

# THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Structure de Recherche : UFR « Sciences du Bois »

Discipline : Sciences de l'ingénieur

Spécialité : Sciences du Bois

---

Présentée et soutenue le : 10/11/2018 par :

**Narjis EL IMAME**

**Modélisation électrique du bleuissement du pin maritime  
et étude de la dégradation des finitions appliquées sur certaines essences du  
bois commercialisées au Maroc**

## JURY

<i>KABOUCI Bousselham, PES, Faculté des Sciences, Rabat</i>	<i>Président</i>
<i>RAHOUTI Mohamed, PES, Faculté des Sciences, Rabat</i>	<i>Directeur de Thèse</i>
<i>ZIANI Mohsine, PES, Institut National des Sciences de l'Archéologie et du Patrimoine, Rabat</i>	<i>Co-Directeur de Thèse</i>
<i>HMYENE Mohamed, PES, Faculté des Sciences et Techniques, Settat</i>	<i>Rapporteur/Examineur</i>
<i>HAKAM Abdelillah, PES, Faculté des Sciences, Rabat</i>	<i>Rapporteur/Examineur</i>
<i>KIFANI-SAHBANE Fatima, PES, Faculté des Sciences, Rabat</i>	<i>Examineur</i>
<i>MERLIN André, PES, Université de Lorraine, France</i>	<i>Examineur</i>
<i>LABBI Abdelkrim, Ingénieur, Président du CTIBA, Casablanca</i>	<i>Invité</i>
<i>SESBOU Abdessadek, PES, Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs, Salé</i>	<i>Invité</i>

**Année Universitaire : 2017-2018**

## DEDICACES

A la mémoire de mon **PAPA Pr. Ahmed EL IMAME**. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation. J'aurais aimé que tu sois avec moi en ces moments.

A ma très chère **MAMAN**. Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A mon très cher mari **Youssef**. Quand je t'ai connu, j'ai trouvé l'homme de ma vie et mon âme sœur. Tes sacrifices, ton soutien moral et matériel, ta gentillesse sans égale m'ont permis de réussir. Sans ton aide, tes conseils et tes encouragements ce travail n'aurait jamais vu le jour. Que ce travail soit le témoignage de ma reconnaissance et de mon amour sincère et fidèle.

A mes chers **Anas, Rabab et Zakaria**. Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des frères, sœur et des amis sur qui je peux compter. Je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur

Je ne saurai oublier de remercier **mes beaux-parents, mes belles sœurs** spécialement ma chère et adorable **Halima** et **mes beaux frères** pour leurs encouragements. Que Dieu, le tout puissant, vous accorde santé et longue vie.

A tous mes ami(e)s. En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble. A ma très chère **Fatima Lahlali** qui m'a toujours encouragé et m'a donné beaucoup d'énergie positive pour continuer.

Enfin, j'exprime mes vifs remerciements à tous le personnel technique et administratif du **CTIBA** pour leur collaboration et leurs qualités humaines. Merci à **Ouafae** pour sa grande sympathie et son amitié, à **Brahim** pour son aide et les moments partagés avec **Fatima**, et à Monsieur **Matar** pour ses conseils.

**A mes perles ISRAE et YACOUB**

## AVANT-PROPOS

Ce travail a été réalisé dans le cadre de l'Unité de Formation et de Recherche (UFR) en Sciences du Bois de la Faculté des Sciences de Rabat, Université Mohammed V, en collaboration avec le Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur le Matériau Bois (LERMAB) de l'Université de Lorraine, France et le Centre Technique des Industries du Bois et de l'Ameublement (CTIBA) de Casablanca, Maroc.

J'exprimer ma profonde gratitude a mon Directeur de thèse, Monsieur **Mohamed Rahouti**, Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat, Université Mohammed V et responsable de l'UFR 'Sciences du bois'.

Je tiens à remercier tous les membres de l'UFR 'Sciences du Bois' et en particulier ceux qui ont participé à l'encadrement de ce travail : Monsieur **Mohsine Ziani**, Professeur à l'Institut National des Sciences de l'Archéologie et du Patrimoine de Rabat et co-Directeur de thèse.

Je tiens à remercier Monsieur **Bousselhame Kabouchi**, Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat et membre de l'UFR 'Sciences du Bois', d'avoir bien voulu accepter d'être rapporteur et président du jury de Thèse, Monsieur **Mohamed Hmyene** Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Settat et membre de l'UFR 'Sciences du Bois', d'avoir bien voulu accepter d'être rapporteur et de participer au jury de Thèse et Madame **Fatima kifani-Sahbane**, Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat et membre de l'UFR 'Sciences du Bois', pour avoir aimablement accepté de juger ce travail.

J'exprimer ma profonde gratitude à Messieurs **Abdelillah Hakam**, Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat, Université Mohammed V et **André Merlin**, Professeur à Université de Lorraine, France, qui m'ont accueilli et guidé tout au long du développement de ce travail. Je les remercie pour tout le savoir qu'ils m'ont transmis, pour la confiance qu'ils m'ont accordée, pour leur patience, leur implication et leurs encouragements.

C'est pour moi un très grand honneur d'inviter Monsieur **Abdelkrim Labbi**, Président du CTIBA et Monsieur **Abdessadek Sesbou**, Professeur à l'Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs de Salé et membre de l'UFR 'Sciences du bois', ainsi que Monsieur **Mohamed El Kortbi** ancien Directeur du CTIBA et membre de l'UFR 'Sciences du Bois'. Je les remercie pour leurs efforts pour le developement du secteur bois au Maroc, pour l'intérêt qu'ils ont toujours témoigné à ce travail et pour avoir aimablement accepté de juger ce travail.

A tous les membres présents à cette soutenance et qui étaient les fondateurs de l'UFR 'Sciences du Bois' et mes Professeurs, je leur dis Merci pour ce que vous avez accompli.

## Résumé

La première partie de ce travail concerne l'application de la Spectroscopie d'Impédance Electrique (SIE) pour la détection précoce du bleuissement du bois de pin maritime (*Pinus pinaster* L.). La caractérisation de ce bois par SIE a été réalisée dans un intervalle de fréquence de 40 Hz à 100 KHz à l'aide d'un Hewlett-Packard LCZ- mètre 3330. Le modèle double-DCE (ZARC) a été utilisé comme circuit équivalent. Les paramètres d'impédance électrique du modèle tels que la résistance intracellulaire ( $R_i$ ), les résistances extracellulaires ( $R_{e1}$  et  $R_{e2}$ ), les temps de relaxation ( $\tau_1$  et  $\tau_2$ ) et les coefficients de distribution des temps de relaxation ( $\Psi_1$  et  $\Psi_2$ ) ont été déterminés. Une relation entre le phénomène de bleuissement et les paramètres électriques du modèle a été trouvée et discutée. Les résultats obtenus indiquent que le bleuissement a été accompagné d'une diminution des valeurs des temps de relaxation ( $\tau_1$  et  $\tau_2$ ) et des résistances extracellulaires ( $R_{e1}$  et  $R_{e2}$ ). Une diminution de 50% de ces valeurs a été constatée.

La deuxième partie est une étude comparative de plusieurs systèmes Bois / Finition. Par définition, un système Bois / Finition est un échantillon qui est composé d'un support en bois et un ou plusieurs produits de finition déposés sur ce bois. Le choix des systèmes Bois / Finitions étudiés a été réalisé en concertation avec les industriels de la filière bois-finition de la région de Casablanca au Maroc. L'objectif était de trouver le système Bois / Finition qui présente la meilleure durabilité en utilisation extérieure. Trois essences du bois (*Pinus sylvestris*, *Quercus robur* et *Khaya ivorensis*) ainsi que six produits de finition ont été utilisés. Les résultats des mesures de l'adhérence, de la perméabilité à l'eau liquide, de l'aspect visuel et de la couleur dans le système de couleur CIELab avant et après vieillissement accéléré au QUV et à la roue de dégradation Gardner, ont permis de faire un classement de la durabilité des différents systèmes Bois / Finition étudiés.

**Mots-clés (5-6 mots) :** Pin Maritime, Bleuissement, Spectroscopie d'Impédance Electrique (SIE), Modèle DCE (ZARC), Finition, Vieillissement artificielle au QUV, Colorimétrie.

## Abstract

The first part of this work concerns the application of Electrical Impedance Spectroscopy (EIS) for the early detection of blue stain in maritime pine (*Pinus pinaster* L.). The characterization of this wood by EIS was carried out in a frequency range of 40 Hz to 100 KHz using a Hewlett-Packard LCZ-meter 3330. The double-DCE model (ZARC) was used as an equivalent circuit. The model's electrical impedance parameters such as intracellular resistance ( $R_i$ ), extracellular resistances ( $R_{e1}$  and  $R_{e2}$ ), relaxation times ( $\tau_1$  and  $\tau_2$ ) and relaxation time distribution coefficients ( $\Psi_1$  and  $\Psi_2$ ) have been determined. A relationship between the bluing phenomenon and the electrical parameters of the model has been found and discussed. The results obtained indicate that blue staining was accompanied by a decrease in the values of relaxation times ( $\tau_1$  and  $\tau_2$ ) and extracellular resistances ( $R_{e1}$  and  $R_{e2}$ ). A 50% decrease in these values was noted. The second part is a comparative study of several Wood / Finishing systems. By definition, a Wood / Finish system is a sample that consists of a wooden support and one or more finishing products deposited on this wood. The choice of Wood / Finish systems studied was carried out in consultation with the manufacturers of the wood-finishing sector of the Casablanca region in Morocco. The objective was to find the Wood / Finishing system that offers the best durability in outdoor use. Three wood species (*Pinus sylvestris*, *Quercus robur* and *Khaya ivorensis*) and six finishing products were used. The results of the adhesion, liquid water permeability, visual appearance and color measurements in the CIELab color system before and after accelerated aging at the QUV and Gardner Degradation Wheel allowed to make a classification of the durability of the different systems Wood / Finishing studied.

### Keywords

Maritime Pine, Bluing, Electrical Impedance Spectroscopy (EIS), DCE Model (ZARC), Finishing, QUV Artificial Aging, Colorimetry.

## SOMMAIRE

	Page
<b>Dédicaces</b>	i
<b>Avant propos</b>	ii
<b>Résumé</b>	iii
<b>Abstract</b>	iv
<b>Liste des tableaux</b>	ix
<b>Liste des figures</b>	xi
<b>Liste des abréviations</b>	xiii
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	1

<b>PREMIERE PARTIE MODELISATION DU BLEUISSEMENT DU BOIS DE PIN MARITIME</b>	4
---	---

<b>CHAPITRE I GENERALITES SUR LA MODELISATION ELECTRIQUES DES CIRCUITS BIOLOGIQUES</b>	5
I.1. Introduction	6
I.2. Utilité et avantages de la technique SIE	6
I.3. Modélisation	7
I.3.1. Eléments usuels d'un circuit électrique	8
I.3.2. Elément à phase constante (Constant Phase Element : CPE)	8
I.3.3. Paramètres électro-physiologiques	8
I.3.3.1. Résistances intra et extracellulaires	9
I.3.3.2. Temps de relaxation	10
I.3.3.3. Coefficient de distribution du temps de relaxation	10
I.4. Matériel et principe de mesure d'impédance	11
I.4.1. LCZ Mètre	11
I.4.2. Principe de mesure d'impédance	11
I.5. Conclusion	13

<b>CHAPITRE II MODELISATION DE LA REPONSE EN FREQUENCE DU BOIS DE PIN MARITIME (<i>Pinus pinaster</i> L.) AUX BASSES FREQUENCES</b>	14
---	----

II.1. Introduction	15
II.2. Matériel et méthodes	15
II.2.1. Matériel	15
II.2.2. Mesures diélectriques	17
II.2.3. Modélisation électrique	17
II.3. Résultats et discussion	18
II.4. Conclusion	21

<b>CHAPITRE III</b> <b>ETUDE ELECTRIQUE DU BOIS DE PIN MARITIME PAR RAPPORT A LA</b> <b>COLORATION BLEUE</b>	22
III.1. Introduction	23
III.2. Matériel et méthodes	24
III.2.1. Matériaux	24
III.2.2. Mesures d'impédance	25
III.2.3. Modélisation électrique	25
III.3. Résultats et discussion	26
III.3.1. Réponse en fréquence	26
III.3.2. Modélisation de la réponse en fréquence	28
III.3.3. Extraction des paramètres électriques du modèle Double-DCE (ZARC)	29
III.4. Conclusion	29

<b>DEUXIEME PARTIE</b> <b>ETUDE DE LA DEGRADATION DES FINITIONS APPLIQUEES SUR CERTAINES</b> <b>ESSENCES DU BOIS COMMERCIALISEES AU MAROC</b>	31
---	----

<b>CHAPITRE IV</b> <b>MATERIEL ET METHODES DES SYSTEME BOIS / FINITION</b>	32
IV.1. Introduction	33
IV.2. Support bois	34
IV.2.1. Choix du support bois	34
IV.2.2. Acquisition du bois	34
IV.2.3. Confection des éprouvettes	35
IV.3. Produit de finition	36
IV.3.1. Acquisition des produits de finition	36
IV.3.2. Mesure de l'extrait sec des produits de finition	39
IV.4. Système Bois / Finition	40
IV.4.1. Préparation de l'atelier de finition	40
IV.4.2. Application des produits de finition	40

IV.4.3. Séchage des systèmes Bois / Finition	45
IV.5. Caractérisation des systèmes Bois / Finition	46
IV.5.1. Mesure de l'épaisseur des finitions	46
IV.5.2. Test de l'adhérence des finitions	47
IV.5.3. Test de la perméabilité à l'eau liquide	48
IV.6. Vieillissement accéléré des systèmes Bois / Finition	50
IV.6.1. Vieillissement accéléré au QUV	51
IV.6.2. Vieillissement accéléré à la roue	54
IV.7. Caractérisation des systèmes Bois / Finition après vieillissement accéléré	54
IV.7.1. Caractérisation de l'aspect	54
IV.7.2. Mesure de la brillance et de la couleur	54
IV.8. Conclusion	56

<b>CHAPITRE V</b> <b>CARACTERISATION DES PRODUITS DE FINITION ET MESURE DE L'ADHERENCE ET LA PERMEABILITE A L'EAU LIQUIDE DES SYSTEMES BOIS / FINITION</b>	57
V.1. Introduction	58
V.2. Caractérisation du bois	58
V.3. Caractérisation des produits de finition	58
V.3.1. Mesure de l'extrait sec du produit de finition	58
V.3.2. Mesure de l'épaisseur des films de finition	59
V.4. Caractérisation des systèmes Bois / Finition	61
V.4.1. Essai de l'adhérence par quadrillage	61
V.4.2. Essai de la perméabilité à l'eau liquide	63
V.5. Conclusion	68

<b>CHAPITRE VI</b> <b>VIEILLISSEMENT ARTIFICIEL AU QUV ET A LA ROUE DES SYSTEMES BOIS / FINITION : ETUDE DE L'ASPECT</b>	69
VI.1. Introduction	70
VI.2. Vieillissement accéléré au QUV	70
VI.3. Vieillissement accéléré à la roue de dégradation	74
VI.4. Conclusion	76

<b>CHAPITRE VII</b> <b>VIEILLISSEMENT ARTIFICIEL AU QUV ET A LA ROUE DES SYSTEMES BOIS / FINITION : ETUDE COLORIMETRIQUE</b>	77
VII.1. Introduction	78
VII.2. Vieillissement accéléré au QUV	78
VII.3. Vieillissement accéléré à la roue de dégradation	84
VII.4. Conclusion	87

<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES</b>	89
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	95

**Liste des Tableaux**

	Page
Tableau II.1: Paramètres des échantillons de bois étudiés	16
Tableau II.2: Paramètres électriques du modèle Double-DCE (ZARC)	21
Tableau III.1. Nombre, densité et teneur en eau des échantillons	24
Tableau III.2. Les valeurs des paramètres (moyenne / d.s) du modèle double DCE (Figure III. 2) correspondent aux échantillons conditionnés à $65 \pm 5\%$ HR. $R_1$ , $\tau_1$ et $\Psi_1$ représentent les paramètres aux basses fréquences et $R_2$ , $\tau_2$ et $\Psi_2$ représentent les paramètres à des fréquences plus élevées.	29
Tableau IV.1. Quelques caractéristiques du support bois utilisé dans ce travail	35
Tableau IV.2. Provenance et utilisation du bois acheté dans le marché marocain	35
Tableau IV.3. Caractéristiques des éprouvettes pour les tests d'adhérence, de perméabilité à l'eau liquide et de vieillissement (au QUV et à la roue)	36
Tableau IV.4. Caractéristiques des produits de finitions utilisés	38
Tableau IV.5. Caractéristiques techniques des produits de finition fournis par les fiches techniques	39
Tableau IV.6. Grammage, méthode et chronologie d'application des produits de finition sur les supports bois témoin et destinés aux tests de perméabilité à l'eau liquide, au test de vieillissement accéléré au QUV et au test de vieillissement accéléré à la roue	41
Tableau IV.7. Code de classification des éprouvettes après l'essai du quadrillage	48
Tableau IV.8. Classement de la perméabilité à l'eau liquide d'un système bois/ finition	49
Tableau IV.9. Cycle d'exposition des éprouvettes dans le QUV	53
Tableau V.1. Caractéristiques du bois utilisé dans ce travail	58
Tableau V.2. Détermination de l'extrait sec des produits de finition utilisés	59
Tableau V.3. Résultats de mesure de l'épaisseur des films de finition	60
Tableau V.4. Adhérence des échantillons selon la norme NF EN ISO 2409 (2013)	63
Tableau V.5A. Résultat de l'absorption moyenne en eau liquide de l'ensemble des éprouvettes A	66
Tableau V.5B. Résultat de l'absorption moyenne en eau liquide de l'ensemble des éprouvettes B	66
Tableau VI.1. Définition des mots techniques et leurs abréviations	70
Tableau VI.2. Significations de la classification des déformations	70
Tableau VI.3. Evaluation de l'aspect des systèmes Bois / Finition après Vieillissement au QUV	71
Tableau VI.4. Evaluation de l'aspect du système Bois / Finition après Vieillissement à la roue	75
Tableau VII.1. Résultats des mesures de L et $\Delta L$	79
Tableau VII.2. Résultats des mesures de a et $\Delta a$	80
Tableau VII.3. Résultats des mesures de b et $\Delta b$	81
Tableau VII.4. Résultats des mesures de la couleur	83
Tableau VII.5. Résultats des mesures de L et $\Delta L$	85

Tableau VII.6. Résultats des mesures de a et $\Delta a$	85
Tableau VII.7. Résultats des mesures de b et $\Delta b$	86
Tableau VII.8. Résultats des mesures de la couleur	86

### Liste des Figures

	Page
Figure I.1. Le LCZ mètre Keithley 3330	11

	Page
Figure I.2.Circuit de mesure des impédances complexes.	12
Figure II.1.Surfaces de contact d'un échantillon	16
Figure II.2.Circuit équivalent du modèle double-DCE (ZARC)	18
Figure II.3.Exemples de spectres d'impédance et meilleurs ajustements du modèle double DCE. La fréquence augmente de droite (40 Hz) à gauche (100 KHz). Courbe expérimentale (pointillée) et théorique (ligne continue) déduite du modèle double DCE	19
Figure II.4.Composante réelle de la constante diélectrique ( $\epsilon'$ ) pour le BPM en fonction de la fréquence. Courbe expérimentale (pointillée) et théorique (ligne continue) déduite du modèle double DCE	20
Figure II.5. Composante imaginaire de la constante diélectrique ( $\epsilon''$ ) pour le BPM en fonction de la fréquence. Courbe expérimentale (pointillée) et théorique (ligne continue) déduite du modèle double DCE	20
Figure II.6.Composante réelle du module ( $M'$ ) pour le BPM en fonction de la fréquence pour le BPM en fonction de la fréquence. Courbe expérimentale (pointillée) et théoriques (ligne continue) déduite du modèle double DCE	20
Figure II.7.Composante imaginaire du module ( $M''$ ) pour le BPM en fonction de la fréquence. Courbe expérimentale (pointillée) et théorique (ligne continue) déduite du modèle double DCE	21
Figure III. Surfaces de contact d'un échantillon sain (a) et d'un échantillon bleui (b)	24
Figure III.2.Circuit équivalent du modèle double-DCE (ZARC)	26
Figure III.3.Composante imaginaire de l'impédance ( $Z_i$ ) en fonction de la composante réelle ( $Z_r$ ) du BPM sain. Courbe expérimentale (pointillée) et théorique (ligne continue) déduite du modèle double DCE.	27
Figure III.4. Composante imaginaire de l'impédance ( $Z_i$ ) en fonction de la composante réelle ( $Z_r$ ) pour le BPM avec bleuissement. Courbe expérimentale (pointillée) et théorique (ligne continue) déduite du modèle double DCE.	27
Figure III.5.Composante imaginaire de l'impédance ( $Z_i$ ) en fonction du composant réel ( $Z_r$ ) pour le BPM avec bleuissement après séchage. Courbe expérimentale (pointillée) et théorique (ligne continue) déduite du modèle double DCE.	28
Figure IV.1.Photos des planches achetées	34
Figure IV.2.Photos des éprouvettes confectionnées	34
Figure IV.3.Photos de cabine de finition au CTIBA	40
Figure IV.4.Photos d'application des produits de finition	41
Figure IV.5.Photos des éprouvettes après application du scellant	45
Figure IV.6.Photos des systèmes bois/finition	45
Figure IV.7.Photos d'un appareil PIG pour la mesure de l'épaisseur des finitions	46
Figure IV.8.Représentation schématique d'une entaille en coin	46
Figure IV.9.Photo de l'outil utilisé pour l'essai d'adhérence par quadrillage	47
Figure IV.10.Photos des éprouvettes pendant l'essai de perméabilité à l'eau	49

	Page
Figure IV.11.Schématization d'un QUV	51
Figure IV.12.Photos de l'équipement de l'essai de vieillissement artificiel au QUV	52
Figure IV.13.Photos : Préparation des éprouvettes pour le QUV	53
Figure IV.14.Equipement pour l'essai de vieillissement à la roue de dégradation GARDNER	54
Figure IV. 15. Spectrophotomètre X-rite SP 62	56
Figure V.1. Photos relatives à la mesure de l'adhérence par quadrillage	62
Figure V.2.Photos des éprouvettes préparées avec les différentes finitions avant les essais de perméabilité à l'eau	64
Figure V.3.Perméabilité à l'eau liquide	67

## Liste des abréviations

BPM	:	Bois du Pin maritime
SIE	:	Spectroscopie d'Impédance Electrique
CTIBA	:	Centre technique des industries de bois et de l'ameublement
CPE	:	Constant Phase Element
CRF	:	Centre de Reserches Forestières

## INTRODUCTION GENERALE

Les principaux facteurs de dégradation des menuiseries en bois destinées à l'extérieur sont l'exposition aux rayons ultraviolets, à l'oxygène et à l'eau. Pour la protection de l'aspect naturel du bois et sa couleur contre ces intempéries, des recherches sur les revêtements ont été réalisées.

Les objectifs fixés pour ce travail sont trois: 1) la détection précoce du phénomène de bleuissement chez le bois du pin maritime (BPM) (*Pinus pinaster* L.) par l'utilisation de la Spectroscopie d'Impédance Electrique (SIE) ; 2) la caractérisation des systèmes de finition par la mesure : de l'épaisseur des couches de finition, de l'extrait sec, ainsi que des mesures de perméabilité à l'eau liquide et de l'adhérence ; 3) l'étude de l'effet du vieillissement accéléré au QUV et à la roue de Gardner sur l'aspect visuel et la couleur des différents systèmes Bois/ Finition réalisés.

La spectroscopie d'impédance électrique (SIE) est une méthode qui donne accès à diverses informations. D'un point de vue électrique, elle permet la modélisation de l'interface électrode-échantillon par un circuit électrique dit équivalent. Les valeurs de conductance et de capacitance qui peuvent être calculées, permettent de distinguer les matériaux isolants, semi-conducteurs ou encore conducteurs. L'exploitation des spectres d'impédance permet aussi l'obtention de nombreuses grandeurs telles que les paramètres cinétiques, les coefficients de diffusion et les constantes diélectrique. En outre, l'impédance électrique facilite l'interprétation physique des résistances présentes dans le matériau telles que les résistances dues au transfert de charge et de matière. L'impédance, au sens large du terme, mesure l'opposition d'un système à une grandeur physique par laquelle il est contraint. Ce terme vient de l'anglais «to impede » qui signifie « faire obstacle à ». Elle est en général définie par le rapport entre la grandeur physique qui lui est appliquée et la grandeur physique qui en résulte ; c'est-à-dire à la mesure de l'opposition du système au déplacement de charges électriques lorsqu'une différence de potentiel lui est appliquée. Elle se définit comme le rapport entre la tension appliquée au système et le courant électrique qui en résulte.

On constate très fréquemment que le bois des résineux, plus spécialement celui des Pins, prend, quelque temps après l'abatage ou le débit, une teinte bleu-noirâtre. Ce changement de coloration est désigné sous le nom de bleuissement. On accorde généralement à cette altération une

importance assez grande et on admet volontiers que le bois bleui est fortement déprécié à la plupart des usages.

Ce manuscrit est composé donc de deux parties : La première partie, constituée des chapitres I, II et III est une **modélisation électrique du bleuissement du bois de pin maritime**. Cette partie concerne l'application de la Spectroscopie d'Impédance Electrique (SIE) pour la détection précoce du bleuissement du bois de pin maritime (*Pinus pinaster* L.). La deuxième partie constituée des chapitres IV, V, VI et VII est une étude comparative de plusieurs systèmes Bois / Finition. Cette partie concerne **la dégradation des finitions appliquées sur certaines essences du bois commercialisées au Maroc**

**Le chapitre I**, intitulé '**Généralités sur la modélisation électrique des circuits biologiques**' est une discussion de quelques concepts de base permettant de comprendre les propriétés électriques des milieux biologiques. La compréhension des différents phénomènes physiques dans un échantillon excité nécessite sa modélisation par un circuit électrique équivalent. La compréhension des différents aspects abordés dans ce chapitre est une condition préalable à une étude visant la caractérisation des milieux biologiques.

**Le chapitre II**, intitulé '**Modélisation de la réponse en fréquence du bois de pin maritime (*pinus pinaster* L.) aux basses fréquences**' est une caractérisation électrique à température ambiante ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ) et dans un intervalle de fréquence de 40 Hz à 100 kHz du bois de pin maritime (BPM) (*Pinus pinaster* var *atlantica*) de la forêt de la Mamora occidentale. L'une des principales applications de la SIE est l'étude des propriétés électriques fondamentales des matériaux afin de les corrélérer avec les caractéristiques intrinsèques de ces dernières. Le modèle double-DCE (ZARC) a été utilisé comme circuit équivalent pour le BPM. Les paramètres d'impédance électrique de ce modèle tels que la résistance intracellulaire ( $R_i$ ), les résistances extracellulaires ( $R_{e1}$  et  $R_{e2}$ ), les temps de relaxation ( $\tau_1$  et  $\tau_2$ ) et les coefficients de dispersion des temps de relaxation ( $\Psi_1$  et  $\Psi_2$ ) ont été déterminés.

**Le chapitre III**, intitulé '**Etude électrique du bois de pin maritime par rapport à la coloration bleue**' a été consacré à l'examen de l'effet de la coloration bleue sur les paramètres d'impédance électrique aux basses fréquences. Le modèle double-DCE (ZARC) a été utilisé comme circuit équivalent pour le BPM. Les paramètres d'impédance électrique de ce modèle tels que la résistance intracellulaire ( $R_i$ ), les résistances extracellulaires ( $R_{e1}$  et  $R_{e2}$ ), les temps

de relaxation ( $\tau_1$  et  $\tau_2$ ) et les coefficients de distribution des temps de relaxation ( $\Psi_1$  et  $\Psi_2$ ) pour les échantillons du BPM sains et attaqués par le bleuissement ont été déterminés et comparés.

**Le chapitre IV**, intitulé ‘**Matériel et méthode des systèmes Bois / Finition**’ a été consacré à la présentation des matériaux de base pour la fabrication des systèmes Bois / Finition, la détermination de quelques caractéristiques des produits de finition (épaisseur et extrait sec), la vérification de l’adhérence et de la perméabilité à l’eau liquide des systèmes Bois / Finition, la description des méthodes de vieillissement accélérés des systèmes Bois / Finition et enfin les techniques de caractérisation des systèmes Bois / Finition avant et après vieillissement au QUV et à la roue (Vérification de l’aspect et de la couleur).

**Le chapitre V**, intitulé ‘**Caractérisation des produits de finition et mesure de l’adhérence et la perméabilité à l’eau liquide des systèmes Bois / Finition**’ présente les résultats de caractérisation des produits de finition utilisés dans ce travail et les résultats concernant la perméabilité à l’eau liquide et l’adhérence des différents systèmes Bois/Finition réalisés.

**Le chapitre VI** est intitulé ‘**Vieillissement artificiel au QUV et à la roue des systèmes Bois / Finition : Etude de l’aspect**. Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats concernant les effets des vieillissements accélérés (au QUV et à la roue de Gardner) sur l’aspect des différents systèmes Bois/Finition réalisés.

Le septième et dernier chapitre est intitulé : **Vieillissement artificiel au QUV et à la roue des systèmes Bois / Finition : Etude colorimétrique**. Ce chapitre a été consacré à l’évaluation du changement de couleur des finitions appliquées aux bois, les plus commercialisés au Maroc, dans le but de trouver le couple bois-finition qui présente la meilleure durabilité en utilisation extérieure. Des tests de vieillissement accéléré au QUV et à la roue de dégradation ont été réalisés sur les trois essences du bois étudiées, revêtus de six finitions (trois finitions polyuréthanes  $F_1$ ,  $F_2$  et  $F_3$  et trois finitions acryliques  $F_4$ ,  $F_5$  et  $F_6$ ). Les mesures colorimétriques dans les systèmes de couleur CIEL\*a\*b\* et CIEL\*C\*h\*: La brillance ( $L^*$ ), les coordonnées vert-rouge ( $a^*$ ) et bleu-jaune ( $b^*$ ), la saturation des couleurs ( $C^*$ ) et l’angle de tonalité ( $h^*$ ) ont été réalisées à l’aide d’un spectrophotomètre X-Rite Model SP62, avant et après des traitements de vieillissement accéléré au QUV et à la roue.

**PREMIERE PARTIE**  
**MODELISATION DU BLEUISSEMENT DU BOIS DE PIN**  
**MARITIME**

**CHAPITRE I**  
**GENERALITES SUR LA MODELISATION ELECTRIQUE**  
**DES CIRCUITS BIOLOGIQUES**

**I.1. Introduction**

En général, l'impédance d'un matériau biologique est complexe, c'est-à-dire qu'elle est composée d'une partie réelle et d'une partie imaginaire. La représentation dite de Nyquist consiste à représenter l'impédance dans le plan complexe :

- Soit la partie imaginaire en fonction de la partie réelle, chaque point de la courbe donne une valeur de l'impédance à une fréquence bien déterminée, ce type de représentation est dit de Nyquist ou de Cole Cole ;

- Soit par le diagramme dit de Bode pour lequel les parties réelle et imaginaire sont représentées séparément en fonction de la fréquence (en échelle logarithmique). Certains auteurs préfèrent pour ce type de représentations adopter plutôt la norme  $|Z|$  et l'angle de phase  $\varphi = \arg Z$ .

Ces deux visions différentes d'un même résultat ne sont pas en compétition, elles sont complémentaires; chacune d'entre-elles montre un aspect particulier du diagramme d'impédance. La représentation de Nyquist permet de voir les différentes «boucles et droites» du diagramme mais masque les résultats à haute fréquence alors que la représentation de Bode offre la vision complète du domaine de fréquence, tout en étant moins parlante pour identifier certains phénomènes caractéristiques.

## **I.2. Utilité et avantages de la technique SIE**

La spectroscopie d'impédance électrique (SIE) a été utilisée pour étudier la réaction aux stress des plantes (Zhang et Willison 1992a, Zhang et Willison 1992b, Zhang et Willison 1993a, Zhang et al. 1993, Repo et al. 1994, Zhang et al. 1995, Inaba et al. 1995, Mancuso et Rinaldelli 1996, Repo et al. 2000, Repo et al. 2004).

Cette méthode donne accès à diverses informations. D'un point de vue électrique, elle permet la modélisation de l'interface électrode-échantillon par un circuit électrique dit équivalent. Les valeurs de conductance et de capacitance qui peuvent être calculées, permettent de distinguer les matériaux isolants, semi-conducteurs ou encore conducteurs.

L'exploitation des spectres d'impédance permet aussi l'obtention de nombreuses grandeurs telles que les paramètres cinétiques, les coefficients de diffusion et les constantes diélectrique. En outre, l'impédance électrique facilite l'interprétation physique des résistances présentes dans le matériau telles que les résistances dues au transfert de charge et de matière.

Le principe d'analyse des résultats est basé sur l'exploitation de la réponse en fréquence de l'échantillon afin de la relier avec les processus physico-chimiques du matériau étudié tels que l'influence de sa microstructure et par conséquent sur la diffusion des porteurs de charge dans l'échantillon. En effet, les paramètres électriques mesurés dépendent des courants hydro-

ioniques lesquels sont fonction de l'état physiologique des matériaux biologiques considérés et des conditions environnantes (Laarabi et *al.*, 2005a, Laarabi et *al.*, 2005b).

Voulant expliquer le phénomène d'un point de vue biologique, certains chercheurs (Repo et *al.*, 2000) considèrent que les propriétés du courant qui passe à travers les espaces apoplastiques (espace de circulation en dehors du cytoplasme cellulaire, et notamment dans les espaces intercellulaires et dans les parois squelettiques des cellules) et symplastique (espace constitué par les cytoplasmes de l'ensemble des cellules liés par des plasmodesmes) du tissu testé dépendent de la fréquence du courant et des propriétés du tissu. Dans l'espace apoplastique, les ions sont les moyens de transport du courant. Quand la fréquence est grande, l'impédance diminue et l'espace symplastique devient conducteur, les espaces apoplastique et symplastique forment alors un circuit parallèle.

Pour caractériser la conductance électrique des cellules vivantes, nous avons recours à des schémas équivalents, c'est à dire à des combinaisons de résistances ohmique et capacitive qui, à première vue, peuvent modéliser les paramètres électriques cellulaires. Ainsi, des mesures de l'impédance électrique ont été élaborées et utilisées pour estimer et évaluer la présence de virus (Greenham et *al.*, 1978), le statut nutritionnel (Greenham et *al.*, 1982), l'état sanitaire général de la plante (Mc Dougall et *al.*, 1987), l'endommagement des fruits (Cox et *al.*, 1993), l'intensité du gel (Repo et *al.*, 1994, Repo et *al.*, 2004, Repo et *al.* 2008, Väinölä et Repo 2000), la variation structurale des cellules suivant l'induction de l'éthylène par les courants électriques (Inaba et *al.*, 1995), la viabilité des cellules au cours de la congélation croissante (Privé et Zhang, 1996), la maturité des fruits (Harker et Maindonald, 1994), la sensibilité à la salinité (Mancuso et Rinaldelli 1996), la capacité d'enracinement des boutures (Mancuso, 1999), la réaction des plantes aux conditions environnementales (Laarabi et *al.*, 2005a et Laarabi et *al.*, 2005b), l'acclimatation des tissus au froid (Stout 1988a, 1988b).

### **I.3. Modélisation**

Afin de rendre compte des phénomènes physiques responsables de la conductivité et des différentes relaxations produites sous l'effet du champ électrique dans le matériau, les données de spectroscopie d'impédance électrique sont communément analysées après ajustement par un modèle électrique de circuit équivalent.

#### **I.3.1. Eléments usuels d'un circuit électrique**

Les éléments du circuit équivalent généralement rencontrés sont des résistors, des condensateurs ou des bobines. Notons que l'impédance d'un résistor est indépendante de la fréquence et en phase avec le courant, cependant, celle de la capacité diminue quand la fréquence augmente et est déphasé de  $-\frac{\pi}{2}$  par rapport au courant.

Suivant les caractéristiques physiologiques du matériau, sa géométrie et les différents processus dont ce dernier est le siège, les différents éléments du circuit sont montés soit en série, soit en parallèle ou par combinaison des deux types de circuit.

Cependant, les diagrammes d'impédance des tissus biologiques montrent souvent une dispersion en fréquence (non idéale) qui ne peut être ajustée à l'aide d'éléments simples comme les résistances (R), les capacités (C), les inductances (L) ou les impédances de diffusion (élément de Warburg ou W).

Cette dispersion en fréquence est souvent décrite comme étant une variation de capacité et est exprimée en termes d'éléments à phase constante (Constant Phase Element : CPE)

### **I.3.2. Élément à phase constante (Constant Phase Element : CPE)**

Mentionné pour la première fois dans la littérature par Fricke (1932), le CPE est décrit comme une dispersion de capacités ou une variation de la capacité en fonction de la fréquence. Par la suite, en étudiant la dispersion et l'adsorption sur les diélectriques, Cole et Cole (1941) ont utilisé la capacité comme paramètre d'investigation. Ils ont alors retrouvé ce comportement CPE.

### **I.3.3. Paramètres électro-physiologiques**

La modélisation du matériau biologique en tant que circuit électrique permet de déduire, à partir de deux grandeurs, la résistance et la réactance, des paramètres électriques de l'échantillon. L'impédance électrique mesurée est fonction de la fréquence, elle diminue à mesure que la fréquence augmente. Les mesures d'impédance réalisées sur une large gamme de fréquences permettent par conséquent d'avoir les informations sur les fluides intra et extracellulaires. Les structures les plus concernées aux basses fréquences sont surtout les membranes cellulaires qui enveloppent le contenu cellulaire ou limitent les organites, mais aussi la composition interne (structures fortement enclavées) lorsque la fréquence devient élevée. Les paramètres électriques

déduits reflètent les propriétés intrinsèques de la cellule telles que les courants hydroioniques, la structure et l'état physiologique.

L'une des principales applications de l'impédance électrique est l'étude des propriétés électriques fondamentales des matériaux dans le but de les corrélérer avec les caractéristiques intrinsèques de ces derniers. Dans ce qui suit seront décrits quelques paramètres électriques caractéristiques des milieux biologiques tels que les résistances intra et extracellulaires permettant de rendre compte du comportement des compartiments internes et externes à la cellule au passage du courant électrique. De plus, le comportement CPE sera décrit à travers les paramètres  $\tau$  et  $\psi$  qui représentent respectivement le temps de relaxation moyen et son coefficient de distribution.

### **I.3.3.1. Résistances intra et extracellulaires**

Les compartiments intra et extracellulaires sont sensibles à divers stress et en particulier aux conditions climatiques. Le ratio des résistances à basse et à fréquence élevée (49 hertz/1.11 mégahertz) décroît au cours de l'acclimatation au froid et avec les dommages dus au gel des tiges de *Lotier Corniculauis* (Stout 1988a, 1988b), que l'auteur attribue à une augmentation de la résistance intracellulaire. Ce rapport permet d'estimer l'efficacité de la membrane à jouer son rôle de barrière à la diffusion des particules entre les régions internes et externes de la cellule et par suite une variation de cette grandeur pourrait d'après cet auteur signifier la destruction de la membrane. De plus cet auteur montre une corrélation linéaire significative ( $p \leq 0,05$ ) et négative entre la résistance intracellulaire et l'humidité des tiges.

Des mesures d'impédance électrique réalisées sur les aiguilles du pin sylvestre (Repo et *al.*, 1994, Zhang et *al.*, 1995) montrent une augmentation aussi bien de la résistance intra que de la résistance extracellulaire suite à l'adaptation au froid d'automne. Ces variations d'après ces auteurs pourraient être attribuées à l'augmentation de la viscosité intracellulaire au cours de l'acclimatation au froid résultant du mouvement des ions.

Une corrélation a été trouvée entre la résistance extracellulaire et l'altération de la membrane cellulaire avec une fuite relative de l'électrolyte dans les racines (Ryypö et *al.* 1998). La résistance électrique de la paroi cellulaire des fruits mûrs de la nectarine après des dommages dû au froid est plus grande dans les tissus ligneux que dans les non-ligneux (Harker et Maindonald 1994).

Un taux fort d'ozone ( $O_3$ ) contribue à réduire la résistance extracellulaire ; par contre, de fortes doses de gaz carbonique ( $CO_2$ ) augmentent la résistance intracellulaire dans les feuilles de

Bouleau argenté (Repo et al., 2004) que ces auteurs attribuent respectivement aux dommages de la membrane cellulaire et aux changements de la composition symplastique sous l'effet des stress.

De fortes corrélations ont été trouvées entre ces deux résistances des feuilles d'olives et la capacité à s'enraciner de leurs tiges (Mancuso, 1999).

Des mesures réalisées sur le tronc de mandarinier indiquent une augmentation de la résistance que l'auteur attribue, non pas à l'humidité, mais plutôt au phénomène d'embolisme des parties périphériques du xylème dans le tronc de l'arbre (Muramatsu et Hiraoka, 2007).

### **I.3.3.2. Temps de relaxation**

La grandeur caractéristique du phénomène produit suite à une excitation est la durée de relaxation qui informe du temps nécessaire pour le retour à l'équilibre. Pour une grande majorité de matériaux en général et pour les matériaux biologiques en particulier, la représentation dans le mode fréquentiel des phénomènes correspond à des dispersions s'étendant sur une plus large gamme de fréquences. Le comportement fréquentiel n'est plus lié à un temps de relaxation unique mais plutôt à une distribution statique de constante de temps dont la fonction de distribution est fonction du modèle. Par conséquent, la constante de temps  $\tau$  considérée est la valeur centrale de la fonction de distribution.

Quelques travaux se rapportent à ce paramètre dans la littérature. Le temps de relaxation augmente avec les blessures causées par le froid et la chaleur sur les cellules (Zhang et Willison 1992b, Repo et al., 1994) et diminue avec une augmentation du taux d'ozone (Repo et al., 2004). Ces auteurs sont unanimes sur le fait que ces variations seraient le résultat du changement de la composition de la membrane cellulaire dû aux différents stress.

De fortes corrélations ( $R^2 = 0,79^{***}$ ) ont été trouvées entre ce paramètre et le taux de matière dans les feuilles de thé (Mizukami et al., 2007), ce paramètre, d'après ces auteurs, pourrait servir comme indicateur de la croissance (maturité) des feuilles fraîches de thé.

### **I.3.3.3. Coefficient de distribution du temps de relaxation**

Le coefficient de distribution est un nombre relié à l'angle de rotation de la droite purement capacitive dans le plan complexe de Nyquist. Dans les composés isotropes, ce paramètre vaut zéro. Dans les matériaux diélectriques formés de molécules de types différents, à l'instar des échantillons biologiques, plusieurs sources peuvent contribuer à la valeur de ce paramètre incluant la variabilité biologique, l'anisotropie d'orientation cellulaire, l'hétérogénéité

intracellulaire, les multiples structures des composants et la gamme des différents processus de relaxation (Repo et *al.*, 2004).

## 1.4. Matériel et principe de mesure d'impédance

### 1.4.1. LCZ Mètre

Le dispositif utilisé pour les mesures électriques est un LCZ Mètre Keithley 3330 (Figure I.1). C'est un appareil digital conçu pour caractériser une large variété des composants passifs et actifs ainsi que des échantillons matériels. Cet appareil permet de mesurer les paramètres du courant tels que la tension ou l'intensité du courant traversant le matériau, de même que les caractéristiques électriques de ce dernier telles la résistance, l'inductance, la capacité, l'impédance, la conductance, la réactance, le facteur de qualité, le facteur de dissipation et l'angle de phase de l'impédance. Il permet d'obtenir des résultats rapides avec une bonne précision. De plus, sa mise en œuvre est aisée, cet appareil offre aussi un large intervalle d'amplitude du signal d'entrée de 10 mV à 1,1 V et une gamme de fréquence de 40 Hz à 100 KHz avec un choix de 201 fréquences.



Figure I.1. Le LCZ mètre Keithley 3330

### 1.4.2. Principe de mesure d'impédance

Un signal alternatif de fréquence variable et de faible amplitude (10mV à 1.1V), est appliqué entre les points A et B (Figure I.2). Cette tension peut être superposée à une tension continue de polarisation. Les tensions de sortie prises sur les points B et C sont mesurées et analysées directement par l'appareil qui nous donne par la suite les composantes en phase ( $//$ ) et en quadrature de phase ( $\perp$ ) par rapport au signal d'entrée, représentant respectivement la partie réelle et la partie imaginaire de l'impédance.

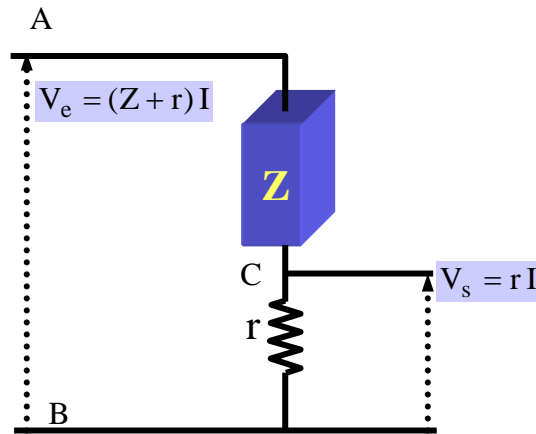


Figure I.2.Circuit de mesure des impédances complexes

En effet,

$$V_e = (Z + r)I \quad (1)$$

$$V_s = rI \quad (2)$$

Par ailleurs, on a :

$$\begin{cases} V_s = V_{//} + jV_{\perp} \\ Z = Z_{//} + jZ_{\perp} \end{cases} \quad (3)$$

Le développement des équations (1), (2) et (3) permet de déterminer les composantes en phase  $Z_{//}$  avec  $V_e$  et en quadrature de phase  $Z_{\perp}$  par rapport à  $V_e$ , présentées dans les équations (4).

$$\begin{aligned} Z_{//} &= \frac{1}{Y_{//}} = \frac{V_{//}(rV_e - rV_{//}) - rV_{\perp}^2}{V_{//}^2 + V_{\perp}^2} \\ Z_{\perp} &= \frac{1}{Y_{\perp}} = \frac{-rV_{\perp}V_{//} - (rV_e - rV_{//})V_{\perp}}{V_{//}^2 + V_{\perp}^2} \end{aligned} \quad (4)$$

Le LCZ Mètre 3330 permet de mesurer une gamme de valeurs de capacités très large allant du pF à plusieurs centaines de nF tout en gardant une bonne précision. Néanmoins, la mesure de fortes capacités peut être perturbée en haute fréquence et en basse fréquence. La limitation en haute fréquence est simplement due à la valeur de l'impédance de la capacité qui va devenir négligeable par rapport à la valeur de sa résistance série. Par contre, à basse fréquence, l'impédance d'une petite capacité devient très importante et donc difficile à mesurer puisque le capacimètre doit alors être capable de mesurer un courant très faible. La résistance maximale spécifiée par le constructeur est de l'ordre de la dizaine de MΩ.

## **1.5. Conclusion**

Ce chapitre nous a permis de présenter quelques concepts de base permettant de comprendre les propriétés électriques des milieux biologiques. La compréhension des différents phénomènes physiques dans un échantillon excité nécessite sa modélisation comme circuit électrique. Le comportement fréquentiel des milieux lié aux phénomènes de relaxations diélectriques a également été étudié. L'origine du comportement électrique d'un tissu biologique a été aussi étudiée à travers la description de ses principaux constituants (milieu extracellulaire, intracellulaire et membrane). La compréhension des différents aspects abordés dans ce chapitre est une condition préalable à une étude visant la caractérisation des milieux biologiques.

**Chapitre II**  
**MODELISATION DE LA REPONSE EN FREQUENCE DU**  
**BOIS DE PIN MARITIME (*Pinus pinaster* L.) AUX BASSES**  
**FREQUENCES**

**II.1. Introduction**

La superficie forestière du Maroc est estimée à 5,8 Mha. 12 000 ha sont consacrés aux pins (*pinus pinaster*) (Mhirit et Blerot, 1999). Le pin maritime est une espèce de la Méditerranée occidentale avec une affinité atlantique. Il est principalement répandu dans le bassin occidental de la Méditerranée. Il pousse spontanément au Maroc, en Algérie, en Corse, en France et en Tunisie. En dehors de ces zones, le pin maritime est également présent en Italie, au Portugal et dans le sud-ouest de l'Espagne (Boudy, 1950).

D'autre part, la spectroscopie d'impédance électrique (SIE) est l'une des méthodes potentielles d'analyse non destructive pour l'évaluation de la teneur en humidité du bois, du gradient d'humidité, de la dégradation, de la densité et des extractibles. Il mesure l'impédance électrique d'un milieu en fonction de la fréquence (Kremer et *al.*, 2002).

Cette méthode est connue par sa simplicité, sa rapidité et son efficacité. La SIE a été utilisée pour étudier la réaction de stress chez les plantes (Repo et *al.* 2000, Väinölä et Repo 2000, Hakam et *al.*, 2012). La méthode fournit des informations sur les propriétés physicochimiques de la structure cellulaire. Selon Tiitta et *al.*, 1999a et 2003, Hakam et *al.*, 2017a et 2017b, la (SIE) pourrait être une technique utile pour distinguer le bois sain du bois attaqué par la pourriture.

La caractérisation du BPM avec un champ électrique aux basses fréquences n'a pas encore été étudiée. Il peut fournir une base valable pour déterminer les défauts de ce bois de façon non destructive, et peut aider à comprendre les interactions bois-eau et les caractéristiques hygroscopiques du bois.

## **II.2. Matériel et méthodes**

### **II.2.1. Matériaux**

Les échantillons du bois de pin maritime ont été obtenus auprès du Centre de Recherches Forestières (CRF), Rabat, Maroc. L'étude a été réalisée sur des pins maritimes matures de 45 ans, de la forêt de la Mamora occidentale (6 ° 45'O, 34 ° 2'N, 30 m d'altitude), Rabat, Maroc. Le sol de la Mamora est constitué d'une couche d'argile sur laquelle se trouve une couche de sable de couleur rouge ou rose. La moyenne des précipitations annuelles est de 500 mm et la température moyenne se situe entre 15 et 23 ° C. A partir des arbres abattus, des tiges de 3 m ont été sciées en planches de 60 mm d'épaisseur. A partir des planches, les échantillons pour les mesures électriques ont été découpés en morceaux carrés de 40 mm et de 2 à 4 mm

d'épaisseur dans la direction longitudinale, et lissés doucement par ponçage (Figure II.1). Pour les mesures physiques (teneur en humidité et densité), les échantillons ont été découpés en morceaux cubiques de 20 mm. Tous les échantillons étaient exempts de fissures, décoloration, attaque biologique, trous d'insectes et autres défauts. Dans cette étude, les échantillons de bois ont été analysés dans des conditions normales de laboratoire (Tableau II.1) (température de  $20 \pm 2$  ° C et teneur en humidité de 15% environ).



Figure II.1: Surfaces de contact d'un échantillon

Tableau II.1: Paramètres des échantillons de bois étudiés

	Moy.	Max	Min	CV (%)
D <sub>h</sub>	0,650	0,695	0,491	7,89
H%	15	15,4	14,8	19,64

Avant les mesures d'impédance, les échantillons ont été pesés et les dimensions ont été mesurées. Après les mesures d'impédance, les échantillons ont été séchés à  $103 \pm 3$ °C pendant 24 h et pesés.

Les dimensions, la teneur en humidité et les densités ont été mesurées avec une précision de 0,1 mg en poids et de 0,02 mm pour les dimensions. Tous les échantillons ont été conservés dans la même chambre, dans les mêmes conditions ambiantes. La teneur en humidité (H%) de l'échantillon a été calculée à l'aide de la formule :

$$H(\%) = \frac{100 \times (M_H - M_0)}{M_0} \quad (5)$$

Où, M<sub>H</sub> est la masse de l'échantillon à l'air avant les mesures d'impédance et M<sub>0</sub> est la masse à l'étuve après séchage à  $103 \pm 3$ °C pendant 24 h (Hakam et *al.*, 2018a)

## II.2.2. Mesures diélectriques

La relaxation et / ou la polarisation des matériaux excités sont provoquées par le courant alternatif. Le paramètre physique varie avec la fréquence de la tension appliquée; cela peut être dû soit à la structure physique des matériaux, soit aux processus chimiques et physiques qui se produisent dans le matériau. Ainsi, une mesure d'impédance sur une plage de fréquence appropriée offre la possibilité de relier les paramètres électriques mesurés aux propriétés physiques et chimiques des matériaux.

Les mesures SIE sur le BPM ont été réalisées à température ambiante avec deux électrodes circulaires en cuivre placées directement au contact du matériau sans utiliser de gel conducteur. Les deux électrodes étaient directement connectées au dispositif de mesure d'impédance (Hewlett-Packard LCZ-meter 3330), avec des fréquences allant de 40 Hz à 100 KHz.

### II.2.3. Modélisation électrique

Il a été prouvé dans plusieurs études précédentes (Tiitta et al., 1999b, Repo et al., 2000, Väinölä et Repo 2000, Tiitta et al., 2003 et Hakam et al., 2017c) que la réponse en fréquence des tissus biologiques comme le bois ne peut être ajustée à l'aide d'éléments simples tels que la résistances (R), la capacités (C), l'inductances ou des impédances de diffusion. Cette dispersion de fréquence est souvent décrite comme un changement de capacité et est exprimée en termes d'éléments de phase constante (CPE):

$$Z_{CPE} = \frac{1}{(i\omega C)^\Psi} \quad (6)$$

Où C est la capacité,  $\omega$  la fréquence angulaire,  $\Psi$  le coefficient de distribution du temps de relaxation et i l'unité imaginaire. Dans cette étude, le modèle mathématique double-DCE (ZARC) (MacDonald 1987) qui est illustré par un schéma équivalent a été ajusté aux données. Le modèle double DCE (ZARC) comprend deux éléments de circuit distribué (DCE) en série avec une résistance  $R_\infty$  ( $R_\infty$  est la résistance aux très hautes fréquences) (Figure II.2). L'élément DCE comprend un élément de phase constante (CPE) en parallèle avec une résistance (R):

$$Z_{DCE} = \frac{R}{1 + (i\omega\tau)^\Psi} \quad (7)$$

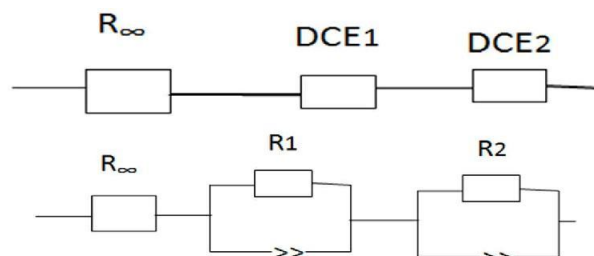


Figure II.2. Circuit équivalent du modèle double-DCE (ZARC)

Les paramètres électriques de ce modèle ont été déterminés pour le BPM: la résistance intracellulaire ( $R_i = R_\infty$ ), les résistances extracellulaires ( $R_{e1} = R_1$  et  $R_{e2} = R_2$ ), les temps de relaxation ( $\tau_1$  et  $\tau_2$ ) et les coefficients de distribution des temps de relaxation ( $\Psi_1$  et  $\Psi_2$ ). Les paramètres du modèle ont été estimés à l'aide du programme d'ajustement de courbe complexe par la méthode des moindres carrés non linéaires (CNLS) LEVM version 8.13 (J.R. Macdonald, Département de physique et d'astronomie, Université de Caroline du Nord, Chapel Hill, États-Unis).

### **II.3. Résultats et discussion**

Les spectres d'impédance électrique du BPM ont été mesurés au laboratoire de la manière décrite ci-dessus. Le comportement de la partie imaginaire de l'impédance ( $Z_i$ ) en fonction de la partie réelle de l'impédance ( $Z_r$ ) pour le BPM à température ambiante est illustré sur la figure II.3.

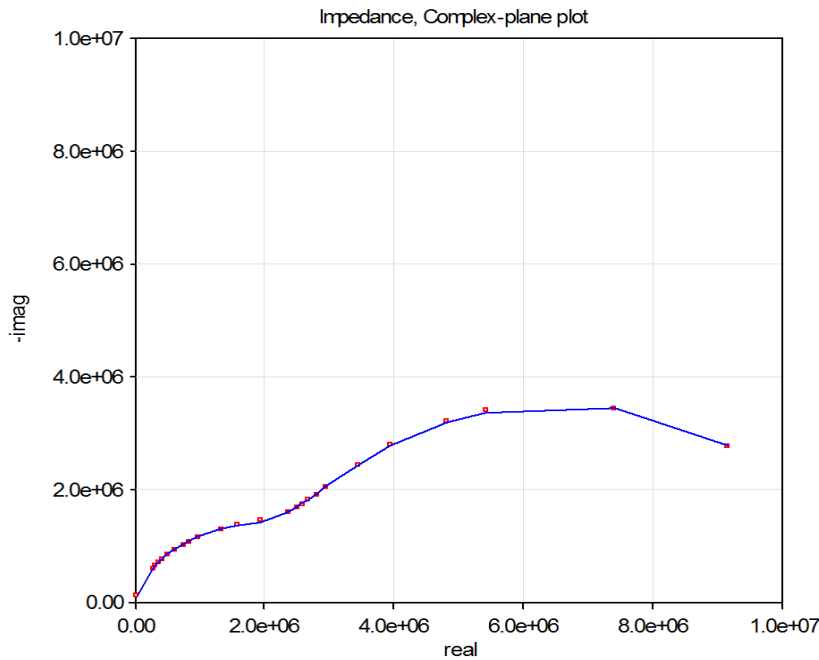


Figure II.3. Exemples de spectres d'impédance et meilleurs ajustements du modèle double DCE. La fréquence augmente de droite (40 Hz) à gauche (100 KHz). Courbe expérimentale (pointillée) et théorique (ligne continue) déduite du modèle double DCE.

Le spectre d'impédance de chaque échantillon avait un double arc en forme de parabole où le haut correspond à la valeur de la fréquence caractéristique du matériau ( $f_c$ ) et l'intersection de la parabole avec l'axe x donne  $R_\infty$ ,  $R_{e1}$  et  $R_{e2}$ . Il est à noter que la courbe expérimentale (en pointillé) coïncide parfaitement avec la courbe (en trait plein) déduite du modèle double DCE (Figure II.3).

La connaissance des valeurs expérimentales pour chaque fréquence de la partie réelle de l'impédance électrique ( $Z_r$ ) et de la partie imaginaire de l'impédance ( $Z_i$ ) ou de la partie réelle de l'admittance ( $Y_r$ ) et de la partie imaginaire ( $Y_i$ ) permet de déduire la constante diélectrique ( $\epsilon$ ) et le module électrique ( $M$ ) en fonction de la fréquence par un simple calcul, en tenant compte des paramètres géométriques des échantillons. Ainsi, la partie réelle de la constante diélectrique ( $\epsilon'$ ) et de la partie imaginaire de la constante diélectrique ( $\epsilon''$ ) pour le BPM en fonction de la fréquence à température ambiante sont représentées respectivement sur les figures II.4 et II.5 et la partie réelle du module électrique ( $M'$ ) et la partie imaginaire du module électrique ( $M''$ ) pour le BPM en fonction de la fréquence à température ambiante sont représentées respectivement sur les figures II.6 et figures II.7.

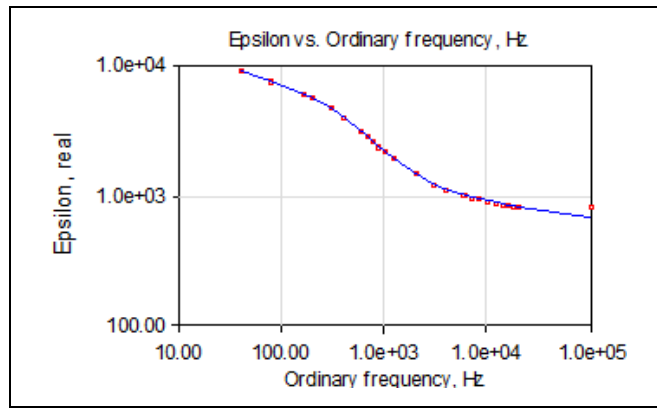


Figure II.4. Composante réelle de la constante diélectrique ( $\epsilon'$ ) pour le BPM en fonction de la fréquence. Courbe expérimentale (pointillée) et théorique (ligne continue) déduite du modèle double DCE

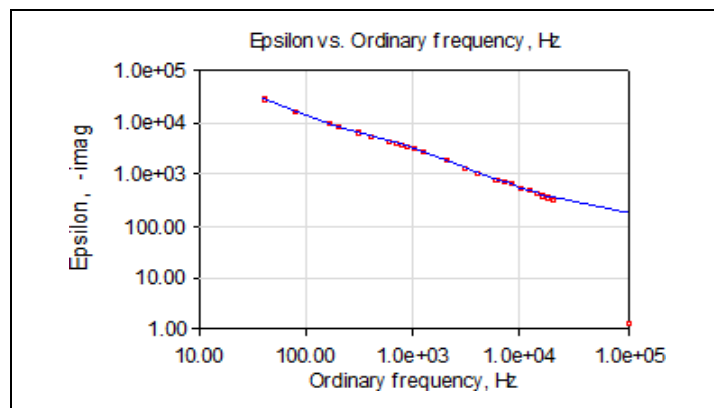


Figure II.5. Composante imaginaire de la constante diélectrique ( $\epsilon''$ ) pour le BPM en fonction de la fréquence. Courbe expérimentale (pointillée) et théorique (ligne continue) déduite du modèle double DCE

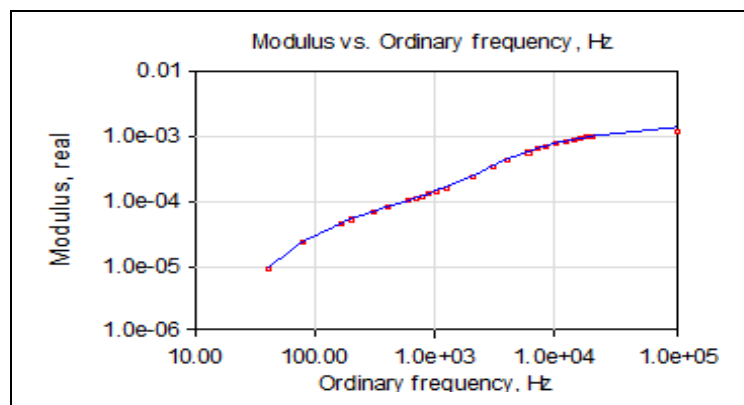


Figure II.6. Composante réelle du module ( $M'$ ) pour le BPM en fonction de la fréquence pour le BPM en fonction de la fréquence. Courbe expérimentale (pointillée) et théoriques (ligne continue) déduite du modèle double DCE

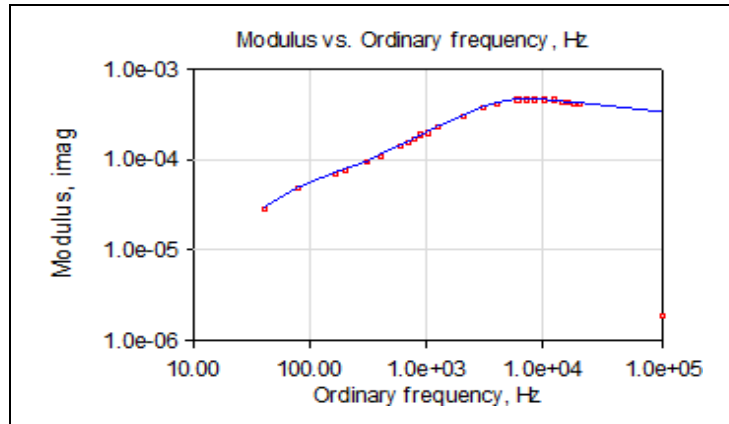


Figure II.7. Composante imaginaire du module ( $M''$ ) pour le BPM en fonction de la fréquence. Courbe expérimentale (pointillée) et théorique (ligne continue) déduite du modèle double DCE

Les valeurs des paramètres électriques des ajustements du modèle double DCE (Figure II.2) pour les échantillons du BPM dans des conditions normales de laboratoire sont clairement indiquées dans le tableau II.2. Les paramètres  $R_1$ ,  $\tau_1$  et  $\psi_1$  représentent l'arc de basses fréquences et  $R_2$ ,  $\tau_2$  et  $\psi_2$  l'arc hautes fréquences du spectre.

Tableau II.2: Paramètres électriques du modèle Double-DCE (ZARC)

$R_1$ (M $\Omega$ )	$\tau_1$ ( $\mu$ s)	$\psi_1$	$R_2$ (M $\Omega$ )	$\tau_2$ ( $\mu$ s)	$\psi_2$
2,15	34,8	0,885	9,14	1554	0,824

## II.4. Conclusions

Dans le cadre de cette étude, la méthode SIE a été utilisée pour examiner les propriétés électriques du BPM à température ambiante ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ). Le modèle Double-DCE (ZARC) a été utilisé comme circuit équivalent. Les spectres d'impédance du BPM sont composés de deux arcs dans un plan complexe compris entre 40 et 100 kHz. Les courbes expérimentales (en pointillés) et théoriques (lignes continues) déduites du modèle double DCE coïncident parfaitement.

**CHAPITRE III**  
**ETUDE ÉLECTRIQUE DU BOIS DE PIN MARITIME PAR**  
**RAPPORT À LA COLORATION BLEUE**

### III.1. Introduction

Habituellement, si les troncs de pin maritime sont laissés dans la forêt ou dans des entrepôts pendant une longue période, ils sont très susceptibles de développer des tâches fongiques à moins d'être sciés rapidement après abattage. La coloration bleue, en raison de sa présence dans le bois d'œuvre, a fait l'objet de nombreuses recherches (Findlay et Pettifor 1937 et 1939, Chapman 1940, Ballard *et al.*, 1982 et 1984, Humar *et al.*, 2008). Findlay et Pettifor (1937) ont étudié l'effet du bleuissement sur les propriétés mécaniques de l'aubier de pin sylvestre et ont constaté que la présence des tâches de champignons n'avait aucun effet sensible sur sa résistance à la compression ou à la flexion. Un autre travail de Findlay et Pettifor (1939) a montré que la coloration bleue causée par *Ophiostoma (Ceratostomella)* sp. apporte une réduction appréciable de la ténacité, mais n'affecte guère les autres propriétés de résistance de l'aubier de pin. La référence à Chapman (1940) montre que les différentes espèces de champignons de coloration bleue n'ont pas affecté le bois avec la même sévérité et leur ordre relatif de supériorité à cet égard n'était pas entièrement le même pour toutes les propriétés testées. D'après les observations initiales de Ballard *et al.*, (1982), il était évident que les hyphes fongiques étaient assez répandus dans les trachéides de l'aubier dans les derniers stades du cycle de la maladie du bleuissement. Ballard *et al.*, (1984) ont étudié la pénétration et la croissance des champignons responsables des tâches bleues dans l'aubier du pin attaqué par le dendroctone du pin ponderosa. Les résultats sur les propriétés du bois teinté de bleu par Humar *et al.*, (2008) ont montré que les champignons de coloration bleue, outre une décoloration considérable, ne causent pas de dommages significatifs au bois.

D'autre part, la spectroscopie d'impédance électrique (SIE) est l'une des méthodes potentielles pour l'analyse non destructive de l'humidité du bois (Zelinka *et al.*, 2007 et 2008), du gradient d'humidité (Tiitta *et al.*, 1999b) du développement des moisissures (Tiitta *et al.*, 1999a), de l'acclimatation au froid (Repo *et al.*, 2000) et l'évaluation de la compatibilité inter-faciale dans les composites de farine de bois / polypropylène (Zhu *et al.*, 2013) ou de la farine de bois / polyéthylène (Lazrak *et al.*, 2018). La SIE a été utilisée pour étudier la réaction de stress chez les plantes (Repo *et al.*, 2000, Väinölä et Repo 2000, Hakam *et al.*, 2012). La méthode fournit des informations sur les propriétés physicochimiques de la structure cellulaire. Selon Tiitta *et al.*, (1999a), Hakam *et al.*, (2017a) et (2017b), la SIE pourrait être une technique utile pour distinguer le bois sain du bois attaqué. La caractérisation du BPM par rapport à la coloration

bleue, avec un champ électrique de basse fréquence, n'a pas encore été étudiée. Elle peut fournir une base valable pour déterminer les défauts du bois de façon non destructive.

## III.2. Matériel et méthodes

### III.2.1. Matériaux

Les échantillons de bois ont été obtenus auprès du Centre de recherches forestières (CRF) de Rabat, Maroc. L'étude a été réalisée sur des pins maritimes matures de 45 ans dans la forêt de la Mamora occidentale (6° 45'O, 34° 2'N, 30m d'altitude), Rabat, Maroc. A partir des arbres abattus, des tiges de 3 m ont été sciées en planches de 60 mm d'épaisseur. Le séchage du bois a provoqué une coloration bleue de certaines planches. A partir de planches saines ou bleuies, des échantillons pour les mesures électriques ont été découpés en morceaux carrés de 40 mm et de 2 à 4 mm d'épaisseur dans la direction longitudinale, et lissés doucement par ponçage (Figure III.1). Pour les mesures physiques (teneur en humidité et densité), les échantillons ont été découpés en morceaux cubiques de 20 mm. Dans cette étude, les échantillons ont été analysés dans des conditions normales de laboratoire. Les paramètres physiques des échantillons du BPM sont rassemblés dans le tableau III.1.



Figure III. Surfaces de contact d'un échantillon sain (a) et d'un échantillon bleui (b)

Tableau III.1. Nombre, densité et teneur en eau des échantillons

Speciment	Nombre d'échantillons	Densité moy/d.s	Humidité % moy /d.s
Témoin	4	650 / 0	15,4 / 0,1
Bleui	8	652 / 3	15,7 / 0,7

Il n'y avait pas de différence significative concernant la teneur en humidité et la densité entre les échantillons témoins et attaqués par le bleuissement. Avant les mesures d'impédance, les échantillons ont été pesés et les dimensions ont été mesurées. Après les mesures d'impédance,

les échantillons ont été séchés à  $103 \pm 3^\circ\text{C}$  pendant 24 h et pesés. Les dimensions, la teneur en humidité et les densités ont été mesurées avec une précision de 0,1 mg en poids et de 0,02 mm pour les dimensions. Tous les échantillons ont été conservés dans la même chambre dans les mêmes conditions ambiantes et la teneur en humidité (H%) est calculée.

### III.2.2. Mesures d'impédance

Les mesures SIE sur les échantillons du BPM ont été réalisées à température ambiante avec deux électrodes circulaires en cuivre placées directement en contact du matériau sans utiliser de gel conducteur. Les deux électrodes étaient directement connectées au dispositif de mesure d'impédance (HP LCZ-meter 3330), avec des fréquences allant de 40 Hz à 100 kHz.

### III.2.3. Modélisation électrique

Il a été montré dans plusieurs études précédentes que la réponse en fréquence des tissus biologiques comme le bois (Tiitta et al., 1999a et 1999b, Hakam et al., 2012 et 2017a, Lazrak et al., 2018) ne peut pas être ajustée en utilisant des éléments simples tels que les résistances (R), les capacités (C), les inductances (L). Cette dispersion de fréquence est souvent décrite comme un changement de capacité et est exprimée en termes d'éléments de phase constante (élément de phase constante: CPE):

$$Z_{CPE} = \frac{1}{(i\omega C)^\Psi} \quad (6)$$

Où C est la capacité,  $\omega$  la fréquence angulaire,  $\Psi$  le coefficient de distribution du temps de relaxation et i l'unité imaginaire. Dans cette étude, le modèle mathématique double-DCE (ZARC) (MacDonald, 1987) qui est illustré par un schéma équivalent a été ajusté aux données. Le modèle double DCE (ZARC) comprend deux éléments de circuit distribué (DCE) en série avec une résistance  $R_\infty$  ( $R_\infty$  est la résistance aux très hautes fréquences) (Figure III.2). L'élément DCE comprend un élément de phase constante (CPE) en parallèle avec une résistance (R):

$$Z_{DCE} = \frac{R}{1 + (i\omega\tau)^\psi} \quad (7)$$

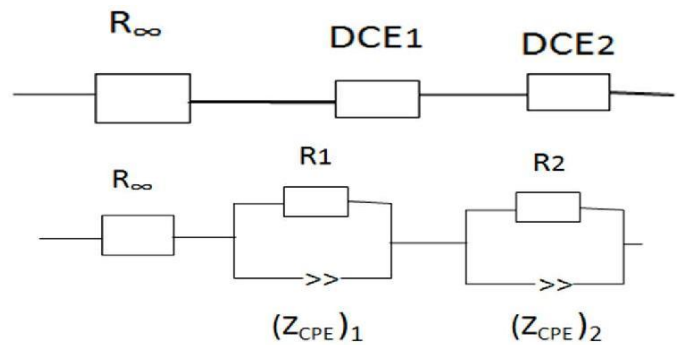


Figure III.2. Circuit équivalent du modèle double-DCE (ZARC)

Les paramètres électriques de ce modèle ont été déterminés pour le BPM sain et bleui : la résistance intracellulaire ( $R_i = R_\infty$ ), les résistances extracellulaires ( $R_{e1} = R_1$  et  $R_{e2} = R_2$ ), les temps de relaxation ( $\tau_1$  et  $\tau_2$ ) et les coefficients de distribution des temps de relaxation ( $\Psi_1$  et  $\Psi_2$ ). Les paramètres du modèle ont été estimés à l'aide du programme d'ajustement de courbe complexe par la méthode des moindres carrés non linéaires (CNLS) LEVM version 8.13 (J.R. Macdonald, Université de Caroline du Nord, USA).

### III.3. Résultats et discussion

#### III.3.1. Réponse en fréquence

Les spectres d'impédance électrique du BPM sain et bleui ont été mesurés au laboratoire par la méthode décrite ci-dessus. Le comportement de la partie imaginaire de l'impédance ( $Z_i$ ) en fonction de la partie réelle de l'impédance ( $Z_r$ ) pour le BPM sain à température ambiante est illustré sur les figures III.3.

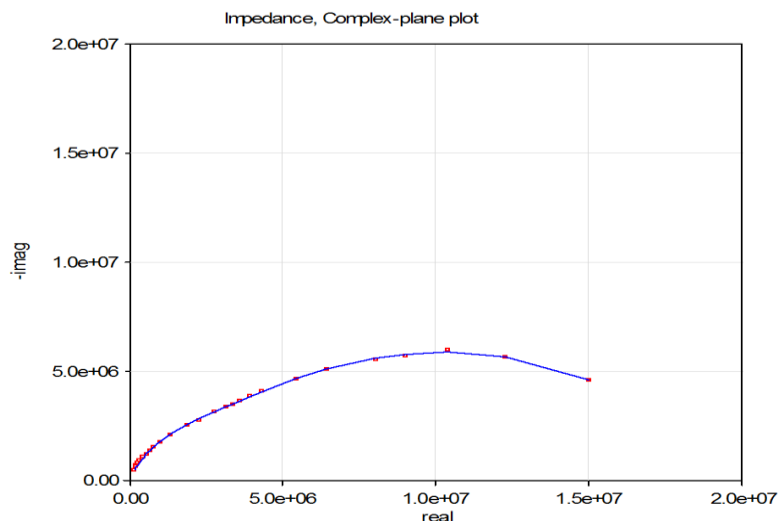


Figure III.3. Composante imaginaire de l'impédance ( $Z_i$ ) en fonction de la composante réelle ( $Z_r$ ) du BPM sain. Courbe expérimentale (pointillée) et théorique (ligne continue) déduite du modèle double DCE.

Le graphique représentant  $Z_i = f(Z_r)$  dans un plan complexe pour le BPM avec bleuissement est présenté sur la figure III.4.

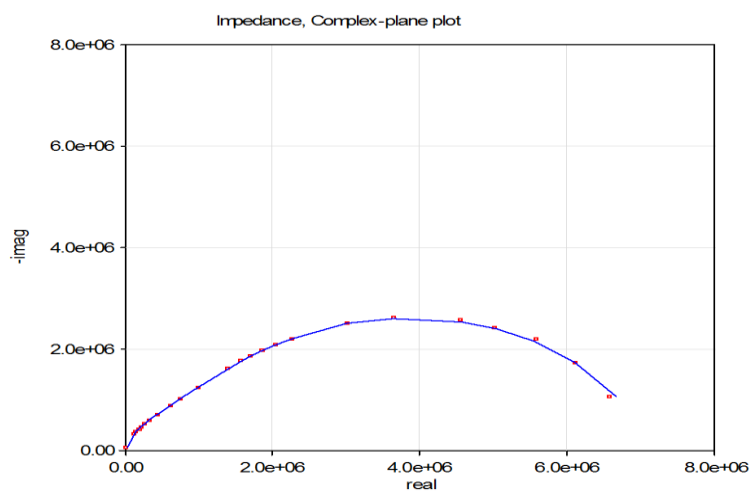


Figure III.4. Composante imaginaire de l'impédance ( $Z_i$ ) en fonction de la composante réelle ( $Z_r$ ) pour le BPM avec bleuissement. Courbe expérimentale (pointillée) et théorique (ligne continue) déduite du modèle double DCE.

Le graphique représentant  $Z_i = f(Z_r)$  dans le plan complexe pour le BPM après séchage est présenté sur la figure III.5.

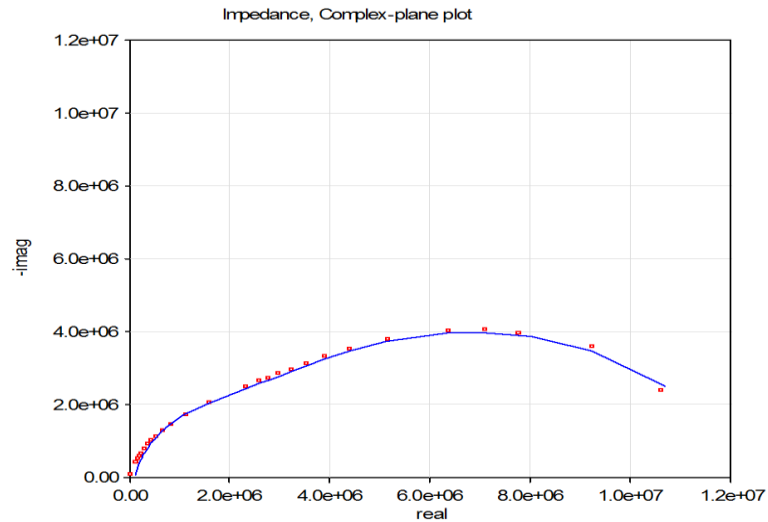


Figure III.5. Composante imaginaire de l'impédance ( $Z_i$ ) en fonction du composant réel ( $Z_r$ ) pour le BPM avec bleuissement après séchage. Courbe expérimentale (pointillée) et théorique (ligne continue) déduite du modèle double DCE.

La coloration bleue a eu un effet sur les propriétés électriques dans toute la gamme de fréquences. Il est à noter que les valeurs expérimentales pour chaque fréquence de la partie réelle de l'impédance électrique ( $Z_r$ ) de l'échantillon bleuie restent faibles par rapport aux échantillons sains sur pratiquement toute la gamme de fréquence, et les valeurs expérimentales pour chaque fréquence de la partie imaginaire de l'impédance électrique ( $Z_i$ ) de l'échantillon bleui restent faibles par rapport aux échantillons sains sur toute la gamme de fréquence (Figures III.3 et Figures III.4).

### III.3.2. Modélisation de la réponse en fréquence

Le spectre d'impédance de chaque échantillon avait un double arc en forme de parabole où le haut correspond à la valeur de la fréquence caractéristique du matériau ( $f_c$ ) et l'intersection de la parabole avec l'axe x donne  $R_\infty$  et  $R_{e1}$  et  $R_{e2}$ . Le rayon de l'arc diminue avec le début de la coloration bleue. Il est évident que l'effet de la coloration bleue de l'échantillon a eu un effet sur les propriétés électriques sur toute la gamme de fréquences. La comparaison des courbes expérimentales (lignes pointillées) avec les courbes théoriques (en traits pleins) (Figures III.3, Figures III.4 et III.5) indique que les mesures expérimentales sont en bon accord avec les valeurs dérivées du modèle double DCE proposé. L'ajustement satisfaisant du modèle double DCE indique fortement la pertinence du modèle dans l'étude du BPM.

### III.3.3. Extraction des paramètres électriques du modèle Double-DCE (ZARC)

Dans les sciences physiques, les caractéristiques du phénomène communément produit par une excitation sont connues sous le nom de temps de relaxation, qui signifie habituellement le retour d'un système perturbé à l'équilibre. Les temps de relaxation ( $\tau_1$  et  $\tau_2$ ) du BPM se sont révélés fortement dépendants de la présence du bleuissement (Tableau III.2). L'effet de la coloration bleue sur les paramètres électriques du modèle adopté a été clairement décrit dans le tableau III.2. Selon ce tableau, un minimum de  $\tau_1$  et  $\tau_2$  est obtenu pour le bois teinté en bleu.

Tableau III.2. Les valeurs des paramètres (moyenne / d.s) du modèle double DCE (Figure III. 2) correspondent aux échantillons conditionnés à  $65 \pm 5\%$  HR.  $R_1$ ,  $\tau_1$  et  $\Psi_1$  représentent les paramètres aux basses fréquences et  $R_2$ ,  $\tau_2$  et  $\Psi_2$  représentent les paramètres à des fréquences plus élevées.

Echantillon	$R_1$ (M $\Omega$ )	$\tau_1$ ( $\mu$ s)	$\Psi_1$	$R_2$ (M $\Omega$ )	$\tau_2$ ( $\mu$ s)	$\Psi_2$
BPM sain	2/0,8	80/20	0,95/0,02	20/10	1500/900	0,75/0,02
BPM bleui	1/0,5	42/13	0,89/0,03	9,6/7	730/530	0,86/0,03

Le tableau III.2 montre que la coloration bleue était accompagnée d'une diminution des valeurs des temps de relaxation ( $\tau_1$  et  $\tau_2$ ) et des résistances extracellulaires ( $R_{e1}$  et  $R_{e2}$ ). Une diminution de 50% de ces grandeurs a été constatée. Aucun changement n'a été observé pour la résistance intracellulaire ( $R_i$ ) (Tableau III.2).

### III.4. Conclusion

Dans le cadre de cette étude, la méthode de Spectroscopie d'Impédance Electrique (SIE) a été utilisée pour examiner l'effet de la coloration bleue sur l'impédance électrique du bois de pin maritime (BPM) (*Pinus pinaster* L.) dans le domaine des basses fréquences et faible teneur en humidité. L'effet de la coloration bleue sur la densité du bois et les propriétés électriques du BPM à un stade précoce du bleuissement par les champignons a été étudié dans la direction longitudinale du bois. Les valeurs expérimentales pour chaque fréquence de la partie réelle ( $Z_r$ ) et de la partie imaginaire ( $Z_i$ ) de l'impédance électrique des échantillons sains et bleuies ont été mesurées dans des conditions atmosphériques à  $(20 \pm 2^\circ\text{C})$  et dans une gamme de fréquence allant de 10 Hz à 100 KHz, dans laquelle l'effet de l'électrode était négligeable. Le modèle Double-DCE (ZARC) a été utilisé comme circuit équivalent. Il a été montré que la coloration bleue a un impact important sur les propriétés électriques. Les données présentées ont montré qu'il est possible d'effectuer une détection précoce du bleuissement et de suivre sa croissance

par analyse des données obtenues par spectroscopie d'impédance électrique. En effet la coloration bleue a eu un effet sur les propriétés électriques sur toute la gamme de fréquences. Les changements observés dans les propriétés électriques du BPM liés à la coloration bleue indiquent qu'à une température et une teneur en humidité constantes, les temps de relaxation ( $\tau_1$  et  $\tau_2$ ) et les résistances extracellulaires ( $R_{e1}$  et  $R_{e2}$ ) diminuent. Les paramètres d'impédance étaient significativement sensibles à la coloration bleue. Selon cette technique, les paramètres électriques peuvent être considérés comme un indicateur du bleuissement du bois.

**DEUXIEME PARTIE**  
**ETUDE DE LA DEGRADATION DES FINITIONS**  
**APPLIQUEES SUR CERTAINES ESSENCES DU BOIS**  
**COMMERCIALISEES AU MAROC**

# **CHAPITRE IV**

## **MATERIEL ET METHODES DES SYSTEME BOIS /**

### **FINITION**

#### **IV.1. Introduction**

Le bois est un matériau largement utilisé pour des applications intérieures mais aussi extérieures. Des exemples d'applications pour l'extérieur concernent les domaines de la

menuiserie (portes, fenêtres), du mobilier (bancs, tables, chaises) ou encore de l'aménagement (bardages, clôtures, terrasses) (Masson, 2011). L'utilisation du bois en industrie présente de nombreux avantages: facilité de mise en oeuvre, faible coût énergétique, qualité d'isolant thermique, propriétés esthétiques et propriétés mécaniques élevées par rapport à son poids. Par exemple, une poutre en bois d'épicéa pesant 60 kg et d'une portée de 3 mètres, est capable de supporter un poids de 20 tonnes (Merlin, 2011)

L'étude des systèmes de finitions appliquées pour les menuiseries extérieures en bois s'est basée sur des essais normatifs, sachant que ces essais ne sont pas suffisamment rapides. Les résultats rapides sont obtenus par des essais de laboratoire avec le QUV, des essais fiables exigent quant à eux une exposition extérieure de longue durée.

L'une des préoccupations actuelles concerne la qualité du bois exposé au milieu extérieur. De nombreuses études ont montré que le bois fini ne peut pas tenir pour une longue période sans être entretenu. Les sources de protection du bois et sa durabilité sont nombreuses, et parmi elles, il y a les produits de finitions. L'étude du vieillissement climatique ou accéléré d'un système bois-finition montre que la conservation optimale n'est pas seulement tributaire de la finition elle-même mais également du support qu'elle recouvre (Podgorski et al., 1994 et 1996, Podgorski, 1993).

Ce chapitre est une description des matériaux de base pour la fabrication des système Bois / Finition, des méthodes de détermination des caractéristiques des produits de finition (épaisseur et extrait sec), des méthodes de caractérisation de l'adhérence et de la perméabilité à l'eau liquide, des méthodes de vieillissement accéléré et enfin des techniques de caractérisation des systèmes Bois / Finition avant et après vieillissement (appréciation visuelle des modifications de l'aspect de surface et mesure des variations de la couleur).

Exposé à plusieurs facteurs de vieillissement sur le QUV ou la roue de dégradation, le bois change de couleur et d'aspect.

Certains bois changent de couleurs et d'aspect selon l'influence des compositions de bois (en particulier les compositions extractives). Pour l'utilisation (parquets, panneaux, meubles, etc.) et la menuiserie extérieure protégée par des revêtements transparents, la stabilisation de la couleur de la surface naturelle du bois est requise. La recherche de nouveaux traitements stabilisant la couleur de surface du bois trouverait facilement des applications industrielles. Ce

travail rend compte des changements de couleur ( $\Delta E$ ,  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  et  $\Delta b^*$ ) (ISO 2813, 1994) et de l'aspect de la surface (EN ISO 4628-1 1982, 2 2003, 4 2003, 5 2003 et 6 2006 et EN XP D 60- 050 2002).

## IV.2. Support bois

### IV.2.1. Choix du support bois

Le choix du support bois s'est porté sur les essences de bois, les plus utilisées au Maroc, à savoir le Pin sylvestre (*Pinus sylvestris*), le Chêne pédonculé (*Quercus robur*) et l'acajou (*Khaya ivorensis*).

### IV.2.2. Acquisition du bois

Des planches du bois massif des trois essences étudiées, commercialisées au Maroc, ont été sélectionnées sans défaut et sans irrégularité et stockées au laboratoire (Figure IV.1). Six panneaux de dimensions : 10 cm x 35cm x 2 cm et un panneau de dimension 30 cm x 15cm x 2cm de chaque essence ont été prélevés. Le tableau IV.1 donne quelques caractéristiques des essences du bois utilisées dans ce travail.



Figure IV.1. Photos des planches achetées Figure IV.2. Photos des éprouvettes confectionnées

Tableau IV.1. Quelques caractéristiques du support bois utilisé dans ce travail

Essence de bois	résineux / feuillus	Retrait tangentiel (%)	Vitesse de séchage	Référence
<i>Pinus sylvestris</i>	résineux	8,3	Rapide à normal	Tropix 7

<i>Quercus robur</i>	feuillus	9,7	Lente	Tropix 7
<i>Khaya ivorensis</i>	feuillus	5,5	Rapide	Tropix 7

Le tableau IV.2 résume la provenance et l'utilisation du bois acheté dans le marché pour la confection des éprouvettes. L'humidité relative de l'air est de  $65 \pm 5\%$  et l'humidité du bois (H%) est entre 12% et 13%. Aucun renseignement sur l'âge et l'origine exacte du bois n'a pu nous être fourni.

Tableau IV.2. Provenance et utilisation du bois acheté dans le marché marocain

Essence	Autres noms	Provenance	Utilisations	Classe d'emploi
Bois massif résineux				
Pin sylvestre	Bois rouge	Suède, Finlande, Europe	Charpente, Menuiserie Aménagement intérieur	3
Bois massif feuillus				
Chêne	Quercus	France, Europe	Menuiserie Aménagement intérieur	3
Bois massif exotique				
Acajou	Sapelli	Afrique	Menuiserie	2

Classe d'emploi 3 : bois destiné pour la menuiserie et le revêtement extérieur partiellement abrité

Classe d'emploi 2 : Situations dans lesquelles le bois est au-dessus du sol et est exposé aux intempéries.

### IV.2.3. Confection des éprouvettes

Les éprouvettes ont été coupées en longueur suivant l'axe de symétrie longitudinal (L), en largeur suivant l'axe de symétrie tangentiel (T) et en profondeur suivant l'axe de symétrie radial (R) (Figure IV.2). Les dimensions et le nombre des éprouvettes confectionnées dépendent du test qu'elles vont subir (Tableau IV.3). Par exemple une éprouvette N est une éprouvette témoin, qui ne va pas subir de test de vieillissement, elle va seulement subir un test d'adhérence, une éprouvette T<sub>PE</sub> est une éprouvette qui va subir un test de perméabilité à l'eau liquide, une éprouvette T<sub>VQ</sub> est une éprouvette qui va subir un test de vieillissement au QUV et une éprouvette T<sub>VR</sub> est une éprouvette qui va subir un test de vieillissement à la roue de dégradation.

Tableau IV.3. Caractéristiques des éprouvettes pour les tests d'adhérence, de perméabilité à l'eau liquide et de vieillissement (au QUV et à la roue)

Test	Code	Dimension L x T x R (cm <sup>3</sup> )	Nombre
Eprouvette témoin	N	30 x 10 x 1,8	1
perméabilité à l'eau	T <sub>PE</sub>	15 x 8 x 1,8	2
vieillissement au QUV	T <sub>VQ</sub>	15 x 8 x 1,5	3
vieillissement à la roue	T <sub>VR</sub>	30 x 15 x 1,8	1

L : longitudinal, T : tangentiel et R : radial

### IV.3. Produit de finition

#### IV.3.1. Acquisition des produits de finition

La finition représente une des étapes les plus importantes pour ajouter de la valeur aux produits en bois et de protéger aussi efficacement que possible les surfaces.

Les produits de finitions sont toujours des mélanges dans lesquels chaque constituant remplit une fonction spécifique. Les principaux constituants d'une finition sont: Les liants, les solvants, les pigments, les charges, les additifs...

Il existe dans le commerce une grande variété de finitions bois. Parmi elles, nous pouvons citer:

##### IV.3.1.1. Les revêtements en milieu solvant

La formation du film s'obtient, soit par l'évaporation du ou des solvants, soit par une réaction chimique qui aboutit à une réticulation du liant. Les liants dans ce cas sont presque des polymères de masse moléculaire élevée, qui ont la propriété de laisser les solvants s'évaporer rapidement. Parmi les liants constitutifs des finitions en phase solvant, nous pouvons citer : le nitrate de cellulose (nitrocellulose), les esters de polyvinyle, le polystyrène, les résines époxy de masse molaire très élevée, les polyamides...

##### IV.3.1.2. Les revêtements en phase aqueuse

Les dispersions de polymères thermoplastiques dans l'eau permettent de formuler des revêtements avec peu ou pas de solvants organiques. L'absence ou la moindre présence de COV rend ces produits plus respectueux de l'environnement que les solvantés. Cependant, l'application d'une finition aqueuse en surface du bois pose des problèmes liés à la structure de ce matériau.

### **IV.3.1. 3. Le vernis de finition**

Il ne s'applique qu'en dernière couche et confère son aspect final au support (brillance, dureté, résistances physico-chimiques, touché). Le vernis de finition doit impérativement s'appliquer sur un fond approprié.

### **IV.3.1.4. la laque**

C'est un vernis de finition opaque et pigmenté. La laque, comme l'apprêt, est en général composée d'un ou de plusieurs liants, de solvants, de diluants, de plastifiants et d'adjuvants, avec incorporation de charges et de pigments.

### **IV.3.1.5. Vernis bicouches**

Le vernis bicouche est un produit hybride qui peut être utilisé à la fois comme couche de fond et comme couche de finition. Le vernis bicouche, comme le vernis de finition et de fond, est en général composé d'un ou de plusieurs liants, de solvants, de diluants, de plastifiants et d'adjuvants. Un vernis bicouche ne permet pas d'obtenir un système de finition brillant en raison de la présence obligatoire d'un agent de ponçage.

### **IV.3.1.6. La peinture**

La peinture forme un film opaque avec des qualités protectrices et décoratives. La quantité importante de pigments qui existent dans la peinture, procure une durabilité supérieure. À l'inverse de la lasure, la peinture masque le veinage du bois après une ou plusieurs couches.

### **IV.3.1.7. La peinture blanche**

Les produits de finition de teinte blanche ne sont pas assez souples pour le bois, donc La souplesse des revêtements photopolymérisables doit être améliorée pour être compatible avec des utilisations extérieures.

Avant toute application, il est nécessaire de se référer à la fiche technique du produit concerné, afin de connaître les spécificités de préparation de surface, d'application et la mise en service du produit appliqué.

Notre choix s'est porté sur six finitions aqueuses couramment commercialisées au Maroc. Le tableau IV.4 présente quelques caractéristiques des produits de finitions utilisés.

Tableau IV.4. Caractéristiques des produits de finitions utilisés

Finition	Marque	Produit	Résine de base	Propriété
F <sub>1</sub>	Sayerlack 1	AM 0546/XX	polyuréthane	Vernis aqueux transparent
		AZ 3430/00		
F <sub>2</sub>	Sayerlack 2	TU 001/00 - TH 925	polyuréthane	Vernis aqueux mate blanc
		TZ 4920/00 - TH 925		
F <sub>3</sub>	Sayerlack 3	AM 0481/XX	polyuréthane	Peinture opaque aqueuse Lasure laquée
		D 14582		
F <sub>4</sub>	Sikkens 1	CETOL WP 560	acrylique	Lasure aqueuse Transparente mate
		CETOL WF 980		
F <sub>5</sub>	Sikkens 2	CETOL WF 791	acrylique	Lasure Aqueuse opaque blanche Mate satiné
F <sub>6</sub>	Sikkens 3	RUBBOL WP 176	acrylique	Peinture aqueuse blanche opaque mate satinée : Laque
		Rub2ol WF 380		

Le tableau IV.5 présente les caractéristiques techniques des produits de finition obtenus à partir des fiches techniques fournies par le fabricant.

Tableau IV.5. Caractéristiques techniques des produits de finition fournis par les fiches techniques

Marque	Densité (kg /l)	contenu solide (%)	Viscosité appliquée	Quantité de vernis appliquée	Ecart de buse (mm)	Pression de l'air (bar)
Sayerlack 1	1,02	9+/-2	48+/-3 second / DIN Cup2 / 20°C	-	-	-
	1,03 -1,08	36 - 48	-	150-300 (g/m2) /couche	1,9 - 2,2	3-4
Sayerlack 2	0,98	46+/-1	DIN 4 60+/-5	180(g/m2) /couche	-	-

Marque	Densité (kg /l)	contenu solide (%)	Viscosité appliquée	Quantité de vernis appliquée	Ecart de buse (mm)	Pression de l'air (bar)
	0,97	41+/-2	DIN 4 60+/-5	-	-	-
	0,96		26+/-1	-	-	-
Sayerlack 3	1,19 ± 0,05	43 ± 2	DIN 4: 18±2	-	-	-
Sikkens 1	1,02	14	22 à 24 secondes, coupe ISO 3	3 - 5 microns/couche	-	-
	1,03	35	30-40 dPa.s	100 microns/couche	0,28	-
Sikkens 2	1,05	-		80-100µm	-	-
Sikkens 3	1,01	26	25 secondes à la coupe ISO3	10 microns, approx. 30 m²/L	-	-
	1,11– 1,31	38- 50	35 - 45 dPa.s Viscosité Haake VT 02	100 microns, approx. 3 m²/L	0,28 – 0,3	-

#### IV.3.2. Mesure de l'extrait sec des produits de finition

L'extrait sec d'un produit de finition est la masse obtenue après évaporation du solvant (l'eau dans notre cas). Il est exprimé en pourcentage (%) et déterminé selon la norme NF EN ISO 3251 (2003). L'appareillage est constitué d'une capsule à fond plat, en verre, d'une étuve et d'une balance analytique. Le mode opératoire consiste à dégraisser et nettoyer les capsules, les faire sécher à l'étuve à 200 °C juste avant utilisation. Nous avons mesuré la masse de chaque capsule propre et sèche ( $m_0$ ) à 1 mg près. Nous avons pesé par la suite, à 1 mg près, une prise d'essai de 1 g ( $m_1$ ) que nous répartissons uniformément dans une capsule. Après avoir effectué la pesée, nous avons placé les capsules pendant 20 minutes dans une étuve portée à la température convenue (200 °C). Les mesures ont été réalisées trois fois et la valeur moyenne est prise en considération. Nous calculons l'extrait sec NV, exprimé en pourcentage en masse, à l'aide de l'équation suivante :

$$NV = \frac{100 \times (m_2 - m_0)}{m_1 - m_0} \quad (8)$$

Avec :

$m_0$ = la masse, en grammes, de la capsule vide ;

$m_1$ = la masse, en grammes, de la capsule contenant la prise d'essai (1 g) ;

$m_2$ = la masse, en grammes, de la capsule contenant le résidu.

## IV.4. Système Bois / Finition

### IV.4.1. Préparation de l'atelier de finition

Les étapes suivantes sont nécessaires pour la préparation de l'atelier de finition (Figure IV.3), nous commençons par purger la ligne d'air comprimé pour éliminer les traces d'eau, puis nettoyer la buse du pistolet avec du solvant, en la laissant pendant 24h dans un verre avec le solvant, puis la nettoyer avec une brosse. Et enfin, préparer la buse, la tête diffuseur d'air, l'aiguille, le papier ou les éponges pour poncer de grain 180/320/400, les gants et les masques pour l'application de la finition et une balance pour le grammage.



Figure IV.3. Photos de cabine de finition au CTIBA

### IV.4.2. Application des produits de finition

Les produits de finition sont appliqués (Figure IV.4) selon les indications des fiches techniques du fabricant. Le tableau IV.6 présente le grammage, la méthode et la chronologie d'application des produits de finition sur les supports bois destinés au test de vieillissement accéléré à la roue. Comme exemple de calcul, si la fiche technique d'un produit de finition dit qu'il faut appliquer 100 g du produit sur une surface de  $1 \text{ m}^2 = 10000 \text{ cm}^2$ , la quantité du produit qu'il faut appliquer sur une éprouvette de vieillissement à la roue ( $T_{VR}$ ) est de  $(100 \times 450)/10000 = 4,5 \text{ g}$ . Donc il faut préparer 4,5 g pour une éprouvette de  $450 \text{ cm}^2$  (Figure IV.4).



Figure IV.4. Photos d'application des produits de finition

Tableau IV.6. Grammage, méthode et chronologie d'application des produits de finition sur les supports bois témoin et destinés aux tests de perméabilité à l'eau liquide, au test de vieillissement accéléré au QUV et au test de vieillissement accéléré à la roue

Finition	Méthode d'application	Grammage (g/m <sup>2</sup> )	Quantité de produit qu'il faut appliquer sur l'éprouvette T <sub>VN</sub> (g) 35 x 10 x 1,8 cm <sup>3</sup>	Quantité de produit qu'il faut appliquer sur l'éprouvette T <sub>VR</sub> (g) 30 x 15x 1,8 cm <sup>3</sup>
F <sub>1</sub>	Application de la 1ère couche du produit 1 avec une brosse	70	2,45	3,15
	Laisser sécher pendant une journée			
	Application de la 1ère couche du produit 2 avec le pistolet	100 et 150	3,5 - 5,25	4,5 - 6,75
	Laisser sécher pour une journée et poncer légèrement (grain 320-400)			
	Application de la deuxième couche du produit 2 avec un pistolet	100-150	3,5 - 5,25	4,5 - 6,75
Laisser sécher pendant 7 jours				
F <sub>2</sub>	Application de la 1ère couche du produit 1 avec un pistolet	150-180	5,25 - 6,3	6,7 - 8,1
	Laisser sécher pendant une journée et poncer légèrement (grain 320-400)			
	Application de la 2ème couche du produit 1 avec un pistolet	150-180	5,25 - 6,3	6,7 - 8,1
	Laisser sécher pendant une journée et poncer légèrement (grain 320-400)			
	Application de la 3ème couche du produit 2 avec un pistolet	100-200	3,5 - 7,0	4,5 - 9,0
Laisser sécher pour 7 jours				
F <sub>3</sub>	Application de la 1ère couche du produit 1 avec une brosse	70	2,45	3,15
	Laisser sécher pendant une journée et poncer légèrement (grain 320-400)			
	Application de la 1ère couche du produit 2 avec un pistolet	100-120	3,5 - 4,2	4,5 - 5,4
	Laisser sécher pendant une journée et poncer légèrement (grain 320-400)			
	Application de la 2ème couche du produit 2 avec un pistolet	100-120	3,5 - 4,2	4,5 - 5,4
Laisser sécher pendant 7 jours				

Finition	Méthode d'application	Grammage (g/m <sup>2</sup> )	Quantité de produit qu'il faut appliquer sur l'éprouvette T <sub>VN</sub> (g) 35 x 10 x 1,8 cm <sup>3</sup>	Quantité de produit qu'il faut appliquer sur l'éprouvette T <sub>VR</sub> (g) 30 x 15x 1,8 cm <sup>3</sup>
	Application de la 1ère couche du produit 1 avec une brosse	100-150	3,5 - 5,25	4,5 - 6,75
Laisser sécher pendant une journée				

F <sub>4</sub>	Application de la 1ère couche du produit 2 avec un pistolet	100-120	3,5 - 4,25	4,5 - 5,40
	Laisser sécher pendant une journée			
	Application de la 2ème couche du produit 2 avec un pistolet	100-120	3,5 - 4,2	4,5 - 5,4
	Laisser sécher pendant 7 jours			
F <sub>5</sub>	Application de la 1ère couche du produit 1 avec un pistolet	80-100	2,8 - 3,5	3,6 - 6,75
	Laisser sécher pendant une journée			
	Application de la 2ème couche du produit 1 avec un pistolet	80-100	2,8 - 3,5	3,6 - 6,75
	Laisser sécher pendant 7 jours			
F <sub>6</sub>	Application de la 1ère couche du produit 1 avec une brosse	80-150	2,8 - 5,25	3,6 - 6,75
	Laisser sécher pendant une journée			
	Application de la 1ère couche du produit 2 avec un pistolet	125-150	4,37 - 5,25	5,63 - 6,75
	Laisser sécher pour une journée			
	Application de la 2ème couche du produit 2 avec un pistolet	125-150	4,37 - 5,25	5,63 - 6,75
	Laisser sécher pendant 7 jours			

Finition	Méthode d'application	Grammage (g/m <sup>2</sup> )	Quantité de produit qu'il faut appliquer sur l'éprouvette N (g) 30 x 10 x 1,8 cm <sup>3</sup>	Quantité de produit qu'il faut appliquer sur l'éprouvette TP (g) 15 x 8x 1,8 cm <sup>3</sup>	Quantité de produit qu'il faut appliquer sur l'éprouvette T <sub>QUV</sub> (g) 15 x 8x 1,8 cm <sup>3</sup>
F <sub>1</sub>	Application de la 1ère couche du produit 1 avec une brosse	70	2,1	0,84	0,84
	Laisser sécher pendant une journée				
	Application de la 1ère couche du produit 2 avec le pistolet	100 - 150	3 - 4,5	1,2 - 1,8	1,2 - 1,8
	Laisser sécher pendant une journée et poncer légèrement (grain 320-400)				

Finition	Méthode d'application	Grammage (g/m <sup>2</sup> )	Quantité de produit qu'il faut appliquer sur l'éprouvette N (g) 30 x 10 x 1,8 cm <sup>3</sup>	Quantité de produit qu'il faut appliquer sur l'éprouvette TP (g) 15 x 8x 1,8 cm <sup>3</sup>	Quantité de produit qu'il faut appliquer sur l'éprouvette T <sub>Quv</sub> (g) 15 x 8x 1,8 cm <sup>3</sup>
	Application de la deuxième couche du produit 2 avec un pistolet	100-150	3 - 4,5	1,2 – 1,8	1,2 – 1,8
Laisser sécher pendant 7 jours					
F <sub>2</sub>	Application de la 1ère couche du produit 1 avec un pistolet	150-180	4,5 – 5,4	1,8 – 2,16	1,8 – 2,16
	Laisser sécher pendant une journée et poncer légèrement (grain 320-400)				
	Application de la 2ème couche du produit 1 avec un pistolet	150-180	4,5 – 5,4	1,8 – 2,16	1,8 – 2,16
	Laisser sécher pendant une journée et poncer légèrement (grain 320-400)				
	Application de la 3ème couche du produit 2 avec un pistolet	100-200	3 - 6	1,2 – 2,4	1,2 – 2,4
Laisser sécher pendant 7 jours					
F <sub>3</sub>	Application de la 1ère couche du produit 1 avec une brosse	70	2,1	0,84	0,84
	Laisser sécher pendant une journée et poncer légèrement (grain 320-400)				
	Application de la 1ère couche du produit 2 avec un pistolet	100-120	3 – 3,6	1,2 – 1,44	1,2 – 1,44
	Laisser sécher pendant une journée et poncer légèrement (grain 320-400)				
	Application de la 2ème couche du produit 2 avec un pistolet	100-120	3 – 3,6	1,2 – 1,44	1,2 – 1,44
Laisser sécher pendant 7 jours					

Finition	Méthode d'application	Grammage (g/m <sup>2</sup> )	Quantité de produit qu'il faut appliquer sur l'éprouvette N (g) 30 x 10 x 1,8 cm <sup>3</sup>	Quantité de produit qu'il faut appliquer sur l'éprouvette T <sub>P</sub> (g) 15 x 8x 1,8 cm <sup>3</sup>	Quantité de produit qu'il faut appliquer sur l'éprouvette T <sub>Quv</sub> (g) 15 x 8x 1,8 cm <sup>3</sup>
	Application de la 1ère couche du produit 1 avec une brosse	100-150	3 - 4,5	1,2 – 1,8	1,2 – 1,8
Laisser sécher pendant une journée					

F <sub>4</sub>	Application de la 1ère couche du produit 2 avec un pistolet	100-120	3 – 3,6	1,2 – 1,44	1,2 – 1,44
	Laisser sécher pour une journée				
	Application de la 2ème couche du produit 2 avec un pistolet	100-120	3 – 3,6	1,2 – 1,44	1,2 – 1,44
	Laisser sécher pendant 7 jours				
F <sub>5</sub>	Application de la 1ère couche du produit 1 avec un pistolet	80-100	2,4 - 3	0,96 – 1,2	0,96 – 1,2
	Laisser sécher pendant une journée				
	Application de la 2ème couche du produit 1 avec un pistolet	80-100	2,4 - 3	0,96 – 1,2	0,96 – 1,2
	Laisser sécher pendant 7 jours				
F <sub>6</sub>	Application de la 1ère couche du produit 1 avec une brosse	80-150	2,4 – 4,5	0,96 – 1,8	0,96 – 1,8
	Laisser sécher pendant une journée				
	Application de la 1ère couche du produit 2 avec un pistolet	125-150	3,75 – 4,5	1,5 – 1,8	1,5 – 1,8
	Laisser sécher pendant une journée				
	Application de la 2ème couche du produit 2 avec un pistolet	125-150	3,75 – 4,5	1,5 – 1,8	1,5 – 1,8
	Laisser sécher pendant 7 jours				

La figure IV.5 présente les éprouvettes confectionnées avant l'application de la finition et la figure V.6 présente les éprouvettes après application de la finition.

Avant les tests de perméabilité à l'eau liquide ou de vieillissement (au QUV ou à la roue), les champs et le dos des éprouvettes sont fermés avec un produit scellant. Ce produit est appliqué en trois fois pendant trois jours à raison d'une couche par jour et laissé sécher pendant une semaine avant le démarrage des essais.



Figure IV.5. Photos des éprouvettes après application du scellant

Le produit scellant a pour fonction principale d'imperméabiliser les champs et le dos des éprouvettes. En effet, en appliquant un scellant, l'eau ou toute autre substance extérieure ne peuvent pas pénétrer dans l'éprouvette et l'endommager.



Figure IV.6. Photos des systèmes bois/ finition

#### **IV.4.3. Séchage du système Bois / Finition**

Entre deux couches, le séchage des éprouvettes est effectué à l'air libre dans le laboratoire pendant 1 jour. Les mesures sur le système Bois / Finition sont réalisées après une semaine.

#### **IV.5. Caractérisation des systèmes Bois / Finition**

##### **IV.5.1. Mesure de l'épaisseur de la couche de finitions**

Un appareil PIG est utilisé pour mesurer l'épaisseur des finitions (Figure IV.7). Cet appareil comprend : un microscope avec un objectif approprié et un oculaire portant une graduation, et un dispositif d'éclairage et un outil coupant. Les mesures sont réalisées selon la norme (NF EN ISO 2808 2007).



Figure IV.7. Photos d'un appareil PIG pour la mesure de l'épaisseur des finitions

Pour réaliser les mesures de l'épaisseur avec cet appareil, nous appuyons sur l'outil coupant afin d'obtenir une entaille en coin bien nette (Figure IV.8). Nous mesurons la largeur projetée  $b$ , en micromètres, de l'entaille en coin à l'aide du microscope.

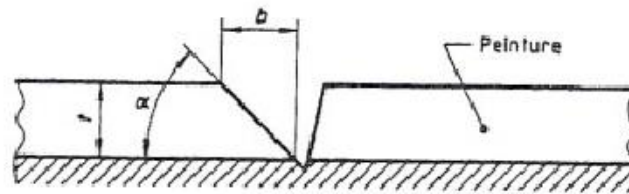


Figure IV.8. Représentation schématique d'une entaille en coin

L'épaisseur est donnée par l'équation :  $t = b \times \tan \alpha$

Où :  $t$  est l'épaisseur, en micromètre,  $b$  est la largeur projetée, en micromètres, de l'entaille mesurée au microscope,  $\alpha$  est l'angle à la base, en degrés, de l'outil coupant.

Le tableau IV.3 donne pour chaque essence du bois utilisé (*Pinus sylvestris*, *Quercus robur* et *Khaya ivorensis*) et chaque finition ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $F_4$ ,  $f_5$  et  $F_6$ ), le nom du test, le nombre et les dimensions des éprouvettes destinées à chaque test. 3 est le nombre d'essences de bois, 6 est le nombre de finitions et 7 est le nombre des systèmes de finition, donc le nombre total des éprouvettes à caractériser est de  $3 \times 6 \times 7 = 126$ .

#### IV.5.2. Test de l'adhérence des finitions par la méthode du quadrillage

La mesure de l'adhérence des films de finition sur le bois se fait en trois étapes. La première étape consiste à réaliser des incisions avec un outil coupant (Figure IV.9) en surface du bois en dessinant un quadrillage sur  $1 \text{ cm}^2$  de 100 carrés de 1 mm de côté. La deuxième étape consiste à couvrir l'endroit incisé avec un ruban adhésif et la dernière étape consiste à arracher avec la

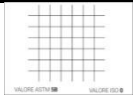
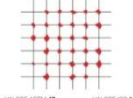
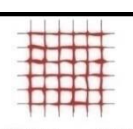
main le ruban. La surface arrachée par le ruban est inversement proportionnelle à l'adhérence. Le but de l'essai est de qualifier, par examen visuel, l'adhérence des peintures et vernis selon le dispositif décrit dans les normes NF EN ISO 2409 2013, EN X PD 060-50 2002 et NF EN ISO 2808 2007.

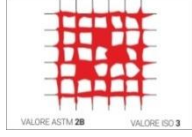




Figure IV.9. Photo de l'outil utilisé pour l'essai d'adhérence par quadrillage

Le tableau IV.7 présente le code de classification des éprouvettes après l'essai d'adhérence par la méthode du quadrillage :

Tableau IV.7. Code de classification des éprouvettes après l'essai du quadrillage

ISO	ASTM	Description typique du résultat	Surface de la partie quadrillée
0	5B	La surface des incisions est parfaitement plate; aucun carré ne s'est détaché..	
1	4B	De la peinture se détache au niveau de l'intersection des incisions. La peinture s'est détachée sur environ 5% de la superficie totale du quadrillage.	
2	3B	La peinture s'est détachée le long des incisions et/ou au niveau des intersections des lignes du quadrillage. La peinture s'est détachée sur environ 5 à 10% de la superficie totale du quadrillage.	

ISO	ASTM	Description typique du résultat	Surface de la partie quadrillée
3	2B	La peinture s'est en partie ou totalement détachée le long des incisions et/ou des carrés se sont détachés entièrement ou en partie. La peinture s'est détachée sur environ 15 à 35% de la superficie totale du quadrillage.	
4	1B	De larges bandes de peinture se sont détachées le long des incisions et/ou des carrés se sont détachés entièrement ou en partie. La peinture s'est détachée sur 35 à 65% de la superficie totale du quadrillage	
5	0B	Tout type de détachement ne pouvant être catalogué dans la classe 4 là où par conséquent, la peinture s'est détachée sur plus de 65% du quadrillage.	

Un examen au microscope optique du ruban adhésif après arrachement permet d'observer la localisation de la rupture du film de finition ; la présence de fibres de bois sur l'adhésif met en évidence une rupture à l'interface bois : revêtement de surface et non une délamination des couches de finition.

#### IV.5.3. Test de la perméabilité à l'eau liquide

Avant d'effectuer l'essai de perméabilité à l'eau, nous effectuons le pré-conditionnement pour s'assurer que les valeurs obtenues à la fin de l'essai soit représentatives. Pour cela, nous avons répété le processus deux fois selon: 24 h d'immersion des éprouvettes en mettant le visage de la face à examiner vers le bas (Figure IV.10), suivi par 3h de séchage à 20°C et 65% HR-, puis 3h de séchage à 50°C et enfin, 18h de séchage à 20°C et 65% HR.



Figure IV.10. Photos des éprouvettes pendant l'essai de perméabilité à l'eau

Une fois ce pré-traitement est terminé, et lorsque les échantillons atteignent un poids stable à nouveau, le cycle d'absorption commence. Pour cela, les éprouvettes d'essai sont pesées avec une précision de 0,01 g près. La masse initiale de l'éprouvette est notée ( $m_0$ ). Les échantillons sont placés dans un récipient avec de l'eau désionisée, de telle sorte que la face finie en cours de test est entièrement immergée dans l'eau. Après 72 heures, les échantillons sont retirés et séchés pour enlever toute goutte d'eau présente et pesés de nouveau ( $m_1$ ). Toute manipulation des échantillons doit être effectuée dans des conditions environnementales contrôlées ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ) pour la température et ( $65 \pm 5\%$ ) pour l'humidité relative. A la fin de l'essai nous examinons: les défauts (de désorption / d'absorption), les moisissures, les bulles, le craquelage, la décoloration, le changement de la brillance. La perméabilité à l'eau liquide est une caractéristique d'autant plus importante que la norme NF EN 927-2 (2014) (spécifications de performances) fixe des valeurs d'absorption d'eau à respecter selon la catégorie d'usage final visé. Ainsi une perméabilité inférieure à  $175 \text{ g/m}^2$  est recommandée pour des emplois stables (menuiseries par exemple) alors que pour des emplois semi-stables (bardages par exemple) la perméabilité doit être inférieure à  $250 \text{ g/m}^2$ . Le tableau IV.8 présente le classement de la perméabilité à l'eau liquide d'un système Bois / Finition.

Tableau IV.8. Classement de la perméabilité à l'eau liquide d'un système bois/ finition

Classement de la finition	stable	semi-stable	non-stable
Valeur d'absorption d'eau	30 à $175 \text{ g/m}^2$	30 à $250 \text{ g/m}^2$	$>300 \text{ g/m}^2$

#### **IV.6. Vieillessement accéléré des systèmes Bois / Finition**

Le vieillissement artificiel des revêtements est utilisé pour produire une certaine exposition énergétique de manière à obtenir un certain degré de modification d'une ou plusieurs propriétés. Les propriétés des revêtements exposés sont comparées avec celles de revêtements non exposés ayant été préparé de la même façon.

D'une façon générale, nous appellons vieillissement toute altération lente et irréversible d'une ou plusieurs propriétés d'un matériau résultant de sa propre instabilité et/ou des effets des contraintes physicochimiques de l'environnement (eau, lumière, oxygène, température, pollution, . . .). Le vieillissement d'un matériau résulte d'une séquence complexe de réactions pour lesquelles de nombreux processus élémentaires sont souvent liés par un réseau d'interactions. Le bois brut ou recouvert d'une finition, en service à l'extérieur ou même à

l'intérieur, est soumis à différents facteurs de stress (photoirradiation, radiation thermique, impact mécanique, variation de température, présence d'humidité et de micro-organismes, polluants atmosphériques, etc.). Ces facteurs peuvent affecter la durabilité et causer le vieillissement du matériau qui se manifeste par la dégradation photochimique, la perte de l'intégrité de la surface (craquelage, écaillage, érosion) et la discoloration. Le type et l'intensité de la dégradation sont fortement influencés par des facteurs comme le temps et les conditions d'exposition durant le vieillissement, les propriétés du bois, la qualité du design de la structure bois, les propriétés physiques et chimiques de la finition elle-même incluant les additifs de stabilisation, la méthode d'application, l'épaisseur du film, la couleur de la finition (Aloui, 2011).

Comme la durée de vie moyenne des finitions actuelles pour bois est de plus en plus longue (elle peut aller jusqu'à 8 ans dans le cas de peintures (Roux et Anquetil, 1994), les méthodes traditionnelles d'exposition aux intempéries naturelles sont devenues trop lentes. En effet, le formulateur ou le fabricant de menuiseries extérieures ne peut se permettre d'attendre toutes ces années pour savoir si une menuiserie finie avec une nouvelle lasure aura une bonne tenue au vieillissement. Ainsi pour des raisons économiques, réduire le temps des tests est devenu un challenge qui intéresse tous les fabricants de polymères en général. C'est pourquoi différents appareils de vieillissement accéléré sont apparus sur le marché ces dernières décennies pour fournir des données relatives à la dégradation des polymères.

Les tests accélérés simulent de quatre façons différentes l'action de l'eau sur les polymères: par trempage dans de l'eau, par condensation à la surface, par aspersion ou par contrôle du niveau d'humidité relative de l'air ambiant (Aloui, 2011).

#### **IV.6.1. Vieillissement accéléré au QUV**

Les méthodes de qualification rapide des systèmes bois-finition mettent en oeuvre des techniques de vieillissement artificiel et accéléré. Les appareils disponibles (Figure IV.11) reproduisent, dans des conditions plus ou moins sévères pour le couple bois-finition, les agressions climatiques auxquelles il est soumis dans la réalité. Dans notre travail, le vieillissement artificiel a été réalisé sur le QUV et la roue de dégradation.

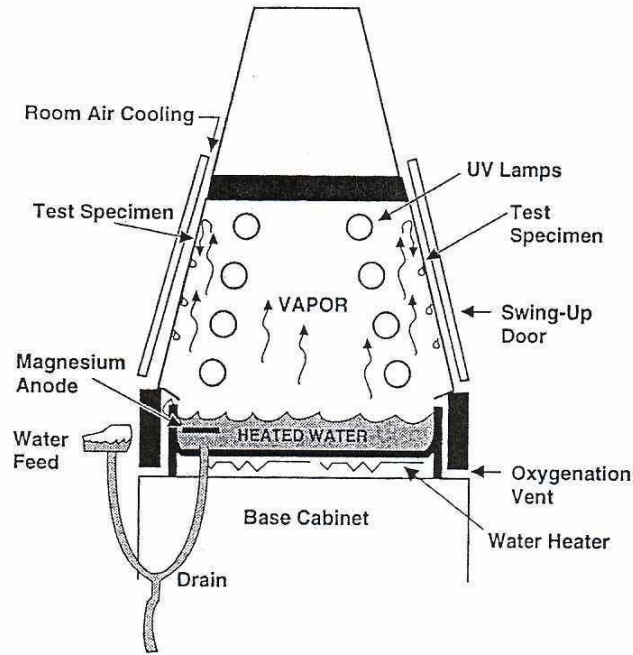


Figure IV.11. Schématisation d'un QUV

La condensation est utilisée principalement dans les QUV pour simuler la rosée à la surface des échantillons (Grossmann, 1990). De l'eau (non distillée) contenue dans le bac sous les échantillons est chauffée au moyen d'une résistance, ce qui produit de la vapeur d'eau chaude et crée un taux d'humidité de 100% pour une température pouvant être contrôlée précisément entre 40 et 60°C. Les échantillons d'essais forment la paroi latérale de la chambre et l'air ambiant refroidit leur face extérieure de quelques degrés en dessous de celle de la vapeur. Ce refroidissement produit la condensation sur leur face intérieure. L'eau qui se dépose ainsi est équivalente à de l'eau distillée pure, ce qui permet de n'avoir aucune trace due aux minéraux dissous dans l'eau du robinet à la surface des échantillons. Ainsi, lorsque des taches ou des changements de couleur apparaissent à la surface des échantillons dans un QUV en mode condensation, ce résultat peut être pris en compte comme faisant partie du processus de vieillissement. La température élevée des gouttes d'eau qui se déposent à la surface des échantillons ne fait qu'accélérer les phénomènes dus à l'eau. Par ailleurs l'évent situé au dessus du niveau de l'eau permet d'assurer que la condensation soit saturée en oxygène, ce qui permet d'avoir des contacts intimes entre oxygène et surface du substrat. Un inconvénient de ce système est que la condensation ne va pas se déposer de manière immédiate à la surface des échantillons. En effet, suivant l'épaisseur des éprouvettes, le matériau testé qui sera plus ou moins isolant (très isolant dans le cas du bois), la température de l'air ambiant et la température de consigne en phase condensation, le dépôt d'humidité pourra prendre entre une demi-heure

et plusieurs heures. Il est ainsi déconseillé de réaliser des phases de condensation de moins de deux heures. Les temps réels pendant lesquels les échantillons sont réellement en contact avec l'eau de condensation sont ainsi approximatifs. L'aspersion d'eau est utilisée dans les QUV avec option spray. Ce système permet de simuler l'action de la pluie sur les échantillons et donc les phénomènes d'érosion qui sont particulièrement importants dans le cas du bois. Deux inconvénients majeurs peuvent survenir lors de l'utilisation du spray : tout d'abord, l'eau utilisée doit être correctement filtrée, adoucie ou distillée sous peine de voir apparaître à la surface du matériau des taches qui ne relèveraient pas du vieillissement du film ou qui pourraient être confondues avec du poudroiement par exemple. Par ailleurs, la température de l'eau utilisée est celle du réseau d'eau et sera donc froide en hiver et chaude en été ce qui peut générer des différences dans le vieillissement. L'humidité relative de l'air contenu dans les chambres d'essai n'est en général pas contrôlée : C'est ainsi le cas de la roue de dégradation accélérée, du QUV en mode UV ou aspersion (l'humidité relative de l'air étant de 100% en phase condensation) (Aloui, 2011).

L'essai au QUV (Figure IV.12) est réalisé selon la norme EN 927-6 (2006). L'avantage d'une telle méthode est de prévoir la durée de service d'un revêtement sans attendre le délai d'un an imposé par le vieillissement naturel.



Figure IV.12. Photos de l'équipement de l'essai de vieillissement artificiel au QUV



Figure IV.13. Photos : Préparation des éprouvettes pour le QUV

L'enceinte d'essai appelé QUV est constituée d'un matériau résistant à la corrosion, contenant des lampes, un plateau rempli d'eau chaude, des buses de pulvérisation d'eau et des supports des panneaux d'essai. Pour le test normalisé de vieillissement accéléré, l'enceinte QUV est composée d'une lampe UV qui émet une lumière UV à partir d'un tube fluorescent. La lampe est de type UV-A 340 ayant un pic d'émission à 340 nm et un éclairement énergétique relatif décrit dans la norme en s'assurant que l'éclairement énergétique à 340 nm soit de 0.89 W/ (m<sup>2</sup>nm).

Pour les phases de condensation et de pulvérisation, l'eau utilisée doit avoir un pH compris entre 5 et 7,5 et une conductivité électrique de 2mS/m.

Les éprouvettes sont revêtues puis colmatées sur les 5 autres faces (Figure IV.13). Le cycle d'exposition d'une semaine est décrit dans le tableau suivant. Ce cycle est réitéré pendant 12 semaines (Tableau IV.9):

Tableau IV.9. Cycle d'exposition des éprouvettes dans le QUV

Etape	Fonction	Température	Durée	Condition
1	Condensation	(45 ± 3)°C	24 h	
2	Etape de sous-cycle 3+4		144 h consistant en 48 * cycles de 3 h constitués des étapes 3 et 4	
3	UV	(60 ± 3)°C	2,5 h	Point de réglage de l'éclairement énergétique 0,89 W/ (m <sup>2</sup> nm) à 340 nm
4	Pulvérisation		0,5 h	6 l/min à 7 l/min, sans UV

#### IV.6.2. Vieillissement accéléré à la roue

Le vieillissement accéléré a été aussi effectué sur une roue de dégradation de type GARDNER (Figure IV.14) qui permet de simuler les agressions climatiques en soumettant le système bois-finition à une alternance de périodes d'exposition au rayonnement UV et de périodes d'immersion dans de l'eau distillée. La rotation de la roue est programmée pour obtenir le cycle

de vieillissement suivant : 26 minutes à l'air ambiant, 11 minutes d'immersion dans l'eau distillée, 26 minutes à l'air ambiant et 22 minutes d'exposition au rayonnement UV.



Figure IV.14. Equipement pour l'essai de vieillissement à la roue de dégradation GARDNER

## IV.7. Caractérisation des systèmes Bois / Finition après vieillissement accéléré

### IV.7.1. Caractérisation de l'aspect de surface

Cet essai a pour but la vérification de la surface par examen visuel des surfaces, dans des conditions définies par les normes EN XP D 60-050 (2002).

### IV.7.2. Mesure de la brillance et de la couleur

Une couleur peut être caractérisée de manière unique, pour un observateur et une mesure bien définie, par les coordonnées d'un point dans un espace cartésien formé par trois vecteurs perpendiculaires. Le système CIEL\*a\*b\* a la propriété d'un espace euclidien où chaque point peut être repéré par : ses coordonnées rectangulaires L\*, a\*, b\* où:

L\* : représente la clarté (indice de luminosité), variant de 0 à 100, du noir au blanc ;

a\* : variant de 0 à +a\* mesurant la variation du gris au rouge et de 0 à -a\* mesurant la variation du gris au vert ;

b\* : variant de 0 à +b\* mesurant la variation du gris au jaune et de 0 à -b\* mesurant la variation du gris au bleu.

L'écart global de couleur  $\Delta E^*$  est défini entre deux points de l'espace L\*a\*b\* comme étant égal à la distance entre ces deux points :  $\Delta E^* = [\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}]^{1/2}$  où  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  et  $\Delta b^*$  sont les

différences respectives en luminance et en coordonnées chromatiques entre les deux points de couleur.

L'espace CIEL\*a\*b\* n'étant pas rigoureusement uniforme, nous préférons utiliser le système CIEL\*C\*h\* qui dérive du système CIEL\*a\*b\* par passage des coordonnées cartésiennes aux coordonnées cylindriques L\*, C\* et h où L\* représente toujours la clarté, C\* représente le chroma (ou niveau de saturation) et h représente l'angle de teinte (ou tonalité chromatique), avec :  $C^* = [a^{*2} + b^{*2}]^{1/2}$  et  $h^* = \text{arc tg } [b^*/a^*]$ .

Les mesures la réflexion spéculaire des surfaces, dans des conditions définies par les normes EN XP D 60-050 (décembre 2002) et la Norme Française NF EN 438-2 (juillet 2005) ont été effectuées en utilisant un spectrophotomètre X-rite SP 62(Figure IV. 15). Les paramètres mesurés sont : la brillance (L\*), les coordonnées chromatiques, vert-rouge (a\*) et bleu-jaune (b\*) en référence au système de coordonnées de couleur CIELab. La valeur retenue pour chaque paramètre est la valeur moyenne de trois mesures.

Avant d'effectuer tout essai, nous étalonnons l'appareil pour chaque éprouvette d'essai, conformément aux instructions du fabricant de l'appareil. L'évaluation de la luminance lumineuse des surfaces et la définition de l'indice de confort au niveau des couleurs ont été réalisées dans des conditions définies dans les normes : NM 14.4.039 (2007) et EN XP D 60-050 (décembre 2002). Les mesures de la valeur de la composante trichromatique ou du facteur de luminance Y ont été effectuées sur trois points différents, tout en évitant la trace des défauts.



Figure IV. 15. Spectrophotomètre X-rite SP 62

#### IV.8. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à une description de la méthodologie relative à la conception et à la caractérisation des systèmes Bois / finition. C'est ainsi que les indications nécessaires sur la matière première (bois et produit de finition) et les méthodes d'analyse ont été fournies.

Ainsi, les éléments essentiels permettant aux lecteurs de comprendre les résultats de la deuxième partie de ce mémoire sont décrites dans ce chapitre, à savoir : le code de classification des éprouvettes après l'essai d'adhérence par quadrillage, la méthode de caractérisation de l'adhérence par quadrillage, la méthode de caractérisation de la perméabilité à l'eau liquide, les méthodes de vieillissement accéléré au QUV et à la roue de dégradation et enfin les techniques de caractérisation des systèmes Bois / Finition avant et après vieillissement (Vérification de l'aspect et de la couleur).

# **CHAPITRE V**

## **CARACTERISATION DES PRODUITS DE FINITION ET MESURE DE L'ADHERENCE ET LA PERMEABILITE A L'EAU LIQUIDE DES SYSTEMES BOIS / FINITION**

### **V.1. Introduction**

La finition représente une des étapes les plus importantes pour ajouter de la valeur aux ouvrages en bois. D'ailleurs, la durée de vie d'un ouvrage en bois est souvent associée à la durabilité de son revêtement de surface qui le protège contre l'humidité, la température et l'ensoleillement. Ainsi, l'amélioration des performances des revêtements de finition s'avère un sujet très important. Ce chapitre permet d'évaluer quelques produits de finition commercialisés par les entreprises marocaines. Il est consacré à la présentation des résultats de caractérisation (mesure de l'extrait sec des produits de finition et mesure de l'épaisseur des films de finitions) et aux résultats des mesures de la perméabilité à l'eau liquide et de l'adhérence par quadrillage des systèmes Bois / Finitions.

### **V.2. Caractérisation du bois**

Les trois essences de bois choisies pour cette étude ont été sélectionnées pour leur utilisation courante au Maroc. Le Pin sylvestre (*Pinus sylvestris*), connu au Maroc sous le nom de “bois rouge”, le Chêne pédonculé (*Quercus robur*) et l’acajou (*Khaya ivorensis*). Le tableau V.1 présente quelques caractéristiques physiques des essences de bois utilisées dans ce travail.

Tableau V.1. Caractéristiques du bois utilisé dans ce travail

Bois	Densité * (g/cm <sup>3</sup> )	Structure	Largeur de cerne (mm)
Pin sylvestre	~0.55	Aucun vaisseau	~1.4
Chêne pédonculé	~ 0.74	Cernes poreux	~1.4
Acajou	~ 0.57	A pores diffus	~1.2

\* Tropix 7

### V.3. Caractérisation des produits de finition

#### V.3.1. Mesure de l’extrait sec des produits de finition

Le tableau V.2 présente les résultats obtenus pour la détermination de l’extrait sec (ou contenu solide) des produits utilisés pour la fabrication des systèmes de finition.

Tableau V.2. Détermination de l’extrait sec des produits de finition utilisés

Finition	Marque des produits	Résine de base	Produit	Extrait sec mesuré (%)	Extrait sec des fiches techniques (%)
F <sub>1</sub>	Sayerlack 1	polyuréthane	Produit 1	16	9 ± 2
			Produit 2	48	36 - 48
F <sub>2</sub>	Sayerlack 2	polyuréthane	Produit 1	42	46 ± 1
			Produit 2	38	41 ± 2
F <sub>3</sub>	Sayerlack 3	polyuréthane	Produit 1	27	43 ± 2
			Produit 2	70	---
F <sub>4</sub>	Sikkens 1	acrylique	Produit 1	10	14
			Produit 2	47	35
F <sub>5</sub>	Sikkens 2	acrylique	Produit 1	14	---
F <sub>6</sub>	Sikkens 3	acrylique	Produit 1	19	26

			Produit 2	46	38 - 50
--	--	--	-----------	----	---------

Une comparaison entre l'extrait sec donné par les fiches techniques des produits et celui que nous avons déterminé au laboratoire, montre pour certaines formulations une différence qui peut être due au fait que les fournisseurs nous ont livré les produits de finition en petite quantité dans des emballages qui ne sont pas d'origine et qui ne garantissent pas une durabilité des propriétés de la formulation en particulier la conservation de l'homogénéité de la formulation aqueuse.

### V.3.2. Mesure de l'épaisseur des films de finitions

Après l'application des produits de finition, la mesure de l'épaisseur des films est essentielle pour vérifier si le grammage appliqué sur le bois est conforme à celui préconisé par les fournisseurs des produits de finition. L'importance de cette mesure est décisive sur la qualité des finitions. Le tableau V.3 présente les valeurs des épaisseurs données par les fiches techniques des fournisseurs et les valeurs des épaisseurs mesurées. Pour chaque échantillon l'épaisseur de la finition a été mesurée deux fois.

Tableau V.3. Résultats de mesure de l'épaisseur des films de finition

N° de l'Eprouvette témoinN	Bois	Finition	Epaisseur 1 mesurée (µm)	Epaisseur 2 mesurée (µm)	Epaisseur moyenne mesurée(µm)	Epaisseur prévue par la fiche technique (µm)
1	A	F <sub>1</sub>	120	130	125	110-120
2	C	F <sub>1</sub>	70	80	75	
3	P	F <sub>1</sub>	100	110	105	
4	A	F <sub>2</sub>	60	70	65	20-30
5	C	F <sub>2</sub>	70	80	75	
6	P	F <sub>2</sub>	100	110	105	
7	A	F <sub>3</sub>	170	180	175	140-175
8	C	F <sub>3</sub>	155	165	160	
9	P	F <sub>3</sub>	170	180	175	

N° de l'Eprouvette témoinN	Bois	Finition	Epaisseur 1 mesurée (µm)	Epaisseur 2 mesurée (µm)	Epaisseur moyenne mesurée(µm)	Epaisseur prévue par la fiche technique (µm)
10	A	F <sub>4</sub>	70	80	75	100-140
11	C	F <sub>4</sub>	100	110	105	
12	P	F <sub>4</sub>	80	90	85	
13	A	F <sub>5</sub>	140	150	145	160-220
14	C	F <sub>5</sub>	145	155	150	
15	P	F <sub>5</sub>	150	160	155	
16	A	F <sub>6</sub>	180	190	185	160-190
17	C	F <sub>6</sub>	190	200	195	
18	P	F <sub>6</sub>	170	180	175	

Le respect des données des fiches techniques du fabricant des produits de finition concernant le grammage et l'application des produits sur les supports bois a permis de trouver des épaisseurs du même ordre de grandeur que les épaisseurs prévues par le fabricant.

Les finitions F<sub>1</sub>, F<sub>3</sub>, F<sub>4</sub>, F<sub>5</sub> et F<sub>6</sub> présentent une épaisseur comparable à ceux données par les fiches techniques des produits de finition, ce qui n'est pas le cas pour la finition F<sub>2</sub>.

Une faible épaisseur de finition diminuera l'effet barrière et par conséquent augmentera la perméabilité à l'eau liquide des systèmes Bois / Finition.

Les résultats précédents permettent de dégager les idées suivantes :

Une lasure incolore comme produit de finition protège moins bien qu'une lasure teintée à cause des pigments qui présentent de meilleures barrières aux UV. Cependant, Il y a des lasures incolores qui contiennent des anti-UV. Ces lasures peuvent être appliquées pour l'extérieur, avec un entretien plus régulier que des lasures teintées. Les lasures incolores préservent l'aspect naturel du bois mais filtrent moins le rayonnement UV.

Plusieurs et différentes sortes de lasures existent en fonction de l'exposition aux intempéries et aux UV aux quelles est soumis le bois fini.

La tenue de la lasure dans le temps dépend de son taux d'extrait sec, c'est-à-dire, des composants non volatiles qui restent en surface après le séchage et l'évaporation du solvant.

Le niveau de protection dépend aussi de la teneur en résines et en matières actives.

Les produits de finition de teinte blanche (peinture) ne sont pas assez souples pour le bois, donc La souplesse des revêtements photopolymérisables doit être améliorée pour être compatible avec des utilisations extérieures.

Il faut noter que certains bois ont des caractéristiques chimiques très particulières. La préparation de la surface de ces bois doit être parfaite afin de garantir la pérennité de la finition appliquée.







En général, les produits lasures transparents se comportent mieux que les finitions laquées.










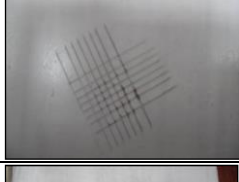


#### V.4. Caractérisation des systèmes Bois / Finition

##### V.4.1. Essai de l'adhérence par quadrillage

L'essai du quadrillage a été réalisé seulement pour les échantillons témoins traités par les trois finitions F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> et F<sub>3</sub> pour s'assurer de la bonne adhérence du produit sur le support bois avant le vieillissement (Figure V.1). Une seule mesure a été réalisée pour chaque échantillon témoin. Les photos des éprouvettes qui ont permis la mesure de l'adhérence des films de finition sur les supports en bois sont présentées sur la figure V.1.

Figure V.1. Photos relatives à la mesure de l'adhérence par quadrillage

Bois	Finition	Avant le test de quadrillage	Après le test de quadrillage
P	F <sub>1</sub>		
A	F <sub>1</sub>		
C	F <sub>1</sub>		

Bois	Finition	Avant le test de quadrillage	Après le test de quadrillage
P	F <sub>2</sub>		
A	F <sub>2</sub>		
C	F <sub>2</sub>		
P	F <sub>3</sub>		
A	F <sub>3</sub>		
C	F <sub>3</sub>		

Les résultats de mesure de l'adhérence (Norme NF EN ISO 2409 2013) sont présentés dans le tableau V.4.

Tableau V.4. Adhérence des échantillons selon la norme NF EN ISO 2409 (2013)

N° Eprouvette	Eprouvette témoin	Bois	Finition	Classification
1	N	A	F <sub>1</sub>	0
2	N	P	F <sub>1</sub>	0
3	N	C	F <sub>1</sub>	0
4	N	A	F <sub>2</sub>	0
5	N	P	F <sub>2</sub>	1
6	N	C	F <sub>2</sub>	0
7	N	A	F <sub>3</sub>	1-2
8	N	P	F <sub>3</sub>	1
9	N	C	F <sub>3</sub>	1
10	N	A	F <sub>4</sub>	0
11	N	P	F <sub>4</sub>	1

N° Epreuve	Eprouvette témoin	Bois	Finition	Classification
12	N	C	F <sub>4</sub>	0
13	N	A	F <sub>5</sub>	0
14	N	P	F <sub>5</sub>	1
15	N	C	F <sub>5</sub>	0
16	N	A	F <sub>6</sub>	1-2
17	N	P	F <sub>6</sub>	1-2
18	N	C	F <sub>6</sub>	1

N = Eprouvette témoin, P=Pin, C= Chêne A = Acajou, F = Finition (F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>, F<sub>3</sub>, F<sub>4</sub>, F<sub>5</sub> et F<sub>6</sub>)


Selon le tableau IV.7 (Code de classification des éprouvettes après l’essai du quadrillage), la classification 0 est obtenue lorsque les bords des incisions réalisées sur nos échantillons sont parfaitement lisses et qu’aucun des carrés du quadrillage ne s’est détaché. La classification 1 est obtenue lorsque le détachement de petites écailles du revêtement aux intersections des incisions, qui affectent environ 5% de la partie quadrillée. Dans la classification 2, le revêtement s’est détaché le long des bords et/ou aux intersections des incisions, qui affecte nettement plus de 5% jusqu’à environ 15% de la partie quadrillée.




Le tableau V.4 présente les résultats de l’essai d’adhérence de tous les films de finition appliqués sur les supports en bois. L’analyse des résultats de ces derniers tableaux a montré que la qualité de l’adhérence des films de finition est satisfaisante.




#### V.4.2. Essai de la perméabilité à l’eau liquide




La figure V.2 présente quelques photos des éprouvettes préparées avec les différentes finitions avant les essais de perméabilité à l’eau. Deux échantillons ont été utilisés pour chaque essence du bois et pour chaque finition.




Figure V.2. Photos des éprouvettes préparées avec les différentes finitions avant les essais de perméabilité à l’eau



Bois	Finition	Avant les essais de perméabilité à l’eau
P	F <sub>1</sub>	


Bois	Finition	Avant les essais de perméabilité à l'eau	
P	F <sub>2</sub>		
A	F <sub>2</sub>		
C	F <sub>2</sub>		

Bois	Finition	Avant les essais de perméabilité à l'eau	
P	F <sub>3</sub>		
A	F <sub>3</sub>		
C	F <sub>3</sub>		

Bois	Finition	Avant les essais de perméabilité à l'eau
P	F <sub>4</sub>	
A	F <sub>4</sub>	
C	F <sub>4</sub>	

Bois	Finition	Avant les essais de perméabilité à l'eau
P	F <sub>5</sub>	
A	F <sub>5</sub>	
C	F <sub>5</sub>	

Bois	Finition	Avant les essais de perméabilité à l'eau
P	F <sub>6</sub>	
A	F <sub>6</sub>	

C	F <sub>6</sub>	
---	----------------	--

Les résultats de la perméabilité à l'eau liquide sont donc une moyenne de mesures réalisées sur deux ensembles des éprouvettes séparément (ensemble A et ensemble B). Le tableau V.5A et le tableau V.5B récapitulent les résultats de cet essai.

Tableau V.5A. Résultat de l'absorption moyenne en eau liquide de l'ensemble des éprouvettes A

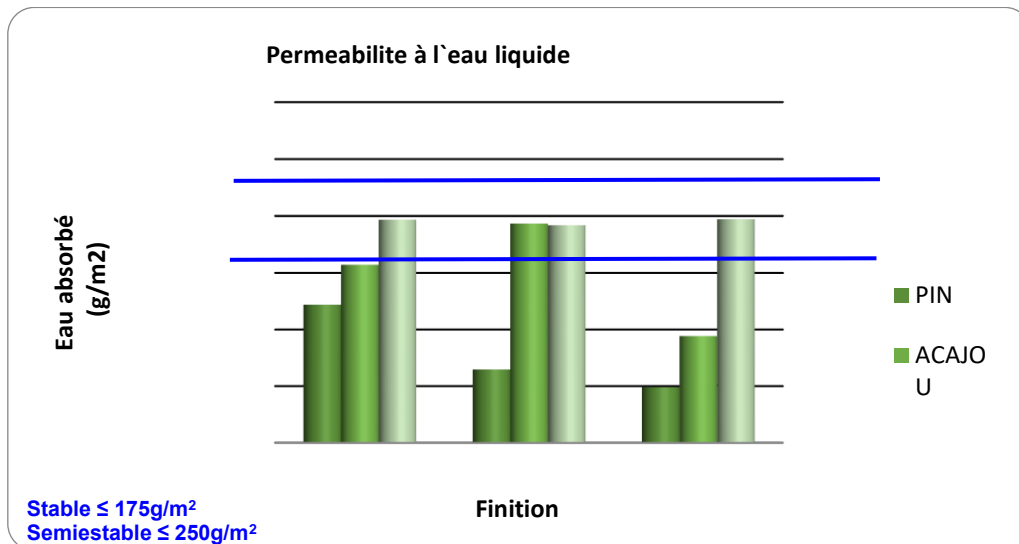
N° Éprouvettes	Test	Bois	Finition	Absorption g/m <sup>2</sup>	Absorption moyenne g/m <sup>2</sup>
1	T <sub>PE</sub>	A	F <sub>1</sub>	149,52	157,14
2	T <sub>PE</sub>	A	F <sub>1</sub>	164,76	
3	T <sub>PE</sub>	A	F <sub>2</sub>	201,90	193,33
4	T <sub>PE</sub>	A	F <sub>2</sub>	184,76	
5	T <sub>PE</sub>	A	F <sub>3</sub>	85,71	94,28
6	T <sub>PE</sub>	A	F <sub>3</sub>	102,86	
7	T <sub>PE</sub>	P	F <sub>1</sub>	77,14	121,91
8	T <sub>PE</sub>	P	F <sub>1</sub>	166,67	
9	T <sub>PE</sub>	P	F <sub>2</sub>	52,38	64,76
10	T <sub>PE</sub>	P	F <sub>2</sub>	77,14	
11	T <sub>PE</sub>	P	F <sub>3</sub>	47,62	49,05
12	T <sub>PE</sub>	P	F <sub>3</sub>	50,48	
13	T <sub>PE</sub>	C	F <sub>1</sub>	280,95	196,66
14	T <sub>PE</sub>	C	F <sub>1</sub>	112,38	
15	T <sub>PE</sub>	C	F <sub>2</sub>	180,00	191,91
16	T <sub>PE</sub>	C	F <sub>2</sub>	203,81	
17	T <sub>PE</sub>	C	F <sub>3</sub>	213,33	197,14
18	T <sub>PE</sub>	C	F <sub>3</sub>	180,95	

Tableau V.5B. Résultat de l'absorption moyenne en eau liquide de l'ensemble des éprouvettes B

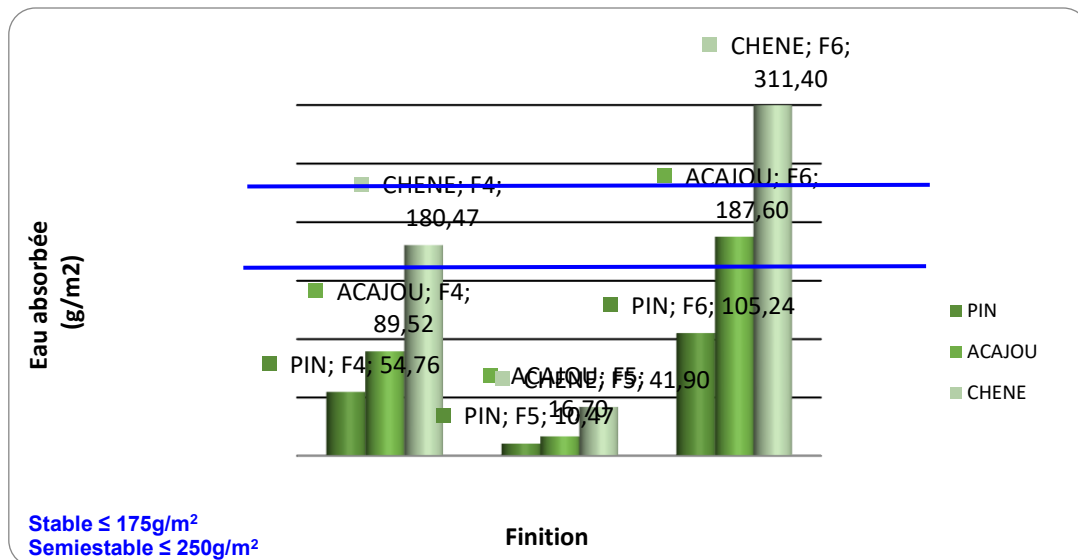
N° Éprouvettes	Test	Bois	Finition	Absorption 1 g/m <sup>2</sup>	Absorption moyenne g/m <sup>2</sup>
19	T <sub>PE</sub>	A	F <sub>4</sub>	94,29	89,53
20	T <sub>PE</sub>	A	F <sub>4</sub>	84,76	
21	T <sub>PE</sub>	A	F <sub>5</sub>	19,05	16,66
22	T <sub>PE</sub>	A	F <sub>5</sub>	14,29	

23	T <sub>PE</sub>	A	F <sub>6</sub>	210,48	187,62
24	T <sub>PE</sub>	A	F <sub>6</sub>	164,76	
25	T <sub>PE</sub>	P	F <sub>4</sub>	55,24	54,76
26	T <sub>PE</sub>	P	F <sub>4</sub>	54,29	
27	T <sub>PE</sub>	P	F <sub>5</sub>	11,43	10,47
28	T <sub>PE</sub>	P	F <sub>5</sub>	9,52	
29	T <sub>PE</sub>	P	F <sub>6</sub>	120,00	105,23
30	T <sub>PE</sub>	P	F <sub>6</sub>	90,48	
31	T <sub>PE</sub>	C	F <sub>4</sub>	237,14	180,47
32	T <sub>PE</sub>	C	F <sub>4</sub>	123,81	
33	T <sub>PE</sub>	C	F <sub>5</sub>	65,71	41,91
34	T <sub>PE</sub>	C	F <sub>5</sub>	18,10	
35	T <sub>PE</sub>	C	F <sub>6</sub>	345,71	311,43
36	T <sub>PE</sub>	C	F <sub>6</sub>	277,14	

Les graphiques de la figure V.3 représentent une analyse des données requises à partir des résultats ci-dessus :



A. Perméabilité à l'eau pour les finitions F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> et F<sub>3</sub> par essence de bois



**B. Perméabilité à l'eau pour les finitions F<sub>4</sub>, F<sub>5</sub> et F<sub>6</sub> par essence de bois**

Figure V.3. Perméabilité à l'eau liquide

Les résultats de la perméabilité à l'eau liquide nous permettent de dégager les conclusions suivantes : les produits F<sub>1</sub> et F<sub>3</sub> sont stables pour le Pin et l'acajou, et semi stables pour le Chêne, pour le produit F<sub>2</sub>, il est stable pour le Pin et semi stable pour l'Acajou et le Chêne. Le produit F<sub>4</sub> est stable pour le Pin et l'acajou et semi stable pour le Chêne, le produit F<sub>5</sub> est stable pour toutes les essences et finalement le produit F<sub>6</sub> est stable pour le Pin et semi stable pour le Chêne et l'Acajou.

En général, tous les produits testés confèrent une bonne imperméabilité à l'eau liquide pour les trois essences du bois : Pin, Chêne et Acajou.

La perméabilité est mieux corrélée au grammage de finition qu'à l'épaisseur. L'épaisseur de la finition est en effet plus tributaire des caractéristiques anatomiques de surface (diamètres des vaisseaux, présence de bois initial ou final, rugosité).

La perméabilité à l'eau liquide est d'autant plus faible que le grammage de finition déposé est élevé.

L'application d'une épaisseur donnée de finition en plusieurs couches conduit à une absorption d'eau plus faible qu'une application en une seule couche, le séchage entre couches étant bénéfique.

La quantité d'eau absorbée dépend de la masse volumique des bois, ici plus importante pour les feuillus (Podgorski, 2012).

Les résultats des mesures de la perméabilité nous ont permis de conclure que les systèmes avec un support en bois de chêne présente la plus forte perméabilité, suivit des systèmes avec le bois d'acajou et enfin la plus faible perméabilité est pour les systèmes avec le bois du pin sylvestre.

## **V.5. Conclusion**

Les résultats des mesures de l'extrait sec des produits de finition et l'épaisseur de la couche de finition après application sur le support bois ont été analysés et comparés avec ceux donnés par les fabricants des produits de finition au Maroc.

Les résultats des mesures de l'adhérence par quadrillage et de la perméabilité à l'eau liquide des systèmes Bois / Finitions ont également été analysés

Les finitions à fort extrait sec, recouvrent très bien la fibre du bois et permettent d'espacer l'entretien. Plus l'extrait sec est élevé, plus la lasure résiste dans le temps. Les finitions lasures qui sont de « haute protection », sont riches en résines, et sont particulièrement adaptées à la protection du bois en extérieur. La haute teneur en extrait sec permet une bonne tenue de la finition sur le bois. Pour une bonne tenue de finition, la perméabilité à l'eau sera contrôlée par l'épaisseur sachant qu'une faible épaisseur du système devrait avoir un niveau de transmission de l'eau élevé.

## **CHAPITRE VI**

# **VIEILLISSEMENT ARTIFICIEL AU QUV ET A LA ROUE DES SYSTEMES BOIS / FINITION : ETUDE DE L'ASPECT**

## **VI.1. Introduction**

Le choix des systèmes Bois/ Finitions a été réalisé en concertation avec les industriels de la filière bois-finition au Maroc. Deux vernis à base de résine polyuréthane (F<sub>1</sub> et F<sub>2</sub>) et deux lasures à base de résine acrylique (F<sub>4</sub> et F<sub>5</sub>) ainsi que deux peintures, une à base de résine polyuréthane (F<sub>3</sub>) et une à base de résine acrylique (F<sub>6</sub>) ont été choisies.

Ce chapitre a été consacré aux résultats concernant les effets des vieillissements accélérés (au QUV et à la roue de Gardner) sur l'aspect des différents systèmes Bois/Finition réalisés.

## **VI.2. Vieillissement accéléré au QUV**

Les résultats de l'évaluation de l'aspect des éprouvettes après Vieillissement au QUV (El Imame et *al.*, 2017) sont présentés dans le tableau VI.1.

Pour bien comprendre et interpréter le tableau VI.3 nous avons reporté sur le tableau VI.1 les définitions des mots techniques et leurs abréviations et sur le tableau VI.2 la signification de la classification des déformations.

Tableau VI.1. Définition des mots techniques et leurs abréviations

Abreviation	Mot technique	Définition
<b>Cl</b>	Cloquage	Le cloquage est caractérisé par de petites bulles ou cloques dans le film de la finition.
<b>Cr</b>	Craquelage	Le craquelage est caractérisé par de petites fissures à la surface de la finition qui se forment avec le vieillissement. En effet, au cours du temps, la finition devient plus dure et plus cassante.
<b>Ec</b>	Ecaillage	L'écaillage est un décollement du feuil de finition en forme d'écailles de répartitions et de dimensions variables à la suite d'un craquelage.
<b>A</b>	Adhérence	C'est un phénomène qui s'oppose au glissement de deux surfaces mécaniques. C'est aussi l'état du feuil de finition qui adhère physiquement au support bois.

Tableau VI.2. Significations de la classification des déformations

Chiffre	Signification de la classification des déformations
<b>0</b>	aucune, c'est-à-dire pas de déformations détectables
<b>1</b>	très peu nombreuses, c'est-à-dire nombre à peine significatif.
<b>2</b>	peu nombreuses, c'est-à-dire nombre peu élevé mais significatif
<b>3</b>	nombre moyen.
<b>4</b>	nombre considérable
<b>5</b>	structure dense

Tableau VI.3. Evaluation de l'aspect des systèmes Bois / Finition après Vieillissement au QUV

<b>Finition F<sub>1</sub></b>							<b>Aspect</b>
<b>N°</b>	<b>Bois</b>	<b>Finition</b>	<b>Cl</b>	<b>Cr</b>	<b>Ec</b>	<b>A</b>	
<b>Classification</b>							
1	A	F <sub>1</sub>	1	0	0	0	Changement de couleur, Perte d'adhérence
2	A	F <sub>1</sub>	0	0	0	0	Changement de couleur brillance
3	A	F <sub>1</sub>	0	0	0	0	Changement de couleur
4	P	F <sub>1</sub>	0	0	0	0	Changement de couleur, cloquage, perte d'adhérence
5	P	F <sub>1</sub>	0	0	0	0	Changement de couleur

6	P	F <sub>1</sub>	0	0	0	0	Changement de couleur, apparition de Petites bulles
7	C	F <sub>1</sub>	0	0	3	0	Changement de couleur, apparition de pores noirs (absorption d'eau)
8	C	F <sub>1</sub>	0	0	3	0	Changement de couleur Pores noirs (absorption d'eau)
9	C	F <sub>1</sub>	0	0	0	0	léger changement de couleur

### Finition F<sub>2</sub>

N°	Bois	Finition	Cl	Cr	Ec	A	Aspect
			Classification				
10	A	F <sub>2</sub>	0	5	5	0	perte d'adhérence, changement total de couleur, cloquage
11	A	F <sub>2</sub>	0	5	5	0	perte d'adhérence, craquelage et écaillage
12	A	F <sub>2</sub>	0	0	0	0	léger changement de couleur
13	P	F <sub>2</sub>	4	1	0	0	perte d'adhérence, Changement total de couleur
14	P	F <sub>2</sub>	2	0	0	0	perte d'adhérence, Changement total de couleur
15	P	F <sub>2</sub>	1	0	0	0	perte d'adhérence, Changement total de couleur
16	C	F <sub>2</sub>	0	0	5	0	Ecaillage, perte d'adhérence, Changement total de couleur
17	C	F <sub>2</sub>	0	0	5	0	Ecaillage, perte d'adhérence, Changement total de couleur
18	C	F <sub>2</sub>	0	0	0	0	léger changement de couleur

### Finition F<sub>3</sub>

N°	Bois	Finition	Cl	Cr	Ec	A	Aspect
			Classification				
19	A	F <sub>3</sub>	0	0	5	0	Ecaillage, perte d'adhérence, Changement total de couleur
20	A	F <sub>3</sub>	0	0	5	0	Ecaillage, perte d'adhérence, Changement total de couleur
21	A	F <sub>3</sub>	0	0	0	0	Changement de couleur (bois), peau d'orange
22	P	F <sub>3</sub>	0	0	5	0	Changement de couleur Ecaillage, Perte d'adhérence
23	P	F <sub>3</sub>	0	0	5	0	Changement de couleur Ecaillage, Perte d'adhérence
24	P	F <sub>3</sub>	0	0	0	0	Changement de couleur

N°	Bois	Finition	Cl	Cr	Ec	A	Aspect
			Classification				
25	C	F <sub>3</sub>	0	0	5	0	perte d'adhérence Changement de couleur
26	C	F <sub>3</sub>	0	0	5	0	perte d'adhérence, Changement de couleur
27	C	F <sub>3</sub>	0	0	0	0	Absorption d'humidité, Changement de couleur

#### Finition F<sub>4</sub>

N°	Bois	Finition	Cl	Cr	Ec	A	Aspect
			Classification				
28	A	F <sub>4</sub>	0	0	0	0	Changement de couleur et apparition de léger voile
29	A	F <sub>4</sub>	0	0	0	0	léger changement de couleur, et apparition de léger voile
30	A	F <sub>4</sub>	0	0	0	0	Changement de couleur
31	P	F <sub>4</sub>	0	0	0	0	Changement de couleur
32	P	F <sub>4</sub>	0	0	1	0	Changement de couleur, pénétration d'eau, Décollement de la finition
33	P	F <sub>4</sub>	0	0	0	0	Changement de couleur
34	C	F <sub>4</sub>	0	0	2	0	Petit changement de couleur, perte d'adhérence, pénétration d'eau
35	C	F <sub>4</sub>	0	0	1	0	Perte d'adhérence
36	C	F <sub>4</sub>	0	0	0	0	Petit changement de couleur

#### Finition F<sub>5</sub>

N°	Bois	Finition	Cl	Cr	Ec	A	Aspect
			Classification				
37	A	F <sub>5</sub>	0	0	0	0	Beaucoup de voile
38	A	F <sub>5</sub>	0	0	0	0	Beaucoup de voile
39	A	F <sub>5</sub>	0	0	0	0	Léger changement de couleur
40	P	F <sub>5</sub>	0	0	0	0	Beaucoup de voile
41	P	F <sub>5</sub>	0	0	0	0	Beaucoup de voile
42	P	F <sub>5</sub>	0	0	0	0	Léger changement de couleur

43	C	F <sub>5</sub>	0	0	0	0	léger voile rupture de vernis (nœud)
44	C	F <sub>5</sub>	0	0	0	0	voile
45	C	F <sub>5</sub>	0	0	0	0	Changement de couleur

#### Finition F<sub>6</sub>

N°	Bois	Finition	Cl	Cr	Ec	A	Aspect
			Classification				
46	A	F <sub>6</sub>	0	<b>5</b>	0	0	Craquelures
47	A	F <sub>6</sub>	0	<b>5</b>	0	0	Craquelures
48	A	F <sub>6</sub>	0	0	0	0	Légère rugosité superficielle
49	P	F <sub>6</sub>	0	0	<b>2</b>	0	Petites craquelures
50	P	F <sub>6</sub>	0	0	<b>2</b>	0	Petites craquelures
51	P	F <sub>6</sub>	0	0	0	0	légère rugosité superficielle
52	C	F <sub>6</sub>	0	0	<b>4</b>	0	Quelques craquelures
53	C	F <sub>6</sub>	0	0	<b>4</b>	0	Quelques craquelures
54	C	F <sub>6</sub>	0	0	<b>1</b>	0	Légère rugosité superficielle

En termes de l'évaluation d'aspect après vieillissement accéléré au QUV, il semble que la finition F<sub>1</sub> pourrait être considérée comme un bon produit, étant donné qu'il n'y a pas d'importants défauts de surface dans le film de finition. Cependant, il faut faire attention au bois utilisé (ne pas avoir des pores de grande taille et de forme irrégulière, comme le chêne), car en plus d'une absorption irrégulière, nous pouvons avoir la formation des micro-pores dans le film à travers lesquels peut pénétrer l'eau et par la suite produire la dégradation du support et l'attaque des organismes xylophages.

En ce qui concerne les finitions F<sub>2</sub> et F<sub>3</sub>, qui sont respectivement transparentes et pigmentées, le mauvais comportement des revêtements peut être dû à la mauvaise qualité des produits destinés à l'utilisation en extérieur. Parmi les problèmes rencontrés, sont ceux dû à l'application. Par exemple, dans la finition F<sub>2</sub>, les épaisseurs des films secs sont faibles alors que si l'épaisseur est plus élevée, nous pouvons avoir une meilleure protection.

Après avoir vérifié le taux de l'extrait sec des produits de finition utilisés et les grammages à appliquer, nous avons constaté qu'il faut respecter le grammage et la viscosité des finitions pour avoir un résultat satisfaisant. A priori, il semble, après l'évaluation d'aspect, suite au vieillissement accéléré au QUV, que les finitions F<sub>4</sub>, F<sub>5</sub> et F<sub>6</sub> donnent de meilleurs résultats que

ceux du F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> et F<sub>3</sub>. Nous n'avons pas noté de défauts importants dans les films, comme le voile et les craquelures qui peuvent donner des problèmes à long terme.

En principe, si nous nous concentrons uniquement sur les résultats de cet essai, ces deux produits de finition ne pouvaient pas être considérés comme appropriés pour une utilisation extérieure, mais nous devons prendre en compte tous les autres résultats, et vérifier également la préparation et l'application des produits. Dans le cas du produit F<sub>1</sub>, en général, les résultats sont mieux comparé aux deux autres produits F<sub>2</sub> et F<sub>3</sub>, malgré l'existence des taches noires d'humidité qui ont été détectées dans le Pin. Dans l'ensemble, pour les différents produits de finition testés, les mieux sont ceux constitués d'une imprégnation ou une première couche de finition et une lasure, c'est-à-dire les produits F<sub>1</sub> et F<sub>4</sub>.

### VI.3. Vieillessement accéléré à la roue de dégradation

Le tableau VI.4 récapitule les résultats de l'étude de l'aspect du système Bois / Finition après Vieillessement à la roue.

Tableau VI.4. Evaluation de l'aspect du système Bois / Finition après Vieillessement à la roue

**E**= Echantillon, **Cl**= cloquage, **Cr**= Craquelage, **Ec**= Ecaillage, **A**= Adhérence

N°	Test	Bois	Finition	Cl	Cr	Ec	A	Aspect
				Classification				
1	T <sub>VR</sub>	A	F <sub>1</sub>	0	0	0	0	Petites traces de pénétration d'eau Pores ouverts problème d'adhérence
2	T <sub>VR</sub>	A	F <sub>2</sub>	0	0	0	0	Petites traces de pénétration d'eau pores ouverts problème d'adhérence
3	T <sub>VR</sub>	A	F <sub>3</sub>	<b>3</b>	0	0	0	Craquelures bulles Problème d'adhérence
4	T <sub>VR</sub>	P	F <sub>1</sub>	0	0	0	0	rugosité superficielle Petit gonflement de fibres
5	T <sub>VR</sub>	P	F <sub>2</sub>	<b>1</b>	0	0	0	Petites craquelures
6	T <sub>VR</sub>	P	F <sub>3</sub>	<b>2</b>	<b>1</b>	0	0	

7	T <sub>VR</sub>	C	F <sub>1</sub>	0	0	2	0	Pénétration d'eau
8	T <sub>VR</sub>	C	F <sub>2</sub>	0	0	2	0	
9	T <sub>VR</sub>	C	F <sub>3</sub>	0	5	3	0	Craquelures
10	T <sub>VR</sub>	A	F <sub>4</sub>	1	0	0	0	Petit changement de brillance
11	T <sub>VR</sub>	A	F <sub>5</sub>	1	0	0	0	Voile
12	T <sub>VR</sub>	A	F <sub>6</sub>	0	1	0	0	Légère rugosité du à la viscosité mais en général bien
13	T <sub>VR</sub>	P	F <sub>4</sub>	0	0	0	0	une petite montée de résine ce qui a fait gonfler le vernis
14	T <sub>VR</sub>	P	F <sub>5</sub>	0	0	0	0	Voile
15	T <sub>VR</sub>	P	F <sub>6</sub>	0	3	0	0	fissures
16	T <sub>VR</sub>	C	F <sub>4</sub>	1	0	0	0	Petites traces de pénétration d'eau Pores ouverts
17	T <sub>VR</sub>	C	F <sub>5</sub>	0	0	0	0	Voile
18	T <sub>VR</sub>	C	F <sub>6</sub>	0	3	0	0	Craquelure

L'évaluation de l'aspect après vieillissement accéléré à la roue a permis de faire les constatations suivantes : Au niveau du produit F<sub>3</sub>, pigmentée, nous avons remarqué des défauts de surface très importants dans le film de finition et dans les trois essences de bois utilisées. Au niveau des produits F<sub>1</sub> et F<sub>2</sub>, transparents, il n'y a pas de défauts de surface détectés dans les échantillons revêtus, sauf pour le chêne, où le noircissement est dû à l'effet de l'humidité existant dans les pores.

Dans les échantillons de chêne, le problème peut être dû à la taille et la forme des pores du bois irréguliers, et qui en plus d'une absorption irrégulière des produits de finition, favorise la formation de micro-trous dans le film par où pénètre l'eau et par la suite favorise la dégradation du support par la pourriture et les organismes xylophages.

Le produit F<sub>6</sub> pigmenté, se comporte mieux que le produit F<sub>3</sub> pigmenté, bien que, après l'évaluation des échantillons, l'apparition de fissures plus ou moins importantes peut être considérée en fonction de l'essence du bois.

Les produits pigmentées F<sub>5</sub> et F<sub>6</sub> se comportent généralement bien lorsqu'ils sont appliqués sur l'Acajou ou le Pin, mais pas sur le chêne, où le problème des pores apparaît à nouveau.

Les revêtements blancs présentaient une variation de coloration importante par rapport aux revêtements transparents ou opaques. L'intensité du changement de couleur était plus élevée chez le chêne pédonculé à revêtement blanc que chez le pin ayant le même revêtement.

#### VI.4. Conclusion

Dans ce chapitre, l'effet du vieillissement accéléré au QUV et à la roue de dégradation sur l'aspect des échantillons de bois de pin sylvestre et de Chêne pédonculé, ainsi que du bois de l'acajou revêtus de vernis, de lasure et de peinture a été étudié en effectuant des études de l'état de surface.

Les résultats de l'analyse de l'aspect, nous a permis de dégager les conclusions suivantes : Pas de défaut de surface détecté pour les finitions F<sub>1</sub> et F<sub>2</sub>, les finitions F<sub>4</sub>, F<sub>5</sub> et F<sub>6</sub> donnent de meilleurs résultats que ceux du F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> et F<sub>3</sub>, la finition pigmentée F<sub>6</sub> se comportent mieux que la la finition pigmentée F<sub>3</sub> et les finitions pigmentées F<sub>5</sub> et F<sub>6</sub> se comportent mieux lorsqu'elles sont appliquées sur l'acajou ou le Pin mais pas sur le chêne.

# **CHAPITRE VII**

## **VIEILLISSEMENT ARTIFICIEL AU QUV ET A LA ROUE**

### **DES SYSTEMES BOIS / FINITION :**

#### **ETUDE COLORIMETRIQUE**

#### **VII.1. Introduction**

Les principaux facteurs de dégradation des composants en bois à l'extérieur sont l'exposition aux rayons ultraviolets, à l'oxygène et à l'eau. (Feist et Hon, 1984 ; Yalinkilic et *al.*, 1999 ; Zhang et Kamdem, 2000 ; Podgorski et Merlin 2001; George et *al.*, 2005 ; Zhang et *al.*, 2009 ; Merlin et *al.*, 2018). Pour la protection de l'aspect naturel du bois et sa couleur contre les intempéries, des recherches sur les revêtements transparents ou semi-transparentes, tels que des vernis, des lasures ou des peintures ont été réalisées. (Jirous-Rajkovic et *al.*, 2002 ; Jirous-Rajkovic et *al.*, 2004 ; Scrinzi et *al.*, 2011 ; Grüll et *al.*, 2011).

Le test de vieillissement au QUV consiste à évaluer la résistance au vieillissement accéléré au QUV du système de revêtement appliqué sur un support en bois. Ce test a l'avantage d'être

accéléré par rapport au vieillissement naturel (Turkoglu et al., 2015 ; Kerber et al., 2016) qui nécessite une exposition d’au moins une année et qui présente souvent des problèmes de répétabilité et de reproductibilité.

Le vieillissement artificiel ou accéléré influe sur la couleur du bois traité ou non traité par la finition (Temiz et al., 2005 ; Zahri, et al., 2007 ; Çakıcıer et al., 2011 ; Baysal et al., 2013 ; Teles et al., 2014 ; Krystofiak et al., 2016 ; Baysal et al., 2016 ; Yalcin et al., 2017). La variation de la couleur de finition observée varie selon la nature du produit de finition, de l’espèce de bois (Gierlinger et al., 2004 ; Zanuncio et al., 2014 et 2015). et de son traitement, thermique (Ayadi et al., 2003 ; Bekhta et Niemz 2003 ; Piedade et al., 2012 ; de Cademartori et al., 2013 ; Demirci et al. 2013) ou chimique (Baysal et al., 2017). Une autre étude a été consacré à l’effet du vieillissement accéléré sur l’adhérence des finitions (Sonmez et al., 2009).

## VII.2. Viellissement accéléré au QUV

Les tableaux VII.1, VII.2, VII.3 et VII.4 récapitulent les résultats relatifs à la mesure de la couleur.

Tableau VII.1. Résultats des mesures de L\* et  $\Delta L^*$

Finition	Bois	L*1		L*2		L*3		L *moyenne		L* moy générale		$\Delta L^*$
		avant	après	avant	après	Avant	après	avant	après	avant	après	
F1	A1	53,52	47,88	54,83	47,02	53,75	47,5	54,03	47,47	52,50	45,23	-7,27
	A2	52,09	46,29	51,69	47,15	51	46,8	51,59	46,75			
	A3	51,8	41,09	53,05	41,83	50,75	41,5	51,87	41,47			
	P1	64,27	46,53	65,37	46,63	65,69	46,6	65,11	46,59	64,88	54,44	-10,44
	P2	64,52	56,57	64,09	56,36	63,41	56,5	64,01	56,48			
	P3	66,59	60,8	64,3	59,68	65,67	60,3	65,52	60,26			
	C1	58,62	48,83	58,53	47,57	58,9	48,2	58,68	48,20	58,99	50,56	-8,42
	C2	56,35	45,78	58,35	47,55	59,12	48,7	57,94	47,34			
C3	60,07	55,98	61,12	56,25	59,81	56,2	60,33	56,14				
F2	A1	51,97	71,17	53,2	69,85	53,51	70,6	52,89	70,54	53,91	60,46	6,55
	A2	52,24	70,7	55,45	64,4	55,22	67,6	54,30	67,57			
	A3	52,7	43,23	55,05	43,32	55,84	43,3	54,53	43,28			
	P1	63,3	48,69	64,64	43,23	63,5	46	63,81	45,97	66,10	51,10	-14,99

	P2	67,52	50,02	68,85	51,08	68,4	50,6	68,26	50,57	56,97	67,85	10,89
	P3	65,26	57,45	66,4	56,06	67,01	56,8	66,22	56,77			
	C1	56,44	71,66	57,21	71,36	67,01	71,6	60,22	71,54			
	C2	55,35	77,98	54,29	77,98	55,02	77,98	54,89	77,98			
	C3	55,53	54,42	56,87	53,59	54,98	54,1	55,79	54,04			
F3	A1	91,45	71,31	91,78	71,4	91,94	71,4	91,72	71,37	91,95	75,39	-16,56
	A2	92,16	61,21	92,73	65,41	92,23	63,4	92,37	63,34			
	A3	92,42	91,6	91,23	91,27	91,63	91,5	91,76	91,46			
	P1	92,16	67,43	90,45	64,6	91,01	66,1	91,21	66,04	91,62	77,52	-14,10
	P2	92,25	76,18	91,49	74,66	91,72	75,5	91,82	75,45			
	P3	91,25	91,47	92,81	90,63	91,4	91,1	91,82	91,07			
	C1	86,45	61,08	86,17	64,51	85,46	62,8	86,03	62,80	85,77	70,77	-15,00
	C2	84,18	58,39	87,06	68,63	85,84	63,6	85,69	63,54			
	C3	85,59	86,67	85,37	85,21	85,81	86	85,59	85,96			
F4	A1	61,52	42,23	50,06	42,49	49,97	42,4	53,85	42,37	50,14	41,77	-8,37
	A2	47,51	42,18	47,58	42,04	48,36	42,2	47,82	42,14			
	A3	48,42	40,49	49,08	41,09	48,75	40,8	48,75	40,79			
	P1	62,59	41,71	56,31	42,04	58,83	41,9	59,24	41,88	60,85	42,64	-18,21
	P2	64,27	38,78	57,92	36,52	60,62	37,9	60,94	37,73			
	P3	65,87	48,25	57,14	48,41	64,12	48,25	62,38	48,30			
	C1	54,15	47,89	53,88	49,68	52,94	48,8	53,66	48,79	53,19	48,50	-4,68
	C2	54,11	47,45	49,73	44,41	54,43	46	52,76	45,95			
	C3	52,5	50,15	54,48	51,34	52,45	50,8	53,14	50,76			
F5	A1	50,19	38,78	51,96	38,63	53,88	38,8	52,01	38,74	51,17	39,85	-11,32
	A2	48,79	39,77	50,51	38,86	49,19	39,4	49,50	39,34			
	A3	51,59	41,67	52,64	41,25	51,78	41,5	52,00	41,47			
	P1	66,03	46,38	63,18	46,53	62,98	46,5	64,06	46,47	65,45	48,50	-16,95
	P2	71,25	46,75	63,66	47,18	71,42	47	68,78	46,98			
	P3	63,03	51,44	63,96	52,64	63,54	52,1	63,51	52,06			
	C1	66,4	53,26	62,67	54,71	66,43	54	65,17	53,99	63,90	55,17	-8,73
	C2	63,03	51,88	57,72	53,47	63,02	52,7	61,26	52,68			
	C3	66,61	58,99	64,54	58,63	64,67	58,9	65,27	58,84			
F6	A1	94,98	90,91	95,07	90,72	95,11	90,9	95,05	90,84	94,95	90,88	-4,07
	A2	94,46	89,95	94,78	90,07	94,65	90,1	94,63	90,04			
	A3	95,19	91,6	95,29	91,85	94,98	91,8	95,15	91,75			
F6	P1	94,35	91,6	94,71	91,47	94,54	91,6	94,53	91,56	94,86	91,62	-3,24
	P2	95,17	91,46	95,2	90,91	94,63	91,2	95,00	91,19			
	P3	95,07	92,81	95,18	92,3	94,9	91,2	95,05	92,10			
	C1	94,9	89,18	95,01	88,88	95,03	89,1	94,98	89,05	94,84	90,11	-4,73
	C2	94,73	89,39	95	88,81	94,93	89,5	94,89	89,23			
	C3	94,51	91,94	95,16	92,07	94,31	92,1	94,66	92,04			

Tableau VII.2. Résultats des mesures de  $a^*$  et  $\Delta a^*$

Finition	Bois	a*1		a*2		a*3		*a moyenne		a* moy générale		Δa*
		avant	après	avant	après	Avant	après	avant	après	avant	après	
F1	A1	13,04	11,39	13,27	11,32	13,63	11,4	13,31	11,37	12,90	12,99	0,09
	A2	12,44	11,93	12,67	12,08	12,25	12,1	12,45	12,04			
	A3	13,08	15,37	12,83	15,68	12,86	15,6	12,92	15,55			
	P1	12,12	16	11,94	15,66	11,88	15,9	11,98	15,85	11,29	14,87	3,58
	P2	10,88	14,79	10,49	15,2	11,3	15	10,89	15,00			
	P3	10,92	13,87	11,18	13,59	10,86	13,8	10,99	13,75			
	C1	7,73	10,2	7,72	9,56	7,71	9,9	7,72	9,89	7,49	10,17	2,68
	C2	7,21	10,5	7,64	10,15	7,49	10,4	7,45	10,35			
	C3	7,28	10,43	7,26	10,11	7,39	10,3	7,31	10,28			
F2	A1	13,51	1,08	13,13	1,07	13,52	1,1	13,39	1,08	12,71	5,45	-7,27
	A2	13,43	1,15	11,65	2,15	12,21	1,7	12,43	1,67			
	A3	12,76	13,48	12,35	13,68	11,85	13,6	12,32	13,59			
	P1	13,06	11,5	10,82	13,59	12,85	12,6	12,24	12,56	11,17	13,82	2,65
	P2	10,63	12,47	9,75	12	9,8	12,3	10,06	12,26			
	P3	11,37	16,41	11,01	16,82	11,23	16,7	11,20	16,64			
	C1	8,48	3,43	8,44	3,19	8,65	3,4	8,52	3,34	8,62	5,46	-3,16
	C2	8,5	2,07	8,4	1,69	8,53	1,9	8,48	1,89			
	C3	8,98	11,08	8,8	11,21	8,81	11,2	8,86	11,16			
F3	A1	-0,25	0,95	-0,25	0,61	-0,27	0,8	-0,26	3,07	0,27	2,21	1,94
	A2	-0,34	4,65	-0,33	3,44	4,1		1,14	4,23			
	A3	-0,04	-0,69	-0,14	-0,62	-0,06	-0,7	-0,08	-0,67			
	P1	-1,27	4,85	-0,89	5,81	-1,06	5,4	-1,07	5,35	-1,03	2,67	3,70
	P2	-0,94	2,82	-0,88	3,39	-0,91	3,2	-0,91	3,14			
	P3	-1,04	-0,52	-1,27	-0,43	-1,03	-0,5	-1,11	-0,48			
	C1	-0,68	4,39	-0,49	4,03	-0,52	4,3	-0,56	4,24	-0,59	2,81	3,41
	C2	-0,6	5,6	-0,54	2,85	-0,65	4,3	-0,60	4,25			
	C3	-0,63	-0,62	-0,65	0,07	-0,59	0,4	-0,62	-0,05			
F4	A1	6,75	12,64	13,94	13,06	13,4	12,9	11,36	12,87	13,69	13,99	0,30
	A2	14,91	12,65	14,87	13,17	15,08	13	14,95	12,94			
	A3	14,69	16,07	14,97	16,25	14,61	16,2	14,76	16,17			
	P1	12,16	14,37	16,64	15,57	15,12	15	14,64	14,98	13,25	14,82	1,56
	P2	10,61	10,24	15,75	10	14,01	10,2	13,46	10,15			
	P3	8,41	19,35	16,61	19,31	9,98	19,33	11,67	19,33			
	C1	11,12	12,38	10,64	11,28	11,38	11,9	11,05	11,85	10,76	11,63	0,87
	C2	10,02	12,54	11,22	10,63	9,94	11,6	10,39	11,59			
	C3	10,99	11,56	10,68	11,28	10,89	11,5	10,85	11,45			
F5	A1	13,09	13,18	13,68	13,21	11,34	12,7	12,70	13,03	13,49	13,27	-0,22
	A2	13,63	10,62	13,82	11,35	13,93	11	13,79	10,99			
	A3	13,69	16,05	13,99	15,54	14,22	15,8	13,97	15,80			
	P1	11,57	17,07	13,7	17,12	13,67	17,1	12,98	17,10	11,89	17,32	5,44
	P2	7,26	16,74	13,42	16,44	7,23	16,6	9,30	16,59			
	P3	13,66	18,41	13,05	18,14	13,41	18,3	13,37	18,28			
	C1	6,9	1,86	8,05	15,86	6,93	15,86	7,29	11,19	7,19	12,30	5,11
	C2	5,89	13,6	8,39	13,62	6,07	13,7	6,78	13,64			
	C3	6,92	12,12	7,89	11,96	7,63	12,1	7,48	12,06			
F6	A1	-1,29	-0,61	-1,28	-0,57	-1,27	-0,6	-1,28	-0,59	-1,32	-0,68	0,64

	A2	-1,38	-0,59	-1,34	-0,57	-1,36	-0,6	-1,36	-0,59	-1,25	-0,66	0,59
	A3	-1,31	-0,85	-1,33	-0,87	-1,36	-0,9	-1,33	-0,87			
	P1	-1,27	-0,63	-1,24	-0,62	-1,26	-0,7	-1,26	-0,65			
	P2	-1,27	-0,51	-1,31	-0,48	-1,33	-0,5	-1,30	-0,50			
	P3	-1,22	-0,81	-1,18	-0,8	-1,19	-0,9	-1,20	-0,84			
F6	C1	-1,22	-0,34	-1,19	-0,32	-1,23	-0,4	-1,21	-0,35	-1,26	-0,54	0,71
	C2	-1,37	-0,42	-1,23	-0,38	-1,38	-0,4	-1,33	-0,40			
	C3	-1,22	-0,86	-1,26	-0,85	-1,2	-0,9	-1,23	-0,87			

Tableau VII.3. Résultats des mesures de  $b^*$  et  $\Delta b^*$

Finition	Bois	$b^*1$		$b^*2$		$b^*3$		$b^*$ moyenne		$b^*$ moy générale		$\Delta b^*$
		avant	après	avant	après	Avant	après	avant	après	avant	après	
F1	A1	20,04	21,5	20,45	20,87	20,08	21,2	20,19	21,19	20,30	21,01	0,71
	A2	20,63	22,06	20,34	22,7	20,32	22,4	20,43	22,39			
	A3	20,3	19	20,6	19,84	19,95	19,5	20,28	19,45			
	P1	26,63	25,09	17,19	24,47	27,07	24,8	23,63	24,79	26,49	28,95	2,46
	P2	28,32	30,83	27,3	31,09	27,95	31	27,86	30,97			
	P3	27,9	31,73	28,14	30,4	27,9	31,1	27,98	31,08			
	C1	22,57	21,72	22,52	19,88	22,67	20,8	22,59	20,80	22,83	24,18	1,35
	C2	21,33	22,62	22,58	21,36	22,58	22	22,16	21,99			
C3	23,64	29,89	23,68	29,59	23,94	29,8	23,75	29,76				
F2	A1	20,21	4,18	20,23	4,15	21,9	4,2	20,78	4,18	20,70	9,78	-10,92
	A2	20,31	4,44	21,17	5,1	21,03	4,8	20,84	4,78			
	A3	20,14	20,02	20,58	20,69	20,69	20,4	20,47	20,37			
	P1	32,29	15,8	29,91	15,68	32,01	15,8	31,40	15,76	30,53	22,97	-7,56
	P2	32,51	17,91	31,92	17,93	32,42	18	32,28	17,95			
	P3	27,75	35,1	27,59	35,3	28,35	35,2	27,90	35,20			
	C1	24,59	9,71	24,94	9,15	25,3	9,5	24,94	9,45	24,25	15,54	-8,71
	C2	23,08	7,24	25,08	6,94	23,9	7,1	24,02	7,09			
C3	23,69	30,52	24,13	29,63	23,54	30,1	23,79	30,08				
F3	A1	4,35	12,46	4,16	11,37	4,35	12	4,29	11,94	4,45	7,44	2,99
	A2	3,7	8,8	3,83	6,23	3,79	7,6	3,77	7,54			
	A3	5,45	2,62	5,13	3,02	5,31	2,9	5,30	2,85			
	P1	7,97	15,75	7,24	14,82	7,55	15,3	7,59	15,29	6,37	10,73	4,36
	P2	4,79	12,74	4,77	12,63	4,7	12,7	4,75	12,69			
	P3	6,85	4,22	6,75	4,22	6,7	4,22	6,77	4,22			
	C1	10,2	11,65	12,33	12,53	10,47	12,1	11,00	12,09	10,83	9,42	-1,41
	C2	9,42	13,34	10,71	10,98	10,17	12,2	10,10	12,17			
C3	10,84	3,62	11,32	4,37	11,99	4	11,38	4,00				
F4	A1	11,61	18,85	25,05	19,49	23,74	19,2	20,13	19,18	23,48	19,53	-3,95
	A2	24,74	19,04	24,93	19,59	25,54	19,4	25,07	19,34			
	A3	24,97	19,83	25,49	20,28	25,25	20,1	25,24	20,07			
F4	P1	24,21	18,3	34,07	20,21	32,47	19,3	30,25	19,27	26,24	20,63	-5,61

	P2	20,65	12,66	33,13	11,87	29,67	12,3	27,82	12,28	26,76	25,41	-1,34
	P3	12,62	30,4	33,31	30,33	16,02	30,3	20,65	30,34			
	C1	27,4	24,54	26,53	23,66	27,63	24,1	27,19	24,10			
	C2	27,28	25,09	26,11	20,24	27,16	22,7	26,85	22,68			
	C3	26,23	29,19	26,58	29,71	25,9	29,5	26,24	29,47			
F5	A1	20,1	10,4	21,21	10,59	16,74	10,5	19,35	10,50	20,11	11,52	-8,59
	A2	19,27	7,53	20,35	8,37	20	8	19,87	7,97			
	A3	20,62	16,69	21,41	15,47	21,26	16,1	21,10	16,09			
	P1	22,63	18,31	26,48	18,46	26,18	18,4	25,10	18,39	22,70	21,24	-1,46
	P2	11,5	17,37	25,9	17,51	11,42	17,5	16,27	17,46			
	P3	26,54	27,54	26,57	28,15	27,09	27,9	26,73	27,86			
	C1	22,05	26,35	25,05	26,29	22,12	26,4	23,07	26,35	21,64	27,83	6,19
	C2	15,27	21,95	22,11	22,83	15,26	22,4	17,55	22,39			
C3	22,19	34,8	25,5	34,62	25,22	34,8	24,30	34,74				
F6	A1	3,68	4,14	3,67	4,21	3,57	4,2	3,64	4,18	3,92	4,28	0,36
	A2	4,45	4,12	4,45	4	4,37	4,1	4,42	4,07			
	A3	3,8	4,58	3,63	4,53	3,65	4,6	3,69	4,57			
	P1	4,13	4,22	3,94	4,29	4,21	4,3	4,09	4,27	4,15	4,36	0,21
	P2	4,45	4,6	4,21	4,62	4,35	4,7	4,34	4,64			
	P3	4,01	3,75	3,99	4,6	4,09	4,2	4,03	4,18			
	C1	5,1	4,03	3,68	4,16	4,78	4,1	4,52	4,10	4,57	4,51	-0,06
	C2	5,26	4,55	5,26	4,73	5,25	4,7	5,26	4,66			
	C3	4,05	4,42	3,89	5,06	3,83	4,8	3,92	4,76			

Tableau VII.4. Résultats des mesures de la couleur

<b>Finition</b>	<b>Bois</b>	$\Delta L^*$	$\Delta a^*$	$\Delta b^*$	$\Delta E^*$
F1	A	-7,27	0,09	0,71	7,30
	P	-10,44	3,58	2,46	11,31
	C	-8,42	2,68	1,35	8,94
F2	A	6,55	-7,27	-10,92	14,66
	P	-14,99	2,65	-7,56	17,00
	C	10,89	-3,16	-8,71	14,29
F3	A	-16,56	1,94	2,99	16,94
	P	-14,10	3,70	4,36	15,21
	C	-15,00	3,41	-1,41	15,45
F4	A	-8,37	0,30	-3,95	9,26
	P	-18,21	1,56	-5,61	19,12
	C	-4,68	0,87	-1,34	4,95
F5	A	-11,32	-0,22	-8,59	14,21

	P	-16,95	5,44	-1,46	17,86
	C	-8,73	5,11	6,19	11,86
F6	A	-4,07	0,64	0,36	4,13
	P	-3,24	0,59	0,21	3,30
	C	-4,73	0,71	-0,06	4,79

Le vieillissement au QUV a modifié la couleur de surface de tous les couples de finition étudiés (Hakam et al., 2018b), la clarté ( $L^*$ ), la coordonnée vert-rouge ( $a^*$ ) et la coordonnée bleu-jaune ( $b^*$ ).

Comme nous pouvons le voir dans le tableau VII.1, les valeurs de  $L^*$  de tous les couples de finition diminuent après vieillissement au QUV, mais avec un impact plus important sur les couples (*Pinus sylvestris* / Finition), tandis que les valeurs de  $a^*$  (Tableau VII.2) augmentent pour tous les couples de finition, sauf pour le couple *Quercus robur* / F<sub>2</sub> et le *Khaya ivorensis* / F<sub>5</sub>. Les valeurs positives de  $\Delta a^*$  montrent une tendance de la surface de la finition à devenir plus rougeâtre, sauf pour les couples (*Quercus robur* / F<sub>2</sub>), (*Pinus sylvestris* / finitions), et (*Khaya ivorensis* / F<sub>2</sub>) où la surface à tendance à devenir plus verdâtre. La coordonnée vert-rouge ( $a^*$ ) des couples (*Pinus sylvestris* / Finition) était plus élevée que celle des couples (*Quercus robur* / Finition) et la coordonnée bleu-jaune ( $b^*$ ) augmente (Tableau VII.3) pour les couples avec finition F<sub>1</sub> et le couple (*Quercus robur* / F<sub>4</sub>) et diminue pour les couples avec finition F<sub>2</sub> et F<sub>3</sub> et le couple (*Pinus sylvestris* / F<sub>4</sub>). D'après les résultats obtenus (Tableaux VII.1, VII.2, VII.3, VII.4), le classement de la durabilité des systèmes *Quercus robur* / Finition par ordre décroissant est : *Quercus robur* / F<sub>3</sub>, *Quercus robur* / F<sub>2</sub>, *Quercus robur* / F<sub>5</sub> et *Quercus robur* / F<sub>1</sub>, *Quercus robur* / F<sub>4</sub>, *Quercus robur* / F<sub>6</sub> et le classement de la durabilité des systèmes *Pinus sylvestris* / Finition par ordre décroissant est : *Pinus sylvestris* / F<sub>4</sub>, *Pinus sylvestris* / F<sub>5</sub>, *Pinus sylvestris* / F<sub>2</sub>, *Pinus sylvestris* / F<sub>3</sub>, *Pinus sylvestris* / F<sub>1</sub> et *Pinus sylvestris* / F<sub>6</sub> et le classement de la durabilité des systèmes *Khaya ivorensis* / Finition par ordre décroissant est : *Khaya ivorensis* / F<sub>3</sub>, *Khaya ivorensis* / F<sub>2</sub>, *Khaya ivorensis* / F<sub>5</sub>, *Khaya ivorensis* / F<sub>4</sub>, *Khaya ivorensis* / F<sub>1</sub>, *Khaya ivorensis* / F<sub>6</sub>.

### VII.3. Vieillissement accéléré à la roue de dégradation

Les tableaux VII.5, VII.6, VII.7 et VII.8 récapitulent les résultats relatifs à l'essai de la couleur.

Tableau VII.5. Résultats des mesures de  $L^*$  et  $\Delta L^*$

Finition	Bois	$L^*1$		$L^*2$		$L^*3$		$L^*$ moyenne		$\Delta L^*$
		avant	après	avant	après	avant	après	avant	après	
F1	A	53,67	45,16	51,16	45,43	54,21	42,88	53,01	44,49	-8,52
F2	A	53,07	46,45	52,02	45,66	52,75	44,17	52,61	45,43	-7,19

Finition	Bois	L*1		L*2		L*3		L* moyenne		$\Delta L^*$
		avant	après	avant	après	avant	après	avant	après	
F3	A	90,25	89,87	90,38	88,34	89,23	89,75	89,95	89,32	-0,63
F1	P	58,81	49,28	59,76	52,39	58,92	51,95	59,16	51,21	-7,96
F2	P	58,48	47,36	56,31	54,66	58,41	47,98	57,73	50,00	-7,73
F3	P	90,05	68,25	89,35	86,03	88,4	73,92	89,27	76,07	-13,20
F1	C	57,11	51,88	57,95	53,71	59,12	54,44	58,06	53,34	-4,72
F2	C	50,31	51,94	51,24	52,85	52,09	49,28	51,21	51,36	0,14
F3	C	87,96	87,49	86,77	69,3	84,96	88,4	86,56	81,73	-4,83
F4	A	50,5	42,93	48,36	43,44	48,48	43,34	49,11	43,24	-5,88
F5	A	51,73	38,91	50,47	38,55	51,69	39,23	51,30	38,90	-12,40
F6	A	95,36	93,05	95,32	93,07	94,93	92,49	95,20	92,87	-2,33
F4	P	51,95	48,22	52,44	47,65	53,53	48,35	52,64	48,07	-4,57
F5	P	54,4	50,47	59,15	51,76	62,36	51,3	58,64	51,18	-7,46
F6	P	95,54	93,29	95,45	93,7	95,52	92,48	95,50	93,16	-2,35
F4	C	50,15	46,65	48,74	46,44	51,13	44,83	50,01	45,97	-4,03
F5	C	35,1	52,54	35,6	50,78	36,7	52,16	35,80	51,83	16,03
F6	C	95,31	92,84	95,35	92,52	95,15	91,08	95,27	92,15	-3,12

Tableau VII.6. Résultats des mesures de  $a^*$  et  $\Delta a^*$

Finition	Bois	a*1		a*2		a*3		a* moyenne		$\Delta a^*$
		avant	après	avant	après	avant	après	avant	après	
F1	A	13,1	13,86	13,46	12,85	13,08	13,3	13,21	13,34	0,12
F2	A	13,4	14,02	13,46	13,4	13,08	14	13,31	13,81	0,49
F3	A	-0,63	-0,98	-0,49	-0,71	-0,5	-0,79	-0,54	-0,83	-0,29
F1	P	13,57	15,11	13,27	13,88	13,01	14,33	13,28	14,44	1,16
F2	P	14,44	16,11	14,94	15,69	14,25	16,27	14,54	16,02	1,48
F3	P	-0,63	7,33	-1,04	0,24	-0,58	4,43	-0,75	4,00	4,75
F1	C	9,45	12,51	8,48	12,41	8,24	11,63	8,72	12,18	3,46
F2	C	10,15	12,64	9,68	12,54	9,48	11,62	9,77	12,27	2,50
F3	C	-0,72	-1,2	-0,56	2,72	-0,2	-0,91	-0,49	0,20	0,70
F4	A	15,37	14,53	14,17	14,41	14,27	14,79	14,60	14,58	-0,03
F5	A	14,3	16,89	14,59	16,8	15,02	17,18	14,64	16,96	2,32
F6	A	-1,21	-0,69	-1,25	-0,71	-1,18	-0,66	-1,21	-0,69	0,53
F4	P	17,45	17,62	17,79	16,73	16,6	16,1	17,28	16,82	-0,46
F5	P	16,28	18	13,95	18,32	12,21	17,71	14,15	18,01	3,86
F6	P	-1,25	-0,7	-1,22	-0,69	-1,19	-0,6	-1,22	-0,66	0,56
F4	C	11,27	13,18	10,84	13,55	10,98	13,59	11,03	13,44	2,41
F5	C	9,19	14,1	9,31	14,13	9,41	13,55	9,30	13,93	4,62
F6	C	-1,3	-0,63	-1,27	-0,66	-1,33	-0,44	-1,30	-0,58	0,72

Tableau VII.7. Résultats des mesures de  $b^*$  et  $\Delta b^*$

Finition	Bois	b*1		b*2		b*3		b* moyenne		$\Delta b^*$
		avant	après	avant	après	avant	après	avant	après	
F1	A	21,47	22,69	19,14	22	20,76	22,3	20,46	22,33	1,87
F2	A	21,06	25,07	20,38	24,31	20,92	23,29	20,79	24,22	3,44
F3	A	6,92	5,63	6,03	4,74	6,8	4,32	6,58	4,90	-1,69
F1	P	23,5	27,72	22	29,61	21,84	29,06	22,45	28,80	6,35
F2	P	26,47	27,86	26,89	33,41	26,3	28,31	26,55	29,86	3,31
F3	P	7,74	13,63	5,97	6,09	7,48	10,91	7,06	10,21	3,15
F1	C	24,57	31,97	23,58	33,76	23,36	32,18	23,84	32,64	8,80
F2	C	24,61	32,26	23,66	32,96	23,51	29,21	23,93	31,48	7,55
F3	C	13	12,65	13,84	17,85	15,81	11,58	14,22	14,03	-0,19
F4	A	27,3	22,45	24,91	23,69	24,88	23,61	25,70	23,25	-2,45
F5	A	22,01	18,24	21,54	17,42	22,47	18,69	22,01	18,12	-3,89
F6	A	4,15	4,75	4,08	4,4	4,37	4,84	4,20	4,66	0,46
F4	P	31,02	33,46	31,71	31,35	31,24	29,44	31,32	31,42	0,09
F5	P	22,81	32,5	24,58	33,26	23,96	30,29	23,78	32,02	8,23
F6	P	4,19	4,39	4,3	4,24	4,37	4,8	4,29	4,48	0,19
F4	C	25,84	31,2	24,38	31,64	25,53	30,34	25,25	31,06	5,81
F5	C	23,42	32,9	24,07	30,6	23,89	31,31	23,79	31,60	7,81
F6	C	4,63	5,09	4,64	4,76	4,89	5,55	4,72	5,13	0,41

Tableau VII.8. Résultats des mesures de la couleur

Finition	Bois	$\Delta L^*$	$\Delta a^*$	$\Delta b^*$	$\Delta E^*$
F1	A	-8,52	0,12	1,87	8,73
F2	A	-7,19	0,49	3,44	7,98
F3	A	-0,63	-0,29	-1,69	1,82
F1	P	-7,96	1,16	6,35	10,25
F2	P	-7,73	1,48	3,31	8,54
F3	P	-13,20	4,75	3,15	14,38
F1	C	-4,72	3,46	8,80	10,57
F2	C	0,14	2,50	7,55	7,95
F3	C	-4,83	0,70	-0,19	4,89
F4	A	-5,88	-0,03	-2,45	6,37
F5	A	-12,40	2,32	-3,89	13,20

Finition	Bois	$\Delta L^*$	$\Delta a^*$	$\Delta b^*$	$\Delta E^*$
F6	A	-2,33	0,53	0,46	2,44
F4	P	-4,57	-0,46	0,09	4,59
F5	P	-7,46	3,86	8,23	11,76
F6	P	-2,35	0,56	0,19	2,42
F4	C	-4,03	2,41	5,81	7,47
F5	C	16,03	4,62	7,81	18,42
F6	C	-3,12	0,72	0,41	3,23

Les revêtements blancs présentaient une décoloration importante par rapport aux revêtements transparents ou opaques. L'intensité du changement de couleur était plus élevée chez le chêne pédonculé à revêtement blanc que chez le pin ayant le même revêtement.

Comme nous pouvons le voir dans le tableau VII.5, les valeurs de  $L^*$  de tous les couples de finition diminuent après vieillissement à la roue, tandis que les valeurs de  $a^*$  augmentent (Tableau VII.6), sauf pour le couple *Khaya ivorensis* / F<sub>4</sub> et le *Pinus sylvestris* / F<sub>4</sub>. Les valeurs positives de  $\Delta a^*$  montrent une tendance de la surface de la finition à devenir plus rougeâtre, sauf pour les couples (*Khaya ivorensis* / F<sub>3</sub>), et le (*Pinus sylvestris* / F<sub>5</sub>), où la surface a tendance à devenir plus verdâtre. La coordonnée vert-rouge ( $a^*$ ) des couples (*Pinus sylvestris* / Finition) était plus élevée que celle des couples (*Khaya ivorensis* / finition) suivi par le (*Quercus robur* / Finition). La coordonnée bleu-jaune ( $b^*$ ) augmente (Tableau VII.7) pour les tous couples, pour les couples (*Khaya ivorensis* / F<sub>3</sub>), (*Quercus robur* / F<sub>3</sub>) et le (*Khaya ivorensis* / F<sub>5</sub>) où elle diminue. D'après les résultats obtenus (Tableaux VII.5, VII.6, VII.7, VII.8), le classement de la durabilité des systèmes *Quercus robur* / Finition par ordre décroissant est : *Quercus robur* / F<sub>5</sub>, *Quercus robur* / F<sub>1</sub>, *Quercus robur* / F<sub>2</sub>, *Quercus robur* / F<sub>4</sub>, *Quercus robur* / F<sub>3</sub>, *Quercus robur* / F<sub>6</sub> et le classement de la durabilité des systèmes *Pinus sylvestris* / Finition par ordre décroissant est : *Pinus sylvestris* / F<sub>3</sub>, *Pinus sylvestris* / F<sub>5</sub>, *Pinus sylvestris* / F<sub>1</sub>, *Pinus sylvestris* / F<sub>2</sub>, *Pinus sylvestris* / F<sub>4</sub> et *Pinus sylvestris* / F<sub>6</sub> et le classement de la durabilité des systèmes *Khaya ivorensis* / Finition par ordre décroissant est : *Khaya ivorensis* / F<sub>5</sub>, *Khaya ivorensis* / F<sub>1</sub>, *Khaya ivorensis* / F<sub>2</sub>, *Khaya ivorensis* / F<sub>4</sub>, *Khaya ivorensis* / F<sub>6</sub>, *Khaya ivorensis* / F<sub>3</sub>.

Pour les autres produits de finition transparents nous avons remarqué des changements plus ou moins importants selon les essences de bois, en raison de leur composition chimique qui les

rend plus ou moins résistants aux radiations. Dans tous les produits transparents, les changements de couleur les plus importants sont marqués au niveau du bois de Pin.

#### **VII.4. Conclusion**

Les résultats ont montré que les deux modes de vieillissements au QUV et à la roue de dégradation provoquent une diminution de la brillance et une modification de la couleur de tous les échantillons étudiés. Cette étude a permis de faire un classement de la durabilité des systèmes bois / finition étudiés.

Il est important de noter que les différences de coordonnées chromatiques et la différence de couleur totale, ( $\Delta E^*$ ), nous aident à comprendre le comportement des échantillons, mais ne peut pas être un moyen pour le classement final du produit.

Les résultats de l'analyse de la couleur, nous a permis de dégager les conclusions suivantes : Les systèmes (*Quercus robur* / F<sub>6</sub>) et (*Pinus sylvestris* / F<sub>6</sub>) et (*Khaya ivorensis* / F<sub>6</sub>) donnent de meilleurs résultats pour les deux modes de vieillissements réalisés : le vieillissement au QUV et à la roue de dégradation, ce qui montre que la Peinture acrylique aqueuse et opaque est mieux adaptée pour ces essences de bois, pour les menuiseries extérieures. Les finitions avec les lasures ou les finitions opaques présentent de meilleurs résultats par rapport aux autres produits de finition.

Le comportement des couleurs pour les produits transparents F<sub>4</sub> et F<sub>5</sub> diffère selon les essences de bois utilisées, alors qu'il n'y a pas de différence significative entre ces deux produits.

Les produits pigmentés génèrent une grande variabilité du comportement en fonction des essences de bois. Dans le cas des produits transparents, la différence de couleur la moins marquée est obtenue avec la finition F<sub>1</sub>. Alors que pour les produits F<sub>4</sub>, F<sub>5</sub> et F<sub>6</sub>, les meilleurs résultats sont des produits F<sub>4</sub> et F<sub>6</sub>, mais dans l'évaluation de l'aspect, ce dernier (le produit F<sub>6</sub>), a présenté des grands changements de couleur et la perte d'adhérence.

Les produits pigmentés génèrent une grande variabilité du comportement en fonction des essences de bois.



## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Trois objectifs ont été fixés au cours de ce travail : 1) la détection précoce du phénomène de bleuissement chez le bois du pin maritime (BPM) par l'utilisation de la Spectroscopie d'Impédance Electrique (SIE) dans le domaine des basses fréquences (40 Hz à 100 KHz) ; 2) la caractérisation des systèmes de finition à savoir la caractérisation des produits de finition (mesure de l'épaisseur des couches de finition et de son extrait sec, ainsi que des mesures de perméabilité à l'eau liquide et de l'adhérence ; 3) l'étude de l'effet du vieillissement accéléré (au QUV et à la roue de Gardner) sur l'aspect visuel et la couleur des différents systèmes Bois/ Finition réalisés.

Dans le cadre du premier objectif et après un premier travail de synthèse bibliographique sur la SIE comme méthode de caractérisation des matériaux biologiques (Chapitre I), le deuxième chapitre a été consacré à une modélisation de la réponse en fréquence du bois de pin maritime

(*Pinus pinaster* var *atlantica*) de la forêt de la Mamora occidentale. L'une des principales applications du SIE est l'étude des propriétés électriques fondamentales des matériaux afin de les corrélérer avec les caractéristiques intrinsèques de ces dernières. Les mesures par (SIE) ont été réalisées à température ambiante ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ) et à des intervalles de fréquence de 40 Hz à 100 kHz. Le modèle double-DCE (ZARC) a été utilisé comme circuit équivalent pour le BPM. Les paramètres d'impédance électrique de ce modèle tels que la résistance intracellulaire ( $R_i$ ), les résistances extracellulaires ( $R_{e1}$  et  $R_{e2}$ ), le temps de relaxation ( $\tau_1$  et  $\tau_2$ ) et le coefficient réparti du temps de relaxation ( $\Psi_1$  et  $\Psi_2$ ) ont été déterminés.

Le troisième chapitre a été consacré à l'examen de l'effet de la coloration bleue sur l'impédance électrique du bois de pin maritime (BPM) (*Pinus pinaster* L.) dans le domaine des basses fréquences et faible teneur en humidité. L'effet de la coloration bleue sur les propriétés électriques du BPM à un stade précoce du bleuissement par les champignons a été étudié dans la direction longitudinale du bois. Les valeurs expérimentales pour chaque fréquence de la partie réelle ( $Z_r$ ) et de la partie imaginaire ( $Z_i$ ) de l'impédance électrique des échantillons sains et bleuies ont été mesurées dans des conditions atmosphériques à ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ) et dans une gamme fréquence allant de 10 Hz à 100 KHz, dans laquelle l'effet du type d'électrode était négligeable. Le modèle Double-DCE (ZARC) a été utilisé comme circuit équivalent. Il a été démontré que la coloration bleue a un impact important sur les propriétés électriques. Les données présentées ont montré qu'il est possible d'effectuer une détection précoce du bleuissement et de suivre son évolution par analyse des données obtenues par spectroscopie d'impédance électrochimique. En effet la coloration bleue a eu un effet sur les propriétés électriques sur toute la gamme de fréquences. Les changements observés dans les propriétés électriques du BPM en raison de la coloration bleue indiquent qu'à une température et une teneur en humidité constantes, les temps de relaxation ( $\tau_1$  et  $\tau_2$ ) et les résistances extracellulaires ( $R_1$  et  $R_2$ ) diminuent. Les paramètres d'impédance étaient significativement sensibles à la coloration bleue. Selon cette technique, les paramètres électriques peuvent être considérés comme un indicateur du bleuissement du bois.

Dans le cadre du deuxième objectif relatif à la caractérisation des systèmes de finition, une caractérisation des produits de finition utilisés (mesure de l'extrait sec et de l'épaisseur des finitions) et des mesures de perméabilité à l'eau liquide et de l'adhérence des produits de finition ont été réalisés. Le choix des systèmes Bois / Finitions étudiés a été réalisé en concertation avec les industriels de la filière bois-finition de la région de Casablanca au Maroc. L'objectif était de trouver le système Bois / Finition qui présente la meilleure durabilité en utilisation extérieure.

Trois essences du bois (*Pinus sylvestris*, *Quercus robur* et *Khaya ivorensis*) ainsi que six formulations de finition ont été choisies.

Par définition, un système Bois / Finition est un échantillon qui est composé d'un support en bois et un ou plusieurs produits de finition déposés sur ce bois. La finition protège le bois contre l'humidité, la température, l'oxygène et l'ensoleillement. C'est une étape importante pour valoriser les produits en bois. D'ailleurs, la durée de vie de ces derniers est souvent associée à la durabilité de son revêtement de finition.

Dans le cadre du troisième objectif relatif à l'étude de l'effet du vieillissement accéléré (au QUV et à la roue de Gardner) sur l'aspect et la couleur des différents systèmes Bois/ Finition étudiés, l'évaluation d'aspect, a montré que les finitions F<sub>4</sub>, F<sub>5</sub> et F<sub>6</sub> donnent de meilleurs résultats que ceux du F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> et F<sub>3</sub>. Nous n'avons pas noté de défauts importants dans les films, comme le voile et les craquelures qui peuvent donner des problèmes à long terme.

L'évaluation de l'aspect après vieillissement accéléré à la roue de dégradation a permis de faire les constatations suivantes :

Au niveau du produit F<sub>3</sub>, pigmentée, nous avons remarqué des défauts de surface très importants dans le film de finition et dans les trois essences de bois utilisées.

Au niveau des produits F<sub>1</sub> et F<sub>2</sub>, transparents, il n'y a pas de défauts de surface détectés dans les échantillons fini, sauf pour le chêne, où le noircissement est dû à l'effet de l'humidité existant dans les pores.

Dans les échantillons de chêne, le problème peut être dû à la taille et les formes des pores du bois irréguliers, et qui en plus d'une absorption irrégulière des produits de finition, favorise la formation de micro-trous dans le film par où pénètre l'eau et par la suite favorise la dégradation du support par la pourriture et les organismes xylophages.

Le produit F<sub>6</sub> pigmenté, se comporte mieux que le pigmenté du produit F<sub>3</sub>, bien que, après l'évaluation des échantillons, l'apparition de fissures plus ou moins importantes peut être considérée en fonction de l'essence du bois.

Les produits transparents (F<sub>5</sub> et F<sub>6</sub>) se comportent généralement bien lorsqu'ils sont appliqués sur l'Acajou ou le Pin, mais pas sur le Chêne, où le problème des pores apparaît à nouveau.

Les revêtements blancs présentaient une discoloration importante par rapport aux revêtements transparents ou opaques. L'intensité du changement de couleur était plus élevée chez le chêne pédonculé à revêtement blanc que chez le pin ayant le même revêtement.

Les résultats des mesures colorimétriques, dans le système de couleur CIEL  $L^*a^*b^*$  : La brillance ( $L^*$ ), les coordonnées vert-rouge ( $a^*$ ) et bleu-jaune ( $b^*$ ), avant et après vieillissement accéléré au QUV et à la roue de dégradation Gardner, ont permis de faire un classement de la durabilité des différents systèmes Bois / Finition étudiés.

L'effet de l'altération accélérée sur la brillance et la couleur des spécimens de pin sylvestre (*Pinussylvestris*), de Chêne pédonculé (*Quercus robur*) et d'Acajou (*Khaya ivorensis*) revêtus de vernis et de lasure a été étudié en effectuant des tests de la brillance et de la couleur de surface. Trois finitions à base de résine polyuréthane (F<sub>1</sub> F<sub>2</sub> et F<sub>3</sub>) et trois à base de résine acrylique (F<sub>3</sub>, F<sub>4</sub> et F<sub>4</sub>) ont été choisies. Les résultats ont montré que l'altération provoquait une diminution de la brillance et une modification de la couleur de tous les spécimens étudiés.

Pour les autres produits transparents nous avons remarqué des changements plus ou moins importants selon les essences de bois, en raison de leur composition chimique qui les rend plus ou moins résistants aux radiations.

L'analyse des caractéristiques des systèmes de finitions et la discussion sur les efficacités des finitions ne peuvent être complètes puisque les fournisseurs ne donnent pas les compositions chimiques des formulations.

Pour les dégradations à l'extérieur, la souplesse de la finition est le facteur le plus important, il faut que la finition soit souple pour suivre les variations dimensionnelles du bois, ceci peut expliquer les différences entre les essences de bois qui n'ont pas les mêmes coefficients de retrait. Ce facteur de la variation dimensionnelle pourrait être le point de départ d'une étude ultérieure de mesure de la stabilité dimensionnelle des trois essences étudiées et en évaluant les modifications de souplesse du revêtement de surface au cours du vieillissement.

Les résultats montrent également que les deux vieillissements accélérés étudiés ne conduisent pas aux mêmes altérations des échantillons, la roue qui impose une immersion de l'échantillon dans l'eau est plus dégradante que le QUV et conduit à un facteur d'accélération par rapport au vieillissement naturel plus important que le QUV.

On peut donc classer les différents systèmes Pour le vieillissement au QUV :

Le classement de la durabilité des systèmes *Quercus robur* / Finition par ordre décroissant est: *Quercus robur* / F<sub>3</sub>, *Quercus robur* / F<sub>2</sub>, *Quercus robur* / F<sub>5</sub> et *Quercus robur* / F<sub>1</sub>, *Quercus robur* / F<sub>4</sub>, *Quercus robur* / F<sub>6</sub> et le classement de la durabilité des systèmes *Pinus sylvestris* / Finition par ordre décroissant est : *Pinus sylvestris* / F<sub>4</sub>, *Pinus sylvestris* / F<sub>5</sub>, *Pinus sylvestris* / F<sub>2</sub>, *Pinus sylvestris* / F<sub>3</sub>, *Pinus sylvestris* / F<sub>1</sub> et *Pinus sylvestris* / F<sub>6</sub> et le classement de la durabilité des systèmes *Khaya ivorensis* / Finition par ordre décroissant est : *Khaya ivorensis* / F<sub>3</sub>, *Khaya ivorensis* / F<sub>2</sub>, *Khaya ivorensis* / F<sub>5</sub>, *Khaya ivorensis* / F<sub>4</sub>, *Khaya ivorensis* / F<sub>1</sub>, *Khaya ivorensis* / F<sub>6</sub>.

Pour le vieillissement à la roue de dégradation :

Le classement de la durabilité des systèmes *Quercus robur* / Finition par ordre décroissant est: *Quercus robur* / F<sub>5</sub>, *Quercus robur* / F<sub>1</sub>, *Quercus robur* / F<sub>2</sub>, *Quercus robur* / F<sub>4</sub>, *Quercus robur* / F<sub>3</sub>, *Quercus robur* / F<sub>6</sub> et le classement de la durabilité des systèmes *Pinus sylvestris* / Finition par ordre décroissant est : *Pinus sylvestris* / F<sub>3</sub>, *Pinus sylvestris* / F<sub>5</sub>, *Pinus sylvestris* / F<sub>1</sub>, *Pinus sylvestris* / F<sub>2</sub>, *Pinus sylvestris* / F<sub>4</sub> et *Pinus sylvestris* / F<sub>6</sub> et le classement de la durabilité des systèmes *Khaya ivorensis* / Finition par ordre décroissant est : *Khaya ivorensis* / F<sub>5</sub>, *Khaya ivorensis* / F<sub>1</sub>, *Khaya ivorensis* / F<sub>2</sub>, *Khaya ivorensis* / F<sub>4</sub>, *Khaya ivorensis* / F<sub>6</sub>, *Khaya ivorensis* / F<sub>3</sub>.

Aussi, nous pouvons dire que les résultats de l'analyse de la couleur, nous ont permis de dégager les conclusions suivantes : Les systèmes (*Quercus robur* / F<sub>6</sub>) et (*Pinus sylvestris* / F<sub>6</sub>) et (*Khaya ivorensis* / F<sub>6</sub>) donnent de meilleurs résultats pour les deux modes de vieillissements réalisés : le vieillissement au QUV et le vieillissement à la roue de dégradation, ce qui montre que la Peinture acrylique aqueuse et opaque est mieux adaptée pour ces essences de bois, pour les menuiseries extérieures. Les finitions avec les lasures ou les finitions opaques présentent de meilleurs résultats par rapport aux autres produits de finition.

Les deux vieillissements accélérés ne sont pas plus représentatif l'un que l'autre du vieillissement naturel. Ils permettent de classer les systèmes de finition en terme de durabilité de la protection mais ne permettent pas de définir un facteur d'accélération absolu. Nous pouvons seulement prédire qu'une finition qui apporte une meilleure durabilité au QUV ou à la roue qu'une autre finition sera également plus efficace pour le vieillissement naturel.

Diverses pistes de recherches énoncées dans ce travail méritent d'être approfondies. L'examen de l'effet de la coloration bleue sur l'impédance électrique du bois du pin maritime (BPM) (*Pinus*

pinaster L.) dans le domaine des basses fréquences et faible teneur en humidité peut être élargi à d'autres essences de bois. Aussi, il serait intéressant d'approfondir le suivi des systèmes bois/ finition par la mesure de l'adhérence par quadrillage après l'essai de la perméabilité à l'eau, après le vieillissement artificiel au QUV et après le vieillissement artificiel à la roue et après la suite élargir les différents essais et mesure après le vieillissement naturel.

Il serait intéressant de pouvoir travailler sur l'amélioration de la durabilité des finitions sur des supports bois par l'utilisation d'autres méthodes de mesure comme la mesure par pendule de Persoz ou la mesure de la température de transition vitreuse pour le suivi des comportements des systèmes bois/ finition, et notamment pour des systèmes comportant d'autres essences de bois et d'autres formulations de produits de finition.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- 1.F. Aloui 2006. Rôle des absorbeurs UV inorganiques sur la photostabilisation des systèmes bois-finition transparente. Thèse Matériaux. Université Henri Poincaré - Nancy I, France.
- 2.N. Ayadi, F. Lejeune, F. Charrier, B. Charrier and A. Merlin 2003. Color stability of heat-treated wood during artificial weathering. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 61, 221-226.
- 3.R.G. Ballard, M.A. Walsh and W.E. Cole 1982. Blue-stain fungi in xylem of lodgepole pine: a light-microscope study on extent of hyphal distribution. *Canadian Journal of Botany* 60(11), 2334-2341.
- 4.R.G. Ballard, M.A. Walsh and W.E. Cole 1984. The penetration and growth of blue-stain fungi in the sapwood of lodgepole pine attacked by mountain pine beetle. *Canadian Journal of Botany* 62, 1724-1729.
- 5.E. Baysal, E.D. Tomak, M. Ozbeyc and E. Altinc 2013. Surface properties of impregnated and varnished Scots pine wood after accelerated weathering. *Coloration Technology* 130, 140-146.

- 6.E. Baysal, E.D. Tomak, E. Topaloglu and E. Pesman 2016. Surface properties of bamboo and scots pine impregnated with boron and copper based wood preservatives after accelerated weathering. *Maderas Ciencia y tecnología* 18(2), 253-264.
- 7.E. Baysal, T. Turkoglu, E. Gavcar, H. Toker, A. Gunduz, M. Kucuktuvek, H. Peker and D. K. Bayraktar 2017. Weathering properties of scots pine treated with some chemicals. *Wood research* 62(5), 737-750.
- 8.P. Bekhta and P. Niemz 2003. Effect of High Temperature on the Change in Color, Dimensional Stability and Mechanical Properties of Spruce Wood. *Holzforchung* 57, 539- 546.
- 9.P. Boudy 1950. *Economie forestière nord-africaine, monographie et traitement des essences forestières*. La Rose, Paris. 2V, 505 p.
- 10.N. Çakıcıer, S. Korkut, D.S. Korkut, A. Kurtoğlu and A. Sönmez 2011. Effects of QUV accelerated aging on surface hardness, surface roughness, glossiness, and color difference for some wood species. *International Journal of the Physical Sciences* 6(8), 1929-1939.
- 11.A.D. Chapman 1940. Effect of blue stain on specific gravity and strength of southern pine. *Journal of Agricultural Research* 61(2), 125-133.
- 12.K.S. Cole and R.H. Cole, 1941. Dispersion and Absorption in Dielectrics I. Alternating Current Characteristics. *The Journal of Chemical Physics* 9(4), 341-351.
- 13.M.A. Cox, M.I.N. Zhang and J.H.M. Willison 1993. Apple bruise assessment through electrical impedance measurements. *Journal of Horticultural Science* 68(3), 393-398.
- 14.P.H.G. de Cademartori, E. Schneid, D.A. Gatto, D.M. Stangerlin and R. Beltrame 2013. Thermal modification of eucalyptus grandis wood: variation of colorimetric parameters. *Maderas Ciencia y tecnología* 15(1), 57-64.
- 15.Z. Demirci, A. Sönmez and M. Budakç 2013. Effect of Thermal Ageing on the Gloss and the Adhesion Strength of the Wood Varnish Layers. *BioResources* 8(2), 1852-1867.
- 16.N. El Imame, A. Hakam, M. Elkhali, S. Drissi Bakhkhat and A. Merlin. Etude comparative de quelques finitions sur trois essences du bois commercialisés au Maroc. 2nd International Congress on Materials & Structural Stability Rabat, Morocco 22-25 November 2017.
- 17.W.C. Feist and D.N.S. Hon 1984. *Chemistry of Weathering and Protection (the Chemistry of Solid Wood)*, Advances in Chemistry Series 207, Ed. R Rowell (Washington: American Chemical Society 401.
- 18.W.P.K. Findlay and C.B. Pettifor 1937. The effect of sap-stain on the properties of timber. I. Effect of sap-stain on the strength of scots pine sapwood. *Forestry* 11, 40-52.
- 19.W.P.K. Findlay and C.B. Pettifor 1939. Effect of blue stain on the strength of obeche

- (triplochiton scleroxylon). Empire Forestry Journal 18(2), 259-267.
- 20.H. Fricke, 1932. The theory of electrolytic polarization. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 14, 310-318.
- 21.B. George, E. Suttie, A. Merlin and X. Deglise 2005. Photodegradation and photostabilisation of wood - the state of the art. Polymer Degradation and Stability 88(2), 268-274.
- 22.N. Gierlinger, D. Jacques, M. Grabner, R. Wimmer, M. Schwanninger, P. Rozenberg and L.E. Pâques 2004. Colour of larch heartwood and relationships to extractives and brown-rot decay resistance. Trees 18(1), 102-108.
- 23.C. G. Greenham, K. Helms and W. J. Muller 1978. Influence of virus inflections on impedance parameters. Journal of Experimental Botany 29(4), 867-877.
- 24.C. G. Greenham, P. G. Randall and W. J. Muller 1982. Studies of phosphorus and potassium deficiencies in *Trifoliumsubterraneum* based on electrical measurements. Revue canadienne de botanique 60, 634-644.
- 25.P.R. Grossmann 1990. Connaissez votre ennemi : le temps et comment le reproduire en laboratoire. Galvano-organo-traitements de surface, 607 et 569.
- 26.G. Grüll, M. Truskaller, L. Podgorski, S. Bollmus and Tscherne 2011. Maintenance procedures and definition of limit states for exterior wood coatings. European Journal of Wood and Wood Products 69(3), 443-450.
- 27.A. Hakam, M. Magne Takam, M. Chokairi, N. Alami Chantoufi, Z. Hamoutahra, A. El Alami, A. Famiri, M. Ziani and J. Gril 2012. Effect of bark stripping on the electrical impedance of *Quercus suber* leaves. Maderas Ciencia y tecnología 14(2), 195-208.
- 28.A. Hakam, N. Alami Chantoufi, N. El Imame, M. Guelzim, M. Ziani, A. Famiri, S. Drissi Bakhkhat, F. Ghailane, M. Hachmi, A. Sesbou and A. Merlin 2017a. Dielectric Properties of Atlas Cedar Wood at its Early Stage of Decay. International Journal of Pharmacognosy and Phytochemical Research 9(3), 444-448.
- 29.A. Hakam, N. El Imame, S. Drissi Bakhkhat, M. Ziani, A. Famiri, M. Hachmi, A. Sesbou and M. Rahouti 2017b. Electrical study of maritime pine wood in relation to blue stain. International Journal of Applied Engineering Research 12(21), 11050-11054.
- 30.A. Hakam and N. El Imame 2017c. Frequency response modelling of maritime pine (*Pinus pinaster* L.) wood at low frequencies. J. Mater. Environ. Sci. 8(12), 4362-4366.
- 31.A. Hakam, M. Elkhal, M. Ziani, A. Famiri and A. Fidah 2018a. Some physical properties of the date palm stem. MATEC Web of Conferences 149, 01047.

- 32.A. Hakam, N. El Imame, M. El Kortbi, M. El Matar, M. Ziani and A. Merlin 2018b. Effect of artificial aging at QUV on the color of finish treated woods of *Pinus sylvestris* and *Quercus robur*. MATEC Web of Conferences. 149, 01088.
- 33.F.R. Harker and J.H. Maindonald 1994. Ripening of nectarine fruit, changes in the cell wall, Vacuole, and membranes detected using electrical impedance measurements. *Plant Physiology* 106(1), 165-171.
- 34.M. Humar, V. Vek and B. Bucar 2008. Properties of blue-stained wood. *Drvna Industrija* 59(2), 75-79.
- 35.A. Inaba, T. Manabe, H. Tsuji and T. Iwamoto 1995. Electrical impedance analysis of tissue properties associated with ethylene induction by electric currents in Cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plant Physiology* 107, 199-205.
- 36.Y. Irmouli 2007. Etude de systèmes de finitions pour bois : application de nouvelles formulations, vieillissement et amélioration des performances. Thèse Sciences du bois et des fibres, Université de Lorraine, France.
- 37.V. Jirous-Rajkovic and H. Turkulin 2002. Wood and coating properties that affect durability of exterior wood. *Drvna Industrija* 53(1), 9-22.
- 38.V. Jirous - Rajkovic, A. Bogner and D. Radovan 2004. The efficiency of various treatments in protecting wood surfaces against weathering. *Surface Coatings International Part B: Coatings Transactions* 87(1), 15-19.
- 39.P.R. Kerber, D.M. Stangerlin, E. Pariz, R.R. de Melo, A.P. de Souza and L. Calegari 2016. Colorimetry and surface roughness of three amazon woods submitted to *natural weathering*. *Nativa, Sinop.* 4(5), 303-307.
- 40.F. Kremer, A. Schonhals and W. Luck 2002. *Broadband Dielectric Spectroscopy*. Springer -Verlag.
- 41.T. Krystofiak, B. Lis, M. Muszyńska and S. Proszyk 2016. The effect of aging tests on gloss and adhesion of lacquer coatings on window elements from pine wood. *Drewno* 59(197), 127-137.
- 42.S. Laarabi, K. EL Kinani, A. Ettouhami and M. Limouri 2005a. Impédance in vivo des organes aériens de certaines plantes mono- et dicotylédones. *Comptes Rendus Biologies* 328(3), 253-262.
- 43.S. Laarabi, K. EL Kinani, A. Ettouhami and M. Limouri, 2005b. Analyse spectrométrique, in vivo, de l'impédance électrique de la première feuille de maïs (*Zeamays* L.) en fonction des conditions hydriques du sol et de l'atmosphère. *Comptes Rendus Biologies* 328(3), 493-503.

- 44.A. Lazrak, A. Hakam, M. Hammi, A. Famiri and M. Ziani 2018. Examination of Interfacial Compatibility Within WPC Panels Using Electrical Impedance Spectroscopy. *Journal of Engineering and Applied Sciences* 13(9), 2786-2790.
- 45.J.R. MacDonald 1987. *Impedance Spectroscopy*. John Wiley & Sons, New York. 368 p.
- 46.R.G. MacDougall, R.G. Thompson and H. Piene, 1987. Stem electrical capacitance and resistance measurements as related to total foliar biomass of balsam fir trees. *Canadian Journal of Forest Research* 17(9), 1070-1074.
- 47.S. Mancuso and E. Rinaldelli 1996. Response of young mycorrhizal and non mucorrhizal plants of olive tree (*Olea europaea* L.) to saline conditions. II. Dynamics of electrical impedance parameters in shoots and leaves, *Advances in Horticultural Science* 10(3), 135-145.
- 48.S. Mancuso 1999. Seasonal dynamics of electrical impedance parameters in shoots and leaves relate to rooting ability of olive (*Olea europaea*) cuttings. *Tree physiology* 19, 95-101.
- 49.E. Masson 2011. Les finitions photoréticulables pour la protection du bois: état de l'art. ENSTIB. IXème Colloque du Club Polyray 5 et 6 Avril 2011 à Epinal. Campus «Fibres».
- 50.Y. Mizukami, K. Yamada, Y. Sawai and Y. Yamaguchi 2007. Measurement of fresh tea leaf growth using electrical impedance spectroscopy. *Agricultural journal* 2(1), 134-139.
- 51.N. Muramatsu and K. Hiraoka 2007. Water status detection of Satsuma mandarin (*Citrus unshiu* Marc) trees using an electrical impedance method. *Environmental Control in Biology* 45(1), 1-7.
- 52.A. Merlin 2011. Le bois, un matériau pour l'habitat. ENSTIB. IXème Colloque du Club Polyray 5 et 6 Avril 2011 à Epinal. Campus «Fibres».
- 53.A. Merlin, B. George, L. Malassenet and L. Podgorski 2018. Durable protection of the surface of wood used outdoors: material constraints, problems and approaches to solutions. *MATEC Web of Conferences* 149, 01016.
- 54.O. Mhirit, and P. Blerot 1999. *Le grand livre de la forêt marocaine*. Editions Mardaga. Liège, Belgique. p 280.
- 55.NF EN 927-2 (2014). Peintures et vernis - Produits de peinture et systèmes de peinture pour le bois en extérieur - Partie 2: spécifications de performance.
- 56.EN 927-6 (2006). Paint and varnishes-Coating materials and coating systems for exterior wood-Part 6: Exposure of wood coatings to artificial weathering using fluorescent UV lamps and water.
- 57.EN X PD 060-50 2002. Ameublement – méthodes générales d'essais des finitions.

- 58.NF EN ISO 2409 (2013). Peintures et vernis - Essai de quadrillage.
- 59.NF EN ISO 2808 (2007). Peintures et vernis - Détermination de l'épaisseur du feuil.
- 60.NF EN ISO 3251 (2003). Peintures, vernis et plastiques - Détermination de l'extrait sec.
- 61.NF EN 438-2 2016. Stratifiés décoratifs haute pression (HPL) - Plaques à base de résines therm durcissables (communément appelées stratifiés) - Partie 2: détermination des caractéristiques.
- 62.NM 14.4.039 (2007). Evaluation de la luminance lumineuse des surfaces.
- 63.A.L. Piedade S.M. Pincelli, L.F. de Moura, J.O. Brito 2012. Effect of thermal rectification on colors of eucalyptus saligna and pinus caribaea woods. *Maderas Ciencia y tecnología* 14(2), 239-248.
- 64.L. Podgorski 1993. Caractérisation d'un système bois-finition : étude du support bois, de la résine et du vieillissement du système complet. Thèse de 3ème cycle en Sciences du Bois et des Fibres, UHP-Nancy I.
- 65.L. Podgorski, A. Merlin , J.M. Saiter 1994. Natural and artificial ageing of an alkyd based wood finish. *Journal of Thermal Analysis*, 41, 1319-24.
- 66.L. Podgorski, A. Merlin, X. Déglise 1996. Analysis of the natural and artificial weathering of a wood coating by measurement of the glass transition temperature. Editeur de Gruyter. *Holzforshung*. Vol 50, N°3, 282 287.
- 67.L. Podgorski, A. Merlin 2001. Systèmes bois-finitions extérieures. Vieillissement, comportement. In: DIROL Daniel, DEGLISE Xavier. *Durabilité des bois*. Paris: Hermès Science Publication.
- 68.L. Podgorski 2012. Durée de service du bois : l'outil et les connaissances développés par le programme WoodExter .FCBA INFO, Juin 2012.
- 69.J.P. Privé and M.I.N. Zhang 1996. Estimating cold stress in 'Beautiful Arcade' apple roots using electrical impedance analysis. *Hort Technology* 6, 54-58.
- 71.T. Repo, M.I.N. Zhang, A. Ryyppö, E. Vapaavuori, S. Sutinen 1994. Effects of freeze-thaw injury on parameters of distributed electrical circuits of stems and needles of Scots pine seedlings at different stages of acclimation. *J. of Exp. Bot.* 45, 823-833.
- 72.T. Repo, G. Zhang, A. Ryyppo and R. Rikala 2000. The electrical impedance spectroscopy of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) shoots in relation to cold acclimation. *Journal of Experimental Botany* 51(353), 2095-2107.
- 73.T. Repo, E. Oksanen and E. Vapaavuori 2004. Effects of elevated concentrations of ozone and carbon dioxide on the electrical impedance of leaves of silver birch (*Betula pendula*) clones. *Tree physiology* 24, 833-843.

- 74.T. Repo, K. Mononen, L. Alvila, T.T. Pakkanen and H. Hänninen, 2008. Cold acclimation of pedunculate oak (*Quercus robur* L) at its northernmost distribution range. *Environmental and Experimental Botany* 63, 59-70.
- 75.M.L. Roux et F. Anquetil 1994. *Finition des ouvrages en bois dans le bâtiment*. CTBA édition.
- 76.A. Ryyppö, T. Repo and E. Vapaavuori 1998. Development of freezing tolerance in roots and shoots of Scots pine seedlings at nonfreezing temperatures. *Revue canadienne de recherche forestière* 28 (4), 557-565.
- 77.E. Scrinzi, S. Rossi, F. Deflorian and C. Zanella 2011. Evaluation of aesthetic durability of waterborne polyurethane coatings applied on wood for interior applications. *Progress in Organic Coatings* 72, 81-87.
- 78.A. Sonmez, M. Budakci and M. Bayram 2009. Effect of wood moisture content on adhesion of varnish coatings. *Scientific Research and Essay* 4 (12), 1432-1437.
- 79.D.G. Stout 1988a. Effect of cold acclimation on bulk tissue electrical impedance: I Measurements with birdsfoot trefoil at subfreezing temperatures. *Plant Physiology* 86(1), 275-282.
- 80.D.G. Stout, 1988b. Effect of cold acclimation on bulk tissue electrical impedance II measurements with alfalfa and birdsfoot trefoil at nonfreezing temperatures, *Plant Physiology* 86(1), 283-0287.
- 81.R.F. Teles and A.F. da Costa 2014. Colorimetric evaluation of three tropical woods after accelerated weathering (45th IRG, St George, Utah, USA).
- 82.A. Temiz , U.C. Yildiz, I. Aydin, M. Eikenes, G. Alfredsen and G. Colakoglu 2005. Surface roughness and color characteristics of wood treated with preservatives after accelerated weathering test. *Applied Surface Science*. 250, 35-42.
- 83.M. Tiitta, T. Rero and H. Viitanen 1999a. Effect of soft rot and bacteria on electrical impedance of wood at low moisture content. *Material und Organismen* 33, 171-287.
- 84.M. Tiitta, T. Savolainen, H. Olkkonen and T. Kanko 1999b. Wood Moisture Gradient Analysis by Electrical Impedance Spectroscopy. *Holzforschung* 53(1), 68-76.
- 85.M. Tiitta, P. Kainulainen, A.M. Harju, M. Venäläinen, M. Manninen, M. Vuorinen and H. Viitanen 2003. Comparing the effect of chemical and physical properties on complex electrical impedance of Scots pine wood. *Holzforschung* 57, 433-439.
- 86.(Tropix 7 Version 7.5.1 CIRAD 2011). <https://doi.org/10.18167/74726f706978>. J. Gérard, D. Guibal, S. Paradis, M. Vernay, J. Beauchêne, L. Brancheriau and A. Thibaut,
- 87.T. Turkoglu, E. Baysal, I. Kureli, H. Toker and M.E. Ergun 2015. The effects of natural weathering on hardness and gloss of impregnated and varnished scots pine and oriental beech wood. *Wood research* 60(5), 833-844.

- 88.A. Väinölä and T. Repo 2000. Impedance spectroscopy in frost hardness evaluation of Rhododendron leaves. *Annals of Botany* 86, 799-805.
- 89.M. Yalcin, H. Pelit, C. Akcay and N. Cakicier 2017. Surface properties of tannin-impregnated and varnished beech wood after exposure to accelerated weathering. *Coloration Technology* 133(4), 334-340.
- 90.M. K. Yalinkilic, R. Ilhan, Y. Imamura, M. Takahashi, Z. Demirci, A. C. Yalinkilic and H. Peker 1999. Weathering durability of CCB-impregnated wood for clear varnish coatings. *Journal of Wood Science* 45(6), 502-514.
- 91.S. Zahri, C. Belloncle, F. Charrier, P. Pardon, S. Quideau and B. Charrier 2007. UV light impact on ellagitannins and wood surface colour of European oak (*Quercus petraea* and *Quercus robur*). *Applied Surface Science* 253, 4985-4989.
- 92.A.J.V. Zanuncio, J.P. Motta, T.A. DA Silveira, E.S. Farias and P.F. Trugilho 2014. Physical and colorimetric changes in *Eucalyptus grandis* wood after heat treatment. *BioResources* 9(1), 293-302
- 93.A.J.V. Zanuncio, A.G. Carvalho, M.T. de Souza, C. M. Jardim, A. de C.O. Carneiro and J.L. Colodette 2015. Effect of extractives on wood color of heat treated *Pinus radiata* and *Eucalyptus pellita*. *Maderas Ciencia y tecnología* 17(4), 857-864.
- 94.S.L. Zelinka, D.S. Stone and D.R. Rammer 2007. Equivalent circuit modeling of wood at 12% moisture content. *Wood and Fiber Science* 39(4), 556-565.
- 95.S.L. Zelinka, R. Douglas, D.R. Rammer and D.S. Stone 2008. Impedance spectroscopy and circuit modeling of Southern pine above 20% moisture content. *Holzforschung* 62(6), 737-744.
- 96.M.I.N. Zhang and J.H.M. Willison 1992a. Electrical impedance analysis in plant tissues: in vivo detection of freezing injury. *Revue canadienne de botanique* 70 (11), 2254-2258.
- 97.M.I.N. Zhang and J.H.M. Willison 1992b. Electrical impedance analysis in plant tissues: The effect of freeze-thaw injury on the electrical properties of potato tuber and carrot root tissues. *Canadian Journal of Plant Science* 72(2), 545-553.
- 98.M.I.N. Zhang and J.H.M. Willison 1993a. Electrical impedance analysis in plant tissues: impedance measurements in leaves. *J. Exp. Bot.* 44, 1369-1375.
- 99.M. I.N. Zhang, J.H.M. Willison, M. A. Cox and S.A. Hall 1993. Measurement of heat injury in plant tissue by using electrical impedance analysis. *Revue canadienne de botanique* 71 (12), 1605-1611.
- 100.M.I.N. Zhang, T. Repo, J.H.M. Willison and S. Sutinen 1995. Electrical impedance analysis in plant tissues: on the biological meaning of Cole-Cole  $\alpha$  in Scots pine needles. *European Biophysics Journal* 24(2), 99-106.

101. J. Zhang, P. Kamdem and A. Temiz 2009. Weathering of copper-amine treated wood. *Applied Surface Science* 256(3), 842-846.
102. J. Zhang and P.D. Kamdem 2000. Weathering of copper-amine treated wood. In: Paper presented at the International Research Group on Wood Preservation (IRG 00- 40155) Kona, Hawaii.
103. L. Zhu, J. Cao and Y.J. Wang 2013. Evaluation of the interfacial compatibility in wood flour/polypropylene composites with the dielectric approach. *Journal of Applied Polymer Science*. 129(3), 1520-1626