

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES**



**Faculté Des Sciences de L'Ingénieur**

**Thèse de Doctorat**

Présentée par :

**M<sup>me</sup> OUADOU Yasmina**

En vue de l'obtention du diplôme de **DOCTORAT en SCIENCES**

**Filière : SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX**

**Option : SCIENCES ET TECHNIQUES DU BOIS ET DES ECO-MATERIAUX**

**TITRE :**

**Contribution à l'étude de la durabilité du bois Algérien**  
**cas: Chêne zeen, Chêne afarès et Pin maritime**

**Devant le jury composé de :**

M <sup>r</sup> ZERIZER Abdelatif	Professeur	UMBBoumerdès	Président
M <sup>me</sup> KAID-HARCHE Meriem	Professeur	USTOran	Examinatrice
M <sup>r</sup> AKNOUCHE Hamid	MCA	UMBBoumerdès	Examinateur
M <sup>r</sup> TAZROUT Mansour	MCA	UMBBoumerdès	Examinateur
M <sup>r</sup> ALIOUCHE Djamel	Professeur	UMBBoumerdès	Directeur de thèse
M <sup>me</sup> THEVENON Marie-France	HDR	CIRAD Montpellier	Co-directrice

*A mon cher époux Ali, qui m'a supporté et soutenu. Un immense  
merci pour sa patience tout au long de cette thèse.*

*A mes deux princesses Marya et Maram*

## Remerciements

« -Alors la soutenance, c'est pour quand ? »

Combien de fois aurais-je pu entendre cette phrase ! Exactement ? Je ne sais pas. En tous cas cette fois, après cinq années d'efforts, de réussites et de désillusions parfois (car rien ne fonctionne jamais comme on l'aurait imaginé), Cette longue relation entre ma thèse et moi a connu ses hauts et ses bas, mais j'y ai pris en grande majorité un plaisir énorme. Je présente enfin الحمد لله le fruit de mon travail. Il m'était inconcevable de présenter ce manuscrit sans remercier celles et ceux qui ont contribué à l'accomplissement de ma démarche.

Je désire tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude accompagnée de l'expression de mon respect pour mes deux directeurs de thèse :

Pr Djamel ALIOUCHE. Pour la confiance accordée durant mes années de thèse, je lui suis reconnaissante également pour ses conseils, sa disponibilité, ses multiples corrections et critiques qui ont permis à ce travail de prendre forme.

Mme Marie-France THEVENON. Qui est à l'origine de ce travail et que je ne remerciais jamais assez, sa collaboration, sa disponibilité, de son support morale et technique. Merci d'avoir accepté d'encadrer ce travail et de m'avoir accueilli au sein de votre laboratoire et aussi pour tout l'aide matérielle que vous me l'avez fourni au quotidien.

Je remercie aussi tous les membres de mon jury, commencer par le Professeur Abdelatif ZERIZER de l'université de Boumerdes qui a accepté d'évaluer cette thèse en tant que président, M<sup>r</sup> Mansour TAZROUT et M<sup>r</sup> Hamid AKNOUCHE maîtres de conférence à l'université de Boumerdes pour avoir accepté d'être examinateur de ce mémoire et je leur suis reconnaissante de l'intérêt qu'ils lui ont accordé

Je voudrais remercier chaleureusement Mme Meriem KAID-HARCHE, Professeur à l'université d'Oran d'avoir accepté de juger ma thèse malgré la longue distance.

Mes remerciements s'adressent également à Professeur Boudjema BEZZAZI pour sa collaboration et de son aide aux achats de mes réactifs en première année de réponses à toutes mes interrogations, ainsi à M<sup>r</sup> Chouaib ARIBI qui m'a aidé à chercher et transporter ma matière première « le bois », que sans son aide, ma thèse en science du bois n'aurait pas pu être réalisée.

Je remercie également les ingénieurs de laboratoire de l'URMPE et du LTMFP, en particulier :Nadia BOUGUETTAYA, Malika KARA, Hayet qui sont toujours disponibles pour me rendre des services.

Evidemment je ne peux oublier de mentionner les personnes qui m'ont aidé pour la préparation de mes échantillons : M<sup>r</sup> Rabah TRIAKI de l'atelier bois et M<sup>r</sup> Mustapha HAFFAF de l'entreprise TRANS bois-Bejaia, grâce à eux, j'ai pu avoir d'excellentes éprouvettes à tester.

Je remercie vivement l'équipe microscope électronique à balayage du centre IBDM de Marseille, plus exacte à M<sup>r</sup> Jean-Paul CHAUVIN, Responsable technique qui est sortie en retraite, sur les clichés MEB ainsi leurs sympathies, et à M<sup>r</sup> BOUTICHE de l'INCH pour les spectres FT-IR. Je leur suis très reconnaissante du temps qu'il a consacré.

Je souhaite remercier ici tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire, que ce soit pour des aspects scientifiques, techniques, pratiques ou plus humains, même de manière indirecte et je n'ai pas mentionné leurs noms ; je déteste oublier quelque chose !

J'adresse de nombreuses pensées et remerciements chaleureux à tous les doctorants et chercheurs que j'ai eu beaucoup de plaisir à côtoyer pendant ces années et qui m'ont aidés par leur conseil, leur soutien et leur inébranlable bonne humeur, ils étaient pour moi une source de discussions et d'intuitions: LIMAM Amel, ROUABAH Imene, HADDADOU Imane, BOULAHIA Hakima et DERBEL Wassila.

Mes dernières pensées iront vers ma famille. A mes parents, qui m'avaient permis de poursuivre mes études jusqu'à la graduation. A mon beau père pour son support quotidien. A ma belle mère d'avoir gardé mes enfants durant mes études. A mes sœurs et frères qui m'ont toujours soutenu et encouragée, assidûment. A mes nièces et neveux. A mes belles sœurs surtout Sawcen.

# SOMMAIRE

Liste des tableaux .....	4
Liste des figures .....	5
Introduction Générale .....	8

## PARTIE I: Revue bibliographique

I. Le secteur forestier en Algérie.....	11
I.1.Présentation de la forêt algérienne.....	11
I.2. Principaux végétaux forestiers d'Algérie.....	11
I.2.1. Les conifères.....	11
I.2.2. Les feuillus.....	12
I.3. La productivité de bois en Algérie.....	16
I.3.1. La production de bois provient de forêts aménagées et non aménagées..	16
I.3.2. Débouchés des bois locaux.....	16
I.4. Gestion des produits forestiers.....	17
I.4.1. Classification des arbres.....	17
I.4.2. Facteurs conditionnant la croissance des espèces .....	17
I.5. Présentation de la forêt de Jijel.....	19
I.5.1. Les essences forestières de la wilaya de Jijel.....	19
I.5.2. Forêt de Guerrouch (zone de prélèvement).....	19
II. Préservation du bois.....	22
II.1. Le matériau bois.....	22
II.2. La chimie du bois.....	22
II.2.1. La formation du bois.....	22
II.2.2. Défauts des bois.....	23
II.2.3. Structure et composition chimique du bois.....	24
II.2.3.1. Structure anatomique du bois.....	24
II.2.3.2. Structure des bois résineux et des bois feuillus.....	25
II.2.3.3. Ultra structure du bois.....	25
II.2.3.4. Constituants chimiques du bois.....	27
II.3. L'altération du bois par des agents biologiques.....	31
II.3.1. Champignons.....	31
II.3.1.1.Les champignons lignivores.....	31
II.3.1.1.1.la pourriture cubique brune.....	32
II.3.1.1.2. la pourriture fibreuse blanche.....	32
II.3.1.1.3. La pourriture molle.....	33
II.3.1.2. Champignons lignicoles agents de discoloration.....	33
II.3.2. Insectes.....	34
II.3.3. Bactéries.....	34
II.3.4. Térébrants marins.....	34
II.4. Les classes de risque biologique (classes d'emploi).....	35
II.4.1. La durabilité naturelle du bois.....	38
II.4.2. Duraminisation du bois, processus de la durabilité naturelle.....	39
II.4.3. Facteurs influençant la durabilité naturelle.....	41
II.4.4. Production de biocides naturels.....	41
II.5. la durabilité conférée au bois.....	42

II.5.1. Historique des traitements conservateurs des bois.....	43
II.5.2. Chronologie des principaux produits chimiques de préservation du bois .....	44
II.5.3. Les différents types de produit de préservation.....	45
II.5.4. Les procédés de traitements.....	46
II.5.4.1. Les traitements de surface.....	46
II.5.4.2. Traitements en profondeur par autoclave.....	47
III. Généralités sur le vieillissement du bois (agents abiotiques-climatiques).....	48
III.1. Facteurs de la photodégradation.....	49
III.1.1 le rayonnement solaire (la lumière UV).....	49
III.1.2. L'oxygène.....	50
III.1.3. La pollution.....	50
III.1.4. L'eau (Humidité).....	50
III.1.5. la température.....	51
III.2. Les agents anti-UV.....	52
III.2.1. Absorbants ultraviolets.....	52
III.2.2. Antioxydants.....	52
III.2.3. Pigments.....	52
III.2.4. Inhibiteurs.....	53
III.3. Aspects macroscopiques de la photodégradation.....	53
III.4. Tests de simulation de vieillissement.....	55
IV. Préservation du bois par des huiles végétales.....	57
IV.1. Les huiles végétales.....	57
IV.1.1. Situation des huiles végétales dans le secteur industriel.....	57
IV.1.2. Définitions.....	57
IV.2. Traitement thermique du bois.....	58
IV.2.1. Procédé ThermoWood (VTT, Finlande).....	59
IV.2.2. Procédé plato®.....	59
IV.2.3. Procédé NOW (Rétifié).....	59
IV.2.4. Procédé Perdure ® (PCI Industries inc., Québec).....	60
IV.2.5. le procédé OHT: (Oil Heat Treatment).....	60
IV.2.6. Procédé Thermoholz Austria (THA).....	60
IV.2.7. Procédé Iwotech (Iwotech Ltd, Danemark).....	60
IV.2.8. Procédé Intemporis.....	60
IV.3. Traitement du bois par des huiles végétales (oléothermique).....	61
IV.4. Propriétés du bois traité à haute température.....	62
IV.4.1. Modifications chimiques.....	62
IV.4.2. Modification des propriétés physiques.....	63
IV.4.2.1. Hygroscopicité/hydrophobie.....	63
IV.4.2.2. Stabilité dimensionnelle.....	63
IV.4.2.3. Couleur.....	63
IV.4.2.4. Masse volumique.....	64
IV.4.2.5. Mouillabilité.....	64
IV.4.2.6. Odeur.....	64
IV.4.2.7. Réaction au feu.....	64
IV.4.3. Modification des propriétés mécaniques.....	64
IV.4.4. Effets sur la durabilité.....	65

## PARTIE II: Partie expérimentale

1. Matériel ligno-cellulosique.....	67
2. Matériel fongique.....	68
3. Produits utilisés.....	69
3.1. Epoxydation de l'huile de soja.....	69
3.2. La cire d'abeille.....	71
4. Analyse physico-chimique des trois bois étudiés.....	72
4.1. Détermination des principaux constituants.....	72
4.1.1. Détermination du taux de lignine de Klason dans la sciure du bois.....	72
4.1.2. Détermination du taux d'holocellulose, de cellulose et d'hémicellulose.....	72
4.1.3. Détermination du taux d'extractibles.....	73
4.1.4. Détermination du taux de cendres.....	73
4.2. Détermination des paramètres physiques.....	73
4.2.1. Détermination de taux d'humidité.....	73
4.2.2. Détermination de la masse volumique.....	75
5. Durabilité naturelle du bois massif vis-à- vis des champignons lignivores.....	75
5.1. Le protocole constitutif de l'essai.....	75
5.2. Validité des essais.....	77
6. Procédé de traitement.....	78
6.1. Imprégnation du bois par oléothermie muni d'un procédé sous vide.....	78
6.2. Finition par la cire d'abeille.....	79
7. Tests et évaluations de la photodégradation du bois.....	81
7.1. Test de vieillissement artificiel accéléré.....	82
7.2. Temps d'exposition estimé dans le xénotest.....	83
7.3. Photostabilisation du bois par un absorbeur UV (cire d'abeille).....	83

## Partie III : Résultats et Discussions

1. Résultats de la caractérisation physico-chimique.....	85
1.1. Composition chimique du bois.....	85
1.2. Cartographie d'humidité.....	83
1.3. Masse volumique.....	86
2. Résultats des essais normalisés de durabilité naturelle vis-à- vis des champignons basidiomycètes.....	88
3. Evaluation de l'efficacité des traitements combinés huile de soja-cire d'abeille selon les normes européennes.....	90
3.1. Critères distinctifs des huiles.....	90
3.2. Gain de poids en pourcentage.....	91
3.3. Teneur en humidité d'équilibre (EMC).....	92
3.4. Résistance aux champignons.....	94
4. Le vieillissement accéléré.....	97
4.1. Changement de la couleur.....	97
4.2. Perte de masse.....	98
4.3. Comportement mécanique en traction.....	99
4.4. Analyse microscopique et spectroscopique.....	100
4.4.1. Observations microscopique au MEB au cours du vieillissement.....	100
4.4.2. Analyse spectroscopique par FT-IR.....	100
5. Résistance au vieillissement par une protection naturelle.....	104
Conclusion Générale & perspectives .....	106

Références Bibliographiques .....	108
Annexe .....	117



# Avant-propos

Mes travaux de thèse avaient débuté en octobre 2012. Cette thèse fut initiée par une collaboration de trois laboratoires :

Le CIRAD (Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement) Montpellier qui, par son laboratoire de préservation, j'ai pu réaliser les essais biologique sur mes bois.

L'entreprise CNTC (Centre national des technologies et de consulting) Boumerdes, pour la pratique d'essai du vieillissement.

La division laboratoire ex CRD (centre de recherche et développement) Boumerdes, et URMPE (Unité de Recherche Matériaux, Procédés et Environnement) pour la pratique d'essais physico-chimique, mécanique et traitement.

Ce mémoire est présenté sous forme d'une thèse de publication indexée et communications nationales et internationales.

## Publications internationales

- **Yasmina Ouadou**, Djamel Aliouche, Marie-France Thevenon & Mohamed Djillali (2017) Characterization and photodegradation mechanism of three Algerian wood species. ISSN 1435-0211 J Wood Sci DOI 10.1007/s10086-017-1615-6.

## Communications internationales

- **OUADOU Yasmina**, ALIOUCHE Djamel, THEVENON-BRILLARD Marie-France 19-21 Novembre 2013. Influence de différents modes de vieillissement sur le comportement mécanique du bois. GDR bois 3544, CNRS, Ecole des ponts. Champs sur Marne. [http://www.lmgc.univ-montp2.fr/~jgril/GDR\\_bois\\_JourneesNov2013/](http://www.lmgc.univ-montp2.fr/~jgril/GDR_bois_JourneesNov2013/) (communication affichée et orale)
- **OUADOU Y**, LIMAM A, BELHAMEL F, ALIOUCHE DJ 06-09 mai 2013 Physico-mechanical and thermal characterization of aleppo pine of zemmouri intended for the construction , International Symposium on Materials and Sustainable Development, CIMDD , Boumerdes – algéria. [www.cimdd2013.fr.gd](http://www.cimdd2013.fr.gd) (communication affichée)
- **OUADOU Yasmina**, ALIOUCHE Djamel, PIGNOLET. Luc, THEVENON Marie-France, DJILLALI M 09& 10 November 2015 Amélioration naturelle de la durabilité biologique des bois locaux par un traitement oléothermique suivi par une finition à base de cire d'abeille. 2nd Intenational symposium on material and sustainable development, Boumerdes. [www.cimdd2015.wix.com/umbb](http://www.cimdd2015.wix.com/umbb). (communication orale)

- **OUADOU Yasmina**, ALIOUCHE Djamel, THEVENON Marie-France, DJILLALI Mohamed 16-17 Novembre 2016  
Characterization and photodegradation mechanism of three Algerian wood species, Oran. [http://www.univ-usto.dz/site\\_divers/CIEBDD2016/](http://www.univ-usto.dz/site_divers/CIEBDD2016/) (communication orale)

### Communications nationales

- LIMAM A, **OUADOU Y**, ZERIZER Abd, ALIOUCHE DJ 15-16 avril 2014 Caractérisation mécanique, physique et thermique de bois du pin d'Alep d'Algérie destiné à la construction. 9èmes journées de mécanique, EMP Bordj EL-Bahri, Alger. <http://www.emp.edu.dz/> (communication affichée)
- **OUADOU Yasmina**, ALIOUCHE Djamel, PIGNOLET LUC, THEVENON Marie-France 24-25 mars 2015 Durabilité naturelle et vieillissement du bois de trois essences algériennes, 6èmes journées de chimie, EMP Bordj EL-Bahri, Alger. <http://www.emp.edu.dz/> (communication orale)



# Liste des tableaux

Tableau 1. Principales familles des conifères	11
Tableau 2. Principales familles des feuillus	12
Tableau 3. Distribution des essences forestières dans la wilaya de Jijel	19
Tableau 4. Classe de risque d'attaques biologiques et classe d'emploi	36
Tableau 5. Classification de la durabilité naturelle selon la norme EN 350-2	38
Tableau 6. Relation entre les classes d'emploi et la durabilité naturelle	39
Tableau 7. Principales essences à bois parfait duraminé et non duraminisé	40
Tableau 8. Classes de l'imprégnabilité selon la norme NF EN 350-2	42
Tableau 9. Produits et procédés de traitement de préservation en fonction de la classe de risque	48
Tableau 10. Composition et indice d'iode de différentes huiles végétales	57
Tableau 11. Comparaison entre l'effet des différents procédés	66
Tableau 12. Échelle de notation de la durabilité selon la perte de masse	77
Tableau 13. Distribution et nombre des éprouvettes	81
Tableau 14. Composition générale des bois	85
Tableau 15. Echelle de notation de la masse volumique	88
Tableau 16. Moyenne de la perte de masse chez toutes les essences étudiées	89
Tableau 17. Caractéristiques et propriétés des huiles utilisées	90
Tableau 18. Paramètres mécaniques des bois étudiés avant et après vieillessement UV accéléré	99
Tableau 19. Perte de masse du chêne zeen, chêne afarès et pin maritime durant un cycle de 30h	129

## Liste des figures

Figure 1. Coupe transversale de l'arbre (les cernes annuels)	23
Figure 2. Plans ligneux : plan transversal ; plan tangentiel; plan radial	24
Figure 3. Plan ligneux des bois résineux (à gauche) et des bois feuillus (à droite)	25
Figure 4. Représentation schématique des différentes couches de la paroi cellulaire	26
Figure 5. Représentation schématique d'une fibre du bois	27
Figure 6. Constituants chimiques du bois	28
Figure 7. Motifs de la chaînes cellulosique	29
Figure 8. Les principaux polysaccharides des hémicelluloses	29
Figure 9. Principaux monomères de la lignine	30
Figure 10. Méthodologie à suivre pour le choix de la préservation du bois	37
Figure 11. Schématisation de la différenciation aubier- bois parfait sur une section transversale	40
Figure 12. Le trempage court des bois	46
Figure 13. Station industrielle d'imprégnation du bois	47
Figure 14. Le spectre d'émission solaire avec énergies de liaison et longueurs d'ondes de certaines liaisons chimiques	49
Figure 15. Echelle de température des différents traitements thermiques	58
Figure 16. Schéma de l'installation chez menz holz	61
Figure 17. Technique d'échantillonnage	68
Figure 18. Culture des champignons étudiés dans des boites de pétrie	69
Figure 19. Méthode d'époxydation des huiles végétales en utilisant du peroxyde d'hydrogène	70
Figure 20. Méthode d'époxydation des huiles végétales en utilisant un peracide	70
Figure 21. Epoxydation de l'huile de soja (a) ; Décantation de la phase huileuse après neutralisation et lavage (b)	70
Figure 22. Schéma du montage de l'hydrodistillation	71
Figure 23. Extraction par hydrodistillation de l'huile essentielle d'orange	73

Figure 24. Montages pour l'extraction au soxhlet	74
Figure 25. Plan de coupe pour déterminer l'humidité	74
Figure 26. Représentation graphique de la cartographie d'humidité	76
Figure 27. Culture des champignons dans des flacons	76
Figure 28. Exposition des éprouvettes de bois aux champignons (a) ; attaque des champignons pendant l'incubation (b)	76
Figure 29. Pesée et mesure des éprouvettes après leur débarrassage de mycélium	76
Figure 30. Immersions des échantillons du bois dans l'huile	78
Figure 31. Photographie du dispositif utilisé pour l'imprégnation sous vide	78
Figure 32. Imprégnation des éprouvettes de bois traitées à l'huile dans la cire d'abeille liquide mélangé avec l'essence de limonène	80
Figure 33. Les éprouvettes traitées	80
Figure 34. Dispositif du vieillissement : appareil Xenotest 220 d'Atlas (a), Supports d'échantillons et masques «armatures » (b)	83
Figure 35. Imprégnation du bois dans l'huile de soja	84
Figure 36. Finition par la cire d'abeille	84
Figure 37. Composition chimique des bois étudiés	85
Figure 38. Cartographie de l'humidité sur la surface de la grume de pin maritime (a), chêne zeen (b), chêne afarès (c)	87
Figure 39. Gain de poids en pourcentage des bois étudiés après traitement oléothermique.	91
Figure 40. Comparaison de la teneur en humidité d'équilibre des échantillons témoin et traités de chêne zeen (a), de chêne afares (b) et de pin maritime (c)	93
Figure 41. Pertes de masse des éprouvettes d'aubier de Chêne zeen (a), Chêne afarès (b) et Pin maritime (c) traitées avec l'huile de soja pure et époxydée à 180 ° C pendant 2 heures ou combinées avec de la cire d'abeille, après 16 semaines d'exposition au champignons lignivores de pourriture brune et fibreuse blanche	95
Figure 42. Eprouvettes de Chêne Zeen (a), Chêne Afarès (b) et Pin maritime (c) après 120h au sein de l'appareil « Xénotest »	97

Figure 43. Perte de masse du Chêne Zeen, Chêne Afarès, et Pin maritime durant un cycle de 30h	98
Figure 44. Modes de rupture en traction des éprouvettes de bois	99
Figure 45. Microstructure des échantillons du bois avant (à gauche) et après (à droite) vieillissement UV de 120 heures: (a) Chêne de Zeen ; (b) Chêne Afarès ; (c) Pin maritime	100
Figure 46. Spectres infrarouges des bois de Chêne de Zeen (A); Chêne Afarès(B); Pin maritime(C) avant et après vieillissement	102
Figure 47. Éprouvettes de pin maritime traitées (a) Huile de soja pure ; (b) Huile de soja pure + cire ; (c) Huile de soja époxydée ; (d) Huile de soja époxydée +cire ; (e) Sans traitement	104
Figure 48. Éprouvettes de chêne zeen traitées (a) Huile de soja pure ; (b) Huile de soja pure +cire ; (c) Huile de soja époxydée ; (d) Huile de soja époxydée +cire ; (e) Sans traitement	105
Figure 49. Contraite de rupture des échantillons de chêne zeen (1), chêne afarès (2) et pin maritime (3) avant (a) et après (b) vieillissement accéléré	128

## Liste des photos

Photo 1. La plus haute altitude du Djebel El Kern avec 1121 m, en plein massif forestier de Guerrouch (Le parc national de Taza-Jijel)	20
Photo 2. À gauche espèces de chênes (zeen et afarès), à droite espèce de pin maritime de la forêt de Guerrouch de Jijel-Algérie.	20
Photo 3. Forêt de Guerrouch, Jilel – Algérie	21

# **INTRODUCTION GENERALE**



En raison de sa nature organique, le bois subit des dégradations abiotiques et biotiques qui provoquent la désintégration progressive de sa structure. La dégradation biotique se compose d'attaques des agents biologiques tels que les champignons, les bactéries et les insectes. Les dégradations abiotiques sont généralement des phénomènes de surface et sont influencées par le rayonnement solaire, les précipitations, la chaleur, la teneur en humidité de l'air ambiant, la présence d'oxygène et de polluants atmosphériques conséquence du vieillissement.

Face à ce type d'attaque, La qualité du bois destiné à la construction et aux menuiseries extérieures doit être de haute qualité « Durable », ainsi l'importation des essences réputées pour leur stabilité comme le Teck, génèrent un coût non négligeable « prix d'achat élevé ». Pour ces raisons, l'utilisation des bois de substitution c'est-à-dire d'essences à croissance plus au moins rapide ou des essences locales peuvent être une solution. Cependant, ces bois sont moins durables et l'amélioration de leurs durabilités vont dans le sens du développement durable, C'est le principal objectif de notre travail : valorisation et développement de trois espèces de bois algérien: le chêne zeen (*Quercus canariensis*), le chêne afares (*Quercus afares*), et le pin maritime (*Pinus pinaster*) en vue de leur utilisation dans l'industrie et la construction en Algérie.

Les solutions de préservation du matériau bois par voie chimique sont peu respectueuses de l'environnement. Récemment, des études portant sur le traitement thermique, appelé aussi pyrolyse douce, il consiste à chauffer le bois entre 160 et 245 °C (320 et 473 °F) située entre le séchage et la carbonisation en absence d'oxygène, ou bien en une immersion dans un ou des bains d'huiles végétales chauffées.

En outre, le bois a besoin d'une finition particulière incorporée sa protection profonde, selon qu'il est plus au moins exposé aux intempéries et à l'eau. Cette finition protège le bois de la pénétration de l'eau liquide.

La caractérisation du bois local est important non seulement pour son utilisation appropriée, mais également pour la promotion du marché algérien qui est nécessaire pour le bois provenant de plantations locales. À cet effet, nous avons considéré la durabilité naturelle des espèces de bois étudiées contre les champignons lignivores basidiomycètes de pourriture cubique (*Coniophora puteana*, *poria placenta* et *Gloeophyllum trabeum*), et fibreuse blanche (*Coriulos versicolor*) a été clarifié pour l'aubier et le duramen.

Nous avons poursuivi l'étude en nous intéressant aux dégradations d'ordre esthétiques par une méthode d'estimation de la photo durabilité, testée dans une enceinte de photo vieillissement accéléré (Xenotest).

Le but visé de nos travaux consiste en un traitement oléothermique par l'huile de soja chauffée à 180 °C pendant deux heures, avec l'ajout à la valeur du procédé en incorporant un adjuvant comme la cire d'abeille, dans le but d'améliorer l'aspect du bois algérien.

L'huile de soja présente un degré d'insaturation moyen en raison de sa teneur en acides gras polyinsaturés (40 à 50%), leur époxydation par le peroxyde d'hydrogène à 70°C et l'acide formique, nous a conduits à un nouveau réactif utilisé pour l'oléochimie à part entière. L'impact de ces combinaisons est évalué pour la résistance biologique auprès les champignons de dégradation.

Le plan adopté dans ce manuscrit est le suivant :

**La première partie** rassemble les éléments de la bibliographie nécessaire à la réalisation de ce travail, elle comprend quatre chapitres : Le premier (I) sera consacré à l'étude du secteur forestier en Algérie; le deuxième chapitre (II) présente l'état de l'art sur le matériau bois, sa durabilité et sa biodégradation, une chronologie pour sa préservation suivi par des procédés de traitements existants. Le troisième chapitre (III) expose les conditions environnementales de vieillissement retenues et les différents moyens expérimentaux utilisées pour accélérer ce phénomène de vieillissement ainsi nous détaillons les transformations physicochimiques que subit le matériau bois. En fin, nous présentons la préservation thermique du bois en chapitre IV.

**La seconde partie** : (Matériels et méthodes) décrit les matériaux et techniques utilisés pour réaliser les différents tests, porte sur la caractérisation chimique et physique des trois bois utilisés, des essais sur la durabilité naturelle contre les champignons lignivores, une méthodologie pour évaluer la durabilité, puis en présentant une étude de vieillissement accéléré type UV dans une chambre à arc Xénon, qui est une sorte de vieillissement simulé.

**La troisième partie** : (résultats et discussion) est composée de deux parties :

- Evaluation de l'efficacité des traitements combinés huile de soja-cire d'abeille auprès les champignons de carie selon les normes européennes.
- Le mécanisme du vieillissement a été discuté par MEB et FTIR pour montrer les changements structurels sur la surface des échantillons du bois avant et après vieillissement. Des essais mécaniques (résistance à la traction, contrainte et module d'élasticité) ont également été effectués pour évaluer le comportement mécanique des échantillons vieillis.

# **PARTIE I: Revue Bibliographique**

## I. Secteur forestier en Algérie

### I.1. Présentation de la forêt algérienne

En Algérie, les forêts productives couvrent seulement un tiers du patrimoine forestier national, soit 4,1 millions d'hectares, avec un taux de reboisement de 16,4% dans le nord et de 1,7% seulement si l'on considère également les régions arides sahariennes. Ces taux de reboisement sont évidemment insuffisants pour assurer l'équilibre physique et biologique. Les espèces dominantes sont le pin d'Alep (*Pinus halepensis*) situé principalement dans les zones semi-arides, le chêne zeen (*Quercus canariensis*) et le chêne afares (*Quercus afares*) occupent les zones les plus fraîches du chêne-liège. Le pin maritime (*Pinus pinaster*) est présent naturellement dans le nord-est du pays. Ces espèces de bois constituent le premier groupe de forêts dites économiques ; Ils représentent une production annuelle d'environ 460.000 m<sup>3</sup> pour l'industrie du bois. De nos jours, la production locale de bois a augmenté de façon continue de 1993 à 240.000 m<sup>3</sup>. Les besoins en bois rond industriel qui sont actuellement de 1,3 millions de m<sup>3</sup> ne sont supportés que jusqu'à environ 18% par cette production locale ; Le reste est couvert par les importations (Source : Direction Générale des Forêts) [1, 2]. La caractérisation et la préservation du bois local est importante non seulement pour son utilisation appropriée mais aussi pour la promotion du marché algérien qui est nécessaire pour le bois issu des plantations indigènes.

La forêt algérienne semble glisser rapidement sur la voie d'une dégradation progressive des essences principales et de son remplacement par le maquis et les broussailles dont le rôle reste néanmoins extrêmement important pour le contrôle et la fixation des sols.

### I.2. Principaux végétaux forestiers d'Algérie :

#### I.2.1. Les conifères

Les CONIFERES: Ce sont des arbres ou arbustes en général toujours verts et le plus souvent résineux. Le fruit des conifères peut être : soit un véritable cône à écailles nombreuses, ex : la famille des Pinacées (Pins), soit un galbule, c'est à dire un cône ovoïde ou rond, avec des écailles ligneuses (Cyprés) ou charnues (Genévrier) soit enfin un fruit très spécial, charnu (If). Leurs feuilles sont appelées aiguilles ou écailles.

En Algérie trois familles nous intéressent : la famille des *Taxacées*, la famille des *Pinacées* et la famille des *Cupressacées*.

Tableau 1. Principales familles des conifères

Familles des conifères	Genres	Exemples
Les taxacées	/	- <i>Taxus baccata</i> appelé If commun
Les pinacées	Genre <i>Abies</i> (le sapin)	- <i>Abies numidica</i> , "Taoumet", Sapin de numidie
	Genre <i>Cedrus</i> (le cèdre)	- <i>Cedrus atlantica</i> , Cèdre de l'Atlas
	Genre <i>Pinus</i> (les pins)	- <i>Pinus halepensis</i> , "Snouber", Pin

		d'alep -Pinus brutia -Pinus laricio sp mauritanica -Pinus pinaster, Pinus maritima, Pin maritime - Pinus pinea, Pin pignon, pin parasol - Pinus insignis, Pinus radiata, Pin de monterey, Pin remarquable - Pinus canariensis, Pin des canaries
Les cupressacées	Genre Callitris	-Callitris articulata, Tétraclynis articulata, "ARAR", Thuya de barbarie
	Genre Juniperus	-Juniperus phoenicea, "ARAR", Genévrier de Phénicie -Juniperus Thurifera, "AÏOUAL", Genévrier de thurifère -Juniperus oxycedrus, "TAGA", Genévrier oxycède -Juniperus communis, "TAGA", Genévrier commun
	Genre Cupressus	-Cupressus sempervirens, Cyprès toujours vert

Source (FOSA, aout 2007) : [www.fao.org/docrep/003/X6771F/X6771F02.htm](http://www.fao.org/docrep/003/X6771F/X6771F02.htm)

### I.2.2. Les feuillus

Tableau 2. Principales familles des feuillus

Familles des feuillus	Genres	Exemples
Famille des FAGACEES	Genre Quercus	-Quercus suber, "FERNAN", Chêne-liège -Quercus ilex, "KERROUCH", Chêne vert -Quercus coociferra, "KHARKHACH", Chêne Kermes -Quercus canariensis, faginea, mirbeckii, ZEHN, Chêne zeen -Quercus afares, Chêne afares

	Genre Castanea	-Castanea sativa, "QUASTHAL", Châtaignier
Famille des CASUARINACEES	Genre Casuarina, Filao	Casuarina tenuissima Casuarina equisetifolia
Famille des SALINACEES	Genre Salix, "AOUD EL MA", Saule	-Salix purpurea, Saule pourpre -Salix alba, Saule blanc
	Genre Populus	-Populus nigra, "SAFSAF", Peuplier noir -Populus alba, "SAFSAF EL ABIAD", Peuplier blanc -Populus trémula, "ARAOUARI", Peuplier tremble -
Famille des BETULACEES	Genre Alnus	-Alnus glutinosa, "AOUD EL AHMAR", Aune glutineux
Famille des ULMACEES	Genre Ulmus	-Ulmus campestris, NECHEM, Orme champêtre
	Genre Celtis	-Celtis australis, TERZAS, Micocoulier
Famille des LAURACEES	/	Laurus nobilis, "RAND", Laurier sauce
Famille des ACERACEES	Genre Acer	-Acer monspessulanum, Erable de Montpellier
		- Acer campestris, Erable champêtre
Famille des CISTACEES	Genre Cistus	-Cistus monspeliensis, "Touzzala", Ciste de Montpellier -Cistus salvifolius, Ciste à feuilles de sauge -Cistus ladaniferus, Ciste à gomme
Famille des ANACARDIACEES	Genre Pistacia	-Pistacia lentiscus, "DHEROU", Pistachier lentisque -Pistacia terebinthus, "BETOUM EL KIFFAN", Pistachier térébinthe

		-Pistacia atlantica, "BETOUM", Pistachier de l'Atlas
Famille des SIMARUBUCEES	Genre Ailantus	-Ailantus glandulosa, Ailante, vernis du Japon
Famille des MELIACEES	Genre Melia	-Melia azédarach, Lilas des Indes
Famille des LEGUMINEUSES		
Sous famille des Césalpinées	Genre Cerotonia	-Ceratonia siliqua, "Kharroub", Caroubier
	Genre Gleditschia	-Gleditschia triacanthos, Févier
Sous Famille des Mimosées	Genre Acacia	-Acacia mollissima, Acacia à feuilles molles -Acacia cyanophylla, Acacia à deux feuilles blanchâtres -Acacia melanoxylon, Acacia à bois noir
Sous famille des Papilionacées	Genre Robinia	-Robinia pseudoacacia, Robinia faux acacia
	Genre Sophora	- Sophora japonica
	Genre Genista	- Genista tricuspidata, genêt à trois pointes - Genista numidica, Genêt de Numidie
	Genre Calycotome	- Calycotome spinosa, "GUENDOUL", Calycotome épineux
	Genre Cytisus	- Cytisus triflorus, "HOUHARIS", Cytise à trois fleurs - Cytisus linifolius, Cytise à feuilles de lin
Famille des MYRTACEES	Genre Myrtus	- Myrtus communis, "REHAN", Myrte commun
	Genre Eucalyptus	- Eucalyptus botryoïdes - Eucalyptus Camaldulensis - Eucalyptus citriodora - Eucalyptus cladocalyx - Eucalyptus globulus - Eucalyptus gomphocephala - Eucalyptus leucoxyton - Eucalyptus occidentalis - Eucalyptus robusta - Eucalyptus sidéroxyton - Eucalyptus viminalis
Famille des TAMARICACEES	Genre Tamarix	-Tamarix africana, THARIA, Tamaris d'Afrique -Tamarix gallica, THARFA,

		Tamaris commun
Famille des OLEACEES	Genre Fraxinus	-Fraxinus oxyphylla, "DARDAR", Frêne oxyphylle -Fraxinus dimorpha, "TOUZZELT", frêne dimorphe
	Genre Olea	-Olea europea, "ZEBODJ", Olivier sauvage

Source (FOSA, aout 2007): [www.fao.org/docrep/003/X6771F/X6771F02.htm](http://www.fao.org/docrep/003/X6771F/X6771F02.htm)

Les essences principales couvrent 1491 000 ha qui se répartissent en forêts d'intérêt économique et forêts de protection :

- Forêts d'intérêt économique constituées par : les résineux (pin d'Alep, pin maritime et cèdre) et les feuillus Chêne zeen et Afarès, eucalyptus.
- Forêts de protection composées de Chêne vert, thuya et genévriers.

-**les pineraies de pin d'Alep** comportent un capital sur pied assez pauvre, de 11 à 54 m<sup>3</sup>/ha (valeurs extrêmes) avec une moyenne de 45 m<sup>3</sup>/ha, et un accroissement moyen annuel de 1,8 m<sup>3</sup>/ha. Le volume sur pied est présumé fournir 30 m<sup>3</sup>/ha de bois d'œuvre et d'industrie et 15 m<sup>3</sup>/ha de bois de chauffage.

-**les subéraies** (229 000 ha). Il s'agit de peuplements âgés : 61% des subéraies sont constituées de vieilles futaies qui ont subi plusieurs démasclages et devraient être régénérées. Les taillis et perchis ne représentent que 2,5 % de la surface.

-**les chênes caducifoliés** (zeen et afarès ; 48 000 ha). Ces peuplements occupent les milieux les plus frais et les altitudes élevées dans la subéraies. Avec sa croissance rapide, le zeen a tendance à recoloniser les subéraies. Les vieilles futaies représentent 56% des surfaces, les taillis et perchis 5% seulement.

-**le pin maritime** (31 510 ha). Le pin maritime, qui est naturel dans le nord-est de l'Algérie, s'installe dans les subéraies plus ou moins dégradées. Sa régénération naturelle est aisée, sauf en exposition sud.

-**le chêne vert** est surtout abondant dans le nord-ouest du pays ; la surface aurait fortement régressé en 30 ans, de 700 000 ha à 108 200 ha (Direction générale des forêts).

Les forêts productives ne couvrent qu'un tiers du patrimoine forestier national, soit 1 400 000 ha. Elles sont constituées de peuplements de pin d'alep, d'encalyptus, de chêne liège, de chêne zeen et afarès, de pin maritime et de cèdre. En matière de réserve de matériel ligneux sur pied, les forêts de pin d'Alep représentent la plus grande proportion. Parmi les feuillus, les eucalyptus et les chênes sont les plus importants. Le chêne liège est essentiellement cultivé pour son écorce (liège).



### I.3. La productivité de bois en Algérie

La possibilité annuelle globale s'élève à environ 1 200 000 m<sup>3</sup> (Plan national de développement forestier, 1984). L'accroissement moyen annuel s'élèverait donc à peine à 1 m<sup>3</sup>/ha/an si l'on considère la superficie occupée par les forêts productives. Les peuplements de Pin d'Alep renferme plus de 80% de la possibilité totale annuelle, le reste est fourni par l'eucalyptus, le chêne zeen et le chêne afarès.

Ces forêts représentent une possibilité annuelle d'environ 460 000 m<sup>3</sup>. La production du bois a suivi un rythme très irrégulier depuis l'indépendance. Faible de 1963 à 1990, celle-ci a connu une augmentation sensible à partir de 1991 culminant en 1993 avec 240 000 m<sup>3</sup>. Cette augmentation est essentiellement due aux moyens humains et matériels mis en œuvre par le secteur pour une meilleure prise en charge des plans de gestion.

#### I.3.1. La production de bois provient de forêts aménagées et non aménagées

Les forêts aménagées sont constituées aussi bien de résineux (pin d'Alep) que de feuillus (chêne zeen, chêne afarès). Pour le pin d'Alep, il s'agit notamment des massifs de Telagh, Djelfa (Senalba Chergui et Gherbi) et de Khenchela (Beni-Imlou). Ces forêts sont exploitées depuis le début des années 80. En ce qui concerne les chênes zeen et afarès, les principales forêts (Guerrouch et Akfadou) sont en cours d'exploitation.

En absence de plan de gestion, l'exploitation de bois au niveau des forêts non aménagées concerne principalement des coupes de vieux bois, des éclaircies et des coupes sanitaires (forêts de pin d'Alep). Des coupes d'assainissement dans les forêts incendiées sont également effectuées. Il faut signaler, cependant, que la part des produits provenant de ces forêts ne présente qu'une faible proportion de la production totale de bois. Par conséquent la production de bois des forêts naturelles provient des essences suivantes par ordre décroissant: pin d'alep, chêne zeen, chêne afarès, cèdre, pin maritime. Le pin d'Alep fournit environ 70 % de la production totale de bois, mais seulement 20% de bois d'œuvre. L'eucalyptus est essentiellement cultivé pour le bois de trituration. La production des chênes, du cèdre et du pin maritime est à 30% environ destinée à un usage en bois d'œuvre. Globalement, la production de ce type de bois n'excède pas 30% de la production nationale de bois alors que le bois de trituration en représente 50 à 60%.

#### I.3.2. Débouchés des bois locaux

Le bois du pin d'Alep, de loin le plus répandu, est de qualité moyenne. Ses principaux débouchés sont la menuiserie, la charpente et le coffrage, les bois d'eucalyptus, qui est exploité généralement à courte rotation (10 ans), est destiné à la trituration. Le bois de chêne zeen, vu son importante densité et sa dureté, est essentiellement utilisé pour la confection de traverses de chemin de fer. Le bois de pin maritime, est surtout utilisé en menuiserie, le bois de cèdre est quant à lui utilisé en ébénisterie.

## - Le liège

De loin, le plus valorisé des produits forestiers, le liège constitue une ressource stratégique du fait de ses multiples usages (bouchonnerie, parquet, isolation thermique). Les potentialités nationales sont estimées à plus de 200 000qx/an. Avec une production relativement faible ces dernières années (100 000 à 150 000 qx/an), l'Algérie occupe le troisième rang des producteurs de liège (7% de la production mondiale), mais loin derrière le Portugal (57%) et l'Espagne (23%). Cependant, avec une meilleure gestion et une exploitation plus rationnelle des peuplements, la production nationale de liège peut connaître une sensible augmentation à court terme.

### I.4. Gestion des produits forestiers

#### I.4.1. Classification des arbres

Les critères de classement varient, selon les pays, les époques et les acteurs :

Dans la classification classique, les arbres font partie de la division des spermaphytes (*Spermatophyta*) : les plantes produisant des graines et, selon la classification botanique, les arbres sont groupés par genre, espèce et famille, avec le cas échéant des sous-espèces.

-CRYPTOGAMES : sans fleurs (fougères et champignons) ;

-PHANEROGAMES : avec fleurs toutes les autres espèces ;

PHANEROGAMES		
ANGIOSPERMES (ovaire)		GYMNOSPERMES (ovule à nu)
<u>MONOCOTYLEDONE</u> Palmiers ; bambous.	<u>DICOTYLEDONE</u> Chêne rouvre ; chêne liège, hêtre ; orme ; frêne ; châtaignier ; noyer acacia.	CONIFERES TAXACEES GNETACEES CYCADEES Mélèze ; cèdre ; épicéa ; pin sapin ; arole genévrier ; pitchpin.

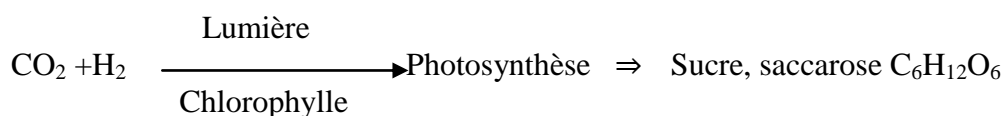
Les forestiers classent les arbres:

- selon leur utilité sylvicole (essence-objectif) ou d'accompagnement,
- selon leurs hauteurs, leur surface, diamètre (petit bois, moyen-bois, gros-bois ou très gros bois).
- Ou encore, selon l'essence: (Feuillus, Résineux).

#### I.4.2. Facteurs conditionnant la croissance des espèces

La répartition des espèces sur la surface du globe est conditionnée par le climat principalement et leur croissance dépend des facteurs suivants:

- **la lumière** : Elle conditionne la fonction d'assimilation de la plante.



- **la température** : Elle conditionne la croissance de l'arbre.

## Besoin en chaleur

Besoin en chaleur →		
Arole	sapin	chêne
pin de montagne	hêtre	châtaignier
mélèze	frêne	orme
épicéa	tilleul	etc.
bouleau	érable	
etc.	etc.	

- **L'hydrologie** : Le besoin en eau peut également fournir une échelle de classement.

## Besoin en eau

Besoin en eau →		
pin	chêne	aulne
érable	bouleau	frêne
	hêtre	saule
	mélèze	orme

- **La pédologie** : Les propriétés physico-chimiques du sol ont une grande importance et leur influence sur la croissance des essences est essentielle. Parmi les éléments caractéristiques, on peut citer :
  - la profondeur du sol meuble (profondeur des racines)
  - La porosité du sol
  - Les propriétés chimiques (degré d'acidité, sols siliceux ou calcaires)
  - La capacité calorifique du sol
  - L'activité biologique (présence de vers, bactéries, etc.)
- **La topographie** : elle conditionne les éléments cités précédemment et peut altérer plus ou moins les conditions climatiques (lumière, pluviosité, vent, hydrologie).
- **Influence réciproque des végétaux** : une concurrence peut s'établir entre des espèces différentes ayant pour conséquence de favoriser une espèce par rapport à l'autre ou au contraire, de permettre la protection d'une espèce par l'autre (vent, lumière, etc.).
- **Influence des animaux** : cette influence peut être traduite par la modification de la nature biologique du sol (apport de matière azotée). Cette action peut être positive ou négative (protection des bois contre les parasites, jeunes pousses mangées par certains animaux).
- **Influence de l'homme** : Elle se manifeste par son action lors de l'exploitation de la forêt :
  - mode d'exploitation (coupe rase), défrichement inconsidéré
  - hybridation des espèces
  - pollution : fluor, pluie acide

## I.5. présentation de la forêt de Jijel

La forêt de Jijel est étendue sur 130878.5 ha, soit 54.56% du territoire de la wilaya de Jijel, situé à 518 mètres d'altitude, la forêt est un élément essentiel et structurant de la région. Elle est omniprésente dans les paysages. Par sa masse et sa diversité, elle constitue un facteur incontournable, voire indispensable au développement régional. Cette forêt, à la densité variable, est néanmoins inégalement répartie. Elle se concentre surtout à l'Ouest et au Sud de la wilaya[3].

### I.5.1. les essences forestières de la wilaya de Jijel

Composée essentiellement de chênes liège (*Quercus suber*), la forêt de la wilaya de Jijel juxtapose en fait, deux formations principales : les vieilles futaies pures et plus ou moins denses et les boisements beaucoup plus clairs souvent mixtes et plus jeunes. Les premières représentent 65% de l'espace sylvicole, leur taux de recouvrement est généralement supérieur à 75%, et la hauteur moyenne des arbres avoisine 9 mètres. Les seconds, disséminés à travers tout l'espace forestier, forment un peuplement où les arbres ne dépassent pas 7 mètres[3].

Tableau 3. Distribution des essences forestières dans la wilaya de Jijel

Espèce	Superficie	(%)
Chêne liège	71756,3	71,18
Chêne zeen	4712,6	4,68
Chêne afarès	1883,03	1,87
Cèdre	1557,32	1,55
Pin maritime	1506,43	1,49
Pin d'Alep	1292,68	1,28
Eucalyptus	1150,18	1,14
Chêne vert	1109,46	1,10
Ch.L+Ch.Z	6492,13	6,44
Ch.L+Ch.A	3839,1	3,81
Ch.Z+Ch.A	2605,7	2,59
Autres	2880,53	2,86
Total	100785,46	100

Conservation des forêts de Jijel(2004)

### 1.5.2. Forêt de Guerrouch (zone de prélèvement)

Son couvert végétal se caractérise par une diversité des essences et une dynamique de croissance résultant de conditions édaphoclimatiques favorables. Elle renferme les plus beaux peuplements de chêne zéen à l'échelle nationale composés de formations climaciques de chêne zéen pur et de chêne afares purs ainsi que des formations de chêne liège présent en belles formations avec ces différents groupements ; des formations de mélange entre chêne zéen et chêne afares existent également.





Photo 1. La plus haute altitude du Djebel El Kern avec 1121 m, en plein massif forestier de Guerrouch (Le parc national de Taza-Jijel)



Photo 2. À gauche espèces de chênes (zeen et afarès), à droite espèce de pin maritime de la forêt de Guerrouch de Jijel-Algérie.

Toutefois ces peuplements sont parmi les plus sensibles et les plus vulnérables au feu en raison de la présence d'un sous-bois très développé, constitué d'essences secondaires inflammables.





Photo 3. Forêt de Guerrouch, Jilel – Algérie

#### I.6. Conclusion

En résumé, on peut dire qu'à l'instar des massifs forestiers méditerranéens, la forêt algérienne joue un rôle beaucoup plus de protection que de production. Composée essentiellement d'essences locales à croissance relativement faible, elle est exploitée à hauteur de 15 à 20% de la possibilité globale estimée à 1 200 000 m<sup>3</sup> /an.

Ces dernières années, on enregistre un accroissement sensitif des besoins nationaux en bois et, parallèlement, une régression des importations, ce qui engendre des tensions sur le marché. Cette situation a contraint les pouvoirs publics à encourager l'exploitation des ressources locales. Le secteur des forêts devrait désormais, améliorer son niveau de participation au développement de l'économie nationale. C'est ainsi qu'il se fixe l'objectif de mobiliser annuellement durant les années à venir plus de 500 000 m<sup>3</sup> de bois, l'objectif étant, bien entendu, la réalisation de la possibilité globale de plus d'un million de m<sup>3</sup> /an.

## II. Préservation du bois

### II.1. le matériau bois

Depuis l'antiquité, le bois est le produit le plus utilisé par l'homme dans ses activités, dont les plus importants sont la construction et l'ameublement. Aujourd'hui, il est devenu le matériau le plus utilisé, par rapport à son aspect naturel, environnemental et qualitatif.

Dans le domaine de la construction, le matériau bois possède des atouts importants ; il est sain, il ne diffuse aucune substance nocive, sa faible densité lui rend un matériau acoustique qui permet d'atténuer le son, aussi sa dureté qui lui donne une grande résistance mécanique, sans oublier qu'il résiste au feu et c'est un bon isolant.

Le bois a prouvé ainsi son existence dans l'environnement ; en premier lieu sa capacité de stocker le carbone provenant du gaz carbonique, dont il préserve l'environnement le fait qu'il lutte contre l'effet de serre. Néanmoins, à cause de son origine biologique, le bois est soumis à différentes agressions, champignons, insectes et termites, qui diminuent de ses propriétés physiques et mécaniques après sa dégradation.

La durée de vie du bois est en fonction de sa durabilité naturelle, qui n'est pas présente pour la majorité des bois, d'où l'importance de sa préservation. Le caractère écologique du bois exige des produits de préservation non toxiques pour l'homme et l'environnement qui est devenu l'ordre du jour, ainsi de nombreux chercheurs essaient de trouver des solutions afin d'éviter l'utilisation des produits chimiques.

### II.2. La chimie du bois

#### II.2.1. La formation du bois

Une plante est généralement formée de racines, d'une tige et de feuilles. L'arbre ne diffère pas des autres plantes que par l'échelle de son développement. Schématiquement, l'arbre est formé de trois parties essentielles : les racines, le tronc et la couronne, chacune d'elles assurant une fonction organique nécessaire à la vie de la plante. Les racines absorbent l'eau et les sels minéraux dissolus du sol (sève brute) qui sont convoyés par le tronc et les branches jusqu'aux feuilles. La fonction de celles-ci est d'absorber le gaz carbonique de l'atmosphère qui, combiné avec l'eau apportée par les racines, forme des sucres simples (glucoses) par le processus de la photosynthèse. La chlorophylle contenue dans les cellules des parties vertes de la plante joue le rôle de catalyseur du processus de cette transformation. Les sucres ainsi formés, qu'on nomme sève élaborée, retournent dans les branches, le tronc et les racines afin de fournir l'énergie et la nourriture aux cellules individuelles qui assurent la croissance de la plante. Cette sève élaborée sera stockée par certains tissus de la plante comme source d'énergie en réserve qui pourra être utilisée par les cellules lorsque la production des sucres sera stoppée pendant la nuit par exemple ou durant les mois d'hiver pour les arbres à feuilles caduques.

La production du bois manifeste une périodicité. Les conifères et les essences feuillues produisent, au printemps, des éléments à parois minces : c'est le bois de printemps ou le bois initial. A la fin de l'été, un tissu plus dense et foncé se forme, la paroi des cellules s'épaissit et l'espace vide se réduit : on a affaire au bois d'été ou bois final. La formation du bois cesse et repose jusqu'au printemps suivant. L'ensemble, bois initial et bois final, constitue le bois formé par le cambium en une année et forme une entité appelée cerne annuel.

Les anneaux (cernes) d'accroissement annuel sont très visibles sur les sections transversales du bois des conifères et des feuillus à zone poreuses ; ils sont moins apparents chez les feuillus à pores diffus. Le tissu principal du bois est le tissu de soutien ; il se compose de cellules allongées, fusiformes, qui courent parallèlement à l'axe de croissance de l'arbre et donne au bois sa structure fibreuse. Ces tissus et leurs cellules diffèrent qualitativement d'une essence à l'autre et constituent cette variété de structures qui caractérisent le bois.

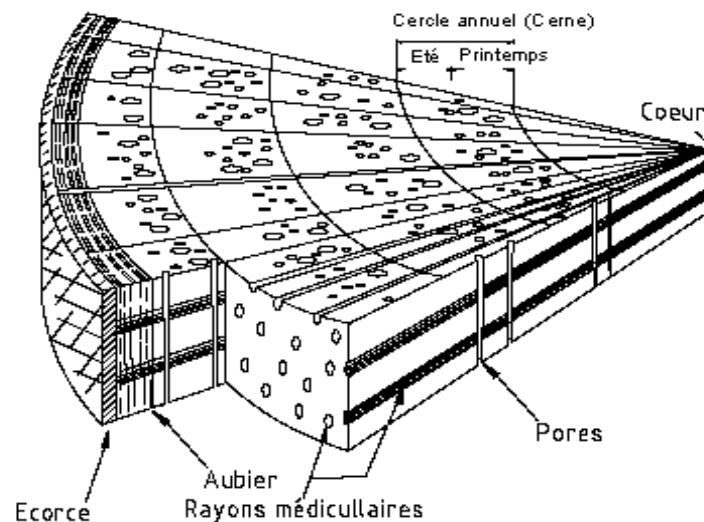
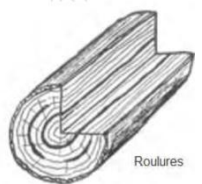


Figure 1. Coupe transversale de l'arbre (les cernes annuels)

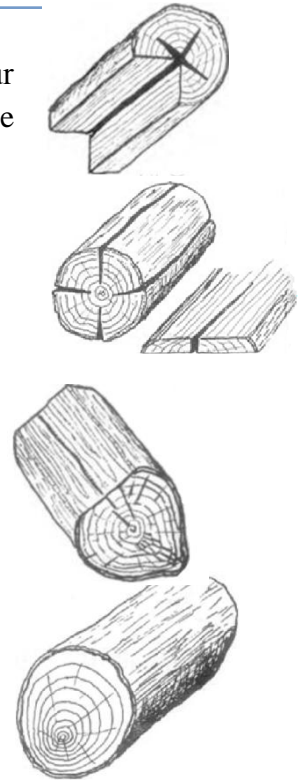
### II.2.2. Défauts des bois

- Les nœuds : ce sont les attaches des branches. Ils ne présentent un réel défaut que lorsqu'ils traversent la planche, dans ce cas ils ouvrent la porte aux moisissures.
- Le rebours : Torsion des fibres dû à l'action de vent. Il est difficile d'obtenir des planches droites.
- La roulure : Fente occasionnée par le décollage des deux couches annuelles successives due au vent et à la gelée.





- La gélivure : Des fentes partent de l'aubier et se dirigent vers le cœur suivant les rayons médullaires, elle apparaît extérieurement sous forme de boursouffure qui laisse suinter la sève.
- Les gerçures : Elles apparaissent sur les grumes séchées trop rapidement. Ce sont des fentes d'autant plus profondes que le bois est plus nerveux.
- Le cœur étoilé : Il se manifeste par une ou deux fentes en croix passant par le centre de l'arbre et s'étendant à toute la longueur de la grume.
- Le cœur excentré : Ce défaut rend le bois peu homogène, difficile à débiter. Il provient d'un développement irrégulier des racines.



## II.2.3. Structure et composition chimique du bois

### II.2.3.1. Structure anatomique du bois

Les éléments du bois sont orientés parallèlement et perpendiculairement à un axe de symétrie matérialisé par la moelle centrale. Les plans de référence du bois pour une description plus fine, à l'échelle de quelques dizaines de micromètres sont :

- Le plan transversal, perpendiculaire à l'axe de la tige (au fil du bois) correspond à la section de coupe du tronc, sur lequel sont observés les cernes annuels.
- Le plan radial, passant de la moelle à l'écorce (au centre de la tige).
- Le plan tangentiel, perpendiculaire au plan radial, parallèle à l'axe de la tige et tangent aux cernes annuels.

Les trois directions, axiale (L) radiale (R) et tangentielle (T), sont les directions d'anisotropie du bois.

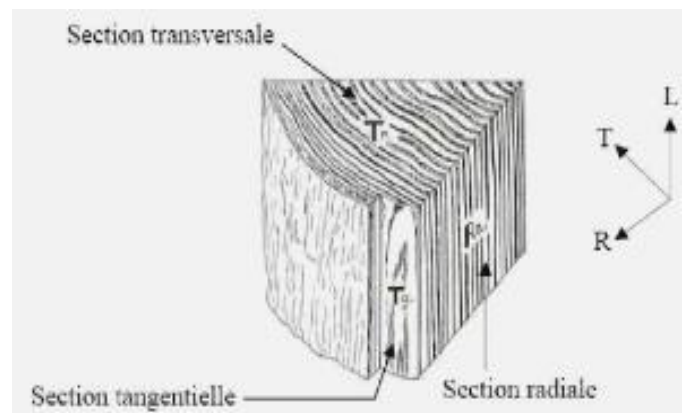
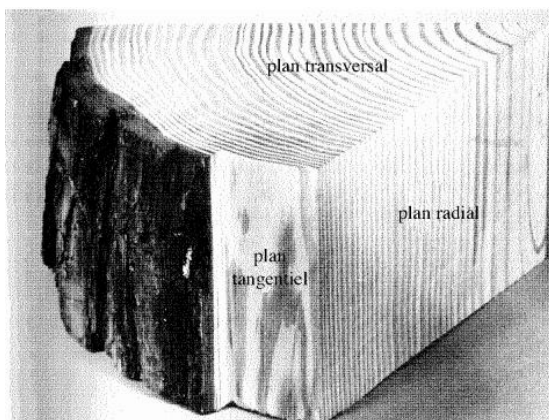


Figure 2. Plans ligneux : plan transversal ; plan tangentiel ; plan radial.

### II.2.3.2. Structure des bois résineux et des bois feuillus

Les résineux présentent une organisation relativement simple et uniforme (figure 4) ; ils sont constitués de deux types de cellules, les trachéides et les cellules parenchymes. Les cellules longitudinales (trachéides) assurent à la fois les fonctions de transport de la sève et de soutien de l'arbre. Elles ont des ponctuations pour permettre le passage des liquides. Les parenchymes en direction axiale et radiale qui assurent le stockage de substances nutritives. Chez certains résineux on trouve des canaux résinifères en direction axiale, radiale ou les deux

Le bois des feuillus présente dans sa structure une diversité beaucoup plus grande que les résineux et possède différents types de cellules (vaisseaux, trachéides et cellules parenchymes). Dans le bois des feuillus, il existe des vaisseaux spécialisés pour transporter la sève brute et des fibres assurant la résistance mécanique et de soutien. Lorsque ces vaisseaux ont environ la même taille et sont répartis de façon homogène dans le cerne, on parle de bois à pores diffus ; s'ils sont plus nombreux au bord de la limite de cerne, on parle de bois à zone initiale poreuse. La réserve de substance nutritive est assurée comme chez les résineux par les parenchymes longitudinaux et radiaux.

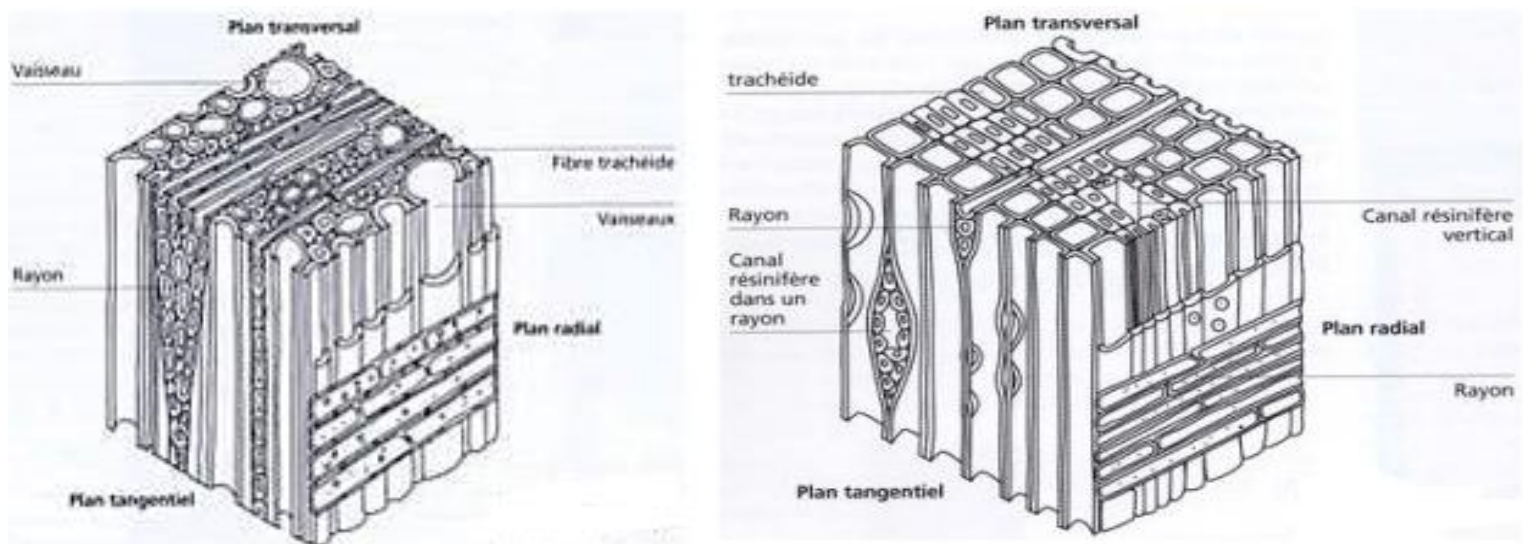


Figure 3. Plan ligneux des bois résineux (à droite) et des bois feuillus (à gauche) (source CTBA)

### II.2.3.3. Ultra structure du bois

La paroi cellulaire du bois ne différencie pas d'un feuillu à un résineux. Elle est multicouche, possède essentiellement une couche intercellulaire, une paroi primaire et une paroi secondaire constituée de trois sous-couches et sont reliées entre elles par la lamelle moyenne (figure 4). Chaque couche est un milieu composite constitué de filaments de cellulose (micro fibrilles) scellés dans une matrice de lignine et d'hémicelluloses.

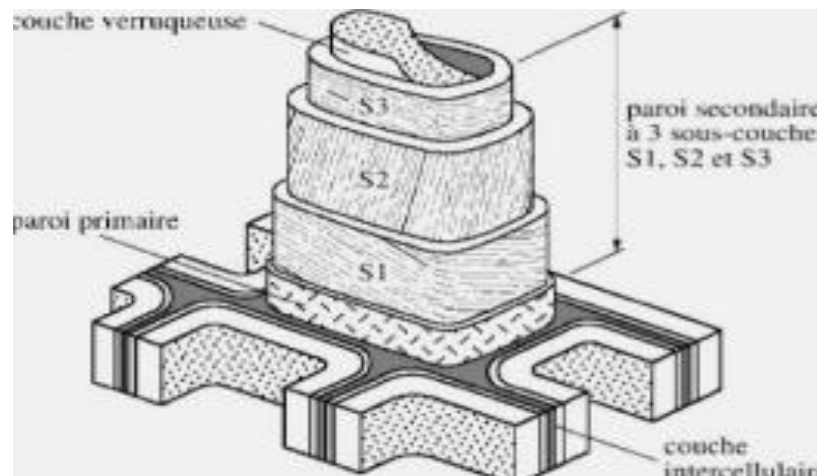


Figure 4. Représentation schématique des différentes couches de la paroi cellulaire

-La couche intercellulaire et la paroi primaire : La couche intercellulaire ou lamelle moyenne est constituée essentiellement de pectine associée à différentes protéines, apparaît après la division de la cellule mère. Son épaisseur varie entre 0,5 et 1,5  $\mu\text{m}$ . Cette couche permet de lier les cellules les unes aux autres, elle possède une importante quantité de lignine. Si certaines micro fibrilles isolées traversent cette couche, son pourcentage en cellulose peut cependant être considéré comme négligeable[4].

A l'intérieur de la paroi primaire (mesure environ 0,1 $\mu\text{m}$ ), les microfibrilles de cellulose s'organisent, s'alignent et s'enroulent telle une hélice autour de l'axe des fibres pour former la paroi secondaire. Les chaînes de cellulose s'associent pour former les microfibrilles qui sont liées entre elles par les hémicelluloses via des liaisons hydrogène.

Il est souvent difficile de différencier la paroi primaire de la couche intercellulaire.

-La paroi secondaire

Cette paroi est essentiellement constituée de micro fibrilles de cellulose alignées, en formant trois couches distinctes :

La couche S1 est constituée de micro fibrilles croisées, avec un angle compris entre 60° et 80° par rapport à l'axe de la fibre. Sa structure peut être considérée comme étant lamellaire (3 à 6 lamelles) et son épaisseur varie entre 0,1 et 0,35  $\mu\text{m}$ .

La couche S2 constitue la partie la plus volumineuse de la paroi secondaire. Elle est composée de micro fibrilles en hélice formant un angle de 5° à 50° par rapport à l'axe de la cellule. Cet angle dans les cellules du bois de printemps varie entre 30° et 50° et dans les cellules du bois d'été entre 5° et 30°. L'épaisseur de la couche S2 varie entre 1 et 10  $\mu\text{m}$  ; elle représente 15 à 85 % de l'épaisseur totale de la couche.

La couche S3 est relativement mince. Son épaisseur varie entre 0,5 et 1,1  $\mu\text{m}$ . Elle est constituée de micro fibrilles dont l'orientation varie entre 60 et 90° par rapport à l'axe de la fibre.

Chacune de ces trois couches contient également de la lignine et des hémicelluloses.

### II.2.3.4. Constituants chimiques du bois

De manière simplifiée, le bois est constitué des matières organiques suivantes : 50% de carbone, 43% d'oxygène, 6% d'hydrogène, 1% d'azote et entre 0,5 et 1,5% de cendres, cette composition élémentaire du bois est toujours approximativement la même[4].

La matière végétale est constituée de cellules reliées entre elles par un squelette rigide formé d'une succession de parois, qui comporte aussi de l'eau : eau de constitution (liaison chimique), eau libre (vides cellulaire) et eau liée (eau de saturation imprégnant les membranes). Ces parois sont caractérisées par différents constituants chimiques : la cellulose concentrée à l'intérieur de la fibre, les parois extérieures de la fibre sont composées principalement de lignines et d'hémicelluloses, qui assure la cohésion de la fibre végétale, les lamelles de jonction inter-fibres sont composées presque uniquement de lignine. Un réseau supplémentaire de pectines augmente la complexité de la matrice. A la fin de la croissance, le réseau polysaccharidique peut être solidifié par un réseau secondaire de protéines HRGP (Hydroxyproline Rich Glyco Proteins).

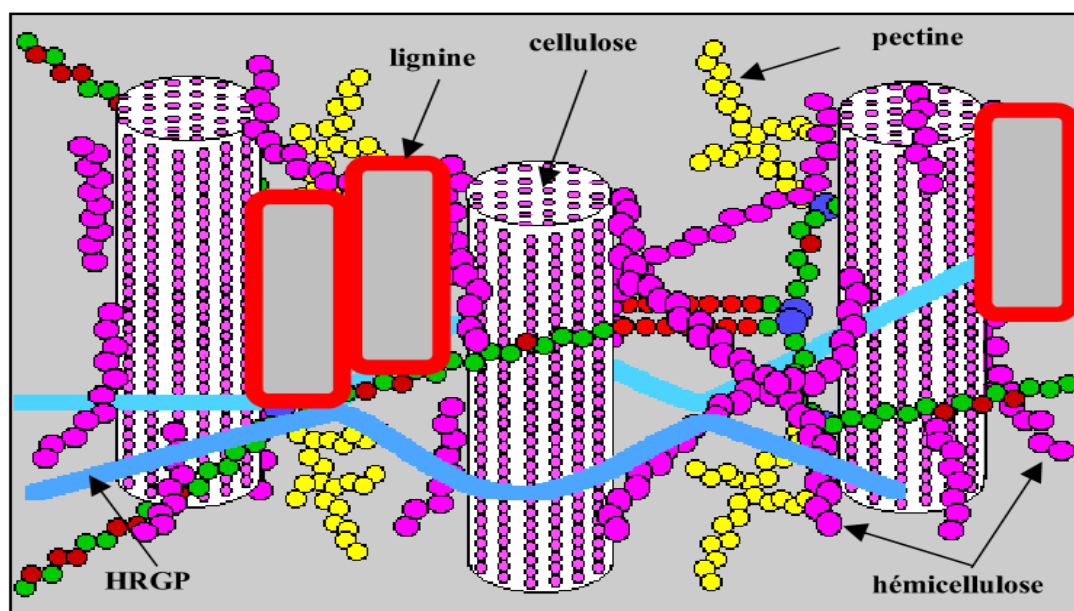


Figure 5. Représentation schématique d'une fibre de bois. (Source : Biologie et Multimédia - Université Pierre et Marie-Curie, 2002).

Les principaux composants chimiques du bois sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Il existe en plus d'autres composants nommés les extractibles. Ils sont déposés dans la paroi de la cellule pendant la formation du bois parfait par la sécrétion.

Le schéma suivant résume les constituants du bois qui peuvent être classés en deux groupes de substances (Figure 6) : Les substances macromoléculaire, présentes en quantité abondante dans toutes les essences et les substances de faible poids moléculaire, généralement plus spécifiques de certaines espèces.

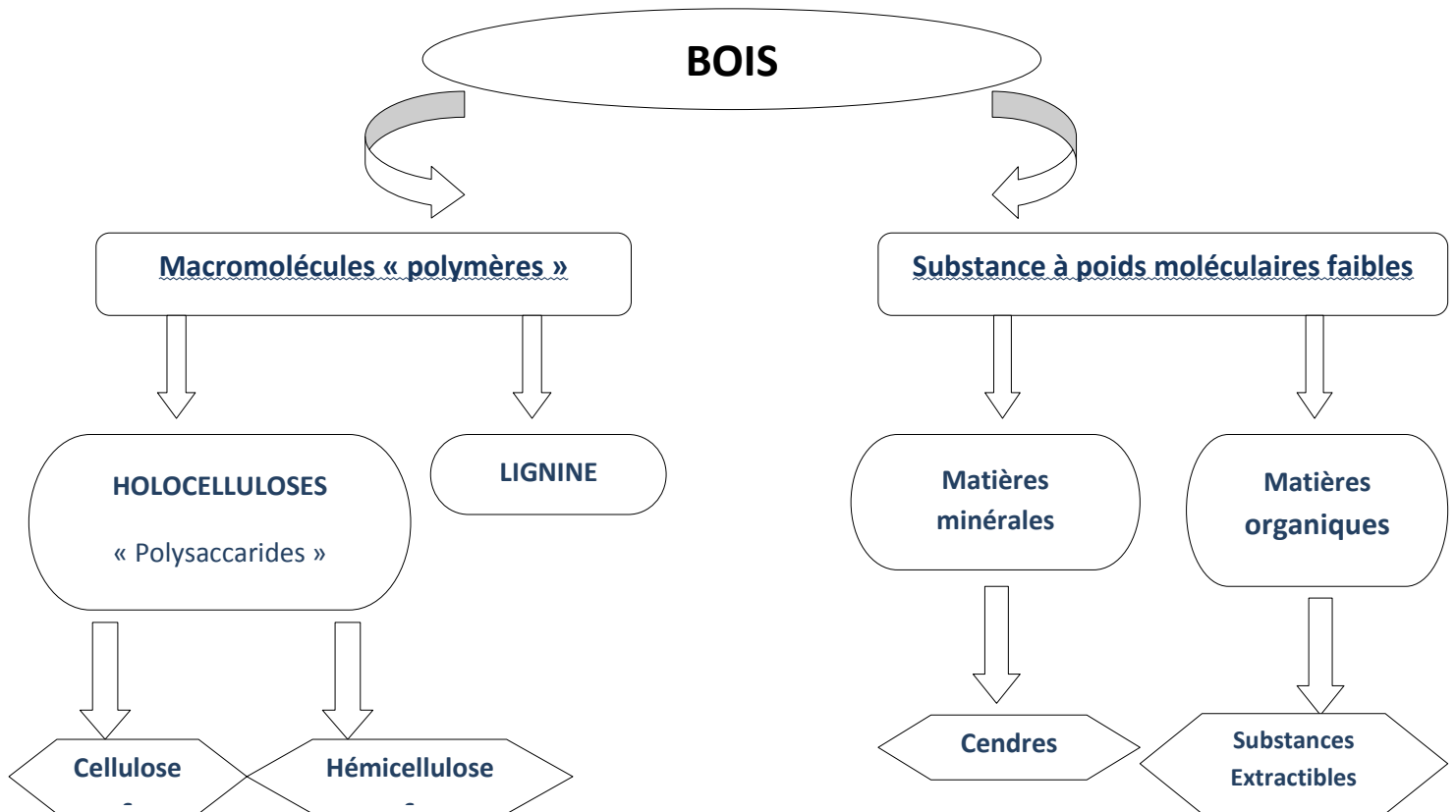


Figure 6. Constituants chimiques du bois

L'holocellulose est le complexe de cellulose-hémicellulose, prend le nom de polyholoside, de forme  $(C_6H_{10}O_5)_n$ .

- **La cellulose** est un glucide, constitué d'unités de glucoses, l'association des deux glucoses en  $\beta(1-4)$  forme un cellobiose, (monomère de la cellulose Fig. 8 ), dont sa nature polymérique est un homopolymère linéaire semi cristalline avec un degré de polymérisation (nombre d'unités) varie entre 5000-10000 pour le bois, sa structure cristalline a été déterminée par diffraction des rayons X et par des méthodes basées sur la polarisation du rayonnement infrarouge[5].



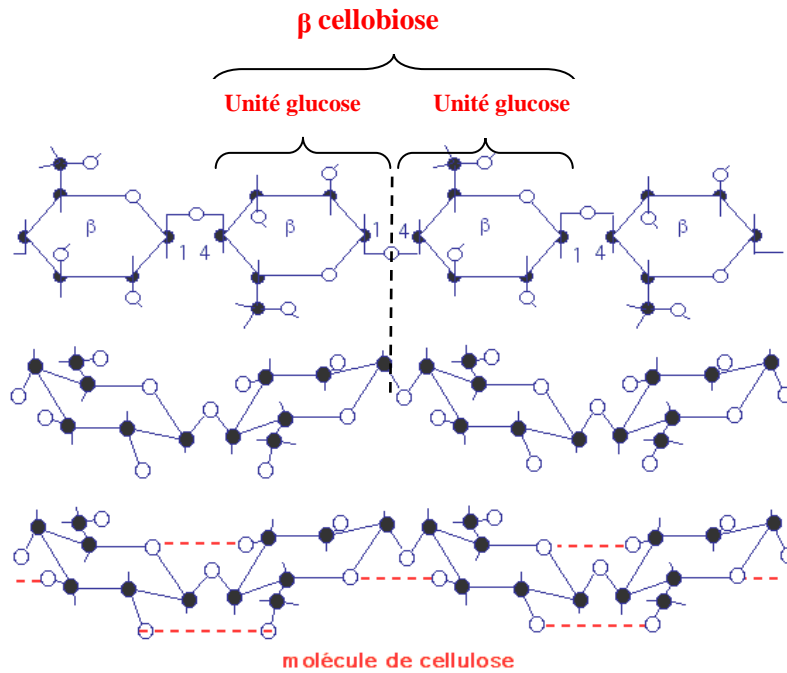


Figure 7. Motifs de la chaîne cellulosique[5]

- **Les hémicelluloses** sont des hétéropolymères ramifiés, Elles sont principalement constituées d'une chaîne de glucose (bêta 1-4) et de courtes chaînes latérales de sucre (polysaccharides) de glucose, xylose, mannose, arabinose, etc (fig. 8). Leurs degré de polymérisation varie de 150 à 200, plus faible que celui de la cellulose. La nature et la proportion des hémicelluloses varient sensiblement entre les espèces, elles possèdent des propriétés hydrophiles, paramètre qui aura un rôle déterminant dans le comportement du bois lors du traitement thermique (variabilité dimensionnelle).

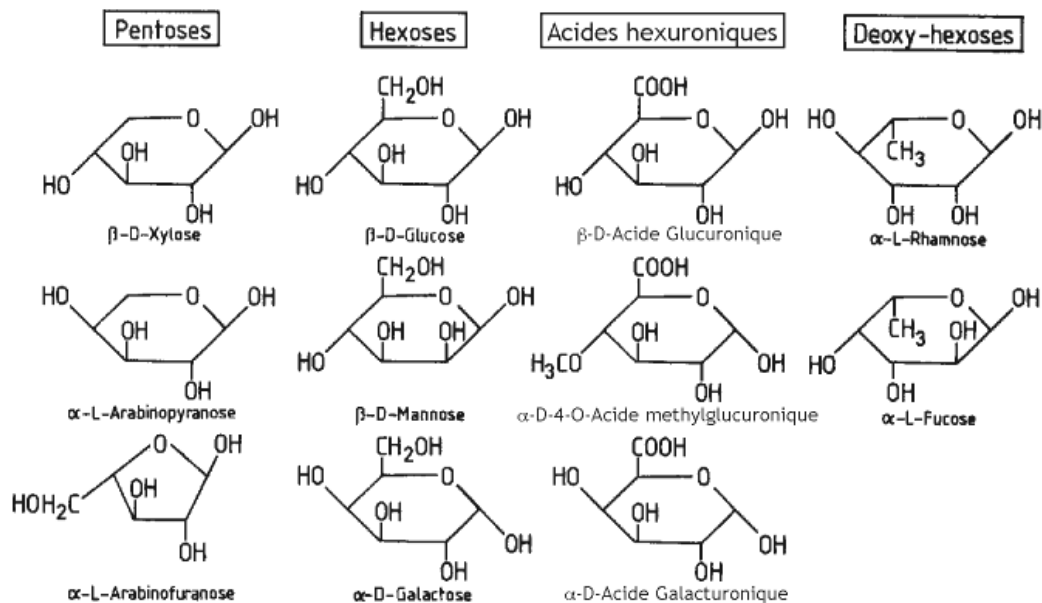


Figure 8. Principaux polysaccharides des hémicelluloses (Formules chimiques)[6]

- **La lignine** (ou plutôt les lignines) est un polymère amorphe, non linéaire, tridimensionnel et complexe constitué d'unités phénol présentées à la Fig. 9. La nature aromatique de l'unité phénolique rend la lignine hydrophobe (la lignification) et sa structure tridimensionnelle présente une grande rigidité.

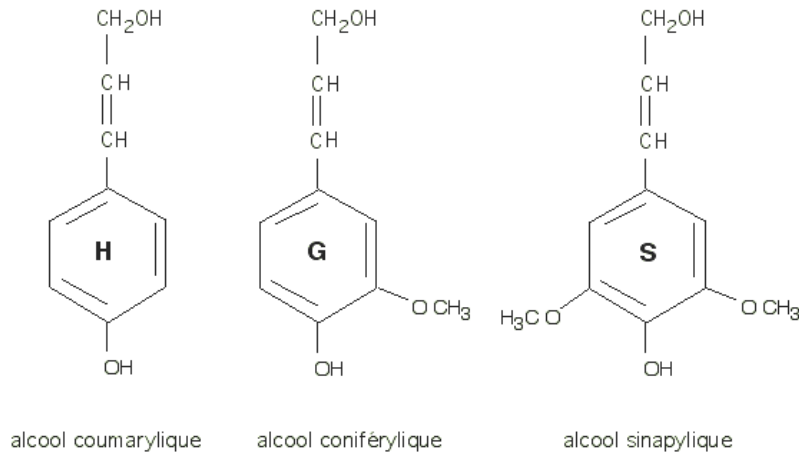


Figure 9. Principaux monomères de la lignine (Formules chimiques)[7]

Ces monomères diffèrent par le cycle qui peut être non méthylé (cycle H pour parahydroxy-benzoyl), méthylé (cycle G pour gaïacyl) ou deux fois méthylé (cycle S pour syringyl). L'acide coniférylique est très abondant (80%) chez les Conifères (Gymnospermes) et l'acide sinapylique (50%) chez les Angiospermes.

- **Les extractibles** comprennent plusieurs substances chimiques différentes et sont facilement éliminés par des solvants naturels. Parmi ces composés, on trouve des terpènes, des cires et résines, ainsi que des composés phénoliques et des composés inorganiques. ils ne contribuent pas aux propriétés mécaniques du bois, bien qu'ils influent sur la densité. Les extractibles pigmentent le bois parfait et lui donnent un parfum, ils sont toxiques et augmentent la résistance du bois parfait à la pourriture[8, 9].

## II.3. l'altération du bois par des agents biologiques

La problématique de la préservation du bois nous impose à mieux cerner les agents biologiques qui sont capables de dégrader ce matériau sensible aux agents biotiques, regroupent les êtres vivants responsables de la dégradation du bois (les bactéries, les champignons, les insectes).

Le paragraphe qui suit fait état de ces agents de dégradation et décrit leur mode d'action, en nous intéressant sur les champignons.

### II.3.1. Champignons

Les champignons responsables des maladies des végétaux sont souvent microscopiques. Pour certains sont tout à fait visibles et exposent librement leurs fructifications. C'est d'ailleurs le meilleur moyen de repérer et d'identifier leur attaque.

A la base de tout développement, il y a présence d'un taux anormal d'humidité et une température ambiante supérieure à 10°C. Le processus commence lorsque les spores se déposent sur une pièce de bois suffisamment humide (30% à 40% d'humidité) pour permettre leur germination. Les spores sont de microscopiques granules très légers qui sont véhiculés par l'air, l'eau et les animaux. Elles sont donc omniprésentes dans notre environnement. La germination d'une spore produit un filament microscopique (*hyphe*) constitué de cellules mises bout à bout. Progressivement, de nouvelles cellules sont formées, soit aux extrémités de l'hyphe, soit par ramification, pour donner le corps du champignon, le *mycélium*. L'ensemble des hyphes forme le mycélium se développe dans les vides cellulaires des fibres ou vaisseaux et qui peut s'étendre sur tout le plan ligneux. Au sein de la matière ligneuse infectée, les hyphes se fraient un passage de cellule en cellule et, grâce au système enzymatique spécifique (cellulases, glucanases, xylanases...) s'excrètent, le champignon digère progressivement certains constituants de cellules du bois. La méréule développe un mycélium qui peut prendre la forme d'un voile, de coussinet, de galettes ou de cordons.

Ces champignons sont capables d'assimiler une reproduction par des spores extrêmement nombreux et résistants (un carpophore libère des milliards de spores), le mycélium constitué de filaments de diamètre de 1µm environ capables de passer par les ponctuations des cellules, et les actions d'enzymes spécifiques sont capables de dégrader la cellulose ou la lignine en composés assimilables. Les dommages qui en résultent se traduisent par une perte des propriétés esthétiques et/ou mécaniques,

#### II.3.1.1. Les champignons lignivores

Ces champignons appartiennent à la classe des basidiomycètes, lignivores car ils se « nourrissent » de la lignine et/ou de la cellulose, entraînent par la suite une diminution de la résistance mécanique du bois.

Les champignons lignivores sont classés selon le type de pourriture qu'ils provoquent sur le bois, cette pourriture est différente en fonction des éléments de la paroi cellulaire



consommés, pour cela on distingue 3 types : la pourriture brune dite cubique, la pourriture blanche dite fibreuse et la pourriture molle.

#### II.3.1.1.1. la pourriture cubique brune

Les champignons de ce type attaquent les bois résineux et feuillus, détruisent principalement la cellulose grâce à un système complexe d'enzyme réductase, qui nécessite des taux d'humidité du bois supérieurs à 22% sauf pour la Mérule (*Serpula lacrymans*). Le bois attaqué prend une couleur brune et se craquèle en nombreux petits cubes d'où le nom de cette pourriture. Le squelette résiduel représente la lignine brune qui se forme par extraction de l'eau du bois[10, 11].

Le tableau ci-dessous, récapitule quelques exemples de champignons de pourriture cubique avec ses caractéristiques[12]

Exemples de champignon	Ses caractéristiques
<i>La Mérule pleureuse, Serpula lacrymans</i>	-un taux d'humidité peu élevé, le maximum étant 50% ; -une température entre 7 et 26° C ; -son développement est favorisé dans des atmosphères peu ventilée et obscure ; -attaque tout les matériaux cellulosesiques ;
<i>Le Coniophore des caves, Coniophora puteana</i>	- Son taux d'humidité optimum se situe entre 40% et 60% ; -une température optimale entre 23-25°C, son maximum étant 35°C ; - On le rencontre dans les caves et les locaux très humides ; -attaque les bois résineux et feuillus ;
<i>Le Poria vaillant, Poria vaillantii</i>	-l'humidité optimale se situe entre 40 et 45% ; -la température optimale est de 27°C ; -attaque les bois résineux ;
<i>Le Lenzite des clotûres, Gloeophyllum sepiarium</i>	-peut se développer dans du bois sec (H% < 20%) et dans des bois très humides (H% > 50%) ; -l'optimum de température est élevé, entre 32 et 34°C - attaque les bois résineux ;

Source: CTBA 2000 [https://fr.wikipedia.org/wiki/Pourriture\\_cubique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pourriture_cubique)

#### II.3.1.1.2. la pourriture fibreuse blanche

Les champignons de cette pourriture attaquent plus particulièrement les bois feuillus, c'est la lignine qui est détruite alors que la cellulose reste partiellement intacte, en laissant un enchevêtrement de fibres de cellulose blanchâtre[13].

Le tableau ci-dessous, récapitule quelques exemples de champignons de ce type de pourriture avec ses caractéristiques[12]:

La pourriture fibreuse «blanche »	
Exemples de champignon	Ses caractéristiques
<i>Le Polypore des caves, Donkioporia expansa</i>	-un taux d'humidité assez élevé : 35à 50% ; -une température optimale se situe autour de 28°C avec un maximum à 35°C; -attaque tout les bois feuillus « ex : le chêne » ;
<i>Le Coriulos versicolor, Syn. Trametes versicolor</i>	- l'humidité optimale pour son développement se situe autour de 40% -La température adéquate varie entre 25 à28 °C, - attaque les bois feuillus « ex : le chêne, le Hêtre »;

Source: CTBA 2000 [https://fr.wikipedia.org/wiki/Chaetomium\\_globosum](https://fr.wikipedia.org/wiki/Chaetomium_globosum)

### II.3.1.1.3. La pourriture molle

Ce sont des champignons lignivores, sauf qu'ils appartiennent à la classe des Ascomycètes, ils dégradent particulièrement les bois feuillus, mais également les résineux de manière moins virulente. Ils consomment les polysaccharides, la lignine restent par ailleurs intacte.

Le champignon le plus rependu pour ce type, est *le Chaetomium globosum Kunze*, qui peut se développer même dans des bois saturés d'eau, (humidité optimum se situe autour de 60% avec une température variable)[14].

### II.3.1.2. Champignons lignicoles agents de discoloration

Ces champignons appartiennent à la classe des Ascomycètes, ce qualificatif ne rend pas compte de l'action du champignon sur la matière ligneuse à savoir un développement sans dégradation des constituants cellulosiques et de la lignine, ils provoquent seulement une coloration et un désordre esthétique, Ils n'engendrent pas de détérioration des propriétés mécaniques[15]. On distingue le bleuissement primaire et secondaire.

Bleuissement primaire : « Moisissures » se développent en surface, de coloration bleue à noire. Conditions de développement: Température: 15 - 40 °C. Humidité du bois: > 25 %.

Bleuissement secondaire : se développent sur les bois non traités ou vernis exposés aux intempéries (menuiseries extérieures, bois séché lentement)

- Agent d'échauffure des bois

L'échauffure du bois est provoquée par une attaque enzymatique du bois comparable à celle de la pourriture blanche. Il se développe dans les arbres feuillus et résineux. Elle se présente sous forme de tâches plus ou moins petites blanchâtres, jaunâtres, rougeâtres ou brunâtres suivant la nature du bois ou l'espèce du champignon, ce dernier appartient à la

famille des champignons basidiomycètes de genre *Stereum*, qui se développent à un taux d'humidité très élevé, supérieur à 80 %, et une température optimale entre 25 et 28 °C.

Les principaux représentant des échauffures sont : *Stereum purpureum*, c'est le plus important et le plus fréquent, vient ensuite *Stereum hirsutum* et *Stereum sanguinolentum*[16].

### II.3.2. Insectes

#### Insectes du bois frais

Les « vrais » Insectes xylophages, attaquent le bois vivant ou malade ou récemment abattu dit « bois frais » en creusant des galeries dans l'aubier ou le duramen ; certains cependant restent sous l'écorce. On peut citer les bostryches, le platype et le sirex.

#### Insectes du bois sec « bois en œuvre »

Il faut y ajouter ceux qui consomment le « bois sec » (charpentes, poutres, meubles...) ou Insectes domiciliaires (Capricornes des maisons...). Les plus connus sont le criocéphale, l'héséphane, les lyctus et les vrillettes.

#### Termites

Les termites sont les agents les plus destructeurs du bois sec, parfois surnommés fourmis blanches, sont des représentants de l'ordre des blattoptères, bien qu'on ait longtemps considéré qu'ils constituaient les seuls représentants de l'ordre des isoptères qui compte environ 281 genres et 2 600 espèces[17]. Ce sont des insectes sociaux, qui vivent au sein de colonies hiérarchisées et organisées en castes. Ils se rencontrent surtout dans les pays chauds, où certaines espèces construisent de grands nids en terre mâchée, les termitières, caractéristiques des plateaux tropicaux[18]. Les termites appartiennent au règne animal, à l'embranchement des arthropodes, à la classe des insectes et à l'ordre des isoptères[19]. Ils sont répartis en trois catégories : les termites souterrains (*Reticulitermes sentonensis*, *Heterotermes tenuis*, *Coptotermes testaceus...*), les termites des bois secs (*Cryptotermes brevis*, *Kalotermes flavocollis...*), et enfin les termites des bois humides[20].

### II.3.3. Bactéries

Les bactéries anaérobies se trouvent souvent dans les bois saturés en eau, la dégradation est très lente comparée à celle des champignons. Les bactéries creusent de véritables tunnels dans la paroi S2, ainsi ils ont un effet majeur sur les propriétés de la perméabilité.

### II.3.4. Térébrants marins

Les térébrants marins sont des organismes xylophages, qui sont les Mollusques et les crustacés. Les Mollusques sont les plus destructifs, sont désignés sous le terme de Tarets, et chez les crustacés on trouve les Limnorias et les chélurans[20].

#### II.4. Les classes de risque biologique (classes d'emploi)

Les bois utilisés dans la construction doivent avoir une durabilité naturelle ou conférée par un traitement préventif contre les agents de dégradation biologique (insectes, champignons...) ou abiotique liés aux contraintes environnementales (climat, température, humidité ...).

En fonction de ces risques, on définit le temps de service de chaque construction en bois, qui est résumé par la norme européenne NF EN 335-1 [21]. Elle décrit cinq classes d'emploi, vient ensuite la norme NF EN 335-2 [22] qui décrit surtout les classes d'imprégnabilité. Par exemple, la classe 1 correspond à une très faible durabilité naturelle. Les risques d'attaque biologique sont en fonction de la localisation et de l'exposition du bois. Connaître la classe d'emploi permet de déterminer l'essence à durabilité naturelle (sans traitement) ou à durabilité conférée (avec traitement de préservation) à utiliser. Le tableau (4) nous détermine la classe d'emploi de l'ouvrage.

Tableau 4. Classe de risque d'attaques biologiques et classe d'emploi [22]

Classes d'emploi	Situations de service	Humidité	Agents de dégradation	Exemple d'emploi
1	A l'intérieur sous abri	6% < H% < 12%	-Des insectes à larves xylophages et termites. « Coléoptères foreurs du bois »	Parquet, escaliers intérieur, portes
2	A l'intérieur ou sous abri, Bois sec mais dont l'humidité ambiante élevée occasionnelle	12% < H% < 20%	Des insectes à larves xylophages, des termites et des champignons de surface (discoloration et pourriture).	Charpente, ossatures correctement ventilées en service
3	3A Bois soumis à une humidification occasionnelle sur des périodes courtes (quelques jours), Conception permettant l'évacuation rapide des eaux	Humidité occasionnelle	Des insectes à larves xylophages, des termites et des champignons de surface (discoloration et pourriture).	Toutes pièces de construction ou menuiseries extérieures verticales soumises à la pluie : bardages, fenêtres... pièces abritées mais en atmosphère condensant
	3B Bois soumis à une humidification fréquente sur des périodes significatives (quelques semaines) Conception ne permettant pas une évacuation rapide des eaux	Humidité fréquente		
4	A l'extérieur en contact avec le sol et/ou l'eau douce	H% > 20%	Des insectes à larves xylophages, des termites et des champignons de surface (discoloration et pourriture molles)	Bois horizontaux en extérieur (balcons, coursives...) et bois en contact avec le sol ou une source d'humidification prolongée ou permanente
5	Bois en contact permanent avec l'eau de mer	Humide en permanence	Des insectes, de la pourriture et des térébrants marins	Piliers, pontons, bois immergés

En fonction de son utilisation, en structure, en vêture, ou encore en terrasse, chaque essence a une durée de vie plus ou moins importante. Celle-ci est fonction de son exposition aux agents climatiques mais également de sa durabilité naturelle, c'est-à-dire sa résistance naturelle aux attaques de différents micro-organismes.

Pour savoir, si le traitement du bois est nécessaire, il convient de déterminer la classe d'emploi du bois mis en œuvre ainsi que sa durabilité naturelle. Le schéma ci-dessous résume la démarche pour le choix d'un bois naturellement durable ou traité

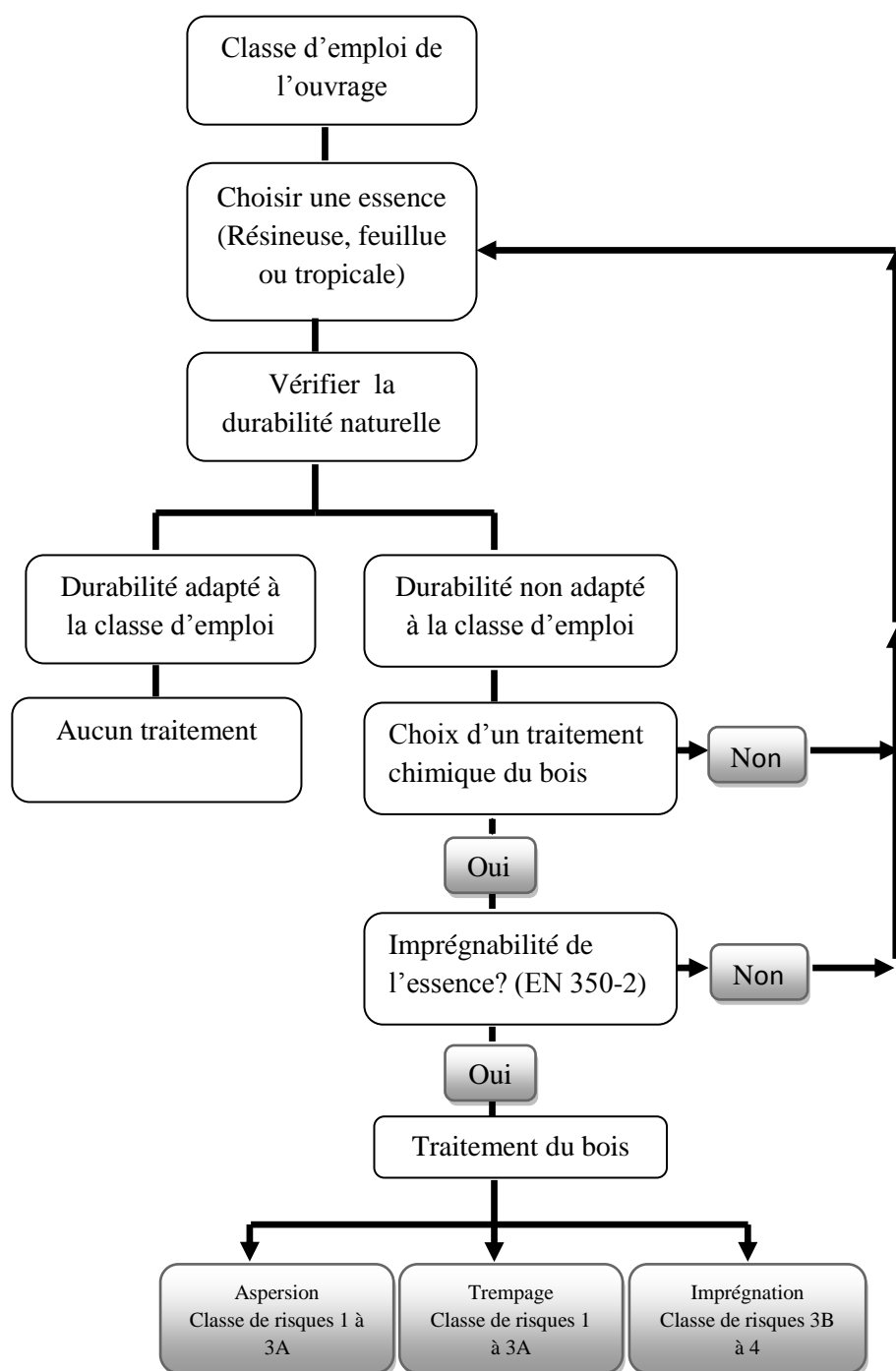
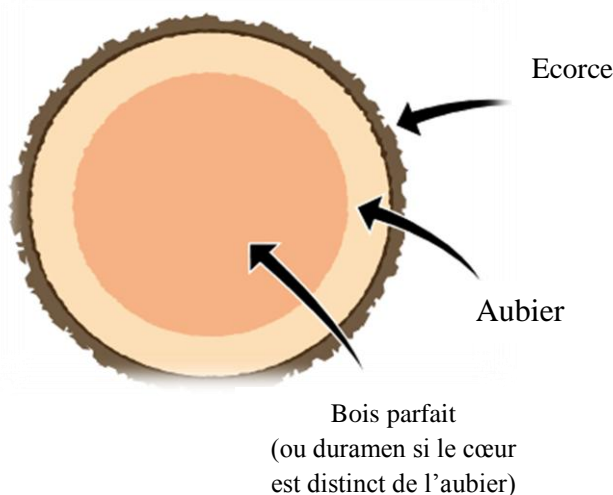


Figure 10. Méthodologie à suivre pour le choix de la préservation du bois

#### II.4.1. La durabilité naturelle du bois

La « durabilité naturelle » d'un bois ne concerne que le cœur du bois, ou le duramen. L'aubier est par définition non durable. L'ensemble des informations relatives à la durabilité des essences est disponible dans la norme NF EN 350-2.



Chaque essence de bois a sa résistance propre selon l'agent biologique concerné ; c'est la durabilité naturelle intrinsèque. Elle est définie dans la norme EN 350-1: b« *Résistance intrinsèque du bois aux attaques d'organismes destructeurs* »

Plusieurs systèmes de classification sont utilisés dans la norme EN 350 pour décrire la durabilité naturelle du bois. La norme EN350-2 définit une classification à cinq niveaux contre les champignons lignivores, à deux niveaux contre les Coléoptères, et trois niveaux contre les termites et les térébrants marins. Le tableau (5) rassemble les classifications de cette norme.

Tableau 5. Classification de la durabilité naturelle selon la norme EN 350-2

Agents de dégradation	Classe de durabilité naturelle	Description
Champignons lignivores	1	Très durable
	2	Durable
	3	Moyennement durable
	4	Faiblement durable
	5	Non durable
Insectes	D	Durable
	S	Sensible
Termites et térébrants marins	D	Durable
	M	Moyennement durable
	S	Sensible

Il existe une relation évidente entre les classes d'emploi et la durabilité naturelle du bois (dans quelle classe de risque peut être utilisée selon ses propriétés de durabilité naturelle intrinsèque). La norme EN 460 a raccordé les classes de la durabilité (NF EN 350) avec les classes de risque.

Tableau 6. Relation entre les classes d'emploi et la durabilité naturelle (extrait de la norme EN 460).

Classe de risque	Classe de durabilité				
	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	(0)	(0)
3	0	0	(0)	(0)- (x)	(0)- (x)
4	0	(0)	(x)	x	X
5	0	(x)	(x)	x	X

0	Durabilité naturelle suffisante
(0)	Durabilité naturelle normalement suffisante, mais pour certains emplois un traitement de préservation peut être recommandé.
(0)-(x)	La durabilité naturelle peut être suffisante, mais en fonction de l'essence de bois, de sa perméabilité et de son emploi final, un traitement de préservation peut s'avérer nécessaire.
(x)	Le traitement de préservation est normalement recommandé, mais pour certains emplois la durabilité naturelle peut être suffisante.
x	Traitement de préservation nécessaire.

#### II.4.2. Duraminisation du bois, processus de la durabilité naturelle

Les essences à aubier et duramen distincts (chêne, robinier, châtaignier, pins ...) ont pour la plupart une durabilité naturelle du cœur (exception faite de l'orme). Cela est dû à la forte présence de tanins et de substances phénoliques dans les cernes du duramen qui jouent le rôle de biocides naturels. De ce fait, leurs utilisations purgées de leurs aubiers peuvent atteindre la classe 3 ou 4 et ceci sans les traiter.

D'autres essences en revanche, ne présentent aucune résistance naturelle contre les attaques d'insectes xylophages ou de champignons. C'est notamment le cas pour les bois à aubier et bois parfait non distincts (bouleau, épicéa, sapin, hêtre...). Ces essences nécessiteront un traitement de préservation si on souhaite les utiliser en construction.

L'aubier est le bois vivant conducteur de la sève brute, c'est le premier tissu formé qui contient l'amidon. D'une manière générale, il est de largeur variable selon les espèces, de couleur clair, peu dense et perméable.

Le bois parfait est la partie interne, formé à partir des cellules les plus anciennes, qui ne comportent plus de cellules vivantes. Il s'agit d'un bois dur, compact, dense, et sec.

La transformation progressive de l'aubier en bois de cœur (bois parfait), est appelée duraminisation, il se traduit macroscopiquement par une différenciation de couleur duramen/aubier. En revanche parfois il s'en distingue, en particulier par une couleur plus foncée, on parle alors de bois parfait duraminisé ou duramen.



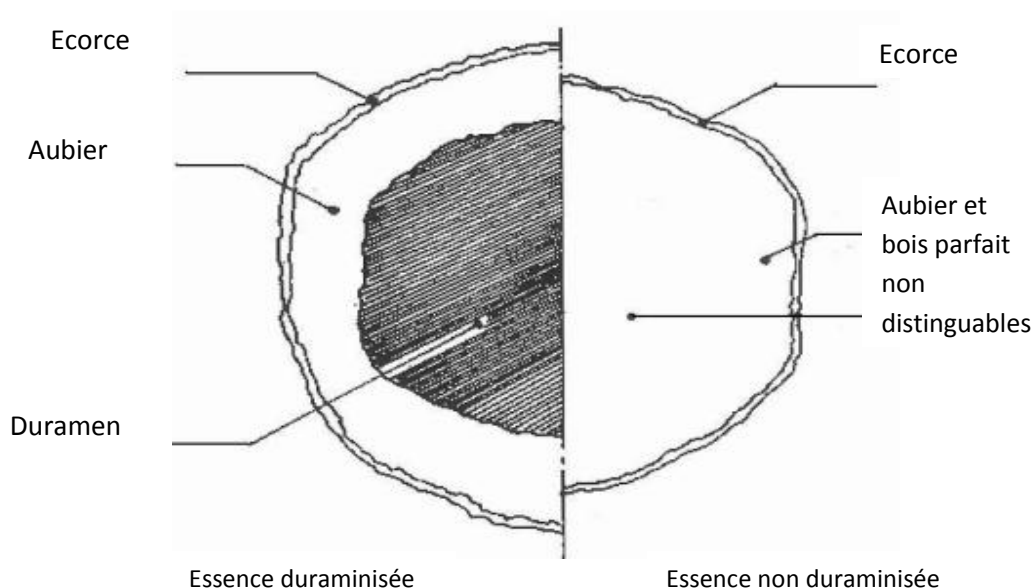


Figure 11. Schématisation de la différenciation aubier- bois parfait sur une section transversale

La duraminisation est un phénomène physiologique au cours duquel les cellules d'aubier se transforment en cellules de duramen. Cela peut se traduire par une évolution morphologique de la cellule (formation de thyllés, dépôts de tanins et d'oléorésines), et par une évolution des compositions chimiques suite à la disparition de certaines substances comme l'amidon et à l'incrustation dans les parois de nouvelles substances minérales (calcium, silice) et autres (tanins, alcaloïdes), qui rend les parois difficilement pénétrables tandis que les tanins sont toxiques pour les agents biologiques. Par contre, le bois parfait non duraminisé possède la même fragilité que l'aubier face aux attaques biologiques[23].

Ce phénomène n'est pas observable dans toutes les essences. Il peut nécessiter 20 ans chez le chêne, 3 ou 4 ans seulement chez le châtaignier et n'a pas lieu chez le hêtre et le sapin. Le tableau suivant récapitule les principales essences de chaque type.

Tableau 7. Principales essences à bois parfait duraminisé et non duraminisé

	Essences duraminisées	Essences non duraminisées
Résineux	Pins, Douglas, Red Cedar et Mélèze	Sapins, Epicéa et Hemlock
Feuillus	Chêne, Châtaignier, Robinier, orme et Noyer	Hêtre, Peuplier, bouleau et Tilleul
Feuillus Tropicaux	Padouk, Okoumé, Sapelli et Niangon	Ilomba, Samba et Ako

### II.4.3. Facteurs influençant la durabilité naturelle

De manière générale, la durabilité naturelle de chaque essence est influencée par plusieurs facteurs liés à la sylviculture.

#### *Le site de croissance de l'arbre*

Le site de croissance a peu d'influence sur la durabilité naturelle, une petite différence était remarquée sur le pin sylvestre de Scandinavie, désigné sous le terme commercial de « Sapin rouge du Nord », qui n'est pas plus durable que le pin sylvestre qui a poussé dans le sud de l'Europe. Il en est de même pour le Teck qui pousse en Asie, est très durable que celui qui provient d'autres pays du globe.

#### *Densité du bois*

Les bois denses ont une durabilité plus faible que les bois dont la texture est faible. Ce facteur n'influence que sur la résistance aux termites, qui consomment le bois initial, et aux térébrants marins.

#### *Age de l'arbre*

C'est à la base de l'arbre que le bois est le plus durable, de même la concentration en extrait biocide est maximale chez les arbres âgés[24].

#### *Condition d'exploitation*

Selon la saison : en printemps, la période de végétation, le bois a une susceptibilité de dégradation par les agents biologiques importante car, le tissu ligneux synthétise des quantités importantes d'hydrates de carbone. En hiver, les températures plus froides ne permettent pas un développement actif des agents biologiques.

Selon l'état de bois : fraîchement coupé pendant la période d'exploitation, traité par la chaleur, ou une humidification excessive peuvent affecter sur la durabilité.

### II.4.4. Production biocides naturels

Ce sont des substances toxiques pour les agents biologiques, elles sont de nature phénolique, on les retrouve chez les essences qui présentent un duramen vrai, elles appartiennent à quatre groupes[25-28]:

- Les *polyphénols* : les stilbènes et les flavonoïdes, ces substances ont été extraites et analysées. Les stilbènes sont trouvés dans les duramens de Pin (pinosylvine) et d'Eucalyptus, les flavonoïdes sont synthétisés dans le duramen du Chêne la quercitine et celui de Douglas, la taxifoline.
- Les *terpénoïdes* sont des hydrocarbures végétaux  $(C_5H_8)_n$ , Des monoterpènes sont synthétisés au niveau des canaux résinifères de certains conifères, (pinène de duramen de Pin) et quinone (tectoquinone du Teck).
- Les *tropolones* sont des dérivées des terpénoïdes. Ils sont spécifiques de la famille des Cupressacées comme le Thuya ou le Red Cedar.

- Les tannins sont des composés importants, que l'on trouve dans l'écorce et le bois de nombreuses essences. Ils sont connus à l'origine pour soigner les problèmes cutanés, par leur pouvoir précipitant et stabilisant des protéines de la peau. De même, leur utilisation est bien connue des industries de tannerie. Il existe les tanins hydrolysables (gallotanins et ellagitanins comme la castalbine extraite du Châtaigner) principalement présents dans les Feuillus et les tanins condensés trouvés à la fois chez les résineux et feuillus.

L'application de biocides naturels est apparue intéressante par plusieurs chercheurs cependant pour obtenir un résultat acceptable, il faudrait des concentrations très élevées, de plus leurs extractions sont difficiles ainsi les rendements sont faibles. En dehors du bois les extraits phénoliques sont instables et oxydables à l'air perdant leur toxicité.

## II.5. la durabilité conférée au bois

Il est possible de modifier la durabilité naturelle d'une essence lorsqu'elle est insuffisante par un traitement, afin de lui conférer une protection suffisante et adaptée à l'utilisation. L'application d'un traitement de préservation pourra assurer la protection nécessaire, à condition que la pénétration de produit de préservation dans le bois soit suffisante et qui peut aussi être associée à un traitement de finition qui préserve de la dégradation physique du bois (humidité, UV, etc.), ce traitement apporte uniquement une protection superficielle.

En général, le choix du produit dépend d'une caractéristique essentielle en préservation du bois qui est l'imprégnabilité. La norme NF EN 350-2 définit 4 classes d'imprégnabilité qui indique la profondeur de pénétration d'un traitement d'ordre esthétique qui ne peut pas se substituer au traitement de préservation.

Tableau 8. Classes de l'imprégnabilité selon la norme NF EN 350-2

Classe d'imprégnabilité	Description
1	Imprégnable
2	Moyennement imprégnable
3	Peu imprégnable
4	Nom imprégnable

Nous présentons dans un premier temps la terminologie utilisée dans la préservation du bois, les produits de traitements couramment utilisés dans l'industrie avec une chronologie d'utilisation. Ensuite, nous détaillerons les différents types de produits de préservation en fonction des constituants. Nous concluons cette section en présentant les procédés de traitement de préservation en fonction de la classe de risque.

### Les produits de traitement du bois regroupent :

- *les produits de préservation du bois* : Ils contiennent au moins un agent biocide actif (pesticide) appliqué à la surface du bois, ou introduit à cœur, de façon à augmenter les caractéristiques de durabilité du matériau par rapport aux dégradations biologiques du bois (champignons, insectes).

- *les produits de traitement de la surface du bois (traitement de finition)* : Ils comprennent les vernis, les huiles, les cires, les laques et les lasures... Ils sont utilisés pour protéger le bois de l'humidité, des intempéries, des rayons UV, de l'usure mécanique, de la saleté, ou pour l'embellir par un effet décoratif.

On trouve dans la gamme de traitement plusieurs spécifications : traitement préventif ou curatif, intérieur ou extérieur, pour bois neuf ou attaqué...

- Traitement préventif

Le traitement préventif est une opération de traitement appliqué sur un bois sain vu qu'il est susceptible d'être attaqué par les insectes ou les champignons. De façon générale, si le taux d'humidité de la région est élevée il est important d'appliquer un traitement préventif aux éléments bois de la construction. Un traitement préventif garantit une protection pour une période d'environ 10 années mais variable, selon les produits.

- Traitement curatif

Le traitement curatif est une opération de traitement appliquée sur un bois attaqué, visant à éliminer tout agresseur (champignons ou insectes), aussi à supprimer toutes les causes d'humidité.

#### II.5.1. Historique des traitements conservateurs des bois

Les traitements conservateurs des bois sont aujourd'hui nombreux. Ils se font par application externe, imprégnation, chauffage...

Ce sont des traitements :

- physiques (séchage, réification),
- par des produits naturels (huile de lin, vernis de gomme-laque, cire d'abeille, colophane...)
- par des produits chimiques (pesticides à base de métaux lourds (cuivre, arsenic, chrome, plomb...) et/ou de molécules synthétisées par la chimie organique)

Certains de ces produits posent des problèmes non résolus de toxicité, dont les déchets sont parfois à considérer comme déchets toxiques.

Anciennement, un bon séchage, des techniques de trempage du bois dans l'eau, un traitement à l'huile de lin (naturellement siccatif), à la chaux ou au sang de bœuf étaient appliqués au bois comme traitement de préservation.

On ne sait pas exactement à quel siècle la préservation du bois a débuté, Auparavant au XVII<sup>e</sup> siècle, la Suède fait un commerce florissant de son goudron de Stockholm (commercialisé sous le nom de Stockholm Tar), il est obtenu par carbonisation du pin à l'abri de l'air puis distillation. C'est un produit visqueux et collant de couleur noire qui a été

largement utilisé pour la protection des bois de marine, comme antiseptique vétérinaire, voir comme remède à usage interne pour l'homme.

Au XIX<sup>e</sup> et début du XX<sup>e</sup> siècle des produits toxiques biocides tels que la céruse de plomb ou du minium de plomb (très toxiques, non-biodégradables et non-dégradables) ont été efficacement testés, mais ils se sont montrés trop dangereux pour les usagers ou les animaux en contact avec ces bois traités.

La seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, une dizaine de produits commerciaux sont apparus sur le marché suite à l'avènement de l'industrie chimique et des biocides.

## II.5.2. Chronologie des principaux produits chimiques de préservation du bois

- créosote

La créosote est le distillat de goudron de houille, constitué d'hydrocarbures polycycliques. On distingue des créosotes légères correspondant à la fraction distillée en premier et des créosotes lourdes correspondant aux produits distillés à plus haute température[30]. Dans de nombreux pays l'usage des traverses traitées est limité (ex en France depuis un arrêté du 2 juin 2003 interdit la vente et l'usage des traverses de chemin de fer pour les particuliers) ; Mais ces produits ont pu pour certains industriels être légalement encore utilisée pour le traitement du bois (si contenant une concentration de benzo-a-pyrène (B[a]P), et de phénols extractibles ne dépassant pas certains niveaux).

- Le pentachlorophénol (PCP)

Le pentachlorophénol (ou PCP) est un produit toxique et tératogène pour l'être humain, longtemps utilisé comme fongicide. De plus, les bois traités aux PCP sont exposés à des classes d'emplois élevées, et en leur fin de vie sont considérés comme des déchets dangereux[29].

- Arséniate de cuivre chromé (ou chromaté) ou CCA

Ce sel breveté en 1934 s'est montré très efficace et résistant contre les champignons, les insectes comme les termites et même les térébrants marins, [30] mais très toxiques (et cancérigène) ; de plus, le traitement par CCA est susceptible d'avoir de graves effets directs et indirects sur les ressources halieutiques et les écosystèmes touchés. Les personnes exposées aux fumées issues de ces bois en cas d'incendie ou de brûlage volontaire vont avoir par la suite de pathologies graves (dont neuropathies et problèmes neuropsychologiques)[31, 32].

- L'arséniate de cuivre ammoniacal (ACA)

La combinaison de l'arsenic et du cuivre en arséniate de cuivre ammoniacal (l'ammoniaque facilite la pénétration dans le bois) rend ce produit efficace contre les champignons, les bactéries et les insectes, mais ces deux composants sont très écotoxiques et non dégradables. Ils posent notamment problème en fin de vie de l'objet[30].

- L'arséniate de cuivre et de zinc ammoniacal (ACZA)

Ce produit a été introduit au Canada pour remplacer l'arséniate de cuivre ammoniacal (ACA). L'ACZA pénètre beaucoup mieux dans le bois de sapin de Douglas que le CCA grâce à l'ammoniaque, qui joue le rôle de solvant.

- Produits de préservation à base de borate de sodium

Les borates de sodium ne peuvent pas actuellement remplacer le CCA ou les produits à l'huile car, ils sont mal fixés dans le bois. Mais ils conviennent pour les bois non exposés aux pluies, ayant aussi un rôle retardateur de feu.

- Produits de préservation sans arsenic ni chrome

Ce sont souvent des produits à base d'éthylamine de cuivre (écotoxique pour de nombreux organismes aquatiques) additionnés de co-biocide(s) à faible toxicité pour les mammifères. Ex : l'ACQ (composé quaternaire de cuivre aminé) et le CBA (composé de type azole de cuivre et de bore), utilisés en Europe et au Japon depuis plusieurs années.

- Produits biocides strictement organiques

Ces alternatives sont en cours de développement et bien que parfois plus coûteux, ils présentent l'avantage d'être efficaces et utilisables à faible dose, mais ils doivent être renouvelés car ils sont biodégradables dans le sol et ils le sont aussi dans le bois. Certaines huiles essentielles naturelles sont étudiées comme modèles.

Le principe de la préservation de bois contre les agents biologiques consiste:

- à introduire un produit efficace.
- en quantité suffisante.
- dans la zone de vulnérabilité du bois.
- pendant la durée de service de la pièce de bois.

### II.5.3. Les différents types de produit de préservation

La préservation chimique a pour vocation d'agir préventivement ou curativement contre les attaques d'insectes et de champignons détruisant le bois ou agissant sur la qualité du bois. En fonction de leur composition, on distingue les produits de préservation hydrosolubles, les produits huileux et les produits à base de solvant[12].

- Produits hydrosolubles

Ce sont des sels hydrosolubles qui comprennent du chrome, cuivre, bore et de l'arsenic (CCA ou CCB), ils sont appliqués en autoclave et les seuls produits de classe 4 et 5.

- les produits en solvants organiques dérivés du pétrole

Ils sont essentiellement utilisés dans l'industrie, ils sont très stable et pénètrent bien dans le bois, leur utilisation doit se faire dans le cadre d'un processus parfaitement contrôlé afin d'éviter des risques pour la santé de l'homme.

Exp : la créosote (traverses de chemin de fer, poteaux)

- les produits hydro-dispersables

Ce sont des huiles en émulsion dans l'eau, elles sont en général stables et pénètrent dans le bois aussi bien que les produits en solvants organiques. Ils répondent aux exigences des classes de risque 1 et 2.

L'utilisation et l'application de ces produits doivent être conformes aux règlements d'hygiène et de sécurité.

#### II.5.4. Les procédés de traitements

La mise en œuvre des produits de traitements préventifs du bois avant son utilisation peut se faire par différents procédés assurant la pénétration et la fixation du produit, deux types de procédés existe : les traitements de surface et les traitements en profondeur.

##### II.5.4.1. Les traitements de surface

Les procédés d'application en surface comme, le trempage court, la pulvérisation ou le badigeonnage sont statiques car l'absorption du produit par le bois est en fonction de la capacité d'absorption naturelle de l'essence, de la qualité d'application et de la qualité de surface (bois raboté ou brut). Elles sont utilisées principalement pour des emplois en classes 1 ou 2 et parfois en classe 3 selon les conditions d'exposition[33].

Trempage court : immersion complète des pièces de bois supérieur à 3 minutes avec une pénétration du produit par capillarité.



Figure 12. Le trempage court des bois (<http://www.a2c-fr.com>)



Badigeonnage :

Aspersion sous tunnel (ou pulvérisation), comme il peut être s'effectuer au pinceau, à la brosse, au rouleau ou au pistolet portable sur toutes les faces de la pièce de bois[33].

Le badigeonnage est destiné pour le traitement préventif, il a le même principe que le trempage court avec les mêmes types de produits qui sont utilisables en mélange avec des solvants pétroliers (gasoil, pétroles,...) ou avec l'eau (produits hydrodispersables) soit que les conditions d'application sont difficiles à contrôler.

#### II.5.4.2. Traitements en profondeur par autoclave

**Injection** : Cette technique est utilisée pour le traitement préventif ou curatif, elle demande un équipement spécial, l'injection se fait par des aiguilles ou des mèches creuses enfoncées dans le bois[32].

**Autoclave double-vide** : l'opération consiste à faire un trempage à pression atmosphérique, un vide est appliqué pendant 30 minutes ensuite le produit est introduit pendant 3 minutes puis un vide final pour ré-essuyer le bois[34].

**Autoclave vide-pression** : vide initial pour chasser l'air des cellules, puis pression pour faire pénétrer le produit dans le bois jusqu'à saturation. Ce procédé est effectué dans un autoclave soumis à des opérations de vide et de pression. Le procédé BETHELL appelé « à cellules pleines » et le plus couramment utilisé[34].



Figure 13. Station industrielle d'imprégnation du bois (<http://www.vercors-piscine.com/>  
<http://www.protacouest.com/presentation/> )



Tableau 9. Produits et procédés de traitement de préservation en fonction de la classe de risque.

Classes de risques	Nature des produits	Procédés de traitement
1 et 2	Produits en phase solvant	Trempage court
		Aspersion sous tunnel
		Autoclave double-vide
		Badigeonnage
	Produits hydrodispersables	Trempage court
		Aspersion sous tunnel
Badigeonnage		
3	Produits en phase solvant	Trempage court
		Autoclave double-vide
	Produits hydrosolubles (type CCB)	Autoclave vide-pression
4	Produits hydrosolubles (type CCB)	Autoclave vide-pression
	Produits huileux naturels (créosote)	Autoclave vide-pression
5	Produits hydrosolubles (type CCB)	Autoclave vide-pression

NB : l'autoclave vide-pression est aussi appelé « injection à refus » ou procédé de BETHELL

Le choix du traitement et son mode d'application sont choisis en fonction de la classe d'emploi à laquelle le bois est destiné et de la nature du bois, celle-ci est déterminée par l'humidité à laquelle le bois est exposé et de la fréquence d'exposition aux agents de dégradation.

Actuellement, la recherche sur les produits de préservation du bois s'oriente vers la production de molécules ciblées et le plus possible respectueuse de la santé et de l'environnement.

### III. Généralités sur le vieillissement du bois (agents abiotiques-climatiques)

Le vieillissement d'un matériau peut être défini comme un processus qui modifie les propriétés physico-chimiques de celui-ci, l'interaction physique pure se traduit par le gonflement ou la plastification du matériau[35]. Tandis que le vieillissement chimique correspond à des processus de dégradation soit par des réactions d'addition, d'hydrolyse ou oxydation[36].

Par définition, on appelle vieillissement toute altération lente et irréversible d'une ou plusieurs propriétés d'un matériau résultant de son instabilité propre ou de l'effet de son environnement (eau, lumière, oxygène, température, pollution, . . .)[35, 37].

Dans ce contexte, nous avons suivi cette modification en utilisant des essais de vieillissement accéléré.

#### III.1. Facteurs de la photodégradation

Les substances organiques sont dégradées sous l'effet de plusieurs facteurs environnementaux, en particulier :

- de rayonnement solaire,
- l'oxygène,
- de l'eau (humidité de l'air, rosée, précipitations),
- de la température,
- de la pollution.

### III.1.1. le rayonnement solaire (la lumière UV)

Lorsque un morceau de bois est exposé à la lumière solaire, le premier effet apparaît est le changement de la couleur, les rayons ultraviolets sont responsables de la photodégradation du bois. On remarquera qu'après passage à travers l'atmosphère, très peu de rayons ultraviolets atteignent la terre, ils sont situés sur la bande comprise entre 300 et 380 nm. La perte visible du spectre est comprise dans la bande de 380 à 780 nm. Elle a une pointe située entre 500 et 600 nm. Le spectre continue vers les grandes longueurs d'onde via les infrarouges qui s'éteignent finalement vers 2500 nm. On peut voir très rapidement qu'environ la moitié de l'énergie solaire est située dans le visible et l'autre moitié dans l'infrarouge.

L'énergie associée à ce rayonnement est suffisante pour rompre certaines liaisons chimiques présentes dans la figure 14.

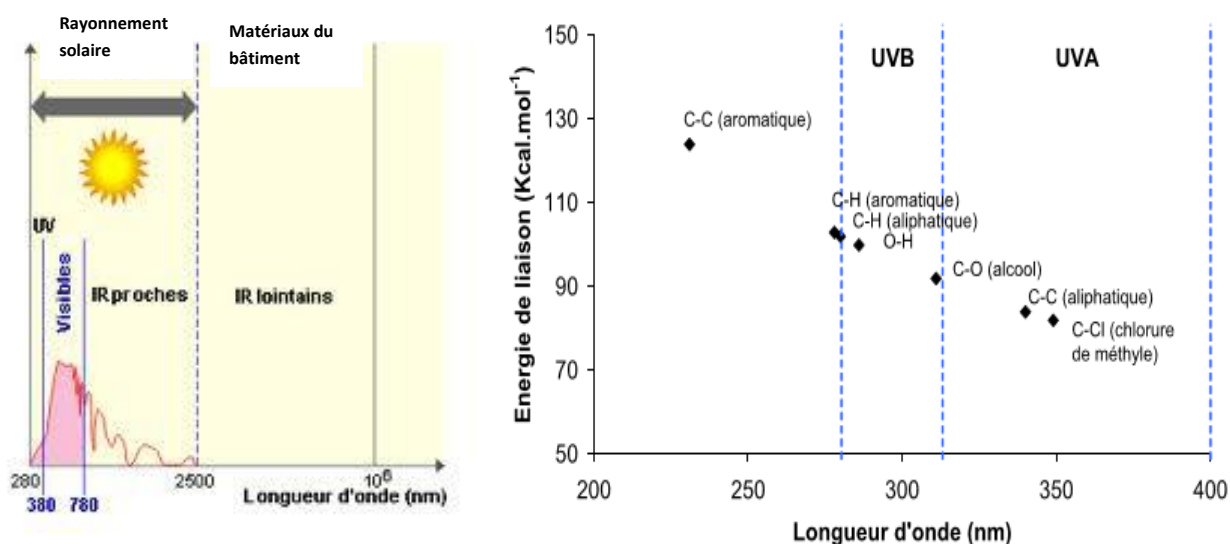


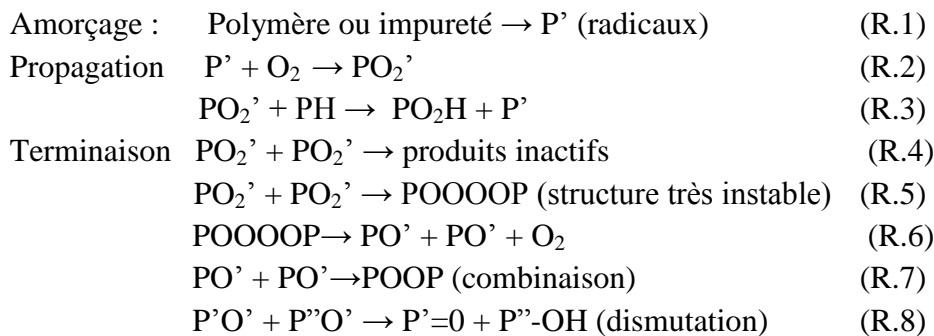
Figure 14. Le spectre d'émission solaire avec énergies de liaison et longueurs d'ondes de certaines liaisons chimiques[38]

L'exposition de plusieurs matériaux organiques aux radicaux lumineuse et surtout la lumière UV provoque la formation des radicaux libres qui vont réagir avec les chaînes de polymère, provoquant des réactions de dégradation[39], les matériaux concernés par ces dommages de dégradation : peau, papier, vernis, lasures, plastiques, textile...

### III.1.2. L'oxygène

L'action de l'oxygène est un élément important dans les réactions de vieillissement. Le bois recouvert d'un revêtement ne subit pas de photo-oxydation suite au rayonnement UV, mais seulement une photolyse, car le revêtement agit comme une barrière protectrice face à l'oxygène[40, 41].

Les processus d'oxydation sont de type radicalaire qui a lieu habituellement dans les couches superficielles en contact avec l'oxygène. Les divers mécanismes à l'origine de l'oxydation sont schématisés ci-dessous[37, 42-45]:



L'amorçage (R.1) peut suivre la voie thermique ou la voie photochimique : thermolyse les liaisons les plus faibles du matériau, ou photolyse des espèces photoréactives (chromophores phénoliques de lignines dans le cas du bois). L'étape de propagation (R.2) se fait très rapidement, sauf dans un cas où l'oxygène ferait défaut. La réaction (R.3) est une étape d'arrachement d'un atome d'hydrogène sur le polymère, cette dernière qui gouverne la cinétique du mécanisme radicalaire de l'oxydation. Des mécanismes de terminaisons (R.4 à R.8) variés sont possibles : Toutefois, il est important de constater que les réactions d'oxydation peuvent engendrer des composés instables comme les peroxydes (POOP) ou les hydroperoxydes (POOH) capables de produire de nouveaux radicaux libres (alkoxydes PO' ou hydroxydes HO') par l'entremise de l'énergie photonique. Les nouveaux radicaux formés pourront ensuite réamorcer la réaction radicalaire et ainsi maintenir la cinétique de photo-oxydation.

### III.1.3. La pollution

Les pluies d'acides (sulfuriques, nitriques) peuvent avoir une influence non négligeable sur le vieillissement, car en présence de la chaleur du rayonnement solaire se condense et ne s'évapore pas avec l'eau, il reste dans le film de rosée, sous forme de résidus de plus en plus agressifs par concentration[45].

### III.1.4. L'eau (Humidité)

L'eau agit de façon tout aussi complexe que les UV sur la dégradation des polymères. La dégradation peut être autant de nature physique que chimique suite à des périodes et

fréquences variables d'exposition à l'humidité, L'eau peut interagir sur le matériau sous différentes formes, par immersion totale, par condensation en surface, par le ruissellement de la pluie ou tout simplement interagir avec l'humidité ambiante. D'un point de vue chimique l'eau sous tous ses états induit des réactions d'hydrolyse avec le bois et le revêtement selon la réaction d'hydrolyse:



Les groupements -X-Y peuvent être soit latéraux, soit se trouve dans la chaîne principale du polymère qui entraîne dans ce cas une modification des propriétés mécaniques, lorsque le taux de renfort dépasse 40%, alors qu'à des taux de renfort voisins de 20%, ces propriétés restent inchangées[46].

### III.1.5. la température

Une élévation de la température influence sur l'évolution physico-chimique des polymères, elle agit sur les irrégularités structurales des polymères et provoque un durcissement de matériaux accompagné d'une perte de souplesse.

En effet, la température des échantillons n'est pas mesurée en vieillissement naturel. Les données de température qui sont fournies sont celles de l'air ambiant[48]. La température de surface d'un matériau est calculée suit à l'équation suivante :

$$T_s = T_a + (AI) / H \quad (2)$$

$T_s$  : température de surface du matériau.

$T_a$  : température ambiante de l'air.

$A$  : Absorptivité solaire.

$I$  : Energie solaire totale incidente

$H$  : Conductance thermique de surface (en  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ).

Les variations de température constituent un facteur de vieillissement des finitions. Roux et Anquetil[47] notent que la température du bois exposé au soleil, varie en fonction de la brillance et de la teinte de la finition. Ainsi, nous donnons ci-après l'exemple d'une finition de différentes couleurs appliquées sur du bois, exposé en été après midi pendant une heure. Les températures de surface suivantes sont relevées :

- 40°C pour une finition blanche, jaune ou orange ;
- De 60 à 70°C pour une finition grise, brune, rouge ou bleue ;
- De 70 à 80°C pour une finition noire ou bleue brillante.

On constate donc que les couleurs foncées se comportent comme des capteurs d'énergie solaire. Les couleurs claires au contraire réfléchissent les rayons solaires et de ce fait contribuent peu au réchauffement de la surface du bois. Pendant l'hiver cette température de surface peut descendre jusqu'à -50°C selon la situation géographique.

### III.2. Les agents anti-UV

La photo protection des matériaux peut être assurée par différents types de composants utilisés pour stabiliser les polymères face au rayonnement ultraviolet[49]. Ces agents agissent à différents stades du processus de vieillissement et se regroupent en quatre grandes familles :

### III.2.1. Absorbants ultraviolets :

Ce sont des composés organiques ou inorganiques stables ayant la capacité d'absorber sélectivement les radiations ultraviolettes de la lumière solaire (280-400 nm). L'énergie nocive du rayonnement ultraviolet est absorbée par ces composés et restituée sous forme de chaleur. Par contre, ces composés n'absorbent pas la lumière dans le domaine visible : ce sont des matériaux transparents.

L'addition de ces agents améliore la stabilité à la lumière du polymère mais également celle des colorants introduits et ils ralentissent le jaunissement. Pour obtenir un effet protecteur optimal, il faut qu'ils aient une bonne dispersion moléculaire[50-52]

### III.2.2. Antioxydants

Parmi tous les composés jouant le rôle d'antioxydant, il a été constaté que certains ions métalliques introduits en faible quantité ont une bonne efficacité. Ainsi, l'ajout de 50 ppm d'ions  $Mn^{2+}$  dans le polyamide avant le filage peut améliorer la tenue à la lumière jusqu'à des températures de 40-50°C. Pour protéger les fibres de polyamide à usage technique, on utilise des ions  $Cu^{2+}$ . Les ions métalliques sont introduites en faible quantité, moins de 75 mg d'ions  $Cu^{2+}$  par kilogramme de fibre.

Les phénols et amines à empêchement stérique (AES ou HALS: Hindered amine light stabilizer) sont des antioxydants efficaces[53] et de bons stabilisants jusqu'à 130°C[54]. Il existe des composés HALS de faible masse molaire qui migrent de l'intérieur du produit polymère à la surface et renouvellent ainsi en permanence sa protection. Ils ne peuvent être utilisés efficacement que pour des pièces épaisses[54].

### III.2.3. Pigments

Ce sont des absorbants ou fortement réfléchissants dans l'ultraviolet :

- Les noirs de carbone, sont de bons antioxydants et qui présentent également une forte absorption dans l'ultraviolet, ce qui les rend particulièrement intéressants quand la coloration noire est possible ;
- Les oxydes de titane sont des absorbants ultraviolets efficaces[55], mais ils induisent l'oxydation des milieux dans lesquels ils sont dispersés, provoquant la destruction superficielle des surfaces exposées à la lumière (photolyse) ;
- Pour les peintures de finition utilisées en couche extérieures, les pigments ont un rôle de colorant et de stabilisateur dans le temps[56].

### III.2.4. Inhibiteurs

Substances organiques capables de désactiver les états excités électroniques créés par les radiations ultraviolettes. Les principaux composés de ce type sont des complexes de nickel mais leur utilisation, ont été mises en cause par rapport à leur innocuité[57].

La plupart des agents stabilisants peuvent être introduits dans le bain de teinture avec le colorant. Cependant, le colorant doit être choisi avec attention pour avoir une stabilité maximum vis-à-vis des phénomènes photochimiques[58].

### III.3. Aspects macroscopiques de la photodégradation

#### *Variation de la couleur*

La couleur est propre à chaque espèce et susceptibles de changer au cours d'expositions aux différents agents d'altérations qui engendrent le vieillissement (le rayonnement solaire, l'eau, l'oxygène, etc.) ; comme elle peut être influencée dans une certaine mesure par l'âge du bois, la station, ou par la présence d'une anomalie.

La lignine est la principale responsable de ce changement de couleur car dans sa structure, elle possède des chromophores capables d'absorber dans le domaine visible, qui transforme la structure chimique et anatomique[59]. La dégradation se fait en surface sur des profondeurs variant de 0,05 à 2,5 mm et qui se traduit par une coloration grisâtre plus ou moins homogène ou par un jaunissement. Cette dégradation s'accompagne de perte de masse pouvant atteindre, selon l'essence de bois, 7 à 10% pour une exposition à l'extérieur de 3 années et par une érosion de surface plus marquée pour le bois de printemps que pour le bois d'été d'où l'apparition d'ondulations de surface[48].

Les revêtements eux aussi subissent des variations dans leur coloration, car ils sont également affectés par le vieillissement.

Grossièrement, les couleurs des bois se répartissent en cinq groupes[60]:

- les bois blancs, crème ou gris clair, du type *Carya* : charme, houx, érable sycomore, marronnier, *Celtis*, lierre, etc.;
- les bois jaune pâle, jaune citron, jaune d'or ou jaune brun clair, du type bouleau : *Elkova*, *Planera*, *Ficus*, *Liriodendron*, *Sophora*, *Citrus*, *Ailantus*, *Buxus*, *Evonymus*, *Ligustrum*, *Paulownia*, *Sambucus*, etc.;
- les bois brun clair, brun verdâtre, brun foncé, brun violacé ou noirs, du type *Juglans* : *Quercus*, *Castanea*, *Morus*, *Laurus*, *Robinia*, *Cytisus*, *Cercis*, *Hippophae*, *Eieagnus*, *Myrtus*, *Olea*, *Catalpa*, *Diospyros*, etc.;
- les bois rosâtres ou rougeâtres, clairs, du type *Alnus* : *Cerasus*, *Sorbus torminalis*, *Gymnocladus*, *Gleditschia*, *Cornus*, etc. ;
- les bois rose vif, rouge, brun rosé, brun rougeâtre, du type *Ostrya* : *Liquidambar*, *Sorbus domestica*, *Pirus*, *Ceratonia*, *Melia*, *Pistacia lentiscus*, *Rhus pentaphylla*, *Zizyphus*, *Arbutus*, *Erica*, *Viburnum tinus*, etc.

La couleur d'un matériau peut être mesurée et quantifiée à l'aide d'appareils spécifiques, selon plusieurs méthodes.

#### *Variation de la brillance*

En général sur une surface miroir, la lumière incidente est réfléchiée dans la direction de la réflexion totale, avec des angles égaux, tandis que pour les surfaces rugueuses, la lumière est diffusée dans toutes les directions. Plus la lumière est diffusée de façon homogène plus la surface est mate.

La brillance, contrairement à la couleur, est une caractéristique propre du film plutôt que du système bois/revêtement. Elle représente la capacité du revêtement à réfléchir la lumière incidente. La mesure de brillance pour un angle spécifique est le rapport de l'intensité de la lumière incidente sur celle de la lumière réfléchiée par la surface à cet angle. Elle est souvent exprimée en pourcentage selon les angles de mesure choisis qui sont habituellement 20°, 60° et 85°, du type de revêtement, soit très brillant, brillant et mat respectivement[61].

#### *Variations dimensionnelles*

L'eau dans le bois est de deux types : l'eau « libre », qui se situe dans les vides du bois (lumière des fibres, vaisseaux, trachéides), et l'eau « liée » qui est imprégnée dans la cellulose des fibres. Quand le bois est séché, c'est l'eau libre qui part d'abord. Le séchage se passe alors sans variation dimensionnel[40, 59].

Dans le cas du film de finition, ses variations dimensionnelles seront invisibles à l'œil. Cependant le film pourra gonfler sous l'effet de l'eau, donc il sera important de rechercher des finitions ayant une bonne élasticité pour pouvoir suivre les variations dimensionnelles du bois et augmenter la durée de vie des systèmes bois-finition.

#### *Le cloquage des films de finition*

Le cloquage apparaît en surface des systèmes bois-finition. Une fois le liquide (eau ou solvant) se vaporise sous le film de peinture il y'aura formation d'une cloque. Les vapeurs de solvant exercent une pression qui déforme le film encore souple, Dans ce cas, une étude menée sur des finitions polyuréthane utilisées dans l'aviation a permis de suggérer le processus de formation des cloques[62] et mis en évidence un phénomène de surface indépendant de l'épaisseur des couches de finition et du substrat.

#### *Écaillage et le craquelage*

L'écaillage et le craquelage sont des phénomènes d'endommagement sous contrainte des polymères, se rencontre généralement lors d'une rénovation avec conservation des anciennes peintures. Le décollement se produit à l'interface bois/ancienne peinture, car celle-ci n'a plus suffisamment de souplesse pour résister aux tensions engendrées par l'application de la nouvelle peinture (lavage donc gonflement, séchage donc retrait, mise en tension permanente). Les surfaces écaillées peuvent s'étendre sur plus de quelques centimètres carrés.



Elle est suivie par la présence de craquelures et fissures. L'adhérence de la finition sur le bois est due d'une part à des liaisons chimiques et d'autre part à un accrochage mécanique[59].

#### III.4. Tests de simulation de vieillissement

Les tests de vieillissement des matériaux peuvent être réalisés, soit à l'exposition directe au soleil (vieillissement naturel), soit en conditions d'exposition artificielle (vieillissement artificiel).

Pour le test naturel, il faut bien situer les surfaces où les conditions climatiques sont plus sévères, un maximum de pluie et d'ensoleillement. Les essais de vieillissement en lumière naturelle sont par définition très longs et difficilement comparables, car les conditions d'essais ne peuvent pas être contrôlées. Par conséquent, des méthodes et des équipements de tests en condition d'exposition artificielle ont été développés dans le but de réaliser des essais de vieillissement accéléré et de simuler de façon plus au moins un climat naturel. Ainsi pour des raisons économiques, réduire les temps de test sont 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 différents dispositifs pour effectuer ces tests sont :

- la lampe à arc au xénon,
- la lampe ultraviolette fluorescente,
- la lampe à arc au carbone,
- la lampe à halogénure de métal.

En ce qui concerne les lampes à arc au xénon, le premier équipement a été développé en 1954 (Xenotest 150). Ce dispositif, lorsqu'il est correctement filtré, simule les radiations ultraviolettes et visibles de la lumière solaire de manière plus satisfaisante que les autres sources artificielles. La lumière est obtenue à partir d'un gaz circulant dans un tube en quartz scellé. Il existe deux systèmes de refroidissement de la lampe qui ne présentent pas de différence significative de spectre. Ainsi, les lampes à arc au xénon peuvent être équipées d'un système de refroidissement à l'eau. C'est le cas des appareils de la série « Xénon Weather Ometer WOM » (Ci3000+, Ci4000, Ci5000). Les lampes peuvent également être équipées d'un système de refroidissement à air, comme les dispositifs de la série « Xénotest » (Alpha - Beta - 150S+).

- Les lampes ultraviolettes fluorescentes sont utiles pour faire des tests comparatifs entre les matériaux. Par contre, l'extrapolation de ces résultats, pour connaître la perte de résistance au vieillissement naturel, n'est pas possible.

Elle fait l'objet d'un programme de recherche pré-normative, au terme duquel une proposition de norme européenne sur le vieillissement artificiel des finitions en bois sera rédigée[63, 64].



- La lampe à arc au carbone a été le premier instrument développé en 1919 pour tester la durabilité des matériaux à la lumière. Cependant, le spectre d'émission dans le domaine ultraviolet est assez différent de celui de la lumière naturelle. La lampe à arc au carbone présente deux bandes d'émissions fortes à 358 et 386 nm, et une faible émission en dessous de 310 nm.

Par conséquent, cette lampe aura un effet beaucoup plus faible que la lumière de soleil sur les matériaux absorbant les radiations dont la longueur d'onde est inférieure à 310 nm. Par contre, elle dégradera plus que la lumière du soleil des matériaux absorbant le rayonnement aux longueurs d'ondes élevées, de l'ordre de 350 nm et plus. Il en résulte des difficultés d'interprétation des résultats. Ces lampes sont maintenant remplacées par des lampes à arc au xénon.

- Les lampes à halogénure de métal fournissent une distribution spectrale proche de l'exposition solaire. Ce dispositif est utilisé dans les chambres climatiques de simulation dans le secteur automobile, défini par la norme DIN 75220 [65].

Les données bibliographiques présentées dans ce chapitre mettent en évidence la dégradation du matériau bois par voie abiotique. Cet axe a connu un développement intéressant suite à des recherches accélérées au cours de ces dernières années.

C'est pourquoi, nous cherchons dans cette présente étude, à relier influence des conditions climatiques (rayonnement UV) sur la structure et le comportement du matériau bois lors du vieillissement accéléré par l'appareil xénotest 150s dans le but de raccourcir les temps d'essais tout en essayant de simuler de façon réaliste le vieillissement.

## IV. Préservation du bois par des huiles végétales

## IV.1. Les huiles végétales

## IV.1.1. Situation des huiles végétales dans le secteur industriel

Les industriels utilisateurs de corps gras représentent une filière très diversifiée, majoritairement constituée par les industries agroalimentaires, mais aussi de façon croissante par celles de la chimie verte. Sachant que l'obtention des huiles végétales nécessite un apport énergétique limitée par rapport aux produits pétroliers. Et parce que les huiles végétales sont des ressources renouvelables aux propriétés multiples, ses activités ont été développés dans deux domaines d'avenir : les biocarburants dans le domaine d'automobiles comme le biodiesel Diester et le domaine de la chimie renouvelable qui permet de concevoir des produits préservant l'homme et la nature. Tandis que, les usages cosmétiques des corps gras végétaux sont aujourd'hui assez répandus, le développement induit par la mise au point de produits biosourcés (issus d'une combinaison de synthons végétaux) représente un enjeu considérable.

## IV.1.2. Définitions

- Les huiles sont des liquides gras à température ambiante contrairement aux graisses qui sont pâteuses dans les conditions normales d'utilisation, et qui ne se mélange pas à l'eau. Elles peuvent d'être d'origine animale, végétale, minérale ou synthétique. Les huiles végétales sont essentiellement constituées d'acides gras, elles sont fluides à 15 °C et les huiles animales sont constituées d'esters de la glycérine.
- Le degré d'insaturation conditionne la siccativité globale d'une huile végétale en recherchant son indice d'iode. Plus celui-ci est élevé, plus l'huile contient des acides gras insaturés.
- L'indice d'iode représente le nombre grammes d'iode moléculaire absorbé par 100 grammes de corps gras. Un fort indice d'iode indique la présence de doubles liaisons et donc une grande siccativité. Les huiles végétales sont classées selon leur indice d'iode comme étant siccatives, semi siccatives ou non siccatives. Le tableau 10 regroupe la composition des principales huiles végétales, les indices d'iode et les siccativités.

Tableau 10. Composition et indice d'iode de différentes huiles végétales[66]

Huile	C16 :0	C18 :0	C18 :1	C18 :2	C18 :3	Ricino- léique	Eléo- stéarique	Eq.doubles liaisons	Indice d'iode
Lin	6	4	17	14	63	-	-	6.6	168-204
Tung	-	4	8	4	-	-	84	7.5	163-175
Soja	12	4	22	53	7	-	-	4.6	117-143
Tournesol	6	4	18	69	1	-	-	4.7	110-143
Colza	4	2	56	26	10	-	-	3.8	94-120
Ricin	-	-	-	-	-	87	-	3.0	83-86
Palme	39	5	45	9	-	-	-	1.7	44-56

Huiles siccatives  $I_{\text{iode}} > 160$ , Huile semi-siccatives  $100 < I_{\text{iode}} < 160$ , Huiles non siccatives  $I_{\text{iode}} < 100$

- L'oxydation des huiles ou rancissement est catalysée par la lumière, la chaleur et certains métaux (cuivre, fer,...). Les huiles végétales, contrairement au gazole, présentent un caractère d'acidité, variable selon les origines. Tournesol, colza : nul soja : 0,16 palme : 0,28[67].

- La viscosité peut être définie comme une résistance à l'écoulement, à la déformation. Elle est liée à la structure des acides gras et des triglycérides, et en particulier à la longueur des chaînes et à leur insaturations :

- l'augmentation du poids moléculaire entraîne une augmentation de la viscosité ;

- l'augmentation de l'insaturation entraîne, à longueur de chaîne constante, une diminution de la viscosité.

La viscosité des huiles végétales est fortement dépendante de la température. Cependant, la plupart des huiles possèdent un indice de viscosité faible.

- La densité des huiles végétale se mesure à 15 °C par rapport à l'eau à 4 °C, à l'aide d'un densimètre plongeant dans un tube à essais. Les valeurs courantes pour les huiles de pétrole varient de 0,85 à 0,95 et dépendent de l'origine des produits. La densité diminue avec la température selon des lois complexes, mais en première approximation on peut la diminuer de 0,00062 par kelvin. Certains lubrifiants synthétiques ont des densités bien plus élevées, jusqu'à 1,5. Cependant, les HV (huiles végétales) ont une densité comprise entre 0,8 – 0,99, la comparaison de la densité d'une huile usagée avec celle de l'huile neuve permet de détecter d'éventuelles pollutions.

- La couleur d'une huile neuve est une caractéristique d'identification (NF T 60-104)[68]. Elle varie généralement du blanc pur au rouge foncé en passant par le jaune citron et le jaune orange, Si l'huile est usagée ou polluée, elle a tendance à foncer. Un trouble plus ou moins laiteux indique une présence d'eau en suspension.

- La résistance des huiles végétales à la chaleur est différente de celle des hydrocarbures formés d'hydrogène et de carbone seulement, les HV contiennent de l'oxygène (entre 10 et 15 %) qui améliore la combustion et diminue la pollution. Elles sont très peu inflammables.

#### IV.2. Traitement thermique du bois

Les recherches sur le bois traité thermiquement font l'objet depuis plusieurs décennies d'années de travaux importants. Les effets du traitement thermique sur la durabilité du bois, son exploitation industrielle est-elle toute récente.

Les principales différences entre les différents traitements thermiques sont liées aux conditions de réalisation, qui se divisent en deux catégories : les bains d'huile et les traitements sous atmosphère gazeuse[69].

Le traitement thermique en générale (figure 15) ayant lieu entre 100°C dans le cas de séchage et 1000°C dans le cas de la pyrolyse - carbonisation du bois ou lors de sa gazéification.

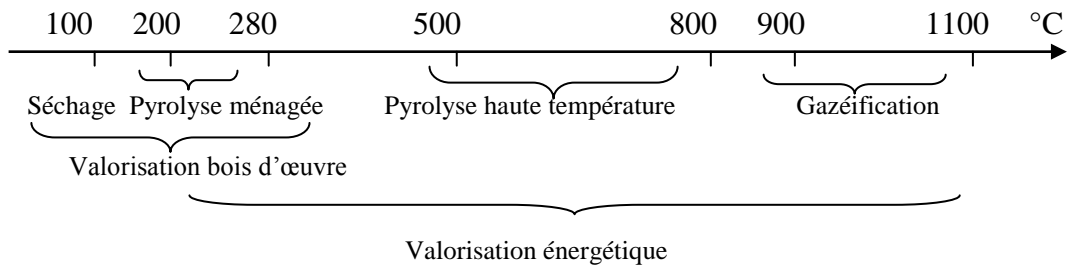


Figure 15. Echelle de température des différents traitements thermiques[70].

Les traitements à haute température consistent en une pyrolyse ménagée entre 160 et 245 °C (320 et 473 °F) du bois, sous une atmosphère contrôlée pauvre en oxygène (azote, vapeur d'eau et gaz de combustion) ou bien en une immersion dans un ou des bains d'huiles végétales chauffées. De nombreuses réactions chimiques se produisent lors du traitement thermique et qui sont accompagnées par des changements favorables pour certaines des propriétés physiques du bois, entraînant une amélioration dans la résistance à la dégradation fongique et une stabilité dimensionnelle.

Il existe actuellement de nombreux procédés de traitements thermiques faisant l'objet d'un ou plusieurs brevets[71-74]. Parmi celles-ci on peut citer : Le procédé ThermoWood, VTT, le procédé PLATO, le procédé NOW (Rétifié), Le procédé Perdure, le procédé OHT: (Oil Heat Treatment), le procédé Thermoholz Austria, le procédé Iwotech et le procédé Intemporis...

#### IV.2.1. Procédé ThermoWood (VTT, Finlande)

En Finlande, plusieurs entreprises se sont associées sous le label ThermoWood® pour ce qui concerne le contrôle de la qualité et la diffusion d'informations. Les produits finlandais disponibles sous la marque ThermoWood® sont obtenus par traitement à haute température, en utilisant de la vapeur d'eau dans des séchoirs adaptés, il comprend trois phases distinctes :

- Montée rapide en température puis séchage à haute température ;
- Traitement à haute température (La température est maintenue constante durant 2 à 3 heures, en fonction des caractéristiques du produit recherché ;
- Refroidissement ré-humidification

#### IV.2.2. Procédé plato®

Le procédé PLATO a été mis au point dans les années 1980 par des scientifiques de la pétrolière Shell qui élaboraient alors une méthode de production de combustible à base de bois. Ce procédé comporte les phases suivantes :

- Une hydrothermolyse ;
- Une phase de séchage ;
- Une phase de polymérisation ;
- Une phase de conditionnement.

#### IV.2.3. Procédé NOW (Rétifié)

Le procédé consiste en une cuisson contrôlée du bois en respectant une atmosphère inerte, obtenue, soit par de l'azote ou d'autres gaz, notamment le CO<sub>2</sub> émis par les brûleurs à gaz. Cette pyrolyse s'appelle « réтификаction » (contraction de réticulation et torréfaction), du fait de la mise en évidence de phénomènes de réticulation de la matière ligno-cellulosique, la réticulation étant un réarrangement de certaines chaînes moléculaires sous l'action de la chaleur. Le procédé comporte au moins une étape dans laquelle on maintient le bois à traiter dans une enceinte de traitement à une température déterminée.

#### IV.2.4. Procédé Perdure® (PCI Industries inc., Québec)

La technologie Perdure® consiste à traiter le bois à haute température par un procédé de pyrolyse ménagé sous atmosphère inerte. Le bois est chauffé entre 200 et 230 °C (392 et 446 °F) à cœur sans utiliser de produits chimiques.

Le traitement est effectué en quatre étapes :

- Préchauffage ;
- Séchage ;
- Chauffage ;
- Refroidissement.

#### IV.2.5. le procédé OHT: (Oil Heat Treatment)

Au lieu d'être de l'air chauffé ou de la vapeur d'eau, le vecteur thermique est de l'huile végétale (colza, lin et tournesol) chauffée, peu dispendieuse et facilement disponible sur les marchés.

- Procédé de « friturage » CIRAD-FORÊT(Centre International de Recherche en Agronomie pour le Développement) : il se distingue de procédé Menz Holz par le fait de plonger successivement les pièces de bois que l'on veut traiter, successivement, dans un bain d'huile chaude, puis dans un autre bain contenant de l'huile froide. La dépression créée au sein du matériau favorise la pénétration d'huile dans le bois.

#### IV.2.6. Procédé Thermoholz Austria (THA)

Thermoholz Austria GmbH (THA) est détenu, à parts égales, par Mitteramskogler GmbH, important fabricant autrichien de produits en bois et Mühlböck GmbH, fabricant de différents types de séchoirs à bois.

#### IV.2.7. Procédé Iwotech (Iwotech Ltd, Danemark)

L'entreprise danoise IWT Iwotech Ltd est déjà un fournisseur de technologies et fabrique des équipements pour l'imprégnation et le séchage du bois. Récemment, elle a construit, pour le compte de la société Bitus (Suède), une usine permettant de faire le traitement thermique du bois. Le produit issu de ce traitement est commercialisé sous la marque « Bitus Thermex ».

#### IV.2.8. Procédé Intemporis (In Wood International SA, Suisse)

L'entreprise suisse In Wood International SA commercialise un procédé mis au point par la société française SPCM. Le procédé, qui fait appel à un four au gaz, s'apparente à celui de PCI Industries à l'exception que la source de chaleur est séparée du four.

#### AUTRES PROCÉDÉS

-Procédé Mekitek (Thermobois inc., Québec) : Ce procédé de traitement à la chaleur qui s'inspire des procédés de réтификаction et ThermoWood .

-Bois francs Brandon inc. (Québec)

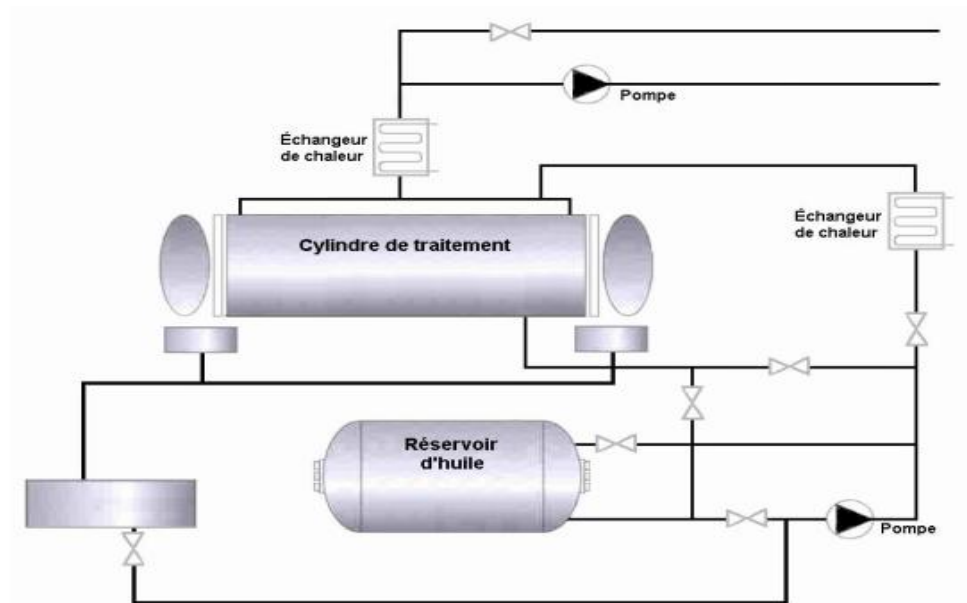
#### IV.3. Traitement du bois par des huiles végétales (oléothermique)

En 1998, le BFH (Centre fédéral de recherches sur la forêt et les produits forestiers, à Hambourg) et la compagnie Menz Holz GmbH (Ehrenberg-Reulbach, Allemagne) ont mené un projet de recherche conjoint visant à augmenter la durabilité et la stabilité du bois. C'est durant ce projet que le procédé OHT a été mis au point. Même si ce projet est maintenant terminé, la collaboration entre les deux organismes se poursuit toujours, notamment en ce qui a trait à l'élaboration d'un procédé de contrôle de la qualité du bois traité thermiquement.

Ce procédé consiste principalement à submerger le bois dans des huiles végétales chaudes à différentes températures (de 180 à 220°C) et pressions (de 2 à 14 bars) pendant 2 à 4 heures pour traiter à cœur le matériau. La pyrolyse contrôlée qui résulte de ce traitement modifie les composants qui sont les plus hydrophiles dans le bois et en diminue l'humidité d'équilibre. Le bois, qui naturellement est hydrophile, devient hydrophobe.

Selon les paramètres de procédé et l'essence traitée, on obtient un nouveau matériau, de couleur plus foncée et attrayante, dont la résistance à la dégradation fongique et la stabilité dimensionnelle sont sensiblement améliorées par rapport à l'essence d'origine; Mais leurs inconvénients : consommation d'énergie et modification des propriétés mécaniques du bois, notamment sa résistance.

Les propriétés physiques et mécaniques du bois traité thermiquement par l'huile vont être évaluées en fonction de la durée et de la température de traitement : des températures plus élevées et un temps d'exposition prolongé permettent d'obtenir une meilleure résistance à la carie, une meilleure stabilité dimensionnelle et un meilleur développement de la couleur[75]. Toutefois, une diminution du module de rupture, de la résistance d'impact, de plus certains traitements thermiques causent une réduction de la dureté du bois traité, bien que cette perte soit en partie contrebalancée par une plus faible teneur en humidité d'équilibre, puisqu'un bois plus sec est généralement plus fort[75].



Source : Le bois traité par haute température, CTBA 2002

Figure 16. Schéma de l'installation chez menz holz

Les bois à traiter sont chargés dans le cylindre. La porte est fermée et l'huile chauffée est pompée dans l'enceinte jusqu'à ce que cette dernière soit remplie. Une fois le traitement terminé, l'huile retourne au réservoir. Il y a ensuite une phase de séchage à l'air qui permet le durcissement de l'huile végétale en surface du bois.

#### IV.4. Propriétés du bois traité à haute température

Le bois traité à haute température doit être considéré comme un nouveau matériau, par rapport aux modifications subies sur ses propriétés macroscopiques : l'état de surface, la stabilité dimensionnelle, les propriétés mécaniques, l'hygroscopie, la durabilité du matériau et plein d'autres propriétés.

##### IV.4.1. Modifications chimiques

Jusqu'à une température de 140 °C, la température n'a pour effet sur le bois que d'en évacuer l'eau libre, puis l'eau liée[76]. Les modifications chimiques du bois deviennent significatives à partir de 180 °C et dépendent de la durée et de la température du traitement[77]. Ces modifications touchent les trois composants principaux du bois : les hémicelluloses, la cellulose et les lignines.

- a. Dégradation des hémicelluloses : la température de décomposition des hémicelluloses se situe entre 120°C et 260°C[78]. Ces dernières possèdent naturellement des propriétés hydrophiles. Leur détérioration permettra de limiter les reprises d'humidité, les produits issus de l'hydrolyse des polysaccharides peuvent à leur tour être le seuil de réactions de

condensation et de déshydratation [79], ce qui conféra au matériau une stabilité dimensionnelle et une durabilité sensiblement améliorées par rapport au bois d'origine.

- b. Une réticulation des lignines : des liaisons transversales se forment entre les molécules tridimensionnelles, ce qui se traduit, par un durcissement du bois.
- c. Une transformation de la structure cristalline de la cellulose :

La cellulose est moins affectée par le traitement thermique, probablement en raison de sa fraction cristalline. La résistance de la cellulose par rapport aux hémicelluloses a été expérimentée lors d'une augmentation de la proportion du monosaccharide de glucose dans les produits de l'hydrolyse acide en raison de la dégradation sélective des hémicelluloses[80]. Les parties amorphes sont plus sensibles à cette dégradation, mais il faut atteindre des températures de l'ordre de 300 °C pour que la cellulose cristalline se dégrade[80].

La cellulose donne la rigidité à la fibre de bois et lors du traitement, les caractéristiques mécaniques en sont modifiées. Le bois voit sa résistance à la flexion, au cisaillement et aux chocs diminuée, tandis que sa résistance à la compression augmente.

-Différence entre feuillus et résineux :

Les différences de composition chimique entre les feuillus et résineux et entre le bois d'aubier et le bois de cœur, induisent des réactions dissemblables lors des traitements. On observe généralement :

- Un dégagement plus soutenu de substances extractibles pour les résineux, aux températures inférieures à 200°C ;
- Une dégradation plus rapide des hémicelluloses chez les résineux ;
- Pour une certaines essences de feuillus, la dégradation des hémicelluloses conduit à la formation de formaldéhyde, de furfural, et d'autres aldéhydes[71]. Le furfural et l'hydroxyméthylfurfural sont des produits de dégradation des pentoses et des hexoses, respectivement[5, 81];
- Pour les résineux, une production plus soutenue de méthanol, résultants principalement de la dégradation de lignine. En effet, la proportion de la lignine est plus importante dans les résineux que dans les feuillus[82].

#### IV.4.2. Modification des propriétés physiques

##### IV.4.2.1. Hygroscopicité/hydrophobie

Nous avons déjà noté dans les propriétés chimiques que la dégradation des hémicelluloses durant le traitement rend le matériau considérablement moins sensible aux phénomènes de perte de reprise d'humidité, un traitement, selon le procédé allemand (OHT) à des températures de 160°C à 190°C a diminué l'humidité d'équilibre pour le bois d'épicéa[83]. Des résultats similaires pour les bois de d'épicéa et de hêtre traité, selon le procédé français à des températures de 200°C à 260°C[84]. Le bois traité thermiquement devient hydrophobe.



#### IV.4.2.2. Stabilité dimensionnelle

Le traitement thermique améliore la stabilité dimensionnelle de l'ordre de 30 à 50%, avec un retrait plus faible et une vitesse de reprise et de perte d'humidité très différente[85]. Il est possible de réduire la déformation provoquée par le gonflement de 75% pour le chêne, 60% pour le hêtre, 55% pour le pin, et 52% pour l'épicéa[86], les gonflements radiaux et tangentiels sont toujours plus faibles après traitement de l'épicéa, du sapin et du peuplier ont tendance à diminuer encore avec des traitements plus sévères[87].

#### IV.4.2.3. Couleur

La couleur du bois traité varie en fonction de la température, de la durée de traitement et de l'essence traitée. Généralement, le traitement à haute température induit, dans la masse, une coloration brune marron des bois, et elle devient plus foncées avec l'augmentation du temps et la température du traitement[88-90]. Souvent, les essences feuillues prennent une teinte plus soutenue que les essences résineuses[91].

#### IV.4.2.4. Masse volumique

Les effets mesurés d'un traitement thermique sur la masse volumique ont permis de constater qu'elle diminue légèrement, dans des proportions variables (de 5% à 10%).

#### IV.4.2.5. Mouillabilité

Le traitement thermique diminue la mouillabilité : le peuplier, le hêtre, l'épicéa et le pin maritime à des températures entre 40°C et 250°C pendant 8 h, leur mouillabilité a diminué radicalement, à partir à 135°C[92]. Plusieurs études ont été effectuées dans le but de trouver de relation entre la diminution de la mouillabilité et la perte de masse ou le taux d'extraits, l'une des raisons possibles de la diminution de la mouillabilité pourrait être l'augmentation de la cristallinité de la cellulose[93].

#### IV.4.2.6. Odeur

Après traitement, le bois présente une forte odeur rappelant celle du café torréfié qui s'estompe avec le temps.

#### IV.4.2.6. Réaction au feu

Les traitements thermiques ne semblent pas avoir d'incidence très marquée sur la réaction au feu des sciages. Cependant on note que le temps d'ignition est un peu plus long en raison de l'absence de composé organique volatils (COV) et que la vitesse de propagation est plus rapide, car le matériau est plus sec.

#### IV.4.3. Modification des propriétés mécaniques

Dans la plupart des cas, le bois traité à haute température perd de son élasticité et devient plus fragile[94, 95], ainsi affaiblissement de la résistance à la flexion statique notamment le module de rupture (MOR) [96], bien que la résistance à la compression diminue également[97].

Les résultats de traitement à l'huile chaude du pin et du hêtre, indiquent une diminution du module d'élasticité (MOE) de manière significative pour des pertes de masse de 8 à 10% [98]. La résistance à la rupture en flexion après traitement à 220°C montre d'environ 50% (8 MPa) pour l'épicéa et 47% (11 MPa) pour le pin sylvestre alors que le bois non traité a une résistance à la flexion de 24 MPa [99]. Cependant, les traitements auraient un effet sensible sur la dureté qui est un paramètre à ne pas négliger, car pendant la cuisson il y a réticulation des lignines, ce qui fait que le bois durcit. On peut donc s'attendre à ce que sa dureté augmente également comme elle peut diminuer, en fonction des espèces de bois et des conditions de traitement [100, 101].

La densité du bois traité diminue en fonction de la température de traitement. La dimension des pores du bois augmente avec le traitement thermique, peut-être dû à la suppression des composants de la paroi cellulaire, HIETALA et al. [87] n'ont pas trouvé de grandes différences entre les dimensions des cellules.

Compte tenu de ces nouvelles caractéristiques, et ces pertes de résistance, son utilisation peut s'avérer importante pour certains emplois : les éléments de terrasse, les clôtures, les bardages. Ainsi sa résistance au poinçonnement est un critère de sélection acceptable pour son utilisation ; par exemple pour les parquets.

#### IV.4.4. Effets sur la durabilité

Les traitements thermiques affectent positivement la durabilité du bois car,

- Ils stérilisent le bois qui pourrait être contaminé par des souches de champignons ;
- Ils permettent d'éliminer des éléments à la base du développement de micro-organismes ;
- Comme on l'a vu précédemment, puisque l'eau ne crée plus de lien avec le bois traité, l'absorption et la désorption d'eau sont rapides (hémicelluloses modifiées) et le taux d'humidité à l'équilibre reste suffisamment bas, cela a pour effet de défavoriser, la croissance des champignons qui ont d'un taux d'humidité minimal environ 20% pour assurer leur développement.

Plusieurs auteurs ont signalé que le traitement thermique conduit à une amélioration de la résistance du bois à la biodégradation. Des études réalisées sur la durabilité de trois essences de bois (épicéa, sapin, peuplier) traitées à la chaleur entre 200 et 260°C, considérées comme peu durables, face aux champignons de pourriture blanche (*Coriolus versicolor*) et brune (*Gloeophyllum trabeum* et *Coniophora puteana*), les résultats ont montré une perte de masse inférieure à 1% pour les bois traités, tandis que pour les échantillons non traités elle peut dépasser 40% [87]. La meilleure condition du couple température-temps pour avoir une meilleure résistance du peuplier contre *Serpula lacrymans* est de 240°C-5h, ou aussi 220°C-15 h [102]. De même, la résistance du bambou à l'attaque du *Coriolus versicolor* nécessite un traitement de 220°C-120 min, tandis qu'une durée de traitement de 60 min est suffisante pour la résistance à *Coniophora puteana* [103]. De plus, Leithoff et Peek [103] ont trouvé que des températures supérieures à 170 °C étaient efficaces pour améliorer la durabilité de deux espèces de bambous,

Nous avons déjà vu précédemment que le traitement thermique de bois peut se faire par différents procédés, et quel que soit le procédé sa durabilité s'améliore face aux différents champignons de pourriture. Le tableau 11 présente l'amélioration de la durabilité après traitement par différents processus de traitement thermique pour 2 essences (l'épicéa et le pin sylvestre)[85].

Tableau 11. Comparaison entre l'effet des différents procédés\* sur la durabilité du bois traité thermiquement selon[85].

Type de traitement	Dégradation		
	Pourriture brune ( <i>Coniophora puteana</i> )	Pourriture brune ( <i>Oligoporus placenta</i> )	Pirriture blanche ( <i>Coriolus versicolor</i> )
Bois non traité (Epicéa/Pin sylvestre)	60% (pour les 2 essences)	27% (épicéa)/ 31% (pin sylvestre)	35% (épicéa)/ 18% (pin sylvestre)
Thermowood	<1%	15%	8%
PLATO	3%	9%	6%
OHT	3%	6%	5%
Rétification	12%	13%	7%

\*les données sur la température et la durée de traitement ne sont pas fournis

Le traitement OHT a donné aux bois étudié la classe 2 (Durable), selon la norme EN-350-1[21], alors que les bois traités par les autres procédés en classe 3 (moyennement durable).

Si le bois est traité à des températures suffisamment élevées, avoisinant les 230°C, il résistera bien aux champignons et aux insectes, à l'exception des termites. Des études faites sur la durabilité du bois traité thermiquement face aux termites montrent que le bois torréfié n'est ni répulsif ni toxique vis-à-vis de ces insectes[104]. Un résultat similaire montre que la résistance du bois traité, par le procédé allemand (OHT), face aux termites (*Reticulitermes grassei*) et ont conclu que, malgré la mortalité légèrement plus élevée des termites avec les échantillons traités, les différences ne sont pas significatives lorsque les échantillons du bois traités et non traités sont côte à côte, les termites préfèrent le bois non traité[105]. En ce qui concerne les xylophages marins, des études préliminaires indiquent qu'il n'y a pas d'amélioration de durabilité[69].

De façon générale, ces bois avec leurs nouvelles propriétés permettraient de l'utiliser, selon les essences, pour la fabrication de menuiseries (portes et fenêtres) et de revêtement extérieurs, ainsi que d'autres usages sans contact avec le sol et soumis à des cycles d'humidification et de séchage.

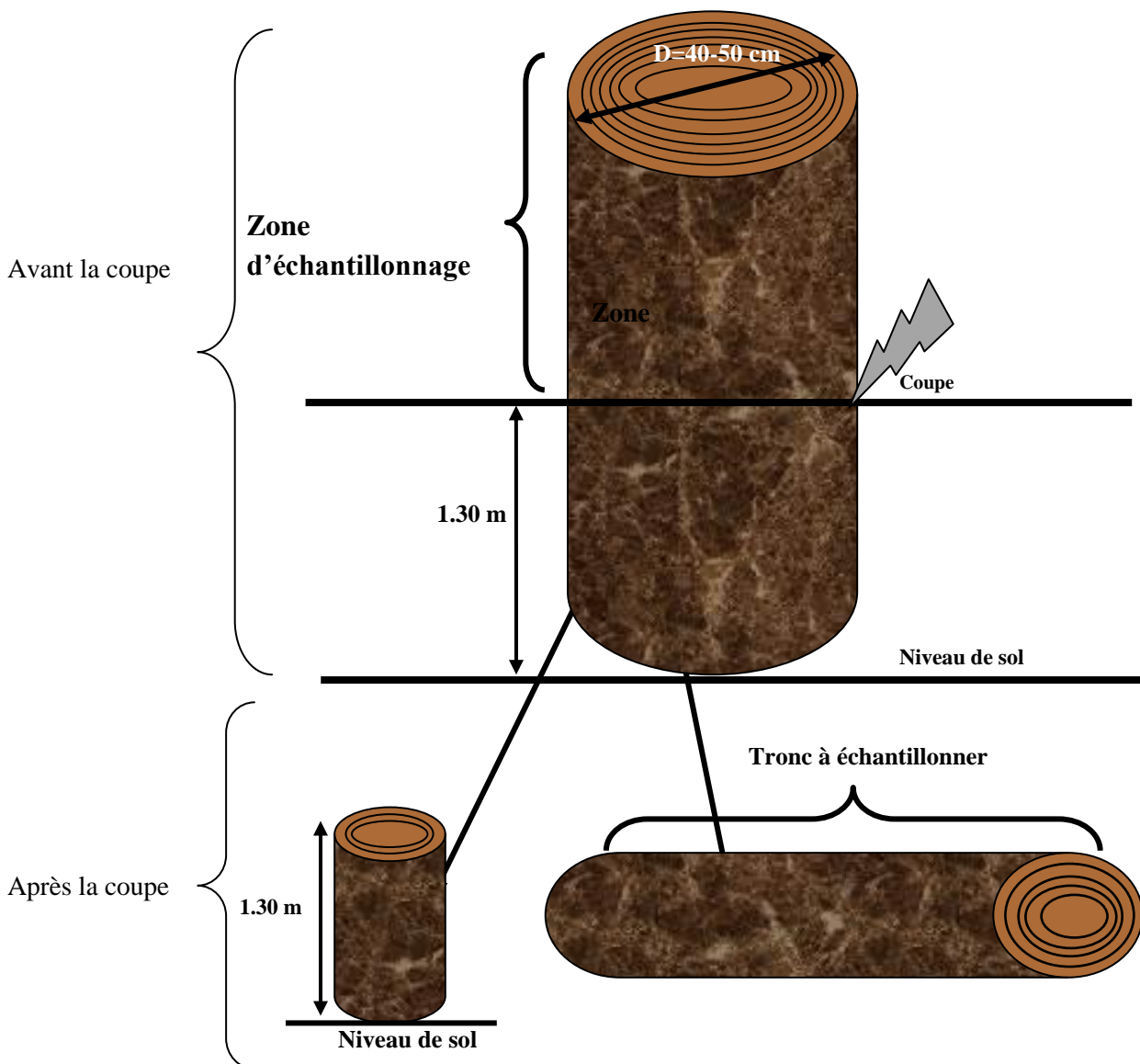
## **PARTIE II: Partie Expérimentale**

### 1. Matériel ligno-cellulosique

Dans cette étude, trois essences prédominantes de bois algériens des régions du nord-est algérien: forêt de Jijel, réparties sur 130878,5 ha, soit 54,56% du territoire de la wilaya de Jijel, située à 518 mètres d'altitude[3].

- Chêne zeen (*Quercus canariensis*, famille des fagacées), âge  $\approx$  90 ans.
- Chêne afarès (*Quercus afares*, famille des fagacées), âge  $\approx$  130 ans.
- Pin maritime (*Pinus pinaster*, famille des pinacées), âge  $\approx$  80 ans.

Nous avons fixé la circonférence de l'arbre à une hauteur de 1.30 m du sol, La coupe a été effectuée sur des arbres de 40-50 cm de diamètre, Les échantillons ont été débités sous forme de billons de 1,50 m de longueur ont été prélevés, ensuite découpés en troncs de 50 cm de longueur.



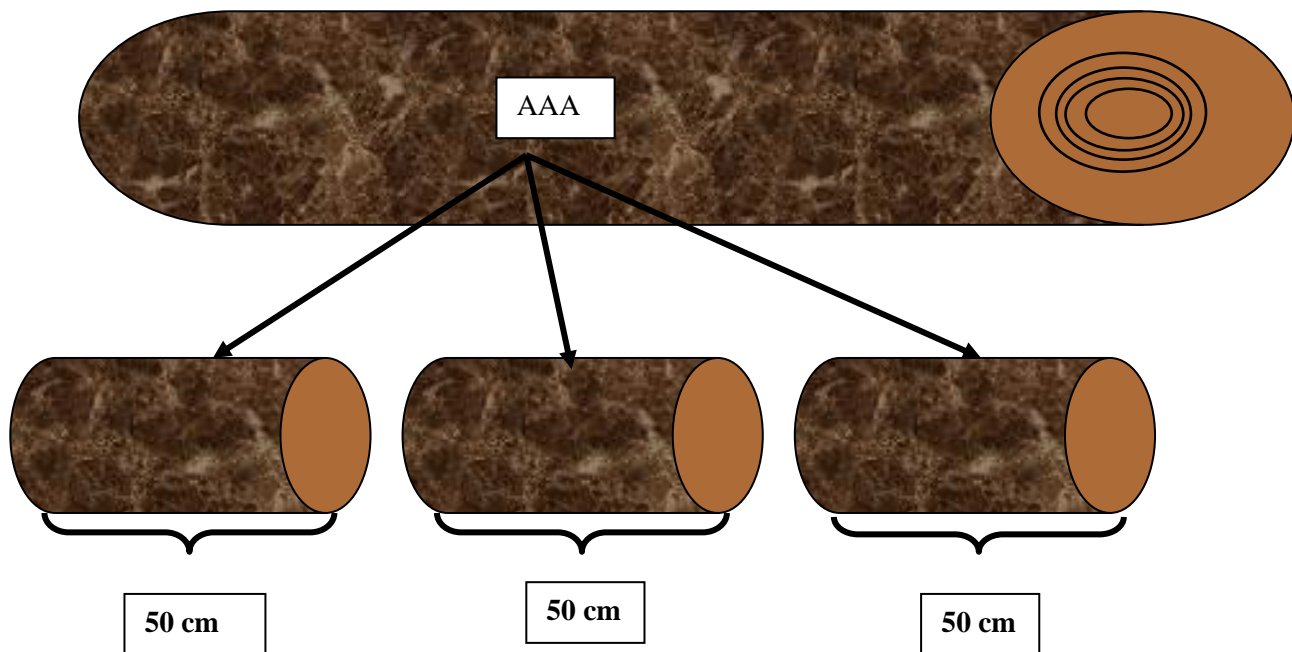


Figure 17. Technique d'échantillonnage

De chaque rondelle de chaque arbre, nous avons prélevé une planche d'environ 25 mm d'épaisseur dans le but d'estimer l'humidité sur une section du bois.

le premier tronc est déroulé à une épaisseur de 1,5 à 2 mm ; sur les feuilles obtenues des éprouvettes de 14 cm de longueur sur 4 cm de largeur sont découpées sous forme de placage destinés aux essais de vieillissement accéléré.

Le deuxième tronc est destiné pour la préparation des éprouvettes d'essais de durabilité naturelle ; les échantillons sont découpés sous forme de lattes rabotées d'une section  $(25 \pm 0,5) \text{ mm} \times (15 \pm 0,5) \text{ mm}$ . Les faces longitudinales doivent être parallèles au fil du bois. les cernes, en suite des coupes transversales nettes, afin d'obtenir des éprouvettes de bois de référence de  $(50 \pm 0,5) \text{ mm}$  de longueur.

## 2. Matériel fongique

Le pourvoyeur de nos quatre souches de champignons est le laboratoire de préservation du CIRAD-Montpellier. Nous avons utilisé quatre souches de champignons choisies pour leur prédisposition pour les résineux, pour les feuillus ou pour les deux espèces, préconisées par la norme EN 350-1 (1994) [21] et sont comme suit :

- Pourriture cubique :
  - *Coniophora puteana* (Schumacher ex Fries) Karsten, Souche : BAM Ebw.15; attaque les bois feuillus et résineux.
  - *Poria placenta* (Fries) Cook sensu J. Eriksson, Souche: FPRL 280 ; attaque les bois résineux.
  - *Gloeophyllum trabeum* (Wulf.Fr.) Karst, Souche: BAM Ebw 109; attaque les bois résineux.
- Pourriture fibreuse blanche :



- *Coriolus versicolor* (Linnaeus) Quélet, Souche: CTB 863A ; Il est universellement utilisé comme espèce de référence en raison de son activité lignivore et de l'importance de son aire géographique; attaque les feuillus.

Les quatre souches fongiques sont maintenues en culture dans un milieu gélosé à base de l'extrait de malt, par de repiquage successif, au fur et à mesure de l'avancement des travaux pour assurer le matériel frais nécessaire pour tous les tests.



*Poria placenta*



*Coniophora puteana*



*Gloeophyllum trabeum*



*Coriolus versicolor*

Figure 18. Culture des champignons étudiés dans des boites de pétrie

### 3. Produits utilisés

Pour le traitement oléothermique : nous avons utilisé deux types d'huiles végétale : huile de soja pure a été amené de l'usine COGRAL (Huilerie et raffinage d'huiles d'origine végétale. Alger) et huile de soja époxydée selon le procédé suivant :

### 3.1. Epoxydation de l'huile de soja

Il existe deux méthodes principales d'époxydation en utilisant soit du peroxyde d'hydrogène  $H_2O_2$  et de l'acide formique, soit par un catalyseur acide (peracide)[106].

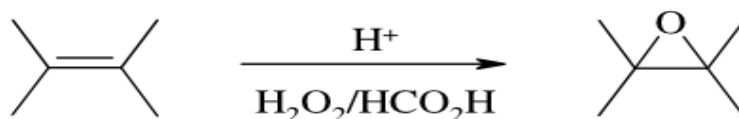


Figure 19. Méthode d'époxydation des huiles végétales en utilisant du peroxyde d'hydrogène

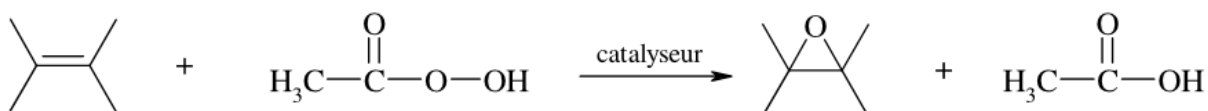


Figure 20. Méthode d'époxydation des huiles végétales en utilisant un peracide

Dans notre travail, nous avons choisi la réaction d'époxydation de l'huile, en présence de peracide formique fabriqué in situ (en utilisant  $H_2O_2$  et de l'acide formique), consiste en la succession des étapes suivantes[107-109].

D'abord, il faut chauffer l'huile de soja à une température comprise entre 45 et 65°C, en suite on ajoute de 1 à 10% en poids d'acide formique ( $H-COOH$ ) de très grande pureté tout en homogénéisant sous agitation le mélange, avec une addition progressive de l'agent peroxydant, l'eau oxygénée ( $H_2O_2$ ) avec une concentration située entre 30 et 70%. La température est maintenue à 70°C environ, maintien sous agitation jusqu'à époxydation complète.

En deuxième étape, refroidissement, décantation des phases organique et huileuse, neutralisation, lavage et séchage de la phase huileuse constituée de l'huile de soja oléique époxydée.



Figure 21. Epoxydation de l'huile de soja (a) ; Décantation de la phase huileuse après neutralisation et lavage (b).



On obtient à la fin un rapport molaire constant de  $\text{H}_2\text{O}_2 / \text{C}=\text{C}$  compris entre 0,2 et 4, c'est à dire en faisant varier la quantité de peroxyde d'hydrogène en fonction du taux d'époxydation désiré. Ainsi le taux d'époxydation varie de façon sensiblement proportionnelle à celui du rapport  $\text{H}_2\text{O}_2 / \text{C}=\text{C}$  0,2 à 4 qui correspondent à une variation de 20 à 100% du taux d'époxydation.

### 3.2. La cire d'abeille

Nous avons utilisé de la cire d'abeille naturelle comme traitement complémentaire au traitement à l'huile. Cette dernière est mélangée avec l'essence de térébenthine extraite de l'écorce d'orange selon, le procédé suivant :

- Nous avons effectué une hydrodistillation, pour obtenir une huile essentielle contenue dans l'écorce d'orange.

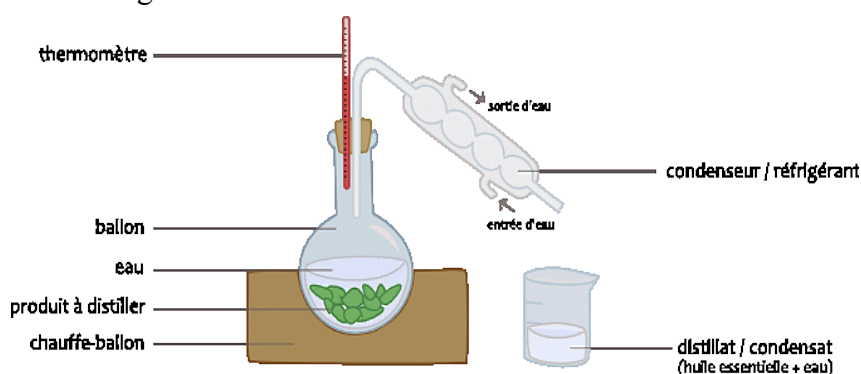
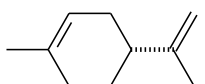


Figure 22. Schéma du montage de l'hydrodistillation

- L'huile essentielle d'orange est composée de plus de 95% limonène ( $\text{C}_{10}\text{H}_{16}$ )



- Le d-limonène qui est l'énantiomère R, appartenant à la famille des terpènes, proche de la térébenthine.
- Pour préparer 10ml d'huile essentielle d'orange, il nous faut 800g de zeste d'orange.



Figure 23. Extraction par hydrodistillation de l'huile essentielle d'orange.

#### 4. Analyse physico-chimique des trois bois étudiés

##### 4.1. Détermination des principaux constituants

La masse sèche est composée principalement de 3 polymères qui sont : la cellulose, les lignines et les hémicelluloses. Les cendres (résidus minéraux) et les produits extractibles comme les terpènes, les tannins et les huiles ne représentent qu'une petite fraction de la composition chimique.

Notre étude pour la composition chimique des bois étudiés se faisant sur de la sciure du bois et pour l'ensemble des analyses, trois essais sont effectués.

##### 4.1.1. Détermination du taux de lignine de Klason dans la sciure du bois

La détermination du taux de lignine de Klason se fait sur un échantillon de 1 g de sciure extraite anhydre. L'échantillon est introduit dans un bécher, puis 15 ml d'acide sulfurique froid ( $H_2SO_4$ ) à 72 % en volume sont lentement ajoutés. Le mélange est bien agité pendant plus d'une minute, puis le bécher est placé sous hotte pendant deux heures. Ensuite, il est dilué par 350 ml d'eau distillée (la concentration de l'acide sulfurique est ramenée à 3 % en volume). Le mélange est chauffé dans un autoclave à 120 °C, pendant une heure, ou bien chauffé à ébullition pendant 4 heures. Le mélange est filtré dans un verre fritté de masse connue, rincé par l'eau chaude, et placé dans une étuve à 105 °C jusqu'à obtenir une masse constante. Le verre fritté et les résidus de lignine sont pesés après avoir été refroidis dans un dessiccateur. Le taux de lignine est exprimé par le rapport de la masse de lignine obtenue sur la masse de sciure anhydre avant extraction (TAPPI T 222 om-06) [110],[111].

##### 4.1.2. Détermination du taux d'holocellulose, de cellulose et d'hémicellulose

Le taux d'holocellulose est déterminé par délignification de la matière lignocellulosique dans le chlorite de sodium. 2 g sciure extraite est ajoutée dans un ballon à fond plat de 250 ml avec 80 ml d'acétate de sodium ( $CH_3COONa$ ), 2 ml de chlorite de sodium ( $NaClO_2$ ) à 27% est ajoutée, sous hotte. Le ballon est chauffé à 76 °C sous agitation. Pendant 5 heures, 2 ml de chlorite de sodium est ajouté toutes les heures. L'holocellulose est filtrée sur un büchner et un papier filtre en fibre de verre, mise à sécher dans une étuve à 105 °C. Le taux d' $\alpha$ -cellulose est déterminé par une extraction des hémicelluloses dans une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium ( $NaOH$ ) à 17.5 % (m/v), car les hémicelluloses sont solubles dans la soude.

Pour l'extraction des hémicelluloses, 2 g d'holocellulose sont introduits dans un bécher, puis 10 ml d'une solution d'hydroxyde de sodium à 17,5% sont ajoutés, cet ajout est renouvelé deux fois à 5 minutes d'intervalle. Ensuite, le mélange est laissé 30 minutes. Puis, 33 ml d'eau distillée sont ajoutées, le mélange est laissé une heure à 20 °C. L'holocellulose est filtrée dans un büchner avec un papier filtre en fibre de verre, et lavée par de l'eau distillée. Finalement, la solution est lavée une dernière fois par 15 ml d'acide acétique à 10 %, puis par de l'eau distillée jusqu'à l'obtention d'un pH neutre mesuré au papier pH. La cellulose est séchée à l'étuve à 105 °C. Le taux d'holocellulose est déterminé par le rapport de la masse

d'holocellulose sur la masse de sciure anhydre avant extraction (TAPPI T 203 om-88) [112],[111].

#### 4.1.3. Détermination du taux d'extractibles

Le taux d'extractibles est déterminé par des extractions de la sciure selon la norme (TAPPI T 204 cm-97) [113], dans un mélange toluène/éthanol (1/2, v/v), dans un soxhlet de 200 ml. La durée d'un cycle dans le soxhlet est d'environ 20 minutes, une seule extraction dure 9 heures. La quantité d'extractibles dans la sciure est calculée par une pesée directe après évaporation du solvant sous atmosphère réduite à 50 °C, mais aussi à partir de la masse perdue par la sciure. Les résultats sont exprimés en pourcentage de la masse de sciure anhydre avec ses extractibles. Les résultats sont une moyenne de trois essais, l'écart type est donné.



Figure 24. Montages pour l'extraction au soxhlet

#### 4.1.4. Détermination du taux de cendres

La détermination du taux de cendres selon la norme (TAPPI T 211 cm-86) [114] est réalisée sur un gramme de sciure de bois. L'échantillon est placé dans un creuset en quartz, silice, porcelaine ou platine de masse connue. Ensuite, l'échantillon et le creuset sont placés une heure et demie dans un four à mouffles à  $600 \pm 10$  °C jusqu'à disparition des particules charbonneuses sans présence de points noirs (imbrûlés). Les cendres sont pesées. Le taux de cendres est exprimé comme le rapport de la masse de cendres sur la masse de sciure anhydre.

#### 4.2. Détermination des paramètres physiques

Les mesures de l'humidité et de la masse volumique du bois sont des essais normés selon les normes françaises datant de 1985 : NF B 51-004, NF B 51-005 [115,116], respectivement.

##### 4.2.1. Détermination de taux d'humidité

Pour déterminer l'humidité  $H$  (%) sur la surface d'une rondelle coupée en sens longitudinale, nous avons récupéré des éprouvettes de (20×20×20) mm (L, R, T) :

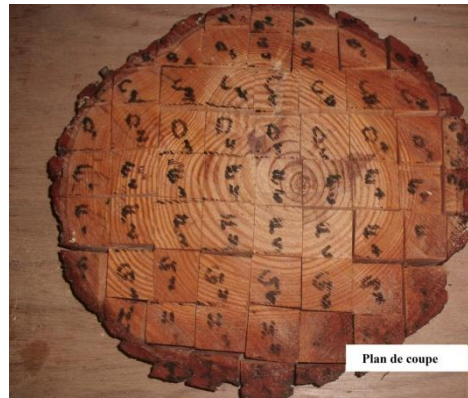


Figure 25. Plan de coupe pour déterminer l'humidité

- Pesée et mesure du volume des éprouvettes à l'humidité initiale ;
- Mise à saturation des éprouvettes (dans un bac d'eau);
- Pesée et mesure du volume des éprouvettes à saturation.
- Placement des éprouvettes à l'étuve à 103°C pour obtenir des échantillons à l'état anhydre
- Pesée et mesure du volume des éprouvettes à l'état anhydre.

Expression des résultats : l'humidité est calculée en utilisant la formule suivante :

$$H = \frac{mh - m_0}{m_0} \times 100 \% \quad (3)$$

Avec  $m_0$  est la masse du bois anhydre et  $m_h$  la masse du bois humide.

Après avoir repéré les taux d'humidité de chaque cube positionné sur la rondelle, nous avons pu établir une cartographie d'humidité grâce à un programme réalisé sous Visual Basic, qui estime le taux d'humidité correspondant à chaque point dans la rondelle, la figure 26 montre le taux d'humidité de chaque éprouvette de la rondelle, en utilisant comme données le diamètre longitudinale et verticale avec la taille de la rondelle.

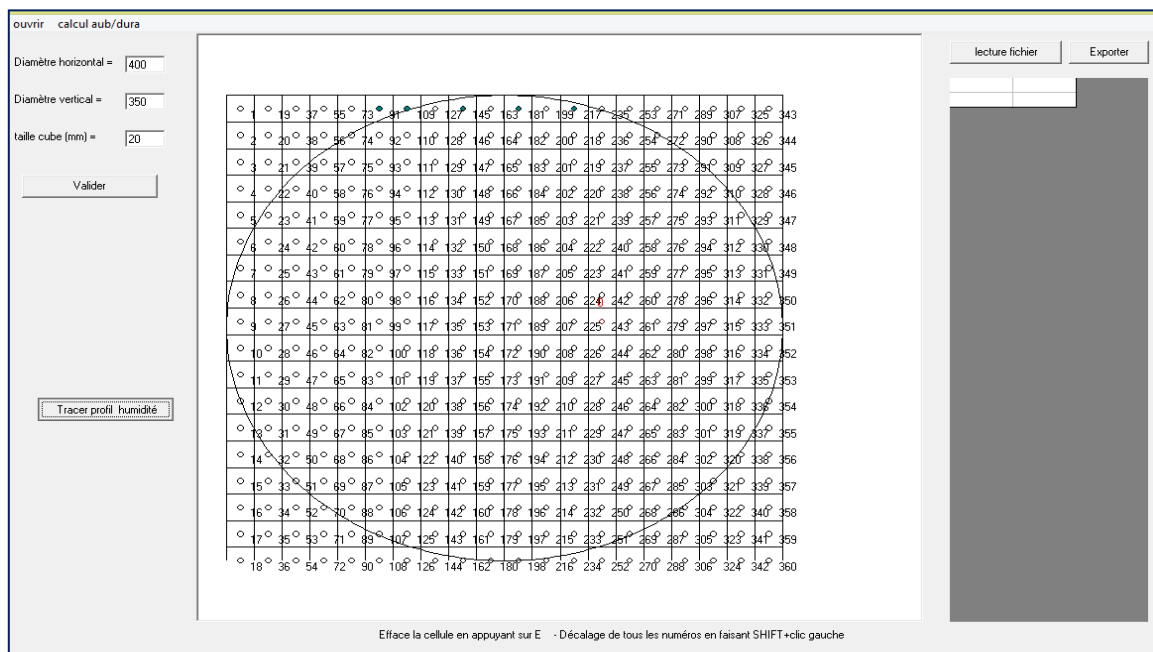


Figure 26. Représentation graphique de la cartographie d'humidité

#### 4.2.2. Détermination de la masse volumique

Le calcul de la masse volumique  $M_v$ , correspondant à l'humidité au moment d'essai en utilisant la formule suivante :

$$M_v = \frac{m(g)}{V(\text{cm}^3)} \quad (4)$$

Dans le même type de bois, la densité varie beaucoup en fonction de la teneur en eau, pour cela nous avons stabilisé les éprouvettes à 12% d'humidité une pièce conditionnée (20°C et 65% d'humidité relative) jusqu'à masse constante (cette étape peut durer plusieurs semaines), pour effectuer à la fin soigneusement la pesée de l'échantillon de volume connu et établir le rapport.

#### 5. Durabilité naturelle du bois vis-à-vis des champignons lignivores

Les essais de durabilité ont été réalisés au laboratoire de préservation du CIRAD à Montpellier et exécutés selon les protocoles décrits dans les normes : NF-EN 350-1[21] et Document : XP CEN /TS 15083-1 [117].

La norme NF-EN 350-1 est utilisée pour tester la durabilité naturelle du bois massif non traité et décrit une méthode qui permet de vérifier leur résistance vis-à-vis des champignons basidiomycètes lignivores pendant 16 semaines de mise en présence. Les éprouvettes de bois sont exposées à l'attaque de champignons basidiomycètes mis en culture sur un milieu gélosé. La dégradation des échantillons est évaluée par le pourcentage de perte de masse de l'éprouvette testée.

##### 5.1. Le protocole constitutif de l'essai

Le principe général de l'essai se procède d'une méthode gravimétrique qui quantifie la perte de masse sèche d'échantillons de bois soumis à l'attaque de champignons basidiomycètes. Toutes les manipulations sont effectuées sous conditions stériles : stérilisation du matériel et milieux de cultures par autoclavage. Les repiquages et inoculations sont effectués sous hotte.

D'abord, il faut cultiver les champignons dans des boîtes de pétrie sur milieu gélosé constitué de  $20 \pm 0.5$  g d'agar-agar +  $40 \pm 0.5$  g de malt en poudre pour 1 litre d'eau distillée, ensuite sont cultivés dans des flacons par des fragments de culture de champignon (figure 27), ces flacons sont munies d'un couvercle troué en son milieu dans lequel est placé un morceau de coton cardé permettant les échanges gazeux.

Entreposer les flacons dans une pièce conditionnée (23°C et 85% d'humidité relative) jusqu'à ce que le mycélium inoculé recouvre entièrement la surface du milieu de culture (environ 15 jours).





Figure 27. Culture des champignons dans des flacons

Dans chaque flacon, deux échantillons de bois (préalablement conditionnés et stérilisés dans l'autoclave, Mi masse initiale) sont déposés sur des supports métalliques préalablement stérilisés à l'autoclave. Les flacons sont stockés pour une durée de 16 semaines dans l'enceinte climatique (23°C et 85% d'humidité relative).



Figure 28. Exposition des éprouvettes de bois aux champignons (a) ; attaque des champignons pendant incubation (b)

Une fois le délai de 16 semaines écoulé, les échantillons sont extraits des flacons. Le mycélium adhérent est débarrassé soigneusement à l'aide d'une brosse à dents. Les échantillons sont immédiatement pesés, il s'agit de la masse humide en fin d'essai (Mh). Ensuite sont à nouveau séchés en étuve (103 ± 2°C, durant 48 h) jusqu'à masse constante et leurs sont mesurées (Ma).



Figure 29. Pesée et mesure des éprouvettes après leur débarrassage de masses anhydres mycélium

A la fin de l'essai, nous déterminons les paramètres suivants :

- L'humidité des éprouvettes en fin d'essai est donnée par Eq.5 :

$$H = \frac{(Mh - Ma)}{Ma} \times 100 \% \quad (5)$$

Ou' Mh masse humide

Ma masses anhydres

- La perte de masse des échantillons d'essais est exprimée en perte de masse dite absolue en % (X) ou en perte de masse relative (Xr) rapportée à la perte de masse des témoins de virulence. Le paramètre de valeur de x (DI) défini dans la norme d'EN 350-1 est donné par Ep.6,7.

$$X = \frac{(Mi - Ma)}{Mi} \times 100\% \quad \text{Ou' } Mi \text{ masse initiale} \quad (6)$$

$$Xr = \frac{\text{perte de masse absolue des échantillons d'essai}}{\text{perte de masse absolue des échantillons de référence}} \quad (7)$$

La classification repose sur les résultats des espèces de champignons causant la plus grande perte de masse moyenne (ou médiane) des éprouvettes, de perte de masse absolue (X) ou de perte de masse relative (Xr). L'échelle de la perte de masse est donnée par le tableau 12 selon les normes EN 113 [118] et EN 350-1[21]:

Tableau 12. Échelle de notation de la durabilité selon la perte de masse

Classe de durabilité	Description	Pourcentage de perte de masse	Perte de masse relative Xr
1	Très durable	≤ 5	Xr ≤ 0.15
2	Durable	5 > à ≤ 10	0.15 < Xr ≤ 0.30
3	Moyennement durable	10 > à ≤ 15	0.30 < Xr ≤ 0.60
4	Peu durable	15 > à ≤ 30	0.60 < Xr ≤ 0.90
5	Non durable	> 30	Xr > 0.90

## 5.2. Validité des essais

Pour que l'essai soit validé pour *Coriolus versicolor*, ce champignon doit engendrer une perte de masse minimum de 20 %, 15% sur les éprouvettes témoins de virulence de Hêtre et l'aubier de pin sylvestre respectivement, après 16 semaines d'incubation. Et pour *Coniophora puteana* et *Poria placenta*, ces champignons doivent engendrer une perte de masse minimum de 20 % sur les éprouvettes témoins de virulence d'aubier de pin sylvestre après 16 semaines d'incubation.

## 6. Procédé de traitement

### 6.1. Imprégnation du bois par oléothermie muni d'un procédé sous vide

Un cristallisoir rempli d'huile est disposé sur une plaque chauffante. Les éprouvettes du bois ont été introduites à l'intérieur, puis une grille a été positionnée afin d'empêcher les éprouvettes de flotter sur la solution; comme montre la figure 30.



Figure 30. Immersions des échantillons du bois dans l'huile

La température de traitement est fixée à 180°C pendant 2 heures. Le cycle d'imprégnation est composé d'une période de 15 minutes sous vide (depression de 0,7 à 0,8 bars, obtenue par une pompe à vide), le vide est ensuite casé puis on attend 15 min avant de retirer les éprouvettes de la solution. La Figure 31, est une photographie du dispositif utilisé pour l'imprégnation vide de petits échantillons.



Figure 31. Photographie du dispositif utilisé pour l'imprégnation sous vide

Ensuite, les éprouvettes imprégnées ont été essuyées sur du papier absorbant pour ôter l'excès de solution en surface. Les éprouvettes sont alors pesées et mesurées, ce qui permet d'obtenir leur masse imprégnée ( $m_{imp}$ ) et leurs dimensions imprégnées ( $L_{imp}$ ,  $l_{imp}$  et  $e_{imp}$ ).



L'augmentation de la masse (GPP%) des éprouvettes traitées a été calculée comme étant le rapport de la différence entre la masse séchée au four après traitement ( $m_2$ ) et la masse séchée au four avant traitement ( $m_1$ ), Ep.8.

$$GPP = \frac{(m_2 - m_1)}{(m_1)} \times 100\% \quad (8)$$

Les éprouvettes sont ensuite mises à sécher pendant 4 semaines en les retournant fréquemment pendant les premiers jours afin d'homogénéiser, puis elles sont reconditionnées à 20°C et 65% d'humidité relative pendant 2 semaines pour les stabiliser.

Teneur en humidité (MC): est défini comme la teneur en humidité à laquelle le bois ne gagne ni ne perd pas de l'humidité; Une condition d'équilibre a été atteinte, la MC est donnée par Eq. (9).

$$\text{Teneur (H)} = \frac{(m_r - m_{r0})}{(m_{r0})} \times 100 \% \quad (9)$$

Où:  $m_r$  est la masse du bois traité thermiquement avec une teneur en humidité et  $m_{r0}$  est la masse du bois traité thermiquement séché au four.

## 6.2. Finition par la cire d'abeille

Il existe plusieurs méthodes d'utilisation de la cire d'abeille :

- Le ciré trois couches : cette technique est très simple sur le principe (plus difficile d'application), consiste à passer trois couches de cire d'abeille, la première au pinceau avec une cire très diluée. Pour les deux dernières couches, on emploie une cire non diluée, entre chaque couche et après séchage, on frotte la surface avec une brosse, puis on lasure avec un chiffon de laine.
- Imprégner le bois dans la cire liquide et enlever en même temps l'excédent de cire avec un pinceau.
- S'applique avec chiffon blanc qui ne pluche pas (tampon), dans le sens des fibres du bois, en deux couches minces, (avant utilisation, les tampons doivent être légèrement imprégnés de térébenthine ou de white spirite.

Dans notre cas, nous avons combiné entre la 2ème et la 3ème méthode : imprégné les éprouvettes du bois dans la cire d'abeille naturelle liquide, en la faisant fondre dans un bain-marie, et en la diluant avec l'essence de térébenthine jusqu'à saturation.



Figure 32. Imprégnation des éprouvettes de bois traitées à l'huile dans la cire d'abeille liquide mélangé avec l'essence de limonène.

Des séries d'éprouvettes sont traitées pour différents lots de traitement qui sont :

- Huile de soja pure ;
- Huile de soja pure et ciré ;
- Huile de soja époxydée ;
- Huile de soja époxydée et ciré.

Et à la fin mettre toutes les éprouvettes en sachets hermétiques pour effectuer une irradiation ionisante par une société spécialisée de façon à éliminer tout germe éventuellement présent.



Figure 33. Les éprouvettes traitées.

Les éprouvettes traitées pour chaque espèce ont été sélectionnés et marqués successivement (voir tableau 13)

Tableau 13. Distribution et nombre d'éprouvettes

Espèces de champignons	Type de traitement	Nombre d'éprouvettes
<i>Coniophoraputéana</i>	Huile de soja pure à 180°C, 2h	8 CZ / 6 CA / 8 PM
	Huile de soja pure 180°C, 2h + la cire	9 CZ / 8 CA / 10 PM
	Huile de soja époxydée à 180°C, 2h	8 CZ / 6 CA / 8 PM
	Huile de soja époxydée à 180°C, 2h + la cire	8 CZ / 8 CA / 10 PM
<i>Coriolus versicolor</i>	Huile de soja pure à 180°C, 2h	10 CZ / 13 CA
	Huile de soja pure 180°C, 2h + la cire	11 CZ / 14 CA
	Huile de soja époxydée à 180°C, 2h	12 CZ / 14CA
	Huile de soja époxydée à 180°C, 2h + la cire	10 CZ / 12 CA
<i>Poria placenta</i>	Huile de soja pure à 180°C, 2h	12 PM
	Huile de soja pure 180°C, 2h + la cire	12 PM
	Huile de soja époxydée à 180°C, 2h	12 PM
	Huile de soja époxydée à 180°C, 2h + la cire	12 PM

CZ: Chêne zeen; CA: Chêne afarès ; PM: Pin maritime

## 7. Tests et évaluations de la photodégradation du bois

Après avoir étudié la durabilité du matériau bois vis-à-vis les agressions biotiques par les microorganismes tels que les champignons lignivores. Nous avons poursuivi notre étude sur la dégradation par les agressions abiotiques, en particulier, les rayons ultraviolets.

Les UV du rayonnement solaire est l'un des paramètres les plus agressifs qui contribuent au processus de désagrégation du bois[119]. Le bois exposé au rayonnement solaire est soumis à une dégradation extérieure de la surface par des changements de la couleur initiale, puis une panne mécanique [120].

La photodégradation ainsi que les processus d'oxydation peuvent être simulés avec des méthodes de vieillissement artificiel comme la résistance à la lumière (xenotest), l'irradiation UV, dans un testeur d'altération accélérée QUV et un traitement thermique, respectivement [121-123]. La lumière à arc xénon simule mieux le spectre solaire que les lampes fluorescentes UV[124].

Pour cela nous avons étudié le mécanisme de photodégradation, à l'aide du rayonnement émis par une lampe à arc xénon, qui a été adaptée pour le vieillissement accéléré. C'est une lampe à décharge de gaz dans un tube scellé de quartz.

La dégradation photochimique des échantillons a été suivi par:

- L'aspect visuel (décoloration)
- Les modifications structurales ont été étudiées par analyse FTIR (spectroscopie infrarouge à transformation de Fourier), basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le

matériau analysé. Elle permet, via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques (élongation, cisaillement, etc.), d'effectuer l'analyse des fonctions chimiques présentes dans le matériau en mesurant simultanément toutes les longueurs d'ondes auxquelles le matériau absorbe ainsi que les intensités d'absorption.

Les spectres IR ont été obtenues à l'aide d'un Spectromètre FTIR Bruker Alpha à température ambiante avec 40 balayages dans la région analytique de  $4000-400\text{ cm}^{-1}$ , avec une résolution de  $2\text{ cm}^{-1}$ . La poudre de sciure d'échantillons non irradiés et irradiés a été préparée en phase KBr.

- Des mesures réalisées sur les coupes microscopiques (microscopie électronique à balayage Stereoscan Leica 440 (tension d'accélération : 300 V à 30 KV), Avant l'examen, les échantillons de poudre ont été recouverts d'or pour les rendre conducteurs. C'est une technique de caractérisation texturale des matériaux visent à préciser les changements produits sur les plans ligneux, par des coupes minces effectuées sur notre matériau, avant et après dégradation.

- Les caractéristiques mécaniques ont été mesurées sur la machine de test Zwick Roell ProLine 10 kN, équipée du logiciel d'application testXpert.

Le comportement des échantillons en traction a été effectué sur des feuilles ( $0,15 \times 4 \times 14\text{ cm}^3$ ) avant et après une période d'exposition de 120 h. La contrainte de traction finale du bois a été spécifiée en mesurant la charge de rupture appliquée statiquement le long de l'axe longitudinal de l'éprouvette. La contrainte maximale appliquée était de 80 MPa. Dix essais ont été effectués pour chaque type de bois avant et après irradiation.

#### 7.1. Test de vieillissement artificiel accéléré (Xenotest)

Le vieillissement accéléré des échantillons de bois a été étudié sur un appareil Xenotest Atlas Heraeus 150 S équipé d'une lampe à arc au xénon de 1500 Watts Sept filtres IR et UV sont employés pour simuler tout le spectre de lumière du soleil que n'importe quelle autre source lumineuse artificielle, avec un prisme ( $380 < \lambda < 750\text{ nm}$ ) ; l'énergie de rayonnement générée est de l'ordre de  $1030\text{ W/m}^2$ .

Les échantillons ( $0,15 \times 4 \times 14\text{ cm}^3$ ) ont été stabilisés à 12% d'humidité dans une salle conditionnée ( $20\text{ °C}$  et 65% d'humidité relative) jusqu'à une masse constante, puis placés dans les armatures tournantes de la lampe à xénon avec chaque rotation de l'armature, chaque échantillon témoin doit tourner de  $180^\circ$  de sorte que les deux côtés du support puissent être employés pour tenir ces échantillons ; cela permet également de simuler les effets de l'exposition de l'échantillon d'une part à la lumière et d'autre part à l'ombre.

Les échantillons en bois ont été exposés à une distance de 10 cm de la source lumineuse. La température et l'humidité sont contrôlées à  $22-24\text{ °C}$  et 54.5-65% pendant l'irradiation.

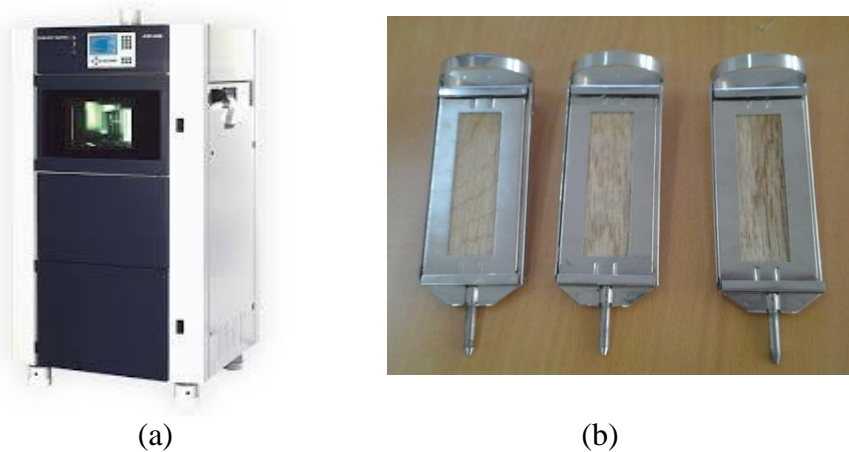


Figure 34. Dispositif du vieillissement : appareil Xenotest 220 d'Atlas (a), Supports d'échantillons et masques «armatures » (b)

Les échantillons ont été exposés pendant 120 heures et la masse de chaque éprouvette est mesurée toutes les 30 heures.

La perte de masse des échantillons après irradiation est déterminée à partir de la relation suivante :

$$X\% = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} \times 100 \quad (9)$$

Où :  $m_i$  est la masse initiale avant essai (g) ;  $m_f$  est la masse finale après essai (g) et X le pourcentage de perte de masse.

### 7.2. Temps d'exposition estimé dans le xénotest

Dans l'appareillage de type Xénotest 150 S, le rayonnement solaire est simulé par une lampe au xénon, de telle manière que le rayonnement au niveau des échantillons soit limité à 200.000 lux ou à 100 mW/cm<sup>2</sup> (ISO/DIS 11341 :2004 ) [125]. Ce rayonnement est comparé avec deux surfaces qui reçoivent un maximum de rayonnement solaire en Belgique : 10 mW/cm<sup>2</sup> et en Corse : 16 mW/cm<sup>2</sup>, ou à l'éclairage généralement de 80.000 lux au maximum. Dans le Xénotest, le niveau de rayonnement et la durée effective d'exposition par 24 heures sont plus élevés qu'en vieillissement naturel[126].

### 7.3. Photostabilisation du bois par un absorbeur UV (cire d'abeille)

La dégradation des bois de chêne zeen, chêne afarès et pin maritime par la lumière UV-visible, va diminuer de leurs durabilités. Pour cela nous avons proposé un traitement pareil que celui de la durabilité naturelle (6), une imprégnation dans l'huile de soja pure et époxydée à 180°C pendant une heure.

Le traitement par l'huile chaude considéré comme un traitement profond pour assurer la protection du bois contre les insectes et les champignons, et la finition par la cire d'abeille sera considéré comme un absorbeur UV qui va protéger le bois contre la photodégradation.

Un absorbeur UV comme la cire a la capacité d'absorption des radiations dans la région UV, sans modification de la nature des radicaux formés sans oublier leur action décorative.

Les figures 35 et 36 montrent le traitement oléothermique appliqué sur des éprouvettes minces destinées pour le test de vieillissement



Figure 35. Imprégnation du bois dans l'huile de soja



Figure 36. Finition par la cire d'abeille

Pour l'évaluation des traitements proposés, nous avons exposé ces échantillons traités, à une radiation de 500 heures à la lampe xénon.

## **PARTIE III: Résultats et Discussion**



1. Résultats de la caractérisation physico-chimique

1.1. Composition chimique du bois

La composition chimique du bois varie, selon l'essence, mais également, selon d'autres paramètres tels que la nature du sol, les conditions de croissance, l'âge de l'arbre et la période d'abattage[127]. Le bois appartient à la classe des matériaux composites, sa composition est typique pour les bois résineux et feuillus, le tableau 14 présente la composition massique des bois résineux et feuillus:

Tableau 14. Composition générale des bois [127]

	Composition massique (%)	
	Résineux	Feuillus
Cellulose	40-50	38-50
Hémicellulose	7-15	19-26
Lignine	26-34	23-30
Extractibles	4	4
Cendres	<1	<1

Matrice → lignine ; Fibre de renfort → cellulose ; Agent interfacial → hémicellulose

Les résultats de la composition chimique de nos bois étudiés sont présentés dans la figure 37. En effet, l'hydrolyse des polysaccharides provoque une hydrolyse plus rapide des hémicelluloses que de la cellulose. Les sucres simples formés rapidement sont dégradés en furfural et hydroxyméthyl- furfural, tandis que les polysaccharides hydrolysés plus lentement forment des sucres simples.

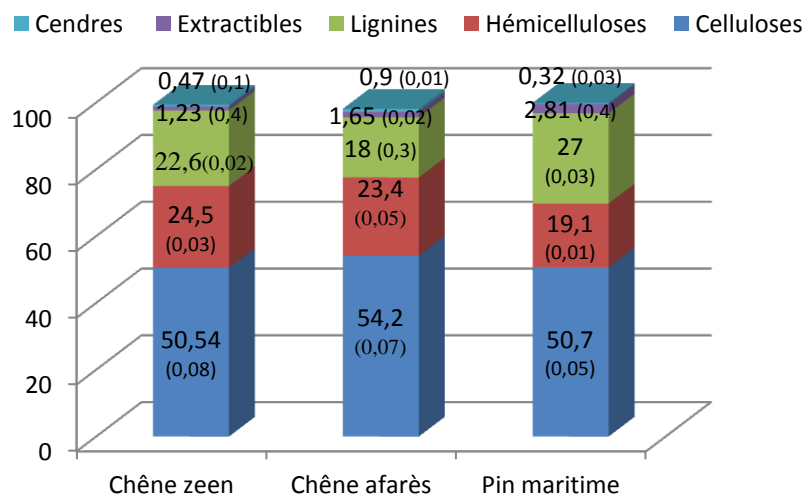


Figure 37. Composition chimique des bois étudiés



Dans notre méthode, le taux d'holocellulose est déterminé par la méthode de délignification au chlorite de sodium. La détermination du taux d' $\alpha$ -cellulose permet par déduction, de connaître le taux d'hémicelluloses constitutives de l'holocellulose. Les taux de cellulose sont respectivement pour le chêne zeen, chêne afarès et pin maritime de 50.54%, 54.2% et 50.7%. Ces résultats sont proches, vu que la cellulose est l'élément de base du matériau bois, elle présente la moitié de la composition et qui est un motif cellobiose (deux glucoses), de plus l'échantillonnage a été effectué dans la même zone et l'âge des arbres ne se différencie pas beaucoup. Les taux d'hémicelluloses sont respectivement pour le chêne zeen, chêne afarès et pin maritime de 24.5%, 23.4% et 19.1% respectivement, il est plus important chez les feuillus que les résineux, inversement aux taux de la lignine qui domine chez le pin maritime avec une proportion de 27%, et 22.6%, 18% pour le chêne zeen et le chêne afarès respectivement.

On désigne ainsi d'autres matières présentes dans les différents bois en quantités plus ou moins importantes : des résines par exemple, les tanins, des huiles aromatiques, des sucres hydrosolubles, ce sont les matières extractibles. Leur extraction par le mélange de solvants composé de toluène/éthanol (v/v, 1/2), a donné une proportion importante d'extractibles pour le pin maritime de 2.81% vu qu'il fait partie de la famille des résineux, tandis que le chêne zeen et le chêne afarès possède peu de cette catégorie d'extractibles avec 1.23% et 1.65% respectivement.

L'analyse de la teneur en cendre nous permet de déterminer la teneur en résidus minéraux qui est égale 0.47%, 0.9%, et 0.32% pour le chêne zeen, chêne afarès et le pin maritime respectivement.

La différence quantitative de composé peut avoir des erreurs, qui peuvent être liées à une perte de masse sur les parois du soxhet, et aux erreurs expérimentales liées à l'humidité présente dans les échantillons malgré leur séchage et le passage au dessiccateur pour le refroidissement avant la pesée.

## 1.2. Cartographie d'humidité

La teneur en eau est variable d'une espèce à l'autre et elle varie aussi, pour une même espèce, suivant la partie de l'arbre considérée, pour cela nous avons effectué des mesures sur des arbres abattus à la même époque et dans des zones voisines. L'ensemble des cartographies obtenues sont représentées dans les figures ci-dessous :

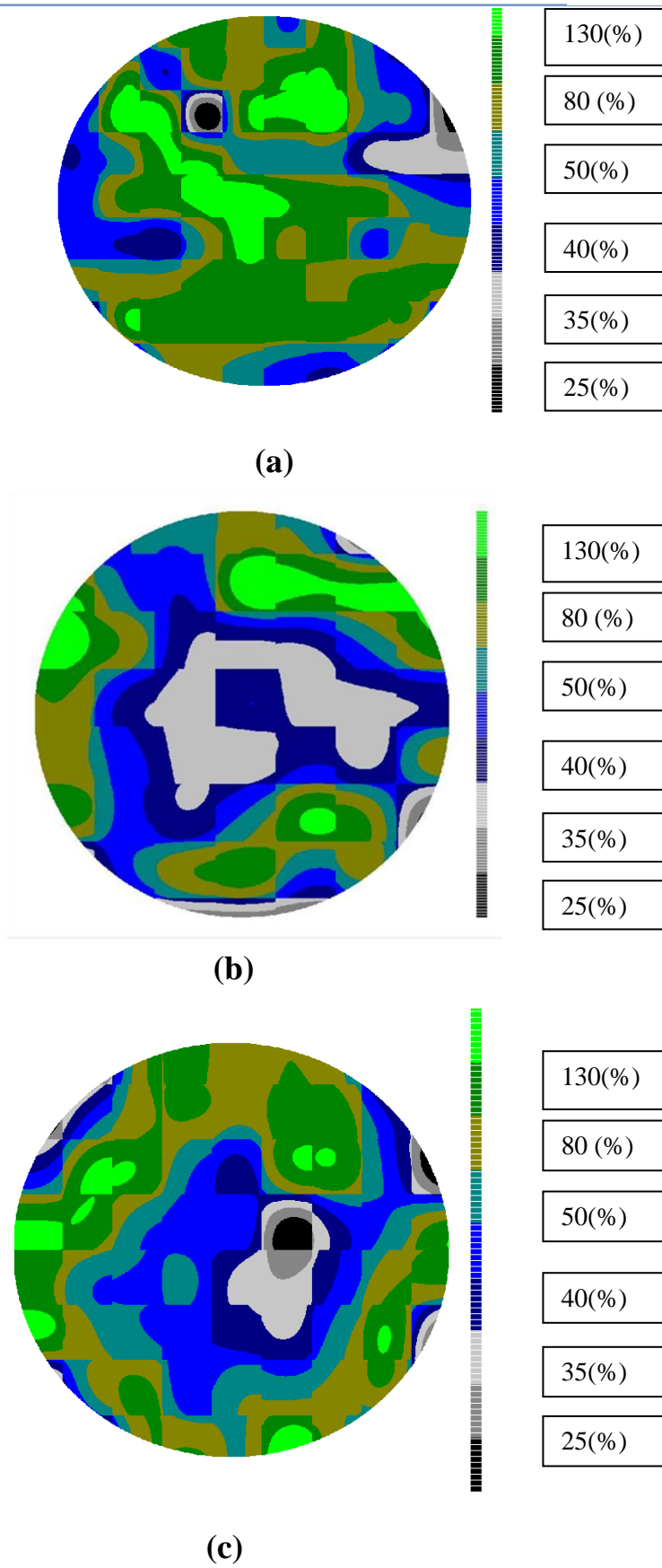


Figure 38. Cartographie de l'humidité sur la surface de la grume de pin maritime (a), chêne zeen (b), chêne afarès (c).

D'après nos résultats expérimentaux, nous avons constaté une différence entre les bois résineux et les bois feuillus, la répartition de l'humidité est hétérogène sur la surface de la grume pour les trois espèces, sauf que les bois résineux contiennent proportionnellement plus d'eau que les bois feuillus, et dans chacune de ces parties, l'aubier est plus riche en eau que le cœur, ainsi l'humidité diminue en direction de la périphérie du tronc vers la moelle.

### 1.3. Masse volumique

La connaissance de la masse volumique des bois est utile non seulement, pour la détermination du poids d'une construction en ce matériau, mais ainsi elle nous renseigne sur d'autres propriétés fondamentales, notamment sur la dureté et la résistance à la compression.

Le tableau 15 montre l'échelle de notation de la masse volumique, par laquelle on peut classer nos bois.

Tableau 15. Echelle de notation de la masse volumique

Masse volumique moyenne (g/cm <sup>3</sup> )			Classes de la masse volumique	
Chêne zeen	Chêne afarès	Pin maritime		
0.89 (±0.07)	0.83 (±0.05)	0.64 (±0.02)	$Mv \text{ g/cm}^3 < 0.5 \text{ g/cm}^3$	Bois très léger
			$0.5 \text{ g/cm}^3 < Mv < 0.65 \text{ g/cm}^3$	Bois léger
			$0.65 \text{ g/cm}^3 < Mv < 0.8 \text{ g/cm}^3$	Bois mi-lourd
			$0.8 \text{ g/cm}^3 < Mv < 0.95 \text{ g/cm}^3$	Bois lourd
			$Mv > 0.95 \text{ g/cm}^3$	Bois très lourd

D'après cette échelle le classement de nos bois étudiés est comme suit : Le pin maritime est classé comme bois léger. Cependant, les chênes (zeen et afarès) ont l'indice des bois lourds.

### 2. Résultats des essais normalisés de durabilité naturelle vis-à-vis des champignons basidiomycètes

Les résultats obtenus concernant la durabilité naturelle vis-à-vis les champignons lignivores ainsi les écarts types sont présentés séparément pour chaque espèce dans le tableau 16.

Les résultats de cette partie sont les données de base pour :

- Déterminer le niveau de perte de masse des trois essences étudiées dans le but de classer leurs durabilités.
- Distinguer les différences significatives entre duramen et aubier.

Tableau 16. Moyenne de la perte de masse chez toutes les essences étudiées.

<b>Chêne zeen</b>					
Champignon	Moyenne de perte de masse absolue Aubier X(%)	Moyenne de perte de masse absolue Duramen X(%)	Perte de masse relative Aubier Xr	Perte de masse relative Duramen Xr	Classe de durabilité
<i>C. puteana</i>	15.08 (2.35)	13.94 (1.91)	0.50	0.47	3-MD
<i>C. versicolor</i>	14.45 (7.13)	13.71 (1.59)	0.36	0.35	3-MD
<b>Chêne afarès</b>					
<i>C. puteana</i>	26.32 (14.47)	23.21 (10.34)	0.88	0.78	4- PD
<i>C. versicolor</i>	30.49 (15.93)	27.19 (18.04)	0.78	0.72	4- PD
<b>Pin maritime</b>					
<i>C. puteana</i>	46.23 (3.74)	45.48 (5.16)	1.42	1.40	5- ND
<i>P. placenta</i>	42.49 (6.33)	43.73 (5.40)	1.27	1.30	5- ND
<i>G. trabeum</i>	39.87 (5.57)	42.57 (5.25)	2.51	2.68	5- ND

D : duramen, A : aubier, ND : non durable, PD : peu durable, MD : moyennement durable

Selon la norme d'essai NF EN 113 (extrait de NF EN 350.1) [118] : Le chêne zeen appartient à la classe 3 (moyennement durable) et le chêne afarès appartient à la classe 4 (peu durable), tous les deux ont mêmes champignons critiques : *Coniophora puteana* et *Coriolus versicolor*. Le pin maritime appartient à la classe 5 (non durable), avec champignons critiques : *Coniophora puteana*, *Poria placenta*, et *Gloeophyllum trabeum*.

La distinction entre les résultats obtenus à partir de bois de coeur (duramen) et le bois d'aubier, est due au fait que, dans le même arbre ces deux parties ont souvent une durabilité naturelle différente contre les champignons, Généralement, le duramen est plus durable que l'aubier[128, 129], ceci est liée aux transformations qui ont pris place durant la duraminisation et qui ont entraînés : la présence accrue d'extractibles[130]. Cette différence de durabilité apparait légèrement dans nos essences, sans changement dans la classe de durabilité entre la partie aubier et duramen.

Conformément à la norme NF EN 460 [131], le bois de la classe de durabilité naturelle 3 comme le chêne zeen, peut être utilisé en classe de risque 3 selon la norme EN 335-1[21], ce qui signifie d'une utilisation non abrité, hors contact du sol et qui peut être continuellement exposé aux intempéries, soumis à une humidification fréquente supérieure à 20%.

cependant le chêne afarès et le pin maritime ; la classe de durabilité 4 et 5 correspond à la classe de risque 1 ou 2, ce qui signifie bois à utilisation sous abri à l'intérieur, entièrement protégé et un traitement de préservation peut être recommandé dans certains emplois.

### 3. Evaluation de l'efficacité des traitements combinés huiles de soja-cire d'abeille

#### 3.1. Critères distinctifs des huiles

Le traitement oléothermique a été effectué en première étape par de l'huile de soja pure chauffée, qui est considérée comme huile semi-siccative, présente un degré d'insaturation moyen en raison de sa teneur en acides gras polyinsaturés (40 à 50%), ou l'acide linoléique (C18 :3) (5,5 à 11%), de l'acide linoléique (C18 :2) (50 à 57%) et de l'acide mono-insaturés comme l'acide oléique (C18 :2) (18 à 26%).

La deuxième étape est la transformation de l'huile de soja pure pour obtenir un produit intermédiaire en faisant subir à l'huile végétale une réaction d'époxydation. Les huiles époxydées sont ainsi considérées comme des réactifs de l'oléochimie à part entière.

Le tableau 17 résume les facteurs essentiels de composition de chaque huile étudiée : huile de soja pure et huile de soja époxydée ;

Tableau 17. Caractéristiques et propriétés des huiles utilisées

Analyse	Norme/Méthodes	Unité	Huile de soja pure	Huile de soja époxydée
Indice d'acide	NF T60-204	mg de KOH/g	0.02	0.38
Indice d'iode	NF ISO 3961	g d'I <sub>2</sub> /100g	132.47	2.67
Indice de peroxyde	NF T60-220	még O <sub>2</sub> /kg	1.88	9.84
Indice de saponification	NF ISO 3675	mg de KOH/g	/	177.3
Masse volumique 20°C	ISO 3675	kg/l	0.92	0.99
Viscosité cinétique à 40°C	ISO 3140	mm <sup>2</sup> /s	54.85	225.44

La fonction époxyde offre surtout la possibilité d'accéder à différents dérivés du fait de la variété des nucléophiles permettant l'ouverture du cycle époxy, qui donne naissance à une ou plusieurs fonctions alcools sur chaque chaîne aliphatique.

-L'indice d'acide est le nombre de milligrammes de potasse nécessaire pour neutraliser toute l'acidité d'un gramme d'huile, l'acidité d'une huile minérale pure (brute) est pratiquement nulle, tableau 17, cependant l'huile époxydée possède un indice d'acide important suite à l'ouverture des groupements époxyde en présence de peracide formique fabriqué in situ (en utilisant H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> et de l'acide formique), qui permet la formation des groupements hydroxyles secondaires ou des alcools secondaires.

-L'indice d'iode indique la présence de doubles liaisons sur la chaîne aliphatique qui est de l'ordre de 132.47 g d'I<sub>2</sub>/100g pour l'huile pure et 2.67 g d'I<sub>2</sub>/100g pour l'huile époxydée ; cela affirme que le protocole pour l'époxydation des insaturations effectué a donné de bons résultats.

-L'indice de saponification est le nombre de milligrammes de potasse nécessaires pour saponifier un gramme d'huile. L'indice comprend la consommation de potasse nécessaire à la neutralisation de l'acidité et la différence entre les deux valeurs représente un indice d'ester correspondant aux corps gras (177.3 mg de KOH/g).

### 3.2. Gain de poids en pourcentage (GPP)

Après traitement par l'huile de soja chaude (pure ou époxydée) , le gain de poids en pourcentage GPP des éprouvettes de bois étudiées sont présentées sous forme d'histogramme (Fig 39). La valeur du GPP n'a aucun effet significatif de temps ou de température.

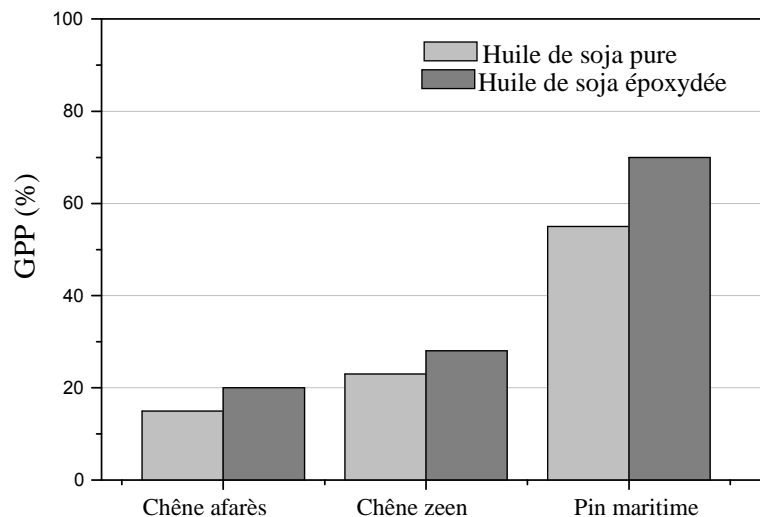


Figure 39. Gain de poids en pourcentage des bois étudiés après traitement oléothermique

La valeur de GPP était d'environ 15% à 20% pour le chêne afarès, 23% à 28% pour le chêne zeen et 55% à 70 % pour le pin maritime. L'augmentation du poids après traitement thermique par l'huile chaude présentée par Sailer et Rapp[132] était d'environ 42% à 51% et de 10% à 18% GPP après traitement pour les bois du pin et épicéa, respectivement. Pour nos espèces le taux GPP est varié, expliqué par changements anatomiques des échantillons, comme il pourrait être lié à la densité (voir tableau 14). Le traitement thermique augmente la taille des pores en raison de l'élimination des composants des parois cellulaires[133].

### 3.3. Teneur en humidité (MC)

La teneur en des échantillons témoin et traité est résumée dans la figure 40.

On constate que le traitement à l'huile a abouti à une MC améliorée et inférieure par rapport à l'échantillon témoin. Pour le traitement thermique à l'huile, la plus forte réduction du pourcentage de MC a été obtenue pour le bois traité avec de l'huile de soja époxydée sur le chêne zeen et le chêne afarès dans les figures 40 (a) et (b). Cependant, pour le pin maritime, la plus forte réduction du pourcentage de MC a été obtenue avec de l'huile de soja pure dans la figure 40 (c). [134] ont indiqué que le traitement thermique à l'huile diminue la MC du bois et suggère également que la MC des échantillons traités thermiquement était significativement faible lorsque la température est supérieure à 190 ° C, mais l'augmentation de la durée du traitement n'a pas affecté la MC. Cette diminution de la MC peut s'expliquer par la libération des groupes OH dans les chaînes celluloses. La réduction des groupes OH accessibles conduit à une interaction limitée avec l'eau par rapport au bois non traité[135]. [136]ont montré que les hémicelluloses étaient les composantes des cellules de bois les plus dégradées par le traitement thermique. De plus, la dégradation de l'hémicellulose due à la haute température appliquée[137]. En outre, les échantillons de bois traités avec de l'huile et de la cire ont une absorption d'eau beaucoup plus faible par rapport aux échantillons traités à l'huile seule.[134] ont constaté que la cire mou est meilleure que l'huile de palme ou l'huile de soja pour améliorer la performance en humidité du bois traité thermiquement

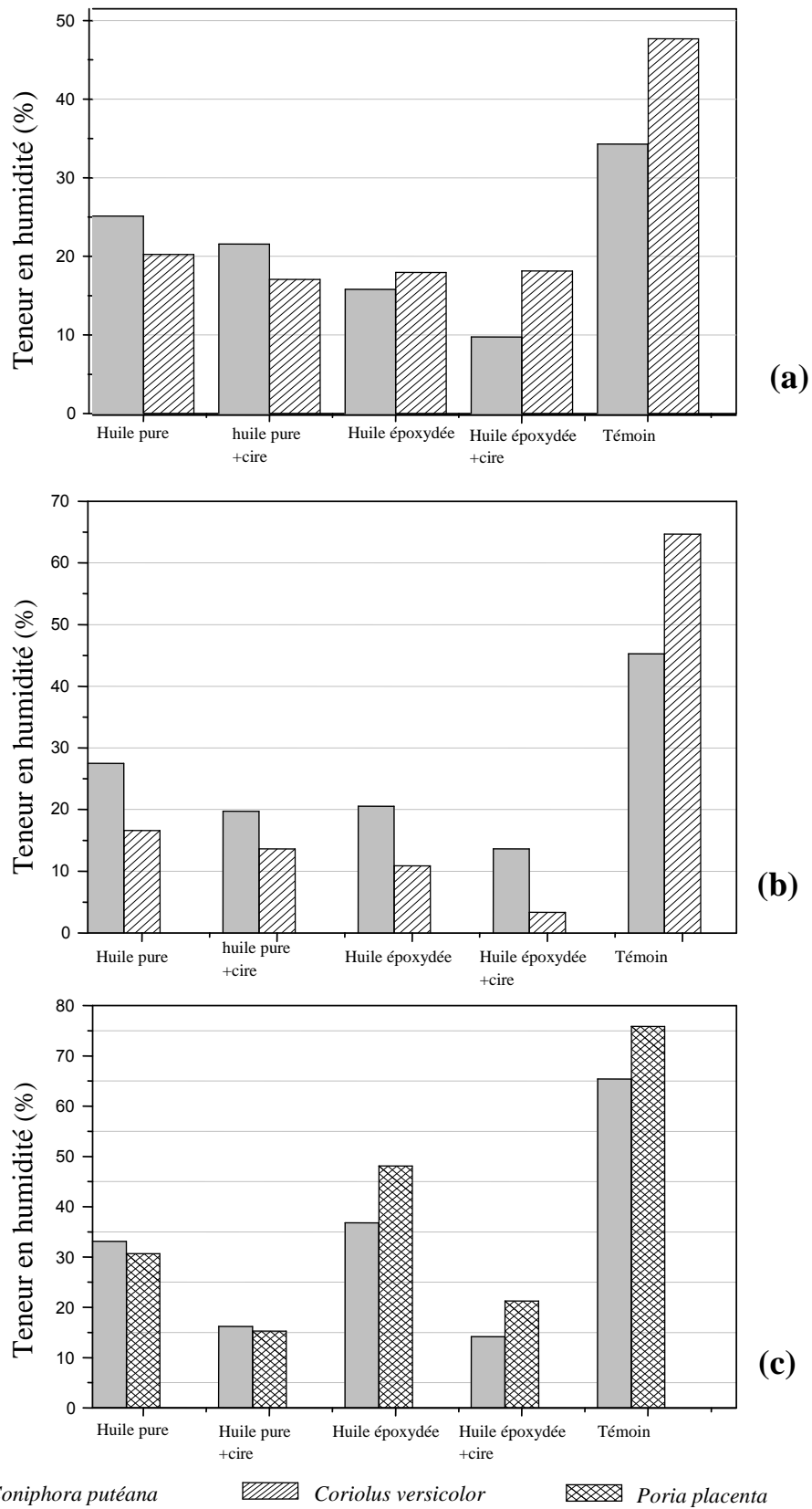


Figure 40. Comparaison de la teneur en humidité des échantillons témoin et traités de chêne zeen (a), de chêne afares (b) et de pin maritime (c).



### 3.4. Résistance aux champignons

L'hétérogénéité naturelle du bois, ainsi que celle des agents biologiques, induisent des dispersions des résultats de ce fait ; de grandes différences entre les traitements. Toutefois, des tendances sont nettement observables : nous avons présenté les résultats sous forme d'histogrammes, ce qui permet de visualiser sur un même graphe l'influence de type de traitement sur l'espèce étudiée par rapport aux champignons et en comparaison avec un témoin.

#### **-Dégradabilité du chêne zeen**

La perte de masse de chêne zeen traité et non traité après exposition à *Coriolus versicolor* et *Coniophora puteana* est présentée dans la figure 41-(a). Les résultats montrent une réduction de 60% et 30% de la perte de masse pour les lots traités à base d'huile de soja pure et époxydée, respectivement contre *C.versicolor* et *C.puteana*. Les résultats sont améliorés avec la combinaison de la cire d'abeille à l'huile pure ou époxydée. Ces lots de traitement améliorent la résistance de chêne zeen contre la pourriture brune, précisément *Coniophora puteana*.

#### **-Dégradabilité du chêne afarès**

Les résultats sont présentés dans la figure 41-(b). Les quatre lots de traitement ayant présentés une résistance assez importante avec une réduction de 80% et 70% de la perte de masse pour les lots traités à base d'huile de soja pure et époxydée, respectivement contre *C.versicolor* et *C.puteana*. L'ajout de la cire d'abeille aux traitements par l'huile de soja pure ou époxydée a attribué à une diminution d'ordre de 2%, expliqué par la formation d'un film imperméable.

L'effet de traitement a eu un impact plus important sur la durabilité biologique contre *C.versicolor* que *C.puteana*.

#### **-Dégradabilité du pin maritime**

Les quatre lots de traitement présentés dans la figure 41-(c), permet d'abaisser les pertes de masse de façon significative jusqu'à atteindre un état résistant inférieur à 5% vis-à-vis le *poria placenta*, sauf qu'avec le lot à base de l'huile de soja pure. Nous avons également une décroissance progressive de la dégradabilité pour les quatre lots de traitements contre de *Coniophora puteana* avec des pertes de masses inférieures ou égale 7%.

Et dans tous les cas l'ajout de la cire d'abeille comme finition au traitement permet de diminuer encore la perte de masse.

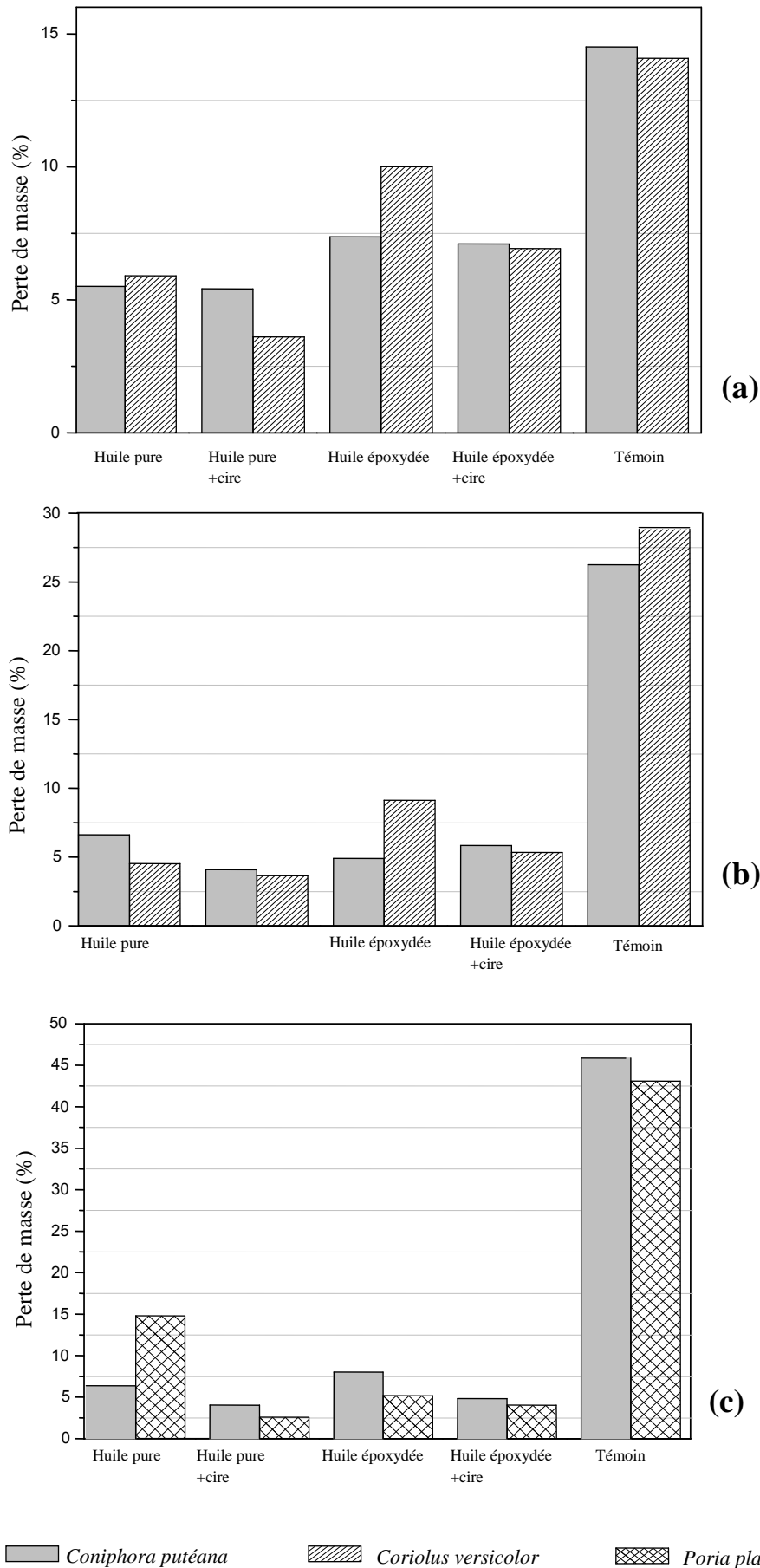


Figure 41. Pertes de masse des éprouvettes d'aubier de Chêne zeen (a), Chêne afarès (b) et Pin maritime (c) traitées avec l'huile de soja pure et époxydée à 180 ° C pendant 2 heures ou combinées avec de la cire d'abeille, après 16 semaines d'exposition aux champignons lignivores de pourriture brune et fibreuse blanche

- **Discussions**

Les quatre lots de traitement ont donné des résultats plus au moins approuvables comparant aux échantillons témoins et confirment qu'il est possible d'obtenir de nouveaux matériaux de durabilité élevée par un traitement thermique à l'huile de soja pure ou époxydée à 180°C pendant deux heures. Sailer et al.[138] ont révélé que le traitement thermique à l'huile à des températures de 190 °C à 220 °C améliorait la résistance du bois à la pourriture brune *Coniophora puteana*. De plus, Leithoff et Peek[139] ont trouvé que des températures supérieures à 170 °C étaient efficaces pour améliorer la durabilité de deux espèces de bambous. La température de traitement à 180°C, utilisée dans cette recherche, augmente significativement la classe de durabilité. Le pin maritime a été classé comme non durable, après traitement, sa classe de durabilité est augmenté jusqu'à la classe très durable. Un résultat similaire de Welzbacher et Rapp[140] qui ont prouvé que le traitement thermique à l'huile peut améliorer la durabilité des bois d'épicéa et de pin contre la pourriture blanche *Coriolus versicolor* et la pourriture brune *Coniophora puteana* en comparaison avec d'autres procédés de traitement thermique.

Les feuillus : le chêne zeen et le chêne afarès ont été classés comme moyennement durable et peu durable, respectivement, après traitement leurs classes de durabilité s'est amélioré vers la classe durable.

Les éprouvettes ayant été traitées à l'huile puis fini par la cire d'abeille montrent globalement une meilleure résistance par rapport à celle traitées à l'huile seule (pure ou époxydée). Nous expliquons ce résultat par l'aptitude de la cire à former une barrière imperméable qui protège le bois de la pénétration de l'eau liquide comme elle peut ralentir la croissance des champignons.

#### 4. Le vieillissement accéléré

##### 4.1. Changement de la couleur

Les échantillons préparés des espèces étudiés ont été exposés à un rayonnement UV dans un appareil Xenotest pendant 120 heures avant de subir aucun traitement.

L'effet du rayonnement solaire UV est l'un des paramètres les plus efficaces parmi tous les facteurs environnementaux qui contribuent au processus d'altération du bois[119]. Ces effets combinés conduisent à la décomposition des couches superficielles, aux changements de couleur, à la valeur esthétique et à long terme ont abouti à une surface grise à carreaux[141].

La figure 42 montre l'effet du vieillissement par UV artificiel sur les échantillons en bois.

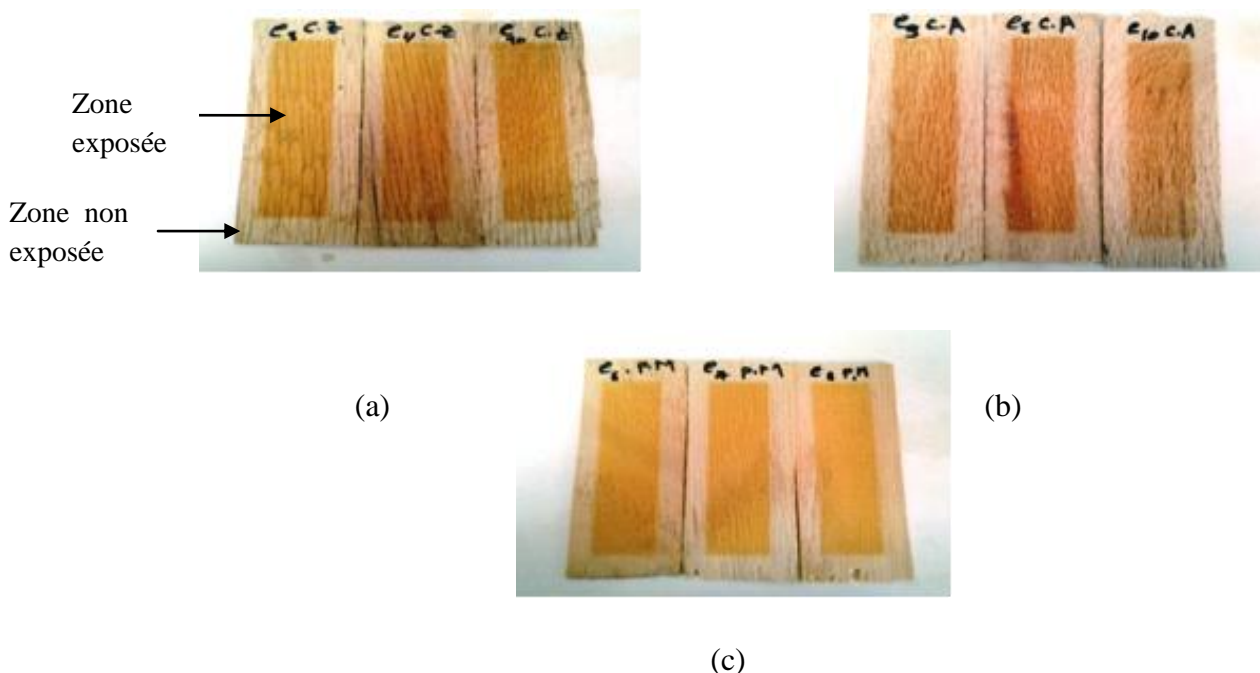


Figure 42. Eprouvettes de Chêne Zeen (a), Chêne Afarès (b) et Pin maritime (c) après 120h au sein de l'appareil « Xénotest »

Nous observons un jaunissement généralisé des parties centres exposées traduit par la formation de radicaux après rupture des liaisons des chaines lignocellulosiques. Les nuances de couleur constatées sur les différentes espèces indiquent le degré de dégradation subit par chaque échantillon. La photodégradation est manifestée par un premier changement de couleur, suivi de la rugosité et de la fissuration. De la littérature, le rôle décisif dans le vieillissement en bois est porté par les processus chimiques concurrentiels de la décomposition et la réticulation des macromolécules dans ce composé normal de polymère. La rupture des liaisons chimiques peut avoir lieu en menant à une production des radicaux, ce processus est prétendu être responsable du jaunissement du bois[142-144].

Parmi tous les constituants de bois, seulement la lignine absorbe relativement fortement dans la région d'UV/visible. Des analyses chimiques ont montré que la détérioration du bois irradié par la lumière est principalement liée à la décomposition de la lignine[145-147]. Lorsqu'il est

stocké à l'extérieur et exposé à la lumière directe du soleil, le bois subit une dégradation chimique causée par les rayons UV en raison de sa teneur en lignine. Par conséquent la dégradation provoquée par la lumière du bois est principalement provoquée par des réactions photochimiques se produisant en lignine.

La décoloration du bois a été associée à la formation de groupes carbonyle et à la dégradation de la lignine[148]; Ce dernier contient surtout un groupe guaiacylène très chromophore, qui produit par dégradation de radical guaiacoxyle[149].

#### 4.2. Perte de masse

Les échantillons ont été retirés du dispositif après différents temps d'irradiation allant de 30 à 120 h. Un manque de matière est également observé, Fig. 43 montre l'évolution de la perte de masse du bois, exprimée en pourcentage au cours de la dégradation.

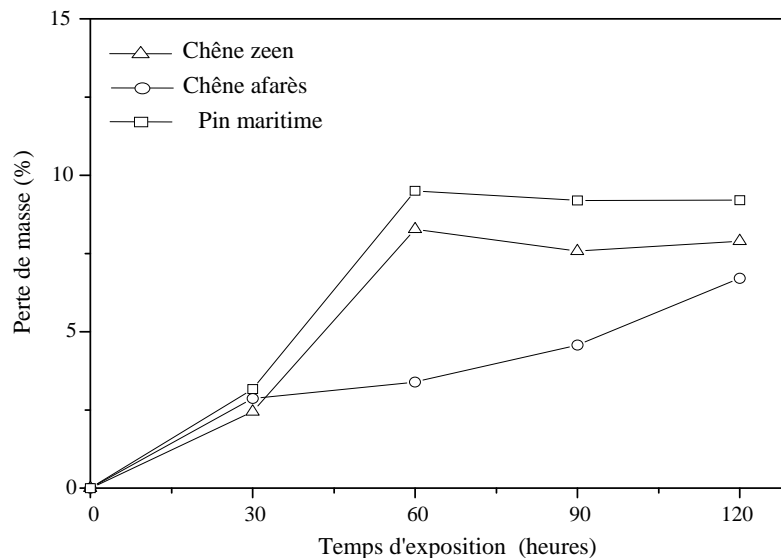


Figure 43. Perte de masse du Chêne Zeen, Chêne Afarès, et Pin maritime durant un cycle de 30h.

Après les 30 heures premières d'irradiation lumineuse par lampe au xénon, la perte de masse augmente fortement au fur et à mesure, puis se stabilise progressivement pour le pin maritime et le chêne zeen. D'autre part, la perte de masse de chêne afares semble augmenter régulièrement tout au long du temps d'exposition.

Cette perte de masse est due, à la libération de l'eau liée, à la structure du bois (les dimensions de fibre), et surtout à la composition chimique des bois résineux et feuillus. Le bois feuillu a la lignine avec des unités de guaiacylène et de syringyle, alors que la lignine de bois résineux se compose seulement d'unités de guaiacylène[150]. En raison de leur contenu important de la lignine et les extractibles, la perte de masse de pin maritime est plus prononcée.

### 4.3. Comportement mécanique en traction

La résistance mécanique a également été utilisée comme mesure du niveau de dégradation dans les échantillons de bois.

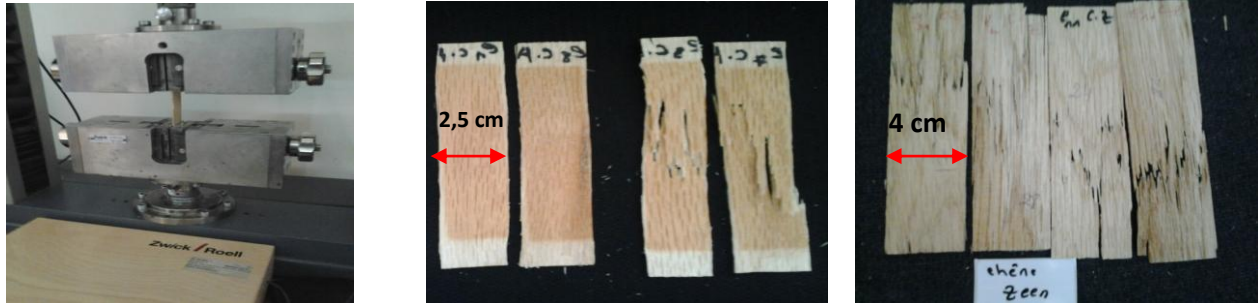


Figure 44. Modes de rupture en traction des éprouvettes de bois

Nous avons mesuré la résistance à la traction de nos échantillons de bois, avant et après vieillissement accéléré de 120 heures. Le tableau 18 montre les caractéristiques mécaniques des trois espèces du bois étudié.

Tableau 18. Paramètres mécaniques des bois étudiés avant et après vieillissement UV accéléré

Espèces de bois	Vieillissement UV	Contrainte de rupture $\sigma$ (MPa)	Déformation à la rupture $\varepsilon$ (%)	MOE (MPa)
Chêne zeen	Avant	43.2 $\pm$ 14.3	1.8 $\pm$ 0.9	3964.2 $\pm$ 407.2
	Après	42.0 $\pm$ 16.5	3.2 $\pm$ 1.1	3233.2 $\pm$ 369.2
Chêne afarès	Avant	64.3 $\pm$ 11.6	2.9 $\pm$ 0.5	4155.0 $\pm$ 319.3
	Après	58.6 $\pm$ 13.5	4.1 $\pm$ 0.7	3036.8 $\pm$ 439.7
Pin maritime	Avant	77.1 $\pm$ 22.7	2.8 $\pm$ 0.7	4948.1 $\pm$ 366.8
	Après	66.8 $\pm$ 20.1	3.9 $\pm$ 0.8	3713.6 $\pm$ 389.3

Sur la base des résultats des essais mécaniques et bien que les contraintes à la rupture des bois non exposés soient plus élevées que leurs homologues en bois âgés, leur MOE est nettement plus élevé. Ce comportement peut s'expliquer probablement par des microfissures dans les échantillons de bois irradiés, qui ont une influence beaucoup plus grande sur la résistance à la traction que sur le module [151, 152].



#### 4.4. Analyse microscopique et spectroscopique

##### 4.4.1. Observations microscopique au MEB au cours du vieillissement

Les changements microscopiques accompagnent les changements de couleur et les changements chimiques du bois pendant la dégradation. La figure 45 montre des images MEB de la structure des échantillons avant (à gauche) et après (à droite) vieillissement aux UV.

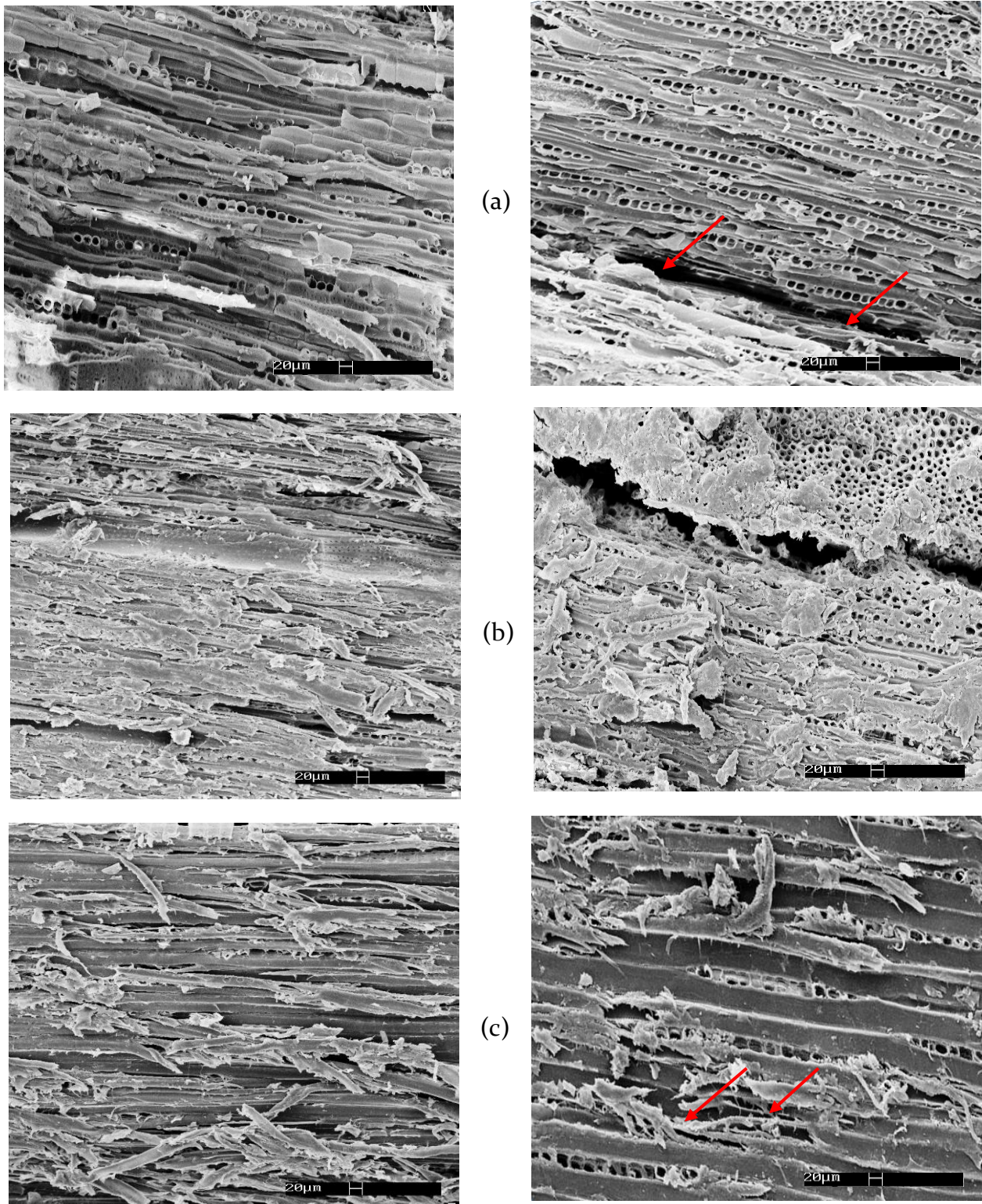


Figure 45. Microstructure des échantillons du bois avant (à gauche) et après (à droite) vieillissement UV de 120 heures: (a) Chêne de Zeen ; (b) Chêne d'Afarès ; (c) Pin maritime.



Les fibres sont clairement visibles sur le cliché MEB des trois échantillons de la figure 45, après exposition, les fibres ont été affaiblies avec des défauts de surfaces substantielles. Cette détérioration est plus importante dans le cas de chêne zeen (Figure 45-a), et modérée pour le chêne afarès avec quelques fissures microscopiques (Figure 45-b) tandis que le pin maritime a été légèrement affaibli (Figure 45-c).

L'action de la lumière conduit à la formation de fissures microscopiques. Les cellules perdent la force de liaison avec les cellules adjacentes près de la surface du bois en raison de la dégradation de la lignine. Les changements observés peuvent alors être résumés comme formation de microfissures et destruction des différentes couches de la paroi cellulaire.

#### 4.4.2. Analyse spectroscopique par FT-IR

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) a été utilisée pour étudier les changements chimiques du bois causés par l'irradiation lumineuse. La spectroscopie FTIR est utilisée comme une technique puissante de nos jours. Dans le cas du bois, la région de l'empreinte digitale est située entre 800 et 1800  $\text{cm}^{-1}$ . La figure 46 montre les spectres FTIR des échantillons de bois avant et après vieillissement.

Les spectres IR des échantillons de bois ont la même allure mais avec une diminution de l'intensité de l'absorption. La diminution de l'intensité des pics dans les spectres après vieillissement est peut être dû au rôle catalytique de la réaction de déshydratation exercé par les rayons UV artificiels.

Le spectre FTIR global des polymères de bois vieilli et non vieilli indique qu'un certain nombre de caractéristiques spectrales semblent être sensibles à l'irradiation. Toutes les bandes attribuées à la composante de lignine, telles que 1590  $\text{cm}^{-1}$ , 1505  $\text{cm}^{-1}$  et 1465  $\text{cm}^{-1}$  pour les bois de chêne afarès et zeen sur les Fig. 46 (a) et 46 (b) et 1505  $\text{cm}^{-1}$ , 1630  $\text{cm}^{-1}$  et 1450  $\text{cm}^{-1}$  pour le pin maritime dans la Fig.46 (c), diminuent significativement suite au processus d'irradiation. Ce résultat indique que la structure de la lignine des trois échantillons de bois a été dégradée dans une mesure significative.

L'évolution de la perte de lignine est mieux suivie à la bande à 1505  $\text{cm}^{-1}$  des trois bois, attribuée à la décomposition partielle de la lignine, la diminution de l'intensité de ce pic indiquant la dégradation de la lignine au cours du processus d'irradiation. D'autres auteurs ont étudié la différence des spectres FTIR enregistrés pour la lignine à partir de bois irradié et non irradié[153, 154]. La diminution observée pour cette bande est significativement plus importante dans le cas du pin maritime que dans le cas des chênes, après 120 heures de traitement.

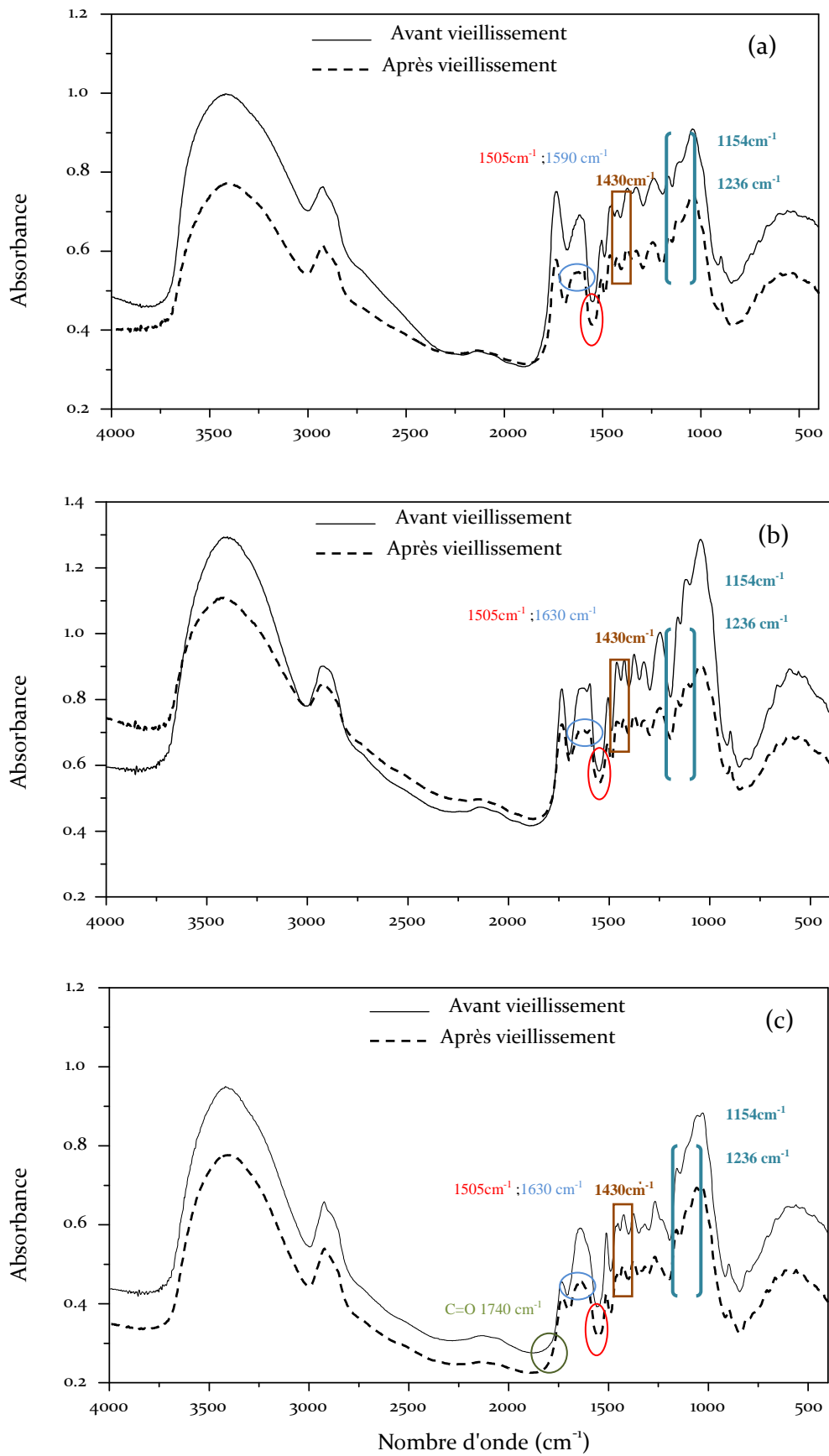


Figure 46. Spectres infrarouges des bois de Chêne de Zeen (a); Chêne d'Afarès (b); Pin maritime(c) avant et après vieillissement.

Pour le bois résineux, la diminution de l'absorbance à  $1740\text{ cm}^{-1}$ , affectée aux vibrations des groupes carboxyles C=O d'acide acétyle ou d'acide carboxylique a été compensée par une augmentation des mêmes groupes dérivés principalement de la lignine.

Le comportement de la bande à  $1430\text{ cm}^{-1}$ , caractéristique de la cellulose cristalline, indique que la zone amorphe de la composante cellulosique des trois bois est plus affectée par le processus de dégradation.

Deux grandes diminutions d'absorption sont apparentes à  $1236$  et  $1154\text{ cm}^{-1}$ . La première diminution appartient à l'allongement asymétrique de la liaison éther, tandis que la seconde appartient à l'allongement symétrique de la liaison éther, dû à la déformation aromatique en C-H et à la vibration du cycle glucose. Ces diminutions d'absorption indiquent la séparation de l'éther et la dégradation de la cellulose[143]. Les changements observés peuvent alors être résumés comme formation de microfissures et destruction des différentes couches de la paroi cellulaire.

Il en résulte de cette partie du vieillissement que les rayonnements UV du soleil dégradent les matériaux lignocellulosiques en particulier la lignine. La cellulose est protégée de la dégradation photochimique de la lignine qui peut jouer un triple rôle[155]:

- Filtre en absorbant les photons du proche ultraviolet ;
- Sensibilisateur en désactivant les états excités de la cellulose ;
- Antioxydant en formant des radicaux phénoxyles par des réactions de transfert radicalaire.

Chimiquement : Les groupements chromophores de la lignine absorbent les rayonnements UV et les transforment en énergie chimique, ces groupements chromophores vont être oxydés en radicaux phénoxy, dont ils cassent les molécules de lignine en plus petites molécules: hydroquinone et cétones qui sont solubles dans l'eau et finalement, la lignine est extraite des cellules du bois[156].

## 5. Résistance au vieillissement par une protection naturelle

La protection des matériaux bois contre les agressions extérieures par application préventive d'une finition (lasure, vernis...), n'est plus assurée, car ces revêtements se décolle du support avec le temps laissant de nouveau le champ libre aux UV et à l'eau

L'huile est le protecteur tout indiqué pour conserver au bois son aspect naturel. Elle est en effet naturellement hydrophobe. Les molécules d'huile de lin pénètrent en profondeur dans le bois et saturer les pores du bois en y prenant la place de l'air, on obtient un bois hydrofugé qui, cependant, continue à respirer. Donc l'huile vient modifier les porosités du bois et protège la lignine en évitant sa dégradation au contact de l'eau et des UV solaires. Selon les essences de bois, ces porosités sont plus ou moins ouvertes.

Selon le type d'huile et l'essence, la teinte du bois évolue de jaune très clair au rouge et leur utilisation ne risque pas de cloquer, contrairement aux lasures et peintures, est un avantage pour accompagner les déformations du bois.

Pour les usages en extérieur, les industriels cherchent à améliorer les performances des huiles en ajoutant des résines pour renforcer leur résistance aux UV.

Dans notre cas, nous avons utilisé de l'huile de soja (pure et époxydée) pour rendre le bois hydrofuge, en ajoutant à ce traitement de base une finition par la cire d'abeille pour une protection contre les salissures et les intempéries telles que l'humidité et les rayons UV.

La finition cirée protège, nourrit et met en valeur l'élégance naturelle du bois. Elle permet une haute protection hydrofuge des supports (donne de la résistance à l'eau) et redonne de la luminosité de l'éclat et de la dureté aux supports.

Les figures 47 et 48 ce sont des photos prises par un appareil professionnel pour montrer les résultats de traitement à l'huile de soja pure et époxydée chauffée à 180°C pendant 1 heure, puis cirés par la cire d'abeille naturelle. Ces échantillons de bois traité ont été exposés à une radiation de 500 heures à la lampe xénon.

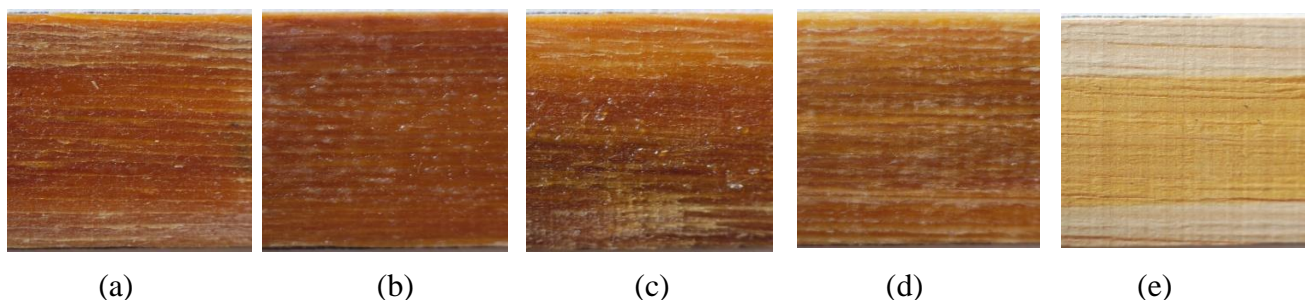


Figure 47. Éprouvettes de pin maritime traitées (a) Huile de soja pure ; (b) Huile de soja pure + cire ; (c) Huile de soja époxydée ; (d) Huile de soja époxydée +cire ; (e) Sans traitement.

Nous remarquons que les lots traités à l'huile de soja (pure ou époxydée) et cirés (b,d) ont résistés mieux aux radiations UV de 500 heures.

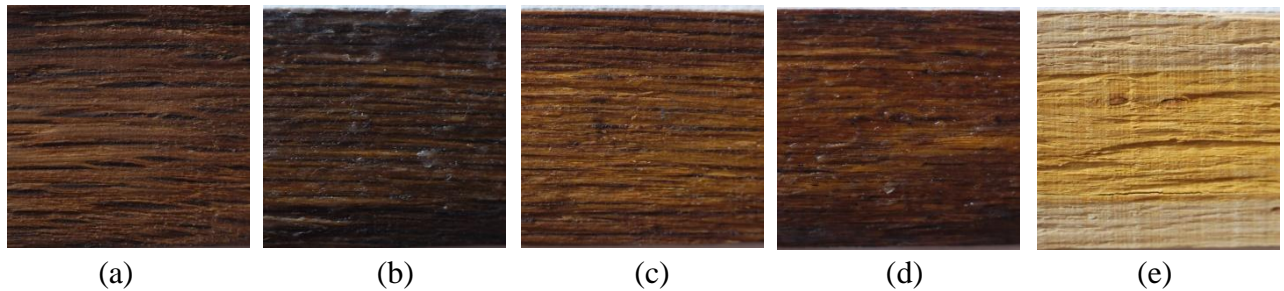


Figure 48. Éprouvettes de chêne zeen traitées (a) Huile de soja pure ; (b) Huile de soja pure + cire ; (c) Huile de soja époxydée ; (d) Huile de soja époxydée +cire ; (e) Sans traitement.

Pour le chêne zeen, les lots traités à l'huile de soja pure (a) et l'huile de soja pure plus la cire (b) ont résisté mieux à l'irradiation.

## **Conclusion et Perspectives**

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont permis de faire progresser considérablement nos connaissances sur trois bois algériens (chêne zeen, chêne afarès et pin maritime) et l'influence de la nature de l'essence utilisée (feuillu ou résineux), pour une meilleure application dans l'industrie du bois local.

Nous avons procédé en première partie à l'étude de la composition chimique et la caractérisation physique des trois bois étudiés dans le but d'exposer ses avantages, les résultats montrent une variabilité qualitative et quantitative très intéressante entre le bois feuillu et le bois résineux, le pin maritime est classé comme bois léger, les chênes (zeen et afarès) ont l'indice des bois lourds.

Nous avons poursuivi l'étude par une exposition de ces trois bois à deux phénomènes de dégradation : biologique (les champignons lignivores) et climatique (les rayons UV). Leurs durabilités naturelles ont été déterminées et comparées à l'aubier de pin sylvestre et le hêtre comme espèce de bois de référence. Les résultats ont montré une durabilité de classe 3, 4 et 5 pour le chêne zeen, le chêne afarès et le pin maritime, respectivement.

L'évaluation du processus de photodégradation a été étudié par un vieillissement accéléré dans une chambre d'essai au xénon. Les résultats montrent une décoloration qui se produit sur tous les échantillons en raison de la photodégradation de la lignine et des extraits sur la surface du bois pendant l'irradiation. La microstructure s'affaiblit surtout dans les zones à forte teneur en hémicellulose et en lignine. La résistance mécanique en traction a également été mesurée avant et après exposition de 120 heures aux UV. Il apparaît qu'après irradiation, une diminution du MOE après vieillissement indique que les échantillons de bois ont perdu une certaine rigidité en raison de la dégradation des hémicelluloses et de la lignine.

La seconde partie de notre étude est concernée par un traitement de préservation et de protection qui a été recommandé pour les trois espèces vu leurs classes de durabilité. Le traitement thermique à l'huile de soja pure ou époxydée a montré une réduction assez importante de la perte de masse contre *coniophora puteana*, *poria placenta* et *coriolus versicolor* pour les trois espèces, et augmentation dans la classe d'emploi. Cela est dû à l'effet hydrophobe de l'huile qui réduit la teneur en humidité de bois. L'addition de la cire d'abeille pourrait être un facteur limitant le développement des champignons, elle a joué le rôle d'une barrière qui empêche les vapeurs d'eau de pénétrer, comme elle offre une résistance à l'eau.



Le traitement oléothermique par l'huile de soja est le traitement de base qui rend le bois plus stable, hydrophobe et moins susceptible aux attaques de champignons et la lubrification par la cire d'abeille a pour but de rendre le bois brillant et naturellement imperméable.

De plus, ces traitements offrant une durabilité importante avec des produits de faibles toxicités pour l'écosystème et qu'ils pourraient être une bonne alternative aux traitements chimiques présentant des impacts environnementaux forts.

L'ensemble de cette étude permet de suggérer qu'il est possible de mettre en place une stratégie de choix entre les bois locaux ainsi les conditions de traitement thermique pour optimiser les coûts de production du bois.

## **Perspectives**

Les perspectives de ce travail sont nombreuses, nous citons à titre d'exemple :

Variation de la durée de traitement à l'huile (4heures ; 6 heures) pour l'huile de soja pure et époxydée ;

Variation de la température du traitement à l'huile (200°C, 220°C et 240°C) pour l'huile de soja pure et époxydée ;

Un traitement à la cire d'abeille seul ;

La prolongation de la période de test à plus de 16 semaines ;

Exposition des bois traités aux autres types de microorganismes de biodégradations (termites, insectes...);

Il semble nécessaire d'étudier le vieillissement du bois non traité à des intervalles de temps plus longs pour assurer les mécanismes de dégradation.

L'étude de l'efficacité de traitement par l'huile et la cire contre les radiation UV (500heures) par des méthodes spectrales (FT-IR, MEB, DRX) pour mieux percevoir le comportement du revêtement.

# **Références Bibliographiques**

- [1] M. Messaoudène, M. Tafer, A. Loukkas, and R. Marchal, "Propriétés physiques du bois de chêne zéen de la forêt des Ait Ghobri (Algérie)," *Bois et forêt des tropiques* vol. 298, pp. 37-48, 2008.
- [2] A. Haddad, D. Lachenal, A. Marechal, G. Janin, and M. Labiod, "Delignification of aleppo pine wood (*Pinus Halepensis* Mill) by soda-anthraquinone process: pulp and paper characteristics," *Cellulose Chemistry & Technology*, vol. 43, no. 7, p. 287, 2009.
- [3] H. TATAR, "LA FORÊT: UNE CHANCE POUR LE MILIEU RURAL JIJELLIEN," *Sciences & Technologie D*, no. 28, pp. 39-44, 2008.
- [4] D. Fengel and G. Wegener, "Wood: chemistry, ultrastructure, reactions," *Walter de Gruyter*, vol. 613, pp. 1960-82, 1984.
- [5] E. Sjostrom, *Wood chemistry: fundamentals and applications*. Elsevier, 2013.
- [6] M. El Yachioui, N. El Halloui, and R. Villa, "Valorisation des tubercules de topinambour par hydrolyse enzymatique," *Journal of food engineering*, vol. 23, no. 1, pp. 1-19, 1994.
- [7] J. Ralph *et al.*, "Lignins: Natural polymers from oxidative coupling of 4-hydroxyphenylpropanoids," *Phytochemistry Reviews*, vol. 3, pp. 29-60, 2004.
- [8] T. P. Schultz and D. D. Nicholas, "Naturally durable heartwood: evidence for a proposed dual defensive function of the extractives," *Phytochemistry*, vol. 54, no. 1, pp. 47-52, 2000.
- [9] T. P. Schultz, T. F. Hubbard, L. Jin, T. H. Fisher, and D. D. Nicholas, "Role of stilbenes in the natural durability of wood: fungicidal structure-activity relationships," *Phytochemistry*, vol. 29, no. 5, pp. 1501-1507, 1990.
- [10] D. C. Eastwood *et al.*, "The plant cell wall-decomposing machinery underlies the functional diversity of forest fungi," *Science*, vol. 333, no. 6043, pp. 762-765, 2011.
- [11] G. Seehann and B. M. Hegarty, *A bibliography of the dry rot fungus, Serpula lacrymans*. IRG Secretariat, 1988.
- [12] D. DIROL and X. DEGLISE, "Durabilité des bois et problèmes associés," *Hermes Science*, 2001.
- [13] F. Ravilly and D. Dirol, "Compararison de l'action lignivore de deux champignons agents de pourriture fibreuse blanche," *Material und Organismen*, 1977.
- [14] K. E. Eriksson, "Enzyme mechanisms involved in cellulose hydrolysis by the rot fungus *Sporotrichum pulverulentum*," *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 20, no. 3, pp. 317-332, 1978.
- [15] W. FINDLAY, "Timber pests and diseases," *Timber pests and diseases*, 1967.
- [16] R. Courtecuisse and B. Duhem, *Guide des champignons de France et d'Europe*. Delachaux et Niestlé Lausanne, 1994.
- [17] T. Abe, D. E. Bignell, and M. Higashi, *Termites: evolution, sociality, symbioses, ecology*. Springer Science & Business Media, 2000.
- [18] D. Inward, G. Beccaloni, and P. Eggleton, "Death of an order: a comprehensive molecular phylogenetic study confirms that termites are eusocial cockroaches," *Biology Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 331-335, 2007.
- [19] F. Legendre, M. F. Whiting, C. Bordereau, E. M. Canello, T. A. Evans, and P. Grandcolas, "The phylogeny of termites (Dictyoptera: Isoptera) based on mitochondrial and nuclear markers: implications for the evolution of the worker and pseudergate castes, and foraging behaviors," *Molecular phylogenetics and evolution*, vol. 48, no. 2, pp. 615-627, 2008.

- [20] O. Pignolet, "Optimisation de la durabilité de bois d'oeuvre (classe d'emploi 4) à l'aide d'anhydrides alkényles succiniques d'origine végétale," 2008.
- [21] NF-EN 350-1: Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois. Durabilité naturelle du bois massif ; partie 1 : Guide des principes d'essais et de classification de la durabilité naturelle du bois.
- [22] NF EN 335-2 Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois - Définition des classes d'emploi - Partie 2 : application au bois massif
- [23] O. Pignolet, "Optimisation de la durabilité de bois d'oeuvre (classe d'emploi 4) à l'aide d'anhydrides alkényles succiniques d'origine végétale," 2008.
- [24] J. Nault, "Radial distribution of thujaplicins in old growth and second growth western red cedar (*Thuja plicata* Donn)," *Wood science and technology*, vol. 22, no. 1, pp. 73-80, 1988.
- [25] P. Nagnan and J. Clement, "Terpenes from the maritime pine *Pinus pinaster*: toxins for subterranean termites of the genus *Reticulitermes* (Isoptera: Rhinotermitidae)?," *Biochemical systematics and ecology*, vol. 18, no. 1, pp. 13-16, 1990.
- [26] R. W. Kennedy, "Fungicidal toxicity of certain extraneous components of Douglas fir heartwood," University of British Columbia, 1955.
- [27] Y. Charpentier, "Etude des termites souterrains français: les réticulitermes," 2005.
- [28] D. Dirol and A. Scalbert, "Improvement of wood decay resistance by tannin impregnation," in *Proceeding of annual meeting of IRG on wood preservation. Japan*, 1991, p. 13.
- [29] K. Sung-Mo, J. J. Morrell, J. Simonsen, and S. Lebow, "Creosote movement from treated wood immersed in fresh water," *Forest products journal*, vol. 55, no. 12, p. 42, 2005.
- [30] H. A. Peters, W. A. Croft, E. A. Woolson, B. A. Darcey, and M. A. Olson, "Seasonal arsenic exposure from burning chromium-copper-arsenate-treated wood," *JAMA*, vol. 251, no. 18, pp. 2393-2396, 1984.
- [31] H. Peters, W. Croft, E. Woolson, B. Darcey, and M. Olson, "HEMATOLOGICAL, DERMAL AND NEUROPSYCHOLOGICAL DISEASE FROM BURNING AND POWER SAWING CHROMIUM-COPPER-ARSENIC (CCA)-TREATED WOOD," *Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology*, vol. 59, no. s7, pp. 39-43, 1986.
- [32] A. Todd and C. Timbie, "Preliminary Survey of Wood Preservative Production Facility at Koppers Company, Inc., Forest Products Group, Specialty Wood Chemicals Division, Valparaiso, Indiana," 1980.
- [33] P.-A. Dupraz, M. Mooser, and D. Pflug, *Dimensionnement des structures en bois: aide au calcul basé sur la SIA 265" Construciton en bois"*. PPUR presses polytechniques, 2009.
- [34] J. Natterer, *Construction en bois: matériau, technologie et dimensionnement*. PPUR presses polytechniques, 2004.
- [35] J. Verdu, "Vieillissement physique des plastiques," *Techniques de l'ingénieur*, pp. 1-17, 1990.
- [36] G. Xiao, M. Delamar, and M. Shanahan, "Irreversible interactions between water and DGEBA/DDA epoxy resin during hygrothermal aging," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 65, no. 3, pp. 449-458, 1997.
- [37] J. VERDU, *Action de l'eau sur les plastiques*. Ed. Techniques Ingénieur, 2000.
- [38] L. Augier, "Etude de l'élaboration de matériaux composites PVC/bois à partir de déchets de menuiserie: formulation, caractérisation, durabilité et recyclabilité," INPT, 2007.

- [39] F. Gugumus, "Thermooxidative degradation of polyolefins in the solid state: part 5. Kinetics of functional group formation in PE-HD and PE-LLD," *Polymer degradation and stability*, vol. 55, no. 1, pp. 21-43, 1997.
- [40] L. Podgorski, "Caractérisation d'un système bois-finition: étude du support bois, de la résine et du vieillissement du système complet," 1993.
- [41] L. Podgorski and A. Merlin, "Système bois-finitions extérieures: Vieillissement, comportement, Chapitre 8 dans" *Mécanique et ingénierie des matériaux: Durabilité des bois*," Ed. *Hermès science*, 2001.
- [42] B. Mailhot, S. Morlat-Thérias, P. O. Bussière, and J. L. Gardette, "Study of the Degradation of an Epoxy/Amine Resin, 2," *Macromolecular Chemistry and Physics*, vol. 206, no. 5, pp. 585-591, 2005.
- [43] A. Shyichuk, J. White, I. Craig, and I. Syrotynska, "Comparison of UV-degradation depth-profiles in polyethylene, polypropylene and an ethylene-propylene copolymer," *Polymer degradation and Stability*, vol. 88, no. 3, pp. 415-419, 2005.
- [45] J. White and A. Shyichuk, "Effect of stabilizer on scission and crosslinking rate changes during photo-oxidation of polypropylene," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 92, no. 11, pp. 2095-2101, 2007.
- [45] E. V. Schmid, *Durabilité des peintures extérieures: incidences des facteurs climatiques et écologiques sur la tenue des peintures*. Galvano Organo, Librairie de Traitements de Surface, 1998.
- [46] J. Lemaire, "Prédiction du comportement à long terme des matériaux polymères," *Journal de Chimie Physique et de Physico-Chimie Biologique*, vol. 95, no. 6, pp. 1386-1395, 1998.
- [47] D. R. Bauer, "Interpreting weathering acceleration factors for automotive coatings using exposure models," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 69, no. 3, pp. 307-316, 2000.
- [48] M.-L. Roux and F. Anquetil, *Finition des ouvrages en bois dans le bâtiment*. Centre Technique du Bois et de l'Ameublement, 1994.
- [49] C. Angelloz, L. Caramaro, P. Laine, and J. Vajja, "Comportement au vieillissement de fibres textiles synthétiques composantes de sangles, élingues et cordes toronnées," Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), 2005.
- [50] W. Achwal, "Use of UV (ultraviolet) absorbers for minimizing photodegradation of disperse dyes as well as polyester fiber," *Colourage*, vol. 41, no. 6, pp. 21-22, 1994.
- [51] G. Reinert, E. Schmidt, and R. Hilfiker, "Facts about the application of UV absorbers on textiles," *Melliand Textilberichte International Textile Reports*, vol. 75, pp. E 151-E 151, 1994.
- [52] G. Reinert and F. Fuso, "Stabilisation of textile fibres against ageing," *Coloration Technology*, vol. 27, no. 1, pp. 32-41, 1997.
- [53] W. Achwal, "Gleanings from German Literature: Use of UV absorbers in textiles," *Colourage*, vol. 42, pp. 44-46, 1995.
- [54] J. VOISIN, "Journée d'information et d'échange sur le vieillissement des matériaux à base de polymères. Recueil des communications., Paris, 14 juin 2000," INRS2000.
- [55] M. Wedler and J. Kastner, "TiO<sub>2</sub>-delustrant specialty for polyamide fibers," *Chemical fibers international*, vol. 47, no. 6, 1997.
- [56] D. DOCTEUR and I. NANCY, "Etude de systèmes de finitions pour bois: application de nouvelles formulations, vieillissement et amélioration des performances."
- [57] F. Cheviré, "Nouvelle génération d'absorbants UV inorganiques. Etude de solutions solides oxydes et oxynitrures. Application à la protection du bois," Université de Rennes 1, 2004.
- [58] P. Degobert, *Automobile et pollution*. Editions OPHRYS, 1995.
- [59] J.-M. Gaillard, "Photodégradation de systèmes bois-finitions(résines alkydes)," 1984.

- [60] J. Venet, *Identification et classement des bois français*. Ecole nationale du génie rural, des eaux et des forêts, Centre de Nancy, 1970.
- [61] N. Auclair, "Stabilité des couleurs des systèmes bois/vernis améliorée par les revêtements nanocomposites aqueux à usage extérieur," Université Laval Québec, 2010.
- [62] X. Yang, C. Vang, D. Tallman, G. Bierwagen, S. Croll, and S. Rohlik, "Weathering degradation of a polyurethane coating," *Polymer degradation and stability*, vol. 74, no. 2, pp. 341-351, 2001.
- [63] L. Podgorski, A. Merlin, and J. Saiter, "Natural and artificial ageing of an alkyd based wood finish: calorimetric investigations," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 41, no. 6, pp. 1319-1324, 1994.
- [64] L. Podgorski, M. Arnold, and G. Hora, "A reliable artificial weathering test for wood coatings," 2003.
- [65] DIN 75220 Novembre 1992 Ageing of automotive components in solar simulation units - Alterung von Kfz-Bauteilen in Sonnensimulationsanlagen
- [66] F. S. Güner, Y. Yağcı, and A. T. Erciyes, "Polymers from triglyceride oils," *Progress in Polymer Science*, vol. 31, no. 7, pp. 633-670, 2006.
- [67] M. A. PIERRE *et al.*, "HAMAD Berna," 2009.
- [68] NF T 60-104 - Produits pétroliers - Méthode de détermination de la couleur des produits pétroliers par comparaison avec une échelle de couleur.
- [69] H. Militz, "Thermal treatment of wood: European processes and their background," *IRG/WP*, vol. 40241, 2002.
- [70] P. Rousset, "Choix et validation expérimentale d'un modèle de pyrolyse pour le bois traité par haute température: de la micro-particule au bois massif," ENGREF (AgroParisTech), 2004.
- [71] B. Tjeerdsma, M. Boonstra, A. Pizzi, P. Tekely, and H. Militz, "Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement," *Holz als Roh-und Werkstoff*, vol. 56, no. 3, p. 149, 1998.
- [72] B. Tjeerdsma, M. Boonstra, and H. Militz, "Thermal modification of non-durable wood species. 2," *Improved wood properties of thermally treated wood. International Research Group on Wood Preservation, Document no. IRG/WP*, pp. 98-40124, 1998.
- [73] P. Chanrion and J. Schreiber, *Bois traité par haute température*. Centre Technique du Bois et de l'Ameublement, 2002.
- [74] H. Leithoff and R. Peek, "Hitzebehandlung-eine Alternative zum chemischen Holzschutz," *Tagungsband zur*, vol. 21, pp. 97-108, 1998.
- [75] V. Repellin, "Optimisation des paramètres durée et température d'un traitement thermique du bois. Modifications des propriétés d'usage du bois en relation avec les modifications physico-chimiques et ultrastructurales occasionnées par le traitement thermique," Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2006.
- [76] M. Chaouch, "Effet de l'intensité du traitement sur la composition élémentaire et la durabilité du bois traité thermiquement: développement d'un marqueur de prédiction de la résistance aux champignons basidiomycètes," Nancy 1, 2011.
- [77] J. Bourgois and R. Guyonnet, "Characterization and analysis of torrefied wood," *Wood science and Technology*, vol. 22, no. 2, pp. 143-155, 1988.
- [78] D. N.-S. Hon, *Chemical modification of lignocellulosic materials*. CRC Press, 1995.
- [79] D. Laroque, C. Inisan, C. Berger, É. Vouland, L. Dufossé, and F. Guérard, "Kinetic study on the Maillard reaction. Consideration of sugar reactivity," *Food Chemistry*, vol. 111, no. 4, pp. 1032-1042, 2008.



- [80] B. Esteves, J. Graca, and H. Pereira, "Extractive composition and summative chemical analysis of thermally treated eucalypt wood," *Holzforschung*, vol. 62, no. 3, pp. 344-351, 2008.
- [81] C. Ganne-Chedéville, "Soudage linéaire du bois: étude et compréhension des modifications physico-chimiques et développement d'une technologie d'assemblage innovante," Université Henri Poincaré, 2008.
- [82] M. Nuopponen, T. Vuorinen, S. Jämsä, and P. Viitaniemi, "Thermal modifications in softwood studied by FT-IR and UV resonance Raman spectroscopies," *Journal of Wood Chemistry and Technology*, vol. 24, no. 1, pp. 13-26, 2005.
- [83] H. Epmeier, C. Bengtsson, and M. Westin, "Effect of acetylation and heat treatment on dimensional stability and MOE of spruce timber," in *Proceedings for the first conference of the European Society For Wood Mechanics*, 2001, pp. 19-21.
- [84] D. Kamdem, A. Pizzi, and A. Jermannaud, "Durability of heat-treated wood," *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 60, no. 1, pp. 1-6, 2002.
- [85] C. Welzbacher, C. Brischke, and A. Rapp, "Estimating the heat treatment intensity through various properties of thermally modified timber (TMT)," ed: Document, 2009.
- [86] A. Burmester, "Investigation on the dimensional stabilization of wood," *Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin*, pp. 50-56, 1973.
- [87] D. Dirol and R. Guyonnet, "The improvement of wood durability by retification process," in *The international research group on wood preservation \_ Section 4 \_ Report prepared for the 24 Annual Meeting*, 1993, pp. 1-11.
- [88] K. Mitsui, H. Takada, M. Sugiyama, and R. Hasegawa, "Changes in the properties of light-irradiated wood with heat treatment. Part 1. Effect of treatment conditions on the change in color," *Holzforschung*, vol. 55, no. 6, pp. 601-605, 2001.
- [89] K. Mitsui, A. Murata, M. Kohara, and S. Tsuchikawa, "Colour modification of wood by light-irradiation and heat treatment," in *First European Conference on Wood Modification*, 2003.
- [90] K. Mitsui, A. Murata, and L. Tolvaj, "Changes in the properties of light-irradiated wood with heat treatment: Part 3. Monitoring by DRIFT spectroscopy," *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 62, no. 3, pp. 164-168, 2004.
- [91] C. Robert Welzbacher and A. Otto Rapp, "Durability of thermally modified timber from industrial-scale processes in different use classes: Results from laboratory and field tests," *Wood Material Science and Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 4-14, 2007.
- [92] M. Hakkou, M. Pétrissans, I. El Bakali, P. Gérardin, and A. Zoulalian, "Evolution of wood hydrophobic properties, during heat treatment of wood," in *Abstract of the First European conference on wood modification. Ghent, Belgium*, 2003.
- [93] M. Pétrissans, P. Gérardin, and M. Serraj, "Wettability of heat-treated wood," *Holzforschung*, vol. 57, no. 3, pp. 301-307, 2003.
- [94] J. L. Shi, D. Kocaefe, and J. Zhang, "Mechanical behaviour of Québec wood species heat-treated using ThermoWood process," *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 65, no. 4, pp. 255-259, 2007.
- [95] D. Kocaefe, B. Chaudhry, S. Poncsak, M. Bouazara, and A. Pichette, "Thermogravimetric study of high temperature treatment of aspen: effect of treatment parameters on weight loss and mechanical properties," *Journal of Materials Science*, vol. 42, no. 3, pp. 854-866, 2007.
- [96] S. Yildiz, "Effects of heat treatment on water repellence and anti-swelling efficiency of beech wood," *International research group wood pre, Section*, 2002.
- [97] O. Unsal and N. Ayrimis, "Variations in compression strength and surface roughness of heat-treated Turkish river red gum (*Eucalyptus camaldulensis*) wood," *Journal of Wood Science*, vol. 51, no. 4, pp. 405-409, 2005.



- [98] H. Rusche, "THERMAL-DEGRADATION OF WOOD AT TEMPERATURES UP TO 200 DEGREES C. 1. STRENGTH PROPERTIES OF DRIED WOOD AFTER HEAT-TREATMENT," *Holz als Roh-und Werkstoff*, vol. 31, no. 7, pp. 273-281, 1973.
- [99] C. Bengtsson, J. Jermer, and F. Brem, "Bending strength of heat-treated spruce and pine timber," in *IRG Annual Meeting*, 2007.
- [100] S. Poncsák, D. Kocaefe, M. Bouazara, and A. Pichette, "Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*)," *Wood Science and Technology*, vol. 40, no. 8, pp. 647-663, 2006.
- [101] D. Kocaefe, J. L. Shi, D.-Q. Yang, and J. Zhang, "Preliminary study of thermal treatment effects on mold growth of selected Quebec wood species," *Forest products journal*, vol. 57, no. 12, p. 30, 2007.
- [102] M. Troya and A. Navarrete, "Study of the degradation of retified wood through ultrasonic and gravimetric techniques," *Document-the International Research Group on Wood Preservation (Sweden)*, no. 94-40030., 1994.
- [103] H. Leithoff and R. Peek, "Heat treatment of bamboo," *Irg/Wp*, pp. 01-40216, 2001.
- [104] O. Unsal, S. N. Kartal, Z. Candan, R. A. Arango, C. A. Clausen, and F. Green, "Decay and termite resistance, water absorption and swelling of thermally compressed wood panels," *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 63, no. 5, pp. 548-552, 2009.
- [105] L. Nunes, T. Nobre, and A. Rapp, "Thermally modified wood in choice tests with subterranean termites," *COST E37, Reinbeck*, 2004.
- [106] O. Zovi, "Fonctionnalisation et photopolymérisation de l'huile de lin en vue de l'élaboration de nouveaux matériaux sans émissions de composés organiques volatiles (COV)," INSA de Rouen, 2009.
- [107] B. K. Sharma, Z. Liu, A. Adhvaryu, and S. Z. Erhan, "One-pot synthesis of chemically modified vegetable oils," *Journal of agricultural and food chemistry*, vol. 56, no. 9, pp. 3049-3056, 2008.
- [108] J. Chen, M. D. Soucek, W. J. Simonsick, and R. W. Celikay, "Epoxidation of partially norbornylized linseed oil," *Macromolecular Chemistry and Physics*, vol. 203, no. 14, pp. 2042-2057, 2002.
- [109] Z. S. Petrović, A. Zlatanić, C. C. Lava, and S. Sinadinović-Fišer, "Epoxidation of soybean oil in toluene with peroxyacetic and peroxyformic acids—kinetics and side reactions," *European Journal of Lipid Science and Technology*, vol. 104, no. 5, pp. 293-299, 2002.
- [110] TAPPI T 222 om-06. Acid-insoluble Lignin in Wood and Pulp. (2006) 5.
- [111] R. M. Rowell, "14 Chemical Modification of Wood," *Handbook of wood chemistry and wood composites*, vol. 381, 2005.
- [112] TAPPI T 203 om-88 Pentosans in wood and pulp
- [113] TAPPI T 204 cm-97. Solvent extractives of wood and pulp. T 204 cm-97, (2007).
- [114] TAPPI T 211 cm-86. Ash in wood and pulp (2003).
- [115] NF B 51 004: « Bois, Détermination de l'humidité »
- [116] NF B 51 005: « Détermination de la masse volumique du bois »
- [117] Document : XP CEN /TS 15083-1 : Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois. Détermination de la durabilité naturelle du bois massif vis-à-vis des champignons lignivores-méthodes d'essai ; partie 1 : Basidiomycètes.
- [118] NF EN 113 (1996) Produits de préservation du bois, Méthode d'essai pour déterminer l'efficacité protectrice vis-à-vis des champignons basidiomycètes lignivores: Détermination du seuil d'efficacité

- [119] N. Ayadi, F. Lejeune, F. Charrier, B. Charrier, and A. Merlin, "Color stability of heat-treated wood during artificial weathering," *Holz als Roh-und Werkstoff*, vol. 61, no. 3, pp. 221-226, 2003.
- [120] B. George, E. Suttie, A. Merlin, and X. Deglise, "Photodegradation and photostabilisation of wood—the state of the art," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 88, no. 2, pp. 268-274, 2005.
- [121] H.-T. Chang and S.-T. Chang, "Correlation between softwood discoloration induced by accelerated lightfastness testing and by indoor exposure," *Polymer degradation and stability*, vol. 72, no. 2, pp. 361-365, 2001.
- [122] G. B. Nagarajappa and K. K. Pandey, "UV resistance and dimensional stability of wood modified with isopropenyl acetate," *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, vol. 155, pp. 20-27, 2016.
- [123] M. Matsuo *et al.*, "Aging of wood: analysis of color changes during natural aging and heat treatment," *Holzforschung*, vol. 65, no. 3, pp. 361-368, 2011.
- [124] J. Miklečić, A. Kaša, and V. Jirouš-Rajković, "Colour changes of modified oak wood in indoor environment," *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 70, no. 1-3, pp. 385-387, 2012.
- [125] ISO/DIS 11341 :2004 Peintures et vernis -- Vieillissement artificiel et exposition au rayonnement artificiel -- Exposition au rayonnement filtré d'une lampe à arc au xénon
- [126] M. Arnold, J. Sell, and W. C. Feist, "Wood weathering in fluorescent ultraviolet and xenon arc chambers," *Forest products journal (USA)*, 1991.
- [127] X. Deglise and A. Donnot, "Bois énergie," *Techniques de l'ingénieur BE*, vol. 8535, pp. 1-21, 2004.
- [128] B. Jourez, "Le Robinier faux acacia," *Courrier du Bois*, vol. 38, no. 120, pp. 13-20, 1998.
- [129] D. LORENZO, M. T. de TROYA, M. J. PRIETO, C. BASO, and M. TOUZA, "ADVANCES IN THE STUDY OF THE NATURAL DURABILITY OF EUCALYPTUS GLOBULUS WOOD," *Pro Ligno*, vol. 3, no. 3, 2007.
- [130] G. Deon and R. Schwartz, "Résistance naturelle des bois tropicaux aux attaques biologiques," *Bulletin de la Société Botanique de France. Actualités Botaniques*, vol. 135, no. 3, pp. 37-48, 1988.
- [131] NF EN 460: Durabilité des bois et des matériaux dérivés du bois – Guide d'exigences de durabilité du bois pour son utilisation selon les classes d'emploi.
- [132] M. Sailer and A. Rapp, "Use of vegetable oils for wood protection," in *COST Action E*, 2001, vol. 22.
- [133] S. Hietala, S. L. Maunu, F. Sundholm, S. Jämsä, and P. Viitaniemi, "Structure of thermally modified wood studied by liquid state NMR measurements," *Holzforschung*, vol. 56, no. 5, pp. 522-528, 2002.
- [134] J. Wang and P. Cooper, "Effect of oil type, temperature and time on moisture properties of hot oil-treated wood," *Holz als Roh-und Werkstoff*, vol. 63, no. 6, pp. 417-422, 2005.
- [135] M. H. Akyildiz and S. Ates, "Effect of heat treatment on equilibrium moisture content (EMC) of some wood species in Turkey," *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, vol. 4, no. 6, pp. 660-665, 2008.
- [136] S. Yildiz, E. D. Gezer, and U. C. Yildiz, "Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat," *Building and Environment*, vol. 41, no. 12, pp. 1762-1766, 2006.
- [137] D. Kamdem, A. Pizzi, and A. Jermannaud, "Durability of heat-treated wood," *Holz als Roh-und Werkstoff*, vol. 60, no. 1, pp. 1-6, 2002.
- [138] M. Sailer, A. Rapp, H. Leithoff, and R. Peek, "Upgrading of wood by application of an oil-heat treatment," *Holz als Roh-und Werkstoff*, vol. 58, no. 1/2, pp. 15-22, 2000.
- [139] H. Leithoff and R. Peek, "Heat treatment of bamboo," *Irg/Wp*, pp. 01-40216, 2001.

- [140] C. Welzbacher and A. Rapp, "Comparison of thermally modified wood originating from four industrial scale processes-durability," *The International Research Group on wood preservation. IRG/WP*, pp. 02-40229, 2002.
- [141] A. Unger, A. Schniewind, and W. Unger, *Conservation of wood artifacts: a handbook*. Springer Science & Business Media, 2001.
- [142] K. Mitsui and S. Tsuchikawa, "Low atmospheric temperature dependence on photodegradation of wood," *Journal of Photochemistry and photobiology B: Biology*, vol. 81, no. 2, pp. 84-88, 2005.
- [143] X. Colom, F. Carrillo, F. Nogués, and P. Garriga, "Structural analysis of photodegraded wood by means of FTIR spectroscopy," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 80, no. 3, pp. 543-549, 2003.
- [144] J. Alexopoulos, "Accelerated aging and outdoor weathering of aspen waferboard," *Forest products journal*, vol. 42, no. 2, pp. 15-22, 1992.
- [145] D. Hon and N. Shiraishi, "Wood and Cellulose chemistry, Chap. 9 Color and Discoloration, Chap. 11 Weathering and photochemistry of wood," ed: Marcel Dekker Inc, New York, Basel, 2001.
- [146] K. K. Pandey, "Study of the effect of photo-irradiation on the surface chemistry of wood," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 90, no. 1, pp. 9-20, 2005.
- [147] C.-M. Popescu, M.-C. Popescu, and C. Vasile, "Structural analysis of photodegraded lime wood by means of FT-IR and 2D IR correlation spectroscopy," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 48, no. 4, pp. 667-675, 2011.
- [148] Y. Liu *et al.*, "Surface photo-discoloration and degradation of dyed wood veneer exposed to different wavelengths of artificial light," *Applied Surface Science*, vol. 331, pp. 353-361, 2015.
- [149] B. George, E. Suttie, A. Merlin, and X. Deglise, "Photodegradation and photostabilisation of wood—the state of the art," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 88, no. 2, pp. 268-274, 2005.
- [150] F. F. P. Kollman and W. A. Côté, *Principles of wood science and technology: solid wood*. Allen & Unwin, 1968.
- [151] W. Sonderegger and P. Niemz, "The influence of compression failure on the bending, impact bending and tensile strength of spruce wood and the evaluation of non-destructive methods for early detection," *Holz als Roh-und Werkstoff*, vol. 62, no. 5, pp. 335-342, 2004.
- [152] K. Beninia, H. J. C. Voorwald, and M. Cioffi, "Mechanical properties of HIPS/sugarcane bagasse fiber composites after accelerated weathering," *Procedia Engineering*, vol. 10, pp. 3246-3251, 2011.
- [153] A. Temiz, N. Terziev, M. Eikenes, and J. Hafren, "Effect of accelerated weathering on surface chemistry of modified wood," *Applied Surface Science*, vol. 253, no. 12, pp. 5355-5362, 2007.
- [154] U. Müller, M. Rätzsch, M. Schwanninger, M. Steiner, and H. Zöbl, "Yellowing and IR-changes of spruce wood as result of UV-irradiation," *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, vol. 69, no. 2, pp. 97-105, 2003.
- [155] C. Kamoun, A. Merlin, X. Deglise, S. H. Urizar, and A. M. Fernandez, "Etude par spectroscopie de résonance paramagnétique électronique de la photodégradation des lignines extraites du bois de pin radiata (*Pinus radiata* D. Don)," *Annals of forest science*, vol. 56, no. 7, pp. 563-578, 1999.
- [156] L. Savoye, "Réduction de l'impact environnemental du blanchiment au peroxyde d'hydrogène en milieu alcalin des pâtes mécaniques," Université de Grenoble, 2011.

# **Annexes**

## Annexe 1: Durabilité naturelle des bois étudiés

### I. Durabilité naturelle du bois de chêne zeen

#### Perte de masse moyenne des éprouvettes de chêne zeen (Aubier) confrontées à *C. puteana*

N° épr.	Masse (g)				Humidité fin essai % (Mh-Mf)/Mf	Perte de masse ( % ) (Mt-Mf)/Mt
	12%	"Mt"	"Mh"	"Mf"		
1	19,119	17,528	19,655	14,748	33,27	15,86
2	17,208	17,215	20,834	15,051	38,42	12,57
3	15,776	15,747	19,069	13,718	39	12,88
4	16,167	16,228	20,085	14,204	41,4	12,47
5	19,952	17,928	20,43	14,992	36,27	16,37
6	15,006	15,024	16,527	12,687	30,26	15,55
7	19,993	17,838	19,477	14,779	31,78	17,14
8	19,092	17,625	20,27	14,617	38,67	17,06
9	19,46	17,637	19,696	14,705	33,94	16,62
10	16,915	16,979	19,735	14,816	33,2	12,73
11	16,96	16,885	19,872	14,651	35,63	13,23
12	17,108	17,007	19,519	14,725	32,55	13,41
13	17,022	16,977	21,097	14,693	43,58	13,45
14	18,494	16,643	19,243	13,911	38,32	16,41
15	16,6	17,444	20,048	14,608	37,23	16,25
16	16,341	16,409	19,951	14,112	41,37	13,99
17	20,118	18,186	20,317	14,991	35,52	17,56
18	17,198	17,282	20,141	14,879	35,36	13,9
19	19,886	18,305	21,325	15,072	41,48	17,66
Moyenne						<b>15,01</b>
Médiane						<b>15,55</b>
Ecart type						<b>1,88</b>

#### Perte de masse moyenne des éprouvettes de chêne zeen (Duramen) confrontées à *C. puteana*

N° épr.	Masse (g)				Humidité fin essai (%) (Mh-Mf)/Mf	Perte de masse ( % ) (Mt-Mf)/Mt
	12%	"Mt"	"Mh"	"Mf"		
20	14,821	14,128	13,633	12,073	35,34	14,54
21	19,361	17,589	21,577	14,932	44,5	15,1
22	17,726	16,394	18,002	13,94	29,13	14,96
23	18,71	16,927	19,311	14,95	29,17	11,67
24	18,568	16,921	19,072	15,26	24,9	9,81
25	20,412	18,158	20,811	16,31	27,59	10,17
26	19,399	17,895	21,436	15,147	41,51	15,35
27	14,834	14,266	12,885	11,781	9,37	17,41
Moyenne						<b>13,94</b>
Médiane						<b>14,96</b>
Ecart type						<b>2,73</b>

Perte de masse moyenne des éprouvettes de chêne zeen (Aubier) confrontées à *C. versicolor*

N° épr.	Masse (g)				Humidité fin essai(%) (Mh-Mf)/Mf	Perte de masse (%) (Mt-Mf)/Mt
	12%	"Mt"	"Mh"	"Mf"		
28	21,891	19,466	22,024	15,658	40,65	19,56
29	21,17	19,02	21,787	14,894	46,28	21,69
30	21,459	19,217	22,369	14,855	50,58	22,69
31	19,741	17,567	21,079	13,822	52,5	21,31
32	16,695	15,225	20,549	11,932	72,21	21,62
33	19,669	16,994	21,839	14,117	54,7	16,92
34	17,346	14,072	20,092	10,554	90,37	25
35	20,689	16,991	21,964	14,854	47,86	12,57
36	21,367	16,568	20,005	15,185	31,74	8,34
37	21,459	16,751	20,251	15,392	31,56	8,11
38	16,528	13,811	13,547	11,381	19,03	17,59
39	20,412	15,72	21,248	14,651	45,02	6,8
40	16,104	15,133	13,836	12,496	10,72	17,42
41	21,038	16,427	22,689	15,148	49,78	7,78
42	16,79	12,844	14,092	9,981	41,18	22,29
43	19,953	14,934	21,577	13,727	57,18	8,08
44	20,384	15,802	17,609	12,548	40,33	20,59
45	20,385	15,766	21,14	14,388	46,92	8,74
46	19,651	15,403	19,067	13,654	39,64	11,35
Moyenne						<b>14,45</b>
Médiane						<b>16,17</b>
Ecart type						<b>6,4</b>

Perte de masse moyenne des éprouvettes de chêne zeen (Duramen) confrontées à *C. versicolor*

N° épr.	Masse (g)				Humidité fin essai(%) (Mh-Mf)/Mf	Perte de masse (%) (Mt-Mf)/Mt
	12%	"Mt"	"Mh"	"Mf"		
47	16,689	16,678	20,978	14,489	44,78	13,12
48	16,077	16,083	19,158	13,523	41,66	15,91
49	13,523	13,521	11,612	9,008	28,9	33,37
50	16,672	16,668	19,577	14,744	32,77	11,54
51	15,517	15,509	20,241	13,374	51,34	13,76
52	15,54	15,556	20,098	13,344	50,61	14,21
Moyenne						<b>13,71</b>
Médiane						<b>13,76</b>
Ecart type						<b>1,59</b>

## II. Durabilité naturelle du bois de chêne afarès

Perte de masse moyenne des éprouvettes de chêne afarès (Aubier) confrontées à *C. puteana*

N° épr.	Masse (g)				Humidité fin essai % (Mh-Mf)/Mf	Perte de masse ( % ) (Mt-Mf)/Mt
	12%	"Mt"	"Mh"	"Mf"		
1	14,145	13,639	9,186	6,036	52,18	55,74
2	15,115	14,591	10,302	7,009	46,98	51,96
3	18,918	17,001	18,085	13,778	31,25	18,95
4	17,278	15,821	16,305	12,08	34,97	23,64
5	18,223	14,817	16,046	11,806	35,91	20,32
6	18,576	17,052	19,657	13,894	41,47	18,51
7	19,429	17,448	17,769	13,35	33,1	23,48
8	19,063	17,477	18,632	14,026	32,83	19,74
9	15,326	14,736	11,144	7,604	46,55	48,39
10	20,029	19,285	16,847	11,616	45,03	39,76
11	14,9	14,546	10,929	7,271	50,3	50,01
12	14,76	13,99	16,639	11,64	42,94	16,79
13	18,18	16,585	20,46	13,53	51,21	18,42
14	17,57	16,573	19,528	13,699	42,55	17,34
15	16,946	15,347	18,927	12,827	47,55	16,42
16	18,306	17,157	20,532	13,918	47,52	18,87
17	18,133	16,678	16,926	12,354	37	25,92
18	17,402	16,119	18,439	12,868	43,29	20,16
19	16,445	15,755	18,403	12,462	47,67	20,9
20	18,533	17,463	19,011	14,114	34,69	19,17
21	18,173	16,479	18,354	13,217	38,86	19,79
22	14,689	14,078	13,568	8,951	51,58	36,41
23	18,296	16,186	18,357	13,523	35,74	16,45
24	16,147	15,091	14,722	10,861	35,54	28,02
Moyenne						<b>26,32</b>
Médiane						<b>20,24</b>
Ecart type						<b>12,69</b>



Perte de masse moyenne des éprouvettes de chêne afarès (Duramen) confrontées à *C. puteana*

N° épr.	Masse (g)				Humidité fin essai % (Mh-Mf)/Mf	Perte de masse (%) (Mt-Mf)/Mt
	12%	"Mt"	"Mh"	"Mf"		
25	18,891	17,356	19,177	12,947	48,11	25,4
26	20,029	18,276	21,267	13,78	54,33	24,6
27	18,858	17,188	21,424	13,398	59,9	22,05
28	17,305	15,945	19,712	12,696	55,26	20,37
29	19,008	17,804	20,315	13,099	55,08	26,42
30	19,074	17,486	19,319	13,103	47,43	25,06
31	16,654	16,019	16,473	11,475	43,55	28,36
32	20,22	17,831	21,123	13,46	56,93	24,51
Moyenne						<b>23,21</b>
Médiane						<b>23,83</b>
Ecart type						<b>2,47</b>

Perte de masse moyenne des éprouvettes de chêne afarès (Aubier) confrontées à *C. versicolor*

N° épr.	Masse (g)				Humidité fin essai (%) (Mh-Mf)/Mf	Perte de masse (%) (Mt-Mf)/Mt
	12%	"Mt"	"Mh"	"Mf"		
33	18,891	17,356	19,177	12,947	48,11	25,4
34	20,029	18,276	21,267	13,78	54,33	24,6
35	19,263	17,534	17,411	12,31	41,43	29,79
36	16,598	15,442	17,866	10,772	65,85	30,24
37	18,858	17,188	21,424	13,398	59,9	22,05
38	17,305	15,945	19,712	12,696	55,26	20,37
39	18,094	16,09	18,576	11,47	61,95	28,71
40	19,705	18,347	18,832	12,092	55,73	34,09
41	19,008	17,804	20,315	13,099	55,08	26,42
42	19,074	17,486	19,319	13,103	47,43	25,06
43	16,173	15,524	17,94	9,54	88,05	38,54
44	16,311	15,422	15,149	10,407	45,56	32,51
45	17,962	16,41	17,922	11,711	53,03	28,63
46	16,299	15,712	14,012	9,753	43,66	37,92
47	16,654	16,019	16,473	11,475	43,55	28,36
48	16,963	16,414	15,519	10,156	52,8	38,12
49	18,198	17,193	19,316	11,72	64,81	31,83
50	17,579	16,77	16,681	11,223	48,63	33,07
51	16,597	15,731	16,083	11,145	44,3	29,15
52	15,569	14,356	16,937	9,273	82,64	35,4
53	15,777	15,116	12,748	9,045	40,93	40,16
54	20,22	17,831	21,123	13,46	56,93	24,51
Moyenne						<b>30,48</b>
Médiane						<b>29,47</b>
Ecart type						<b>5,56</b>

Perte de masse moyenne des éprouvettes de chêne afarès (Duramen) confrontées à *C. vérsicolor*

N° épr.	Masse (g)				Humidité fin essai (%) (Mh-Mf)/Mf	Perte de masse (%) (Mt-Mf)/Mt
	12%	"Mt"	"Mh"	"Mf"		
55	16,584	15,781	19,733	12,836	53,73	22,6
56	17,403	16,566	20,052	12,951	54,82	25,58
57	17,133	16,286	18,66	12,656	47,43	26,13
58	16,181	15,446	16,92	11,881	42,41	26,57
59	13,87	13,424	14,332	11,352	26,25	18,15
60	22,299	21,168	27,583	18,353	50,29	17,69
61	17,048	16,397	18,197	14,823	22,76	13,05
62	16,367	15,719	17,04	10,3	65,43	37,06
63	23,652	22,48	23,908	16,969	40,89	28,25
64	22,85	21,469	26,105	9,775	167,05	57,22
Moyenne						<b>27,18</b>
Médiane						<b>25,85</b>
Ecart type						<b>12,46</b>

### III. Durabilité naturelle du bois de pin maritime

Perte de masse moyenne des éprouvettes de pin maritime (Aubier) confrontées à *C. puteana*

N° épr.	Masse (g)				Humidité fin essai % (Mh-Mf)/Mf	Perte de masse (%) (Mt-Mf)/Mt
	12%	"Mt"	"Mh"	"Mf"		
1	11,82	11,796	10,334	6,028	66,17	48,89
2	12,457	12,506	10,612	7,397	58,71	40,85
3	11,076	11,145	11,328	5,963	79,75	46,49
4	10,855	10,899	11,051	5,89	78,04	45,95
5	11,646	11,565	10,577	6,794	76,96	41,25
6	9,938	9,983	9,579	5,198	72,1	47,93
7	10,935	10,932	11,133	6,274	67,69	42,6
8	11,037	11,112	8,024	5,796	73,18	47,84
9	11,813	11,868	9,477	6,2	66,67	47,75
10	12,038	11,901	9,93	6,227	70,41	47,67
11	12,214	12,074	9,037	7,065	60,33	41,48
12	12,195	12,041	10,235	6,867	60,92	42,96
13	11,705	11,56	11,069	6,774	56,14	41,4
14	11,653	11,525	9,984	5,766	66,12	49,96
15	12,996	12,838	9,782	7,131	56,12	44,45

16	10,23	10,111	10,472	5,054	58,76	50,01
17	10,596	10,466	8,29	5,434	74,4	48,07
18	11,014	10,872	9,205	5,689	74,54	47,67
19	12,191	12,029	9,674	5,252	72,06	56,33
20	12,112	12,006	10,284	6,57	55,78	45,27
21	11,954	11,813	9,937	6,79	63,01	42,52
22	11,073	10,99	9,076	6,141	62,57	44,12
23	11,688	11,596	10,334	5,598	74,74	51,72
24	12,1	12,007	10,612	6,299	66,24	47,53
25	10,863	10,758	11,328	5,2	59,42	51,66
26	11,132	11,191	11,051	5,761	59,78	48,52
27	10,806	10,679	10,577	6,073	59,29	43,13
28	11,151	11,037	9,579	6,502	58,16	41,08
29	11,547	11,552	11,133	6,453	54	44,13
30	10,752	10,824	8,024	5,671	60,04	47,6
Moyenne						<b>46,23</b>
Médiane						<b>47,01</b>
Ecart type						<b>3,74</b>

Perte de masse moyenne des éprouvettes de pin maritime (Aubier) confrontées à *P. placenta*

N° épr.	Masse (g)				Humidité fin essai % (Mh-Mf)/Mf	Perte de masse ( % ) (Mt-Mf)/Mt
	12%	"Mt"	"Mh"	"Mf"		
31	11,165	11,062	11,062	6,745	64	39,02
32	11,373	11,443	11,443	6,708	70,58	41,37
33	10,78	10,878	10,878	6,049	79,83	44,39
34	10,47	10,566	10,566	5,32	98,6	49,64
35	9,498	9,564	9,564	6,834	39,94	28,54
36	10,964	10,967	10,967	6,064	80,85	44,7
37	11,559	11,645	11,645	7,381	57,76	36,61
38	11,738	11,766	11,766	6,653	76,85	43,45
39	11,21	11,312	11,312	6,507	73,84	42,47
40	11,148	11,241	11,241	5,974	88,16	46,85
41	11,097	11,189	11,189	5,36	108,75	52,09
42	11,589	11,625	11,625	6,625	75,47	43,01
43	11,904	11,997	11,997	8,049	49,04	32,9
44	11,655	11,672	11,672	7,086	64,71	39,29
45	10,576	10,652	10,652	6,254	70,32	41,28
46	11,667	11,692	11,692	7,301	60,14	37,55
47	11,497	11,602	11,602	5,639	105,74	51,39
48	9,149	9,239	9,239	4,591	101,24	50,3
Moyenne						<b>42,49</b>
Médiane						<b>42,74</b>
Ecart type						<b>6,33</b>

Perte de masse moyenne des éprouvettes de pin maritime (Aubier) confrontées à *G.trabeum*

N° épr.	Masse (g)				Humidité fin essai % (Mh-Mf)/Mf	Perte de masse (%) (Mt-Mf)/Mt
	12%	"Mt"	"Mh"	"Mf"		
49	10,421	10,473	9,859	6,368	54,82	39,19
50	12,003	11,893	10,936	6,975	56,78	41,35
51	11,389	11,425	10,914	7,163	52,36	37,3
52	11,836	11,721	10,86	7,086	53,25	39,54
53	10,277	10,142	9,154	6,372	43,65	37,17
54	11,097	11,13	10,123	6,92	46,28	37,82
55	13,062	12,895	12,155	7,879	54,27	38,89
56	11,318	11,158	14,335	6,964	105,84	37,58
57	11,73	11,583	10,36	6,75	53,48	41,72
58	11,421	11,461	11,217	7,288	53,91	36,41
59	10,901	10,933	11,02	7,062	56,04	35,4
60	11,685	11,662	10,755	6,818	57,74	41,53
61	12,007	11,863	9,277	6,145	50,96	48,2
62	11,429	11,312	9,884	6,72	47,08	40,59
63	10,76	10,808	10,53	6,774	55,44	37,32
64	10,604	10,659	9,683	6,175	56,8	42,06
65	11,264	11,318	15,561	7,123	118,46	37,06
66	11,397	11,439	10,695	6,741	58,65	41,07
67	10,955	10,835	9,797	6,485	51,07	40,14
68	12,033	11,886	11,311	7,533	50,15	36,62
69	11,287	11,159	10,158	6,33	60,47	43,27
70	10,89	10,954	11,648	7,886	47,7	28
71	11,128	11,176	9,376	5,496	70,59	50,82
72	11,139	11,204	9,574	5,019	90,75	55,2
73	12,021	12,065	15,7	8,732	79,8	27,62
74	11,186	11,037	9,948	6,186	60,81	43,95
75	12,05	11,927	12,705	7,879	61,25	33,93
76	11,933	11,77	10,213	6,724	51,88	42,87
77	12,033	12,076	10,24	6,745	51,81	44,14
78	11,494	11,55	10,407	7,002	48,62	39,37
Moyenne						<b>39,87</b>
Médiane						<b>39,46</b>
Ecart type						<b>5,57</b>

Perte de masse moyenne des éprouvettes de pin maritime (Duramen) confrontées à *C. puteana*

N° épr.	Masse (g)				Humidité fin essai % (Mh-Mf)/Mf	Perte de masse (%) (Mt-Mf)/Mt
	12%	"Mt"	"Mh"	"Mf"		
1	9,605	9,671	8,381	5,403	55,11	44,13
2	11,537	11,533	10,293	6,819	50,94	40,87
3	10,835	10,824	9,859	6,486	52	40,07
4	11,515	11,57	10,963	7,089	54,64	38,72
5	12,699	12,547	10,54	6,85	53,86	45,4
6	10,082	10,14	9,016	5,496	64,04	45,79
7	11,406	11,461	10,923	6,831	59,9	40,39
8	11,187	11,234	10,108	5,048	100,23	55,06
9	12,019	12,074	10,542	6,649	58,55	44,93
10	11,156	11,209	8,455	4,941	71,11	55,91
11	12,096	12,158	10,624	6,657	59,59	45,24
12	11,34	11,397	9,468	5,694	66,28	50,03
13	11,833	11,896	11,23	7	60,42	41,15
14	11,552	11,63	10,59	6,581	60,91	43,41
15	11,62	11,682	9,664	5,713	69,15	51,09
16	11,654	11,65	10,112	6,35	59,24	45,49
Moyenne						<b>45,48</b>
Médiane						<b>45,08</b>
Ecart type						<b>5,165</b>

Perte de masse moyenne des éprouvettes de pin maritime (Duramen) confrontées à *P. placenta*

N° épr.	Masse (g)				Humidité fin essai % (Mh-Mf)/Mf	Perte de masse (%) (Mt-Mf)/Mt
	12%	"Mt"	"Mh"	"Mf"		
17	11,68	11,743	11,222	5,93	89,24	49,5
18	10,222	10,297	10,719	6,174	73,61	40,04
19	11,072	11,125	10,111	5,338	89,41	52,01
20	11,657	11,719	11,812	6,531	80,86	44,26
21	11,364	11,151	10,503	6,074	72,91	45,52
22	11,817	11,685	11,599	7,455	55,58	36,2
23	11,521	11,589	12,64	6,94	82,13	40,11
24	10,318	10,382	10,771	6,429	67,53	38,07
25	11,5	11,566	8,58	5,541	54,84	52,09
26	11,635	11,718	9,242	6,002	53,98	48,77
27	11,65	11,647	11,527	7,09	62,58	39,12
28	11,595	11,583	11,024	6,143	79,45	46,96
29	11,238	11,296	9,801	6,797	44,19	39,82
30	10,549	10,613	9,212	6,398	43,98	39,71
Moyenne						<b>43,73</b>
Médiane						<b>42,19</b>
Ecart type						<b>5,4</b>

Perte de masse moyenne des éprouvettes de pin maritime (Duramen) confrontées à *G.trabeum*

N° épr.	Masse (g)				Humidité fin essai % (Mh-Mf)/Mf	Perte de masse (%) (Mt-Mf)/Mt
	12%	"Mt"	"Mh"	"Mf"		
31	11,105	10,968	10,201	6,475	57,54	40,96
32	11,877	11,753	11,005	7,122	54,52	39,4
33	10,542	10,43	8,27	5,307	55,83	49,11
34	11,505	11,397	9,976	6,622	50,64	41,89
35	11,783	11,621	10,828	5,541	95,41	52,31
36	12,154	12,045	11,659	6,242	86,78	48,17
37	11,442	11,304	10,965	6,968	57,36	38,35
38	10,02	10,067	8,622	5,073	69,95	49,6
39	11,821	11,873	11,846	7,652	54,8	35,55
40	11,109	11,166	10,167	6,687	52,04	40,11
41	9,983	10,03	8,653	5,471	58,16	45,45
42	11,62	11,669	11,068	7,38	49,97	36,75
43	11,911	11,86	11,083	7,2	53,93	39,29
44	11,51	11,495	11,271	7,391	52,5	35,7
45	11,609	11,575	13,099	6,324	107,13	45,36
46	11,526	11,501	10,686	6,539	63,41	43,14
Moyenne						<b>42,57</b>
Médiane						<b>41,43</b>
Ecart type						<b>5,081</b>

## Annexe 2: Durabilité naturelle des bois de pin sylvestre et de hêtre (contrôle de virulence)

### L'aubier du hêtre confronté à *C. putéana*

origine	m (g)					Humidité fin essai % (Mh-Mf)/Mf	Perte de masse (%) (Mt-Mf)/Mt
	N° epr.	Masse 12%	"Mt"	"Mh"	"Mf"		
H 2009 0507 A	T1	14,2	12,686	13,778	8,527	61,58	32,78
H 2009 0507 A	T2	13,311	11,924	13,318	8,216	62,10	31,10
H 2009 0507 A	T3	15,155	13,563	13,436	11,605	15,78	14,44
H 2009 0507 A	T4	14,036	12,576	12,585	10,877	15,70	13,51
H 2009 0507 A	T5	13,77	12,359	14,031	8,596	63,23	30,45
H 2009 0507 A	T6	14,263	12,765	14,791	9,089	62,74	28,80
						<b>Moyenne</b>	<b>29,62</b>
						<b>Médiane</b>	<b>25,19</b>

### L'aubier du hêtre confronté à *C. versicolor*

origine	m (g)					Humidité fin essai % (Mh-Mf)/Mf	Perte de masse (%) (Mt-Mf)/Mt
	N° epr.	Masse 12%	"Mt"	"Mh"	"Mf"		
H 2009 0507 A	T7	13,689	12,266	13,686	9,972	37,24	18,70
H 2009 0507 A	T8	14,191	12,733	14,665	11,007	33,23	13,56
H 2009 0507 A	T9	14,319	12,815	14,213	11,093	28,13	13,44
H 2009 0507 A	T10	14,015	12,592	14,018	10,965	27,84	12,92
H 2009 0507 A	T11	14,216	12,735	14,664	12,666	15,77	0,54
H 2009 0507 A	T12	14,198	12,719	14,648	12,649	15,80	0,55
						<b>Moyenne</b>	<b>9,95</b>
						<b>Médiane</b>	<b>13,18</b>

### L'aubier du pin sylvestre confronté à *C. putéana*

origine	m (g)					Humidité fin essai % (Mh-Mf)/Mf	Perte de masse (%) (Mt-Mf)/Mt
	N° epr.	Masse 12%	"Mt"	"Mh"	"Mf"		
PS 2009 08 11 A	T13	10,708	9,545	10,886	6,789	60,35	28,87
PS 2009 08 11 A	T14	12,888	11,481	12,809	7,665	67,11	33,24
PS 2009 08 11 A	T15	12,94	11,567	13,44	7,913	69,85	31,59
PS 2009 08 11 A	T16	10,155	9,031	10,25	6,209	65,08	31,25
PS 2009 08 11 A	T17	8,746	7,812	8,408	5,082	65,45	34,95
PS 2009 08 11 A	T18	9,464	8,409	9,239	5,529	67,10	34,25
						<b>Moyenne</b>	<b>32,36</b>
						<b>Médiane</b>	<b>32,41</b>



L'aubier du pin sylvestre confronté à *P.placenta*

origine	m (g)					Humidité fin essai % (Mh-Mf)/Mf	Perte de masse (%) (Mt-Mf)/Mt
	N° epr.	Masse 12%	"Mt"	"Mh"	"Mf"		
PS 2009 08 11 A	T19	8,929	7,95	8,744	4,865	79,73	38,81
PS 2009 08 11 A	T20	10,667	9,492	11,381	6,341	79,48	33,20
PS 2009 08 11 A	T21	12,979	11,566	14,098	7,678	83,62	33,62
PS 2009 08 11 A	T22	9,268	8,258	10,156	5,534	83,52	32,99
PS 2009 08 11 A	T23	9,393	8,338	9,586	5,408	77,26	35,14
PS 2009 08 11 A	T24	10,896	9,703	12,969	7,617	70,26	21,50
						<b>Moyenne</b>	<b>32,54</b>
						<b>Médiane</b>	<b>33,41</b>

L'aubier du pin sylvestre confronté à *G.trabeum*

origine	m (g)					Humidité fin essai % (Mh-Mf)/Mf	Perte de masse (%) (Mt-Mf)/Mt
	N° epr.	Masse 12%	"Mt"	"Mh"	"Mf"		
PS 2009 08 11 A	T25	10,975	9,772	11,411	9,613	18,70	<b>1,63</b>
PS 2009 08 11 A	T26	10,022	8,956	10,395	8,786	18,31	<b>1,90</b>
PS 2009 08 11 A	T27	9,439	8,383	9,499	8,234	15,36	<b>1,78</b>
PS 2009 08 11 A	T28	9,553	8,473	9,639	8,34	15,58	<b>1,57</b>
PS 2009 08 11 A	T29	9,472	8,404	9,991	7,437	34,34	<b>11,51</b>
PS 2009 08 11 A	T30	12,827	11,463	12,434	9,143	35,99	<b>20,24</b>
						<b>Moyenne</b>	<b>6,44</b>
						<b>Médiane</b>	<b>1,84</b>

### Annexe 3: Comportement mécanique en traction et perte de masse enregistrés après vieillissement

La figure 49 montre les courbes contrainte-déformation des échantillons des trois espèces avant et après vieillissement.

Contrainte (MPa)

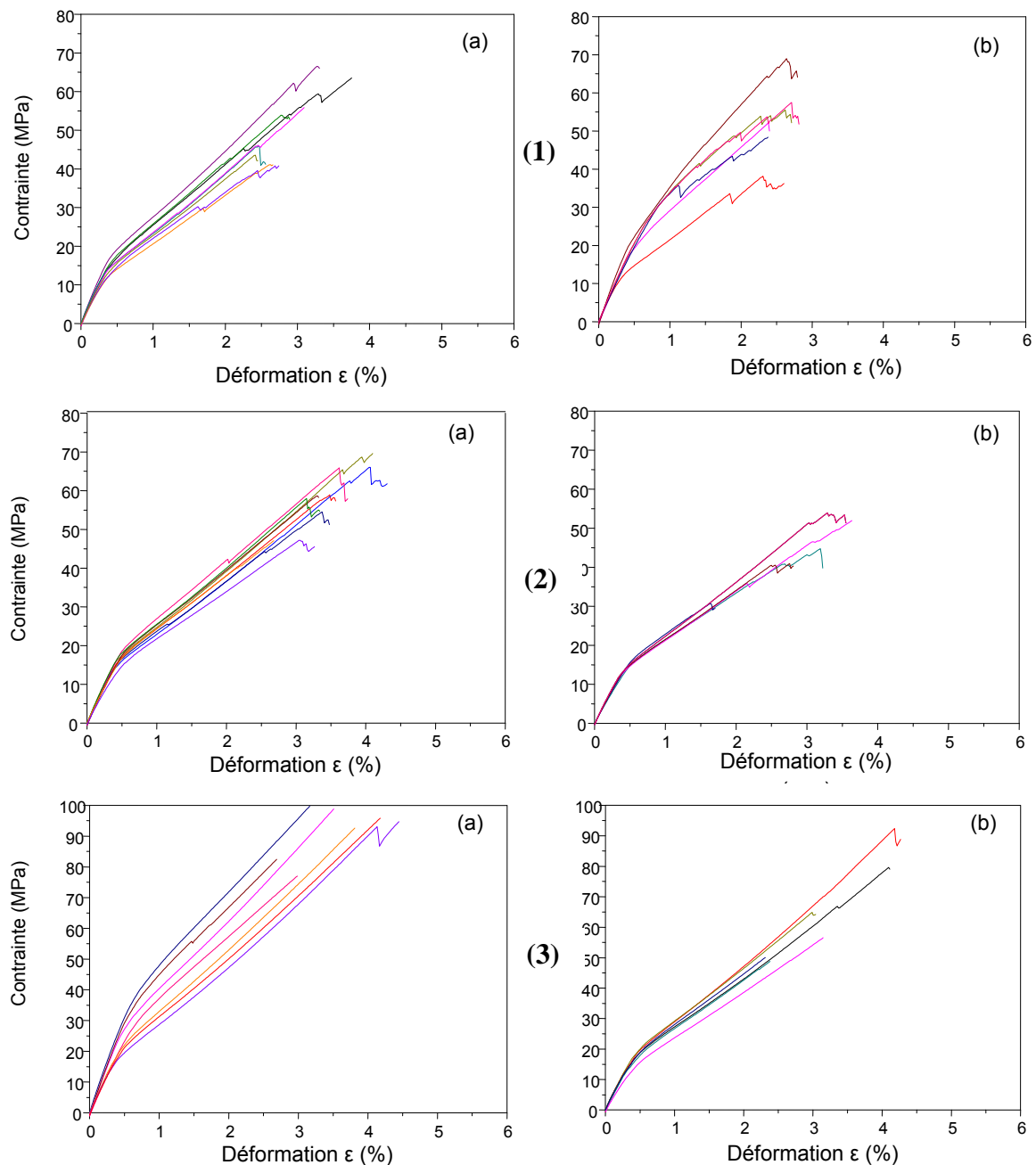


Figure 49. Contrainte de rupture des échantillons de chêne zeen (1), chêne afarès (2) et pin maritime (3) avant (a) et après (b) vieillissement accéléré

Les valeurs réelles des pertes de masse enregistrée au cours de la dégradation des échantillons de bois sont illustrées sur le tableau 15. Les résultats sont exprimées en % et en valeurs absolues.

Tableau 19: Perte de masse du chêne zeen, chêne afarès et pin maritime durant un cycle de 30h

	Perte de masse (%)		
Temps d'exposition aux UV (h)	Chêne zeen	Chêne afarès	Pin maritime
30	2.4 ±0.4	2.9 ±0.2	3.2 ±0.4
60	8.3 ±0.4	3.4 ±0.2	9.5 ±0.3
90	7.6 ±0.3	4.6 ±0.2	9.2 ±0.3
120	7.9 ±0.3	6.7 ±0.2	9.2 ±0.3
	Perte de masse (g)		
30	0.17	0.19	0.18
60	0.59	0.23	0.55
90	0.54	0.30	0.53
120	0.56	0.45	0.53

## Résumé

Ce travail vise la valorisation de trois espèces algériennes, le pin maritime (*Pinus pinaster*), le chêne Zeen (*Quercus canariensis*) et le chêne Afares (*Quercus afares*) provenant de la forêt de Jijel, en vue de leur utilisation dans l'industrie et la construction en Algérie.. Nous avons considéré la durabilité biologique naturelle de ces espèces contre les champignons basidiomycètes et nous avons poursuivi l'étude en nous intéressant aux dégradations d'ordre esthétique par une méthode d'estimation de la photo durabilité dans une chambre d'essai au xénon.

Les espèces de chêne zeen et chêne afarès ont été classées comme peu durable et moyennement durable (classes 3,5), respectivement. Le pin maritime, a été classé comme non durable.

Le traitement oléothermique avec de l'huile de soja pure ou époxydée à 180 ° C pendant deux heures avec l'ajout à la valeur du procédé une finition par la cire d'abeille. On a testé la teneur en humidité et la perte de masse de bois traité thermiquement et d'échantillons témoins. Les résultats ont montré une absorption d'eau beaucoup plus faible par rapport aux échantillons non traités, une réduction significative de la perte de masse contre *Coniophora puteana*, *Poria placenta* et *Coriolus versicolor* pour les trois espèces et une amélioration dans la classe d'emploi.

La dégradation des échantillons par rayonnement UV a été établie par un changement initial de couleur (après 30 heures d'exposition), suivie d'une fissuration (exposition de 120 heures), traduite par microscopie électronique à balayage (SEM) et spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR). La décoloration des échantillons de bois irradiés était principalement liée à la décomposition de la lignine qui est la structure clé de la photodégradation du bois. De plus, une diminution des propriétés mécaniques a été observée, le MOE des échantillons des trois espèces a diminué dû à la dégradation des hémicelluloses et de la lignine (la rupture de la chaîne macromoléculaire).

**Mots clés:** durabilité naturelle, huile de soja, cire d'abeille, photodégradation, vieillissement accéléré par UV

## Abstract

This work aims at the valorization of three Algerian species, the maritime pine (*Pinus pinaster*), the oak Zeen (*Quercus canariensis*) and the oak Afares (*Quercus afares*) obtained from Jijel forest, for applications in the national wood industry. We have considered the natural biological durability of these species against basidiomycete fungi and we have continued the study by considering aesthetic degradations by a method of estimating photo durability in a xenon test chamber. All the species were classified as moderately durable to less durable (classes 3-4) except for maritime pine, which was classified as non durable (class 5).

The oleothermic treatment with pure or epoxidized soy oil at 180 ° C. for two hours with the addition to the process value of a beeswax finish. The moisture content and loss of mass of heat treated wood and control samples were tested. The results showed a much lower water absorption compared to the untreated samples, a significant reduction in the mass loss against *Coniophora puteana*, *Poria placenta* and *Coriolus versicolor* for all three species and an improvement in the use class.

The degradation of the samples by UV radiation was established by an initial change in color (after 30 hours of exposure), followed by roughness and cracking (exposure of 120 hours), translated by scanning electron microscopy ) And Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Discoloration of irradiated wood samples was mainly related to the decomposition of lignin, which is the key structure of wood photodegradation. In addition, a decrease in the mechanical properties was observed, the MOE of the samples of the three species decreased due to the degradation of the hemicelluloses and the lignin (the rupture of the macromolecular chain).

**Key words:** natural durability, soy oil, beeswax, photodegradation, UV accelerated aging

## ملخص

يهدف هذا العمل إلى تقييم ثلاثة أنواع من الأشجار السائدة في الجزائر، الصنوبر البحري، بلوط الافراس وبلوط الزان من غابات جيجل شركة جزائرية، للتطبيقات في صناعة الخشب الوطني خذنا بعين الاعتبار الاستدامة البيولوجية الطبيعية لهذه الأنواع ضد الفطر الدعاميات واصلنا الدراسة علي التركيز فيما يخص تدهور الجمالي للأنواع الثلاثة باستعمال وسيلة لتقدير الاستدامة الصورة في غرفة اختبار زينون

تم تصنيف الأنواع بلوط الافراس وبلوط الزان معتدل و قليل المقاومة (فئة 3.5) على التوالي. اما الصنوبر البحري، صنف على أنه غير مقاوم وقد أظهرت المعالجات الحرارية بزيت الصويا الساخن نقية او ابوكسيدي مع إضافة شمع العسل تحسنا في فئة المتانة والكفاءة العالية في الحفاظ على الخشب.

اختبرنا محتوى الرطوبة وفقدان كتلة لعينات الخشب المعالجة حراريا و كذلك العينات الغير معالجة. وأظهرت النتائج وجود انخفاض كبير في فقدان كتلة ضد *Coniophora puteana*، بوريا المشيمة و *Coriolus* المبرقشة لهذه الانواع الثلاثة وتحسنا في فئة العمل

تدهور العينات بتأثير الأشعة فوق البنفسجية من خلال تغيير لون الأولي (بعد 30 ساعة من التعرض) تليها خشونة وتكسير ( 120 ساعة من التعرض)، تم تشخيص هذا من قبل المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) والتحليل الطيفي تحويل فورييه الأشعة تحت الحمراء (FTIR). تغير لون عينات الخشب المعرضة للاشعاع ويرجع ذلك أساسا إلى تحلل اللجنين التي هي هيكل الرئيسي للتحلل الضوئي للخشب. وبالإضافة إلى ذلك، لوحظ وجود انخفاض في الخواص الميكانيكية، وكذلك MOE للأنواع الثلاثة وهذا بسبب انخفاض محتوى الرطوبة من العينات والذي ادي الي تدهور هيميسيلولوز واللجنين وبالتالي تمزق في سلسلة الجزيئات

**كلمات البحث:** المقاومة الطبيعية ، زيت الصويا، شمع العسل، التحلل الضوئي ، الشيخوخة المتسارعة بالأشعة فوق البنفسجية.