	2576,00	25,55	238,51	5,10	5,34	6,67	9,14	10639,68	31,40	29,49	448,1
MW-EP-14	4	2577,00	25,52	221,08	4,48	4,74	6,36	9,30	10175,64	32,01	30,00	456,2
MW-EP-15	5	2587,00	25,49	234,84	4,41	4,70	6,48	8,74	10011,77	32,26	30,24	458,6
MW-EP-16	6	2607,00	25,51	231,78	4,07	4,32	6,35	8,73	9886,39	32,25	30,20	454,1
MW-EP-17	7	2538,00	25,41	264,05	4,56	4,67	6,23	8,40	9380,53	30,70	28,80	446,6
MW-EP-18	8	2555,00	25,46	264,61	5,95	6,24	8,40	9,34	13686,92	32,45	30,43	467,8
MW-EP-19	9	2584,00	25,62	257,64	5,10	5,49	7,22	9,29	11589,31	32,38	30,43	459,7
MW-EP-20	10	2545,00	25,46	262,02	4,90	4,99	6,39	8,62	9918,65	30,50	28,68	442,6
MW-BJ-11	1	2533,00	24,15	216,01	8,07	8,23	9,50	10,66	16520,13	33,70	31,92	521,8
MW-BJ-12	2	2560,00	24,43	98,84	9,35	9,37	10,41	16,95	27637,82	34,15	32,31	516,6
MW-BJ-13	3	2554,00	25,28	260,48	7,80	8,11	9,80	9,58	16807,85	36,22	34,30	531,2
MW-BJ-14	4	2558,00	25,37	109,28	10,49	10,52	11,69	17,41	32750,47	36,00	34,10	525,5

MW-BJ-15	5	2521,00	24,13	214,51	8,12	8,29	9,66	10,76	16905,00	33,70	31,96	525,4
MW-BJ-16	6	2552,00	25,37	252,93	7,91	8,21	9,80	9,68	17232,58	35,64	33,73	521,0
MW-BJ-17	7	2556,00	25,29	254,21	7,47	7,78	9,54	9,66	16320,08	36,01	34,15	528,3
MW-BJ-18	8	2532,00	24,37	189,69	8,32	8,40	9,43	11,78	17411,66	33,49	31,76	514,7
MW-BJ-19	9	2545,00	25,20	161,15	9,97	10,02	11,17	13,90	24589,07	36,01	34,17	532,8
MW-BJ-20	10	2553,00	25,42	254,56	7,98	8,29	9,97	9,79	17534,40	35,96	34,09	525,3
MW-PF-11	1	2509,00	25,40	269,45	5,65	5,67	6,55	8,58	10247,96	27,06	25,63	402,2
MW-PF-12	2	2529,00	25,44	257,64	5,93	5,92	6,89	8,85	10872,22	27,98	26,43	410,8
MW-PF-13	3	2507,00	25,41	266,55	5,70	5,62	6,38	8,65	10191,91	26,90	25,46	399,7
MW-PF-14	4	2514,00	25,39	265,90	5,81	5,71	6,45	8,44	9995,33	27,05	25,60	401,1
MW-PF-15	5	2509,00	25,39	269,30	5,84	5,77	6,62	8,54	10246,56	27,03	25,55	401,1
MW-PF-16	6	2535,00	25,36	259,26	5,61	5,70	6,38	8,30	9625,42	27,07	25,59	398,1
MW-PF-17	7	2501,00	25,35	271,31	5,91	5,71	6,44	8,41	10033,21	26,89	25,44	401,3
MW-PF-18	8	2527,00	25,24	254,59	8,19	8,29	9,26	9,88	16274,89	31,30	29,59	463,9
MW-PF-19	9	2523,00	25,37	270,09	5,81	5,79	6,35	8,39	9825,42	26,99	25,55	399,2
MW-PF-20	10	2514,00	25,40	265,40	5,56	5,61	6,58	8,48	10194,58	27,26	25,90	405,6
MW-ER-11	1	2591,00	25,01	353,66	22,97	23,11	26,32	13,34	59325,65	48,00	45,52	702,5
MW-ER-12	2	2596,00	24,73	356,84	25,53	25,67	28,07	13,51	64910,79	47,14	44,61	694,9
MW-ER-13	3	2605,00	24,85	334,01	23,38	23,45	25,04	13,38	57494,85	45,67	43,21	667,5
MW-ER-14	4	2585,00	25,02	363,44	21,87	22,08	25,83	12,93	56399,17	47,50	44,97	695,3
MW-ER-15	5	2596,00	24,99	354,26	21,85	22,03	24,98	12,93	55064,94	46,31	43,91	676,9
MW-ER-16	6	2596,00	25,12	301,57	17,67	17,83	19,94	12,48	42765,28	44,53	42,22	647,4
MW-ER-17	7	2616,00	24,53	315,05	20,82	20,88	23,18	13,16	51247,69	44,50	42,16	657,0
MW-ER-18	8	2594,00	24,96	326,34	25,53	25,59	27,87	14,36	68536,90	47,46	44,95	694,2
MW-ER-19	9	2594,00	25,13	354,38	22,44	22,68	25,89	13,44	58014,10	47,82	45,28	694,6
MW-ER-20	10	2592,00	24,68	352,54	27,50	27,61	29,96	14,26	72340,37	47,89	45,38	709,4

Annexe C-6 Effet du séchage au four sous vide sur les propriétés mécaniques du bois en compression perpendiculaire pour les différentes essences de bois

Arbre	Éch.	A (mm ²)	H (mm)	EMod (MPa)	Rp 0.1 (MPa)	Rp 0.2 (MPa)	F _{max} (Mpa)	εF max	W _{Rm} (J/m ²)	M _{initiale} (g)	M _{anhydre} (g)	M _{volumique} (kg/m ³)
OV-P-11	1	2581,00	25,72	200,87	4,97	5,28	6,49	9,97	10855,46	36,47	33,88	510,4
OV-P-12	2	2611,00	26,00	173,82	6,34	6,45	7,67	11,31	14281,05	36,13	33,65	495,7
OV-P-13	3	2612,00	25,59	236,96	4,40	4,64	5,63	8,61	8745,99	34,01	31,72	474,6
OV-P-14	4	2632,00	25,72	221,55	4,17	4,36	5,45	8,84	8458,85	34,45	32,04	473,3
OV-P-15	5	2582,00	25,63	163,10	3,92	4,08	5,26	9,20	8566,03	35,21	32,61	492,8
OV-P-16	6	2585,00	25,67	176,29	3,86	4,11	5,22	9,00	8202,93	34,60	32,09	483,6
OV-P-17	7	2602,00	25,66	187,07	4,25	4,42	5,46	9,45	8821,23	33,34	31,29	468,6
OV-P-18	8	2623,00	25,64	234,39	4,48	4,72	6,16	8,75	9658,35	35,07	32,44	482,4
OV-P-19	9	2605,00	25,65	239,07	4,20	4,35	5,38	8,72	8291,03	32,64	30,58	457,7
OV-P-20	10	2573,00	25,52	226,69	4,30	4,45	5,52	8,80	8536,39	33,34	31,28	476,4
OV-EP-11	1	2557,00	25,66	221,64	6,02	6,19	7,83	9,81	13371,28	31,92	29,51	449,8
OV-EP-12	2	2568,00	25,65	213,21	4,32	4,47	5,73	8,89	9114,39	30,85	28,43	431,6
OV-EP-13	3	2597,00	25,74	179,99	4,81	4,93	6,51	9,99	11145,81	31,68	29,54	441,9
OV-EP-14	4	2603,00	25,81	206,66	5,57	5,72	7,13	10,08	12092,09	32,76	30,39	452,3
OV-EP-15	5	2607,00	25,83	176,12	4,51	4,70	5,83	10,01	9824,90	31,46	28,99	430,5
OV-EP-16	6	2602,00	25,70	222,23	4,80	4,95	6,60	9,23	10666,33	32,03	29,66	443,5
OV-EP-17	7	2546,00	25,59	227,59	4,91	4,98	6,30	9,10	10103,18	31,82	29,75	456,6
OV-EP-18	8	2580,00	25,61	216,48	5,20	5,41	6,81	9,45	11191,17	31,01	29,02	439,2
OV-EP-19	9	2596,00	25,73	187,12	4,83	5,00	5,93	9,64	9920,52	30,99	28,79	431,0
OV-EP-20	10	2595,00	25,76	191,15	5,09	5,24	6,61	9,95	11192,68	32,17	29,83	446,2
OV-BJ-11	1	2570,00	24,51	173,54	7,15	7,33	8,99	11,30	16594,50	33,96	31,77	504,4
OV-BJ-12	2	2572,00	24,48	181,32	6,71	6,93	8,67	10,85	15461,34	33,92	31,25	496,3
OV-BJ-13	3	2589,00	25,73	257,46	9,87	9,99	11,67	10,68	21813,74	33,90	32,07	481,4
OV-BJ-14	4	2571,00	25,91	198,03	7,60	7,78	9,30	10,70	17618,96	35,57	33,33	500,3

OV-BJ-15	5	2629,00	26,01	214,99	8,39	8,47	10,16	10,71	19421,55	34,38	32,25	471,6
OV-BJ-16	6	2580,00	25,84	204,58	7,69	7,88	9,49	10,59	17721,56	36,25	33,76	506,4
OV-BJ-17	7	2584,00	25,68	92,73	10,32	10,34	11,46	18,72	35371,59	36,47	33,99	512,2
OV-BJ-18	8	2580,00	25,91	214,17	7,70	7,94	9,68	10,66	18000,02	35,54	33,55	501,9
OV-BJ-19	9	2626,00	25,99	200,79	9,38	9,47	10,88	11,83	22002,36	33,30	31,14	456,3
OV-BJ-20	10	2585,00	25,92	199,46	7,91	8,09	9,59	10,86	18344,92	36,37	33,75	503,7
OV-PF-11	1	2560,00	25,85	82,73	7,81	7,82	8,30	16,63	22941,93	28,29	26,69	403,3
OV-PF-12	2	2531,00	25,65	220,47	5,65	5,66	6,09	9,70	10079,60	26,34	24,76	381,4
OV-PF-13	3	2563,00	25,79	122,22	7,23	7,25	7,55	13,75	16424,72	29,03	27,19	411,3
OV-PF-14	4	2540,00	25,82	105,69	7,34	7,35	7,59	14,33	17771,89	28,24	26,53	404,5
OV-PF-15	5	2559,00	25,63	98,66	7,02	7,02	7,31	14,66	17367,92	28,02	26,16	398,9
OV-PF-16	6	2554,00	25,41	234,20	6,07	6,00	6,48	9,20	10451,88	26,60	25,00	385,2
OV-PF-17	7	2538,00	25,49	217,80	7,75	7,90	8,53	10,16	15382,87	30,22	28,45	439,8
OV-PF-18	8	2539,00	25,40	117,81	7,30	7,31	7,61	13,14	16714,86	28,44	26,66	413,4
OV-PF-19	9	2529,00	25,50	224,33	5,51	5,58	6,09	9,13	9913,47	26,19	24,65	382,2
OV-PF-20	10	2583,00	25,84	120,01	7,51	7,52	7,74	14,62	17257,42	29,38	27,65	414,3
OV-ER-11	1	2599,00	25,28	243,84	25,51	25,57	28,21	17,86	85201,82	47,68	44,50	677,3
OV-ER-12	2	2628,00	25,74	203,17	20,16	20,21	22,44	17,68	67236,33	46,23	43,05	636,4
OV-ER-13	3	2616,00	25,38	262,83	19,42	19,50	21,67	14,12	53041,83	46,12	42,73	643,6
OV-ER-14	4	2577,00	25,37	296,30	18,49	18,62	21,84	13,46	49481,42	47,44	44,32	677,9
OV-ER-15	5	2628,00	25,39	222,74	17,12	17,19	19,45	14,77	48249,43	47,80	42,49	636,8
OV-ER-16	6	2581,00	25,27	246,31	21,19	21,26	23,71	15,92	63452,35	47,51	44,55	683,1
OV-ER-17	7	2583,00	25,25	210,72	21,07	21,11	23,14	17,18	67853,45	46,66	43,42	665,7
OV-ER-18	8	2584,00	25,34	308,19	20,35	20,47	23,64	13,84	54839,70	47,31	44,44	678,7
OV-ER-19	9	2627,00	25,13	212,32	18,67	18,71	20,51	15,71	54927,07	46,45	42,98	651,0
OV-ER-20	10	2616,00	25,62	230,29	19,88	19,93	22,20	16,27	60682,27	46,43	43,25	645,3

Annexe C-7 Effet du séchage à l'air sur les propriétés mécaniques du bois en flexion simple pour les différentes essences de bois

Arbre	Éch.	A (mm ²)	Lv (mm)	EMod (MPa)	F _{max} (MPa)	F _{break} (MPa)	ε F _{max} (%)	ε Break (%)	W _{Break} (J/m ²)	W _{Rm} (J/m ²)	M _{initiale} (g)	M _{anhydre} (g)	M _{volumique} (kg/m ³)
EP-FL-A-01	1	608,60	356,00	10779,65	69,52	50,53	0,76	0,79	12307,30	11499,72	31,31	29,35	482,3
EP-FL-A-02	2	635,60	356,00	10951,58	117,81	112,45	1,39	1,39	37606,65	37602,68	34,98	32,80	516,0
EP-FL-A-03	3	633,80	356,00	12538,64	103,56	77,66	1,32	1,74	51457,53	34976,53	30,29	28,32	446,8
EP-FL-A-04	4	635,20	356,00	10300,53	75,40	70,23	0,78	0,83	13401,41	11844,32	34,94	32,72	515,1
EP-FL-A-05	5	607,80	356,00	12238,87	108,81	81,59	1,54	1,91	58494,18	43571,35	29,80	27,88	458,7
EP-FL-A-06	6	641,00	356,00	10647,88	90,85	89,33	1,02	1,02	20190,21	20185,44	32,45	30,43	474,7
EP-FL-A-07	7	645,10	356,00	6051,18	55,75	55,75	1,05	1,05	12303,77	12303,77	31,16	29,20	452,6
EP-FL-A-08	8	635,80	356,00	11947,97	106,93	106,04	1,41	1,51	42095,15	38114,75	32,27	30,21	475,1
EP-FL-A-09	9	625,30	356,00	12076,54	106,57	106,57	1,34	1,34	35562,64	35562,64	31,11	29,23	467,5
EP-FL-A-10	10	631,30	356,00	10811,75	105,64	78,85	1,65	1,66	46395,83	46223,64	32,55	30,60	484,7
P-FL-A-01	1	630,50	356,00	6711,37	40,01	31,97	0,85	0,94	9475,60	8210,23	29,21	27,35	433,8
P-FL-A-02	2	633,40	356,00	10211,61	93,15	89,42	1,12	1,47	34145,15	22986,93	31,35	29,28	462,3
P-FL-A-03	3	634,00	356,00	9343,96	68,04	62,14	0,78	0,92	14052,63	10979,58	32,40	30,40	479,5
P-FL-A-04	4	624,20	356,00	9628,70	97,41	97,41	1,16	1,16	24706,53	24706,53	29,65	27,84	446,0
P-FL-A-05	5	633,00	356,00	8371,13	79,69	79,58	1,30	1,30	24437,95	24435,59	29,89	27,97	441,9
P-FL-A-06	6	634,50	356,00	9796,43	83,35	83,35	0,94	0,94	16410,70	16410,70	30,84	28,80	453,9
P-FL-A-07	7	633,50	356,00	6895,29	56,98	53,67	1,17	1,17	16173,92	16170,52	29,78	27,83	439,3
P-FL-A-08	8	641,60	356,00	11209,41	103,54	75,25	1,40	2,51	75344,55	35952,76	32,22	30,24	471,3
P-FL-A-09	9	630,80	356,00	10254,10	101,37	96,33	1,31	1,31	30677,93	30672,87	30,71	28,72	455,3
P-FL-A-10	10	631,00	356,00	10219,27	107,89	105,38	1,84	1,84	52461,74	52456,25	33,16	31,11	493,0
BJ-FL-A-01	1	622,00	356,00	11285,08	118,63	115,95	1,70	1,74	53092,47	51323,81	36,56	34,45	553,9
BJ-FL-A-02	2	622,00	356,00	11663,18	131,62	131,62	2,02	2,02	70340,53	70340,53	36,11	33,99	546,5
BJ-FL-A-03	3	620,00	356,00	12111,48	119,83	89,49	1,51	1,66	51999,36	45405,55	36,58	34,39	554,7
BJ-FL-A-04	4	628,00	356,00	11145,62	120,39	120,16	1,61	1,61	48124,57	48112,22	37,10	34,93	556,2
BJ-FL-A-05	5	621,80	356,00	11799,42	111,12	111,12	1,54	1,54	43465,32	43465,32	36,33	34,29	551,5

BJ-FL-A-06	6	617,00	356,00	9708,24	92,43	92,43	1,31	1,31	28205,93	28205,93	37,26	35,16	569,9
BJ-FL-A-07	7	603,00	356,00	8174,85	92,77	92,77	1,63	1,63	36185,55	36185,55	32,93	31,11	515,9
BJ-FL-A-08	8	618,30	356,00	12951,61	127,41	109,56	1,57	1,67	56512,89	51533,22	35,63	33,56	542,8
BJ-FL-A-09	9	627,50	356,00	10517,47	118,80	118,80	2,02	2,02	62649,10	62649,10	36,18	34,02	542,2
BJ-FL-A-10	10	629,00	356,00	9379,54	100,70	100,70	1,64	1,64	41001,68	41001,68	33,83	31,88	506,8
PF-FL-A-01	1	622,80	356,00	10939,15	91,37	91,37	1,24	1,24	27489,15	27489,15	27,91	26,29	422,1
PF-FL-A-02	2	621,00	356,00	11894,67	98,58	98,38	1,37	1,42	36847,20	34970,11	28,72	27,01	434,9
PF-FL-A-03	3	617,80	356,00	10806,39	80,75	80,75	1,00	1,00	18428,77	18428,77	27,93	26,27	425,2
PF-FL-A-04	4	620,00	356,00	10592,44	87,86	87,86	1,12	1,12	23257,32	23257,32	27,70	26,05	420,2
PF-FL-A-05	5	613,30	356,00	11126,15	93,62	70,16	1,37	1,76	46364,31	33241,87	34,44	32,47	529,4
PF-FL-A-06	6	607,80	356,00	9832,38	85,33	85,33	1,34	1,34	28161,24	28161,24	30,85	29,09	478,6
PF-FL-A-07	7	606,60	356,00	12151,40	95,14	95,14	1,23	1,23	29346,44	29346,44	28,99	27,31	450,2
PF-FL-A-08	8	624,00	356,00	11948,06	88,76	88,76	1,09	1,09	23722,53	23722,53	29,32	27,64	442,9
PF-FL-A-09	9	619,70	356,00	9911,95	75,27	73,32	0,98	0,99	17028,84	16814,35	28,61	27,01	435,9
PF-FL-A-10	10	619,00	356,00	9170,70	67,22	67,22	0,90	0,90	13337,13	13337,13	30,33	28,64	462,7
ER-FL-A-01	1	633,60	356,00	14736,76	163,75	-	1,76	-	-	73805,92	43,81	41,36	652,8
ER-FL-A-02	2	632,60	356,00	14186,01	164,52	147,70	1,82	2,06	91363,89	76854,52	42,51	40,05	633,1
ER-FL-A-03	3	627,10	356,00	15561,87	176,97	-	2,02	-	-	95115,69	45,11	42,52	678,0
ER-FL-A-04	4	632,70	356,00	14429,70	171,66	154,36	1,92	2,32	110743,16	84616,13	44,62	42,01	664,0
ER-FL-A-05	5	630,80	356,00	14069,57	173,70	-	2,27	-	-	104900,34	44,25	41,65	660,3
ER-FL-A-06	6	632,40	356,00	15053,78	159,18	-	2,31	-	-	105851,78	44,34	41,66	658,8
ER-FL-A-07	7	627,90	356,00	16050,13	175,04	131,21	1,95	3,09	167054,70	91450,46	45,03	42,31	673,8
ER-FL-A-08	8	632,70	356,00	9805,68	95,33	95,33	1,24	1,24	26609,98	26609,98	45,09	42,42	670,5
ER-FL-A-09	9	629,10	356,00	13779,84	133,48	133,48	1,72	1,72	61971,90	61971,90	45,59	42,98	683,2
ER-FL-A-10	10	640,20	356,00	14491,62	163,07	121,91	1,93	2,60	122606,47	82082,58	48,09	45,32	707,9

Annexe C-8 Effet du séchage aux micro-ondes sur les propriétés mécaniques du bois en flexion simple pour les différentes essences de bois

Arbre	Éch.	A (mm ²)	Lv (mm)	EMod (MPa)	F _{max} (MPa)	F _{break} (MPa)	ε F _{max} (%)	ε Break (%)	W _{Break} (J/m ²)	W _{Rm} (J/m ²)	M _{initiale} (g)	M _{anhydre} (g)	M _{volumique} (kg/m ³)
BJ-FL-MW-01	1	619,00	356,00	11153,82	121,18	104,23	1,85	1,92	62385,22	59173,43	35,78	33,52	541,5
BJ-FL-MW-02	2	621,70	356,00	10032,71	106,31	106,31	1,58	1,58	41224,42	41224,42	35,97	33,76	543,0
BJ-FL-MW-03	3	627,70	356,00	9081,97	106,76	106,76	2,06	2,06	57392,57	57392,57	36,62	34,14	543,9
BJ-FL-MW-04	4	624,50	356,00	12405,66	123,75	122,29	1,60	1,80	60297,88	51084,59	37,82	35,48	568,1
BJ-FL-MW-05	5	628,50	356,00	11130,34	121,60	121,60	1,66	1,66	50029,28	50029,28	34,85	32,81	522,0
BJ-FL-MW-06	6	628,50	356,00	9516,42	106,13	97,77	1,57	1,97	54960,91	40063,55	33,37	31,50	501,2
BJ-FL-MW-07	7	607,20	356,00	8682,56	64,67	64,67	0,91	0,91	12819,31	12819,31	38,22	35,76	588,9
BJ-FL-MW-08	8	628,00	356,00	11225,59	120,59	120,03	1,76	1,99	66171,61	55347,77	36,53	34,06	542,4
BJ-FL-MW-09	9	623,70	356,00	12665,62	125,14	111,37	1,82	1,86	63062,29	61425,01	34,15	31,97	512,6
BJ-FL-MW-10	10	621,00	356,00	12234,40	127,20	95,35	1,47	1,89	65060,24	45741,63	35,08	32,91	530,0
P-FL-MW-01	1	638,00	356,00	10624,60	105,72	101,68	1,24	1,31	32743,64	29896,47	30,20	28,19	441,8
P-FL-MW-02	2	631,30	356,00	10383,43	114,23	85,12	1,53	1,78	53177,92	42238,92	29,86	27,79	440,2
P-FL-MW-03	3	633,80	356,00	8903,28	80,04	60,03	1,01	1,29	25108,85	17289,78	30,13	28,09	443,2
P-FL-MW-04	4	633,00	356,00	10096,17	102,59	102,59	1,53	1,53	38420,58	38420,58	29,08	27,22	430,0
P-FL-MW-05	5	635,30	356,00	8840,72	79,47	78,93	1,15	1,16	21856,35	21553,07	28,84	26,98	424,7
P-FL-MW-06	6	628,20	356,00	9449,50	97,11	97,11	1,37	1,37	31345,98	31345,98	32,38	30,42	484,2
P-FL-MW-07	7	630,00	356,00	10214,79	103,37	96,96	1,52	1,55	40572,31	39596,68	29,94	27,84	441,9
P-FL-MW-08	8	632,50	356,00	9775,14	97,50	97,50	1,35	1,35	30648,23	30648,23	31,94	29,72	469,9
P-FL-MW-09	9	631,50	356,00	10006,31	66,62	63,46	1,09	1,14	19656,33	18439,93	31,44	29,34	464,6
P-FL-MW-10	10	624,00	356,00	10720,15	99,63	99,63	1,23	1,23	28116,56	28116,56	31,65	29,65	475,2
EP-FL-MW-01	1	621,80	356,00	11947,96	108,97	81,55	1,54	1,62	47163,63	44035,93	31,44	29,07	467,5
EP-FL-MW-02	2	617,60	356,00	11667,11	88,15	66,09	0,96	1,19	27053,49	19635,08	31,30	28,88	467,6
EP-FL-MW-03	3	631,50	356,00	9677,96	95,36	81,34	1,02	1,17	25037,25	20277,43	29,98	27,74	439,3
EP-FL-MW-04	4	623,90	356,00	11209,35	101,00	93,13	1,16	1,19	27873,69	27053,15	31,50	29,20	468,0

EP-FL-MW-05	5	639,30	356,00	12107,29	102,71	77,01	1,56	1,82	53457,35	43394,86	32,00	29,86	467,1
EP-FL-MW-06	6	628,20	356,00	12253,86	105,21	78,89	1,45	1,70	49543,33	39900,46	34,11	31,75	505,4
EP-FL-MW-07	7	628,90	356,00	10956,23	105,14	105,14	1,38	1,38	35496,97	35496,97	36,01	33,54	533,3
EP-FL-MW-08	8	626,60	356,00	10537,69	93,33	93,33	1,00	1,00	19817,88	19817,88	39,81	36,30	579,3
EP-FL-MW-09	9	630,20	356,00	10399,68	76,10	76,10	0,76	0,76	11689,17	11689,17	38,02	35,34	560,8
EP-FL-MW-10	10	639,20	356,00	8632,87	81,70	81,70	1,09	1,09	18917,24	18917,24	34,89	32,32	505,6
ER-FL-MW-01	1	633,70	356,00	14397,53	166,07	124,55	2,12	2,40	109425,90	93830,18	41,12	38,25	603,6
ER-FL-MW-02	2	641,70	356,00	14542,77	183,00	136,96	2,06	2,73	141920,36	96624,90	45,88	42,74	666,0
ER-FL-MW-03	3	627,90	356,00	16585,15	178,25	133,36	1,99	2,40	123168,09	95420,82	45,89	42,74	680,7
ER-FL-MW-04	4	625,10	356,00	16840,33	179,36	133,85	1,94	3,03	164096,25	94264,91	45,03	41,95	671,1
ER-FL-MW-05	5	642,30	356,00	14051,13	163,93	128,75	2,23	2,92	138849,00	98814,76	43,49	40,51	630,7
ER-FL-MW-06	6	627,20	356,00	14988,79	165,99	124,35	2,11	2,42	114423,49	95443,00	44,10	41,19	656,7
ER-FL-MW-07	7	633,10	356,00	14084,34	159,29	119,46	1,92	2,35	105412,43	79399,50	41,72	38,95	615,2
ER-FL-MW-08	8	623,20	356,00	13321,31	143,34	133,33	1,85	2,06	81243,94	69387,56	46,09	42,97	689,5
ER-FL-MW-09	9	627,00	356,00	15495,53	155,62	116,69	1,35	2,56	113220,54	48998,41	48,54	45,34	723,1
ER-FL-MW-10	10	631,30	356,00	15795,53	177,18	132,65	1,85	2,48	126998,58	84440,94	47,51	44,60	706,5
PF-FL-MW-01	1	607,10	356,00	9589,29	76,33	76,33	0,93	0,93	15387,24	15387,24	28,37	26,58	437,8
PF-FL-MW-02	2	605,40	356,00	10627,84	85,62	85,35	0,99	0,99	19035,55	19031,20	30,26	28,34	468,1
PF-FL-MW-03	3	609,80	356,00	10626,40	86,74	86,74	1,22	1,22	25711,77	25711,77	31,96	29,97	491,5
PF-FL-MW-04	4	613,30	356,00	10516,48	93,56	93,56	1,12	1,12	23786,13	23786,13	29,03	27,26	444,5
PF-FL-MW-05	5	616,30	356,00	11904,66	94,11	94,11	0,95	0,95	19965,36	19965,36	28,87	27,02	438,4
PF-FL-MW-06	6	613,80	356,00	11291,32	91,13	68,24	1,27	1,81	46550,68	29608,58	27,26	25,58	416,7
PF-FL-MW-07	7	610,30	356,00	11953,53	91,61	91,15	1,04	1,06	23425,59	22557,69	29,32	27,47	450,1
PF-FL-MW-08	8	620,20	356,00	10641,67	86,20	86,20	1,19	1,19	25003,71	25003,71	27,43	25,80	416,0
PF-FL-MW-09	9	624,50	356,00	10945,08	83,95	83,95	1,03	1,03	20297,40	20297,40	28,75	27,14	434,6
PF-FL-MW-10	10	612,10	356,00	10168,35	84,91	81,02	1,19	1,19	24182,78	24181,84	29,73	27,75	453,4

Annexe C-9 Effet du séchage au four sous vide sur les propriétés mécaniques du bois en flexion simple pour les différentes essences de bois

Arbre	Éch.,	A (mm ²)	Lv (mm)	EMod (MPa)	F _{max} (MPa)	F _{break} (MPa)	ε F _{max} (%)	ε Break (%)	W _{Break} (J/m ²)	W _{Rm} (J/m ²)	M _{initiale} (g)	M _{anhydre} (g)	M _{volumique} (kg/m ³)
PF-FL-OV-01	1	617,50	356,00	11566,22	81,60	81,60	0,96	0,96	18220,40	18220,40	27,03	25,51	413,1
PF-FL-OV-02	2	622,40	356,00	10253,98	85,06	85,06	1,03	1,03	19433,18	19433,18	28,21	26,35	423,4
PF-FL-OV-03	3	642,90	356,00	9038,62	84,48	84,45	1,31	1,37	28063,59	26372,33	27,08	25,39	394,9
PF-FL-OV-04	4	621,80	356,00	10644,90	85,63	85,63	1,06	1,06	21168,27	21168,27	28,04	26,36	423,9
PF-FL-OV-05	5	620,30	356,00	9384,90	73,63	73,63	0,92	0,92	14568,17	14568,17	27,69	26,14	421,4
PF-FL-OV-06	6	621,50	356,00	10660,38	75,08	75,08	0,91	0,91	15168,58	15168,58	28,56	27,01	434,6
PF-FL-OV-07	7	621,80	356,00	9617,27	74,64	74,64	0,91	0,91	14522,85	14522,85	26,85	25,34	407,5
PF-FL-OV-08	8	623,50	356,00	9279,11	83,90	83,90	1,04	1,04	18794,93	18794,93	28,65	26,99	432,9
PF-FL-OV-09	9	627,50	356,00	10528,40	88,15	88,15	1,18	1,18	24874,60	24874,60	28,45	26,78	426,8
PF-FL-OV-10	10	622,70	356,00	9738,38	80,16	80,16	0,98	0,98	17104,03	17104,03	26,94	25,26	405,7
EP-FL-OV-01	1	642,80	356,00	10615,35	97,99	71,57	1,52	1,99	54361,74	38090,59	30,84	28,82	448,4
EP-FL-OV-02	2	637,00	356,00	10699,72	94,52	83,92	1,48	1,52	37198,07	36018,18	32,38	30,18	473,8
EP-FL-OV-03	3	640,30	356,00	9585,02	69,40	51,63	1,01	1,94	39832,26	16861,89	34,04	31,70	495,1
EP-FL-OV-04	4	638,20	356,00	10429,16	100,20	74,72	1,57	2,11	58889,17	41001,49	30,72	28,60	448,1
EP-FL-OV-05	5	638,80	356,00	11593,00	102,03	76,49	1,58	1,83	52876,14	43110,53	31,46	29,30	458,7
EP-FL-OV-06	6	645,40	356,00	8125,42	81,70	81,70	1,38	1,38	26423,46	26423,46	30,84	28,89	447,6
EP-FL-OV-07	7	646,60	356,00	10267,65	82,02	82,02	0,89	0,89	15425,41	15425,41	30,01	27,95	432,3
EP-FL-OV-08	8	630,00	356,00	9537,92	80,17	80,17	0,94	0,94	15361,44	15361,44	32,56	30,40	482,5
EP-FL-OV-09	9	652,20	356,00	9739,22	90,90	89,51	1,20	1,23	25824,02	24896,38	31,00	29,09	446,0
EP-FL-OV-10	10	637,80	356,00	10093,43	89,97	89,95	1,01	1,01	19083,18	19082,20	30,90	29,00	454,7
P-FL-OV-01	1	632,00	356,00	9158,96	83,44	82,73	1,06	1,06	18877,17	18872,93	34,36	32,17	509,0
P-FL-OV-02	2	612,80	356,00	9420,60	91,43	89,60	1,17	1,26	26644,11	23473,02	31,22	29,30	478,1
P-FL-OV-03	3	615,00	356,00	9198,84	83,26	80,92	1,05	1,05	18561,40	18557,14	31,84	29,69	482,8
P-FL-OV-04	4	620,70	356,00	9477,83	92,60	87,90	1,19	1,30	28258,57	24305,33	32,19	30,05	484,1

P-FL-OV-05	5	615,30	356,00	9423,83	90,36	87,48	1,33	1,33	28338,62	28334,10	29,27	27,44	446,0
P-FL-OV-06	6	630,60	356,00	8963,56	98,39	94,91	1,28	1,29	27901,88	27519,17	31,27	29,21	463,2
P-FL-OV-07	7	631,50	356,00	8644,15	86,92	86,66	1,14	1,14	21436,87	21432,60	32,80	30,62	484,9
P-FL-OV-08	8	642,30	356,00	9328,29	82,89	82,89	1,30	1,30	27022,25	27022,25	31,46	29,45	458,5
P-FL-OV-09	9	641,10	356,00	8710,17	81,86	81,86	1,33	1,33	26333,69	26333,69	31,21	29,29	456,9
P-FL-OV-10	10	637,80	356,00	8426,21	95,78	91,02	1,40	1,40	30174,60	30169,88	32,51	30,51	478,4
ER-FL-OV-01	1	634,30	356,00	12317,45	127,98	95,75	1,69	2,74	101774,89	55548,73	46,88	44,17	696,4
ER-FL-OV-02	2	671,30	356,00	9344,31	82,54	82,54	1,02	1,02	18113,22	18113,22	47,53	44,75	666,6
ER-FL-OV-03	3	640,70	356,00	9518,25	113,18	113,18	1,39	1,39	34688,13	34688,13	44,35	41,68	650,5
ER-FL-OV-04	4	646,00	356,00	11105,93	131,95	98,07	1,86	2,14	74143,29	61386,10	46,16	43,40	671,8
ER-FL-OV-05	5	653,30	356,00	11583,39	127,14	121,92	1,81	1,88	61427,74	58038,58	45,21	42,53	651,0
ER-FL-OV-06	6	629,90	356,00	13575,40	149,74	112,23	1,86	2,42	103060,26	72460,35	42,13	39,77	631,4
ER-FL-OV-07	7	632,30	356,00	12381,37	138,80	103,55	1,67	2,62	100508,47	56523,50	43,29	40,90	646,8
ER-FL-OV-08	8	642,10	356,00	9461,63	71,78	71,78	0,83	0,83	12451,69	12451,69	40,05	37,81	588,8
ER-FL-OV-09	9	645,00	356,00	13092,94	165,11	123,53	1,93	2,55	119632,35	81706,03	47,14	44,47	689,5
ER-FL-OV-10	10	645,00	356,00	13250,02	151,97	143,56	2,19	2,19	89017,67	89008,20	45,99	43,51	674,6
BJ-FL-OV-01	1	642,30	356,00	9194,02	105,67	105,67	1,78	1,78	46527,18	46527,18	34,13	32,18	501,0
BJ-FL-OV-02	2	616,90	356,00	10967,45	114,21	110,97	1,88	1,88	56977,58	56969,71	36,25	34,15	553,6
BJ-FL-OV-03	3	635,00	356,00	11450,69	115,96	105,30	1,46	1,57	46111,13	41051,05	39,23	37,01	582,8
BJ-FL-OV-04	4	635,80	356,00	11721,93	116,81	103,43	1,52	1,82	56311,43	44376,26	34,99	32,96	518,4
BJ-FL-OV-05	5	636,00	356,00	9870,02	103,18	86,52	1,51	1,53	38060,89	37262,05	35,34	33,47	526,3
BJ-FL-OV-06	6	642,00	356,00	8618,78	90,74	87,92	1,38	1,38	28527,47	28524,85	34,50	32,61	507,9
BJ-FL-OV-07	7	645,90	356,00	10660,06	109,51	109,51	1,72	1,72	48250,53	48250,53	33,36	31,51	487,8
BJ-FL-OV-08	8	633,50	356,00	10183,96	104,21	104,21	1,48	1,48	36740,77	36740,77	34,40	32,46	512,4
BJ-FL-OV-09	9	628,90	356,00	9463,47	103,46	95,96	1,45	1,75	45968,16	35056,38	35,19	33,30	529,5
BJ-FL-OV-10	10	646,90	356,00	8799,15	96,49	82,96	1,65	1,68	40081,79	39176,86	35,75	33,81	522,6