

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	I
TABLE DES MATIÈRES	II
LISTE DES FIGURES.....	V
LISTE DES TABLEAUX	IX
RÉSUMÉ.....	X
ABSTRACT.....	XI
INTRODUCTION.....	I
CHAPITRE 1	3
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
1.1 Le bois	3
1.1.1 Anisotropie du bois	5
1.1.2 Classification du bois	6
1.1.2.1 Les résineux.....	6
1.1.2.2 Les feuillus.....	7
1.1.3 Composition chimique du bois.....	10
1.1.3.1 La cellulose	11
1.1.3.2 Les hémicelluloses.....	12
1.1.3.3 La lignine.....	13
1.1.4 Hygroscopie du bois.....	14
1.2 Les composites bois-polymère	16
1.2.1 Généralités	16
1.2.2 Les fibres de bois	17
1.2.3 Les matrices thermoplastiques	18
1.2.4 Les agents de couplage.....	19
1.2.5 Les Procédés de fabrication des CBP.....	19
1.2.5.1 L'extrusion	20
1.2.5.2 L'injection.....	21

1.2.5.3	<i>La thermocompression</i>	22
1.3	Caractérisation diélectrique des matériaux	23
1.3.1	Matériau diélectrique	23
1.3.2	Polarisation diélectrique	24
1.3.3	Conduction	27
1.3.4	Grandeurs caractéristiques des matériaux diélectriques	28
1.3.4.1	<i>La permittivité relative</i>	28
1.3.4.2	<i>La constante diélectrique et les pertes diélectriques</i>	29
1.3.4.3	<i>La conductivité électrique</i>	31
1.3.4.4	<i>La puissance dissipée</i>	32
1.3.4.5	<i>La profondeur de pénétration</i>	32
1.3.5	Applications des matériaux diélectriques	34
1.4	Facteurs influençant les propriétés diélectriques du bois	36
1.4.1	Effet de la fréquence	36
1.4.2	Effet de la teneur en humidité	38
1.4.3	Effet de l'anisotropie du bois	39
1.5	Facteurs influençant les propriétés diélectriques des CBP	40
1.6	Originalité du travail	41
CHAPITRE 2		42
MATÉRIELS ET MÉTHODES		42
2.1	Objectifs	42
2.2	Les hypothèses de la recherche	42
2.3	Méthodologie	43
2.3.1	Préparation des échantillons de bois	44
2.3.2	Élaboration des échantillons de composite bois-polymère	46
2.3.2.1	<i>Matières plastiques utilisées</i>	46
2.3.2.2	<i>Préparation des fibres de bois</i>	47
2.3.2.3	<i>Mise en œuvre des composites</i>	48
2.3.3	Mesure de l'humidité et de la masse volumique du bois	50
2.3.3.1	<i>Mesure de la teneur en humidité</i>	50
2.3.3.2	<i>Mesure de la masse volumique</i>	51
2.3.3.3	<i>Mesure des propriétés chimiques du bois</i>	52
2.3.4	Mesure des propriétés diélectriques	53
2.3.4.1	<i>Principe de la méthode de spectroscopie diélectrique</i>	53
2.3.4.2	<i>Précision des mesures</i>	54

2.3.4.3 Dispositif expérimental.....	56
2.3.5 Analyse statistique des résultats.....	56
CHAPITRE 3	58
RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	58
3.1 Caractérisation des propriétés diélectriques du bois.....	58
3.1.1 Effet de la teneur en humidité	58
3.1.2 Effet de la fréquence	68
3.1.3 Effet de l'anisotropie du bois	70
3.1.4 Effet de la température.....	73
3.1.5 Effet de la masse volumique	79
3.1.6 Comparaison entre les propriétés diélectriques de l'aubier et du duramen.....	84
3.2 Caractérisation des propriétés diélectriques des composites bois-polymère	87
3.3.1 Effet de la fréquence et de la teneur en fibres	87
3.3.2 Effet de la cellulose.....	92
CONCLUSIONS	94
Implications pratiques des résultats.....	95
Perspectives.....	96
REFERENCES.....	98
ANNEXE A.....	110
Résultats des propriétés diélectriques du bois.....	110
ANNEXE B.....	115
Résultats des propriétés diélectriques des composites bois-polymère.....	115

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Structure générale d'un tronc d'arbre (Garrett 2007).....	5
Figure 1.2 : Schéma des trois plans ligneux du bois (Raven et al. 1999)	6
Figure 1.3 : Structure macroscopique du bois de résineux (Fahn 1990).....	9
Figure 1.4 : Structure macroscopique du bois de feuillus (Fahn 1990)	9
Figure 1.5: Constituants chimiques du bois (Murphy et McCarthy 2005)	10
Figure 1.6 : Structure moléculaire de la cellulose (adapté de Shmulsky et Jones (2011))	12
Figure 1.7 : Les trois monomères principaux de la lignine (Macheix et al. 2005)	13
Figure 1.8 : Types d'eau dans le bois (Shmulsky et Jones 2011)	15
Figure 1.9 : Représentation schématique d'interaction entre les chaînes de cellulose et les molécules d'eau (Torgovnikov 1993)	15
Figure 1.10 : Représentation schématique d'un matériau composite (adapté de Raskin 2010).....	16
Figure 1.11: Formule chimique du polyéthylène maléaté (adapté de Wang et Wideman 2013).....	19
Figure 1.12 : Schéma de principe d'une extrudeuse (Kouassi 2013).....	20
Figure 1.13 : Vis à trois zones (Trotignon et al. 1996)	21
Figure 1.14 : Presse d'injection (Gosselin 2005)	22
Figure 1.15 : Schéma d'une presse à compression (adapté de Chawla 2012)	23
Figure 1.16 : Représentation schématique de la polarisation diélectrique (Bodeux 2009).....	24
Figure 1.17 : Les différents types de polarisation (adapté de Orłowska 2003).....	27
Figure 1.18 : Mécanisme de générations des charges dans un isolant entre électrodes sous l'effet d'un champ électrique (Melle 2005).....	28
Figure 1.19 : Évolution de la permittivité réelle ϵ' et imaginaire ϵ'' en fonction de la fréquence (adapté de Debye 1929)	30

Figure 1.20 : Diagramme de Fresnel.....	31
Figure 1.21 : Transit de puissance lorsqu'une onde électromagnétique atteint un matériau diélectrique (Callebaut 2007).....	33
Figure 2.1: Protocole expérimental suivi	43
Figure 2.2: Découpage des échantillons du bois.....	45
Figure 2.3: Broyeur à couteau rotatifs de type Thomas-Willey, modèle4.	47
Figure 2.4: Présentation du tamiseur (M.S Tyler).....	48
Figure 2.5: Extrudeuse double vis (Thermo Scientific HAAKE PolyLab OS Rheodrive 7 avec Rheomex OS Module extrusion)	48
Figure 2.6: Presse à compression (adapté de CTMP/2015/F.Therrien).....	50
Figure 2.7: Densitomètre à Rayons X (Quintek Measurements System [QMS])..	51
Figure 2.8 : Représentation de la configuration des deux électrodes (adapté de http://www.novocontrol.de).....	53
Figure 2.9 : Schéma du principe de mesure de spectroscopie diélectrique.....	54
Figure 2.10 : Spectromètre diélectrique	57
Figure 3.1 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') du pin gris en fonction de la teneur en humidité mesurée à différentes fréquences.	60
Figure 3.2 : Variation du facteur de perte (ϵ'') du pin gris en fonction de la teneur en humidité mesurée à différentes fréquences.....	60
Figure 3.3 : Variation de la tangente de perte ($\tan\delta$) du pin gris en fonction de la teneur en humidité mesurée à différentes fréquences.	61
Figure 3.4 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') du pin gris en fonction de la teneur en humidité mesurée à différentes fréquences.	62
Figure 3.5 : Variation du facteur de perte (ϵ'') du pin gris en fonction de la teneur en humidité mesurée à différentes fréquences.....	62
Figure 3.6 : Variation de la tangente de perte ($\tan\delta$) du pin gris en fonction de la teneur en humidité mesurée à différentes fréquences.	63
Figure 3.7 : Variation de la profondeur de pénétration du pin gris en fonction de la teneur en humidité mesurée à différentes fréquences.	66

Figure 3.8 : Variation de la résistivité du pin gris en fonction de la teneur en humidité mesurée à différentes fréquences.....	67
Figure 3.9 : Variation de la conductivité du pin gris en fonction de la teneur en humidité mesurée à différentes fréquences.....	67
Figure 3.10: Variation de la constante diélectrique (ϵ') du pin gris en fonction de la fréquence mesurée pour différentes teneurs en humidité.	69
Figure 3.11 : Variation du facteur de perte (ϵ'') du pin gris en fonction de la fréquence mesuré pour différentes teneurs en humidité	71
Figure 3.12 : Variation de la tangente de perte ($\tan\delta$) du pin gris en fonction de la fréquence mesurée pour différentes teneurs en humidité.	72
Figure 3.13 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') du pin gris avec la teneur en humidité dans les trois directions.....	74
Figure 3.14 : Variation du facteur de perte (ϵ'') du pin gris avec la teneur en humidité dans les trois directions	74
Figure 3.15 : Variation de la tangente de perte ($\tan\delta$) du pin gris avec la teneur en humidité dans les trois directions	75
Figure 3.16 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') du pin gris en fonction de la température mesurée pour différentes teneurs en humidité	77
Figure 3.17 : Variation du facteur de perte (ϵ'') du pin gris en fonction de la température mesuré pour différentes teneurs en humidité.....	77
Figure 3.18 : Variation de la tangente de perte ($\tan\delta$) du pin gris en fonction de la température mesurée pour différentes teneurs en humidité.....	78
Figure 3.19 : Variation de la profondeur de pénétration du pin gris en fonction de la température mesurée pour différentes teneurs en humidité	79
Figure 3.20 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') du mélèze en fonction de la teneur en humidité mesurée à une fréquence constante (915 MHz).	80
Figure 3.21 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') des espèces du bois en fonction de la teneur en humidité mesurée à une fréquence constante (915 MHz).....	81

Figure 3.22 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') en fonction de la masse volumique pour différentes teneurs en humidité	83
Figure 3.23 : Relation entre les valeurs de la constante diélectrique mesurées et prédites.....	84
Figure 3.24 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') de l'aubier et du duramen du pin gris en fonction de la teneur en humidité.....	85
Figure 3.25 : Variation du facteur de perte (ϵ'') de l'aubier et du duramen du pin gris en fonction de la teneur en humidité.....	86
Figure 3.26 : Variation de la tangente de perte ($\tan\delta$) de l'aubier et du duramen du pin gris en fonction de la teneur en humidité.....	86
Figure 3.27 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') du composite en fonction de la fréquence pour différents teneur en fibres.	89
Figure 3.28 : Variation du facteur de perte (ϵ'') du composite en fonction de la fréquence pour différents teneur en fibres.	89
Figure 3.29 : Variation de la tangente de perte ($\tan\delta$) du composite en fonction de la fréquence pour différents teneur en fibres.	90
Figure 3.30 : Variation de la résistivité du composite en fonction de la fréquence pour différents teneur en fibres.....	91
Figure 3.31 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') du composite en fonction de la fréquence pour différentes essences de fibres de bois	92
Figure 3.32 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') en fonction de la teneur en cellulose	93

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Répartition chimique (% en masse) des différents composés dans le bois des feuillus et des résineux (Sjöström 1993).....	11
Tableau 1.2: Les valeurs des constantes diélectriques de quelques matériaux.....	35
Tableau 1.3 : Synthèse sur les propriétés diélectriques du bois.....	36
Tableau 2.1 : Récapitulatif des conditions expérimentales des échantillons du bois.....	46
Tableau 2.2: Paramètres d'extrusion.....	49
Tableau 2.3 : Teneur en cellulose des fibres de bois.....	52
Tableau 2.4 : Tableau récapitulatif des pourcentages des composants et de la teneur en cellulose dans chaque mélange	52
Tableau 2.5 : Exemples des moyennes et des écarts types des mesures de la constante diélectrique du bois chêne rouge et du pin gris pour différentes teneurs en humidité montrant la précision des données expérimentales.	55
Tableau 3.1 : Comparaison entre les résultats actuels du bois avec celle de la littérature pour une fréquence de micro-ondes constante (915 MHz)	64
Tableau 3.2 : Les valeurs de la masse volumique du bois anhydre, de la teneur en extractibles et des propriétés diélectriques de chaque essence étudiée mesurées à une teneur en humidité constante (17%).....	82

RÉSUMÉ

La caractérisation des propriétés diélectriques du bois et des composites à base de bois est importante à la fois pour mieux comprendre leur interaction avec les ondes électromagnétiques et pour évaluer leur potentiel d'utilisation pour de nouvelles applications. Dans ce cadre, on a recours à la méthode de spectroscopie diélectrique permettant de suivre l'évolution des propriétés diélectriques des matériaux sur un étendu de fréquences de 1 à 3×10^3 MHz et de température de -20 à 100°C. L'objectif consistait en premier lieu à étudier les propriétés diélectriques du bois en fonction de la fréquence, de la teneur en humidité, de la température et des propriétés intrinsèques du bois. En deuxième lieu, cette étude visait à évaluer les propriétés diélectriques des composites bois-polymère. Nous avons élaboré des composites avec des mélanges à différentes proportions de fibres de bois (40%, 50%, 60%), de polyéthylène à haute densité et de polyéthylène maléaté (3%) par deux procédés : extrusion et thermocompression.

Les résultats indiquent que le comportement diélectrique de toutes les espèces de bois étudiées est quantitativement similaire. En général, les propriétés diélectriques augmentent avec la teneur en humidité. Une relation linéaire positive entre la constante diélectrique et la teneur en humidité est établie. Le comportement diélectrique du bois humide dans l'intervalle de fréquences étudié est caractérisé par une réduction importante des propriétés diélectriques avec une fréquence croissante. La direction du grain du bois joue également un rôle important. Les propriétés diélectriques du bois sont plus élevées dans la direction longitudinale que celles dans la direction tangentielle et radiale. Les résultats de cette étude suggèrent que les différences de comportement diélectrique entre les espèces de bois sont attribuées principalement à leurs caractéristiques intrinsèques. Il existe une relation linéaire positive entre la masse volumique et la constante diélectrique du bois. Nous avons établi un modèle de régression multiple qui permet d'évaluer la variation de la constante diélectrique en fonction de la teneur en humidité et la masse volumique.

La caractérisation des propriétés diélectriques des composites bois-polymère révèle que l'incorporation des fibres modifie le caractère résistif du polyéthylène aux basses fréquences, mais n'a aucun effet à des fréquences de micro-ondes. Quant à l'effet du taux de fibres, il s'est avéré que ceux-ci augmentent les propriétés diélectriques du composite.

ABSTRACT

The characterization of the dielectric properties of wood and wood-based composites is important for both understanding their interaction with electromagnetic waves and to assess their potential use for new applications. Thus, we used the dielectric spectroscopy method to monitor changes in the materials dielectric properties over wide frequencies from 1 to 3×10^3 MHz and temperature from -20 to 100° C. The primary objective is to investigate the dielectric properties of wood according to the frequency, the moisture content, the temperature and the intrinsic properties of wood. Secondly, this study aimed to evaluate the dielectric properties of wood-polymer composites. We have elaborated composites with mixtures in different proportions of wood fibers (40%, 50%, 60%), of high density polyethylene and maleated polyethylene (3%) by two methods: extrusion and thermocompression.

The results indicate that the dielectric behavior of all investigated wood species is quantitatively similar. In general, the dielectric properties increase with the increasing moisture content. A positive linear relationship between the dielectric constant and the moisture content was established. The dielectric behavior of wet wood in the range of studied frequencies is characterized by a significant reduction in dielectric properties as the frequency increases. The wood principal direction plays an important role as well. The dielectric properties of wood are much higher in the longitudinal direction than in the tangential and radial directions. The results of this study suggest that wood intrinsic characteristics were the main factors that explain the differences in the dielectric behavior among wood species. There is a positive linear relationship between the density and the dielectric constant of wood. We have established a multiple regression model that evaluates the variation of the dielectric constant as a function of the moisture content and density.

Characterization of dielectric properties of wood-polymer composites reveals that the incorporation of the fibers alters the resistive character of the polyethylene at low frequencies, but it doesn't have any effect at microwave frequencies. Higher fiber contents increase the dielectric properties of the composite.

INTRODUCTION

Le bois, cette ressource naturelle qui est, sans doute, la plus exploitée depuis longtemps, est indispensable pour l'activité économique dans tous les pays du monde ; c'est une ressource renouvelable, durable, biodégradable et très polyvalente. Le bois est un des matériaux les plus appréciés dans l'industrie de construction et d'ameublement en raison de ses propriétés mécaniques. Il est également utilisé pour la fabrication des pâtes et papiers et constitue une importante source d'énergie. Grâce à l'abondance de cette ressource naturelle, les fibres de bois demeurent largement utilisées dans les industries de plasturgie comme un substitut de renforcement depuis plusieurs années. Malgré le progrès des recherches, plusieurs défis persistent et les études dans le domaine du bois et de ses dérivés ne cessent d'évoluer afin de répondre aux exigences imposées par les industriels en termes de qualité et de coût. De ce fait, l'utilisation du bois pour de nouveaux usages plus lucratifs nécessite une caractérisation avancée de ses propriétés et une meilleure compréhension de leur comportement lors du procédé de transformation et en service. Dans ce contexte, la caractérisation des propriétés diélectriques du bois et des composites à base de bois est importante à la fois pour mieux comprendre leur interaction avec les ondes électromagnétiques et pour évaluer leur potentiel d'utilisation pour de nouvelles applications.

L'étude proposée dans le cadre de ce travail vise en premier lieu à caractériser les propriétés diélectriques du bois. Ces propriétés sont importantes, entre autre, une utilisation efficace du bois dans des applications du traitement thermique et pour le développement des outils à des fins de diagnostics. Le traitement du bois par micro-ondes est d'importance croissante dans les domaines de chauffage, de collage, de séchage, ainsi que pour l'amélioration de la qualité du bois (Sahin et Ay, 2004). D'autre part, un certain nombre d'instruments de mesure, basés sur les propriétés diélectriques du matériau, sont utilisés pour mesurer la teneur en humidité et la masse volumique du bois de façon non destructive (Antti et al.

2000, Lee 2003). Dans ce travail, on s'intéresse au comportement diélectrique du bois dans le domaine des micro-ondes. Ainsi, nous allons considérer l'effet de la température et des propriétés intrinsèques du bois (essence, direction, aubier et duramen, bois initial et bois final).

En deuxième lieu, nous nous intéressons à étudier les propriétés diélectriques des composites bois-polymère dans une perspective d'évaluer le potentiel de leur utilisation pour des applications lucratives dont le domaine d'isolation électrique (emballage électronique, câblerie, etc.) (Markiewicz et al. 2012). En se basant sur des composites à matrice polyéthylène, les propriétés diélectriques sont supposées être dépendantes de la fréquence, de la température et de la concentration des fibres de bois issues de différentes essences.

Le plan de ce travail se décline comme suit : le premier chapitre offre un aperçu détaillé sur l'anatomie du bois. Nous présenterons aussi une synthèse bibliographique sur les différents constituants utilisés dans les composites bois-polymère (matrice thermoplastique, fibres de bois et agents de couplage) et sur les principaux procédés de fabrication. La troisième partie de ce chapitre portera sur les différentes théories qui décrivent les propriétés diélectriques des matériaux. Nous achèverons par une présentation des travaux de recherche cités dans la littérature. Le deuxième chapitre sera dédié à la description des matériaux utilisés et du procédé d'élaboration des composites bois-polymères ainsi que la méthode suivie pour la caractérisation des propriétés diélectriques des matériaux. Le troisième chapitre expose les résultats obtenus et leurs discussions. Finalement, nous tirerons les grandes conclusions ainsi que les perspectives dégagées à l'issue de ces travaux.

CHAPITRE 1

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans ce chapitre, nous présenterons les notions principales nécessaires à la compréhension de ce projet. La première partie se focalise sur les caractéristiques des matériaux utilisés dans cette étude (bois et composites bois- polymère). Nous définirons dans une deuxième partie les principes physiques intervenant dans les propriétés diélectriques. Dans la dernière partie, nous présenterons une synthèse des résultats de recherche sur les propriétés diélectriques du bois et des composites bois- polymère en fonction de plusieurs facteurs.

1.1 Le bois

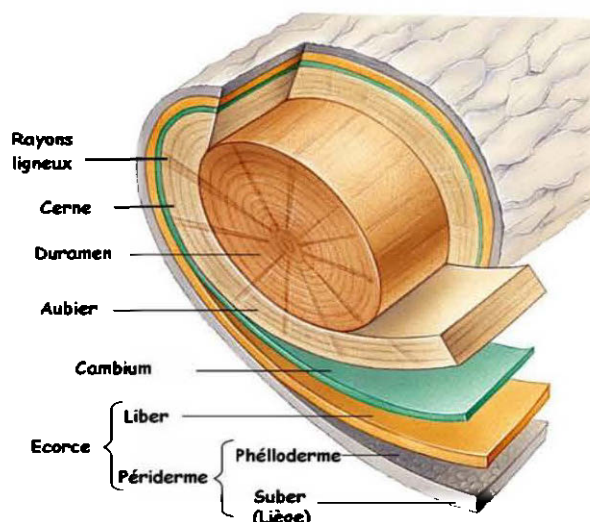
Le bois est un matériau composite naturel utilisé dans plusieurs applications. En raison de son origine biologique, il possède une structure extrêmement complexe à tous les niveaux hiérarchiques. Ses propriétés anatomiques, chimiques, physiques et mécaniques varient considérablement d'une espèce à une autre, dans une même espèce ou dans les différentes parties du même arbre (Mullins et McKnight 1981).

Le tronc d'un arbre est constitué d'un ensemble de couches concentriques (Figure 1.1). De l'intérieur vers l'extérieur, on distingue une partie centrale foncée appelée le duramen (bois de cœur), une partie périphérique plus claire appelé l'aubier et l'écorce qui est formé à son tour de deux couches ; l'écorce interne appelée liber sert à transporter la sève élaborée des feuilles aux racines et l'écorce externe joue le rôle de protection contre les éléments extérieurs (ex. dessiccation, attaques biologiques, mécaniques, etc.).

La croissance du bois est assurée par une couche mince située entre l'aubier et l'écorce, appelée cambium qui est la partie la plus importante de l'arbre. Elle se traduit par l'apparition d'un cerne d'accroissement produit chaque année. Le

nombre de cernes permet ainsi de connaître l'âge cambial de l'arbre. Par division cellulaire, le cambium donne naissance au liber vers l'extérieur et au bois d'aubier vers l'intérieur du tronc (Navi et Heger 2005). Les cernes les plus anciens subissent des transformations physiques et chimiques : il s'agit du duramen ou bois de cœur. Ce dernier est constitué principalement de cellules mortes lignifiées qui représentent la masse principale du tronc. Il se trouve toujours au centre du tronc et résulte d'une transformation progressive de l'aubier. Cette transition est accompagnée par une augmentation de la teneur en extractibles, ce qui lui confère des propriétés différentes et uniques. En effet, les extractibles offrent une durabilité naturelle au bois de cœur qui se caractérise par sa capacité à résister à la pourriture. D'autre part, la présence des extractibles engendre une imperméabilité accrue, ce qui rend le bois de cœur lent à sécher et plus difficile à imprégner avec des liquides. Le bois de cœur peut avoir aussi un poids légèrement plus élevé que l'aubier (Haygreen et Bowyer 1989, Miller 1999, Rowell 2005).

Dans les régions tempérées, la production du bois commence au printemps avec le bois initial, continue en été et s'achève en automne avec le bois final. Chez les résineux (par exemple les mélèzes) et certains types de feuillus, le passage du bois final au bois initial est abrupt et visible sur les sections transversale et radiale de la tige à cause des différences de couleurs. Le bois final forme la partie plus foncée du cerne. Étant composé de cellules à parois épaisses, il est nettement plus dense que le bois initial (Shmulsky et Jones 2011). Par contre, pour certaines espèces, le bois possède une structure uniforme et la transition du bois initial au le bois final est graduelle tel que le peuplier faux-tremble et l'érable à sucre.



1.1Figure 1.1 : Structure générale d'un tronc d'arbre (Garrett 2007)

1.1.1 Anisotropie du bois

Le bois est un matériau anisotrope, ses propriétés mécaniques et physiques varient selon la direction considérée. Les trois directions longitudinale (L), radiale (R) et tangentielle (T) sont les directions d'anisotropie du bois pour la plupart de ses propriétés physiques, mécaniques et technologiques. La figure 1.2 illustre les trois plans d'observation, appelés plans ligneux, nécessaires à la description de la structure anatomique du bois. Ces trois plans sont le plan transversal, le plan radial et le plan tangentiel.

Le plan transversal (RT) résulte d'une coupe d'un morceau de bois perpendiculairement à l'axe de la tige. Cette coupe révèle la présence des rayons ligneux qui s'étendent à l'intérieur du bois jusqu'à l'écorce. Le plan radial (LR) est obtenu à partir d'une coupe parallèle aux rayons ligneux et perpendiculaire aux cernes. Il permet d'observer les alignements des cellules longitudinales. Le plan tangentiel (LT) est un plan excentré perpendiculaire au plan radial. Il se trouve parallèle à l'axe de la tige et tangents aux cernes annuels. La moelle n'y apparaît pas mais cette coupe fournit des informations sur les autres caractéristiques macroscopiques.

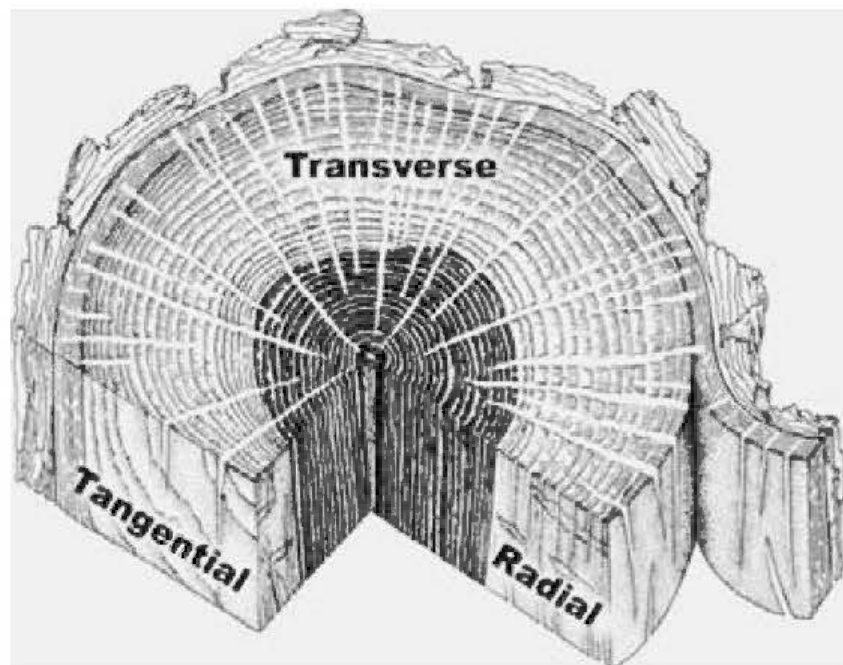


Figure 1.2 : Schéma des trois plans ligneux du bois (Raven et al. 1999)

1.1.2 Classification du bois

Les arbres sont divisés en deux grandes classes : les résineux et les feuillus. Les différences fondamentales reposent sur l'organisation et la nature des cellules caractérisant chaque type de bois. Les connaissances de ces différences sont importantes pour mieux comprendre les propriétés du matériau.

1.1.2.1 Les résineux

Les résineux présentent une organisation relativement simple et uniforme. Ils sont des essences à feuillage persistant en forme d'aiguilles (par opposition aux arbres à feuilles). L'épinette, le mélèze et le pin sont des résineux. Les résineux sont constitués essentiellement de deux types de cellules : les cellules longitudinales (trachéides) et les cellules de parenchymes. Chez certaines espèces de résineux, d'autres types de cellules longitudinales sont présents notamment des canaux résinifères disposés parallèlement et perpendiculairement aux trachéides (Figure 1.3).

- Les trachéides : Ce sont des cellules allongées dans la direction longitudinale de section hexagonale ou carré dans le bois initial et rectangulaire dans le bois final. Leur longueur varie entre 3 et 7 mm et leur diamètre tangentiel est environ constant sur une rangée radiale. Les trachéides remplissent la double fonction de soutien et de conduction de la sève. Leurs parois ligneuses sont pourvues d'ouverture de communication observables sur les faces radiales appelées ponctuations aréolées. Ils servent à transporter l'eau et les substances nutritives entre deux cellules voisines. En outre, les parois des trachéides sont imprégnées de lignine, responsable de la solidité et de la rigidité du bois.
- Les cellules de parenchymes sont des cellules courtes et de section prismatique. Leur longueur varie de 0,1 à 0,22 mm et leur largeur varie entre 0,01 et 0,05 mm. Leurs parois sont garnies de ponctuations simples à la différence des trachéides. Les cellules de parenchymes assurent la réserve des substances nutritives. Elles peuvent être disposées longitudinalement ou radialement. Les parenchymes radiaux forment les rayons ligneux, appelés également rayons médullaires. Des cellules épithéliales dans les canaux résinifères longitudinaux et des transversaux sont présents chez certaines espèces en faible quantité. Elles constituent une source de résine (Beaudoin et al. 2009).

1.1.2.2 Les feuillus

Les arbres feuillus possèdent des feuilles bien développées. Ils possèdent habituellement une masse volumique élevée.

Le bois des feuillus présente une différenciation cellulaire plus évoluée que les résineux. Il se compose principalement des éléments de vaisseaux, de fibres et de cellules de parenchymes (Figure 1.4).

- Les éléments de vaisseaux sont des cellules courtes de forme tubulaires qui se réunissent longitudinalement pour former de véritable tuyau appelée « vaisseau ». Ils se caractérisent par un gros diamètre qui varie selon l'espèce et par une paroi cellulaire très mince. Les vaisseaux sont interconnectés par

des ponctuations et des cloisons perforées afin de permettre le passage de la sève brute. Leur disposition permet de classer le bois de feuillus en trois catégories : bois à zone poreuse, bois à zone semi-poreuse et bois à pores diffus.

- Les fibres libriformes sont des cellules longitudinales de faible diamètre avec des parois cellulaires épaisses et rigides, sans cloisons perforées. Ils remplissent le rôle de support mécanique à la tige. La proportion des fibres varie entre de 25 à 75% selon l'espèce et influence la résistance mécanique du bois. Chez certaines espèces, il existe des fibres-trachéides qui se différencient des fibres libriformes par la présence des ponctuations aréolées.
- Les cellules de parenchymes sont des cellules courtes orientées longitudinalement à paroi peu lignifiée et abondamment ponctuées (ponctuations simples). Ils assurent la réserve et la distribution des substances nutritives. Chez les feuillus, il existe deux grands types de parenchymes longitudinaux ; les parenchymes paratrachéaux associés avec les vaisseaux et les parenchymes apotrachéaux isolés des vaisseaux.
- Les rayons des bois feuillus sont constitués de deux à plusieurs cellules transversales. Ces cellules assurent la communication avec les cellules adjacentes permettant la circulation radiale et l'accumulation de substances de réserve. La proportion en volume des rayons influence considérablement les propriétés physiques et mécaniques (stabilité dimensionnelle, la perméabilité et la résistance mécanique) (Rowell 2005).

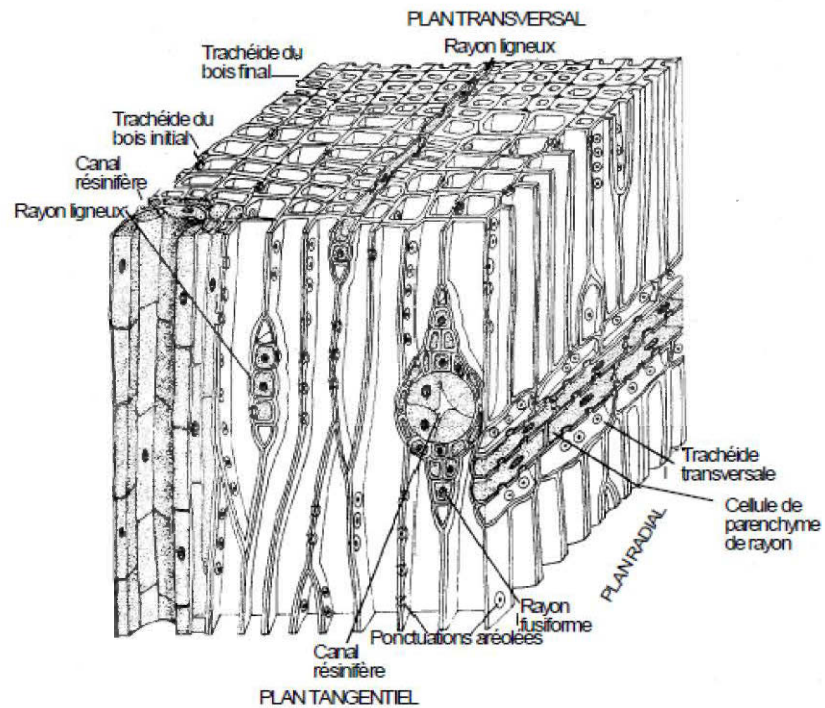


Figure 1.3 : Structure macroscopique du bois de résineux (Fahn 1990)

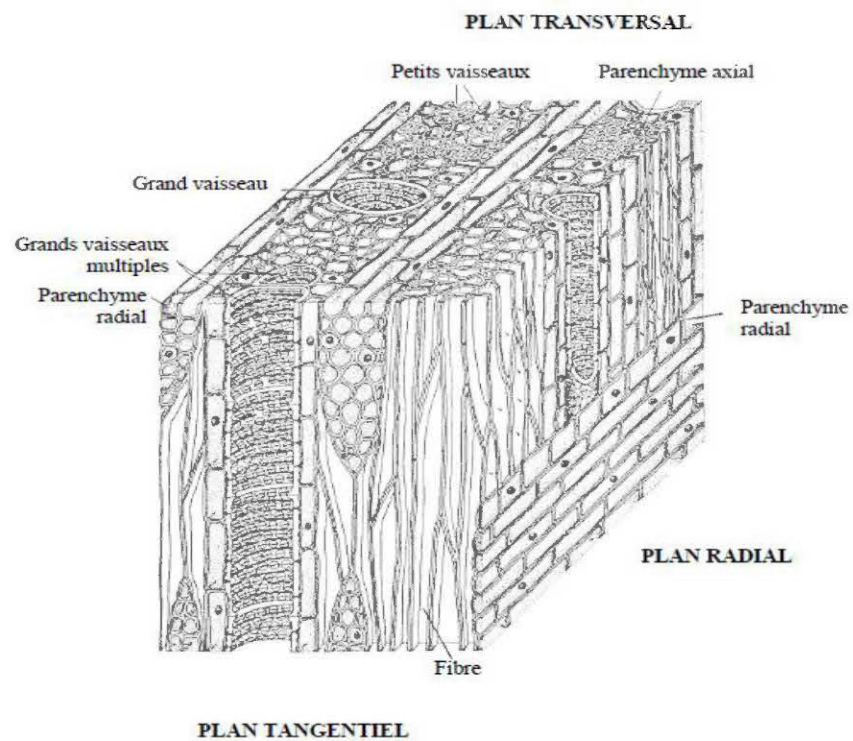


Figure 1.4 : Structure macroscopique du bois de feuillus (Fahn 1990)

1.1.3 Composition chimique du bois

Le bois est défini comme étant un biopolymère tridimensionnel formé d'un réseau complexe dans lequel sont inclus trois types de substances macromoléculaires à savoir : la cellulose, les hémicelluloses et les lignines avec des quantités faibles d'extractibles et de substances minérales (Figure 1.5). Les microfibrilles de cellulose sont constituées principalement de polymères solides et linéaires de glucoses. Elles sont associées à des polymères amorphes composés de plusieurs sucres de nature différente (hémicelluloses). Ces polysaccharides sont incorporés dans une matrice amorphe de polymère phénylpropane (lignine), et le tout donne naissance à une structure composite dite paroi cellulaire lignocellulosique (Rowe 1989).

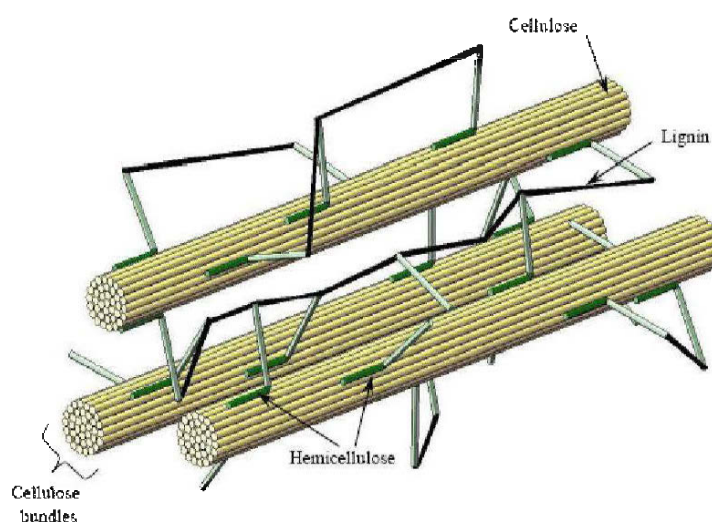


Figure 1.5: Constituants chimiques du bois (Murphy et McCarthy 2005)

Une analyse chimique permet de distinguer entre les feuillus et résineux, mais ces techniques ne peuvent pas être utilisées pour identifier les espèces de bois en raison des variations au sein de chaque espèce. En général, la teneur en lignine chez les résineux est plus élevée que celle chez les feuillus (Tableau 1.1).

Tableau 1.1 : Répartition chimique (% en masse) des différents composés dans le bois des feuillus et des résineux (Sjöström 1993)

Constituants (%)	Résineux	Feuillus
Cellulose	42 ± 2	45 ± 2
Hémicelluloses	27 ± 2	30 ± 5
Lignine	28 ± 3	20 ± 4
Extractibles	3 ± 2	5 ± 3

1.1.3.1 La cellulose

La cellulose est un homopolysaccharide de glucoses ($C_6O_5H_{10}$) constituée principalement d'unités de D-glucopyranose. Son élément de base est un motif cellobiose composé de deux molécules de glucoses reliées par une liaison glucosidique β (1-4). La structure moléculaire de la cellulose est présentée sur la figure 1.6. Les chaînes moléculaires de la cellulose s'associent entre elles par des liaisons hydrogènes intramoléculaires (à l'intérieur de la même chaîne) et intermoléculaires (entre deux chaînes différentes) pour former les microfibrilles. L'organisation des groupements hydroxyyles confèrent à la cellulose une structure semi cristalline. Son degré de cristallinité est de l'ordre de 65 %.

La cellulose se caractérise par un degré de polymérisation très important (jusqu'à 10,000 unités de glucoses). Les liaisons hydrogènes inter-chaînes dans les zones cristallines sont fortes, donnant ainsi aux fibres une bonne rigidité et l'insolubilité dans la plupart de solvants. Elles protègent également la cellulose de la fusion. Dans les zones moins ordonnées, les chaînes sont plus disposées à se lier avec d'autres molécules, comme l'eau.

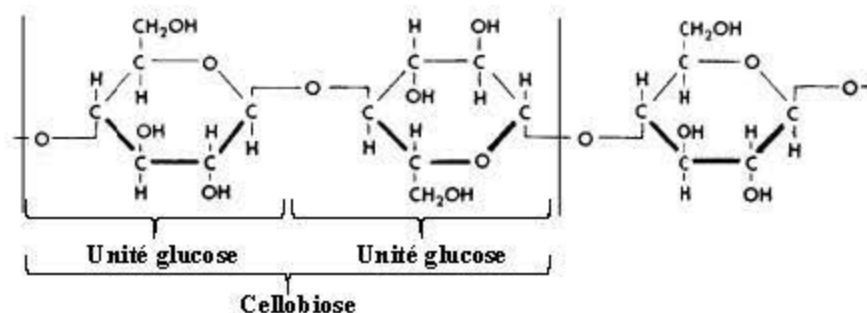


Figure 1.6 : Structure moléculaire de la cellulose (adapté de Shmulsky et Jones 2011)

1.1.3.2 Les hémicelluloses

Les hémicelluloses sont des hétéropolysaccharides, elles contiennent plusieurs sucres à cinq atomes de carbone (pentoses) tels que la xylose et l'arabinose et à six atomes de carbone (hexoses) tels que le glucose, le mannose, le galactose et l'acide glucuronique. Elles sont formées à partir des liaisons glycosidiques variées. Les hémicelluloses sont liées d'une part à la surface des microfibrilles de cellulose par des liaisons hydrogènes et d'autre part à la lignine par des liaisons covalentes. Les chaînes de molécules sont ramifiées et ne comportent pas plus de quelques centaines d'unités de sucres, ce qui indique que leur degré de polymérisation est faible (50-300 unités). Ce polymère se distingue de la cellulose du fait que sa structure branchée le rend fragile et se dépolymérise plus facilement. Il est le premier polymère du bois à se décomposer lors d'un traitement thermique et son altération est accélérée par des réactions acido-catalysées. Contrairement à la cellulose, les hémicelluloses présentent une structure amorphe et les liaisons hydroxyles peuvent être substituées par des groupements acétates CH_3COO^- et méthoxyle CH_3O . En outre, les hémicelluloses se caractérisent par leur solubilité dans des solutions alcalines (par exemple soude caustique NaOH) et leur insolubilité dans l'eau. Leur résistance aux attaques chimiques est moyenne (Fengel et Wegner 1989, Wertz 2011).

Les structures et les compositions des hémicelluloses, diffèrent d'un bois feuillu à un bois résineux. Les hémicelluloses de feuillus sont généralement plus riches en

xylose, tandis que les hémicelluloses des résineux sont principalement constituées de mannoses et de xyloses (De Cherisey 2015).

1.1.3.3 La lignine

La lignine est un composé phénolique à poids moléculaire élevé. Elle constitue la composante non glucidique la plus importante des fibres végétales. La lignine résulte de la polymérisation oxydative de trois molécules de base phénoliques appelées monolignols, qui sont les alcools *p*-coumarylique, coniférylique et sinapylique. Ces monolignols sont à l'origine respectivement des unités *p*-hydroxyphényle H, guaiacyle G et S syringyl. Malgré la simplicité de la structure et du nombre des monomères de base, la lignine présente une structure très complexe. Un exemple de la structure complexe de la lignine est présenté sur la figure 1.7 (Macheix et al. 2005, Wertz 2010, De Cherisey 2015).

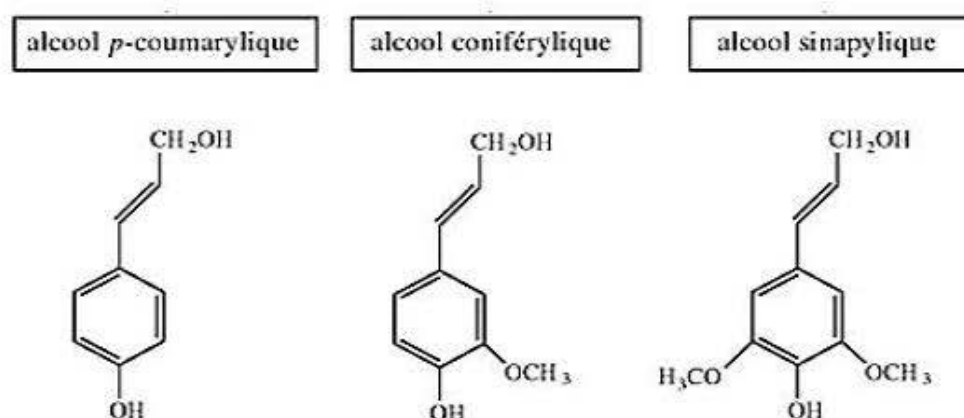


Figure 1.7 : Les trois monomères principaux de la lignine (Macheix et al. 2005)

La lignine sert comme un agent de liaison pour maintenir les cellules ensemble. Elle est intimement associée à la cellulose et aux hémicelluloses et c'est elle qui confère sa rigidité à la paroi cellulaire. Grâce à la lignification des parois de ces cellules, le bois est rigide, relativement hydrophobe et résistant à la biodégradation par rapport aux autres tissus végétaux. La lignine est aussi observée dans les tissus de fibre ou dans le parenchyme, ce qui apporte à la plante un atout mécanique supplémentaire pour la croissance en hauteur de l'arbre. De

plus, la lignine possède un rôle essentiel dans l'imperméabilisation des cellules conductrices de sève et de résister aux fortes pressions négatives, nécessaires pour le transport de l'eau jusqu'aux feuilles. Ce polymère a un pouvoir antioxydant, absorbe les radiations UV et protège les plantes contre les attaques biologiques extérieures en constituant une barrière physique.

1.1.4 Hygroscopie du bois

En raison de son caractère hygroscopique, le bois est sensible aux variations atmosphériques du milieu où il est exposé. Il tend à absorber ou perdre de l'eau en fonction de l'humidité relative et la température de l'air et de la quantité d'eau contenue dans le bois. Cette relation entre le bois et l'eau influe considérablement sur le comportement physique et mécanique du bois et rend son utilisation délicate.

La teneur en humidité du bois est une grandeur sans dimension souvent exprimée en pourcentage comme étant la masse de l'eau qu'il contient divisée par sa masse anhydre et ses valeurs peuvent changer de zéro à 250% (Torgovnikov 1993).

Par convention, la masse anhydre est obtenue par séchage d'une éprouvette à $103 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à obtention d'une masse constante, généralement pendant 24 heures.

L'eau dans le bois vert se présente sous deux états différents : l'eau libre et l'eau liée (Figure 1.8). L'eau libre (ou liquide) remplit partiellement ou totalement les lumens des cellules de bois. Elle est retenue uniquement par des forces capillaires et la première à s'évacuer par évaporation lors du séchage du bois sans intervenir dans les phénomènes de retrait ou de gonflement. L'eau liquide dans le bois possède des propriétés thermodynamiques comme le point de fusion, semblables à celles de l'eau pure, qui correspond à 0°C (Nkeuwa 2010).

L'eau liée est contenue dans les parois cellulaires. Elle est fixée fortement par des liaisons hydrogène aux groupements hydroxyles (OH) libres présents à la surface externe des chaînes de celluloses (Figure 1.9).

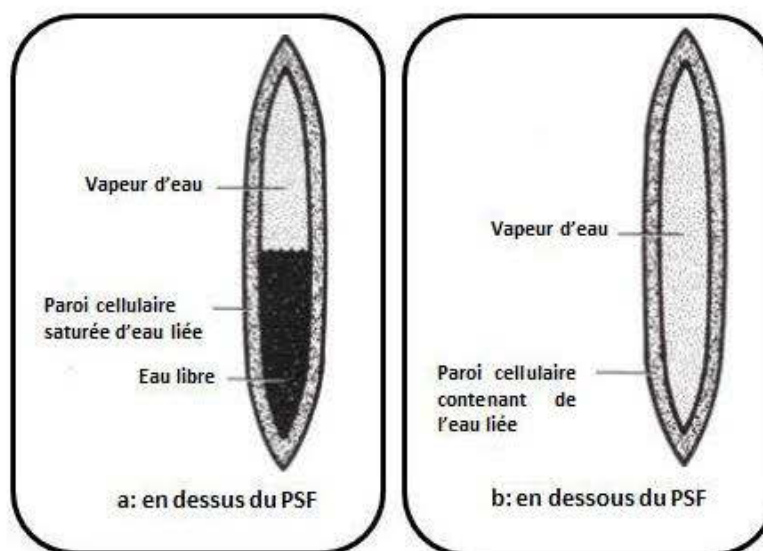


Figure 1.8 : Types d'eau dans le bois (Shmulsky et Jones 2011)

L'eau liée peut se regrouper en deux types selon l'ordre décroissant de leur énergie de liaison ; l'eau d'adsorption maintenue par les surfaces des microfibrilles de cellulose et l'eau condensée capillaire qui se trouve dans les pores de la paroi cellulaire. Contrairement à l'eau d'adsorption, l'eau capillaire est congelable et sa température de fusion est inférieure à celle de l'eau libre (Nkeuwa 2010).

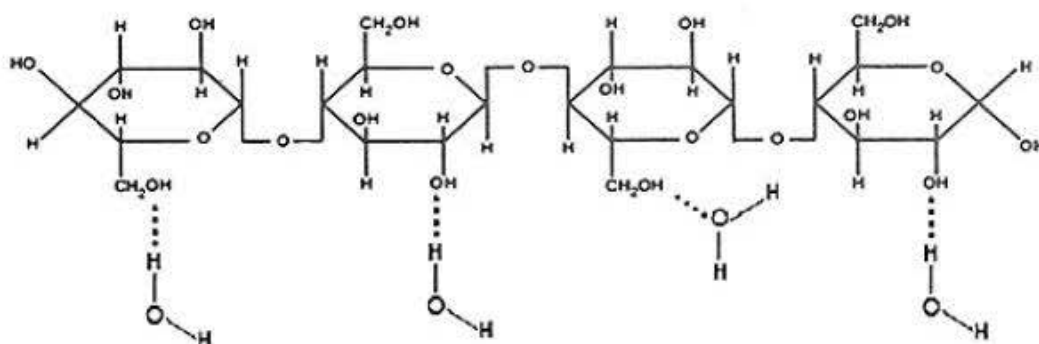


Figure 1.9 : Représentation schématique d'interaction entre les chaînes de cellulose et les molécules d'eau (Torgovnikov 1993)

L'humidité limite, pour laquelle l'eau est entièrement sous forme liée, est appelé le point de saturation des fibres (PSF). Cet état est atteint lorsqu'il n'existe plus d'eau libre dans les cavités cellulaires et les parois cellulaires sont saturées d'eau

liée. A 20°C, le point de saturation des fibres a lieu pour un taux d'humidité compris entre 32-35% pour les feuillus et 22-28% pour les résineux. Les variations dimensionnelles du bois se produisent dans le domaine hygroscopique situé entre l'état anhydre et le bois au PSF.

1.2 Les composites bois-polymère

1.2.1 Généralités

Un matériau composite est défini comme étant une combinaison d'au moins deux matériaux non miscibles de natures et de formes différentes pour donner naissance à un produit hétérogène présentant des caractéristiques plus intéressantes que celles des constituants individuels (résistance mécanique, légèreté, rigidité, résistance à la corrosion, etc.). Dans un matériau composite, on peut distinguer la matrice qui constitue la base du matériau et le renfort présenté sous forme des arrangements de fibres qui sont noyées dans la matrice. L'adhésion entre ces deux matériaux est assurée par un agent de couplage (Figure 1.10).

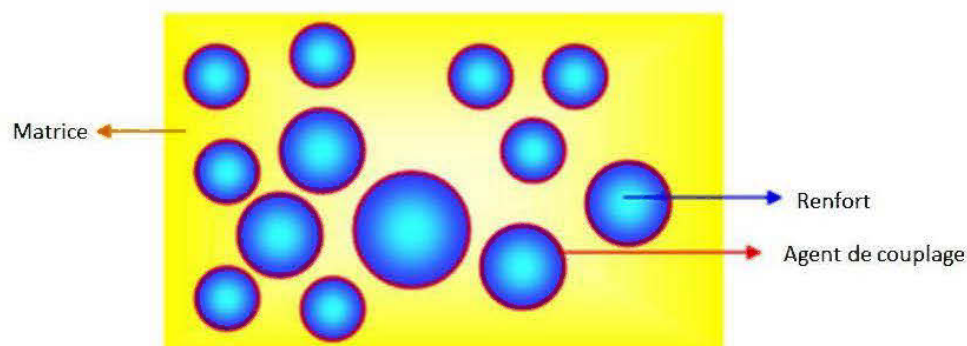


Figure 1.10 : Représentation schématique d'un matériau composite (adapté de Raskin 2010)

Les composites bois-polymère (CBP) suscitent un intérêt grandissant des scientifiques et des ingénieurs de matériaux. Ils présentent de multiples avantages ; faible coût de production, renouvelable avec un faible impact sur l'environnement, une bonne aptitude à la mise en forme et de bonnes performances mécaniques et diélectriques (Dhal et Mishra 2012). Ils sont généralement fabriqués à partir de matières recyclées, permettant ainsi la

valorisation des résidus du bois et des plastiques de post-consommation (CRIQ 2003). Grâce à ses avantages, les composites bois-polymère sont très attrayants et recommandés pour diverses industries telles que les industries de l'aérospatiale, de l'automobile, de la construction ou de l'emballage.

1.2.2 Les fibres de bois

Le renfort d'un matériau composite désigne tout produit susceptible d'améliorer les propriétés structurelles ou mécaniques. Le bois, au sens large des matériaux lignocellulosiques, a été longtemps employé comme renfort de polymère, afin d'alléger la masse et le coût des CBP sans dégrader leurs propriétés mécaniques. En effet, plusieurs enquêtes prouvent la valeur des fibres de bois, en raison des caractéristiques intéressantes qu'ils possèdent notamment leur caractère écologique (ressource biodégradable), leur aptitude au recyclage, leur nature non-abrasive et d'autres propriétés spécifiques élevées (Zadorecki et Michell 1989). Cependant, certains inconvénients tels que l'incompatibilité avec la matrice polymère hydrophobe, la sensibilité à la température et la mauvaise résistance à l'humidité réduit le potentiel d'utilisation des fibres de bois comme renfort dans des polymères pour quelques applications (Saheb et Jog 1999).

Dans les composites à base d'une matrice thermoplastique renforcée de fibres de bois, le bois se retrouve principalement sous forme de fibres courtes, de particules ou de farine. Ces petites tailles facilitent leur intégration dans la matrice plastique lors du procédé de transformation du fait qu'elles se répartissent de façon uniforme au cours de la mise en œuvre, alors que les fibres longues requièrent des procédés spéciaux pour réaliser une orientation souhaitée. La farine de bois est généralement obtenue par broyage des résidus de la transformation du bois notamment ceux des opérations de rabotage ou de sciage ou du recyclage du bois en milieu urbain (Wolcott et Englund 1999). La plage de taille des particules de farine de bois utilisées commercialement est généralement comprise entre 180 - 840 μm (80- 20 U.S mesh) (Niska et Sain 2008).

1.2.3 Les matrices thermoplastiques

La matrice d'un composite est une résine polymérisée qui a pour but d'assurer la cohésion de l'ensemble et de former une unité structurale homogène. Elle permet également de transmettre, aux fibres de renforts, les efforts mécaniques appliqués sur le matériau et de le protéger (Gibson 1994). Les thermoplastiques, ramollissant à la chaleur et se fixant par refroidissement, leur structure est linéaire ou ramifiée et le processus est réversible. La rapidité de mise en œuvre des thermoplastiques avec une moindre dépense énergétique, et la possibilité de recyclage des déchets ont favorisé leur emploi aux dépens des thermodurcissables. Dans le cas des composites bois-polymère, le choix de la matière utilisée pour la fabrication du composite dépend principalement de la température de ramollissement qui doit être inférieure à la température de dégradation thermique du bois (Wolcott et Englund 1999, Klyosov 2007). En raison de la faible stabilité thermique de la farine de bois, il convient d'utiliser des matières plastiques dont le point de ramollissement se situe au-dessous de 200 °C (Niska et Sain 2008, Ben'MBarek 2011). Afin de répondre à cette exigence, les polymères thermoplastiques les plus utilisés et les moins chers, pour l'élaboration des CBP sont les polyoléfines, tels que les polyéthylènes (PE) et les polypropylènes (PP).

Dans notre étude, nous avons élaboré des CBP à matrice en polyéthylène haute densité (PEHD) renforcés de fibres de bois. En effet, le PEHD résulte de la polymérisation de l'éthylène (C_2H_4) menant à une structure composée par la répétition du motif $-(CH_2)-$. Ce polymère est reconnu par sa facilité de mise en forme et son faible coût. Il est habituellement présenté sous forme de poudre ou de granulés cylindriques (Douminge 2010, Legros et al. 2011).

En raison de son caractère hydrophobe, le PEHD possède une bonne stabilité dimensionnelle. Il est largement utilisé comme isolant dans les câbles vu les spécifications diélectriques qu'il présente ; faibles pertes diélectriques, une faible permittivité diélectrique, une résistivité élevée et un coût modéré (Douar 2014).

1.2.4 Les agents de couplage

L'adhésion fibre-matrice joue un rôle important dans la détermination d'une variété de propriétés des matériaux composites. Dans le cas des CBP, les fibres de bois possèdent un caractère hydrophile qui est à l'origine de manque de compatibilité avec la matrice polymérique hydrophobe. L'incorporation de ces fibres engendre la formation d'un matériau hétérogène et une mauvaise dispersion des fibres dans la matrice (Lu et al. 2000, George et al. 2001, Bengtsson et Oksman 2006, Amor et al. 2014). Pour cette raison, le traitement des fibres est une étape critique dans le développement de ces matériaux composites. Les traitements chimiques sont les plus utilisés notamment par l'ajout d'un agent de couplage qui assure la création d'un pont chimique entre le renfort et la matrice. Parmi les agents de couplage, on trouve les polyoléfines maléates (MAPE ou MAPP). Ces matériaux sont fabriqués par greffage d'anhydride maléique (MA) sur la chaîne du polymère (polyéthylène ou polypropylène) (Beg 2007, Niska et Sain 2008). La fonctionnalité maléique assure la compatibilité avec les surfaces de fibres de bois, tandis que l'autre extrémité interagit avec la matrice (Figure 1.11). Les agents de couplage sont généralement présents à des concentrations massiques inférieures ou égales à 3% dans les composites (Bouafif 2009).

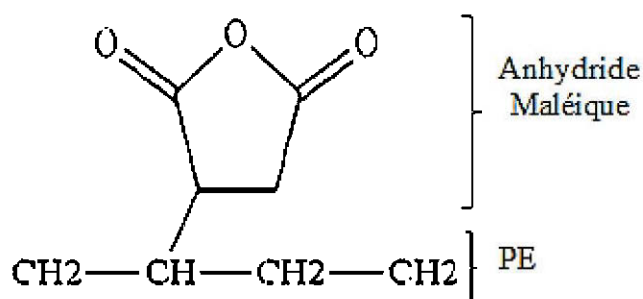


Figure 1.11: Formule chimique du polyéthylène maléaté (adapté de Wang et Wideman 2013)

1.2.5 Les Procédés de fabrication des CBP

Les composites bois-polymère se présentent sous des formes variables selon leurs usages qui nécessitent différents procédés de mise en œuvre.

1.2.5.1 L'extrusion

L'extrusion est une technique de transformation de matières thermoplastiques sous forme de granulé ou de poudre et des composites thermoplastiques à fibres courtes. Elle permet de produire par un processus technologique continu des profilés finis ou semi-finis. Cette technique est la méthode la plus répandue dans la production des CBP.

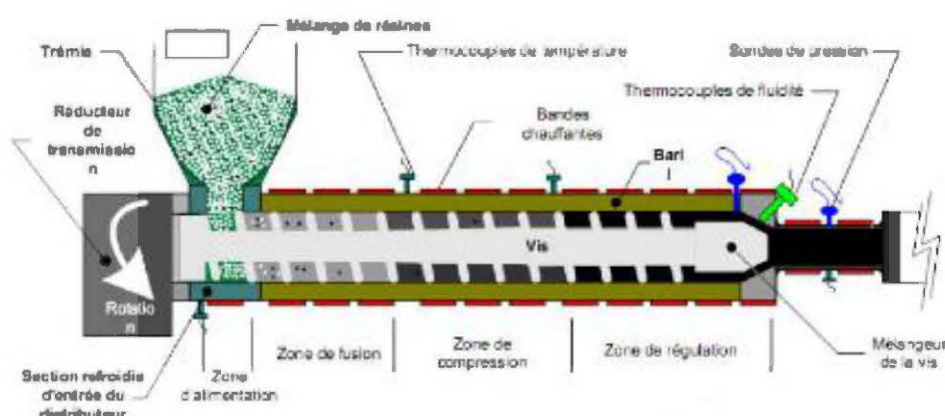


Figure 1.12 : Schéma de principe d'une extrudeuse (Kouassi 2013)

L'extrusion consiste à introduire les fibres et la résine dans la trémie de l'extrudeuse. Au cours du procédé, tous les ingrédients sont mélangés à l'aide d'un système à vis à trois zones (type vis d'Archimède) entraîné par un moto-réducteur. (Figures 1.12 et 1.13). La vis tourne et facilite l'avancée de la matière en fusion sous l'effet de la chaleur des résistances électriques (zone d'alimentation). Après plastification et dégazage adéquat du fondu suite à une friction maximale (zone de compression), la vis assure l'homogénéisation du mélange du polymère et des fibres de bois (zone de pompage). La matière est ainsi extrudée à travers une filière et on obtient la forme finale de l'extrudât, qui est refroidi à l'air ou à l'eau et peut être par la suite coupé aux longueurs standards (Le Baillif et Oksman 2006). La vitesse de rotation des vis et le profil de température sont des paramètres essentiels pour l'extrusion. En effet, une grande augmentation des vitesses de rotation et des températures entraîne une dégradation des fibres et provoque souvent des cassures (Le Baillif et Oksman 2006).



Figure 1.13 : Vis à trois zones (Trotignon 1996)

1.2.5.2 L'injection

L'injection est un procédé de mise en forme qui permet de réaliser des produits finis à partir d'un thermoplastique à l'état fondu chargé de renfort court. Cette technique offre la possibilité de fabriquer des formes complexes dans une gamme de poids allant de quelques grammes à plusieurs kilogrammes.

La presse d'injection doit remplir trois fonctions principales : plastification, injection et fermeture de moule (Figure 1.14). Tout d'abord, la matière est introduite dans une trémie sous forme de granulés. Comme dans une extrudeuse, le mouvement de rotation de la vis pompe les granules pendant leur transport de la zone d'alimentation vers la buse. Ainsi, la matière est fondue sous l'effet de la chaleur et du cisaillement. Pour stocker la quantité nécessaire pour le remplissage du moule, la vis recule dans le fourreau et la matière homogénéisée s'entasse à l'avant de la vis. Quand la quantité de matière prédéterminée est plastifiée, la vis joue le rôle d'un piston et injecte le mélange à haute pression dans le moule. La matière injectée est maintenue sous pression pendant le début de son refroidissement. L'unité de fermeture assure le verrouillage, l'ouverture et la fermeture du moule, et l'éjection des pièces.

Dans le cas des CBP, l'orientation des fibres de bois dans le composite est déterminée par l'écoulement de la masse fondue pendant le remplissage du moule. Donc, le procédé d'injection contribue à des performances meilleures que celles de l'extrusion (Stark et al. 2004, Beg 2007).

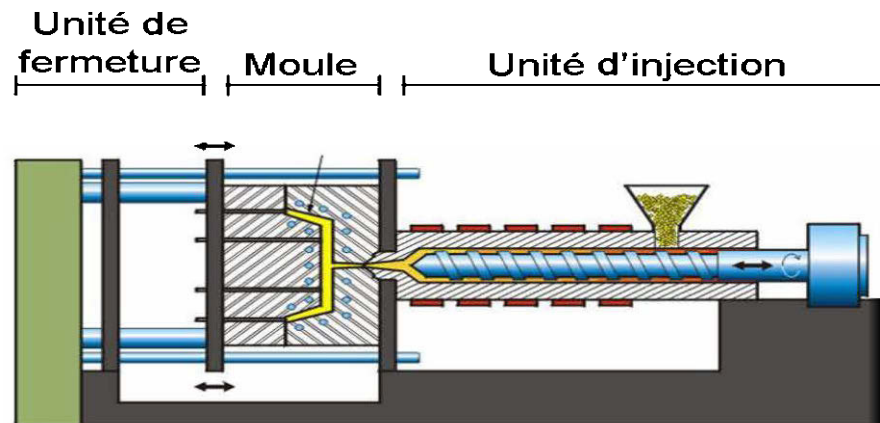


Figure 1.14 : Presse d'injection (Gosselin 2005)

1.2.5.3 La thermocompression

Le moulage par compression est l'une des plus anciennes techniques pour la mise en œuvre des polymères thermodurcissables. Le développement des produits composites à matrice polymère, pour des structures solides et légères a renouvelé l'intérêt du moulage par compression. Le moulage par compression offre plusieurs avantages lors de mise en forme des polymères renforcés. À la différence du moulage par injection, le procédé du moulage par compression permet d'utiliser des fibres plus longues dans la résine sans être endommagées. En outre, des concentrations élevées de fibres peuvent être incluses dans les matériaux moulés par compression (Isayev 1987). Ce procédé de moulage est adaptable pour la mise en œuvre des composite bois-polymère à matrice thermoplastique. Il est souvent précédé d'une phase de mise en granules afin de garantir un mélange homogène des renforts avec la matrice (Bouafif 2009). Le processus de moulage par compression consiste à introduire les granules entre deux plaques chauffantes et appliquer une pression hydraulique sur le moule (Figure 1.15). La température et la pression de moulage dépendent fortement de la matière transformée. Elles sont maintenues jusqu'à ce que la matière soit durcie.

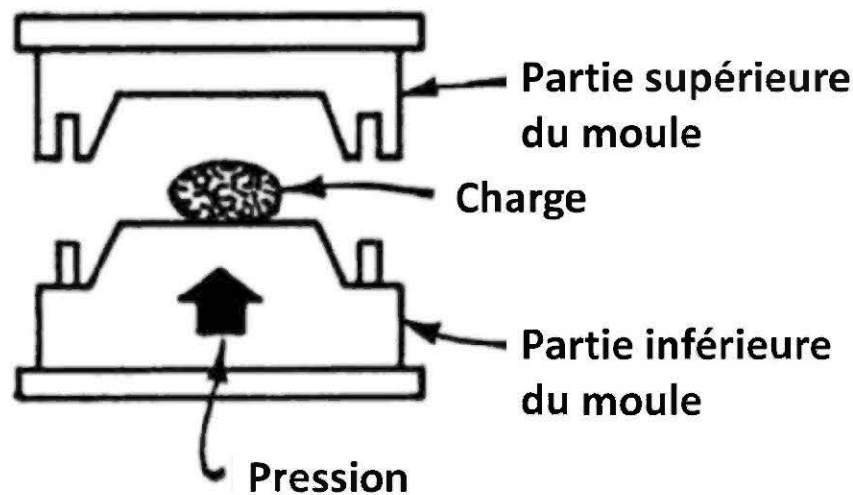


Figure 1.15 : Schéma d'une presse à compression (adapté de Chawla 2012)

1.3 Caractérisation diélectrique des matériaux

1.3.1 Matériau diélectrique

Les matériaux diélectriques peuvent être assimilés aux matériaux isolants. L'isolation électrique est rattachée à une grandeur physique mesurable appelée résistivité, qui s'exprime en ohms multiplié par l'unité de longueur ($\Omega.m$). À la différence d'un milieu conducteur, les matériaux diélectriques idéaux ne contiennent pas de charges libres dans leur volume car les atomes impliqués dans ces matériaux partagent leurs électrons et sont donc liés structurellement par des forces électriques. Ces charges liées ne sont pas susceptibles d'effectuer que de faibles déplacements par rapport à leur position d'équilibre.

Les matériaux diélectriques sont regroupés en deux catégories selon la structure des charges dans la molécule. On trouve les diélectriques polaires constitués de molécules qui possèdent une distribution asymétrique. Dans ce cas, même en absence de champ électrique externe, la molécule possède un moment dipolaire permanent. L'eau pure étant la plus courante qui absorbe très fortement l'énergie de micro-ondes (Meredith 1998, Martinez-Vega 2010).

Il existe une autre gamme de matériaux diélectriques présentant des caractéristiques non polaires qui possèdent une haute résistivité et qui ne se

chauffe pas de manière significative dans un champ micro-ondes. Ces matériaux sont caractérisés par un arrangement moléculaire symétrique du fait que les centres de gravité des charges positives et négatives coïncident avec le centre de symétrie, en absence du champ électrique. Ils sont employés dans de nombreux secteurs industriels tels que les domaines de l'électronique et de l'électrotechnique. Les meilleurs isolateurs les plus courants sont le quartz, l'alumine, le polycarbonate, le polyéthylène et le polypropylène.

1.3.2 Polarisation diélectrique

La polarisation est un phénomène physique résultant de l'application d'un champ électrique sur des charges électriques liées. Elle correspond à des modifications dans l'organisation des charges électriques notamment par le déplacement des charges et la réorientation des dipôles électriques. En effet, le champ électrique pénètre au cœur du diélectrique et y induit une séparation des barycentres de charges positives et négatives, initialement confondus. Cela se traduit par la formation d'un dipôle électrique. Ainsi, ces dipôles induits tendent à s'orienter dans la direction du champ électrique $\vec{E}$. Cette orientation dépend de la direction du champ électrique (Figure 1.16). Si le champ électrique varie, les dipôles changeront leur alignement afin de suivre les variations du champ.

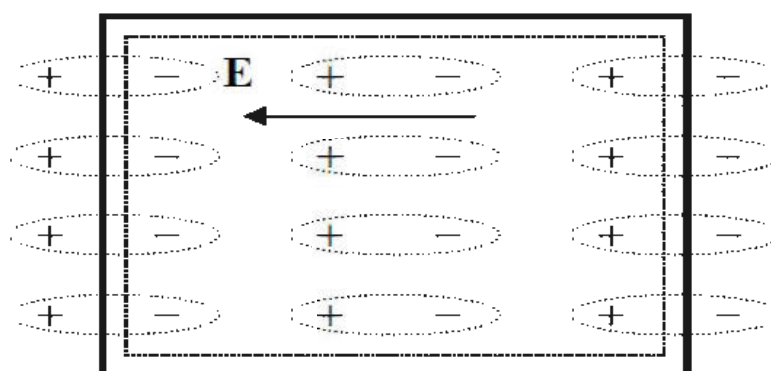


Figure 1.16 : Représentation schématique de la polarisation diélectrique
(Bodeux 2009)

On peut distinguer différents types de polarisation pouvant prendre place dans un diélectrique : polarisation électronique P_e , polarisation ionique P_i , polarisation dipolaire P_d et polarisation interfaciale P_i (ou du type Maxwell - Wagner). De manière générale, la polarisation totale P d'un matériau résulte de la contribution de ces différents mécanismes (1.1) :

$$P_t = P_e + P_i + P_d + P_i \quad (1.1)$$

- Polarisation électronique

Cette polarisation est due au déplacement du nuage d'électrons par rapport au noyau positif, sous l'action d'un champ électrique. Elle a lieu dans un atome neutre et lui confère un moment dipolaire (Figure 1.17). Les électrons ont des masses très petites, ils suivent donc les oscillations du champ électrique jusqu'à des fréquences élevées de l'ordre de 10^{15} Hz (Torgovnikov 1993, Dubois 1998).

- Polarisation ionique

Ce processus de polarisation est lié au déplacement relatif des ions par rapport à leurs positions d'équilibre au sein de la molécule. Sous l'effet d'un champ électrique, le cristal ionique est soumis à des forces coulombiennes qui s'exercent sur les ions de signes opposés, de sorte que les ions tendent à s'écarter les uns des autres. Ainsi, la distance inter-ionique change et un dipôle induit apparaît (Figure 1.17). Vu que l'inertie des ions est relativement lourde par rapport à celle des électrons, la polarisation ionique s'établit en environ 10^{-13} s donc plus lentement que la polarisation électronique. La fréquence de coupure se situe dans le domaine des fréquences optiques infrarouges (vers 10^{12} Hz) (Torgovnikov 1993, Dubois 1998).

- Polarisation dipolaire

Cette polarisation apparaît lorsqu'une molécule ou un groupement d'atomes possède un moment dipolaire permanent. En absence du champ électrique, les moments dipolaires permanents ne présentent pas d'orientation particulière, du fait de l'agitation thermique (Figure 1.17). Lorsqu'un champ électrique est appliqué au diélectrique, les dipôles ont tendance à s'orienter dans la direction du

champ appliqué, donnant naissance à une polarisation appelée polarisation dipolaire (Martinez-Vega 2010, Torgovnikov 1993, Dubois 1998).

La polarisation dipolaire est caractérisée par l'apparition du phénomène de relaxation dû à l'amortissement des mouvements de réorientation des dipôles électriques. Ce phénomène a été expliqué par Debye. Lorsque la fréquence du champ électrique est suffisamment élevée, les dipôles ne peuvent plus suivre les variations du champ électrique, ce qui donne naissance au phénomène de relaxation. Celui-ci correspond à une augmentation de la partie imaginaire de la permittivité électrique, traduisant des pertes plus importantes.

- Polarisation interfaciale (Maxwell-Wagner)

Ce type de polarisation apparaît dans les diélectriques hétérogènes dont les permittivités (ϵ_1 et ϵ_2) et les conductivités (σ_1 et σ_2) des matériaux constituant 1 et 2 sont différentes. En absence du champ électrique, les charges libres sont dispersées uniformément dans chaque région. Lorsqu'on applique un champ électrique, une accumulation de ces charges peut se produire aux interfaces des différentes phases constituant le matériau comme les joints de grains (Figure 1.17). Chaque grain de matériau devient alors un dipôle où les charges s'accumulent sur les parois opposées (Torgovnikov 1993, Dubois 1998).

Dans ce travail, nous étudions les propriétés diélectriques du bois et des CBP dans la gamme de fréquence $10^6 - 3 \times 10^9$ Hz. Par conséquent, les polarisations électronique et ionique sont des phénomènes instantanés qui auront déjà eu lieu et dont l'influence n'apparaîtra pas dans la gamme de fréquence utilisée pour notre étude. Par contre, les polarisations d'orientation et interfaciale peuvent jouer un rôle très important pour l'analyse du comportement diélectrique préalable de nos matériaux.

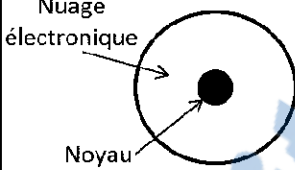
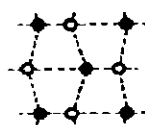
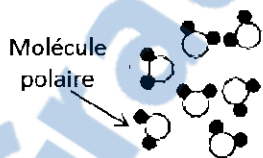
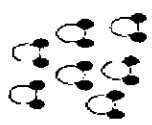
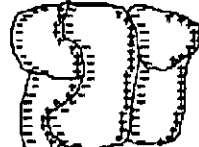
Type de polarisation	$\vec{E} = 0$	$\vec{E} \neq 0$
Électronique		
Ionique		
Dipolaire		
Interfaciale		

Figure 1.17 : Les différents types de polarisation (adapté de Orłowska 2003)

1.3.3 Conduction

Les matériaux diélectriques réels contiennent un certain volume de charges libres. Ainsi, dans les diélectriques, on peut également observer une très légère conduction, détectable surtout à basses fréquences. Cette conduction est due aux mouvements des ions et des électrons.

Leur origine peut être classée en deux catégories (Dissado et Fothergill 1992):

- Les charges intrinsèques sont des ions contenus initialement dans l'isolant ou générés soit par électro dissociation d'espèces neutres, soit par ionisation des constituants du solide par interactions avec des rayonnements énergétiques ou des particules (Laurent 1999).
- Les charges extrinsèques sont des électrons, des trous ou des ions injectés à partir des électrodes métalliques vers l'isolant sous l'action d'un champ électrique (Figure 1.18).

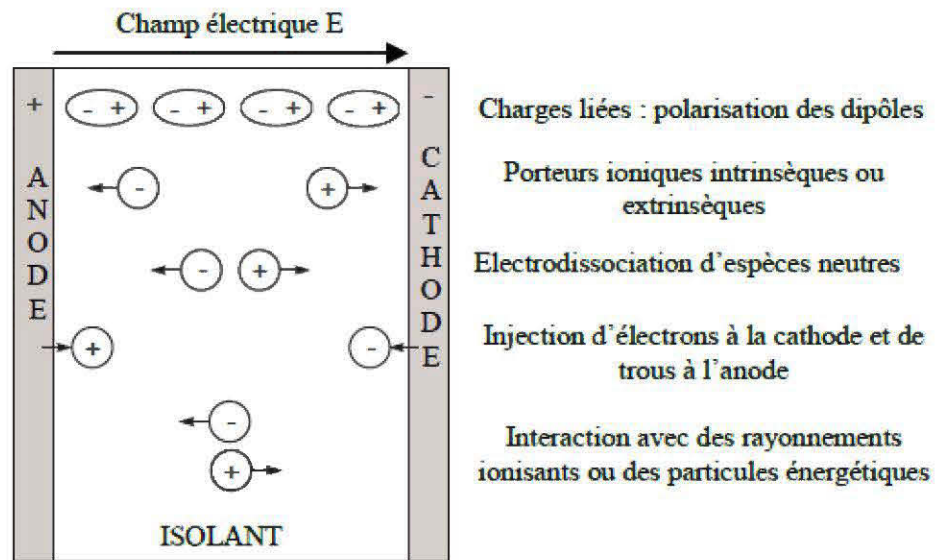


Figure 1.18 : Mécanisme de générations des charges dans un isolant entre électrodes sous l'effet d'un champ électrique (Melle 2005)

1.3.4 Grandeurs caractéristiques des matériaux diélectriques

Les paramètres permettant de caractériser les matériaux diélectriques sont nombreux. Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes intéressés à certains de ces paramètres notamment la permittivité relative, la constante diélectrique, le facteur de perte, le facteur de dissipation diélectrique, la conductivité électrique, la puissance dissipée et la profondeur de pénétration.

1.3.4.1 La permittivité relative

Chaque mécanisme de polarisation a une traduction dans la réponse en fréquence du matériau diélectrique. Cette réponse en fréquence s'exprime par la permittivité diélectrique reliant la polarisation P et le champ électrique E suivant la formule (1.2) :

$$P = \epsilon \cdot E \quad (1.2)$$

La permittivité est donc une propriété physique qui décrit la réponse d'un milieu donné sous l'action d'un champ électrique. Elle peut être exprimée par une quantité adimensionnelle : la permittivité relative ϵ_r normalisée par rapport à la permittivité du vide ϵ_0 (1.3) :

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (1.3)$$

Avec $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$

Dans le cas d'un diélectrique parfait, ϵ_r est facile à mesurer en termes de capacité, de sorte qu'elle est habituellement définie comme le rapport entre la capacité d'un condensateur donné avec le matériau diélectrique C_x et la capacité du même condensateur à vide C_v (1.4).

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_v} \quad (1.4)$$

ϵ_r est toujours supérieur à l'unité (>1).

1.3.4.2 La constante diélectrique et les pertes diélectriques

Dans un champ électrique alternatif, la polarisation ne suit pas le champ d'une façon instantanée et le retard se traduit par une perte d'énergie. Ainsi, la permittivité relative est alors remplacée par une grandeur complexe appelée « la permittivité relative complexe ». Elle est présentée par l'équation suivante (1.5) :

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - i\epsilon_r'' \quad (1.5)$$

Avec

- La composante réelle ϵ_r' est appelée constante diélectrique.
- La composante imaginaire ϵ_r'' est appelée facteur de perte.

Par conséquent, les propriétés diélectriques présentent deux types d'interactions entre le matériau diélectrique et le champ électrique, à savoir l'absorption de l'énergie électromagnétique sous la forme d'une polarisation à l'intérieur du bois et la dissipation d'une partie de l'énergie sous forme de chaleur. La capacité d'un matériau à absorber l'énergie est exprimée quantitativement par la constante diélectrique (ϵ_r'), et le taux de perte d'énergie dans le matériau est donné par le facteur de perte diélectrique (ϵ_r'').

La figure 1.19 représente schématiquement la dépendance fréquentielle de chacune de ces composantes ϵ_r' et ϵ_r'' .

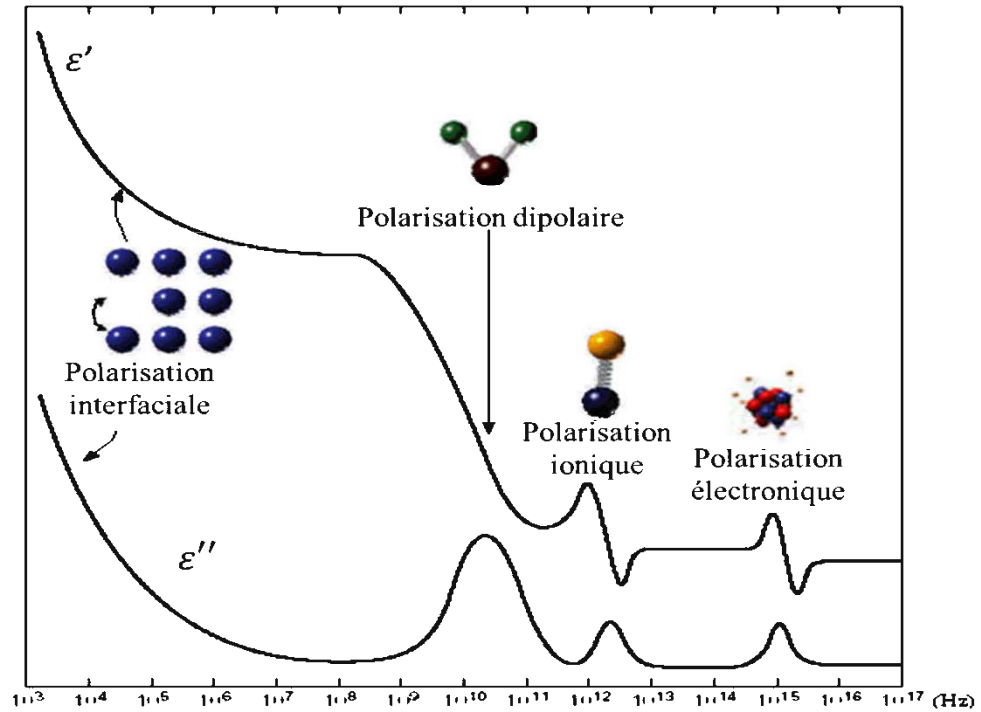


Figure 1.19 : Évolution de la permittivité réelle ε' et imaginaire ε'' en fonction de la fréquence (adapté de Debye 1929)

La notion de pertes diélectriques peut être introduite en utilisant le diagramme de Fresnel (Figure 1.20). Lorsqu'on applique une tension alternative $U = U_0 \cdot e^{i\omega t}$ aux bornes d'un condensateur parfait, le courant est en quadrature avance sur la tension et s'écrit sous la forme suivante (1.6) :

$$I = \omega \varepsilon_r C_0 U_0 \cdot e^{i(\omega t + \frac{\pi}{2})} = i\omega \varepsilon_r C_0 U \quad (1.6)$$

Tenant compte du phénomène des pertes diélectriques qui réduisent le pouvoir du condensateur à emmagasiner les charges électriques et en intégrant l'équation (1.5), on obtient :

$$I = i\omega \varepsilon_r C_0 U = i\omega(\varepsilon_r' - i\varepsilon_r'')C_0 U = \omega \varepsilon_r'' C_0 U + i\omega \varepsilon_r' C_0 U \quad (1.7)$$

Selon cette expression, le circuit est traversé par un courant qui possède deux composantes :

- Une composante I_p appelée courant de perte [A]: $I_p = \omega \varepsilon_r'' C_0 U$
- Une composante I_c appelée courant de charge [A] : $I_c = \omega \varepsilon_r' C_0 U$

Ce diagramme met en évidence le déphasage existant entre ces deux grandeurs.

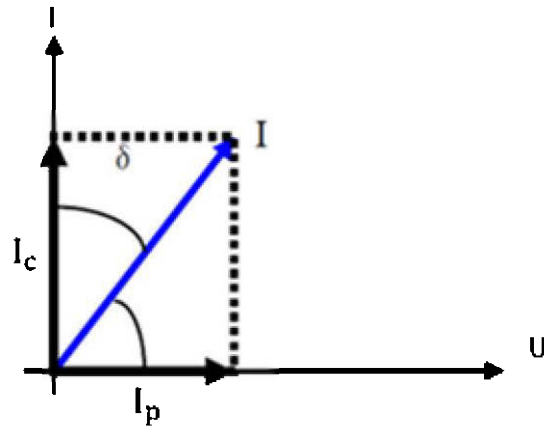


Figure 1.20 : Diagramme de Fresnel

L'angle δ , appelé angle de perte diélectrique, constitue l'écart angulaire entre les courants pour un diélectrique parfait et pour un diélectrique réel (Grossin 2006, Sahraoui 2008). La tangente de l'angle de perte est appelée le facteur de dissipation diélectrique. Elle est donnée par la relation suivante (1.8) :

$$\tan \delta = \frac{|I_p|}{|I_c|} = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (1.8)$$

Ce terme définit le degré d'absorption de l'énergie électrique convertie en chaleur d'un matériau diélectrique à une fréquence donnée. Il représente le ratio de l'énergie dissipée dans le diélectrique sur l'énergie accumulée.

1.3.4.3 La conductivité électrique

La conductivité électrique est une grandeur physique liée aux courants de conduction créés par le mouvement des charges libres. Elle traduit l'aptitude du matériau à laisser ces charges circuler sous l'effet d'un champ électrique. Ce déplacement est accompagné par des pertes d'énergie responsables de l'atténuation des ondes électromagnétiques dans le milieu de propagation (Filali et al. 2006).

La conductivité électrique, notée σ^* , est une grandeur complexe mesurée en Siemens par mètre [S/m]. Elle est donnée par la formule suivante (1.9) :

$$\sigma^* = \sigma' + i\sigma'' \quad (1.9)$$

Avec

- σ' est la partie réelle de la conductivité. Elle représente le transfert d'énergie par migration des charges.
- σ'' est la partie imaginaire de la conductivité. Elle représente la dissipation d'énergie due au déplacement des porteurs de charges.

La conductivité électrique est définie par rapport à la permittivité complexe par la relation (1.10) :

$$\sigma^* = i\omega\epsilon_0\epsilon_r^* \quad (1.10)$$

Par superposition des expressions (1.5), (1.9) et (1.10), on obtient

$$\sigma' = \omega\epsilon_0\epsilon_r'' \quad (1.11)$$

$$\sigma'' = \omega\epsilon_0\epsilon_r' \quad (1.12)$$

Avec $\omega = 2\pi f$: la pulsation

Il est à noter que tout au long de ce travail, ϵ' et ϵ'' désigneront respectivement la constante diélectrique et le facteur de perte. $\tan\delta$ sera nommée la tangente de perte.

1.3.4.4 La puissance dissipée

Au niveau macroscopique, la puissance électromagnétique dissipée P sous forme de chaleur dans un matériau diélectrique est proportionnelle au carré du champ électrique. Elle est calculée selon la formule suivante (1.13) :

$$P = 2\pi f\epsilon_0(\epsilon' \tan \delta)E^2 = 2\pi f\epsilon_0\epsilon''E^2 \quad [\text{W/m}^3] \quad (1.13)$$

f : Fréquence du champ électrique [Hz]

ϵ_0 : Constante diélectrique du vide [$8,84 \times 10^{-12}$ F/m]

$\epsilon' \tan \delta = \epsilon''$: Facteur de perte du matériau

E : intensité du champ électrique dans le matériau [V/m]

1.3.4.5 La profondeur de pénétration

Lorsqu'une onde électromagnétique atteint la surface d'un matériau, une partie de l'onde est réfléchiée tandis qu'une autre partie pénètre dans la matière et se propage à travers le matériau (Figure 1.21). L'énergie de cette onde émise est absorbée

progressivement par le matériau. Cette absorption est caractérisée par la profondeur de pénétration D_p (Meredith 1998, Huang 2009). Ainsi, la puissance transmise par cette onde émise décroît exponentiellement et peut être calculée selon l'équation suivante (1.14) :

$$P_{\text{trans}}(z) = P_{\text{trans}}(z = 0)e^{-2\alpha z} \quad (1.14)$$

$P_{\text{trans}}(z)$: Puissance transmise à travers la surface dans la direction z [W.m^{-2}].

$P_{\text{trans}}(z = 0)$: Puissance juste à l'intérieur de la surface de matériau dans la direction z [W.m^{-2}].

z : Distance parcourue dans la matière depuis la surface [m]

Par conséquent, il y a une atténuation de la pénétration dans le matériau diélectrique. Le facteur d'atténuation α indique le taux d'absorption de la puissance de l'onde au sein du matériau. Il est dépendant de ses propriétés diélectriques et de la fréquence selon la formule suivante (1.15) :

$$\alpha = \frac{2\pi f}{2,998 \times 10^8} * \sqrt{\frac{\epsilon'}{2} \left[\sqrt{(1 + (\tan \delta)^2)} - 1 \right]} \quad [\text{m}^{-1}] \quad (1.15)$$

La profondeur de pénétration D_p est définie comme la profondeur dans le matériau pour laquelle le transfert a été réduit à 37% par rapport à la puissance entrante. Autrement dit, 63% de l'énergie transmise initiale a été déposée sous forme de chaleur, au moment où l'onde atteint cette profondeur.

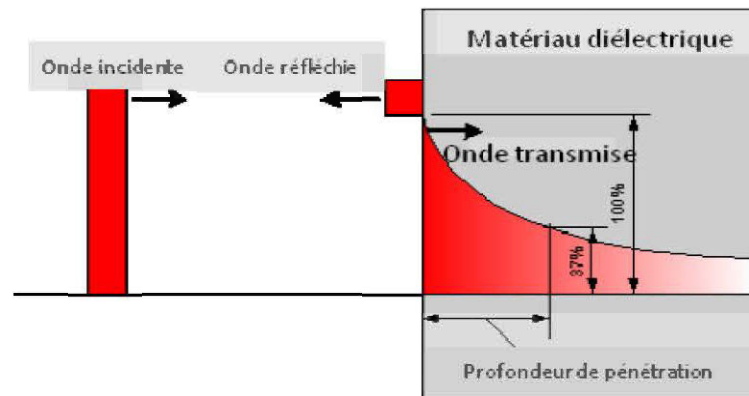


Figure 1.21 : Transit de puissance lorsqu'une onde électromagnétique atteint un matériau diélectrique (Callebaut 2007)

La profondeur de pénétration peut être estimée selon la formule suivante (1.16) :

$$D_p = \frac{1}{2\alpha} \quad (1.16)$$

Pour un matériau à faible pertes diélectriques ($\epsilon''/\epsilon' \ll 1$), le facteur d'atténuation et la profondeur de pénétration peuvent être calculés comme suit (Resh, 2006) :

$$\alpha = \frac{2,998 \times 10^8 \times \sqrt{\epsilon''}}{\pi f \epsilon'} \quad \text{et} \quad D_p = \frac{1}{2} \alpha \quad (1.17)$$

La profondeur de pénétration est un paramètre important pour les applications de séchage du bois par micro-ondes. Elle influe sur le choix de la fréquence de séchage et sur la distribution de la température dans le matériau.

1.3.5 Applications des matériaux diélectriques

Les matériaux diélectriques occupent une place très importante dans le domaine d'ingénierie électrique, particulièrement en électrotechnique. Ils sont largement utilisés dans la construction des câbles de transport et de distribution d'énergie à haute fréquence afin de séparer entre les pièces métalliques portées à des potentiels électriques différents. Par exemple, le polyéthylène est un matériau diélectrique principalement utilisé comme une enveloppe isolante pour les câbles souterrains de distribution à moyenne et haute tension (Huang 2009, Douar 2014). En effet, l'introduction de matériaux diélectriques à faible constante diélectrique permet de réduire la capacité parasite entre les lignes d'interconnexion métalliques (Charrouf 2008).

Cependant, pour certaines applications, on cherche souvent à utiliser des matériaux diélectriques, ayant des valeurs de constante diélectrique élevées, qui sont capables d'emmagasiner le maximum d'énergie électrique dans le volume le plus faible possible tout en dissipant une énergie minimale sous forme de chaleur. Dans ce cas, les diélectriques, en particulier avec de faibles pertes dans la région des GHz, sont de bons candidats pour répondre aux exigences de l'industrie de télécommunication et électronique (par exemple, les condensateurs électriques) (Monnier 2010, Teirikangas et al. 2011).

Bien que les diélectriques aient été adoptés principalement pour les applications électriques et électroniques, une attention particulière a été acquise à ces

matériaux à perte élevée aux applications de chauffage par micro-onde. Cette technologie est basée sur le mécanisme de transfert d'énergie fournie par les micro-ondes aux matériaux à travers des interactions moléculaires avec le champ électromagnétique. Le chauffage par micro-onde a la particularité de produire la chaleur au cœur du matériau contrairement aux procédés de séchage conventionnels, où le matériau est chauffé en premier de la surface extérieure. Le chauffage volumétrique offre plusieurs avantages. Il assure un chauffage rapide et uniforme sur toute l'épaisseur du matériau. Il permet également de réduire le temps et le coût du traitement et d'économiser la consommation d'énergie (Sahin et Ay 2004, Barba et Amore 2012). Dans l'industrie, le chauffage par micro-ondes est effectué soit à une fréquence proche de 915 MHz ou 2450 MHz, dans le but d'éviter toute interférence avec les systèmes de télécommunication.

Le tableau 1.2 montre quelques exemples de constantes diélectriques pour des isolants courants données à une température et fréquence constantes.

Tableau 1.2: Les valeurs des constantes diélectriques de quelques matériaux

Matériaux isolants	Constante diélectrique (20°C et 1KHz)*	Matériaux isolants	Constante diélectrique (25°C et 1MHz) **
Vide	1 (par convention)	Polyéthylène	2,25
Air	1,00059	Polystyrène	2,4
Téflon	2,1	Bois	3
Polyéthylène	2,25	Époxy	3,5 - 4
Polystyrène	2,4	P.V.C	3,2 – 3,6
Papier	3,5	Quartz fondu	3,8
Céramique	15 à 400	Eau	80

*Tiré de Niepce et Haussone (1994)

** Tiré de Pecht et al (1998)

1.4 Facteurs influençant les propriétés diélectriques du bois

Le bois est un matériau diélectrique biologique avec une structure et une composition complexes. Placé dans un champ électrique, ses propriétés diélectriques varient considérablement en fonction de plusieurs facteurs, tels que la fréquence de l'onde électrique et son orientation vis-à-vis des principaux axes d'anisotropie du bois, la teneur en humidité, la température et la masse volumique. Dans ce contexte, plusieurs auteurs ont compilé une grande quantité d'informations sur les propriétés diélectriques du bois. Le tableau 1.3 montre une synthèse sur les propriétés diélectriques du bois rapportées de la littérature sur une plage de teneur en humidité de 0 à 100% mesurées à une fréquence de 915 MHz et une température de 20°C.

Tableau 1.3 : Synthèse sur les propriétés diélectriques du bois

TH* (%)	Torgovnikov 1993		Koubaa et al. 2008		Koubaa et al. 2013**		Kabir et al. 2001***	
	ϵ'	$\tan\delta$	ϵ'	$\tan\delta$	ϵ'	$\tan\delta$	ϵ'	$\tan\delta$
0	1,8	0,025	1,95	0,06	-	-	2,5	0,004
10	2,5	0,1	-	-	-	-	3	0,23
20	3,4	0,16	-	-	0,9	0,48	5	0,18
30	4,7	0,22	-	-	-	-	-	-
40	-	-	10,2	0,18	-	-	9	0,28
60	6,9	0,21	16,2	0,11	7,37	0,15	12	0,25
100	13,1	0,17	25,8	0,09	11,88	0,1	32	0,13

*TH : teneur en humidité

** Fréquence=830 MHz

*** Fréquence=1 GHz (valeurs projetées)

1.4.1 Effet de la fréquence

Le comportement diélectrique du bois diffère fortement selon la gamme de fréquence étudiée. Plusieurs travaux de recherche ont porté sur l'effet de la

fréquence sur les propriétés diélectriques et les résultats montrent que l'augmentation de la fréquence engendre une diminution de la constante diélectrique du bois sec (Norimoto et Yamada 1970, James et al. 1975, Torgovnikov 1993, Kabir et al. 1997, Kabir et al. 2001, Koubaa et al. 2008). Norimoto et Yamada (1970) ont étudié la variation du facteur de perte avec la fréquence dans une gamme de 30 Hz à 1 MHz et ont constaté que ce paramètre qui traduit les pertes électriques augmente avec la fréquence. Ils ont expliqué que ces pertes sont dues aux mouvements des groupements $-CH_2OH$ dans la région désordonnée de la matrice ligneuse (Norimoto et Yamada 1970). Ces résultats confirment les travaux menés par Torgovnikov (1993) sur le bois sec. Ce dernier montre qu'une large dispersion de la constante diélectrique se produit dans le domaine des basses fréquences (inférieur à 1 MHz). Avec l'augmentation de la fréquence, ϵ' diminue de façon monotone. Torgovnikov (1993) a indiqué également que le facteur de perte augmente progressivement de 0,007 à 0,34 pour atteindre un maximum à une fréquence de 10 MHz. La même tendance a été observée pour la variation de la tangente de perte en fonction de la fréquence.

Les travaux de Kabir et al. (2001) effectués sur le bois d'hévéa à l'état anhydre pour des fréquences de 1 à 18 GHz montrent une forte diminution du facteur de perte avec une fréquence croissante jusqu'à environ 3 GHz. Ceci a été expliqué par le phénomène de perte conductrice qui domine les basses fréquences. Cette diminution est suivie d'une légère augmentation pour atteindre un pic à 10 GHz et elle décroît de nouveau.

D'un autre côté, une étude réalisée par Torgovnikov (1993) sur le bois humide, dans une gamme de fréquence de 100 Hz à 100 GHz, a montré une diminution rapide de la constante diélectrique et du facteur de perte lorsque la fréquence augmente. Ces résultats viennent appuyer ceux trouvés par James et al. (1975) qui ont étudié l'effet de la fréquence du bois de Sapin Douglas sur une plage de fréquence allant de 20 Hz jusqu'à 50 MHz. James et al. (1975) mentionnent que l'augmentation de la constante diélectrique à basses fréquences est attribuée aux phénomènes de polarisation dipolaire et interfaciale. À des fréquences plus

élevées, la polarisation interfaciale devient négligeable et la polarisation dipolaire est prédominante.

En général, la profondeur de pénétration diminue avec l'augmentation de la fréquence. Dans la région des micro-ondes, la profondeur de pénétration devient très faible, en particulier lorsque le bois est très humide (Resch 2006, Koubaa et al. 2008).

1.4.2 Effet de la teneur en humidité

Le bois est un matériau poreux, hygroscopique. Il est évident que la teneur en humidité influe fortement le comportement diélectrique du bois. Dans ce contexte, plusieurs études ont été effectuées pour affirmer cette hypothèse. Plusieurs auteurs se sont mis d'accord que la constante diélectrique et le facteur de perte de toutes les espèces de bois étudiées augmentent considérablement avec la teneur en humidité à partir de l'état anhydre jusqu'au point de saturation des fibres (PSF) (Peyskens et al. 1984, Kabir et al. 1997). Au début, l'augmentation de la constante diélectrique n'est pas significative en raison de la haute résistance des liaisons hydrogène entre les molécules d'eau et le bois. Le processus d'humidification conduit à la pénétration des molécules d'eau entre les molécules de cellulose et à l'affaiblissement des liaisons transversales, ce qui entraîne une mobilité accrue des dipôles.

Pour une meilleure compréhension de l'effet de la teneur en humidité sur les propriétés diélectriques du bois, Torgovnikov (1993) a proposé d'analyser cette influence dans quatre régions de teneurs en humidité à savoir de 0 à 5% (eau monomoléculaire), de 5 à 23% (eau polymoléculaire), de 23% jusqu'au point de saturation des fibres (eau capillaire condensée), et supérieure à 30% (eau libre). En effet, le comportement diélectrique du bois diffère selon la nature de l'interaction de ces types d'eau avec le matériau bois. À l'état anhydre, les macromolécules de cellulose du bois sont mutuellement liées par des forces de valence secondaires qui empêchent les dipôles des molécules de se déplacer sous l'influence du champ électromagnétique. Avec une augmentation de la teneur en humidité du bois de 1 à 5%, les valeurs de la constante diélectrique et du facteur

de perte augmentent légèrement. L'eau monomoléculaire possède les liaisons les plus stables avec la substance de la paroi cellulaire. Sous l'action d'un champ électrique alternatif, les molécules présentent une mobilité limitée, tandis que l'eau polymoléculaire possède une plus grande mobilité et des propriétés diélectriques plus élevées, et par conséquent, elle influe largement le comportement diélectrique du bois humide. Lorsque la teneur en humidité augmente de 5 à 23%, soit dans la zone d'adsorption, les valeurs de la constante diélectrique et du facteur de perte augmentent considérablement. La présence de l'eau capillaire condensée (23% au PSF) engendre une augmentation des propriétés diélectriques du bois (Torgovnikov 1993).

1.4.3 Effet de l'anisotropie du bois

L'anisotropie du bois influe considérablement sur son comportement diélectrique. En effet, les propriétés diélectriques sont distinguées dans les trois directions à savoir, les directions longitudinale, radiale et tangentielle. Les auteurs, qui ont traité l'effet de l'orientation de la fibre par rapport à la direction du champ électrique, ont mentionné que les propriétés diélectriques du bois dans la direction longitudinale (parallèlement aux fibres) sont plus élevées que celles dans la direction transversale indépendamment de l'essence de bois. Selon Peyskens et al. (1984), les valeurs du facteur de perte mesurées à des teneurs en humidité entre 32 et 36% dans la direction longitudinale sont de 2 à 2,5 fois plus élevées que celles dans la direction transversale pour le pin, et de 2,5 à 3 fois plus élevées pour la pruche et l'épinette.

Norimoto et al. (1978) ont suggéré que les différences des propriétés diélectriques entre les trois directions principales sont attribuées à l'arrangement de la paroi cellulaire, à la structure moléculaire spécifique de la paroi de la cellule et à l'anisotropie des substances de la paroi cellulaire. Les valeurs élevées de la constante diélectrique dans la direction longitudinale ont été expliquée par Norimoto et Yamada (1970) par le fait que la probabilité de transition du dipôle d'un site à un site adjacent est considérablement supérieure lorsque le champ est appliqué dans la direction longitudinale que dans la direction transversale. Les

constituants chimiques du bois peuvent également contribuer à la différence des propriétés diélectriques. Une étude réalisée par Norimoto et Yamada (1972) a révélé que les propriétés diélectriques dans la direction longitudinale sont fortement influencées par la cellulose et le mannane. Toutefois, le comportement diélectrique dans la direction transversale dépend de la lignine qui possède des propriétés diélectriques plus faibles que celles de la cellulose. D'autre part, des études antérieures ont considéré que les groupes hydroxyles de la cellulose devraient avoir une plus grande liberté de rotation dans la direction longitudinale (Lin 1967).

1.5 Facteurs influençant les propriétés diélectriques des CBP

La combinaison du polymère et de la matière lignocellulosique engendre de nouvelles propriétés diélectriques du composite. Cependant, il y a très peu d'information disponible en ce qui concerne la caractérisation des propriétés diélectriques des CBP. Le comportement diélectrique de ces matériaux est influencé par plusieurs facteurs tels que la fréquence, la nature de la matrice, l'essence des fibres de bois et certainement la concentration massique des renforts dispersés dans la matrice polymérique.

Les propriétés diélectriques dépendent fortement de la fréquence du champ électrique appliqué. Des études, effectuées sur une gamme de fréquence de 0,01Hz à 100 MHz ont montré que la constante diélectrique et le facteur de perte diminuent avec une fréquence croissante (Markiewicz et al. 2012).

Les propriétés diélectriques des CBP varient également en fonction de la nature de la matrice. En comparant les résultats obtenus sur des échantillons contenant la même quantité de fibres de bois, mais avec différentes matrices, les différences dans les valeurs de ϵ' , ϵ'' et $\tan\delta$ sont plus importantes dans la gamme des basses fréquences. Nottingher et al. (2010) ont constaté que les échantillons avec une matrice de polypropylène ont des propriétés supérieures que celles avec une matrice de polyéthylène. Ceci est probablement dû à une "compacité" supérieure dans le cas d'une matrice de polypropylène avec une interaction plus efficace entre les molécules de la matrice et les fibres de bois.

Le renforcement des fibres de bois influe significativement sur les propriétés diélectriques des CBP (Notingher et al. 2010, Dhal et Mishra 2012, Markiewicz et al. 2012). Markiewicz et al. (2012) ont évalué l'effet de la variation de la proportion des renforts organiques sur les propriétés diélectriques. Il s'est avéré que la constante diélectrique augmente avec la teneur en fibres de bois. Ce résultat a été expliqué par la présence des groupes polaires hygroscopiques de la cellulose.

1.6 Originalité du travail

À la lumière de cette revue de la littérature, nous constatons un manque d'informations concernant les propriétés diélectriques du bois et des CBP. D'où l'originalité de cette étude. La caractérisation des propriétés diélectriques du bois est importante à la fois pour le développement des outils à des fins de diagnostic et pour déterminer les paramètres du traitement thermique du bois (chauffage, séchage, etc.). Par la présente étude, nous avons voulu étudier les propriétés diélectriques du bois en fonction de ses caractéristiques intrinsèques dans la gamme des micro-ondes. Nous établirons des modèles statistiques caractérisant les propriétés diélectriques du bois en fonction de sa masse volumique et sa teneur en humidité. Ces modèles pourraient nous permettre de développer des outils non destructifs sur la base des propriétés diélectriques pour la mesure des différentes propriétés intrinsèques du bois.

Malgré les développements technologiques et l'avancement des connaissances concernant le rôle des propriétés intrinsèques des fibres, de l'adhésion matrice-fibres et des mécanismes de rupture, l'utilisation des composites bois-polymère reste limitée à des applications non-structurales et généralement peu lucratives. Ainsi, nous avons entrepris cette étude pour caractériser les propriétés diélectriques des CBP en fonction de plusieurs facteurs. En effet, très peu d'études ont traité le comportement diélectrique des CBP. La caractérisation avancée des composites permettrait de mieux comprendre les interactions polymères-fibres et d'évaluer le potentiel des composites pour de nouvelles applications à haute valeur ajoutée dont le domaine d'emballage électronique.

CHAPITRE 2

MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Objectifs

L'objectif général de cette étude est de caractériser les propriétés diélectriques du bois et des composites bois-polymère. Plus spécifiquement, les objectifs sont :

- Étudier la variation des propriétés diélectriques du bois en fonction de la fréquence dans la gamme 1 MHz – 3 GHz, de la température, de la teneur en humidité et des caractéristiques intrinsèques du bois (essence, direction, aubier et bois de cœur, bois initial et bois final).
- Étudier la variation des propriétés diélectriques des composites à base d'une matrice en polyéthylène haute densité renforcée par des fibres de bois, en fonction de la fréquence, de la température et du pourcentage des fibres de bois issues de différentes essences.

2.2 Les hypothèses de la recherche

- La fréquence des ondes électromagnétiques, la température et la teneur en humidité du matériau sont des paramètres qui influent les propriétés diélectriques du bois et des CBP.
- Les propriétés diélectriques du bois varient selon la direction du bois considérée (longitudinale, radiale et tangentielle).
- L'addition des fibres de bois dans la matrice thermoplastique agit sur les propriétés diélectriques du composite.
- La variation des propriétés diélectriques des diverses essences de bois et des composites issus de fibres différentes s'explique par les différences des caractéristiques chimiques entre les échantillons.

2.3 Méthodologie

Cette partie présente la description des matériaux utilisés dans cette étude ainsi que les techniques expérimentales employées. Ce diagramme présente le protocole expérimental suivi lors de ce travail.

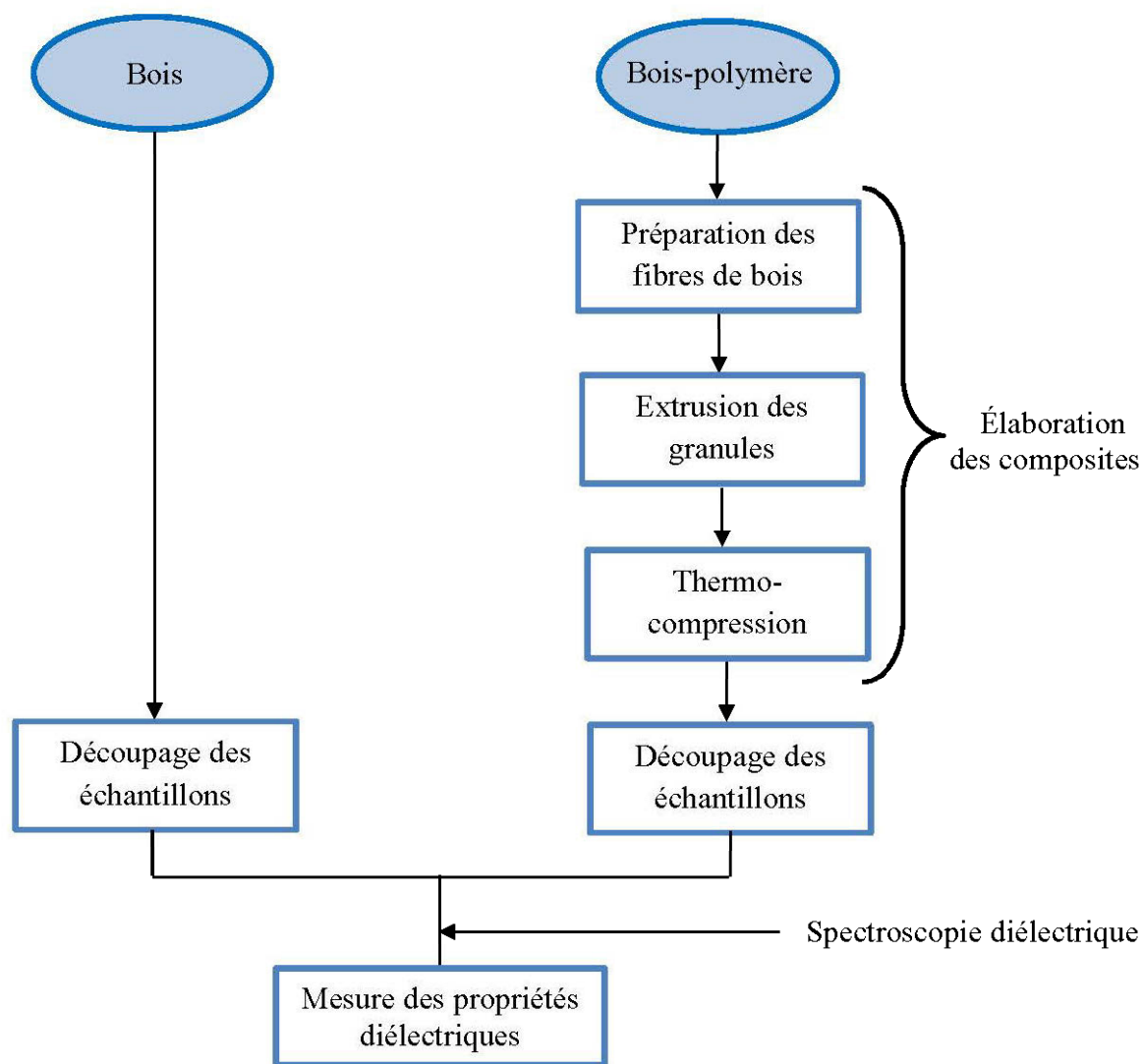


Figure 2.1: Protocole expérimental suivi

2.3.1 Préparation des échantillons de bois

Les propriétés diélectriques ont été mesurées sur quatre essences du bois ; le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb), l'épinette blanche (*Picea glauca*), le mélèze laricin (*Larix Laricina*) et le chêne rouge (*Quercus rubra*). Tenant compte de l'anisotropie du bois, les échantillons ont été coupés dans les trois directions à savoir la direction longitudinale, radiale et tangentielle. Ensuite, les échantillons du bois de cœur et de l'aubier ont été prélevés à partir des coupes longitudinales et radiales obtenues. Les échantillons du bois initial et du bois final ont été coupés à partir des coupes radiales du bois de mélèze laricin et de chêne rouge. Le choix de ces deux essences est justifié par la différence remarquable entre leurs zones du bois initial et du bois final (Figure 2.2).

Finalement, tous les échantillons ont été découpés en forme circulaire de 9,5 mm de diamètre et de 1 mm d'épaisseur pour la mesure des propriétés diélectriques.

Nous devons prendre en compte que si les propriétés sont décrites par exemple dans la direction radiale (R) du grain, le vecteur $\vec{E}$ est orienté parallèlement à cet axe et la direction de propagation de l'onde sera contenue dans le plan longitudinal-tangentiel. Dans le cas où le vecteur $\vec{E}$ est orienté parallèlement à l'axe tangentiel (T), la direction de propagation de l'onde s'effectuera dans le plan longitudinal-radial. De même, les propriétés diélectriques du bois seront mesurées dans la direction longitudinale, si le vecteur $\vec{E}$ est parallèle à l'axe longitudinal (L), et la direction de propagation de l'onde est contenue dans le plan radial-tangentiel.

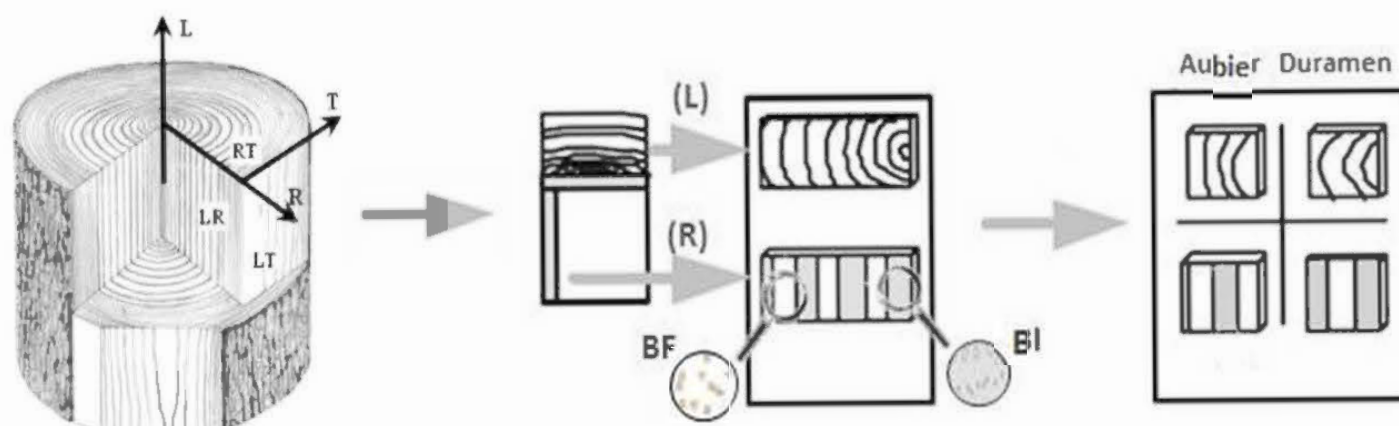


Figure 2.2: Découpage des échantillons du bois

Le tableau 2.1 résume les conditions expérimentales appliquées pour chaque essence du bois. Le domaine de fréquence pour tous les échantillons du bois est compris entre 1 MHz et 3 GHz.

Tableau 2.1 : Récapitulatif des conditions expérimentales des échantillons du bois

Essence du bois	Direction	Température	Zone de coupe
Pin gris	• Longitudinale	[-20 et 100°C]	Aubier/ Duramen
	• Radiale		
	• Tangentielle		
Épinette blanche	• Longitudinale	[-20 et 100°C]	Aubier/ Duramen
	• Radiale		
	• Tangentielle		
Mélèze laricin	• Longitudinale	23°C	Duramen
	• Radiale		Bois initial / Bois final
Chêne rouge	• Longitudinale	23°C	Duramen
	• Radiale		Bois initial / Bois final

2.3.2 *Élaboration des échantillons de composite bois-polymère*

2.3.2.1 Matières plastiques utilisées

La matrice thermoplastique utilisée est le polyéthylène haute densité (PEHD) DOW DMDA-8007 NT 7 de masse volumique de l'ordre de 965 kg/m³. Sa température de ramollissement est égale à 133°C. L'agent couplant utilisé est le polyéthylène maléaté (MAPE). Il est fourni par la société canadienne Fusabond E226 enregistré sous la franchise de la compagnie Dupont. Il est sous forme de granules de masse volumique égale à 930 kg/m³. Sa température de ramollissement est égale à 120°C. La quantité de l'agent couplant utilisée est fixée

à 3% de la masse totale du composite pour améliorer l'homogénéité du mélange en assurant une meilleure distribution des fibres dans la matrice polymérique.

2.3.2.2 Préparation des fibres de bois

Dans cette étude, les composites ont été renforcés par des fibres de bois issues de différentes essences : le peuplier faux-tremble, le pin gris, le bouleau et l'écorce du peuplier faux- tremble. Ces fibres ont subi un prétraitement spécifique avant d'être incorporées au composite. La première étape est le broyage des particules de bois qui consiste à réduire mécaniquement la taille des fibres dans un broyeur à couteaux rotatifs.



Figure 2.3: Broyeur à couteau rotatifs de type Thomas-Willey, modèle 4.

L'étape suivante est le tamisage permettant d'obtenir des charges de faibles granulométries allant de 300 μm jusqu'à 150 μm (Figure 2.4). Enfin, les fibres de bois sont séchées au four à une température de 103°C pendant 24h afin de minimiser le dégagement d'eau et la formation des bulles ou de défauts dans le produit final.

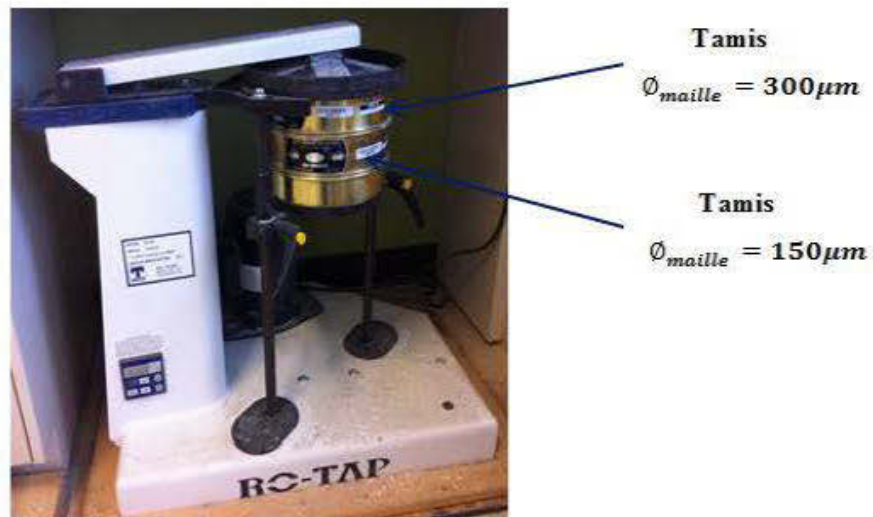


Figure 2.4: Présentation du tamiseur (M.S Tyler)

2.3.2.3 Mise en œuvre des composites

Les CBP ont été préparés en deux étapes : un mélange de granulation par extrusion suivi d'un moulage par compression.

- Granulation

Afin de réaliser le mélange des fibres de bois et de polymère, on a utilisé une extrudeuse conique à double vis représentée sur la figure 2.5.



Figure 2.5: Extrudeuse double vis (Thermo Scientific HAAKE PolyLab OS Rheodrive 7 avec Rheomex OS Module extrusion)

Les paramètres de l'extrudeuse utilisés sont représentés sur le tableau 2.2. La vitesse de la vis varie selon la concentration des fibres dans le mélange et de la nature de chaque essence de fibres. Le choix du profil de température dans les différentes zones de la vis a été fait de façon à minimiser la dégradation des fibres de bois tout en assurant une bonne fluidité au composite.

À la sortie de la filière, le profilé est trempé dans un bain d'eau puis passe par un ventilateur pour le séchage. Ensuite, on procède à la granulation de l'extrudât de taille standard (maximum 3 mm) à l'aide d'un broyeur à disque rotatif.

Tableau 2.2: Paramètres d'extrusion

Longueur de vis	340 mm
Diamètre de la filière	3 mm
Vitesse de rotation de la vis	80-100 tr/min
Température de la vis	155°C
Vitesse de rotation des disques	180 tr/min

- ◆ Moulage par compression

Les granules obtenues par extrusion sont moulées par compression en plaque sur une presse hydraulique préchauffée de type Carver Autofour 3012-NE, HC selon la norme ASTM D4703-03 3. Pour fabriquer les plaques, le moule a été préchauffé à 195°C. Ensuite, le matériau est placé dans l'empreinte de la matrice et comprimé jusqu'à la fermeture du moule. On procède à un préchauffage de la matière pendant 5 min en appliquant une pression de contact. Une force constante de 7000 lbs a été ensuite appliquée pendant 5 min. La vitesse de refroidissement est maintenue 15°C/min.



Figure 2.6: Presse à compression (adapté de CTMP/2015/F.Therrien)

À partir des films de composite obtenus par moulage, les échantillons sont découpés en forme de disque de 9,5 mm de diamètre et 1mm d'épaisseur pour effectuer les mesures diélectriques.

Au cours de cette étude, nous avons élaboré des échantillons en PEHD pur et des composites bois-polymère.

2.3.3 Mesure de l'humidité et de la masse volumique du bois

2.3.3.1 Mesure de la teneur en humidité

Pour varier la teneur en humidité de l'échantillon du bois, on procède aux étapes suivantes :

- On immerge l'échantillon dans l'eau pendant 24h puis on pèse notre échantillon et on mesure ses propriétés diélectriques.
- On pèse de nouveau l'échantillon et on refait la mesure diélectrique.
- On répète cette étape (étape 2) jusqu'à ce que le poids de l'échantillon devienne constant.

- On sèche l'échantillon dans une étuve pendant 8h à une température de 80°C afin de ne pas détruire les extractibles.
- On mesure sa masse anhydre pour déterminer finalement la teneur en humidité des différentes mesures de l'échantillon à partir de la formule suivante (Eq.18) :

$$TH(\%) = \frac{M_{eau}}{M_s} \times 100 = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad (2.1)$$

Avec M_h Masse humide [g]

M_s Masse anhydre [g]

M_{eau} Masse totale d'eau contenue dans le bois (eau libre + liée) [g]

TH Teneur en humidité [%]

2.3.3.2 Mesure de la masse volumique

La différence de la masse volumique du bois qui existe à la fois entre et au sein des essences, peut avoir une influence importante sur les propriétés diélectriques. C'est la raison pour laquelle on mesure la masse volumique de chaque échantillon. La masse volumique est mesurée à l'aide d'un densitomètre à rayons X (Figure 2.7). Les échantillons de bois coupés sous forme de disque sont collés sur des morceaux de bois pour que le rayon X puisse traverser l'échantillon afin d'obtenir une valeur moyenne de la masse volumique. Les dimensions initiales ainsi que la masse initiale de chaque échantillon doivent être déterminées avant chaque mesure.

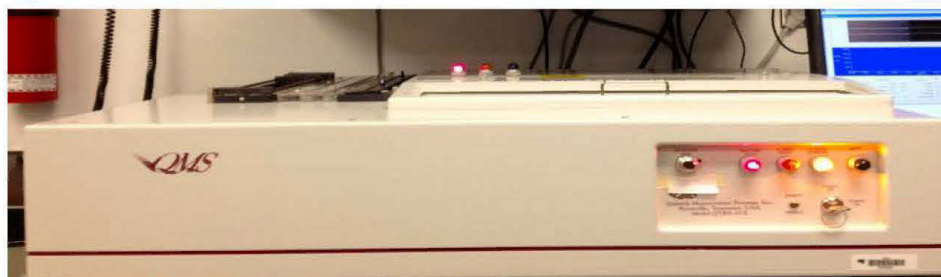


Figure 2.7: Densitomètre à Rayons X (Quintek Measurements System [QMS])

2.3.3.3 Mesure des propriétés chimiques du bois

La cellulose est la composante structurelle du bois et sa teneur reflète le potentiel de renforcement pour les CBP. Migneault et al. (2014) ont déterminé le taux de cellulose (tableau 2.3) par la méthode de l'acide nitrique suivant l'approche de Browning (1967). À partir de ces données, nous avons calculé les teneurs en cellulose pour chaque composite renforcé par différents pourcentages de fibres de bois. Le tableau 2.4 présente les pourcentages de chaque composant dans les mélanges préparés pour une essence de bois ainsi que sa teneur en cellulose.

Tableau 2.3 : Teneur en cellulose des fibres de bois

Essence de la fibre	Teneur en cellulose (%)
Pin gris	52,0
Peuplier faux-tremble	50,7
Bouleau blanc	47,3
Écorce du peuplier faux-tremble	32,0

Tableau 2.4 : Tableau récapitulatif des pourcentages des composants et de la teneur en cellulose dans chaque mélange

Numéro de mélange	Bois	Teneur en fibres (%)	Teneur en PEHD (%)	Teneur en MAPE (%)	Teneur en cellulose (%)
1	-	0	100	0	0,00
2	Pin gris	40	57	3	20,80
3		50	47		26,00
4		60	37		31,20
5	Bouleau	40	57	3	18,92
6		50	47		23,65
7		60	37		28,38
5	Peuplier	40	57	3	20,28
6	Faux-	50	47		25,35
7	tremble	60	37		30,42
11	Écorce de	40	57	3	12,80
12	Peuplier faux-	50	47		16,00
13	tremble	60	37		19,20

2.3.4 Mesure des propriétés diélectriques

2.3.4.1 Principe de la méthode de spectroscopie diélectrique

Cette technique consiste à placer un diélectrique entre deux électrodes, à appliquer une tension sinusoïdale de fréquence fixe aux bornes des deux électrodes et à mesurer l'impédance résultante et le déphasage du courant induit. La configuration est celle d'un condensateur plan ayant deux électrodes cylindriques concentriques de même diamètre, de surface S , d'épaisseur t et une distance inter-électrodes d tel que représenté sur la figure 2.8.



Figure 2.8 : Représentation de la configuration des deux électrodes (adapté de <http://www.novocontrol.de>)

La tension électrique $u(t)$ appliquée sur le matériau diélectrique est de faible amplitude U_1 et de pulsation égale à $2\pi f$ (2.1).

$$u(t) = \text{Re}(U^* \exp(i\omega t)) \quad (2.1)$$

Avec $U^* = U_1$

Cette tension induit un courant $i(t)$ de même pulsation ω dans le matériau. Celui-ci n'étant pas un diélectrique parfait (purement capacitif), il existe un déphasage de $\varphi \neq \frac{\pi}{2}$ entre $u(t)$ et $i(t)$ (Figure 2.9). Ainsi, le courant est donné par la formule suivante (2.2) :

$$i(t) = \text{Re}(I^* \exp(i\omega t)) \quad (2.2)$$

Avec $I^* = I_1 \exp(-i\varphi)$

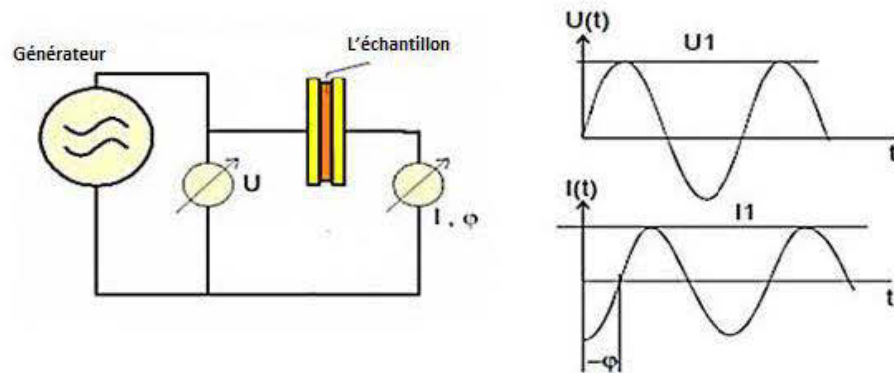


Figure 2.9 : Schéma du principe de mesure de spectroscopie diélectrique

Le rapport des amplitudes tension/courant définit le module de l'impédance série $|Z^*(\omega)|$; le déphasage entre la tension et le courant complète l'information pour donner accès aux parties réelle et imaginaire de l'impédance complexe Z^* . L'impédance complexe est alors donnée par l'expression suivante (2.3):

$$Z^*(\omega) = \frac{U^*(\omega)}{I^*(\omega)} = \frac{U_1}{I_1} \exp(i\varphi) \quad (2.3)$$

À partir de $Z^*(\omega)$, on peut déduire :

- la capacité complexe $C^*(\omega)$
- la permittivité complexe $\varepsilon^*(\omega)$ de l'échantillon.

La capacité complexe de la zone d'échantillonnage est calculée par l'équation suivante (2.4) :

$$C^* = \frac{1}{i\omega Z^*(\omega)} \quad (2.4)$$

La permittivité diélectrique complexe $\varepsilon^*(\omega)$ du diélectrique étudié s'écrit donc :

$$\varepsilon^*(\omega) = \frac{C^*}{C_0} \quad (2.5)$$

Avec C_0 la capacité d'un condensateur plan dans le vide : $C_0 = \frac{\varepsilon_0 S}{e}$

Où S et e sont la surface et l'épaisseur de l'échantillon, respectivement.

2.3.4.2 Précision des mesures

Dans le cadre de ce projet, il est généralement impossible d'obtenir des mesures aux mêmes conditions expérimentales. À titre d'exemple, il est impossible de mesurer

les propriétés diélectriques d'échantillons de bois à la même teneur en humidité. Ainsi, un échantillonnage préliminaire nous a permis de prédire le nombre d'échantillons à mesurer pour chaque essai. Nous avons mesuré trois échantillons. En ce qui concerne les propriétés diélectriques, nous avons trouvé des courbes de tendances de coefficients de corrélation élevés. Nous avons utilisé les équations de ces courbes de tendances pour estimer les moyennes et les écart-types à des teneurs en humidité constantes (Tableau 2.5). En général les écart-types sont inférieurs à 10% de la moyenne de la constante diélectrique ce qui est indicatif de la bonne précision des mesures obtenues

Tableau 2.5 : Exemples des moyennes et des écarts types des mesures de la constante diélectrique du bois de chêne rouge et de pin gris pour différentes teneurs en humidité montrant la précision des données expérimentales.

Teneur en humidité (%)	Moyenne $\pm$ Écart type de ε^1	
	Chêne rouge	Pin Gris
10	2,06 $\pm$ 0,24	2,08 $\pm$ 0,16
20	2,85 $\pm$ 0,16	3,32 $\pm$ 0,16
30	3,64 $\pm$ 0,08	4,56 $\pm$ 0,18
40	4,42 $\pm$ 0,10	5,80 $\pm$ 0,27
50	5,21 $\pm$ 0,20	7,05 $\pm$ 0,35
60	6,00 $\pm$ 0,30	8,29 $\pm$ 0,43
70	6,78 $\pm$ 0,40	9,53 $\pm$ 0,51

¹ Les moyennes et écart-types sont estimés à partir des équations des courbes des tendances

2.3.4.3 Dispositif expérimental

Les mesures sont effectuées avec un spectromètre diélectrique à large bande BDS (Broadband Dielectric Converter) fourni par Novocontrol GmbH, Germany.

Le dispositif expérimental est associé à un analyseur d'impédance Agilent E4991 qui fonctionne sur une gamme de fréquence entre 1 MHz et 3GHz (Figure 2.10). Il comprend également une cellule d'échantillonnage dans laquelle l'échantillon est inséré entre deux électrodes. La régulation en température est assurée par le système Quatro. Cet appareil permet des mesures suivant des isothermes allant de -160°C à 250°C . L'ensemble du système est contrôlé par un PC avec les logiciels WinDETA et WinFit qui permettent l'exécution des données du test et l'identification des différents paramètres. Ils assurent le traitement des résultats obtenus en fixant la fréquence et en variant la température ou par la réalisation des spectres isothermes en fixant la température et en variant la fréquence.

La mesure diélectrique nous permet d'accéder à plusieurs propriétés électriques diélectriques notamment ; la constante diélectrique ϵ' , le facteur de perte ϵ'' , la tangente de perte $\tan\delta$, l'angle de perte δ , le facteur d'atténuation α , la profondeur de pénétration D_p , la conductivité électrique σ , la résistivité électrique ρ , etc.

2.3.5 Analyse statistique des résultats

L'analyse statistique des données permet d'estimer des paramètres de distribution (moyenne, variance, proportion, etc.) et de vérifier la validité des hypothèses. Dans notre travail, nous avons procédé à une analyse de régression multiple effectuée à l'aide du logiciel SPSS. Le modèle de régression multiple consiste à prédire la variance d'un phénomène (variable dépendante) à l'aide d'une combinaison d'au moins deux facteurs explicatifs (variables indépendantes).

Nous avons utilisé cette approche pour décrire quantitativement la variation de la constante diélectrique en fonction de différentes variables indépendantes selon des modèles linéaires. Les variables indépendantes sont la teneur en humidité et la masse volumique. Le niveau de signification est de 5%.



Figure 2.10 : Spectromètre diélectrique

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Nous présenterons dans ce chapitre les résultats obtenus après avoir réalisé les différentes mesures dans la partie expérimentale. Les résultats permettront d'étudier les propriétés diélectriques du bois et des composites bois-polymère afin d'évaluer l'influence de différents paramètres tels que la fréquence, la teneur en humidité et la température. Dans une première partie, nous traiterons les données relatives du bois puis nous aborderons dans une seconde partie la caractérisation des propriétés des composites bois-polymère.

3.1 Caractérisation des propriétés diélectriques du bois

L'étude présentée dans cette partie fournit des données sur les propriétés diélectriques du bois en fonction de différents facteurs notamment la teneur en humidité, la fréquence, la température, la masse volumique et la direction du grain par rapport à la direction du champ électrique. Les espèces étudiées sont le pin gris, l'épinette blanche, le mélèze laricin et le chêne rouge. Les mesures ont été prises à des fréquences allant de 1MHz à 3 GHz. Dans cette plage de fréquence, nous avons effectué des mesures pour différentes teneurs en humidité du bois à partir de l'état sec jusqu'à la saturation. Nous détaillerons dans cette partie les résultats du pin gris et les graphiques de l'épinette blanche seront présentés en annexe A (A.1 à A.9).

3.1.1 Effet de la teneur en humidité

La teneur en humidité est sans doute un facteur influant le comportement diélectrique du bois dans le domaine de fréquence considéré. Les figures 3.1 et 3.2 illustrent les variations de ϵ' et ϵ'' du pin gris en fonction de la teneur en humidité, mesurées pour différentes fréquences et à une température ambiante (23°C). Les

résultats obtenus montrent que les valeurs de la constante diélectrique et du facteur de perte augmentent progressivement avec la teneur en humidité. L'augmentation de la teneur en humidité, conduit à l'augmentation de la quantité d'eau dans le bois. Étant donné que la constante diélectrique et le facteur de perte de l'eau sont plusieurs fois supérieurs à ceux du bois, une tendance à l'augmentation des propriétés diélectriques du bois avec la teneur en humidité est attendue. De ce fait, l'hypothèse qui proposait que les molécules d'eau contiennent des groupements polaires responsables de l'augmentation des propriétés diélectriques est vérifiée. Ces mêmes résultats ont été également rapportés par Kabir et al. (1997) et Koubaa et al. (2008). Au-dessus du point de saturation des fibres, on remarque une augmentation abrupte de la constante diélectrique. La même tendance est observée pour les valeurs du facteur de perte. À ces teneurs en humidité, les molécules d'eau libre interagissent avec le champ électrique indépendamment de la paroi cellulaire et de l'eau liée. Par conséquent, les variations des propriétés diélectriques à des teneurs en humidité supérieures à 30% sont déterminées principalement par les propriétés diélectriques de l'eau libre et de son volume relatif dans le bois. Une étude menée par Torgovnikov (1993) a révélé que les mesures des propriétés diélectriques des extraits des arbres fraîchement abattus, à ces teneurs en humidité et à une fréquence de 915 MHz, sont similaires à celles de l'eau pure.

La figure 3.3 illustre l'évolution de la tangente de perte du pin gris en fonction de la teneur en humidité pour différentes fréquences. Les valeurs de $\tan\delta$ augmentent considérablement avec la teneur en humidité jusqu'à un maximum puis commence à décroître. Lorsque la fréquence diminue, la valeur maximale de la tangente de perte est décalée vers des teneurs en humidité plus élevées. En effet, la position du maximum à une fréquence de 39 MHz a lieu pour une humidité d'environ 120%, tandis que pour une fréquence de 915 MHz, elle se produit à 60% d'humidité.

D'autre part, les figures 3.1 à 3.3 montrent que plus la fréquence est faible, plus les propriétés diélectriques sont élevées. A titre d'exemple, la pente de la courbe du facteur de perte à une fréquence de 915 MHz est moins importante que celle obtenue à une fréquence de 27,12 MHz.

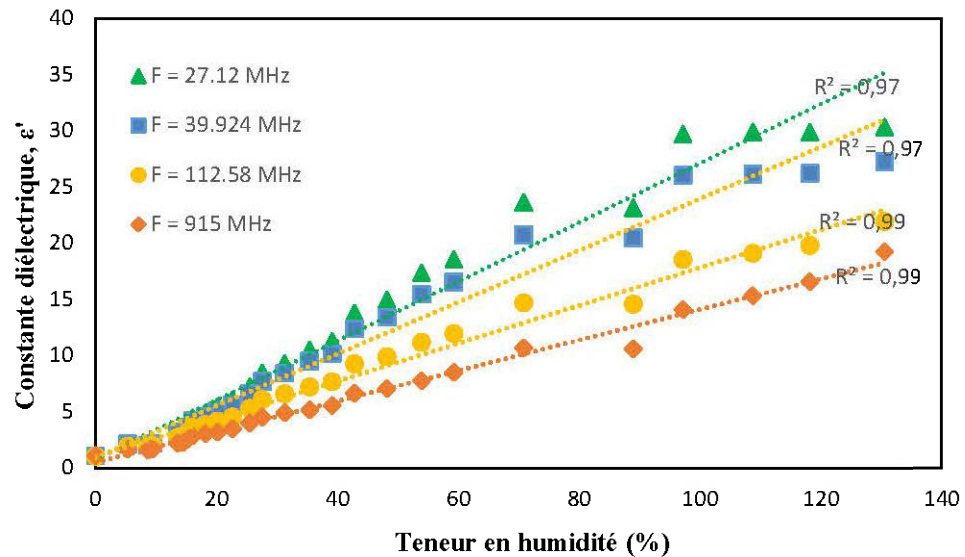


Figure 3.1 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') du pin gris en fonction de la teneur en humidité mesurée à différentes fréquences.

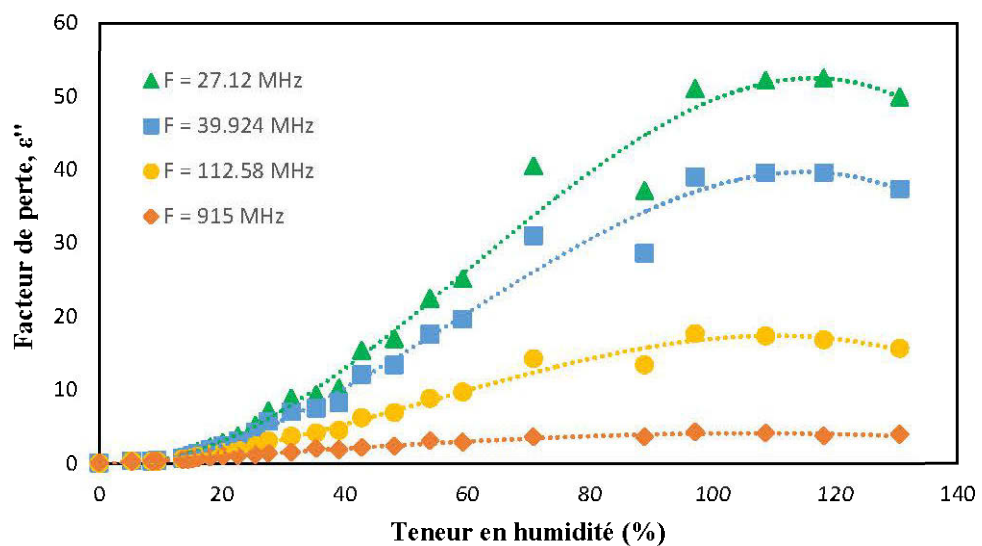


Figure 3.2 : Variation du facteur de perte (ϵ'') du pin gris en fonction de la teneur en humidité mesurée à différentes fréquences.

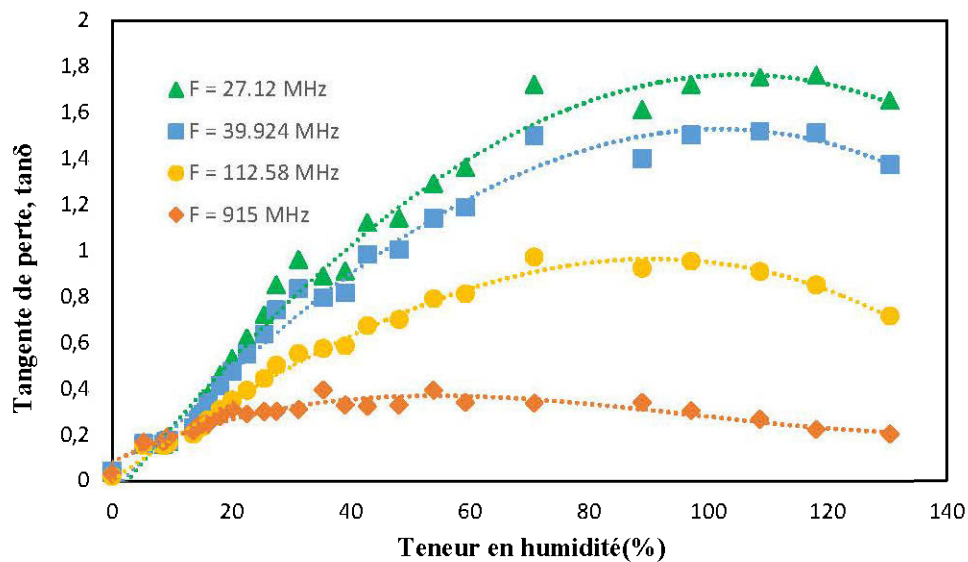


Figure 3.3 : Variation de la tangente de perte ($\tan\delta$) du pin gris en fonction de la teneur en humidité mesurée à différentes fréquences.

Pour mieux analyser le comportement diélectrique du bois au-dessous du PSF, les courbes de variation des propriétés diélectriques du pin gris sur une plage de teneur en humidité allant de 0% jusqu'à 35% sont présentées sur les figures 3.4 à 3.6. Pour des teneurs en humidité inférieures à 5%, on remarque que la constante diélectrique augmente lentement et le facteur de perte reste quasiment stable. Lorsque la teneur en humidité augmente jusqu'à 25%, une augmentation considérable des propriétés diélectriques est observée, particulièrement les valeurs du facteur de perte et de tangente de perte. A titre d'exemple, dans cette plage de teneur en humidité et pour une fréquence de 27,12 MHz, les valeurs de ϵ'' passent de 0,39 à 5,17 et ceux de $\tan\delta$ augmentent de 0,17 à 0,72. Un accroissement supplémentaire de la teneur en humidité de 25% à 35% entraîne une augmentation importante des propriétés diélectriques. Ces constatations viennent appuyer les recherches menées par Torgovnikov (1993) qui a expliqué ces résultats en se référant à l'état de l'eau dans le bois pour chaque domaine de teneur en humidité. Par conséquent, sur le plan théorique, la mesure de l'ensemble des propriétés diélectriques n'est pas une fin en soi, ces propriétés nous fournissent une

meilleure compréhension de la structure moléculaire du bois et des interactions entre le bois et les molécules d'eau.

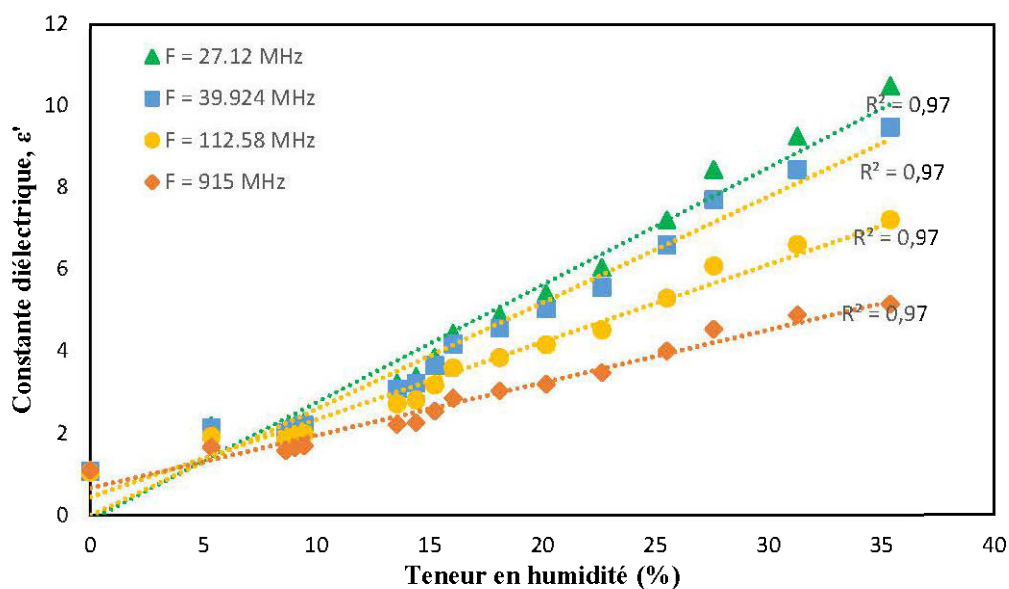


Figure 3.4 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') du pin gris en fonction de la teneur en humidité mesurée à différentes fréquences.

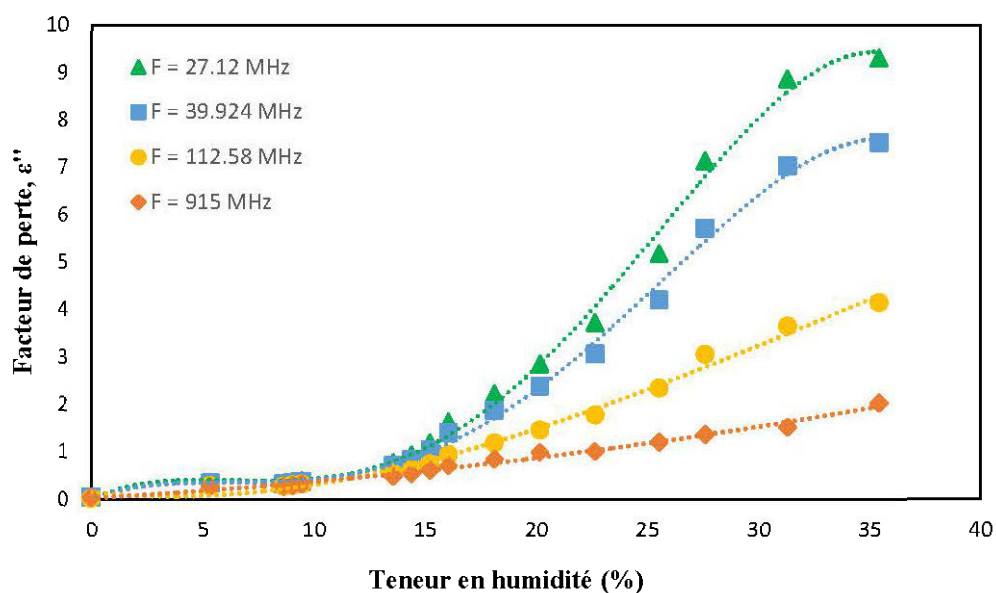


Figure 3.5 : Variation du facteur de perte (ϵ'') du pin gris en fonction de la teneur en humidité mesurée à différentes fréquences.

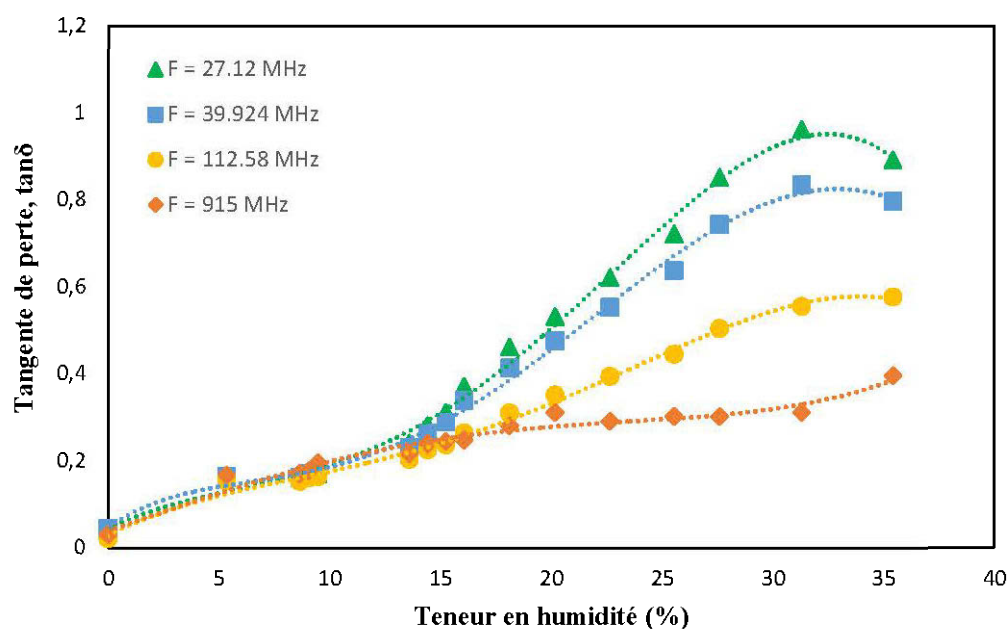


Figure 3.6 : Variation de la tangente de perte ($\tan\delta$) du pin gris en fonction de la teneur en humidité mesurée à différentes fréquences.

L'effet de la teneur en humidité indique qu'un séchage sélectif peut être obtenu en utilisant l'énergie de micro-ondes. En effet, les parties les plus humides du bois absorbent plus de puissance à cause des valeurs élevées du facteur de perte. Ce phénomène a tendance à uniformiser une répartition de l'humidité initialement irrégulière. Cela contribue à une meilleure qualité du produit livré contrairement aux procédés de séchage conventionnels.

Une relation linéaire est établie entre la constante diélectrique et la teneur en humidité du pin gris pour toutes les fréquences avec un coefficient de corrélation très élevé, mais la pente de la courbe augmente à mesure que la fréquence diminue. Il est de même pour l'épinette blanche, le mélèze et le chêne avec des coefficients de corrélation importants. Ces mêmes tendances ont été également rapportées par Koubaa et al. (2008). Ceci montre une forte relation entre ces deux paramètres (ϵ' et TH%) et ces données pourraient être utilisées pour la prédiction de la teneur en humidité de chaque espèce à partir de la constante diélectrique.

D'après le tableau 3.1, on remarque que les valeurs de la constante diélectrique et de la tangente de perte de cette étude concordent généralement avec celles de la littérature.

Tableau 3.1 : Comparaison entre les résultats actuels du bois avec ceux de la littérature pour une fréquence de micro-ondes constante (915 MHz)

TH (%)	Présente étude		Torgovnikov 1993		Koubaa et al. 2008		Koubaa et al. 2013*	
	ϵ'	$\tan\delta$	ϵ'	$\tan\delta$	ϵ'	$\tan\delta$	ϵ'	$\tan\delta$
0	1,09	0,029	1,8	0,025	1,95	0,06	-	-
10	1,67	0,19	2,5	0,1	-	-	-	-
20	3,19	0,29	3,4	0,16	-	-	0,9	0,48
30	4,88	0,31	4,7	0,22	-	-	-	-
40	5,54	0,33	-	-	10,2	0,18	-	-
60	8,49	0,34	6,9	0,21	16,2	0,11	7,37	0,15
100	14,04	0,31	13,1	0,17	25,8	0,09	11,88	0,1

*Fréquence=830 MHz

D'autre part, la variation de la profondeur de pénétration ne montre aucune dépendance de la teneur en humidité au-dessus du PSF. Toutefois, elle dépend des fréquences micro-ondes (Fig. 3.7). Plus la fréquence est élevée, plus la profondeur de pénétration est faible à n'importe quelle teneur d'humidité. Ce résultat suggère que le séchage du bois à forte épaisseur à l'aide des ondes électromagnétiques à basses fréquences serait meilleur que celui à hautes fréquences. Cette affirmation est en accord avec celle rapporté par Koubaa et al (2008). L'analyse de la dépendance de la profondeur de pénétration de la fréquence et de la teneur en humidité du bois assure le bon choix de la fréquence permettant un séchage plus rapide du bois. Pour préserver l'approvisionnement uniforme de l'énergie, le séchage des poutres de bois ou des grumes brutes à une fréquence de 0,434 GHz

est préférable. Tandis que pour les sciages, les panneaux de fibres et les panneaux de particules, les fréquences de séchage les plus convenables sont de 0,915 et 2,45 GHz. D'autre part, pour les placages et le papier, les fréquences de 2,45 et 5,8 GHz sont principalement utilisées (Torgovnikov 1993).

La figure 3.8 illustre la variation de la résistivité électrique du pin gris en fonction de la teneur en humidité pour différentes fréquences. On remarque que cette propriété électrique dépend fortement de la teneur en humidité. En effet, le bois à l'état sec est un excellent isolant. Au-dessous de 30%, on constate une réduction rapide de la résistivité du bois en augmentant la teneur en humidité. Pour une fréquence de 27,12 MHz, la résistivité du bois est d'environ 10^6 ohm.cm à l'état sec et environ 10^3 ohm.cm au point de saturation des fibres. Lorsque la teneur en humidité dépasse 30%, la résistivité reste quasiment stable. Pour cette raison, les mesures de résistivité du bois au-dessous du point de saturation sont utilisées pour prédire avec précision sa teneur en humidité (Glass et Zelinka 2010).

La conductivité électrique du bois varie également avec la quantité d'eau présente dans le bois. Lorsque la teneur en humidité augmente de zéro jusqu'au PSF, la conductivité du bois augmente considérablement (figure 3.9). Le mécanisme de conduction électrique dépend de la présence d'ions dans le bois. Un modèle de conduction ionique a été proposé par Lin (1967) pour expliquer la conduction électrique à travers la paroi cellulaire du bois. Il a souligné que le nombre de porteurs de charge dans le bois est le facteur majeur affectant le mécanisme de conduction sur une plage de teneur en humidité de 0 à 20%. À des teneurs en humidité plus élevées, le degré de dissociation des ions absorbés est suffisamment élevé pour que la mobilité des ions puisse être le facteur principal dans la détermination de la conductivité électrique. Par conséquent, la concentration des ions et leur distribution influent fortement la conductivité électrique du bois (Kollmann et Côté 1968).

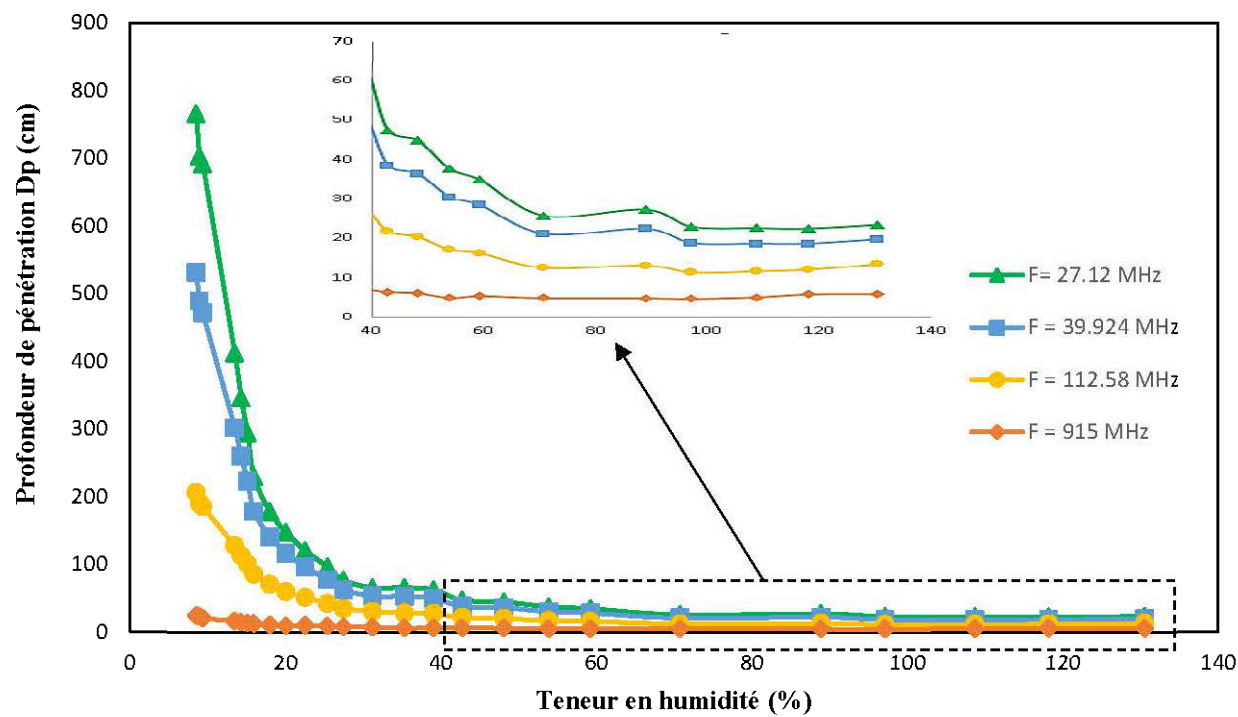


Figure 3.7 : Variation de la profondeur de pénétration du pin gris en fonction de la teneur en humidité mesurée à différentes fréquences.

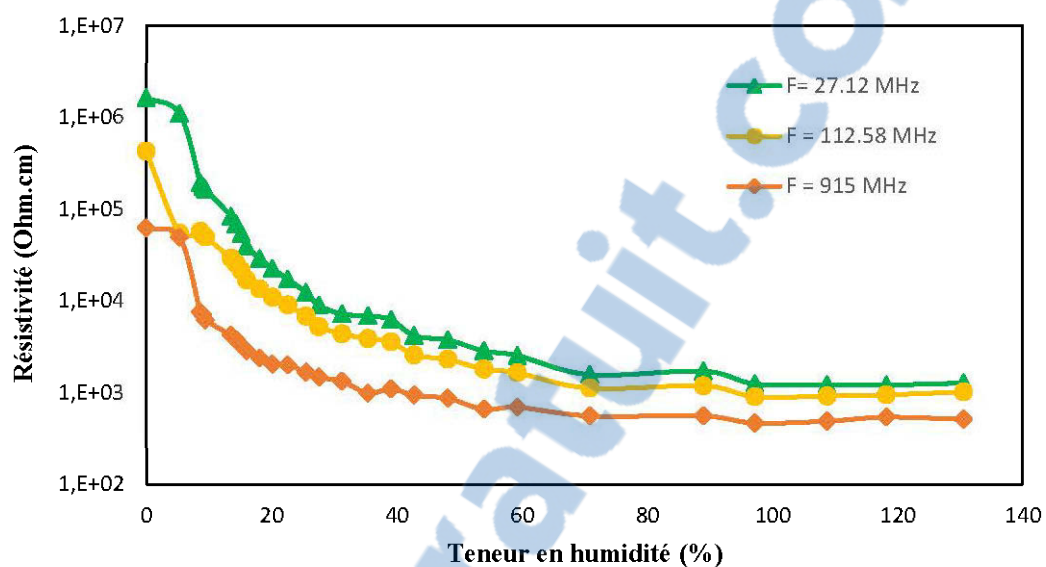


Figure 3.8 : Variation de la résistivité du pin gris en fonction de la teneur en humidité mesurée à différentes fréquences.

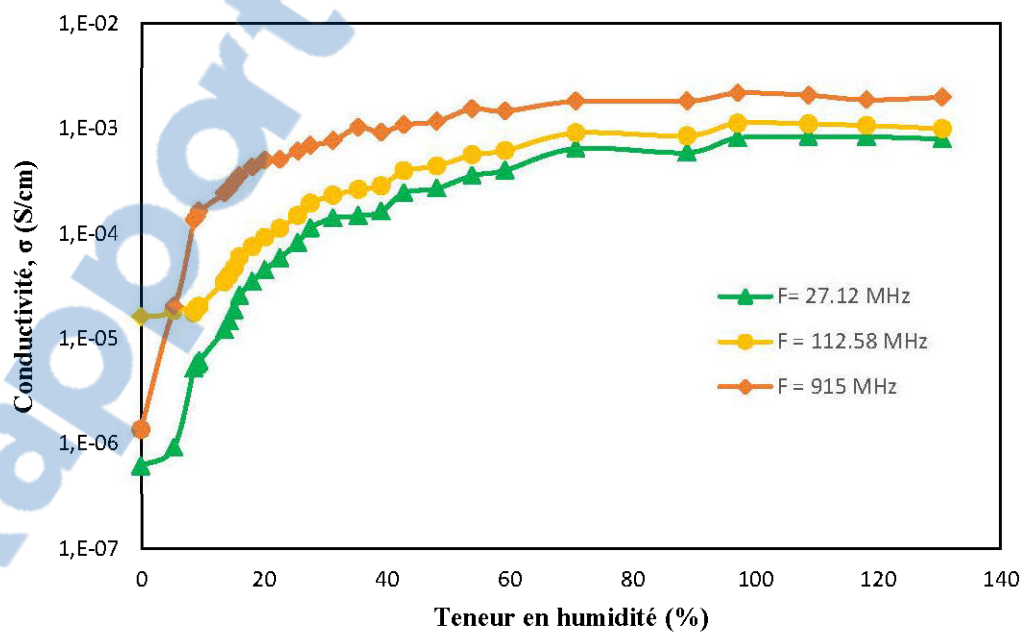


Figure 3.9 : Variation de la conductivité du pin gris en fonction de la teneur en humidité mesurée à différentes fréquences.

3.1.2 Effet de la fréquence

Les propriétés diélectriques du bois sont fortement influencées par la fréquence dans le domaine étudié. La figure 3.10 montre une famille de courbes illustrant la relation entre la constante diélectrique et la fréquence pour différentes teneurs en humidité. Les données actuelles montrent une très grande sensibilité du bois à la polarisation électrique ne se produisant que lorsque le champ électrique externe varie lentement et lorsqu'au moins une quantité modérée d'eau est présente. Pour l'échantillon sec (0%), les valeurs de ϵ' sont très proches de 1 et restent quasiment constantes dans toute la plage de fréquence. Alors que pour les échantillons humides, on observe que la constante diélectrique diminue lorsque la fréquence accroît. Ces résultats sont en accord avec ceux des études réalisées par James et al. (1975), Torgovnikov (1993), Kabir et al. (2001). Ce comportement diélectrique peut être expliqué d'une part par la contribution de la polarisation interfaciale, en raison des discontinuités qui s'effectuent entre les régions amorphes et cristallines des molécules de cellulose. D'autre part, l'augmentation de ϵ' à basses fréquences est attribuée au phénomène de polarisation dipolaire. En effet, les groupements polaires tels que $-\text{OH}$ et $-\text{CH}_2\text{OH}$ présents dans les molécules de bois sont capables de s'orienter sous l'action des ondes électromagnétiques. La diminution de la constante diélectrique à des fréquences plus élevées démontre que la polarisation interfaciale devient négligeable, et la polarisation dipolaire est prédominante. Autrement dit, l'énergie électrique est absorbée sous l'effet de l'alignement de molécules ayant fixé un moment dipolaire. Au-dessus de 1,5 GHz, on peut voir une diminution brusque de la constante diélectrique. Ceci peut être expliqué par la difficulté des dipôles présents dans le matériau à s'orienter assez rapidement et à suivre la fréquence du champ électrique appliqué. Torgovnikov (1993) suggère que cette diminution rapide des valeurs de la constante diélectrique du bois, à des teneurs en humidité supérieures au PSF, est attribuée à la diminution des valeurs de la constante diélectrique de l'eau libre dans cette gamme de fréquence.

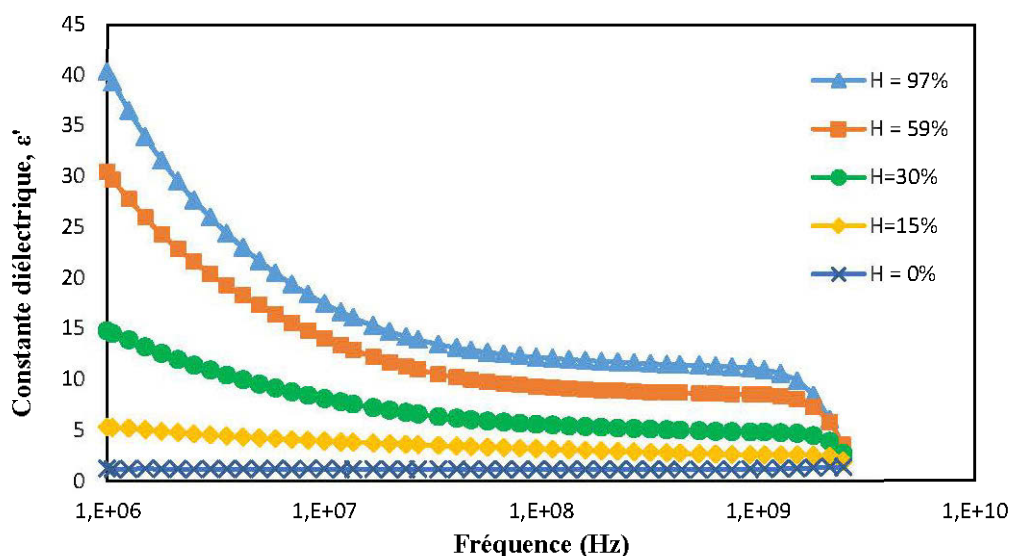


Figure 3.10: Variation de la constante diélectrique (ϵ') du pin gris en fonction de la fréquence mesurée pour différentes teneurs en humidité.

La figure 3.11 montre que le bois à l'état anhydre induit des pertes diélectriques qui sont presque nulles. À une teneur en humidité allant jusqu'à 15%, en augmentant la fréquence, le facteur de perte et la tangente de perte diminuent légèrement. Pour des teneurs en humidité élevées, on observe une forte augmentation de ϵ'' vers les fréquences les plus faibles. Plus la teneur en humidité est élevée, plus les valeurs du facteur de perte sont importantes. Le même comportement a été observé pour la tangente de perte. Cependant, une augmentation de la teneur en humidité de 60% à 100% n'a pas un effet remarquable sur les valeurs de tangente de perte.

On remarque que dans le domaine de la fréquence [$3 \times 10^8 - 3 \times 10^9$ Hz], et pour des teneurs en humidité inférieures au PSF, les valeurs de tangente de perte tendent à accroître pour atteindre un maximum puis diminuent rapidement. Dans ce domaine de fréquence, une augmentation de la teneur en humidité du bois engendre une diminution de la tangente de perte (Fig. 3.12).

Les valeurs élevées du facteur de perte et de la tangente de perte du bois humide à basse fréquence peuvent être expliquées par le phénomène de conduction ionique.

En effet, l'application d'un champ électrique provoque une dissociation des molécules et une migration des ions en délivrant l'énergie cinétique. L'énergie cinétique ordonnée est ensuite convertie en énergie cinétique désordonnée par les collisions des ions migrants avec des molécules non ionisées. Ce qui engendre une dissipation de l'énergie électrique sous forme de chaleur. D'autre part, les pertes sont dues au travail nécessaire à l'établissement de la polarisation. Le frottement engendré par la rotation des dipôles cherchant à s'aligner suivant le champ électrique génère de la chaleur. Ce phénomène est appelé perte par relaxation diélectrique qui est causée principalement par la présence des molécules d'eau polaires. Avec une fréquence croissante, l'influence du phénomène de conductivité ionique devient négligeable et le phénomène de relaxation est responsable des pertes dissipées dans le bois humide.



3.1.3 Effet de l'anisotropie du bois

Les résultats obtenus montrent l'importance de l'orientation du bois par rapport à la direction du champ électrique. Les valeurs de la constante diélectrique du pin gris dans la direction longitudinale sont plus élevées que celles dans les directions transversales (radiale et tangentielle). Cette différence est plus prononcée pour des teneurs en humidité supérieures au PSF (Fig. 3.13). Ceci est conforme avec les résultats déjà trouvés pour l'épinette blanche, où les valeurs les plus importantes de ϵ' sont obtenues pour le vecteur $\vec{E}$ orienté parallèlement aux fibres. Pour le pin gris, les valeurs longitudinales à une fréquence de 27,12 MHz sont de 1,5 à 2,5 fois plus élevées que les valeurs transversales. Comme la constante diélectrique, les valeurs du facteur de perte et de tangente de perte sont plus importantes pour l'orientation du champ parallèle aux fibres que dans la direction transversale.

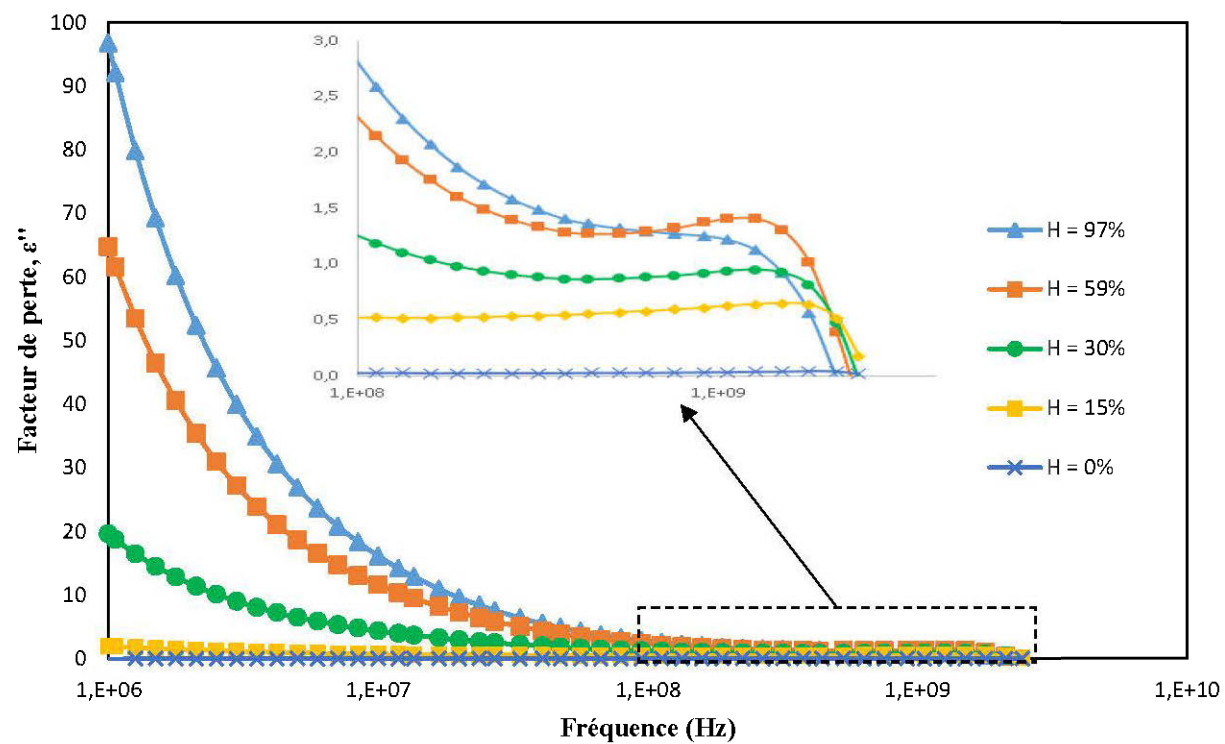


Figure 3.11 : Variation du facteur de perte (ϵ'') du pin gris en fonction de la fréquence mesuré pour différentes teneurs en humidité

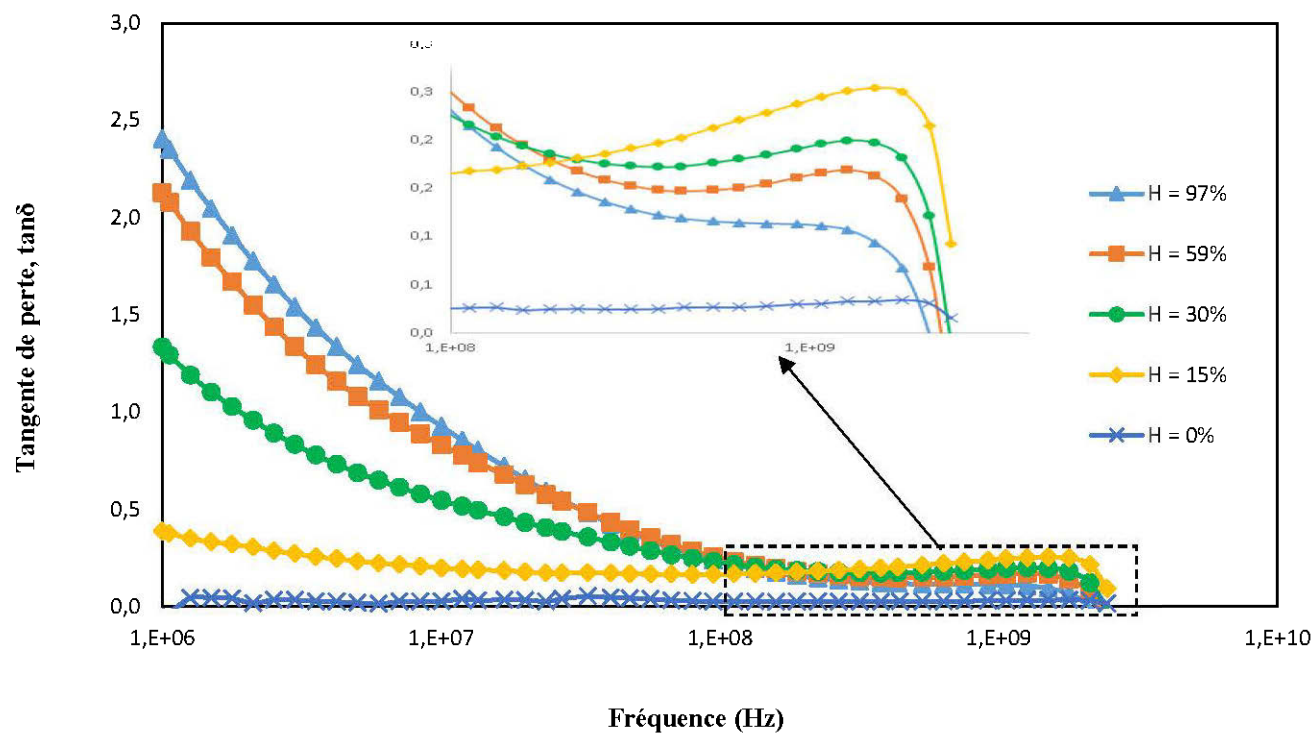


Figure 3.12 : Variation de la tangente de perte ($\tan\delta$) du pin gris en fonction de la fréquence mesurée pour différentes teneurs en humidité.

D'une autre part, les propriétés diélectriques des espèces étudiées montrent une différence relativement faible entre les directions radiale et tangentielle. Cette différence est négligeable par rapport à celle entre les directions longitudinale et transversale. En effet, pour une fréquence de 27,12 MHz, les valeurs du facteur de perte du pin gris dans la direction radiale sont un peu plus élevées que celles dans la direction tangentielle en particulier à des teneurs en humidité élevées (Fig. 3.14). Peyskens et al. (1984) ont mentionné que la différence des propriétés diélectriques entre les directions radiale et tangentielle dépend de l'essence de bois et de la teneur en humidité.

D'après les résultats obtenus, il y a une différence notable au niveau des propriétés diélectriques entre les trois directions du bois. Ce comportement peut être expliqué par les caractéristiques particulières de la structure poreuse du bois. Les résultats de cette étude concordent avec ceux des résultats des études antérieures (Lin 1973, Peyskens et al. 1984, Torgovnikov 1993, Kabir et al. 2001, Sahin et Ay 2004). Ces études ont attribué la variation des propriétés diélectriques avec l'anisotropie du bois aux différences dans la structure du bois, de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique ainsi qu'aux différences au niveau moléculaire dans chaque direction de bois, comme nous avons discuté dans la partie précédente (chapitre 1 paragraphe 1.3.1.3). Ces conclusions sont très importantes en vue d'application des techniques de séchage du bois. La puissance absorbée, déterminée par la valeur de ε'' , peut augmenter sensiblement par une orientation correcte du bois.

3.1.4 Effet de la température

L'effet de la température sur les propriétés diélectriques du bois dépend considérablement du comportement diélectrique de l'eau selon ses différents états (glace ou liquide). Les figures 3.16 et 3.17 représentent les variations de la constante diélectrique et du facteur de perte du pin gris en fonction de la

température à une fréquence de 915 MHz mesurés pour différents teneurs en humidité.

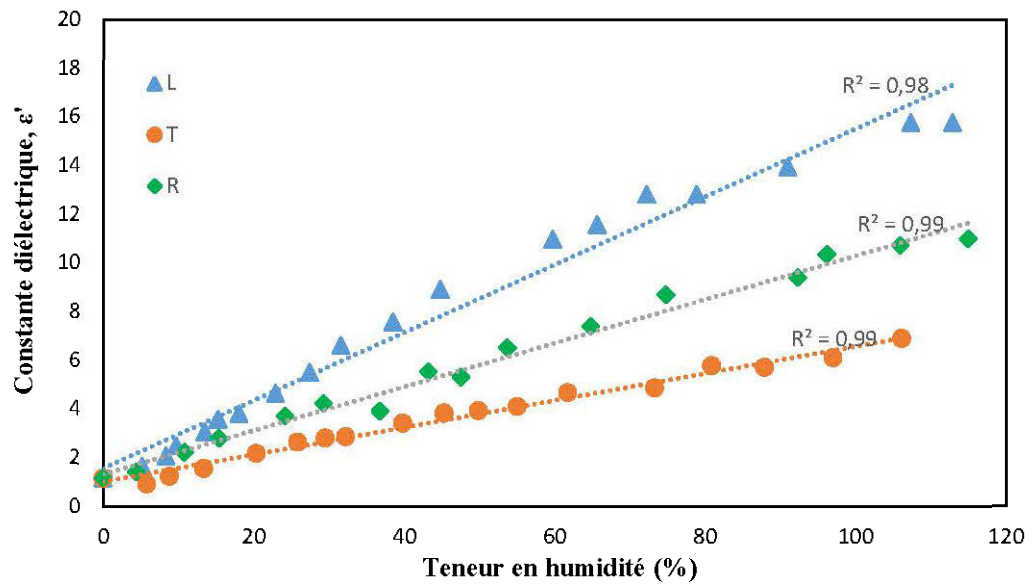


Figure 3.13 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') du pin gris avec la teneur en humidité dans les trois directions

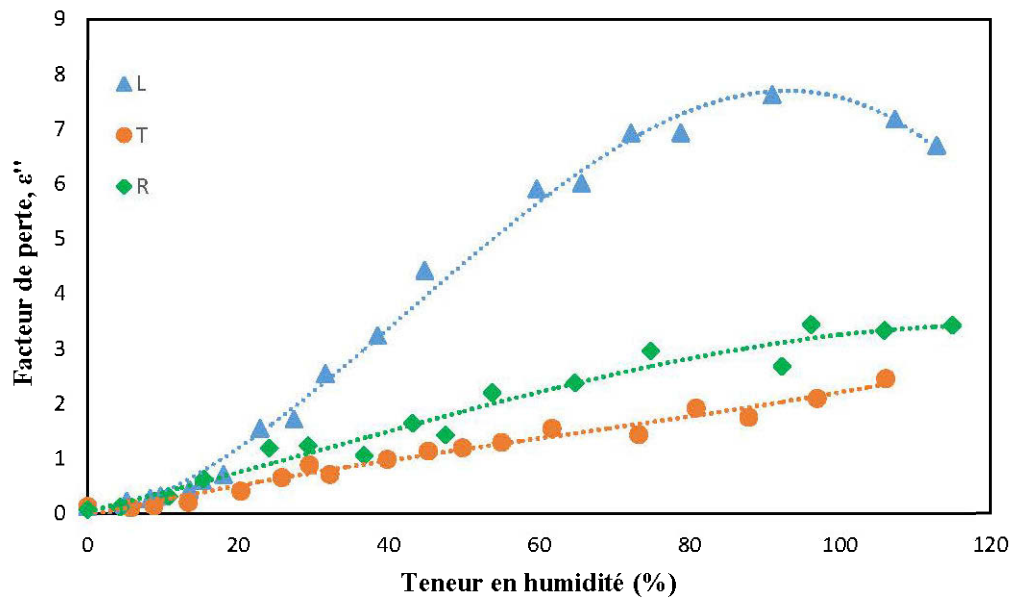


Figure 3.14 : Variation du facteur de perte (ϵ'') du pin gris avec la teneur en humidité dans les trois directions

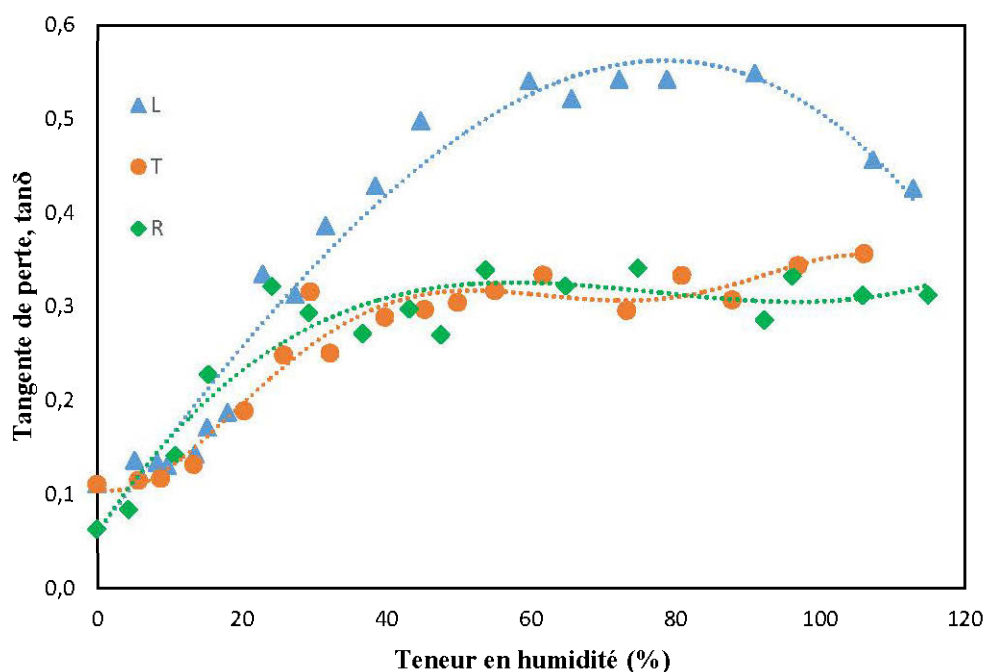


Figure 3.15 : Variation de la tangente de perte ($\tan\delta$) du pin gris avec la teneur en humidité dans les trois directions

Le bois à l'état gelé est constitué de la paroi cellulaire, de l'air, de la glace et de l'eau liée non congelable. La variation des propriétés diélectriques des trois premiers composants est faible dans la gamme de fréquence de micro-ondes pour des températures inférieures à -5°C (Torgovnikov 1993). Par conséquent, la quantité d'eau liée non congelable est le principal facteur déterminant la variation des propriétés diélectriques du bois humide à des températures négatives. Les données des figures 3.16 et 3.17 montrent qu'à des températures négatives, les valeurs de la constante diélectrique et du facteur de perte augmentent avec la teneur en humidité qui est une partie de la quantité d'eau liée non congelable. Avec une augmentation de température, cette quantité d'eau augmente et le rapport de la glace et l'eau liée non congelable change constamment. À des teneurs en humidité supérieures à 30%, l'eau libre à une température d'environ 0°C passe de l'état solide à l'état liquide, et la valeur de la constante diélectrique augmente fortement en dépassant le point correspondant à 0°C (Fig. 3.16). À des

teneurs en humidité allant jusqu'à 30%, la courbe de la constante diélectrique ne subit pas de changement brusque lors du passage de la température de 0°C. La même dépendance est valable pour l'épinette blanche et ces résultats sont conformes avec ceux déjà trouvés pour différentes essences de bois canadiens (érable à sucre, épinette noire, peuplier faux tremble et bouleau jaune) (Koubaa et al. 2013). D'autre part, avec l'augmentation de la température au-delà de 50°C, on remarque une diminution progressive des valeurs de la constante diélectrique pour atteindre environ 1 à 100°C indépendamment de la teneur en humidité du bois. Ceci nous suggère que toute la quantité d'eau est évaporée et que le bois atteint son état anhydre.

À une teneur en humidité constante, le facteur de perte augmente avec l'augmentation de la température du bois de l'espèce étudiée pour atteindre un maximum à 10°C puis commence à diminuer pour des températures plus élevées (Fig. 3.17). Le même comportement est trouvé pour le bois l'épinette blanche testé à des fréquences de micro-ondes. Ces mêmes résultats ont été observés par Koubaa et al. (2008, 2013) pour différentes essences de bois.

Les données de la figure 3.18 montrent que la variation de la tangente de perte en fonction de la température dépend également de la teneur en humidité du bois. À des teneurs en humidité supérieures à 30%, une augmentation de la température jusqu'à 0°C décongèle complètement l'eau libre et provoque une diminution abrupte des valeurs de tangente de perte. À des teneurs en humidité allant jusqu'à 30%, une augmentation de la température provoque une diminution continue de la tangente de perte sans subir des changements brusques lors du passage du point 0°C.

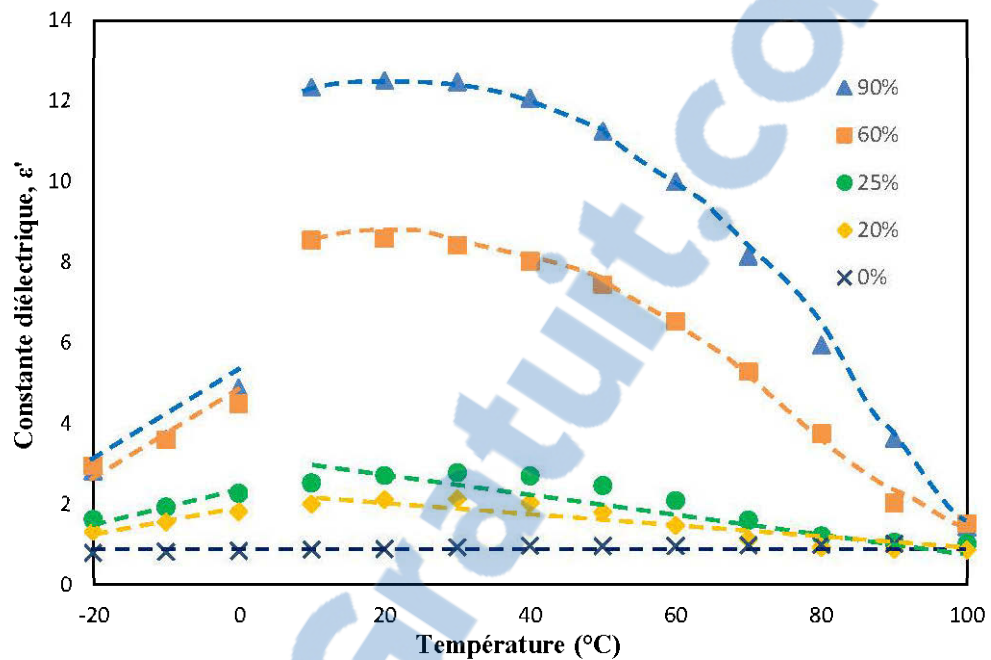


Figure 3.16 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') du pin gris en fonction de la température mesurée pour différents teneurs en humidité

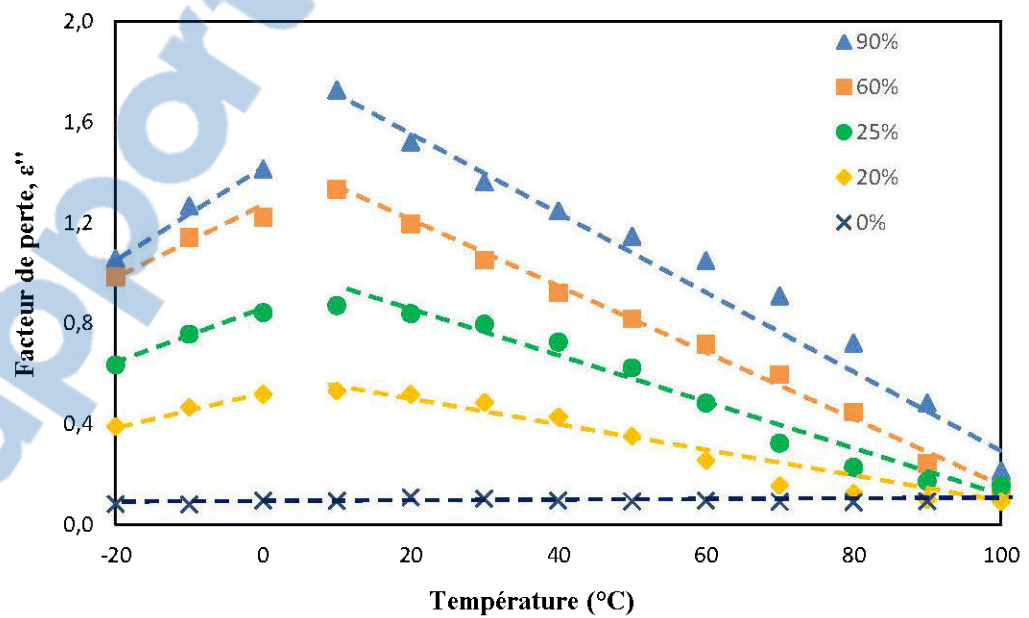


Figure 3.17 : Variation du facteur de perte (ϵ'') du pin gris en fonction de la température mesuré pour différents teneurs en humidité

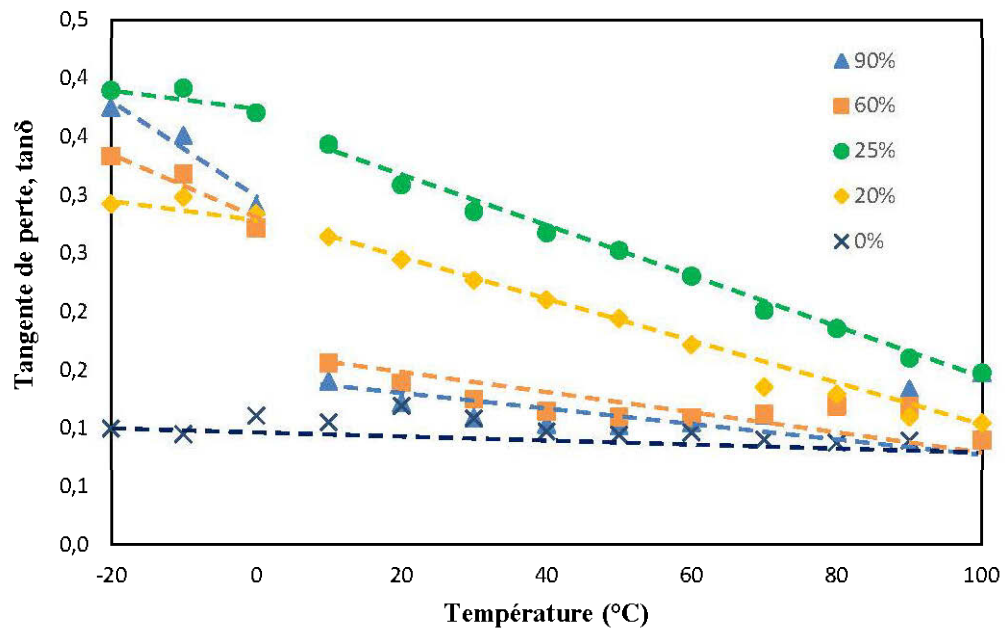


Figure 3.18 : Variation de la tangente de perte ($\tan\delta$) du pin gris en fonction de la température mesurée pour différentes teneurs en humidité

La figure 3.19 révèle une faible dépendance de la profondeur de pénétration de la teneur en humidité sur toute la plage de température. À une fréquence de 915 MHz, la profondeur de pénétration du bois humide diminue légèrement jusqu'à 0°C puis augmente avec l'augmentation de la température. Ceci peut être expliqué par la variation de la tangente de perte avec la température. En effet, la profondeur de pénétration et la tangente de perte sont deux paramètres inversement proportionnels (Équations 1.15 et 1.16). L'accroissement de la profondeur de pénétration à des températures positives est dû à la diminution de la tangente de perte avec l'augmentation de la température.

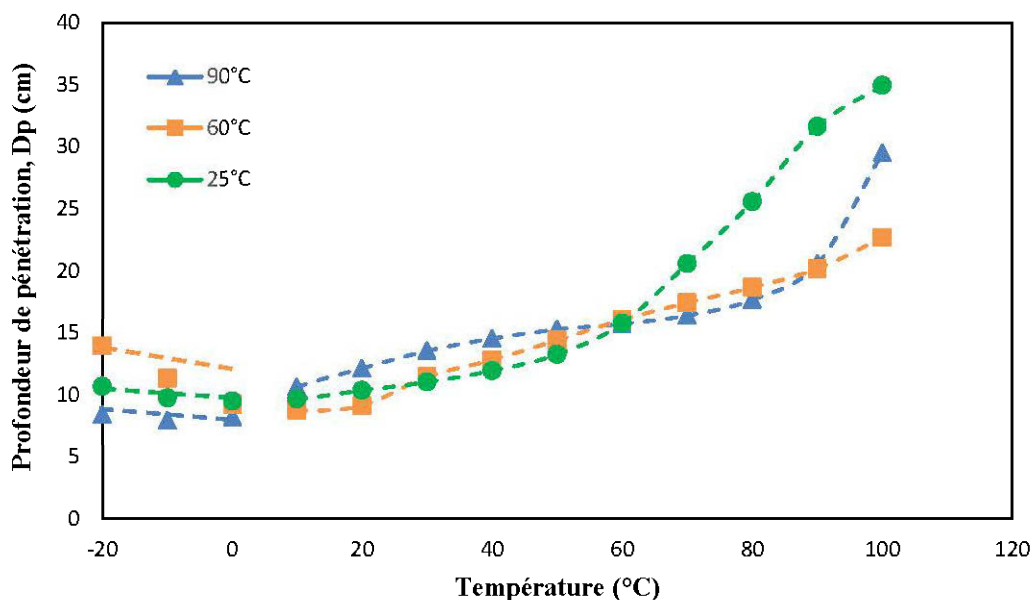


Figure 3.19 : Variation de la profondeur de pénétration du pin gris en fonction de la température mesurée pour différentes teneurs en humidité

3.1.5 Effet de la masse volumique

La figure 3.20 représente une comparaison entre les propriétés diélectriques du bois initial (bois de printemps) et du bois final (bois d'été) du mélèze. Cette comparaison montre que les valeurs de ϵ' du bois final sont supérieures à celles du bois initial. Le même comportement est observé pour le bois de chêne (Annexe A.10). Cette différence s'explique principalement par la masse volumique plus élevée du bois final. En effet, les masses volumiques du bois initial et du bois final du mélèze sont de 386 et 685 kg/m³, respectivement. Les masses volumiques du bois initial et du bois final du chêne rouge sont de 545 et 678 kg/m³, respectivement. Il semble que la masse volumique représente un facteur important agissant sur le comportement diélectrique du bois. Une étude récente menée par Holmes et al. (2014) a montré qu'à une faible teneur en humidité (10%), le pourcentage de bois final a un effet important sur les valeurs de la constante diélectrique. Ces travaux ont rapporté également que la constante diélectrique est

fortement corrélée avec la masse volumique du bois. Cependant, ces auteurs ont constaté que ces deux facteurs sont sensiblement des variables indépendantes.

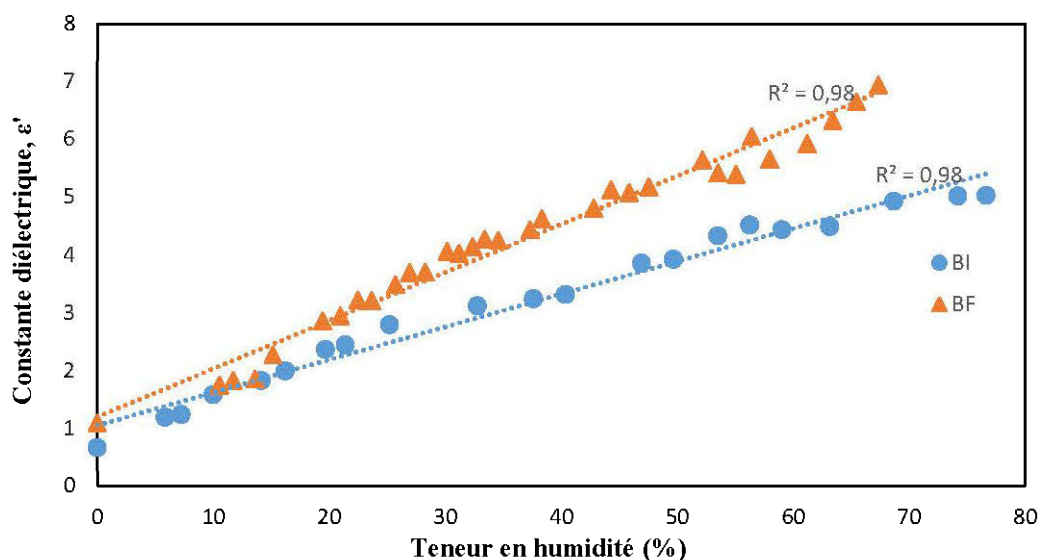


Figure 3.20 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') du mélèze en fonction de la teneur en humidité mesurée à une fréquence constante (915 MHz).

La figure 3.21 représente l'évolution de la constante diélectrique en fonction de la teneur en humidité des quatre espèces de bois étudiées dans la direction longitudinale. Les données de cette illustration montrent que les valeurs de ϵ' du chêne rouge sont supérieures à celles du mélèze laricin qui sont à leur tour supérieures à celles du pin gris et de l'épinette blanche. Ces résultats peuvent être attribués aux différences des masses volumiques de chaque espèce. À titre d'exemple, le chêne rouge est plus dense que le mélèze laricin, le pin gris et l'épinette blanche, respectivement (Tableau 3.2). Ces résultats viennent appuyer les résultats des travaux menés par Peyskens et al. (1984), Torgovnikov (1993) et Ay et Sahin (2004).

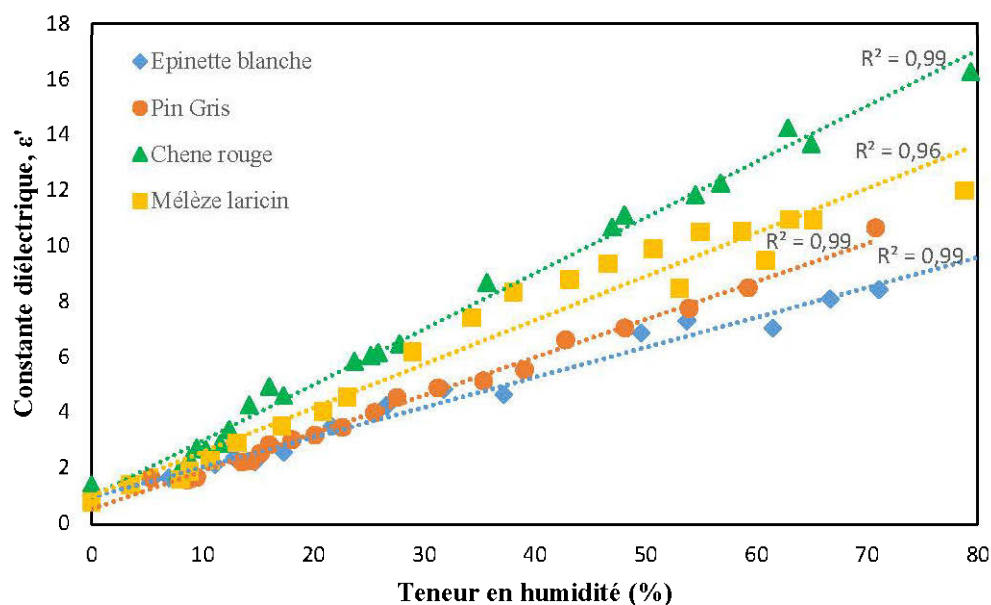


Figure 3.21 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') des espèces de bois en fonction de la teneur en humidité mesurée à une fréquence constante (915 MHz).

Parmi les hypothèses qui pourraient expliquer les différences entre les propriétés diélectriques des espèces du bois est l'influence des extractibles. En effet, il a été rapporté qu'il existe des relations à des fréquences élevées entre les propriétés diélectriques du bois et la teneur en extractibles (Tomppo et al. 2009). Les données du tableau 3.2 et de la figure 3.21 suggèrent qu'il existe une corrélation entre les propriétés diélectriques du bois et la teneur en extractibles. Plus le bois est riche en extractibles, plus les valeurs de la constante diélectrique sont élevées.

Tableau 3.2 : Les valeurs de la masse volumique du bois anhydre, de la teneur en extractibles et des propriétés diélectriques de chaque essence étudiée mesurées à une teneur en humidité constante (17%)

Espèces de bois	masse volumique (Kg/m ³)	Teneur en extractibles(%)*	ε'	ε''	Tan(δ)
Chêne rouge	661	5,3	4,6	0,96	0,21
Mélèze laricin	553	4,6 – 4,9	3,51	0,02	0,01
Pin gris	473	3,2	3,03	0,85	0,28
Épinette blanche	455	2,1	2,57	0,75	0,29

*Tiré de Zhang et Koubaa (2008)

L'analyse des données de cette étude a permis d'établir une relation entre la masse volumique du bois et la constante diélectrique. La figure 3.22 montre que pour la même plage de teneur en humidité, la constante diélectrique augmente avec la masse volumique. La relation entre ces deux paramètres suit un modèle de variation linéaire avec un coefficient de corrélation élevé. Pour un bois à faible masse volumique, il y a moins de groupes polaires, ce qui signifie que les valeurs de la constante diélectrique sont inférieures à celles du bois dense (Vermaas et al. 1974). Ces observations sont en accord avec les résultats d'études antérieures qui ont établi une relation linéaire positive entre la masse volumique et la constante diélectrique pour des teneurs en humidité entre 0 et 30% et à une fréquence de 9,8 GHz (Ay et al. 2004). La même relation a été trouvée par Peyskens et al. (1984) entre 6 et 35% à 3 GHz. Ces résultats affirment la forte relation entre ρ et ε' et suggèrent la possibilité de prédiction de la masse volumique du bois à partir des valeurs de la constante diélectrique.

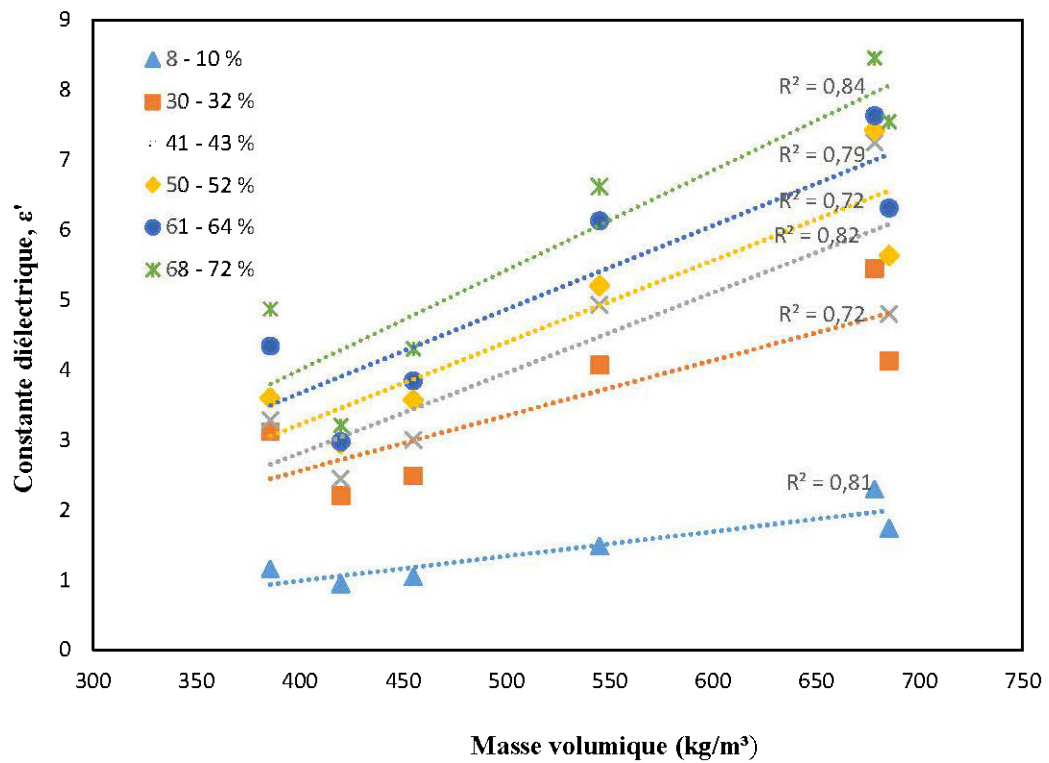


Figure 3.22 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') en fonction de la masse volumique pour différentes teneurs en humidité

Ces résultats suggèrent que la teneur en humidité et la masse volumique influencent considérablement sur le comportement diélectrique du bois, en particulier sur la constante diélectrique. De ce fait, nous avons établi un modèle de régression multiple qui permet de suivre l'évolution de la constante diélectrique en fonction de la teneur en humidité et la masse volumique. L'équation obtenue par ce modèle est :

$$\epsilon' = -5,369 + 0,012\rho + 0,069H \quad (3.1)$$

Avec ρ : masse volumique du bois

H : teneur en humidité du bois

La figure 3.23 montre une comparaison entre les valeurs de la constante diélectrique mesurées et prédites suivant ce modèle. On remarque une forte

corrélation entre ces valeurs ($R^2 = 0.85$) ce qui confirme la validité de ce modèle. Celui-ci nous permet de déduire la variation de la teneur en humidité du bois en fonction de sa constante diélectrique et sa masse volumique. Ce qui suggère que dans la mesure de la teneur en humidité du bois à partir des données des propriétés diélectriques, il faut tenir en compte la masse volumique du bois.

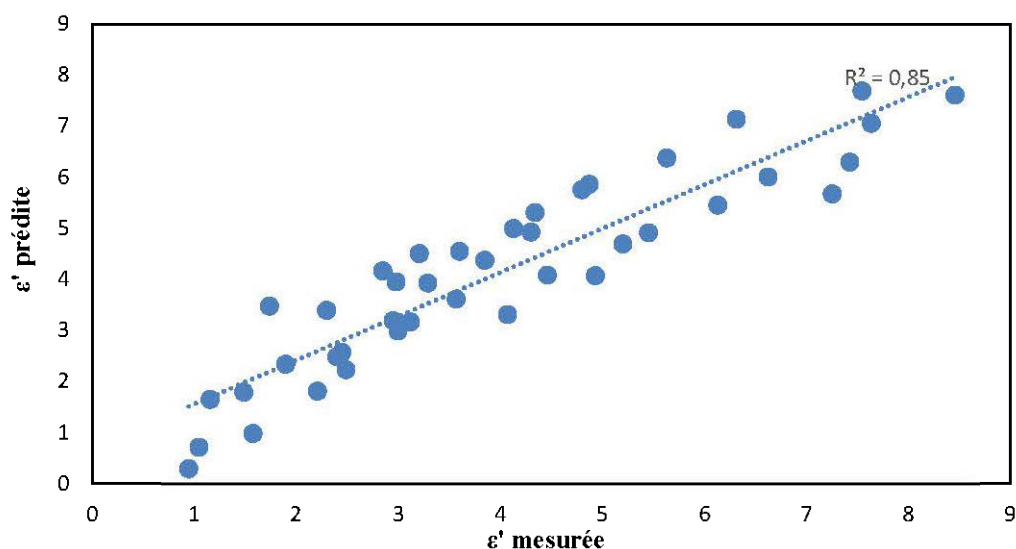


Figure 3.23 : Relation entre les valeurs de la constante diélectrique mesurées et prédites

3.1.6 Comparaison entre les propriétés diélectriques de l'aubier et du duramen

Les figures 3.24 à 3.26 montrent une comparaison entre les propriétés diélectriques de l'aubier et du duramen. On constate que les valeurs de ϵ' du duramen sont supérieures à celle de l'aubier sur toute la plage de teneur en humidité. Ceci est vrai dans les deux directions longitudinale et radiale (Figure 3.24). L'explication la plus plausible pour interpréter ces variations est l'influence de la perméabilité du bois. En effet, la perméabilité du bois du pin gris diffère au niveau de l'aubier et du duramen. L'aubier est perméable, alors que le bois de cœur ne l'est pas (Zhang et Koubaa 2008). D'autre part, les données de la figure 3.25 montrent que pour des teneurs en humidité inférieures à 40%, les courbes de

variation du facteur de perte du bois de cœur et de l'aubier sont presque confondues. La comparaison entre les valeurs de ε'' montre que les pertes diélectriques du bois de cœur sont plus élevées que celles de l'aubier pour des teneurs en humidité dépassant 40%. Cette différence est plus prononcée dans la direction longitudinale. En revanche, la tangente de perte du pin gris ne montre pas une différence significative entre l'aubier et le duramen (Fig. 3.26).

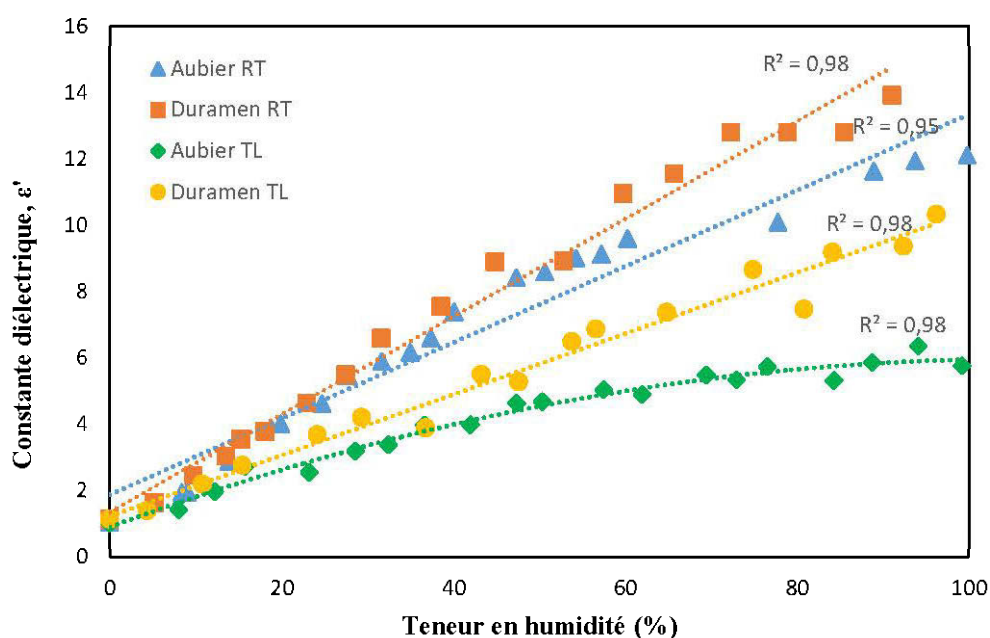


Figure 3.24 : Variation de la constante diélectrique (ε') de l'aubier et du duramen du pin gris en fonction de la teneur en humidité

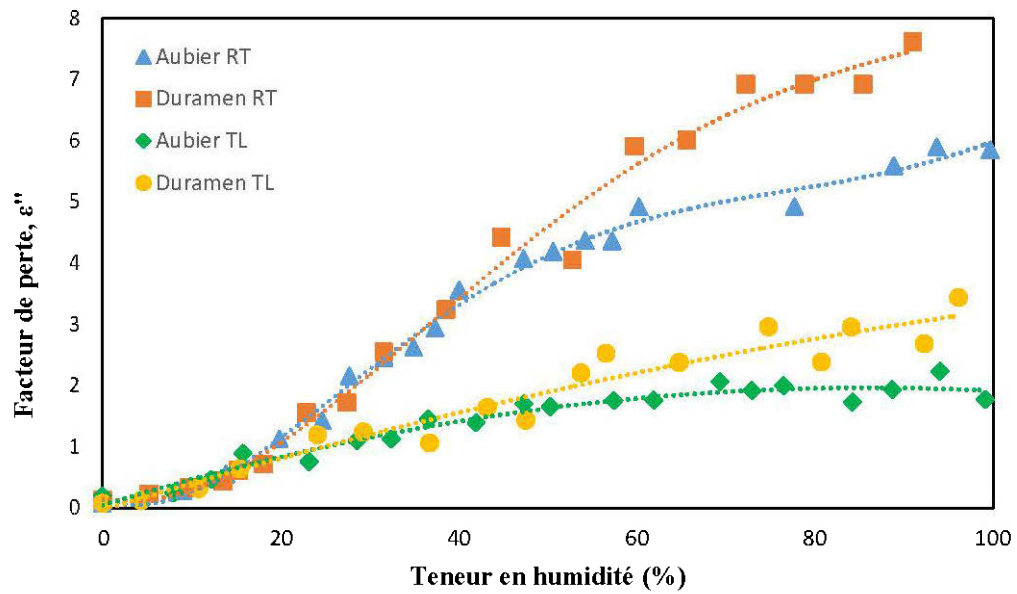


Figure 3.25 : Variation du facteur de perte (ϵ'') de l'aubier et du duramen du pin gris en fonction de la teneur en humidité

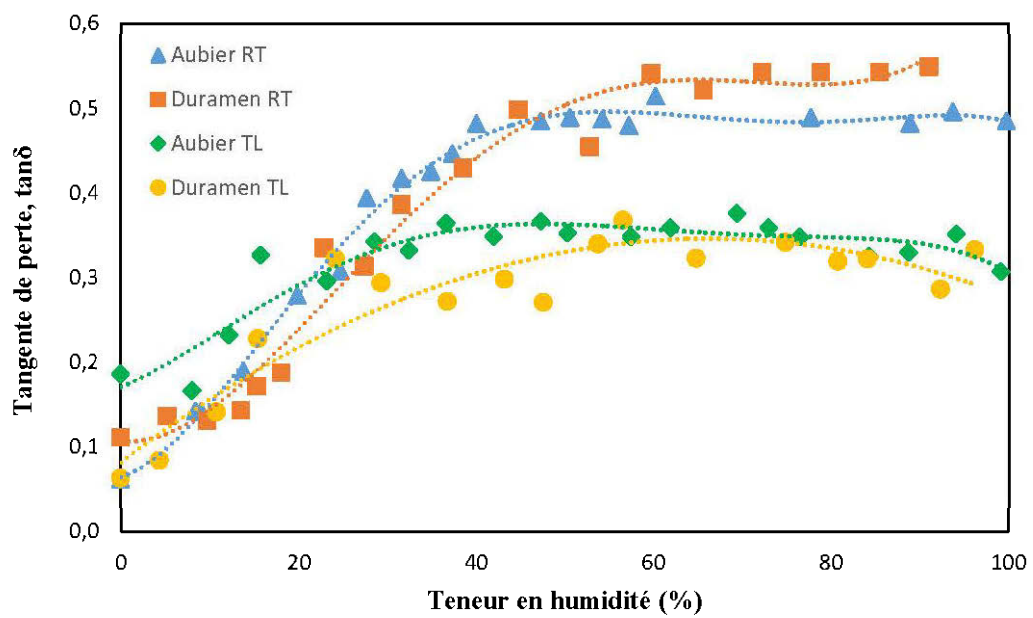


Figure 3.26 : Variation de la tangente de perte ($\tan\delta$) de l'aubier et du duramen du pin gris en fonction de la teneur en humidité

3.2 Caractérisation des propriétés diélectriques des composites bois-polymère

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés à l'étude des propriétés diélectriques des composites bois-polymère, mesurées sur une bande de fréquences allant de 1 à 10^3 MHz. Nous avons évalué l'effet de la fréquence et de la variation de la teneur en fibres issues de différentes essences de bois sur les propriétés diélectriques. Les résultats des propriétés des propriétés diélectriques des composites renforcés par des fibres d'écorce de peuplier faux-tremble sont détaillés dans cette partie. Les graphiques qui illustrent les variations de ces propriétés des composites renforcés par les autres essences de fibres (pin gris et peuplier faux tremble) sont donnés en annexes B.

3.3.1 Effet de la fréquence et de la teneur en fibres

La figure 3.27 représente l'évolution de la constante diélectrique en fonction de la fréquence pour les composites à base de polyéthylène renforcés par des fibres d'écorce de peuplier, mesurée à température constante (23°C). Les résultats montrent que les valeurs de ϵ' augmentent avec la diminution de la fréquence pour les différentes teneurs en fibres. Ce résultat est similaire à celui obtenu par Augustine et al. (1997) pour des composites à matrice en polyéthylène basse densité renforcés par des fibres de sisal. En effet, le polyéthylène pur est un matériau hydrophobe non polaire, qui présente seulement une polarisation ionique et électronique instantanée. Sa constante diélectrique reste quasiment constante sur toute la plage de fréquence avec une faible augmentation à hautes fréquences. L'addition des fibres de bois hydrophiles au polymère implique l'introduction de groupes polaires dans le matériau non polaire donnant lieu à une polarisation dipolaire. La polarisation globale du composite est donc la somme des polarisations électronique, ionique et dipolaire qui donne lieu à une constante diélectrique plus élevée comparativement au polyéthylène pur. Sur la figure 3.27, on observe que la présence des fibres induit l'apparition d'un palier sous forme de

profil décroissant à hautes fréquences, caractéristique d'une relaxation dipolaire. La diminution de la constante diélectrique est due à l'amortissement de la polarisation dipolaire à haute fréquence. À basses fréquences, l'orientation de la molécule est possible. Cependant, à des fréquences élevées, le mouvement de rotation des molécules polaires contenus dans le composite n'est pas suffisamment rapide pour atteindre l'équilibre avec le champ appliqué.

Les figures 3.28 et 3.29 illustrent l'effet de l'augmentation de la teneur des fibres de pin gris dans le composite sur ϵ'' et $\tan \delta$, respectivement. On constate que ces deux propriétés augmentent avec la teneur en fibres. En effet, l'incorporation des fibres augmente la polarisabilité du matériau en ajoutant des groupes polaires ce qui conduit à une augmentation de l'énergie stockée dans le composite accompagnée par une dissipation d'énergie élevée. Par ailleurs, le PEHD pur est un matériau semi cristallin. Cette cristallinité se traduit par une résistivité élevée et une faible dissipation de la chaleur. L'incorporation de fibres dans une matrice perturbe la disposition régulière des molécules et améliore le passage du courant à travers les régions amorphes en raison de leur capacité à absorber l'eau (Pathania et al. 2010). Par conséquent, l'ajout de fibres conduit à une perte plus élevée associée à des relaxations de la phase amorphe.

L'étude du facteur de perte et de la tangente de perte est d'importance fondamentale pour la caractérisation d'un matériau composite isolant. La tangente de perte est une mesure de l'énergie électrique convertie en chaleur. Cette chaleur augmente la température de l'isolant et accélère sa détérioration. Les deux facteurs principaux qui contribuent à l'augmentation du facteur de perte sont la polarisation dipolaire et la conduction ionique.

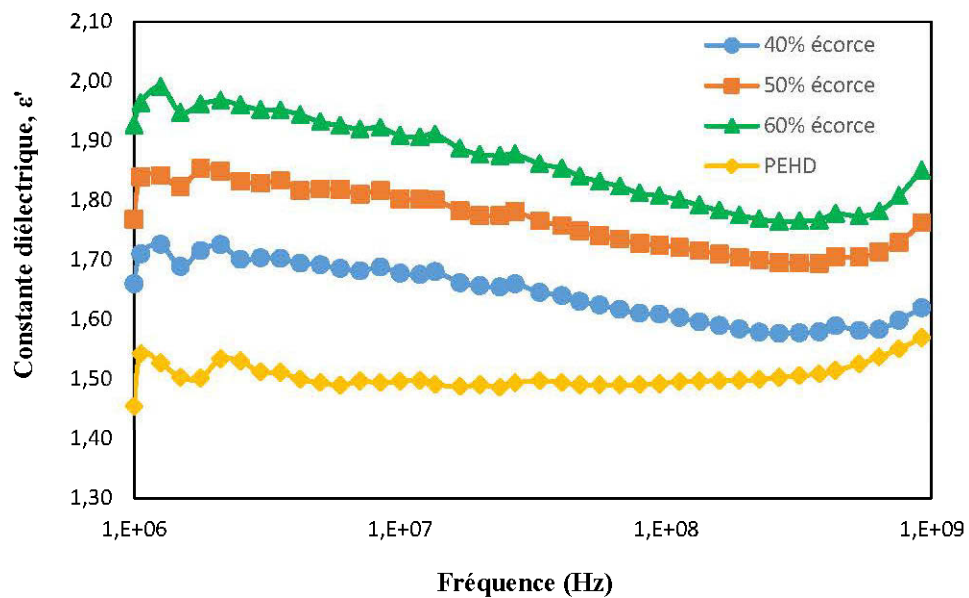


Figure 3.27 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') du composite en fonction de la fréquence pour différentes teneurs en fibres.

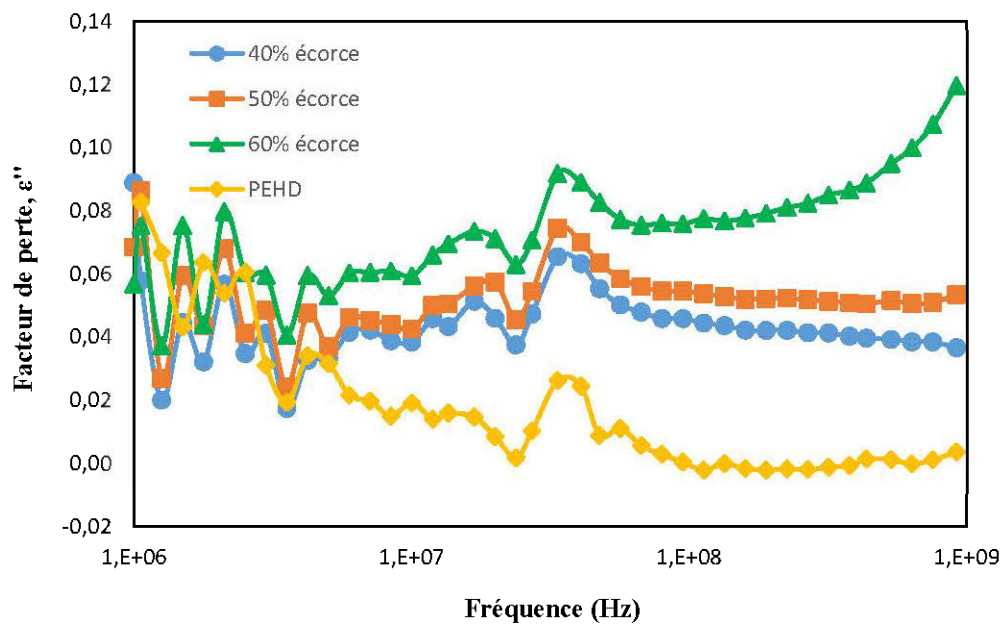


Figure 3.28 : Variation du facteur de perte (ϵ'') du composite en fonction de la fréquence pour différentes teneurs en fibres.



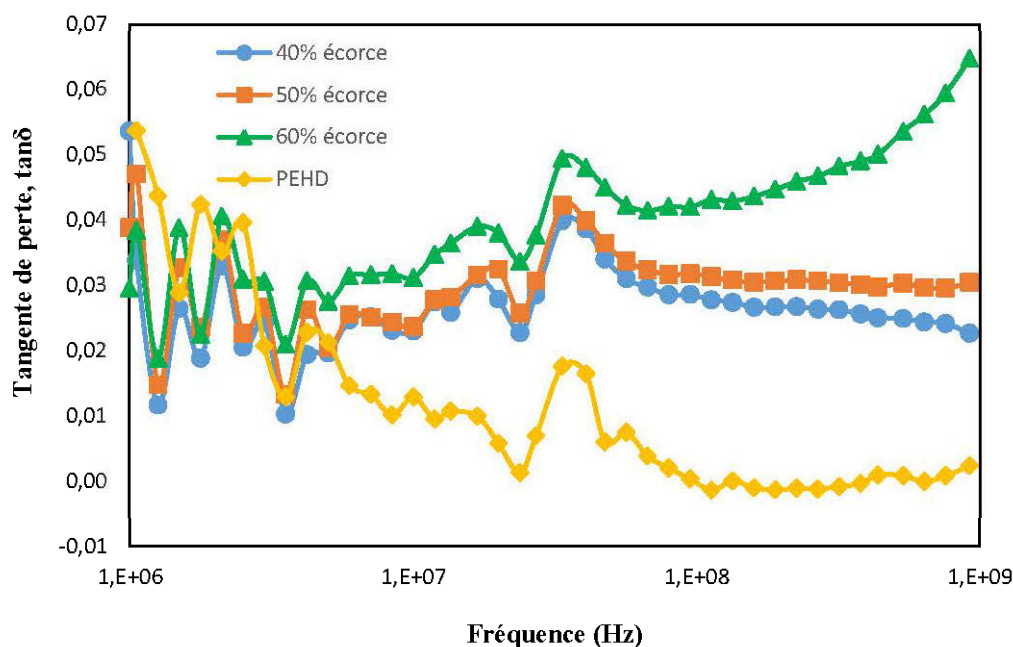


Figure 3.29 : Variation de la tangente de perte ($\tan\delta$) du composite en fonction de la fréquence pour différentes teneurs en fibres.

Les essais effectués sur des échantillons de composite contenant différentes concentrations en fibres de bois montrent une diminution significative de la résistivité lorsque la fréquence augmente (Fig. 3.30). Une autre observation intéressante est que le renforcement des fibres dans le polyéthylène diminue la résistivité des composites, indépendamment de la fréquence. Ceci implique que la conductivité augmente lors de l'ajout de fibres lignocellulosiques dans le mélange. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Jacob et al. (2006). Ils s'expliquent par la présence de groupes polaires qui facilitent le passage du courant. Dans les polymères, il est bien connu que les régions amorphes deviennent rapidement plus conductrices lorsque la teneur en humidité augmente. En raison de la structure complexe des fibres, les groupements hydroxyles -OH dans la cellulose, l'hémicellulose et la lignine peuvent absorber l'humidité, et par conséquent la présence des fibres de bois augmentent la conductivité du composite.

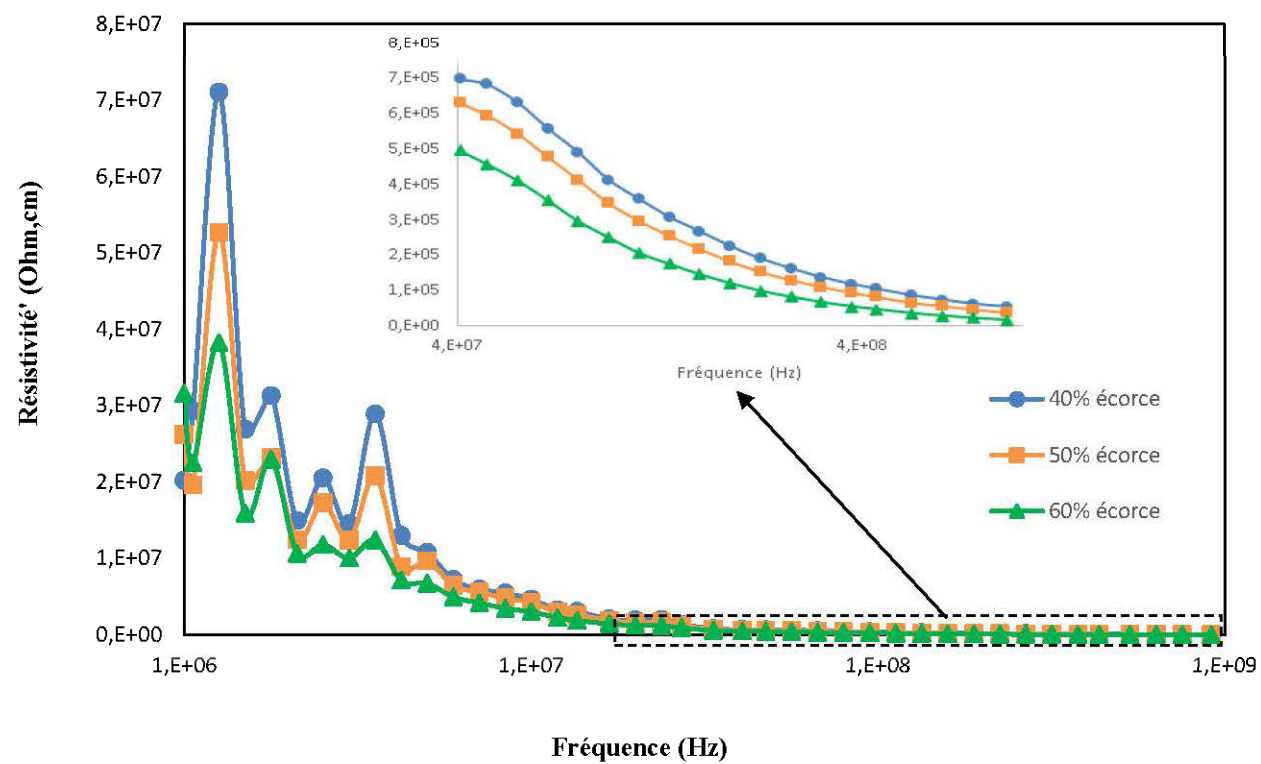


Figure 3.30 : Variation de la résistivité du composite en fonction de la fréquence pour différents teneur en fibres.

3.3.2 Effet de la cellulose

La figure 3.31 montre que le comportement diélectrique des composites en fonction de la fréquence est caractérisé par une diminution de ϵ' avec l'augmentation de la fréquence indépendamment de l'essence des fibres de bois renforcées dans le PEHD. On remarque que pour une même teneur en fibres, l'incorporation des fibres de peuplier et de pin gris conduit à des constantes diélectriques supérieures que celles du bouleau et de l'écorce, respectivement. Ces variations peuvent être expliquées par les différences au niveau de la teneur en cellulose présente dans les fibres de bois de chaque composite.

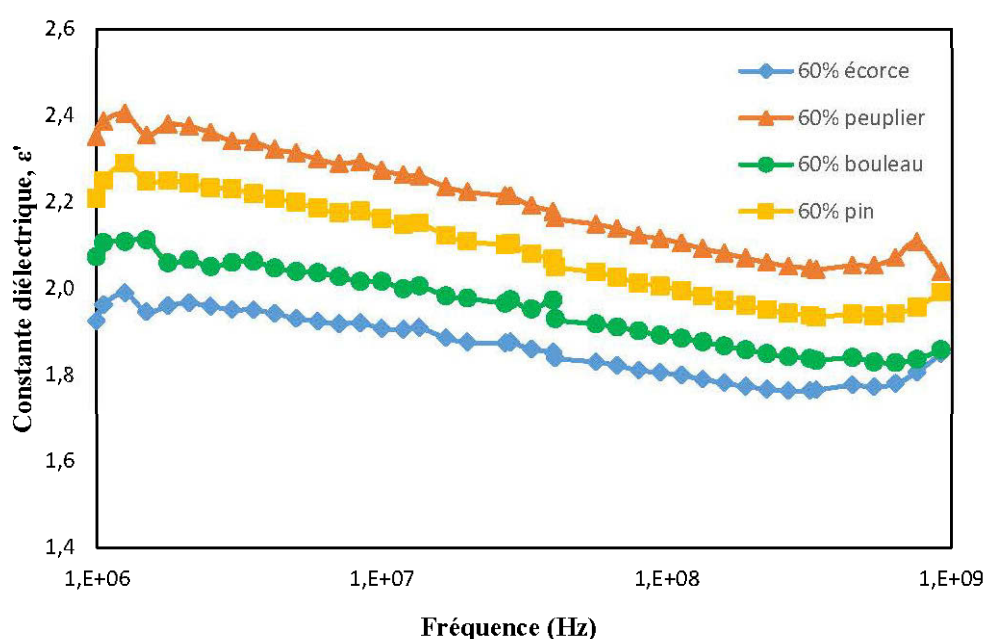


Figure 3.31 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') du composite en fonction de la fréquence pour différentes essences de fibres de bois

Les données de la figure 3.32 montrent une relation entre la teneur en cellulose et la constante diélectrique avec un coefficient de de détermination R^2 de 0,52. Plus la teneur en cellulose est importante, plus la constante diélectrique est élevée.

Ainsi, la variation de la constante diélectrique avec les essences de bois peut être expliquée par la variation de la teneur en cellulose dans le composite.

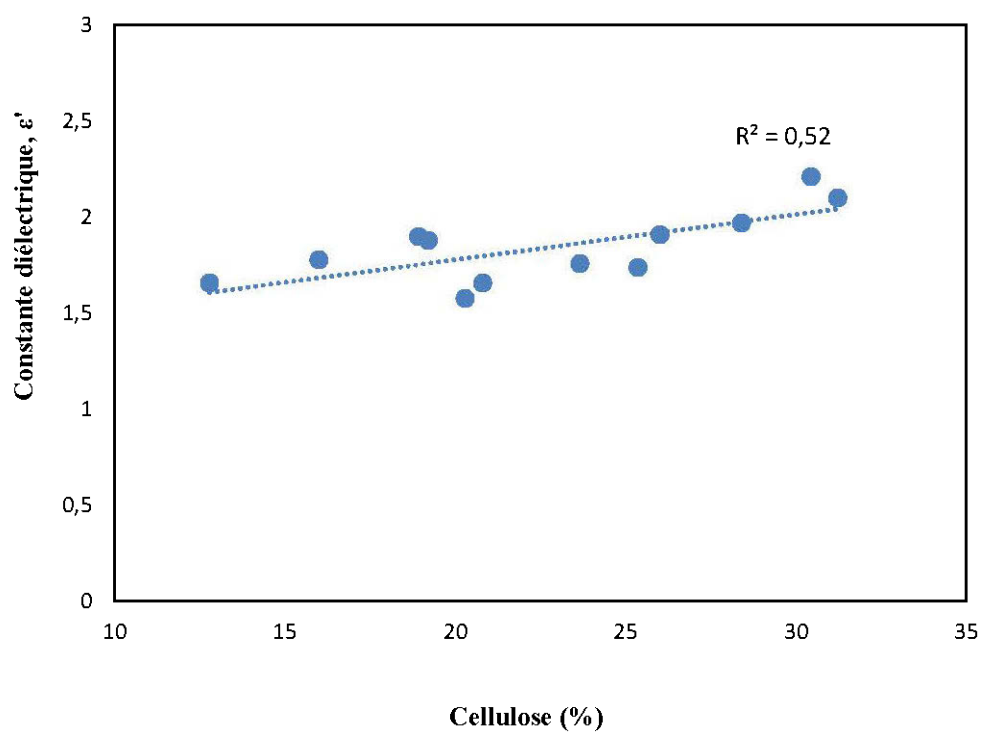


Figure 3.32 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') en fonction de la teneur en cellulose

CONCLUSIONS

Le présent travail propose une caractérisation des propriétés diélectriques du bois et des composites bois-polymère en vue de garantir une utilisation efficace dans des applications d'ingénierie, où ils sont soumis à des champs électriques alternatifs. Pour l'évaluation de ces propriétés, nous avons utilisé la méthode de spectroscopie diélectrique.

Dans une première partie, notre intérêt a porté sur la caractérisation des propriétés diélectriques du bois. Cette étude a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les propriétés diélectriques du bois dépendent fortement de la teneur en humidité. Pour une fréquence constante de micro-ondes, le facteur de perte et la tangente de perte augmentent avec la teneur en humidité, tandis que la résistivité diminue. La constante diélectrique augmente avec l'augmentation de la teneur en humidité et une relation linéaire a été établie entre ces deux paramètres.
- Le comportement diélectrique du bois humide dans l'intervalle de fréquences 1 MHz – 3 GHz est caractérisé par une réduction importante de la constante diélectrique et de la tangente de perte avec une fréquence croissante. La profondeur de pénétration diminue également avec la fréquence. Cette conclusion est valable pour les différentes espèces du bois.
- Pour une fréquence de microondes bien déterminée, l'effet de la température sur les propriétés diélectriques du bois est plus prononcé à des teneurs en humidité élevées. Les variations de ces propriétés ont été expliquées par le comportement diélectrique de l'eau présente dans le bois selon ses différents états.
- Les différences entre les propriétés diélectriques des espèces sont attribuées principalement à leurs caractéristiques intrinsèques telles que la teneur en extractibles et la masse volumique.

Dans une deuxième partie, nous nous sommes intéressés à l'étude des propriétés diélectriques des composites à base de PEHD renforcés par des fibres de bois de différentes essences. À l'issue de cette étude, nous avons pu tirer les conclusions suivantes :

- L'augmentation de la proportion des fibres agit sur le comportement diélectrique des CBP. Les résultats quant à l'augmentation de la teneur en fibres montrent un accroissement de la constante diélectrique, du facteur de perte et de la tangente de perte.
- La variation de la résistivité pour les différents types de CBP en fonction de la fréquence est non significative au-delà de 10 MHz. Ainsi, l'ajout des fibres de bois ne modifie pas le caractère résistif du PEHD. Ce qui suggère que les composites peuvent être recommandés pour les applications d'isolation électrique dans la gamme de fréquences élevée.
- Les variations de la constante diélectrique des composites renforcés par des fibres de bois issues de différentes essences s'expliquent principalement par la teneur en cellulose des fibres. En effet, les fibres, dont les teneurs en cellulose sont élevées, possèdent des valeurs constantes diélectriques plus élevées.

Implications pratiques des résultats

Sur le plan pratique, les données de cette étude nous ont permis de tirer les implications suivantes :

- La relation linéaire entre la constante diélectrique et la teneur en humidité pourrait être utile pour le développement d'outils non destructifs de caractérisation de la teneur en humidité du bois.
- Une étude de l'anisotropie du bois nous a permis de trouver la meilleure orientation des fibres pour l'application des techniques de séchage par micro-ondes. Le facteur de perte, qui détermine la puissance dissipée dans le bois, augmente sensiblement pour une orientation du champ électrique parallèle

aux fibres. Ce qui permet de réduire le temps de chauffage et de consommer moins d'énergie.

- La masse volumique a un effet positif sur les propriétés diélectriques du bois. Sur la base de la constante diélectrique, une nouvelle méthode rapide et non destructive peut être développée pour mesurer les variations de la masse volumique du bois par micro-ondes. En effet, le densitomètre à haute fréquence nous permet d'éviter le coût relativement élevé ainsi que le danger relié à l'utilisation des rayons X lors de la mesure de la masse volumique.
- Un modèle de régression multiple obtenu a permis de prédire la constante diélectrique du bois à partir de sa teneur en humidité et de sa masse volumique. La corrélation entre les valeurs de ε' mesurées et prédites est assez importante. Ceci doit être pris en considération lors de détermination de la teneur en humidité du bois du pin gris à partir des valeurs de la constante diélectrique et des corrections de masse volumique doivent être effectuées.

Rapport-gratuit.com 
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Perspectives

Concernant les perspectives de ce travail, il serait intéressant d'étudier l'effet de la teneur en extractibles sur la mesure des propriétés diélectriques plus en détail pour déceler les relations possibles avec les paramètres diélectriques et mieux comprendre l'interaction entre les ondes électromagnétiques et le bois. On devrait aussi approfondir les connaissances sur la variation des propriétés diélectriques des composites bois-polymère en fonction de la température et la teneur en humidité. Ceci permettrait de mieux évaluer leur potentiel d'utilisation pour de nouvelles applications plus lucratives.

L'utilisation de la technique de séchage par micro-ondes est plus rapide et permet d'obtenir un profil uniforme du taux d'humidité, contrairement aux techniques standard de séchage à air chaud. Certes que les deux procédés de séchage influencent les propriétés mécaniques du bois. Certains auteurs ont constaté une

diminution des propriétés mécaniques du bois traité aux micro-ondes comparativement au chauffage conventionnel (Oloyede et Groombridge 2000, Antti et al. 2001). Cependant, d'autres auteurs ont rapporté que les propriétés mécaniques de l'épinette de la Norvège séchée au four conventionnel sont semblables à celles séchées aux micro-ondes pour une teneur en humidité finale de l'ordre de 12% (Hansson et Antti 2004). Dans ce contexte, une recherche plus poussée est encore nécessaire afin d'étudier l'effet du séchage par micro-ondes sur les propriétés mécaniques du bois.

REFERENCES

- Amor, I. B., Arous, M. et Kallel, A. (2014). "Effect of maleic anhydride on dielectric properties of natural fiber composite." *Journal of Electrostatics*, 72 (2), 156-160.
- Antti, A. 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". Proceedings of the 3rd European Cost E15 Workshop on Wood Drying, Helsinki, Finland. 9 p.
- Antti, A. L., Zhao, H. et Turner, I. (2000). "An investigation of the heating of wood in an industrial microwave applicator: Theory and practice." *Drying Technology*, 1665–1676.
- Augustine, P., Kuruvilla, J. et Sabu, T. (1997). "Effect of surface treatments on the electrical properties of low-density polyethylene composites reinforced with short sisal fibers." *Composites science and technology*, 57 (1), 67-79.
- Ay, N. et Sahin, H. (2004). "Dielectric constant of Turkish timbers in the longitudinal direction at a 9.8-GHz frequency." *Forest products journal*, 10 (54), 65-68.
- Barba, A. A. et d'Amore, M. (2012). "Relevance of dielectric properties in microwave assisted processes." *INTECH Open Access Publisher*. University of Salerno, Italy. 91-118.
- Beaudoin, M., Benabdallah, B. et Stevanovic, T. (2009). "Propriétés fondamentales du bois", dans Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, Manuel de foresterie, 2^{ème} éd. Ouvrage collectif, Éditions MultiMondes, Québec. 1325-1364.

Beg, M. D. H. (2007). "The Improvement of Interfacial Bonding, Weathering and Recycling of Wood Fibre Reinforced Polypropylene Composites. " Thèse de doctorat, The university of Waikato, Hamilton, New Zealand. 151p.

Ben'Mbarek, T. (2011). "Utilisation d'une méthode optique sans contact pour décrire le comportement mécanique de composites bois/plastique 'WPC'. " Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour. 168 p.

Bengtsson, M. et Oksman, K. (2006). "The use of silane technology in crosslinking polyethylene/wood flour composites." *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 37 (5), 752-765.

Bodeux, R. (2009). "Rôle des interfaces sur les propriétés diélectriques de condensateurs à base de CCTO déposé par PLD." Thèse de doctorat, Université François – Rabelais. 168p.

Bouafif, H. (2009). "Effets des caractéristiques intrinsèques des fibres de bois et des procédés de mise en forme sur la performance des matériaux composites bois/thermoplastique." Thèse de doctorat, Université du Québec à Montréal. 223 p.

Browning, B. L. (1967). "Methods of wood chemistry". Volume II, Interscience, New York. 498 p.

Callebaut, J. (2007). "Efficacité énergétique". Chauffage par diélectrique. Leonardo-energy. 12 p.

Charrouf, N. (2008). "Caractérisation Electrique des Diélectriques à Faible Permittivité." Mémoire de maitrise en microélectronique, Université de Batna. 82 p.

Chawla, K. K. (2012). "Composite materials: science and engineering." Springer Science & Business Media. 491 p.

Centre de recherche industrielle du Québec CRIQ (2003). "Profil des produits forestiers deuxième transformation – Produits composites Bois-polymère." Rapport présenté au ministère des Ressources naturelles (MRN). 53 p.

De Cherisey, H. (2015). "Etat de l'art sur la production de molécules chimiques issues du bois en France." ADEME. 149 p.

Debye, P. J. W. (1929). "Polar Molecules." Chemical Catalog CO, New York. 83 p.

Dhal, J. P. et Mishra, S. C. (2012). "Processing and Properties of Natural Fiber-Reinforced Polymer Composite." *Journal of Materials*. 6 p.

Dissado, L. A. et Fothergill J.C. (1992). "Electrical Degradation and Breakdown in Polymers". Peter Peregrinus Ltd, London, United Kingdom. 605 p.

Douar, M. A. (2014). "Recherche de matériaux isolants pour la conception d'une nouvelle génération de connecteurs électriques haute tension: influence de la pollution sur les phénomènes de décharges partielles du contournement et de claquage." Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France. 331 p.

Douminge, L. (2010). "Étude du comportement du polyéthylène haute densité sous irradiation ultraviolette ou sollicitation mécanique par spectroscopie de fluorescence." Thèse de doctorat, Université de La Rochelle. 151 p.

Dubois, J. C. (1998). "Propriétés diélectriques des polymères". Techniques de l'ingénieur, E 1 850, 1 - 15.

Fahn, A. (1990). "Plant anatomy." Oxford, Pergamon Press.

Fengel, D. et Wegner, G. (1989). "Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions. " Berlin, Germany, Walter de Gruyter. 617 p.

Filali, B., Rhazi, J. E. et Ballivy, G. (2006). "Mesure des propriétés diélectriques du béton par une large sonde coaxiale à terminaison ouverte." *Canadian journal of physics*, 84 (5), 365-379.

Garrett, L. (2007). "Get ready for biology." San Francisco. 258 p.

George, J., Sreekala, M. S. et Thomas, S. (2001). "A Review on Interface Modification and Characterization." *Polymer engineering and science*, 41 (9), 1471-1482.

Gibson, R. F. (1994). "Principles of composites materials mechanics." *McGraw-Hill in Mechanical Engineering*. 425 p.

Glass, S. V. et Zelinka, S. I. (2010). "Moisture relations and physical properties of wood, Wood handbook-Wood as an engineering material." Forest Products Laboratory, United States Department of Agriculture Forest Service, Madison, Wisconsin. 4-1 - 4-19.

Gosselin, R. (2005). "Injection de mousses composites bois/plastiques d'origine postconsommation." Maitrise en génie chimie, Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval, Québec. 130 p.

Grossin, D. (2006). "Développement du procédé de chauffage micro-ondes en vue de l'élaboration de céramiques à propriétés électriques particulières." Thèse de doctorat, Université de Caen. 187 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*, 171(2006). 467-470.

Haygreen, J. G. et Bowyer, J. L. (1989). "Forest products and wood science: An introduction." Iowa State University Press. 500 p.

Holmes, W. S., Bogosanovic, M., Emms, G. et Mukhopadhyay, S. (2014). "Effects of seasonal growth rings on the microwave measurement of wood." *Proceedings of the 8th International Conference on Sensing Technology (Ed.)*, 412 - 417.

Huang, A. (2009). "Recent Advances in Dielectric Materials." Nova Science Publishers. 792 p.

Isayev, A. I. (1987). "Injection and Compression Molding Fundamentals." Marcel Dekker Inc, New York. 704 p.

Jacob, M., Varughese, K. T. et Thomas, S. (2006). "Dielectric characteristics of sisal–oil palm hybrid biofibre reinforced natural rubber biocomposites." *Journal of Material Science*, 41, 5538–5547.

James, W. L. (1975). "Dielectric properties of wood and hardboard: variation with temperature, frequency, moisture content, and grain orientation." *US Forest Product Laboratory Research paper*, 1-32.

Kabir, M. F., Daud, W. M., Khalid, K. B. et Sidek, H. A. A. (2001). "Temperature dependence of the dielectric properties of rubber wood." *Wood and Fiber Science*, 33 (2), 233-238.

Kabir, M. F., Khalid, K. B., Daud, W. M. et Aziz, S. H. (1997). "Dielectric properties of rubber wood at microwave frequencies measured with an open-ended coaxial line." *Wood and Fiber Science*, 29 (4), 319-324.

Klyosov, A. (2007). "Wood-plastic composites." *John Wiley & Sons*. 698 p.

Kouassi, K. A. E. A. (2013). " L'utilisation des tuyaux annelés en polyéthylène pour l'assainissement en Côte d'Ivoire. Quelle rentabilité? " Institut national polytechnique Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro, Côte d'Ivoire. 100 p.

Kollmann, F. F. et Côté Jr, W. A. (1968). "Principles of wood science and technology." Solid Wood. 592 p.

Koubaa, A., Boubtane, S., Djedidi, Z. et Erchiqui, F. (2013). "Dielectric Properties of Wood: Variations and Implications on Heating and Non-Destructive Testing." The Second International Conference on "Research to Applications & Markets". Sousse, Tunisia.

Koubaa, A., Perré, P., Hutcheon, R. M. et Lessard, J. (2008). "Complex Dielectric Properties of the Sapwood of Aspen, White Birch, Yellow Birch, and Sugar Maple." *Drying Technology*, 26, 568-578.

Laurent, C. (1999). "Diélectriques solides et charge d'espace." Techniques de l'Ingénieur, Génie électrique: D2305, 1-13.

Le Baillif, M. et Oksman, K. (2006). "The influence of the extrusion process on bleached pulp fiber and its composites." *In Proceedings of the progress in wood and biofibre plastic composites conference*. Toronto, Canada.

Lee, H. W. (2003). "Combined microwave and connective drying of Korean wood species." *Proceedings 8th International IUFRO Wood Drying Conference, Brasov, Romania*, 146–155.

Legros, N., Mihai, M., Iordan, A. et Alemdar, A. (2011). "Biocomposites renforcés de fibres de bois à matrice thermoplastique." Colloque Environnement Global des Composites, Sherbrooke. 24 p.

Lin, R. T. (1967). "Review of the dielectric properties of wood and cellulose." *Forest Products Journal*, 17 (7), 61-66.

Lin, R. T. (1973). "Wood as an orthotropic dielectric material." *Wood and Fiber Science*, 5 (3), 226-236.

Lu, J. Z., Qinglin, W. et McNabb Jr, H. S. (2000). "Chemical coupling in wood fiber and polymer composites: a review of coupling agents and treatments." *Wood and Fiber Science*, 32 (1), 88-104.

Macheix, J. J., Fleuriet, A. et Jay-Allemand, C. (2005). "Les composés phénoliques des végétaux: un exemple de métabolites secondaires d'importance économique." *PPUR presses polytechniques*. 192 p.

Markiewicz, E., Paukszta, D. et Borysiak, S. (2012). "Acoustic and dielectric properties of polypropylene-lignocellulosic materials composites, Polypropylene, Dr. Fatih Dogan (Ed.)." *In Tech*. 500 p.

Martinez-Vega, J. (2010). "Dielectric materials for electrical engineering." John Wiley & Sons, Hoboken, USA. 580 p.

Melle, S. (2005). "Analyse et modélisation des phénomènes de chargement de diélectriques dans les MEMS RF : application à la fiabilité de microcommutateurs électromécaniques micro-ondes." Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse. 167 p.

Meredith, R. J. (1998). "Engineers' handbook of industrial microwave heating." The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom. 363 p.

Migneault, S., Koubaa, A. et Perré, P. (2014). "Effect of Fiber Origin, Proportion, and Chemical Composition on the Mechanical and Physical Properties of Wood-Plastic Composites." *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 34 (4). 1-21.

Miller, R. (1999). "Structure of Wood; Wood handbook-Wood as an engineering material." General technical report. Forest Products Laboratory, United States Department of Agriculture Forest Service, Madison, Wisconsin. 463 p.

Monnier, D. (2010). "Etude des dépôts par plasma ALD de diélectriques à forte permittivité diélectrique (dits «High-K») pour les applications capacités MIM, Chemical and Process Engineering." Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France. 149 p.

Mullins, E. J. et McKnight, T. S. (1981). "Les bois du Canada: leurs propriétés et usages." Éditions du Pélican conjointement avec le Service canadien des forêts et le Centre d'édition du gouvernement du Canada, 3, 509 p.

Murphy, J. D. et McCarthy, K. (2005). "Ethanol production from energy crops and wastes for use as a transport fuel in Ireland." *Applied Energy*, 82, 148-166.

Navi, P. et Heger, F. (2005). "Comportement thermo-hydrromécanique du bois: applications technologiques et dans les structures." PPUR presses polytechniques. 298 p.

Nenez, S. (2001). "Céramiques diélectriques commandables pour applications micro-ondes: composites à base de titanate de baryum-strontium et d'un oxyde non ferroélectrique." Thèse de doctorat, Université de Bourgogne. 233p.

Niepce, J.C. et Haussone, J.M. (1994). "BaTiO₃:matériau de base pour les condensateurs céramiques." Collection forceram, Editions Septima, 1, 19 p.

Niska, K. O. et Sain, M. (2008). "Wood-polymer composites." Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC. 353 p.

Nkeuwa, W. N. (2010). "Détermination de la porosité des parois cellulaires du bois." Mémoire de maîtrise, Université Laval. 116 p.

- Norimoto, M., Hayashi, S. et Yamada, T. (1978). "Anisotropy of dielectric constant in coniferous wood." *Holzforschung*, 32 (5), 167-172.
- Norimoto, M. et Yamada, T. (1970). "The Dielectric Properties of .Wood V, On the Dielectric Anisotropy of Wood." *Wood Research*, 50 (63), 12-32.
- Norimoto, M. et Yamada, T. (1972). "The dielectric properties of wood. VI. On the dielectric properties of the chemical constituent of wood and the dielectric anisotropy of wood." *Wood Research*, 52, 31-43.
- Notingher, P. V., Stancu, C., Enescu, I. et Enescu, A. (2010). "Dielectric Properties of Wood-Polymer Composites." *Materiale Plastice*, 47 (4), 393-398.
- Oloyede, A. et Groombridge, P. (2000). "Influence of microwave heating on the mechanical properties of wood". *Journal of Materials Processing Technology*, 100 (1). 67-73.
- Orlowska, S. (2003). "Conception et prédiction des caractéristiques diélectriques des matériaux composites à deux et trois phases par la modélisation et la validation expérimentale". Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon. 134 p.
- Pathania, D., Singh, D. and Sharma, D. (2010). "Electrical properties of natural fiber graft co-polymer reinforced phenol formaldehyde composites." *Optoelectronics and Advanced Materials - Rapid Communications*, 4 (7), 1048 - 1051.
- Pecht, M., Agarwal, R., McCluskey, F. P., Dishongh, T. J., Javadpour, S., & Mahajan, R. (1998). "Electronic packaging materials and their properties." CRC press. 182 p.

- Peyskens, E., de Pourcq, M., Stevens, M. et J. Schalck, G. (1984). "Dielectric properties of softwood species at microwave frequencies." *Wood Science and Technology*, 18, 267-280
- Raskin A. (2010). "Les résines composites". Université Médicale Virtuelle Francophone. 37 p.
- Raven, P. H., Evert, R. F. et Eichhorn, S. E. (1999). "Biology of plants." New York, W.H. Freeman. 686 p.
- Resch, H. (2006). "High-frequency electric current for drying of wood-historical perspectives." *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, 8 (2), 67-82.
- Rowe, J. W. (1989). "Natural products of woody plants I : Chemicals extraneous to the lignocellulosic cell wall." Springer-Verlag, Berlin. 1243 p.
- Rowell, R. M. (2005). "Handbook of wood chemistry and wood composites." CRC Press. 446 p.
- Saheb, D. N. et Jog, J. P. (1999). "Natural fiber polymer composites: a review." *Advances in polymer technology*, 18 (4), 351-363.
- Sahin, H. et Ay, N. (2004). "Dielectric properties of hardwood species at microwave frequencies." *Journal of Wood Science*, 50, 375–380.
- Sahraoui, K. (2008). "Etude des propriétés diélectriques et structurales des céramiques du type BaTiO₃-CaTiO₃." Maitrise en physique, Université Mentouri-Constantine. 98 p.
- Shmulsky, R. et Jones, P. D. (2011). "Forest products and wood science." Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons. 477 p.

Sjöström (1993). "Wood Chemistry– Fundamentals and Applications " *San Diego, USA, Academic Press*, 51–108.

Stark, N. M., Matuana, L. M. et Clemons, C. M. (2004). "Effect of processing method on surface and weathering characteristics of wood–flour/HDPE composites." *Journal of Applied Polymer Science*, 29 (3), 1021-1030.

Teirikangas, M., Juuti, J. et Jantunen, H. (2011). "Organic-inorganic RF composites with enhanced permittivity by nanoparticle additions." *Progress In Electromagnetics Research*, 115, 147-157.

Tomppo, L., Tiitta, M., Laakso, T., Harju, A., Venäläinen, M. et Lappalainen, R. (2009). "Dielectric spectroscopy of Scots pine." *Wood Science and Technology*, 43 (7-8), 653-667.

Torgovnikov, G. I. (1993). "Dielectric Properties of Wood-Based Materials." Springer Berlin Heidelberg. 169 p.

Trotignon, J.P., Verdus, J., Dobraczynski, A., Piperau, M. 1996. "Matières plastiques, structures-propriétés, mise en oeuvre, normalisation." Edition Nathan. 216 p.

Vermaas, H. F., Pound, J. et Borgin, K. B. (1974). "The loss tangent of wood and its importance in dielectric heating." *South African Forestry Journal*, 89 (1), 5-8.

Wang, J. H et Wideman, G. J. (2013). "Method for Forming a Thermoplastic Composition that Contains a Renewable Biopolymer." Brevet, US 20130154151 A1, Kimberly-Clark Worldwide, Inc.

Wertz, J. L. (2011). "Les hémicelluloses." Note de synthèse, Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège. 16 p.

Wertz, J. L. (2010). "La lignine." Note de synthèse, Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège. 23 p.

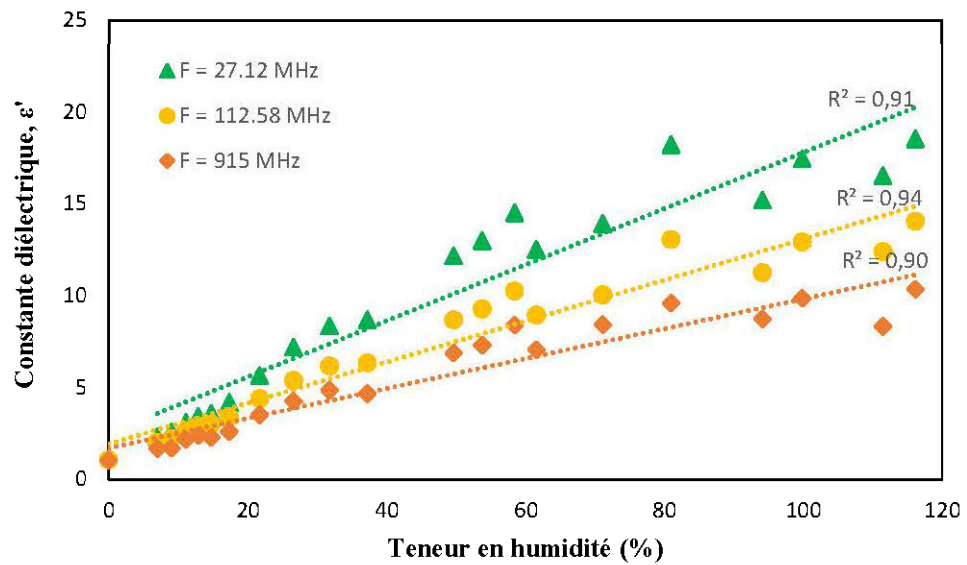
Wolcott, M. P. et Englund, K. (1999). "A technology review of wood-plastic composites." Proceedings of the 33rd international particleboard and composite materials symposium. Pullman WA: 103-111.

Zadorecki, P. et Michell, A. J. (1989). "Future prospects for wood cellulose as reinforcement in organic polymer composites." *Polymer Composites*, 10 (2), 69-77.

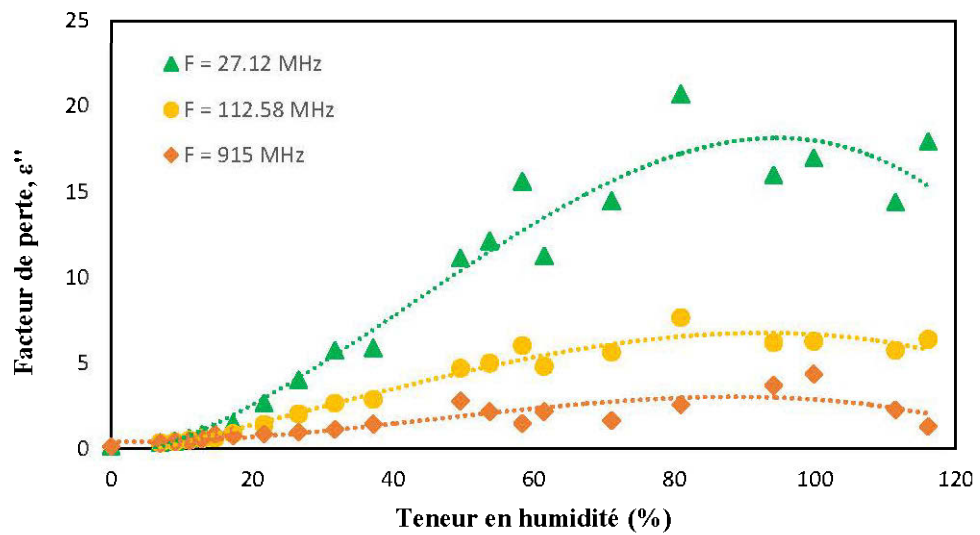
Zhang, S. Y. et Koubaa, A. (2008). "Les résineux de l'est du canada." Forintek Canada corporation.

ANNEXE A

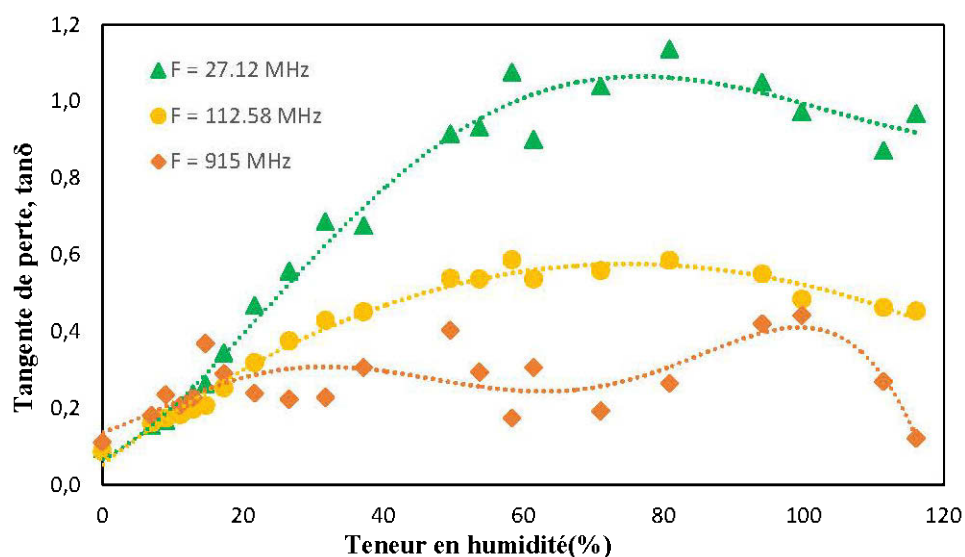
RÉSULTATS DES PROPRIÉTÉS DIÉLECTRIQUES DU BOIS



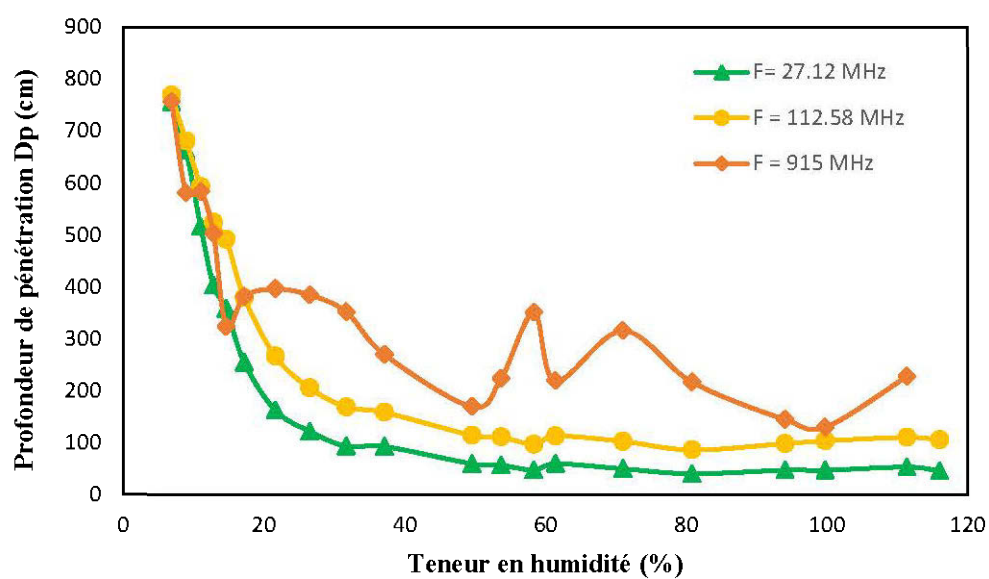
Annexe A.1 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') de l'épinette blanche en fonction de la teneur en humidité mesurée à différentes fréquences.



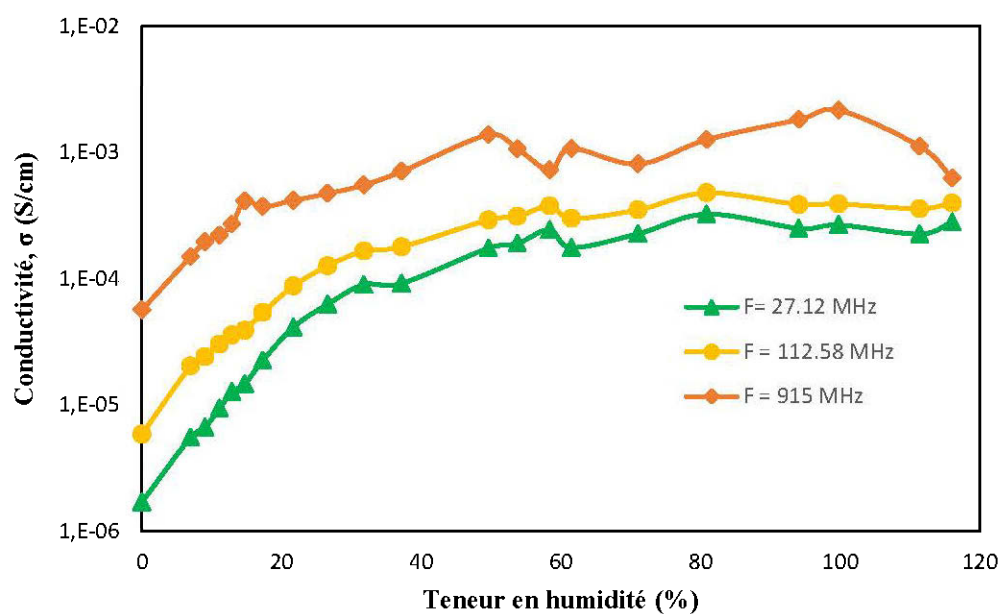
Annexe A.2 : Variation du facteur de perte (ϵ'') de l'épinette blanche en fonction de la teneur en humidité mesurée à différentes fréquences.



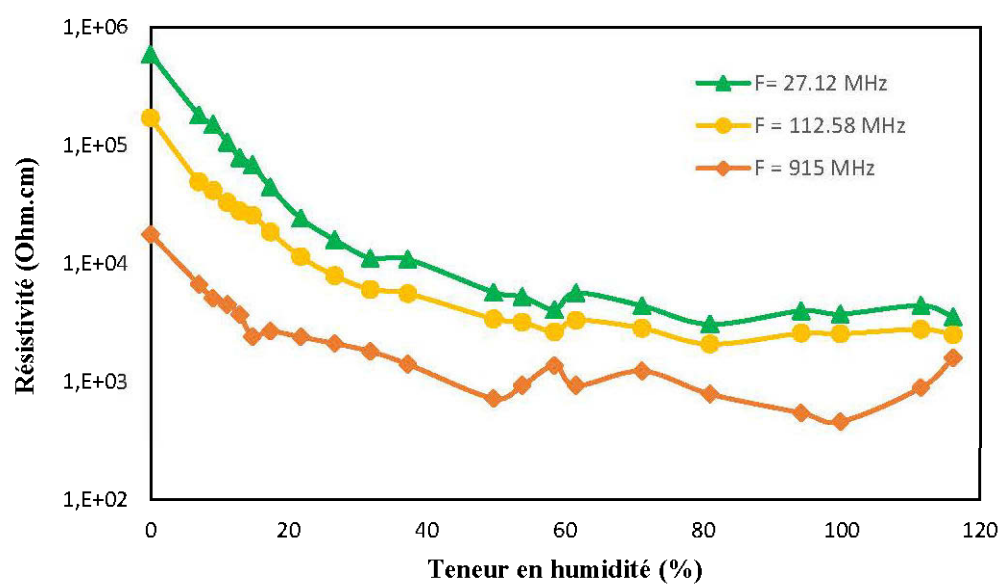
Annexe A.3 : Variation de la tangente de perte ($\tan\delta$) de l'épinette blanche en fonction de la teneur en humidité mesurée à différentes fréquences.



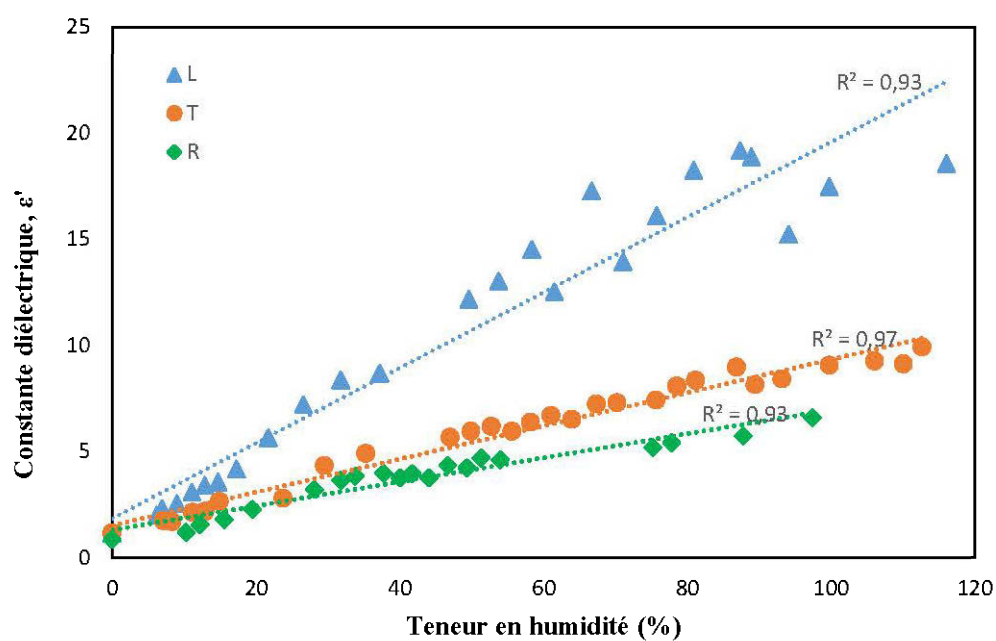
Annexe A.4 : Variation de la profondeur de pénétration de l'épinette blanche en fonction de la teneur en humidité mesurée à différentes fréquences.



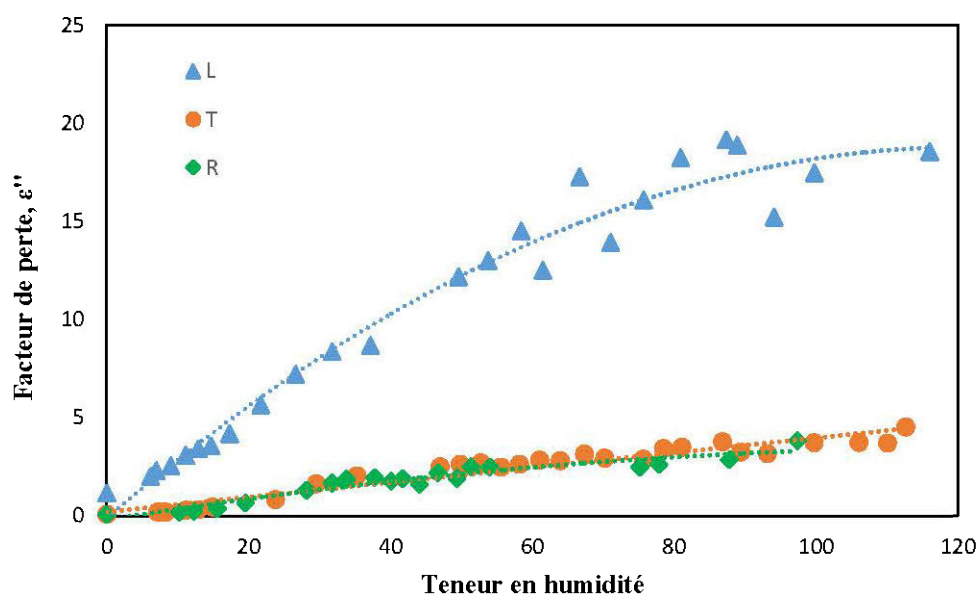
Annexe A.5 : Variation de la conductivité de l'épinette blanche en fonction de la teneur en humidité mesurée à différentes fréquences.



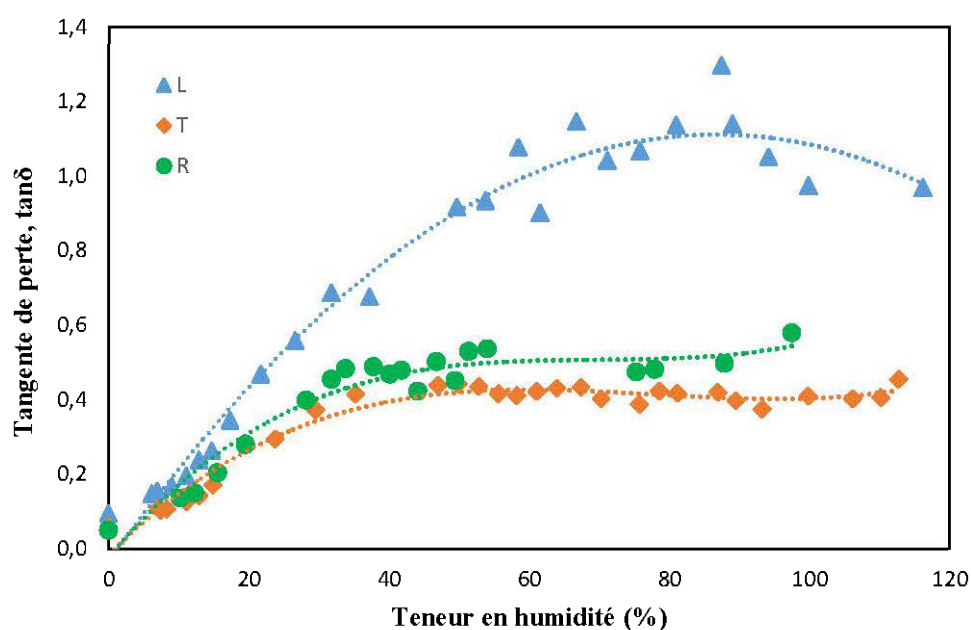
Annexe A.6 : Variation de la résistivité de l'épinette blanche en fonction de la teneur en humidité mesurée à différentes fréquences.



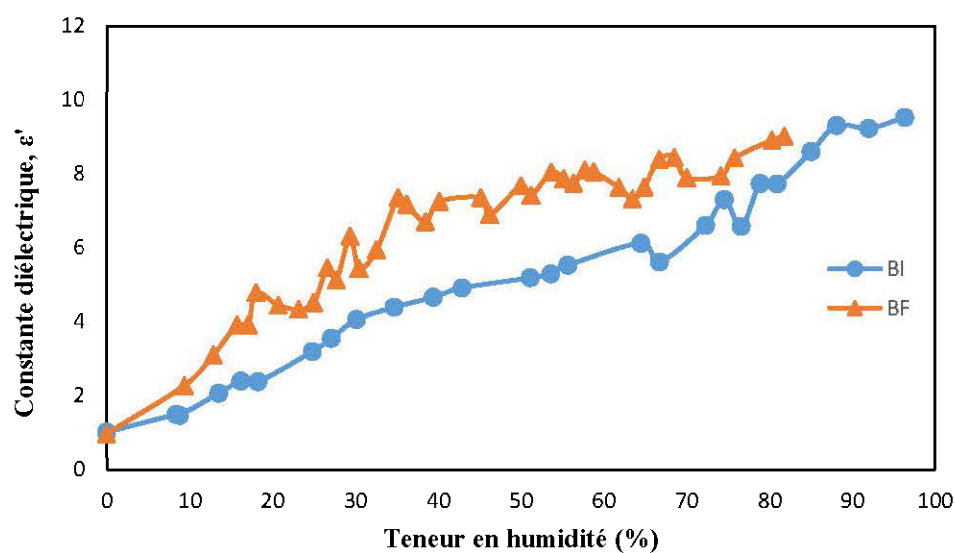
Annexe A.7 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') de l'épinette blanche avec la teneur en humidité dans les trois directions



Annexe A.8 : Variation du facteur de perte (ϵ'') de l'épinette blanche avec la teneur en humidité dans les trois directions



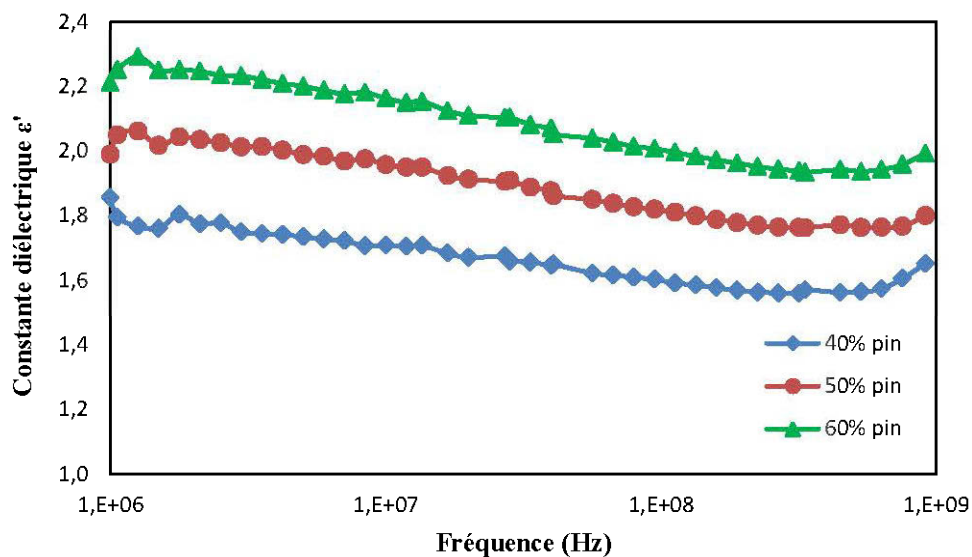
Annexe A.9 : Variation de la tangente de perte ($\tan\delta$) de l'épinette blanche avec la teneur en humidité dans les trois directions



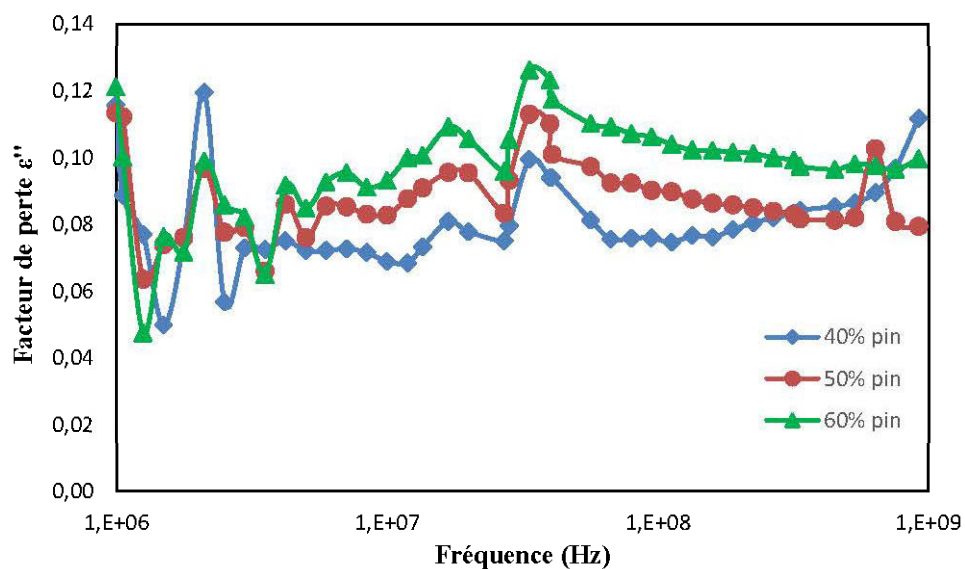
Annexe A.10 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') du chêne en fonction de la teneur en humidité mesurée à une fréquence constante (915 MHz).

ANNEXE B

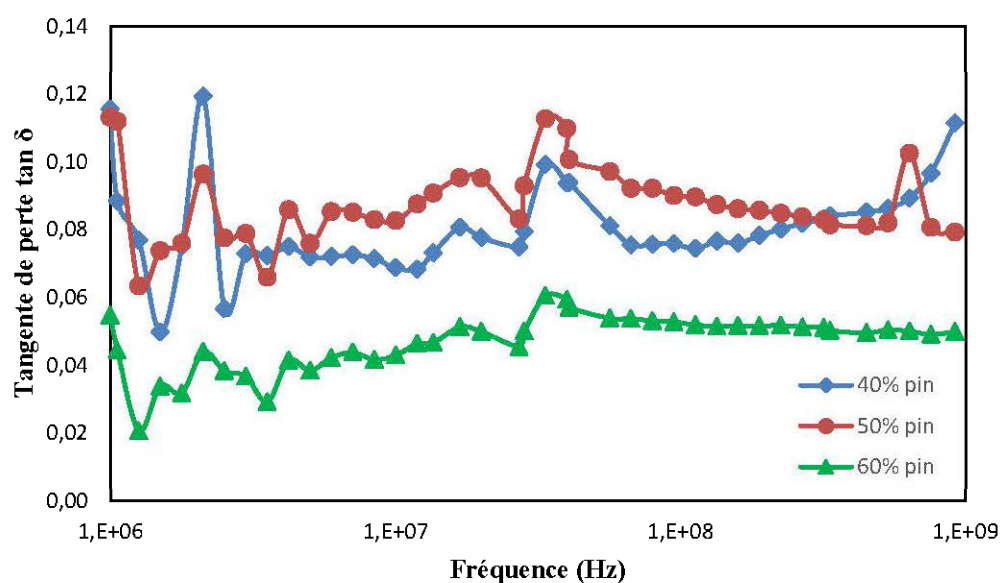
RÉSULTATS DES PROPRIÉTÉS DIÉLECTRIQUES DES COMPOSITES BOIS-POLYMÈRE



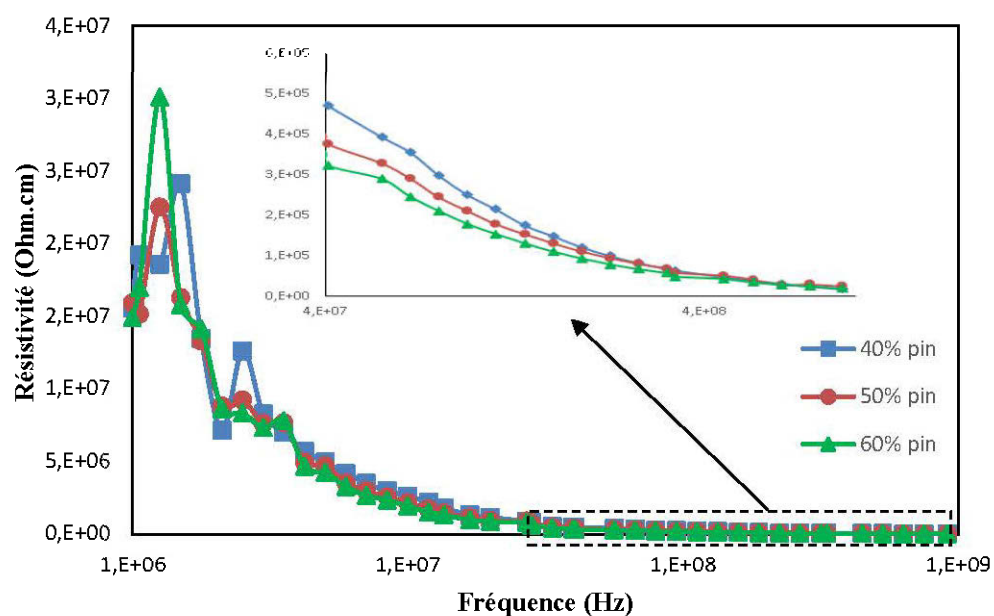
Annexe B.1 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') du composite en fonction de la fréquence pour différents teneur en fibres.



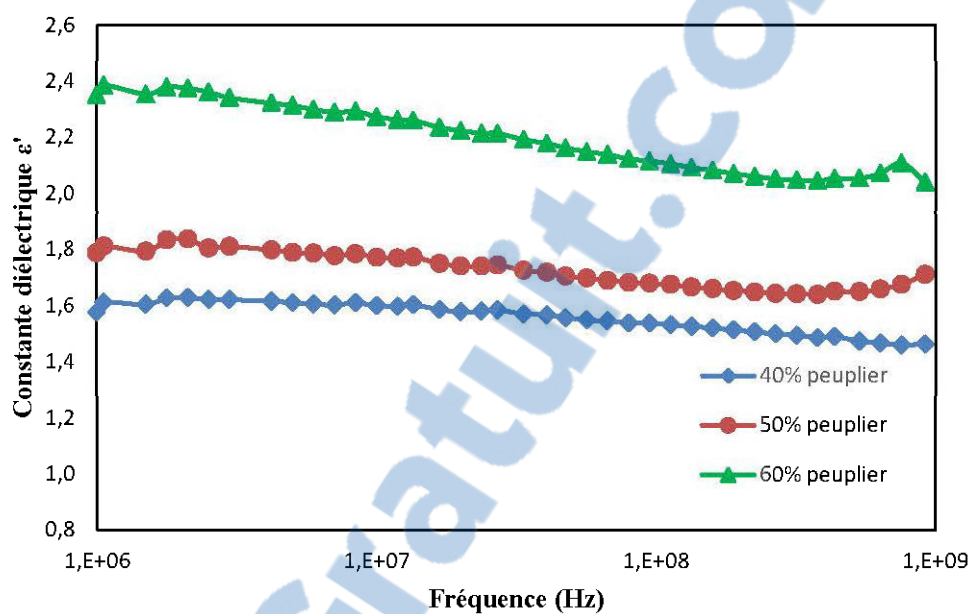
Annexe B.2 : Variation du facteur de perte (ϵ'') du composite en fonction de la fréquence pour différents teneur en fibres.



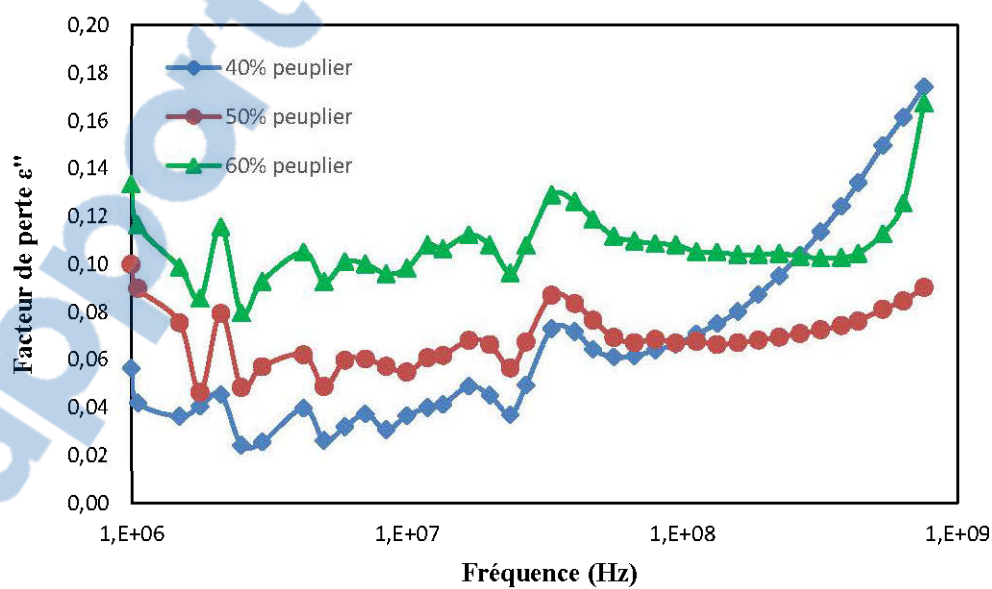
Annexe B.3 : Variation de la tangente de perte ($\tan \delta$) du composite en fonction de la fréquence pour différents teneur en fibres.



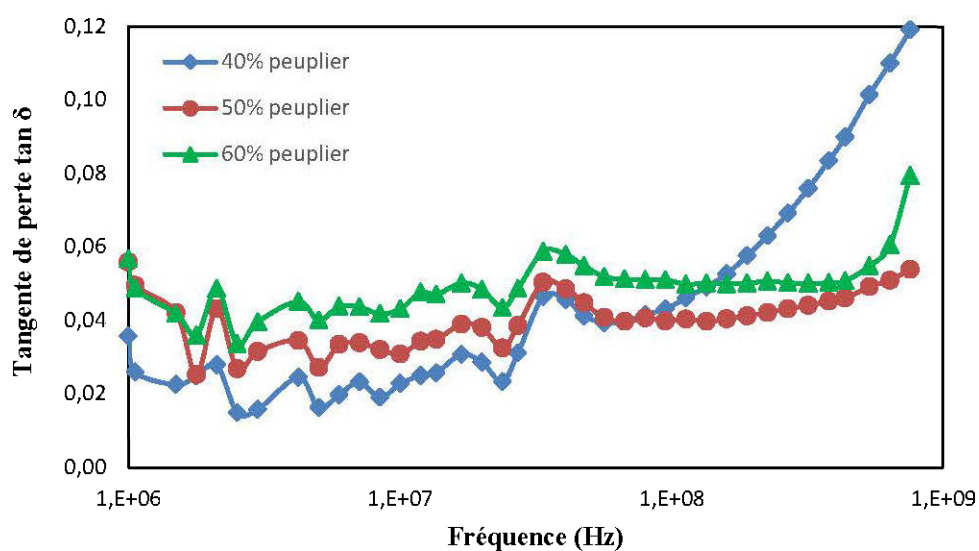
Annexe B.4 : Variation de la résistivité du composite en fonction de la fréquence pour différents teneur en fibres.



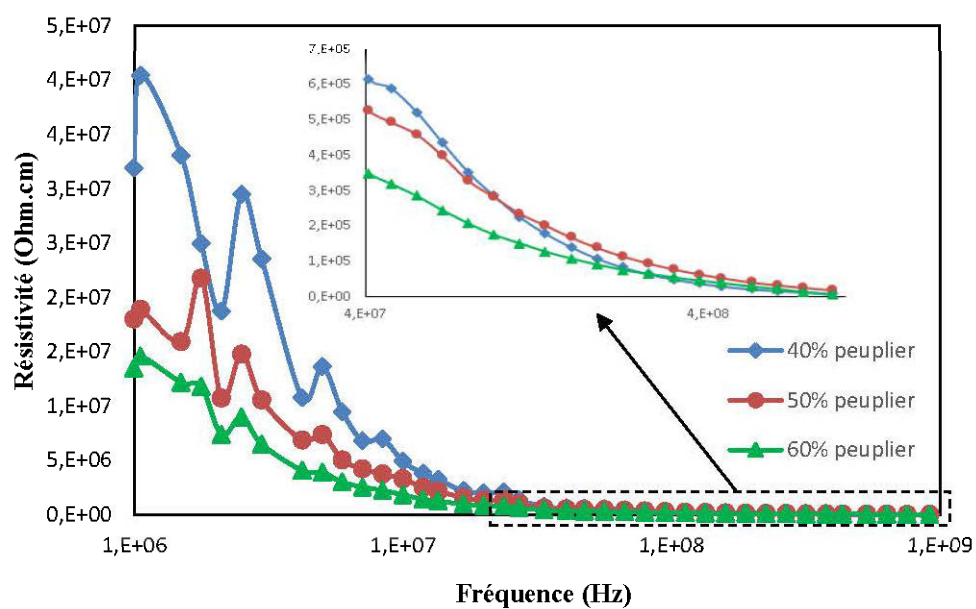
Annexe B.5 : Variation de la constante diélectrique (ϵ') du composite en fonction de la fréquence pour différents teneur en fibres.



Annexe B.6 : Variation du facteur de perte (ϵ'') du composite en fonction de la fréquence pour différents teneur en fibres.



Annexe B.7 : Variation de la tangente de perte ($\tan \delta$) du composite en fonction de la fréquence pour différents teneur en fibres.



Annexe B.8 : Variation de la résistivité du composite en fonction de la fréquence pour différents teneur en fibres.