

N° Ordre 23156/FSI/UMBB/2016

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA –BOUMERDES**



**Faculté des Sciences de l'Ingénieur**

**Thèse de Doctorat**

**présentée par :**

**M<sup>lle</sup> DERBAL Wassila**

**En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en :**

**Filière : Sciences et Génie des Matériaux**

**Option : Sciences et Techniques du Bois et Eco-matériaux**

**Elaboration et caractérisation d'un composite massif de type « trio »  
(carrelet 3 plis) en pin d'Alep pur ou associant pin d'Alep et chênes  
algériens.**

**Devant le jury composé de :**

Président	BEZZAZI	Boudjemaa	Professeur	UMBB
Directeur de thèse	ZERIZER	Abdellatif	Professeur	UMBB
Co-directeur de thèse	GERARD	Jean	D.R.	CIRAD Montpellier
Examineur	AIT TAHAR	Kamel	Professeur	UMMTO
Examineur	AKNOUCHE	Hamid	MCA	UMBB
Examineur	TAZROUT	Mansour	MCA	UMBB

**Année universitaire 2016**

## Remerciements

Ce travail a été réalisé en trois parties à L'URMPE (UMB Boumerdès), à l'usine de transformation des bois TRANSBOIS (Béjaïa) et à l'unité de recherche BioWooEB (CIRAD-Montpellier).

Je tiens à remercier en premier lieu Dieu le tout puissant de m'avoir donné courage et santé pour achever ce travail.

Que Monsieur le Professeur ZERIZER Abdellatif trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance pour avoir accepté de diriger mes travaux.

Je tiens à exprimer mes remerciements à Monsieur GERARD Jean pour avoir conduit l'encadrement de mes travaux jusqu'à leur terme.

Je tiens à remercier vivement et respectueusement le Professeur BEZZAZI Boudjema d'avoir bien voulu présider notre jury.

Je suis particulièrement reconnaissante envers les deux enseignants AKNOUCHE Hamid et TAZROUT Mansour qui participent en tant examinateurs au jury de cette thèse.

J'adresse ma profonde gratitude au professeur AIT TAHAR Kamel qui a accepté de lire et de juger ce travail.

Un grand remerciement à tous les membres du l'UR-MPE UMB Boumerdès.

J'adresse aussi un remerciement profond à toute l'équipe de TRANSBOIS (Béjaïa) en particulier à Monsieur HEFAF.

Je tiens à remercier tous les membres du Laboratoire Thermique (Centre de recherche CNERIB) en particulier Monsieur MEZIANE.

Je tiens à remercier tous les membres de l'Unité de Recherche BioWooEB du CIRAD pour l'ambiance amicale qu'ils ont su créer pendant toute la durée de mes travaux de recherche et pour leur appui permanent.

Un remerciement particulier à Monsieur Joseph GRIL directeur du GDR "Sciences du bois"

Enfin, j'exprime mes profonds remerciements à tous ceux qui ont contribué à la finalisation de ce travail.



## TRANSBOIS- Béjaia



Je dédie ce mémoire

A mes chers parents

A mes chères sœurs

A mon cher frère

A toute ma famille

A tous mes amis

# **Sommaire**

# Sommaire

Introduction générale.....	1
<b>Partie 1 : Etude bibliographique</b>	
<b>Chapitre 1 : Les ressources forestières</b>	
Introduction .....	5
<b>1.1. Présentation et caractérisation de la forêt méditerranéenne .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1.1. La situation forestière en région méditerranéenne .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1.2. Relation entre l'accroissement des stocks et la gestion des forêts.....</b>	<b>8</b>
<b>1.1.3. Analyse SWOT .....</b>	<b>9</b>
<i>Rappel de la méthodologie SWOT .....</i>	<i>9</i>
<i>Résultats de l'analyse .....</i>	<i>9</i>
<b>1.2. Contexte : Etat du secteur des forêts en Algérie .....</b>	<b>10</b>
<b>1.2.1. Répartition des terres en Algérie .....</b>	<b>11</b>
<b>1.2.2. Présentation de la forêt algérienne.....</b>	<b>12</b>
<b>1.2.3. Etendue des forêts et des autres terres boisées .....</b>	<b>12</b>
<b>1.2.4. Répartition du couvert forestier par essence .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2.5. Taux d'espace boisé des wilayas .....</b>	<b>14</b>
<b>1.3. Situation des trois essences de bois d'Algérie étudiées.....</b>	<b>15</b>
<b>1.3.1. Présentation et localisation des trois essences .....</b>	<b>15</b>
<b>1.3.2. Caractérisation anatomiques et technologiques du bois des trois essences étudiées ..</b>	<b>19</b>
<b>1.4. Situation de la filière bois en Algérie .....</b>	<b>21</b>
<b>1.4.1. Situation générale .....</b>	<b>21</b>
<b>1.4.2. La production de bois provient de forêts aménagées et non aménagées .....</b>	<b>22</b>
<b>1.4.2. Revenus générés par la forêt algérienne .....</b>	<b>23</b>
<b>1.5. Facteurs influençant l'évolution de la forêt algérienne et menaçant son développement ..</b>	<b>23</b>
<b>1.5.1. Contraintes socio-économiques.....</b>	<b>24</b>
<b>1.5.2. Les incendies .....</b>	<b>24</b>
<b>1.5.3. Le surpâturage.....</b>	<b>25</b>
<b>1.6. La stratégie actuelle pour le développement forestier en Algérie .....</b>	<b>25</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>26</b>
<b>Chapitre 2 : Le bois, caractéristiques et fonctionnalités</b>	
Introduction .....	27
<b>2.1. Généralités sur le matériau bois .....</b>	<b>28</b>

# Sommaire

2.1.1.	Anatomie et structure .....	28
2.1.2.	Les principales caractéristiques du comportement physique du matériau bois .....	28
2.2.	Propriétés physiques .....	33
2.2.1.	Relation entre la structure anatomique du bois et ses propriétés physiques.....	33
2.2.2.	Le point de saturation des fibres.....	35
2.2.2.1.	Les différentes méthodes de détermination du PSF .....	36
2.2.2.2.	Les facteurs qui affectent le PSF.....	36
2.2.3.	Le collapse.....	38
2.3.	Aspect mécanique.....	38
2.3.1.	Les facteurs influençant le comportement mécanique du bois.....	38
2.3.1.1.	Les nœuds .....	38
2.3.1.2.	L'orientation des fibres.....	39
2.3.1.3.	Bois juvénile et bois de réaction .....	40
2.3.1.4.	La densité .....	40
2.3.1.5.	La température .....	41
2.3.1.6.	L'humidité .....	42
2.4.	Le vieillissement du bois.....	42
2.5.	Durabilité du bois .....	43

## Chapitre 3 : Les composites à base de bois massif

Introduction .....	45
3.1. Les composites à base de bois.....	46
3.1.1. Le bois lamellé-collé .....	46
Figure 1.3.1 : Le bois lamellé-collé.....	47
3.1.2. Les carrelets bois trois plis .....	47
3.1.2.1. Définition .....	47
Description du produit.....	47
3.1.2.2. Avantages d'utilisation .....	48
3.1.2.3. Les différents types de carrelet trois plis .....	48
3.1.2.4. Les domaines d'utilisation des carrelets .....	48
3.1.3. Le comportement mécanique des composites à base de bois .....	49
3.1.3.1. Le dommage mécanique.....	49
3.2. Etat de l'art sur la technique d'aboutage .....	51
3.2.1. Aboutage.....	51

# Sommaire

Figure 1.3.5 : Profil en scarf d'aboutage .....	51
<b>3.2.2. L'aboutage par entures multiples .....</b>	<b>52</b>
<b>3.2.3. Facteurs qui affectent la qualité des aboutages .....</b>	<b>54</b>
<b>3.2.3.1. Effets des propriétés du bois .....</b>	<b>54</b>
<i>Masse volumique .....</i>	55
<i>Teneur en humidité du bois .....</i>	55
<i>Température .....</i>	55
<b>Les nœuds .....</b>	<b>56</b>
<b>3.2.3.2. Effets de la géométrie des joints .....</b>	<b>56</b>
<i>Paramètres de profil des joints .....</i>	56
<i>Types de configuration de joints .....</i>	57
<i>Orientation des entures .....</i>	58
<b>3.2.3.3. Effet des paramètres de production .....</b>	<b>58</b>
<i>Pression d'assemblage .....</i>	58
<i>Type d'adhésif .....</i>	59
<i>Coupe des entures .....</i>	59
<b>Conclusion .....</b>	<b>59</b>
<b>Chapitre 4: Le collage dans l'industrie de bois</b>	
<b>Introduction .....</b>	<b>60</b>
<b>4.1. Le collage du bois .....</b>	<b>60</b>
<b>4.2. Les principaux types de colles .....</b>	<b>61</b>
<b>4.2.1. Les adhésifs aminoplastes .....</b>	<b>61</b>
<b>4.2.2. Les adhésifs thermoplastiques .....</b>	<b>61</b>
<b>4.2.3. Les autres adhésifs .....</b>	<b>62</b>
<b>4.2.4. Les colles issues de la chimie verte .....</b>	<b>62</b>
<b>4.3. Classification des collages .....</b>	<b>62</b>
<b>4.4. Mécanismes régissant le collage du bois .....</b>	<b>63</b>
<b>4.4.1. Mouillabilité, grammage de colle et temps d'assemblage .....</b>	<b>64</b>
<b>4.4.2. Pénétration de la colle .....</b>	<b>65</b>
<b>4.4.3. Pression de collage .....</b>	<b>65</b>
<b>4.4.4. Polymérisation des adhésifs .....</b>	<b>65</b>
<b>4.4.5. Stabilisation .....</b>	<b>65</b>
<b>4.5. Facteurs influençant la mouillabilité de surface et la qualité d'adhérence .....</b>	<b>66</b>

# Sommaire

Conclusion .....	67
<b>Partie 2 : Matériels</b>	
Matériel.....	68
1.1. Origines des bois étudiés.....	68
1.2. Caractéristiques des sites de prélèvements .....	69
1.2.1. Station forestière d'Akfadou.....	69
1.2.2. Station forestière Haizer .....	71
1.3. Les critères de prélèvement .....	72
1.4. Logique d'échantillonnage .....	74
1.4.1. Description du protocole de prélèvement des éprouvettes pour les essais normalisés	74
1.4.1.1. Conditionnement des billons dans l'eau.....	74
1.4.1.2. Traçage des billons.....	74
1.4.1.3. Usinage des éprouvettes .....	75
1.4.2. Prélèvement spécifique des éprouvettes pour la mesure du point de saturation des fibres (= PSF) .....	78
1.5. Chaîne de transformation du bois jusqu'à la fabrication des carrelets trois plis .....	78
1.5.1. Débit, mise aux dimensions et conditionnement des bois.....	79
1.5.2. Préparation de l'adhésif et composition des carrelets.....	81
1.5.3. Délignage et mise à longueur des profilés fabriqués .....	86
1.6. Protocole de fabrication des aboutages à entures multiples .....	87
1.6.1. Sciage-séchage .....	87
1.6.2. Délignage des lamelles après séchage.....	87
1.6.3. Préparation de l'adhésif dans l'abouteuse .....	88
1.6.4. Profilage des entures sans épaulement et collage des entures dans l'abouteuse .....	88
1.6.5. Mise à dimensions des pièces aboutées.....	88
1.7. Echantillonnage et préparation des éprouvettes .....	88
1.7.1. Préparation des carrelets.....	88
1.7.2. Préparation des éprouvettes de bois abouté et bois massif .....	89
Conclusion .....	90
<b>Partie 3: Méthodes, résultats et discussions</b>	
<b>Chapitre 1: Caractérisation physico-mécanique des bois</b>	
Introduction .....	91

# Sommaire

1.1.	Détermination des propriétés physiques de chaque essence .....	91
1.1.1.	Détermination de l'humidité du bois NF B 51-004 (Sept 1985) .....	91
1.1.2.	Détermination de la masse volumique NF B 51-005 (1985) .....	93
1.1.3.	Détermination du retrait radial et du retrait tangentiel NF B 51 006 (1985) .....	95
1.1.4.	Détermination du point de saturation des fibres (PSF) des trois essences de bois .....	96
1.2.	Résultats et discussion (partie physique) .....	101
1.3.	Détermination des propriétés mécaniques .....	114
1.3.1.	Détermination de la contrainte de rupture en flexion statique et calcul du module d'élasticité longitudinal B 51-008 (1987) .....	114
1.3.2.	Méthode de détermination du module d'élasticité longitudinal et module de cisaillement transverse par méthode vibratoire (méthode BING®), .....	119
1.3.3.	Essai de compression axial NF B 51-007 (1985) .....	120
1.3.4.	Essai de cisaillement EN 314-1 (2005) .....	122
1.4.	Résultats et discussions (partie mécanique) .....	123
	Conclusion .....	129

## Chapitre 2 : Qualification des aboutages à entures multiples

Introduction .....	131	
2.1.	Caractérisation et qualification des aboutages .....	131
2.1.1.	Détermination de la masse volumique, du module d'élasticité longitudinal et du module de cisaillement transverse par méthode vibratoire (méthode BING®) .....	132
2.1.2.	Contrainte de rupture en flexion longitudinale (flexion 4 points) .....	133
2.1.2.1.	Résistance en flexion statique et valeurs caractéristiques .....	134
2.1.2.1.	Qualification du collage et performances des entures .....	135
2.2.	Résultats et discussions .....	136
2.2.1.	Comparaison des modules d'élasticité longitudinaux, des modules de cisaillement et des masses volumiques des bois massifs et aboutés .....	136
2.2.2.	Comparaison du comportement à la rupture en flexion des bois massifs et des bois aboutés .....	137
2.2.3.	Valeurs caractéristiques de la contrainte de rupture en flexion statique .....	141
Conclusion .....	142	

## Chapitre 3: Etude du comportement mécanique et qualification du collage des carrelots trois plis

Introduction .....	143	
3.1.	Etude du comportement mécanique des carrelots .....	143

# Sommaire

<b>3.1.1. Détermination de la résistance à l'humidité : Essai de délamination suivant la norme XP CEN/TS 13307-1&amp;2 (2010-01-01).....</b>	<b>144</b>
<b>3.1.1.1. Détermination de la masse volumique des carrelets .....</b>	<b>145</b>
<b>3.1.1.2. Essai de délamination pour la classe de service 2 (produits abrités de la pluie - portes et fenêtres extérieures) .....</b>	<b>146</b>
<b>3.1.1.3. Essai de délamination pour la classe de service 1 (Portes et fenêtres intérieures) .....</b>	<b>148</b>
<b>3.1.1.4. Evaluation de la délamination : méthode de mesure des ouvertures de joints de collage .....</b>	<b>149</b>
<b>3.1.1.5. Quantification de la délamination : calcul des résultats .....</b>	<b>151</b>
<b>3.2. Résultats et discussions .....</b>	<b>153</b>
<b>3.3. Essai de vieillissement accéléré.....</b>	<b>157</b>
<b>Conclusion : .....</b>	<b>160</b>

## Chapitre 4: Application des carrelets trois plis en conditions réelles d'utilisation

<b>Introduction .....</b>	<b>162</b>
<b>4.1. Fabrication et validation des performances de prototype d'éléments de menuiserie.....</b>	<b>162</b>
<b>4.2. Essais de durabilité naturelle en conditions réelles d'utilisation .....</b>	<b>164</b>
<b>4.2.1. Présentation.....</b>	<b>164</b>
<b>4.2.2. Protocole de suivi .....</b>	<b>1655</b>
<b>Conclusion générale et perspective .....</b>	<b>167</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>171</b>

## Annexes

# Liste des figures

## Partie 1: Etude bibliographique

### Chapitre 1

Figure 1.1.1: Carte de l'Algérie.....	11
Figure 1.1.2: Occupation du sol des wilayas du Nord (BNEDER 2009).....	13
Figure 1.1.3: Taux de boisement des wilayas de l'Algérie du Nord.....	15
Figure 1.1.4: Feuille et arbre de Pin d'Alep.....	16
Figure 1.1.5: L'étendue de barrage vert en Algérie.....	16
Figure 1.1.6: Chêne zèen.....	18
Figure 1.1.7: Répartition du chêne zèen en Algérie (Rabhi 2011).....	18
Figure 1.1.8: Chêne afarès.....	19
Figure 1.1.9: Evolutions annuelle du nombre de feux et des superficies parcourues par le feu en Algérie sur la période 1985-2010).....	24

### Chapitre 2

Figure 1.2.1: Les directions du bois et ses principaux constituants à l'intérieur de la tige.....	29
Figure 1.2.2: La structure microscopique du bois d'un résineux et d'un feuillus.....	30
Figure 1.2.3: Vue microscopique de bois de pin d'Alep dans le plan radial, tangentiel et transversale (x 40).....	31
Figure 1.2.4: Vue microscopique de bois de chêne afarès dans le plan radial, tangentiel et transversale(x40).....	32
Figure 1.2.5: Vue microscopique de bois de chêne zèen dans le plan radial, tangentiel et transversale (x 40).....	33
Figure 1.2.6: L'eau libre et l'eau liée dans le bois.....	35
Figure 1.2.7: Retraits radial et tangentiel du bois de hêtre en fonction de son humidité d'équilibre en adsorption et en désorption à environ 25°C (d'après Stevens 1963).....	37
Figure 1.2.8: Différents types de nœuds dans le bois.....	39
Figure 1.2.9: Relation entre contrainte de rupture en compression et densité.....	41
Figure 1.2.10: Dégradation de bois en vieillissement.....	42

### Chapitre 3

Figure 1.3.1: Types de bois lamellés-collés.....	47
Figure 1.3.2: Carrelet trois plis en Pin.....	47
Figure 1.3.3: Différents domaines d'utilisation des carrelets.....	48
Figure 1.3.4: Agencement idéal de lamelles de bois dans la section des poutres lamellées collées (lamelles d'orientation voisines assemblées entre elles).....	50
Figure 1.3.5: Profil en scarf d'aboutage.....	51
Figure 1.3.6: Description de la géométrie du profil d'aboutage.....	53
Figure 1.3.7: Profil d'un joint horizontal (A) et vertical (B).....	53
Figure 1.3.8: Effet du type de joint sur la résistance mécanique à la traction par rapport à celle du bois massif (d'après Selbo 1975).....	58
Figure 1.3.9: Types de configuration des joints.....	58

### Chapitre 4

Figure 1.4.1: Illustration de la mouillabilité.....	64
---	----

## Partie 2: Matériels

Figure 2.1.1: Division administrative de l'Algérie de Nord : les deux sites de prélèvement sont repérés par un cercle rouge.....	69
Figure 2.1.2: Carte des travaux forestiers (Bejaia).....	70
Figure 2.1.3: Forêt d'Akfadou (Béjaia –Algérie).....	71
Figure 2.1.4: Carte des travaux forestiers (Bouira).....	72
Figure 2.1.5: Sélection puis abattage des arbres.....	73
Figure 2.1.6: Collecte des billons tronçonnés (chêne afares).....	73
Figure 2.1.7: Conditionnement des billons dans l'eau.....	74
Figure 2.1.8: Traçage transversal des éprouvettes le long d'un diamètre.....	75

# Liste des figures

Figure 2.1.9 :Dégauchissage, rabotage et mise au format des bois débités.....	75
Figure 2.1.10 :Schéma synoptique de découpage des éprouvettes.....	77
Figure 2.1.11 :Eprouvette d’essai de cisaillement.....	77
Figure 2.1.12 :Echantillonnage et marquage des éprouvettes pour l’essai de PSF.....	78
Figure 2.1.13 :Sciage des billons.....	80
Figure 2.1.14:Plateaux délimités en lamelles de 35 mm d’épaisseur.....	80
Figure 2.1.15:Séchage des plateaux de bois.....	81
Figure 2.1.16:Choix de la configuration des orientations de cernes lors de la composition des carrelets.....	85
Figure 2.1.17 :Les différentes étapes de la fabrication des carrelets.....	86
Figure 2.1.18:Mise à longueur de carrelet final (carrelets mixte à la sortie de la déligneuse).....	87
Figure 2.1.19:Délignage des lamelles.....	88
Figure 2.1.20:Profilage des entures.....	89
Figure 2.1.21:Elaboration des éprouvettes prélevées dans les carrelets trois plis.....	90
Figure 2.1.22:Eprouvette de bois abouté.....	90
<b>Partie 3: Méthodes ,résultats et discussions</b>	
<b>Chapitre 1</b>	
Figure 3.1.1 :Eprouvette d’essai d’humidité.....	92
Figure 3.1.2:Eprouvette d’essai de masse volumique.....	94
Figure 3.1.3 :Pesée des éprouvettes.....	94
Figure 3.1.4 :Détermination du volume.....	94
Figure 3.1.5 :Eprouvette d’essai avec marquage.....	95
Figure 3.1.6 :Mesure des dimensions radial et tangentiel.....	96
Figure 3.1.7 :Eprouvettes de retraits linéaires et PSF.....	97
Figure 3.1.8 :Préparation des échantillons dans les récipients en verre.....	98
Figure 3.1.9 :Saturation des échantillons dans l’autoclave.....	99
Figure 3.1.10 :Déshydratation des échantillons en étuve sèche.....	100
Figure 3.1.11 :Pesée des éprouvettes.....	101
Figure 3.1.12 :Mesure des dimensions à l’aide d’un comparateur Heidenhain.....	101
Figure 3.1.13 :Mesure du volume saturé d’une éprouvette utilisant le principe de la poussée d’Archimède (méthode de la double pesée).....	101
Figure 3.1.14 : Représentation graphique en box plot de la masse volumique des trois essences.....	105
Figure 3.1.15:Détermination du PSF du Chêne Zéen.....	109
Figure 3.1.16 : Détermination du PSF du Chêne Afarès.....	109
Figure 3.1.17 : Détermination du PSF du Pin d’Alep.....	110
Figure 3.1.18 :Représentation graphique de la distribution du retrait radial total pour le chêne afarès et le chêne zéen.....	111
Figure 3.1.19: Représentation graphique en box plot de la distribution du retrait tangentiel pour le chêne afarès et le chêne zéen.....	112
Figure 3.1.20 :Distribution d’infradensité sous forme de box plot pour les deux chênes.....	113
Figure 3.1.21 : Eprouvette d’essai de flexion.....	117
Figure 3.1.22:Essai de flexion quatre points.....	117
Figure 3.1.23:Dispositif d’essai Bing (CIRAD).....	120
Figure 3.1.24:Magnitude de la transformée de Fourier.....	120
Figure 3.1.25 :Signal analytique associé aux modes de fréquence.....	120
Figure 3.1.26 :Mise en place de l’essai de compression axial.....	122
Figure 3.1.27:Essai de cisaillement.....	122
Figure 3.1.28: Courbe force-déplacement chêne afarès (essais de flexion) .....	124
Figure 3.1.29: Courbe force-déplacement pin d’Alep (essais de flexion) .....	124
Figure 3.1.30: Courbe force-déplacement chêne zéen (essais de flexion) .....	125
Figure 3.1.31 :Courbes force-déplacement : essai de compression axiale.....	128

# Liste des figures

Figure 3.1.32:Rupture d'éprouvette d'essai de cisaillement (chêne afarès).....	129
<b>Chapitre 2</b>	
Figure 3.2.1 : Profil des entures multiples.....	132
Figure 3.2.2 : Géométrie des entures multiples.....	132
Figure 3.2.3 : Schéma du bâti d'essai de flexion.....	133
Figure 3.2.4 : Bâti utilisé pour les essais de flexion.....	134
Figure 3.2.5 : Distribution des contraintes de rupture en flexion pour le pin d'Alep, <i>Pinus halepensis</i> Mill.....	138
Figure 3.2.6 : Distribution des contraintes de rupture en flexion pour le chêne afarès, <i>Quercus afares</i> Pomel.....	138
Figure 3.2.7 : Distribution des contraintes de rupture en flexion pour le chêne zéen, <i>Quercus canariensis</i> Willd.....	138
Figure 3.2.8: Courbe force-déplacement type pour la rupture en flexion des bois massifs du pin d'Alep <i>Pinus halepensis</i> Mill., du chêne afarès <i>Quercus afares</i> Pomel, et du chêne zéen, <i>Quercus canariensis</i> Willd.....	139
Figure 3.2.9 : Défauts d'aboutages (entures mal profilées ou pression de serrage insuffisante) : les entures ne sont pas ajustées.....	140
Figure 3.2.10 : Le manque d'ajustement des entures provoque un décollement des joints de colle sur les trois essences.....	141
<b>Chapitre 3</b>	
Figure 3.3.1 :Fabrication des éprouvettes d'essais à partir des carrelets.....	144
Figure 3.3.2 :Eprouvette avec numérotation des plans de colle.....	146
Figure 3.3.3 :Le bain thermostaté.....	147
Figure 3.3.4 :Eprouvettes dans le bac d'eau .....	147
Figure 3.3.5 :Eprouvette dans l'étuve ventilée à la sortie de bain thermostaté .....	148
Figure 3.3.6 :Eprouvettes prélevées dans les carrelets 3-plis conditionnés en étuve ventilée.....	149
Figure 3.3.7:Méthode de mesure de l'ouverture des joints en utilisant la jauge d'épaisseur de 0,2mm.....	150
Figure 3.3.8 :Comportement des bois à la fin de l'essai.....	151
Figure 3.3.9: Mise en place de l'essai de vieillissement sur la roue Gardner.....	158
Figure 3.3.10: Les différentes composantes ou phases de l'essai de vieillissement.....	158
Figure 3.3.11 : Etat des éprouvettes à la fin d'essai.....	159
<b>Chapitre 4</b>	
Figure 3.4.1:Prototype de menuiserie fabriqué à partir de carrelets 3-plis en Pin d'Alep, constitué d'un dormant et d'un battant.....	162
Figure 3.4.2:Prototype de menuiserie fabriqué à partir de carrelets 3-plis mixte Pin d'Alep-Chêne afarès, constitué d'un volet et d'un battant.....	163
Figure 3.4.3: Site d'essais en conditions réelles d'utilisation du CIRAD.....	164

# Liste des tableaux

## Partie 1

Tableau 1.1.1:Surfaces forestières par pays dans le bassin méditerrané.....	7
Tableau 1.1.2:Accroissement des stocks par hectare des forêts de plusieurs pays de la méditerranée en 2010 (source FAO 2010).....	8
Tableau 1.1.3 :Résultats de l'approche <b>SWOT</b> appliquée à la forêt méditerranéenne .....	9
Tableau 1.1.4 :Répartition des terres.....	12
Tableau 1.1.5 :Données de base résultant des inventaires.....	12
Tableau 1.1.6 :définition des classes de couverture forestière.....	13
Tableau 1.1.7 :Surfaces occupées par les principales essences en Algérie.....	14
Tableau 1.1.8 :La production Algérienne en bois, liège et alfa.....	22
Tableau 1.1.9 :Revenus tirés de la forêt en 1999.....	23
Tableau 1.3.1 :Facteurs qui affectent la résistance mécanique des bois aboutés.....	54
Tableau 1.3.2 : Les paramètres de joint de l'enture étudié par Ayarkwa <i>et al.</i> (2000a).....	57

## Partie 2

Tableau 2.1.1:Critères de prélèvement .....	73
Tableau 2.1.2:Spécifications de la colle vinylique 1 mono composant.....	82
Tableau 2.1.3 : Spécifications de la colle EPI 1989.....	83
Tableau 2.1.4 :Spécifications de la colle vinylique 2.....	84

## Partie 3

Tableau 3.1.1 :Classement de bois en fonction de la masse volumique $M_v$ .....	93
Tableau 3.1.2 :Taux d'humidité des bois.....	102
Tableau 3.1.3 :Masse volumique des trois essences.....	103
Tableau 3.1.4 : Les retraits radiaux et tangentiels.....	106
Tableau 3.1.5 : Comparaison des retraits de différents chênes.....	107
Tableau 3.1.6 : Comparaison des retraits de différents pins.....	107
Tableau 3.1.7: Retraits linéaires transverses moyens des 3 essences déterminées lors d'essai de PSF.....	111
Tableau 3.1.8 : Résultats généraux des mesures d'infradensité pour les trois essences.....	113
Tableau 3.1.9 :Taux d'humidité des trois essences lors de l'essai.....	115
Tableau 3.1.10:Contrainte de rupture en flexion statique et module d'élasticité longitudinal.....	123
Tableau 3.1.11:Caractéristiques mécaniques pour cinq espèces de Pin.....	125
Tableau 3.1.12 : Résultats de la contrainte de rupture en compression axial.....	126
Tableau 3.1.13: Les valeurs comparées.....	127
Tableau 3.1.14: Module de cisaillement et contrainte de cisaillement.....	129
Tableau 3.2.1. :Comparaison bois massifs / bois aboutés pour les trois caractéristiques déterminées avec la méthode vibratoire.....	136
Tableau 3.2.2 :Comparaison des caractéristiques mécaniques des bois massifs et aboutés : résultats du test (non paramétrique) de Mann-Whitney (test de rang).....	137
Tableau 3.2.3 : Valeurs caractéristiques pour la contrainte de rupture en flexion statique (bois massifs et bois aboutés).....	141
Tableau 3.3.1 : Données sur les éprouvettes d'essai.....	144
Tableau 3.3.2 : Masse volumique $M_v$ des carrelats.....	145
Tableau 3.3.3:Comportement des carrelats en fonction du type de colle et selon l'essence(classe 1).....	150
Tableau 3.3.4 :Comportement des carrelats en fonction de type de la colle (classe 2).....	151
Tableau 3.3.5 :Résultats des calculs de délamination pour le collage vinylique 1.....	153
Tableau 3.3.6 :Résultats des calculs de délamination pour le collage EPI.....	154
Tableau 3.3.7 :Résultats des calculs de délamination pour la colle vinylique 2.....	155

## Liste des abréviations

..., - : non disponible

**ABS** : Acrylonitrile Butadiène Styène, polymère thermoplastique

**ANSI**: American National Standards Institute

**BLC**: Bois lamellé collé

**BNEDER** : Bureau National d'Etudes de Développement Rural

**CTB**: Centre technique du bois

**CTFT** :Centre technique forestier tropical.

**DA** : Dinar algérien

**DGF** : Direction générale des forêts

**EPI** :Emulsion polymer isocyanates

**FAO** : Organisation des Nations Unies pour l'agriculture et l'alimentation

**FAOSTAT**: Division statistique de la FAO

**FRA** : Evaluation des ressources forestières mondiales

**IFN** : Inventaire Forestier

**JAS**: Japanese Agricultural Standard

**MATE**: Ministère de l'agriculture du territoire et de l'environnement

**MUF**: Mélamine-urée-formol

**OSB**: Oriented Strand Board (= panneau de lamelles minces, longues et orientées)

**PAN** : Programme d'action national

**PF**:Phénol-formol

**PNDF** : Plan national de développement forestier

**PNR** : Plan national de reboisement

**PRF** : Résorcine-phénol-formol, = RPF

**PUR** :Polyuréthane

**PVAc** : Vinylique poly(acétate de vinyle), ou acétate de polyvinyle

**Qx** : Quintaux

**SAU** : Surface agricole utile

**SIG**: Système d'informatique géographique

**SWOT** : Strenghts – Weaknesses – Opportunities – Threats

**UF**:Urée-formol

# Résumé

Ces travaux de recherche ont pour finalité de valoriser des ressources forestières locales peu utilisées pour la fabrication de produits-bois composites destinés à des emplois dans l'habitat.

Les caractéristiques physiques et mécaniques des trois essences ciblées, le pin d'Alep, le chêne afarès et le chêne zéen ont été étudiées.

Des produits-bois reconstitués par collage ont été fabriqués : aboutages à entures multiples pour chacune des trois essences et carrelets 3-plis en pin d'Alep pur, en chêne zéen pur, en chêne afarès pur, puis associant pin d'Alep et chêne afarès afin d'améliorer la résistance et la rigidité des produits.

Les bois utilisés proviennent des deux stations forestières de Haizer (région de Bouira) pour le pin d'Alep et d'Akfadou (région de Béjaïa) pour les deux chênes.

Les produits reconstitués par collage, aboutages à entures multiples et carrelets trois plis, ont été fabriqués puis qualifiés et caractérisés conformément aux procédures définies dans la norme XP CEN/TS 13307-2 (janvier 2010) *Ebauches et profilés semi-finis en bois lamellé-collé et assemblés par entures multiples pour usages non structurels - partie 2 : Contrôle de production*.

Trois types de colles ont été utilisés : colle vinylique 1 mono-composant utilisée par Transbois, colle EPI et seconde colle vinylique 2.

Les essais de caractérisation physique et mécanique des bois ont montré que le pin d'Alep est un bois qui peut être qualifié de léger tandis que le chêne afarès est un bois lourd et le chêne zéen un bois très lourd.

Le retrait tangentiel total et le retrait radial total du pin d'Alep sont respectivement faible et moyen. Les retraits de séchage des deux chênes sont beaucoup plus élevés que ceux du pin d'Alep. Le retrait radial du duramen du chêne afarès est moyen, celui de l'aubier est élevé, et pour cette même essence, le retrait tangentiel est élevé dans tout le bois. Le retrait radial moyen et le retrait tangentiel moyen du chêne zéen sont respectivement élevé et très élevé.

Les différences de point de saturation des fibres (PSF) entre les essences sont similaires à celles observées pour les retraits de séchage. Le PSF du pin d'Alep est en moyenne inférieur à 30% ce qui en fait une essence plutôt stable. En revanche, les PSF des deux chênes sont beaucoup plus élevés et dépassent 30% ce qui confirme le caractère « nerveux » de ces deux essences et leurs retraits de séchage élevés.

Les deux chênes présentent l'un comme l'autre des propriétés mécaniques très élevées.

Pour étudier la tenue et le comportement des aboutages, leurs caractéristiques ont été comparées à celles déterminées sur des éprouvettes massives pour ces mêmes essences. Une caractéristique physique et trois caractéristiques mécaniques ont été déterminées : masse volumique, résistance en rupture par un essai de flexion statique 4 points, module d'élasticité longitudinal et module de cisaillement transverse en utilisant le dispositif « Bing » (méthode mettant en œuvre une analyse des fréquences de résonance du matériau).

Tant pour le pin d'Alep que pour les deux chênes, on observe les mêmes niveaux de module d'élasticité pour les bois massifs et pour les bois aboutés.

Les bois aboutés présentent des résistances en flexion toujours plus faibles que les bois massifs. Cette différence est liée à la forte variabilité de la tenue des aboutages liée à l'un et/ou l'autre des deux facteurs suivants : pression de serrage trop faible ou irrégulièrement répartie, usinage des entures peu précis d'où un mauvais ajustement des assemblages.

# Résumé

L'hétérogénéité du séchage peut être aussi un facteur explicatif : certaines éprouvettes présentaient un taux d'humidité supérieur à celui conseillé lors de l'utilisation d'une colle vinylique.

Ces facteurs limitants n'ont cependant pas impactés les résultats des valeurs caractéristiques de résistance en rupture qui restent en accord avec les spécifications de la norme utilisée en référence pour caractériser la tenue des aboutages.

Ces résultats auraient été très probablement améliorés si le processus de fabrication des aboutages à entures multiples avait été conduit en suivant plus strictement les règles de l'art.

Le comportement du collage des carrelets 3-plis a été caractérisé par un essai de délamination pour la classe de service 1 (portes et fenêtres intérieures) et pour la classe de service 2 (portes et fenêtres extérieures abritées de la pluie) conformément à la norme XP CEN/TS 13307-1&2 (2010-01-01).

La délamination des carrelets a été caractérisée en mesurant l'ouverture des plans de collage après conditionnement et stabilisation des éprouvettes.

Les résultats obtenus pour les trois colles sont les suivants :

✓ Colle vinylique 1 (monocomposant) : pour les 4 types de carrelets, le collage est conforme aux préconisations de la classe de service 1 ; bien que la présence de résine puisse constituer un facteur limitant, les collages de pin d'Alep présentent les meilleurs résultats ; en revanche, les résultats sont intermédiaires pour les carrelets composites chêne/pin. Trois des quatre types de carrelets ne donnent pas de résultats satisfaisants pour la classe de service 2.

✓ Colle EPI : les quatre types de carrelets donnent des résultats conformes aux préconisations de la norme pour la classe de service 1 ; aucun décollement n'a été observé sauf pour le chêne afarès. Les carrelets de pin d'Alep, de chêne afarès et les carrelets mixtes donnent aussi des résultats satisfaisants en classe de service 2 ; comme pour la classe de service 1, aucun décollement n'est observé sur les carrelets de pin d'Alep, cette essence présentant un très bon comportement au collage.

✓ Colle vinylique 2 : les quatre types de carrelets présentent des résultats conformes aux préconisations de la norme pour la classe de service 1 ; l'utilisation d'une colle vinylique paraît donc suffisante dans ces conditions d'utilisation, même pour des bois « nerveux » à densité élevée. En revanche, trois des quatre types de carrelets ne donnent pas de résultats satisfaisants en classe de service 2.

L'applicabilité de la mise en œuvre de carrelets 3-plis en pin d'Alep a été vérifiée par la conception puis la fabrication de produits de démonstration.

Ainsi, certains carrelets de pin d'Alep non utilisés pour les essais de laboratoire ont servi à fabriquer des éléments de menuiserie : battant et dormant de fenêtre, volet.

Ces produits ont été fabriqués simultanément en France (atelier du Cirad) et en Algérie (unité de fabrication de l'entreprise partenaire). Aucun problème technique n'est apparu durant les processus de fabrication. Les carrelets 3-plis de pin d'Alep, stables et présentant des résistances mécaniques satisfaisantes, conviennent particulièrement bien pour fabriquer ces produits.

Des essais longue-durée de suivi de l'aspect et de la stabilité biologique de ces produits ont été mis en place (suivi sur 3 ans avec une périodicité de 6 mois). Les premiers relevés à 6 mois n'ont révélé aucune attaque d'agents de dégradation biologique.

# Abstract

These research studies aim to give higher added-value to local and lesser-used forest resources through manufacturing of glued products to be applied for building.

The physical and mechanical characteristics of the three studied species, Aleppo Pine, Afares Oak and Zeen Oak, have been studied.

Glue-laminated products have been manufactured: finger jointed for the 3 species then 3-layers laminated profiles for each species and mixing Aleppo Pine and Afares Oak in order to improve strength and stiffness of the products.

Wood specimens come from two forest stations, Haizer (Bouira region) for Aleppo Pine and Akfadou (Béjaïa region) for the 2 Oaks species.

Glued-products, i.e. finger jointed specimen and 3-layers profiles, have been manufactured then characterized according to the rules defined in the standard XP CEN/TS 13307-2 (January 2010) *Laminated and finger jointed timber blank and semi-finished profiles for non-structural uses - Part 2: Production control*.

Three categories of glues have been used: mono-component vinyl used par the Company Transbois, EPI(Emulsion Polymer Isocyanates), and vinyl 2.

The physical and mechanical tests have shown that Aleppo Pine wood is light whereas Afares Oak is heavy and Zeen Oak is very heavy.

Radial shrinkage of Aleppo Pine is medium and tangential shrinkage is low whereas Afares Oak heartwood gets medium radial shrinkage but high shrinkage for sapwood, and high tangential shrinkage in sapwood as well as in heartwood. Radial shrinkage of Zeen Oak is medium to high and tangential shrinkage is high.

For the 3 species, the tendencies brought to fore for fiber saturation point (FSP) are the same that for linear shrinkages: Aleppo Pine FSP is the lowest, below the 30% threshold commonly considered as the wood mean value.

The FSP of the 2 Oaks are over 30% that corresponds to the results obtained with the shrinkages.

Both Afares and Zeen Oaks have very high mechanical properties that make them adapted to structural applications.

Strength and quality of the finger-joints have been studied by comparison with the mechanical properties of massive wood. Four characteristics have been considered: bending strength(4 points bending), specific gravity, longitudinal modulus of elasticity (Young modulus), and transversal shearing strength using BING method.

For the 3 species, stiffness of massive wood and finger jointed specimen appeared quite similar.

By contrast, bending strength of finger jointed wood is systematically lower than massive wood. These results are caused by the very variable quality of the finger joints. For some of them, fingers are out of adjustment because of inaccurate machining process and/or clamping pressure too much low.

Moreover, drying quality showed some heterogeneousness, some wood specimen having moisture content over the acceptable limit for a mono-component vinyl glue.

# Abstract

Despite these constraints linked to manufacturing processes, characteristics values for bending strength are acceptable according to the specifications of the reference standard. This standard defines the finger joints quality criteria.

For the 3-layers laminated profiles, gluing quality has been assessed using a delamination test for service class 1 (doors and indoor windows) and service class 2 (outdoor doors and windows sheltered from the rain). The reference standard is XP CEN/TS 13307-1&2 (2010-01-01).

For the 2 service classes, the opening of the glue joints are measured to determine the level of delamination after conditioning then moisture content stabilization.

. For the mono-component vinyl glue 1, gluing can be considered as correct for service class 1 for the four types of profiles. The best result is for Aleppo Pine, the softwood species easier to glue despite of resin pockets or drips. For mixed profiles (Aleppo Pine + Afares Oak), the result is intermediate.

By contrast, for service 2, gluing doesn't meet the required conditions for three of the four types of profiles.

. For EPI glue, gluing is good for the four types of profiles for service class 1: no delamination except for Afares Oak.

For service class 2, gluing is correct for Aleppo Pine, Afares Oak and mixed profiles. For Aleppo Pine, no delamination similar to class 1 that reveals the very good ability of this species to be glued.

. For mono-component vinyl glue 2, results are excellent for the four types of profiles in service class 1. These results confirm that vinyl glue is appropriated even for high density and high shrinkages wood species.

For service class 2, gluing doesn't meet the required conditions for three of the four types of profiles.

The technological behavior of the 3-layers profiles under practical conditions of use has been studied designing and processing semi-manufactured or finished products.

A part of the profiles manufactured for the laboratory tests have been used to manufacture prototypes of joinery components, window frame, window leaf, and shutter.

These products have been manufactured in the partner company in Algeria, and in the workshop of Cirad.

Manufacturing has not posed any problem; profiles are very stable; they are very appropriated to these kind of finished products.

## ملخص

هذه الأعمال البحثية (البحوث) تهدف إلى إحصاء و تقييم الموارد الغابية المحلية التي يقل استخدامها في صنع المنتجات الخشبية المركبة المستعملة في البيئة السكنية .

في هذا البحث تم درس خواص الخشب الفيزيائية و الميكانيكية للأصناف الثلاثة: الصنوبر، بلوط الأفراس، بلوط الزان.

تم خلال هذه الأعمال صنع مواد خشبية معادة التركيب عن طريق اللصق :

- تركيب متعدد لقطاعات الخشب القصيرة وذلك لأنواع الخشب الثلاثة .  
- صنع المواد الخشبية المركبة الثلاثة الوحيدة من الصنوبر ،بلوط الزان و البلوط الأفراس ، وبعد ذلك المختلطة من خشب الصنوبر و بلوط الأفراس و الهدف من ذلك تحسين صلابته ومقاومته الميكانيكية .

خلال عملية صنع المواد الخشبية المركبة الثلاثية تم استخدام ثلاثة أصناف من الغراء (الغراء الخشبي)

هذه المواد المصنوعة تم دراسة خواصها تباعا للمعيار التالي XP CEN/TS 13307-1et2 (janvier 2010) *Ebauches et profilés semi-finis en bois lamellé-collé et assemblés par entures multiples pour usages non structurels - partie 2 :*

*Contrôle de production.*

التجارب المنجزة لتحديد الخواص الفيزيائية و الميكانيكية للخشب بينت أن الصنوبر خشب خفيف، بلوط الأفراس خشب ثقيل و بلوط الزان خشب ثقيل جدا.

تقييم جودة اللصق لأنواع الأولى للمواد المعادة التركيب تم بمقارنة خواصه الميكانيكية للخشب العادي (خشب غير معاد التركيب )  
الخصائص الأربعة المعتبرة هي:

- الاوجاج الثابت الرباعي.
- الكتلة الحجمية .
- المرونة .
- كيفية استجابة الخشب للقطع .

النتائج أظهرت أن الخشب المعاد التركيب يمتلك تقريبا نفس خواص الخشب العادي .

فيما يخص النوع الثاني للمواد المعادة التركيب لقد تم تقييم جودتها عن طريق تجارب تم من خلالها تحديد نوعية و جودة الإلصاق و مدى نجاحها مع الأصناف الثلاثة للخشب و ذلك بإتباع نص المعيار السابق.

النتائج أظهرت أن الإلصاق كان ناجحا لكل من الأصناف الثلاثة للغراء المستخدم و يعتبر أيضا ناجحا للخشب المستعمل رغم ضعف بعض النتائج المتحصل عليها .

الكلمات المفتاحية :

خشب الصنوبر، خشب بلوط الزان، خشب الأفراس، مواد خشبية معادة التركيب ،إلصاق الخشب .

# Introduction générale

## Introduction générale

### Introduction générale

Les ressources forestières de l'Algérie se caractérisent par une très importante variabilité associée aux très grandes variations de climat d'est en ouest, et des régions sahariennes aux côtes méditerranéennes. Les bioclimats méditerranéens s'échelonnent depuis le bioclimat humide jusqu'au bioclimat saharien (Louni 1994).

Malgré cette diversité climatique associée à de très fortes variations de pluviosité dans l'espace et dans le temps conditionnant directement les conditions de croissance de la végétation, les forêts algériennes sont dominées par un nombre limité d'espèces ou de groupes d'espèces de plantation ou de forêt naturelle dont certaines sont fortement endémiques.

Par ordre décroissant de superficie, ces espèces sont les suivantes : pin d'Alep (*Pinus halepensis*), chêne-liège (*Quercus suber*), eucalyptus *Eucalyptus* p.p., chêne vert (*Quercus rotundifolia*), chênezéen (*Quercus canariensis*) et chêne afarès (*Quercus afares*), pin maritime (*Pinus pinaster*), et enfin cèdres, essentiellement cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*).

Leurs potentialités et leurs perspectives de valorisation sont aussi très inégales et dépendent directement de la qualité de leur bois, sous-tendue par la qualité des arbres sur pied (rectitude, cylindricité et conicité des tiges, présence de défauts externes ou internes).

Le pin d'Alep est l'espèce la plus abondante en Algérie mais son utilisation reste limitée à des emplois à faible valeur ajoutée, essentiellement l'emballage et la construction légère (Direction générale des forêts 2000).

Cette limitation de ses emplois potentiels est liée à sa forte nodosité, à la présence de résine à cœur, et à sa nervosité due à la présence de bois de compression (Thibaut *et al.* 1992 ; Langbour *et al.* 2011).

Le chêne zéen et le chêne afarès sont deux espèces à feuilles caduques, souvent associées au chêne-liège qu'elles ont tendance à supplanter dans certaines stations fraîches. Les caractéristiques technologiques de leurs bois sont proches : fort retrait de séchage, dureté et propriétés mécaniques élevées.

Compte tenu de la faible stabilité dimensionnelle de ces deux essences, l'usage de leur bois est limité à des pièces de forte section pour des emplois lourds et à faible valeur ajoutée : poteaux de mine, traverses de chemin de fer, charpente traditionnelle... (Ameels 1989 ; Berrichi 1993 ; Messaoudene *et al.* 2008). Du fait de leurs similitudes, ces deux espèces sont donc souvent traitées de façon groupée dans les études forestières et technologiques.

Les travaux de recherche ont été axés sur le pin d'Alep et sur les chênes zéen et afarès du fait de leurs comportements technologiques connus comme très différents, mais avec des perspectives de valorisation qui se rejoignent car ces trois espèces présentent un fort potentiel technologique pour des applications et des créneaux de mise en marché multiples.

Avant d'envisager toute tentative de valorisation de ces essences, il est apparu important dans un premier temps de mieux cerner leurs caractéristiques technologiques de référence,

## Introduction générale

caractéristiques physiques et mécaniques qui conditionnent directement les itinéraires techniques à adopter.

Parmi les caractéristiques physiques, la masse volumique, les retraits linéaires de séchage et le point de saturation des fibres sont les plus importants à étudier car ils expliquent en grande partie le futur comportement technologique des bois durant leur transformation puis après mise en œuvre.

La masse volumique constitue la caractéristique technologique de référence, la première à déterminer pour mieux cerner les possibilités de transformation puis de mise en œuvre de toute essence de bois quelle qu'en soit l'origine.

Cette propriété est reliée, plus ou moins étroitement, aux principales propriétés physiques et mécaniques du bois ainsi qu'à certaines caractéristiques de mise en œuvre.

L'étude des retraits de séchage et du point de saturation des fibres contribue à mieux appréhender les mécanismes des mouvements de l'eau dans le bois, sorption et désorption qui régissent le comportement des bois et leur stabilité dimensionnelle durant le séchage.

L'étude des caractéristiques mécaniques de référence, module d'élasticité longitudinal, contrainte de rupture en flexion et en compression, permet d'adapter les emplois en structure où les pièces de bois sont fréquemment sollicitées en flexion statique suivant leur plus grande direction, parallèlement aux fibres, et en compression.

Les trois essences étudiées présentent des handicaps technologiques qui limitent leur valorisation en bois d'œuvre.

Le pin d'Alep se caractérise par une forte nodosité qui le pénalise dans les emplois où le bois est sollicité mécaniquement ainsi que dans les emplois où l'aspect du bois est important, par exemple en menuiserie et en agencement intérieur.

Les deux chênes n'ont pas, ou beaucoup moins, ce handicap des nœuds, mais la nervosité du bois affecte les rendements matière, notamment après séchage, les bois fendus et déformés devant être purgés de leurs défauts avant mis en œuvre.

Les techniques de reconstitution par collage sont donc apparues particulièrement adaptées à ces bois pour permettre leur valorisation en bois d'œuvre. Ces techniques se sont largement développées depuis 20-25 ans. Au-delà du pin d'Alep et des deux chênes étudiés, elles permettent de tirer le meilleur parti et d'apporter de la valeur ajoutée à des bois qui seraient autrement déclassés, voire mis au rebut ou non exploités :

- . essences faiblement disponibles et dont l'exploitation ne permet pas de constituer des lots commerciaux de volume suffisant,
- . grumes de petit diamètre provenant ou non d'éclaircies et dont la valorisation constitue un problème récurrent pour les gestionnaires forestiers,
- . grumes mal conformées dont il est très difficile, sinon impossible, de tirer des pièces massives de dimension satisfaisante,
- . bois posant des problèmes durant leur transformation : faibles rendements matière au sciage notamment à cause des effets induits par la libération des contraintes de croissance, problèmes de séchage pour les bois nerveux (cas des deux chênes),

## Introduction générale

. bois présentant des défauts qu'il est nécessaire de purger avant utilisation (cas du pin d'Alep),

. bois sciés déclassés souvent réservés à un marché très local alors que la reconstitution des bois par collage permet d'obtenir des produits à plus haute valeur ajoutée.

Parmi ces techniques de reconstitution par collage qui aujourd'hui se développent de plus en plus, la fabrication de carrelets 3-plis, produit équilibré mécaniquement donc stable, occupe une place prépondérante.

La fabrication de ces carrelets 3-plis met en œuvre deux processus différents mais qui, associés, conduisent à obtenir ce type de produit : l'aboutage et la lamellation.

La seconde partie des travaux réalisés porte sur la caractérisation des produits obtenus à partir de ces deux processus de fabrication.

Les carrelets trois plis sont constitués de trois lames de bois, aboutées ou non, collées entre elles sur face. Leur fabrication repose sur la maîtrise d'une double technologie : l'aboutage à entures multiples qui relève d'un processus industriel, la lamellation relevant d'une technologie plus simple et plus flexible que l'aboutage, davantage transposable à un processus semi-industriel.

Ces produits présentent des avantages multiples : comme énoncé précédemment, leur fabrication permet de valoriser des bois de qualité secondaire purgés de leurs défauts et des coproduits de scierie ; leurs résistances mécaniques sont comparables à celles du bois massif ; ils sont prêts à l'emploi et ont une stabilité dimensionnelle supérieure à celle du bois massif (risques limités de déformations, de fissurations et de gerces durant la mise en œuvre).

Le développement de ces produits depuis quelques années est lié à la mise au point de nouvelles colles à bois très performantes qui permettent de s'affranchir en partie des contraintes technologiques imposées par certaines essences : bois très durs, nerveux (retraits de séchage élevés), à forts taux d'extraits.

Ces produits sont aujourd'hui acceptés par les entreprises de seconde transformation, notamment en menuiserie industrielle, et sont proposés par la quasi-totalité des opérateurs spécialisés dans le négoce, la revente et la distribution de matériaux-bois et produits dérivés (Le Névé 2012).

L'application des techniques de collage par aboutage et lamellation est apparue *a priori* bien adaptée pour mieux valoriser des essences telles que le pin d'Alep et les chênes zéen et afarès du fait des problèmes technologiques posés par leur transformation directe en bois massif (Messaoudene *et al.* 2008 ; Langbour *et al.* 2011).

Cependant, l'aptitude de ces bois au collage et le comportement des produits reconstitués se devaient d'être étudiés afin de valider la faisabilité d'une telle fabrication, ceci avant d'envisager son application à un niveau industriel.

Le collage d'essences secondaires et la fabrication de bois massifs reconstitués ont fait l'objet de nombreuses études ayant pour finalité la valorisation de ressources forestières locales en utilisant des adhésifs de différents types (Dinkel 1997 ; Bustos 2003 ; Pommier et Muszynski 2007).

## Introduction générale

Les innovations les plus récentes ont concerné l'aboutage du bois vert à l'aide d'adhésifs assurant un collage chimique du bois mais dont la stabilité dans le temps après collage reste hypothétique (Dagenais 2007 ; Coman 2010).

Les objectifs de l'étude de faisabilité se déclinent à deux niveaux :

- . Aptitude à l'aboutage des trois essences testées (aboutage sans épaulement : entures usinées sur la totalité de la section des pièces) et caractéristiques des produits aboutés obtenus.
- . Adaptation de la technique de lamellation, caractérisation des produits lamellés et perspectives de fabrication de produits lamellés-aboutés.

De ces deux opérations, l'aboutage est sans doute celle qui est la plus délicate à conduire car il est davantage sensible à la nervosité du bois et à ses défauts de structure.

Pour les aboutages, la qualification des produits obtenus reposera sur l'étude et la détermination de leurs propriétés de référence par comparaison au bois massif : masse volumique, contrainte de rupture en flexion quatre points, module d'élasticité longitudinal.

Les produits lamellés seront caractérisés par des essais de délamination selon deux catégories de critères correspondant à deux classes de service (classes 1 et 2) associées à des emplois intérieur ou extérieur abrité, et par un essai de vieillissement accéléré sur la roue Gardner.

Après l'évaluation des performances mécaniques des produits reconstitués par collage et afin de confirmer et valider les résultats qui seront obtenus, des prototypes de produits finis ou semi-finis seront fabriqués, de type éléments de menuiserie ou équivalent.

En fonction des moyens disponibles, ces fabrications seront réalisées en Algérie dans l'entreprise-partenaire ou au centre d'usinage du Cirad.

Partie 1 : Etude bibliographique  
Chapitre 1 : Les ressources forestières

## Introduction

La forêt représente une composante importante des territoires en région méditerranéenne. Elle contribue de façon significative au développement rural, à la réduction de la pauvreté et à la sécurité alimentaire des populations locales. Elle est à la fois source de bois, de liège, d'énergie, de nourriture, de revenus et de multiples autres biens et services environnementaux : biodiversité, alimentation en eau, espaces récréatifs et accueil du public, stockage de carbone. La forêt a une importance cruciale pour de nombreux secteurs économiques des régions concernées : agriculture et alimentation, conservation des eaux et des sols, fourniture d'eau potable, tourisme, énergie (FAO 2013).

### 1.1. Présentation et caractérisation de la forêt méditerranéenne

#### 1.1.1. La situation forestière en région méditerranéenne

Depuis toujours, les forêts méditerranéennes ont été exploitées par les populations locales pour satisfaire leurs besoins grâce aux ressources et services que ces forêts fournissent.

La qualité des paysages, la protection des sols et des ressources en eau, la lutte contre l'érosion et la désertification, la fixation du carbone, la conservation de la diversité biologique, la faune sauvage et la chasse, les produits forestiers non ligneux et les activités récréatives sont des services écosystémiques vitaux pour les populations méditerranéennes (FAO 2013).

Cependant, cette forêt est aujourd'hui sous la menace de contraintes multiples, notamment le déséquilibre biologique causé par la surexploitation, la multiplication des incendies et la désertification. Ces facteurs de risque ont été largement décrits dans le rapport de la FAO *Etat des forêts méditerranéennes 2013* à partir d'une analyse des données de chaque pays de la région méditerranéenne.

Les écosystèmes forestiers méditerranéens sont composés :

- de forêts couvrant près de 70 millions d'hectares (FAO 2010),
- d'autres terres boisées couvrant près de 33 millions d'hectares et étroitement reliées à des zones urbaines et agricoles.

Les forêts méditerranéennes typiques sont composées des groupes d'espèces forestières suivantes :

- les feuillus, principalement des chênes :
  - . à feuilles persistantes : *Quercus ilex* (chêne vert), *Q. suber* (Chêne liège), *Q. coccifera* (chêne kermès), *Q. calliprinos* (chêne de Palestine), *Q. ithaburensis* (chêne du mont Thabor, feuilles semi-persistantes).

. à feuilles caduques : *Q. pubescens* (chêne pubescent), *Q. cerris* (chêne chevelu), *Q. pyrenaica* (chêne Tauzin), *Q. toza* (chêne brosse).

- les conifères, principalement *Pinus halepensis* (Pin d'Alep), *P. brutia* (Pin de Calabre), *P. pinea* (Pin parasol, appelé aussi Pin pignon), *P. pinaster* (Pin maritime) et des espèces du genre *Juniperus* (*Genévrier*).

La dégradation de ces forêts a produit une végétation à basse densité comme le maquis et la garrigue.

Cependant, en absence de stress hydrique, les forêts de *Q. robur* (chêne pédonculé), *Q. petraea* (chêne rouvre ou chêne sessile), *Fraxinus sp.* (Frênes), *Populus alba* (peuplier blanc) et *Pinus nigra* (pin noir) peuvent prospérer (FAO 2013).

Dans la région méditerranéenne, les surfaces forestières sont inégalement réparties.

Une distinction est faite entre les *Forêts*<sup>1</sup> et les *Autres terres boisées*<sup>2</sup>.

Le pourcentage de la surface totale des forêts pour chacun des pays de la région varie d'environ 1/5 pour l'Espagne et la France (respectivement 21% et 19%) jusqu'à un taux quasi négligeable pour les pays du sud-est méditerranéens : 0,1% pour la Jordanie et l'Egypte.

A l'intérieur de chaque pays, le pourcentage de terres couvertes par les *Forêts* est très variable :

- un seul pays présente un taux de couverture forestière supérieur à 50%, la Slovénie avec 62%,

- dix pays ont un taux de couverture supérieur à 30% : la Bosnie- Herzégovine (43%), l'Ancienne République yougoslave de Macédoine (39%), le Portugal (38%), l'Espagne (36%), la Bulgarie (36%), la Croatie (34%), le Monténégro (34%), l'Italie (31%), la Serbie (31%), la Grèce (30%).

- deux pays ont un taux de couverture supérieur à 20% : la France (29%) et l'Albanie (28%).

En bas du tableau, ce taux de couverture est quasi négligeable pour la Libye et l'Egypte, et très faible pour la Jordanie et **l'Algérie** (1%).

Pour les *Autres terres boisées*, trois pays se distinguent avec un taux de couverture de 20% : Chypre, le Monténégro, la Grèce. De 1990 à 2010, les surfaces forestières dans les pays méditerranéens se sont accrues de près de 12 millions d'hectares, en moyenne de 0,68% par an, excepté pour quatre pays, l'Albanie, l'Algérie, la Bosnie-Herzégovine et Israël qui dont le couvert forestier a diminué.

---

<sup>1</sup> Terrain qui satisfait aux trois critères suivants : (1) couvert par des arbres supérieur ou égal à 10 % ; (2) surface supérieure ou égale à 0,5 ha ; largeur supérieure ou égale à 20 mètres.

<sup>2</sup> Terrain qui satisfait aux 3 critères suivants : (1) couvert par des arbres compris entre 5 et 10 % ou couvert par d'autres végétaux ligneux supérieur ou égal à 10 % ; (2) surface supérieure ou égale à 0,5 ha ; largeur supérieure ou égale à 20 mètres.

Ces changements sont principalement liés à l'accroissement naturel des forêts, aux boisements et aux reboisements.

La forêt algérienne ne représente que 1,8% des forêts méditerranéennes, les *Forêts* et les *Autres terres boisées* ne représentent que 1% de la surface totale du pays.

Tableau 1.1.1: Surfaces forestières par pays dans le bassin méditerranéen

Pays	Forêts			Autres terres boisées		Autres terres		% de la surface Totale des forêts du bassin méditerranéen
	Surface totale (x 1000ha)	X 1000 ha	% de la surface totale	X 1000ha	% de la surface totale	1000 ha	% de la surface totale	
Espagne	49919	18173	36	9574	19	22171	44	21
France	55010	15954	29	1618	3	37438	68	19
Turquie	76963	11334	15	10368	13	55261	72	13
Italie	29411	9149	31	1767	6	18495	63	11
Maroc	44630	5131	11	631	1	38868	87	6
Bulgarie	10864	3927	36	0	0	6937	64	4,6
Grèce	12890	3903	30	2636	20	6351	49	4,6
Portugal	9068	3456	38	155	2	5457	60	4,1
Serbie	8746	2713	31	410	5	5623	64	3,2
Bosnie -	5120	2185	43	549	11	2368	46	2,6
Croatie	5592	1920	34	554	10	3118	56	2,3
<b>Algérie</b>	<b>238174</b>	<b>1492</b>	<b>1</b>	<b>2685</b>	<b>1</b>	<b>23399</b>	<b>98</b>	<b>1,8</b>
Slovénie	2014	1253	62	21	1	740	37	1,5
Tunisie	15536	1006	6	300	2	1423	92	1,2
ARYM	2543	998	39	143	6	1402	55	1,2
Albanie	2740	776	28	255	9	1709	62	0,9
Syrie	18378	491	3	35	0,002	1785	97	0,6
Monténégro	1382	467	34	277	20	627	45	0,5
Libye	175954	217	0,001	330	0,002	1754	100	0,3
Chypre	924	173	19	214	23	537	58	0,2
Israël	2164	154	7	33	2	1977	91	0,2
Liban	1023	137	13	106	10	780	76	0,2
Jordanie	8824	98	1	51	1	8676	98	0,1
Egypte	99545	70	0,000	20	0,000	9945	100	0,1
Autres	686	25	4	0	0	661	96	0,1
<b>Total</b>	<b>773171</b>	<b>69248</b>	<b>551</b>	<b>32732</b>	<b>165</b>	<b>5847</b>	<b>1778</b>	<b>100</b>

Note : Autres pays = Andorre, Gibraltar, Vatican, Malte, Monaco, Palestine et Saint -Marin ; ARYM=Ancienne république yougoslave de Macédoine, Syrie=République arabe syrienne.

Source : FAO, 2010

La production de produits forestiers ligneux représente 35% de la valeur économique totale des forêts méditerranéennes.

### 1.1.2. Relation entre l'accroissement des stocks et la gestion des forêts

L'accroissement des stocks, c'est-à-dire du volume des troncs des arbres sur pied constitue un indicateur de référence pour suivre la gestion des forêts dans le cadre des inventaires forestiers nationaux.

Cet accroissement donne des informations de première importance pour estimer l'évolution des volumes de biomasse disponibles et des stocks de carbone.

La Bulgarie, la France, l'Italie, l'Espagne et la Turquie fournissent le volume le plus important de cet accroissement des stocks, plus de 500 millions de m<sup>3</sup> par pays.

Cependant, nous avons remarqué suite aux analyses réalisées qu'il existe en région méditerranéenne des différences très importantes entre les pays pour l'accroissement des stocks par hectare : la Croatie et la Slovénie présentent un accroissement des stocks supérieur à 200 m<sup>3</sup>/ha lié aux conditions très favorables de croissance des arbres.

Tableau 1.1.2 : Accroissement des stocks par hectare des forêts de quelques pays de la Méditerranée en 2010 (source FAO 2010)

Pays	Accroissement des stocks par hectare (m <sup>3</sup> )
Slovénie	332
Croatie	213
France	162
Turquie	135
Egypte	120
Algérie	76
Espagne	50
Grèce	47
Liban	37
Tunisie	26

Source : FAO 2010

Des efforts pour améliorer la qualité des données disponibles sur l'accroissement des stocks dans les autres terres boisées devrait être fait par la prochaine édition de l'Etat des forêts méditerranéennes qui sera publié en fin 2016 ou 2017.

### 1.1.3. Analyse SWOT

#### *Rappel de la méthodologie SWOT*

L'analyse SWOT (Strengths – Weaknesses – Opportunities – Threats) ou SLOOT (Strengths – Limitations– Opportunities – Threats) ou encore AFOM (Atouts-Faiblesses-Opportunités – Menaces) est une méthode d'évaluation initialement utilisée en marketing ; elle permet de définir de manière organisée l'état d'une situation donnée à travers la mise en évidence de ses **forces** et de ses **faiblesses** propres d'une part, et des **opportunités** et **menaces** liées à son environnement d'autre part. Elle définit les rapports entre ces quatre facteurs afin d'améliorer la situation en adoptant les stratégies les plus appropriées.

Cette méthode vise à identifier les stratégies qui maximisent le potentiel de forces et d'opportunités et qui minimisent l'impact des faiblesses et des menaces.

#### *Résultats de l'analyse*

L'application de la méthode SWOT à la forêt méditerranéenne a pour objectif d'en déterminer les forces, les faiblesses, les opportunités et les menaces appliquées à l'ensemble de ses caractéristiques tant techniques que socio-économiques.

Elle a été construite à partir de l'analyse des données disponibles dans la littérature, résultats de recherches et études réalisées sur le sujet, et des données statistiques de la FAO.

Cette analyse nous a permis de mieux appréhender et d'avoir une meilleure vision de la situation du secteur forestier dans la région, la finalité étant de développer ce secteur qui reste une source importante de revenus pour les populations locales en région méditerranéenne et dont la montée en puissance demeure un enjeu stratégique majeur pour tous les pays de la région.

Tableau 1.1.3 : Résultats de l'approche **SWOT** appliquée à la forêt méditerranéenne

<b>Paramètres</b>	
<b>Forces</b>	Diversité biologique Exceptionnelle variété des produits forestiers non ligneux Situation géographique et climat favorable, notamment surtout dans le nord de la zone méditerranéenne.
<b>Faiblesses</b>	Population aux ressources limitées favorisant l'exode rural. Fortes pressions anthropiques exercées sur les ressources forestières par les populations pauvres dans le sud de la Méditerranée. La prédominance des terres occupées par le désert du Sahara.
<b>Opportunités</b>	Engagement des responsables politiques qui ont pris conscience des enjeux vitaux, liés au maintien et au développement du couvert forestier.

	<p>Enjeux climatiques (COP 21) et montée en puissance du concept de services environnementaux pour la forêt.</p> <p>Terrain de recherche attractif pour la communauté scientifique internationale et développement des collaborations multiples sur des projets de Recherche &amp; Développement.</p>
<b>Menaces</b>	<p>Multiples menaces physiques : incendies de forêts, risques phytosanitaires (insectes ravageurs, maladies associées, dépérissement).</p> <p>Déficit hydrique croissant, notamment dans certains pays, notamment sur la série d'Atlas saharien en Algérie.</p> <p>Effets du changement climatiques et fragilité politico-socio-économique de certains pays.</p> <p>Explosion démographique à l'origine de surexploitations des ressources forestières</p>

Cette analyse révèle toutes les potentialités de la forêt méditerranéenne, et donc de la forêt algérienne, mais elle en révèle aussi toutes les fragilités.

Elle met l'accent sur les enjeux associés à la sauvegarde et au développement des peuplements forestiers concernés mais aussi sur la crainte d'un manque de volonté générale de conduire les actions nécessaires pour la préserver compte tenu de sa grande fragilité.

## 1.2. Contexte : état du secteur des forêts en Algérie

Avec une superficie de 2,388 millions de km<sup>2</sup>, l'Algérie est le plus vaste pays méditerranéen, et le premier pays africain par sa superficie ; il est bordé au nord par la mer Méditerranée sur une distance de 1 280 km. Le Sahara algérien constitue un des plus vastes déserts du monde ; il couvre plus de 2 millions de km<sup>2</sup> soit 84% du territoire.

Deux chaînes montagneuses importantes, l'Atlas tellien dans la partie nord et l'Atlas saharien dans la partie Sud, séparent le pays en trois milieux différents qui présentent des spécificités en termes de relief et de morphologie.

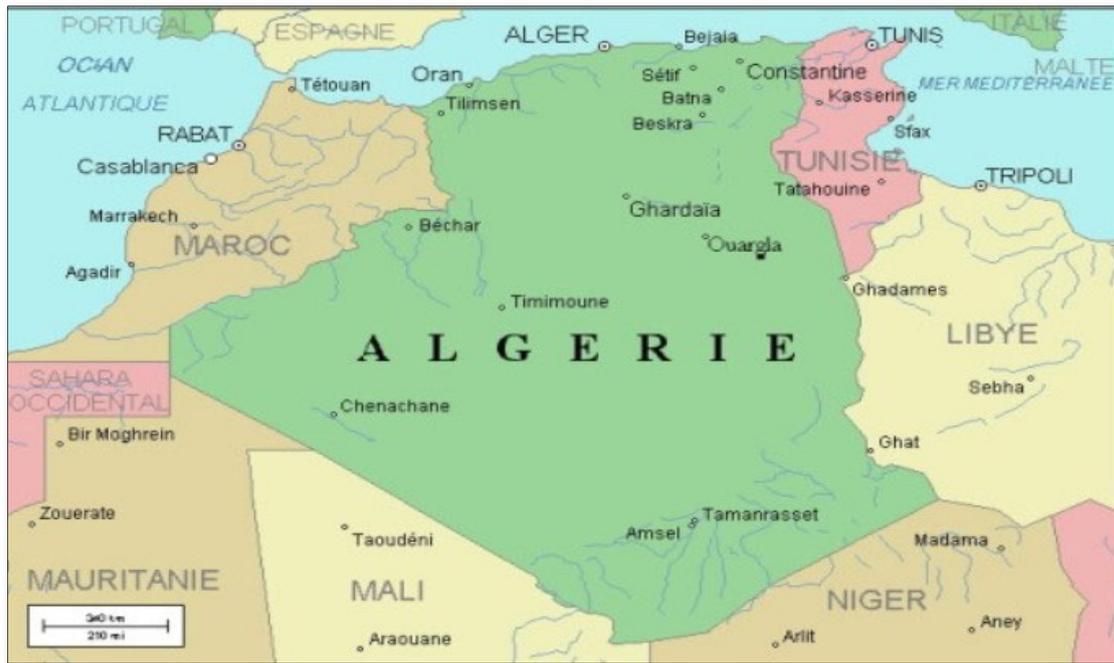


Figure 1.1.1: Carte de l'Algérie

Le climat de l'Algérie est un climat méditerranéen typique ; il présente une diversité bioclimatiques méditerranéenne depuis le per-humide au nord jusqu'au per-aride au sud et depuis le froid au nord jusqu'au chaud au sud pour les variantes thermiques.

Il se caractérise par une longue période de sécheresse estivale variant de 3 à 4 mois sur le littoral, de 5 à 6 mois au niveau des hautes plaines et de 6 mois et plus au niveau de l'Atlas saharien (Bougadoum 1992).

### 1.2.1. Répartition des terres en Algérie

Selon les dernières données du Ministère de l'Agriculture (1992, 1997 et 2000), les 238 millions d'hectares du territoire algérien sont répartis comme indiqué dans le tableau 1.1.4. Les terres utilisées par le secteur agricole occupent 40 millions d'hectares soit 17% de l'ensemble du territoire et se subdivisent comme suit :

- 31 millions d'hectares sont utilisés comme pacages et parcours et constituent le domaine essentiel du pastoralisme en Algérie.
- Huit millions d'hectares représentent la surface agricole utile (SAU) et se répartissent en terres labourables (93% de la SAU) et en cultures pérennes (7% de la SAU). Sur plus de 75% de la SAU, la pluviométrie reste une contrainte importante pour le développement des cultures.
- Les formations forestières couvrent 4,2 millions d'hectares (Ghazi et Lahouati 1997).
- Les steppes à alfa assurent la transition entre les groupements forestiers et les groupements steppiques. Les surfaces occupées par l'alfa étaient de 5 millions d'hectares au début du siècle, elles sont passées à moins de 3 millions d'hectares au début des années 2000 et couvrent aujourd'hui moins de 2 millions d'hectares. L'importante dégradation des nappes alfatières est due à leur exploitation intensive car l'alfa constitue la matière première de la pâte à papier ; cette ressource est aussi utilisée par le secteur artisanal traditionnel pour la vannerie (Nedjraoui 1990 ; Kadi-Hanifi 1998).

Les terres improductives qui représentent 80% du territoire algérien sont localisées essentiellement dans les régions sahariennes

Tableau 1.1.4 : Répartition des terres

Vocation des terres	SAU	Pacage et parcours	Terres alfatières	Terres forestières	Terres improductives	Total
Superficie (10 <sup>3</sup> ha)	8 227	31 054	2 916	4 196	191 331	238 174
Pourcentage de la superficie totale	3,5%	13,1%	1,2%	1,8%	80,3%	100%

Source : FAO (2003)

### 1.2.2. Présentation de la forêt algérienne

La végétation de la forêt algérienne est en état de lutte continue contre les phénomènes de dépérissement et contre la sécheresse qui survient régulièrement durant plusieurs mois consécutifs. Compte tenu des facteurs historiques et des pressions anthropiques qui l'ont marquée et qui pèsent encore sur elle, cette forêt semble sur la voie d'une rapide évolution régressive, avec une montée en puissance des maquis et des broussailles (DGF 1997).

Les forêts dites économiques et susceptibles de production couvrent environ 1,2 million d'ha, soit moins de 30% du couvert forestier.

Parmi la superficie couverte par les forêts, 718 000 h sont des plantations. En excluant le Sahara, les forêts couvrent environ 15% de la partie septentrionale du pays.

De plus, 15 à 20 millions d'hectares sont constitués de pâturages, maquis et garrigues.

La couverture forestière du pays a augmenté de 1,3% entre 1990 et 2000 (FAO 2003).

### 1.2.3. Etendue des forêts et des autres terres boisées

Deux inventaires forestiers nationaux (IFN) ont été réalisés par la Direction Générale des Forêts successivement en 1984 et 2003. Deux sources de référence fiables sont ainsi disponibles : le premier inventaire réalisé par le bureau national d'études forestières et le second inventaire réalisé par un bureau d'études spécialisé, le bureau national des études de développement rural.

Les résultats des deux inventaires ont été récapitulés dans le tableau 1.1.5.

Tableau 1.1.5 : Données de base résultant des inventaires

Classe (type de couverture)	Superficie (ha)	Superficie (ha)
	(IFN 1984)	(IFN 2003)
Forêts denses	753 000	584 659
Forêts claires	719 000	801 235
Maquis	1 876 000	2 560 241
Reboisements	247 000	141 178
Vides	50 000	-

Autres	-	20 583 040
<b>Total</b>	<b>3 645 000</b>	<b>24 590 353</b>

Source : IFN 1984 et IFN 2003

Le tableau 1.1.6 présente la définition au niveau national des classes correspondant aux types de couverture.

Tableau 1.1.6 : définition des classes de couverture forestière

Classe	Définition
Forêts claires	Forêt découvert supérieur à 10% et inférieur à 40% (système de classification identique à celui adopté par la FAO)
Forêts denses	Forêt découvert supérieur à 40% (système de classification identique à celui adopté par la FAO)
Maquis	Toute végétation ligneuse ne dépassant pas 7 mètres de hauteur (arbustes, arbrisseaux, broussailles...)
Reboisements	Plantations forestières
Vides	Vides labourables et terrains de parcours

Source : (Ikermoud2000)

La figure 1.1.2 présente la cartographie de la répartition des terres en Algérie du nord.

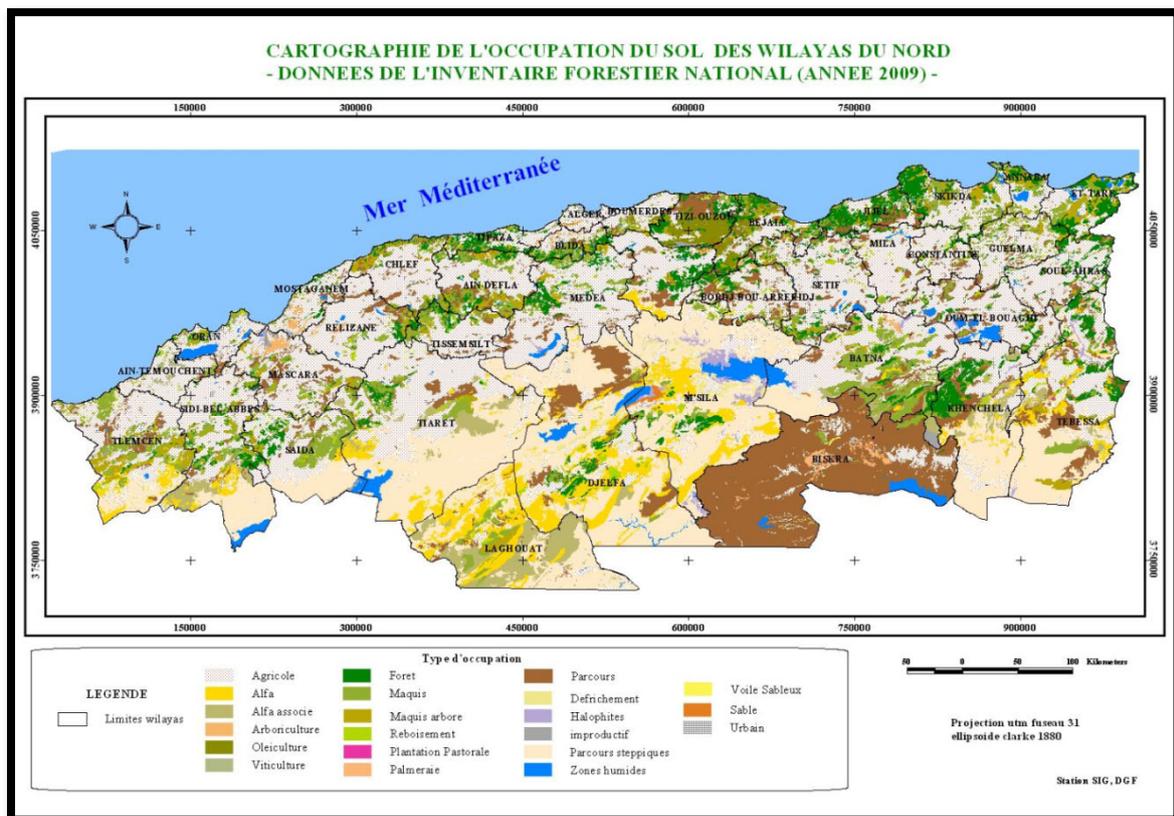


Figure 1.1.2: Occupation du sol des wilayas du Nord (BNEDER 2009)

### 1.2.4. Répartition du couvert forestier par essence

Le nord-est du pays présente les conditions de croissance les plus favorables du fait de la pluviométrie élevée (jusqu'à 1 200 mm/an). Cette région se caractérise par des forêts de chêne-liège (*Quercus suber*), de chênes verts (*Quercus ilex*) et de Cèdres (*Cedrus spp.*).

Beaucoup de ces forêts sont dégradées, comme partout en Algérie, et dans certaines zones, l'élevage est un obstacle sérieux pour la régénération. Les régions nord-est sont aussi couvertes par des forêts de Pins et d'Eucalyptus à croissance rapide. L'essence la plus abondante dans le pays est le pin d'Alep. La plupart des peuplements sont dispersés dans les montagnes centrales. Le tableau 1.1.7 récapitule l'occupation en hectares des principales essences forestières en Algérie.

Ce tableau confirme la prépondérance du pin d'Alep qui représente l'espèce dominante avec plus des 2/3 des surfaces occupées.

Tableau 1.1.7: Surfaces occupées par les principales essences en Algérie

Essence	Surface en hectares	Pourcentage / surface totale
Pin d'Alep	1 158 533	67,7 %
Chêne-liège	349 218	20,4 %
Chêne zéen et chêne afarès	43 922	2,6 %
Cèdre	32 909	1,9 %
Pin maritime	28 490	1,7 %
Divers	68 391	4 %
Eucalyptus	29 355	1,7 %
<b>TOTAL</b>	1710818	100 %

Source : BNEDER (2009)

### 1.2.5. Taux d'espace boisé des wilayas

À l'échelle nationale, on observe un taux de boisement très variable d'une wilaya à une autre.

Les taux de boisements retenus ici prennent en compte les surfaces forestières, les maquis, et les broussailles.

Ils sont évalués en pourcentage de la superficie totale de la wilaya. Les wilayas les plus boisées d'Algérie se situent à l'est et au centre du pays (Figure 1.1.3). On constate, en effet, que la wilaya la plus boisée d'Algérie est la wilaya d'El Tarf, avec un taux exceptionnel de 59 %. En seconde position, avec un taux qui dépasse 30 %, on trouve les 7 wilayas de Skikda, Jijel, Bejaia, Annaba, Tizi Ouzou, Aïn Defla et Blida. Dix autres wilayas, comme les wilayas de Tlemcen, Tissemsilt, Sidi Bel Abbès, Tipaza, Bouira et Guelma, présentent un pourcentage de boisement qui reste élevé (20-30 %) (Meddour-Sahar 2012; DGF 2007).

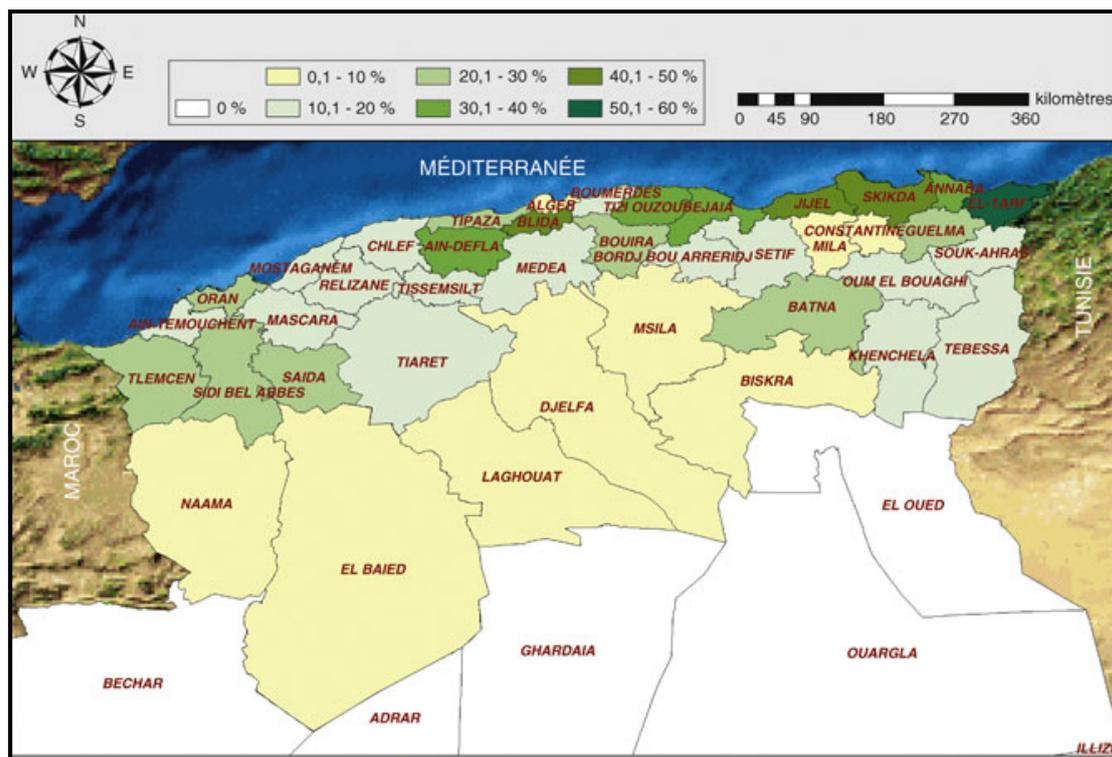


Figure 1.1.3: Taux de boisement des wilayas de l'Algérie du Nord

Source : (Meddour-Sahar 2012; DGF 2007)

### 1.3. Situation des trois essences étudiées

Les trois espèces retenues pour l'étude, le pin d'Alep (*Pinus halepensis*), le chêne afarès (*Quercus afares*) et le chêne zéen (*Quercus canariensis*) sont des essences de première importance au niveau national.

#### 1.3.1. Présentation et localisation des trois essences

##### *Pin d'Alep*

Le pin d'Alep est l'essence résineuse la plus répandue dans le bassin méditerranéen et la plus abondante en Algérie car elle est la plus rustique et capable de s'adapter à différents types du sol et à des climats très variés.

On compte près de 1 160 000 ha de pin d'Alep en Algérie (BNEDER 2009) issus de reboisements ou présents à l'état naturel. Ces peuplements ont tendance à régresser de façon continue du fait des incendies répétés et des pacages non contrôlés.

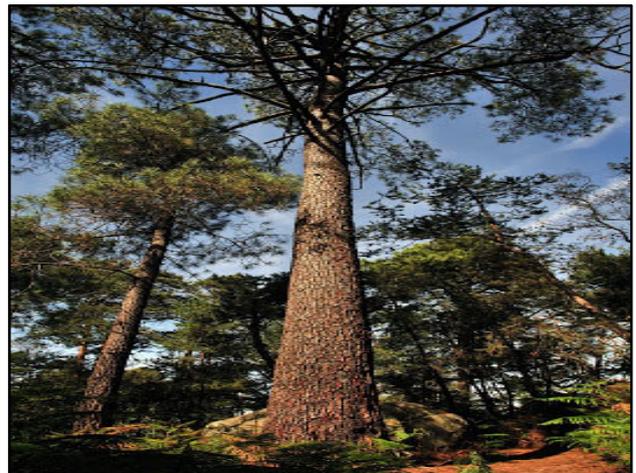
*Pinus halepensis* est une essence de lumière à tendance colonisatrice qui supporte le découvert dès le début de son cycle de croissance. Ses faibles exigences en eau et l'abondance de sa production de graines lui permettent de coloniser rapidement les stations les plus variées.

Cette essence se trouve à l'état spontané sur tout le pourtour du bassin méditerranéen. C'est une espèce xérophile, thermophile et héliophile ; la température moyenne annuelle varie dans son aire de répartition entre 13°C et 18,5°C, avec un optimum compris entre 13,5°C et

15,5°C (Kadik 1987) ; elle se développe dans les zones semi-arides à faible pluviométrie comprise entre 300 et 450 mm.



Feuille



Arbre sur pied

Figure 1.1.4:Feuille et arbre de pin d'Alep.

Bien qu'on rencontre le pin d'Alep sur tout le territoire algérien, il est surtout présent sous forme de quelques gros massifs bien individualisés et localisés principalement dans les régions suivantes (Leutrech 1982) :

- Régions est : forêts des Monts de Tébessa et des Aurès
- Région du centre : forêts de l'Ouarsenis
- Région ouest : forêts des Monts de Saida, de Mascara, de Sidi bel Abbés et de Telagh
- Atlas saharien : forêts des Monts de Ouled Nail, près de Djelfa et du djebel Amour près d'Aflou
- Barrage vert : cette barrière de végétation est constituée essentiellement de pin d'Alep.

**le barrage vert** : Pour sauvegarder les zones présahariennes menacées, les responsables forestiers algériens ont considéré que toute modification à grande échelle du sol et de la végétation entraîne une transformation du bioclimat dans la région affectée, d'où l'idée du « barrage vert ». Il devait occuper une superficie de 3 millions d'hectares.

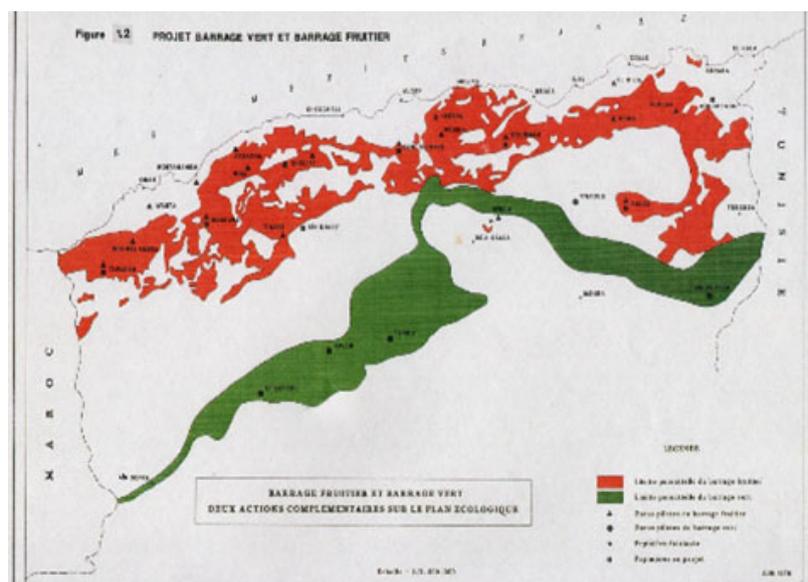


Figure 1.3.5:L'étendue de barrage vert en Algérie

***Chêne afarès et chêne zéen***

Le chêne afarès et chêne zéen sont les deux principales espèces montagneuses de la région de Kabylie en Algérie. Si l'on se réfère à l'histoire de ces deux chênes, les rares études paléobotaniques montrent qu'ils ont eu, dans le passé, au quaternaire et avant l'invasion romaine, une extension bien supérieure à celle qu'ils connaissent actuellement (Messaoudene 1989).

Les données statistiques les plus récentes montrent que la surface occupée par le chêne afarès et le chêne zéen est inférieure à 44 000 ha (43 922 ha selon les données disponibles), soit moins de 3 % de la surface forestière

En Algérie, ces deux espèces prospèrent à partir de 800 mm de pluie, souvent en mélange avec le chêne liège qu'ils envahissent dans certaines stations fraîches. Ces deux espèces se présentent sous forme de vastes futaies ; elles se régénèrent très facilement tant par rejet que par souche.

Ces deux espèces montagneuses typiques en Kabylie (Ait Ghobri, Akfadou, Babors, Tamesguida, Kefrida et Tassentout) colonisent les régions de l'est du pays, depuis la Kabylie jusqu'à la frontière tunisienne, dans la région de Jijel (forêt de Guerrouch), à Annaba (forêt de l'Edough), à l'extrême est (Djebel Ghora, El Kala et Souk Ahras).

Les futaies denses de chêne afarès et chêne zéen occupent quelques chaînons côtiers de l'Atlas tellien ; on les trouve aussi dans l'extrême ouest du pays.

Le chêne zéen est représenté par la sous-espèce *Q. tlemciensis* (Alkaraz 1989) sur les versants nord et sud.

De petits peuplements à l'état disséminé sont localisés dans les régions de Ténès, Teniet El Had, Cherchel, Chréa, dans le Djurdjura, l'Aurès et le Hodna (Kaouane 1987).

Le chêne zéen est une espèce monoïque à feuilles caduques à semi-persistantes, pouvant atteindre plus de 30m de hauteur et 2m de diamètre, avec un fût très élancé et un houppier étalé dans les peuplements clairs, et fastigié dans les formations très denses. Son écorce est profondément fissurée, de couleur brun foncé (Rabhi 2011).



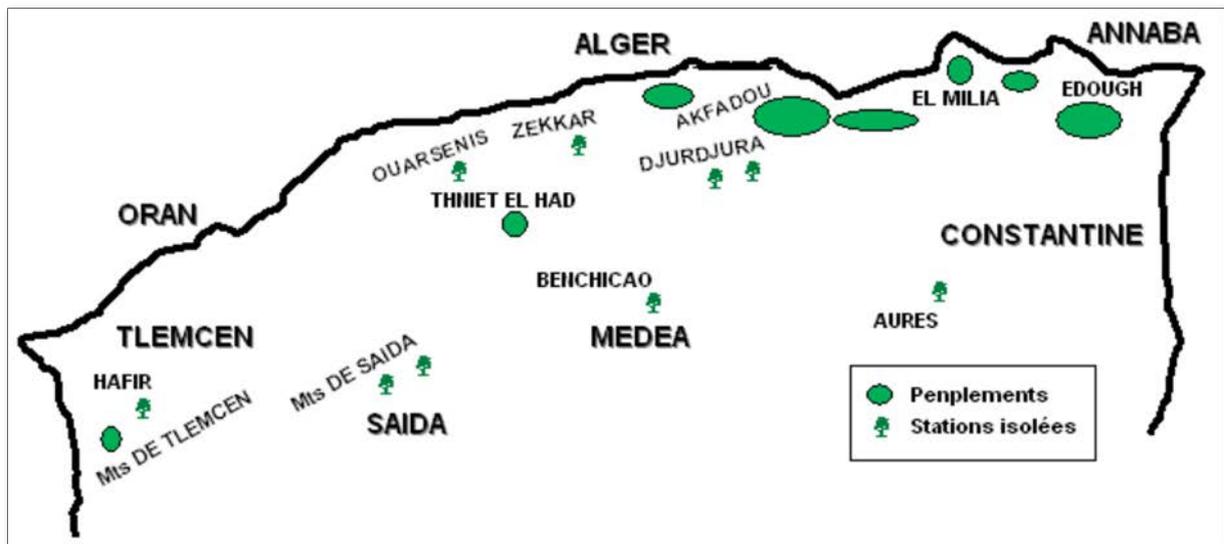
Feuille



Arbre (DERBAL W )

Figure 1.1.6: Chêne zéen

La figure suivante montre la répartition du Chêne zéen en Algérie



1.1.7: Répartition du chêne zéen en Algérie (Rabhi 2011)

Le chêne afarès, aussi appelé chêne de Kabylie, est une espèce endémique à feuilles caduques. En général, on le rencontre à une altitude comprise entre 900 et 1900 mètres.

A l'état jeune, son port est pyramidal ou fastigié. Il s'étale ensuite avec l'âge.

Son écorce est épaisse, très rugueuse, de couleur gris-brun.

Les jeunes rameaux sont couverts d'un tomentum dense et blanchâtre. Ils deviennent ensuite glabres et laissent apparaître des lenticelles saillantes.

Les bourgeons sont ovoïdes. Les bourgeons terminaux sont accompagnés de stipules allongées et persistantes.

Les feuilles sont alternes, tardivement caduques, simples, oblongues à ovales oblongues, longues de 6 à 12 cm et larges de 4 à 8 cm. Le bord est doté de larges dents triangulaires aiguës et terminées par un mucron. En général, les feuilles sont couvertes d'un tomentum

blanchâtre des deux côtés. Par la suite, la face supérieure devient glabre, vert foncé, luisante tout en gardant quelques poils épars.



Figure 1.1.8: Chêne afarès

### 1.3.2. Caractérisation anatomique et technologique du bois des trois essences étudiées

#### *Pin d'Alep*

Les principales caractéristiques anatomiques du bois de pin d'Alep sont les suivantes :

- absence de parenchyme vertical ;
- canaux verticaux disséminés dans le bois initial et le bois final, et canaux horizontaux plus petits contenus dans certains rayons ;
- parois des trachéides transversales minces, irrégulièrement épaissies et peu dentées.

Les propriétés de la fibre, en particulier l'indice feutrage (82 en moyenne) sont très favorables dans l'industrie de la papeterie, mais la forte teneur en résine du bois constitue un handicap pour ce type d'utilisation.

L'aubier du pin d'Alep est plus ou moins bien différencié, blanc-jaunâtre.

La couleur du duramen peut varier de fauve clair à brun ou brun rouge.

Les accroissements sont larges et irréguliers, mais bien apparents, avec une séparation nette entre le bois initial et le bois final.

Les nœuds sont souvent abondants.

Le bois de pin d'Alep est léger à mi-dur.

Sa densité à 12% d'humidité varie de 0,53 à 0,86 (0,70 en moyenne).

Le séchage du bois est réputé facile et rapide (bois peu nerveux), sans risques majeurs de fentes ni de déformations.

Le bois de pin d'Alep est généralement chargé de résine qui peut être distillée pour obtenir des essences dont les applications sont multiples (industrie des peintures et des vernis, industrie papetière, cosmétique, lubrifiants, etc)

En revanche, cette résine constitue un handicap pour la transformation en bois d'œuvre du pin d'Alep ; elle rend le bois « gras » et lui confère une dureté et une masse volumique très élevées qui compliquent sa mise en œuvre : assemblages difficiles (problèmes de collage, avant-trous nécessaires pour le clouage ou le vissage), encrassement des lames de scie et des outils d'usinage.

### *Chêne zéen*

Le bois de chêne zéen présente de gros rayons ligneux multi-sériés et de petits rayons unisériés, qui forment une maillure caractéristique lorsqu'il est débité en quartiers.

La zone de bois initial se caractérise par de gros vaisseaux alignés en bandes tangentielles et isolés les uns des autres. En revanche, le bois final est formé de vaisseaux nettement plus petits et de taille variable. Les fibres sont très nombreuses dans le bois final, irrégulièrement réparties et à trajet rectiligne-oblique.

Les travaux de recherche sur la qualité du bois de chêne zéen donnent des résultats variables, parfois contradictoires. Beaucoup de forestiers considèrent que le bois de chêne zéen est de qualité médiocre et lui accorde très peu d'intérêt (Messaoudene et *al.* 2009).

Les essais de caractérisation conduits par le Centre Technique Forestier Tropical ont été parmi les premiers qui ont permis de qualifier cette essence et d'en définir les qualités technologiques.

Le bois de chêne zéen est de couleur claire, de droit fil, à grain assez fin et de durabilité naturelle moyenne.

Le bois est dur à très dur (dureté Monnin moyenne : 9) et très dense (densité moyenne à 12% d'humidité : 1,00).

Il est peu abrasif et son usinage est relativement facile en utilisant des machines suffisamment puissantes et des outils résistants.

En revanche, son séchage est difficile ; les risques de fentes sont importants notamment pour les débits de forte largeur et plus généralement à fort élancement.

Son séchage naturel est plus facile à conduire que le séchage artificiel qui doit être mené très prudemment.

Messaoudene (2009) confirme que le bois du chêne zéen se caractérise par des retraits de séchage très élevés.

Ces retraits sont en moyenne de 17,2% dans le sens tangentiel et de 7,2% dans le sens radial entre l'état saturé et l'état anhydre.

Ces forts retraits et la grande différence entre le retrait tangentiel et le retrait radial expliquent en partie les difficultés de séchage (ratio T/R très supérieur à 2). Les valeurs très élevées de ces caractéristiques montrent également qu'un séchage complet avant mise en œuvre est indispensable (CTFT 1970).

### *Chêne afarès*

Les propriétés physiques et mécaniques du bois de chêne afarès sont proches de celles du chêne zéen.

Le bois de chêne Afares est homogène sans zone poreuse bien marquée, de droit fil. Son grain est cependant moins fin que celui du bois de chêne zéen et le duramen est d'une couleur plus foncée.

Son aubier est semblable à celui du chêne zéen, assez épais (3 à 8 cm), de couleur claire, souvent piqué ou altéré.

Son bois est dur (dureté moyenne 8) et lourd (densité moyenne égale à 0,9), donc légèrement inférieur au bois de chêne zéen pour ces deux caractéristiques.

Les retraits de séchage sont très élevés, mais dans de moindres proportions, que ceux du chêne zéen. Ils sont aussi très variables. Le retrait total, de l'état saturé à l'état anhydre, est en moyenne de 13,2 % dans le sens tangentiel et de 4,8% dans le sens radial. Le ratio T/R est très élevé ce qui explique la nervosité du bois. Le retrait longitudinal reste peu élevé : 0,15% selon Dautrebande (1989) mais associé à un retrait tangentiel de 9,6%, un retrait radial de 5,2%, et un retrait volumétrique total de 18,4%.

Le bois de chêne zéen est utilisé en menuiserie courante et en aménagement intérieur, pour la fabrication d'emballages lourds, mais sa principale utilisation demeure le bois de chauffage.

## 1.4. Situation de la filière bois en Algérie

### 1.4.1. Situation générale

La possibilité annuelle globale, toutes catégories de bois confondues, s'élève à environ 1 200 000 m<sup>3</sup> (PNDF 1984). L'accroissement moyen annuel s'élèverait donc 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 représentent plus de 80% de la possibilité totale annuelle. Le reste est fourni par les eucalyptus, le chêne zéen et le chêne afarès.

La superficie des forêts ayant fait l'objet d'études d'aménagement s'élevant à près d'un million d'hectares toutes essences confondues, ces forêts représentent une possibilité annuelle d'environ 460 000 m<sup>3</sup>.

La production de bois a suivi un rythme très irrégulier depuis l'indépendance. Faible de 1963 à 1990, elle a connu une augmentation sensible à partir de 1991 atteignant 240 000 m<sup>3</sup> en 1993. 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.

Ces dernières années, ils ont enregistré un accroissement sensible des besoins nationaux en bois et, parallèlement, une régression des importations, ce qui a engendré des tensions sur le marché.

Cette situation a contraint les pouvoirs publics à encourager l'exploitation des ressources locales. Le secteur des forêts doit améliorer son niveau de participation au développement de l'économie nationale. Ainsi, un objectif de mobilisation annuelle de 500 000 m<sup>3</sup> de bois a été fixé pour les années à venir, à comparer à la possibilité globale de plus d'un million de m<sup>3</sup>/an.

### 1.4.2. La production de bois provient de forêts aménagées et non aménagées

#### *Production des forêts aménagées*

Les résineux (pin d'Alep) sont plus abondants dans les forêts aménagées que les feuillus (chêne zéen, chêne afarès). Pour le pin d'Alep, il s'agit notamment des massifs de Telagh, Djelfa (Senalba Chergui et Gherbi) et de Khenchela (Béni-Imloul). Ces forêts sont exploitées depuis le début des années 80.

En ce qui concerne les chênes zéen et afarès, les principales forêts (Guerrouch et Akfadou) sont en cours d'exploitation bien que ces essences de chêne trouvent difficilement des débouchés.

#### *Production des forêts non aménagées*

La production de bois des forêts naturelles provient des essences suivantes par ordre décroissant : pin d'Alep, chêne zéen, 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. Environ 30% de la production de chênes, de cèdre et de pin maritime est destinée à un usage en bois d'œuvre.

#### *Débouchés des produits forestiers locaux*

**Le bois de pin d'Alep**, le plus répandu, est de qualité très variable, souvent moyenne à faible. Ses principaux débouchés correspondent principalement à des emplois de faible à moyenne valeur ajoutée, essentiellement la menuiserie, la charpente et le coffrage. Les bois d'eucalyptus, qui sont exploités généralement en courte rotation (en moyenne 10 ans), sont essentiellement destinés à la trituration. Le bois de chêne zéen est essentiellement utilisé pour la fabrication de traverses de chemin de fer compte tenu de sa densité et sa dureté très élevées. Le bois de pin maritime, de meilleure qualité, est surtout utilisé en menuiserie. Le bois de cèdre est le plus souvent associés à des emplois haut de gamme, notamment en aménagement intérieur et en ébénisterie.

**Le liège est** le plus valorisé des produits forestiers ; il constitue une ressource stratégique du fait de ses multiples usages (bouchonnerie, parquet, isolation thermique). Les potentialités nationales sont estimées à plus de 200 000 qx/an. Avec une production relativement faible ces dernières années (100 000 à 150 000 qx/an), l'Algérie occupe le troisième rang mondial des producteurs de liège (7% de la production mondiale), 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 pourrait connaître une sensible augmentation à court terme.

Le tableau suivant présente la production de bois, de liège et d'alfa en Algérie pour l'année 2007 (FAOSTAT)

Tableau 1.1.8 : La production algérienne en bois, liège et alfa

Désignation	Production (année 2007)
Bois	154 471 m <sup>3</sup>
Liège	82 973 quintaux
Alfa	1 073 tonnes

Source : FAOSTAT 2007(site internet).

#### 1.4.2. Revenus générés par la forêt algérienne

La forêt algérienne génère pour le pays des revenus conséquents principalement liés à la commercialisation du bois, du liège, et de l'alfa, ainsi que de diverses amodiations (vides labourables, tranchées-pare-feu cultivées, etc...).

**Les revenus tirés de la forêt au titre de l'année 1999 sont détaillés ci-dessous :**

Tableau 1.1.9 : Revenus tirés de la forêt en 1999

Exploitations	Revenus	En %
Exploitation de bois	73 931 872 DA	11,5 %
Récolte de liège	431 783 147 DA	67,3 %
Récolte d'alfa	6 549 000 DA	1,0 %
Exploitation de produits divers	19 800 278 DA	3,1 %
Amodiations	93 009 507 DA	14,5 %
Contraventions	16 886 055 DA	2,6 %
<b>Total</b>	<b>641 959 860 DA</b>	

Source : FAO (1999)

#### 1.5. Facteurs influençant l'évolution de la forêt algérienne et menaçant son développement

La forêt algérienne souffre aujourd'hui de plusieurs handicaps majeurs, dont un des principaux est le taux élevé d'incendies dont la prévention reste difficile par manque d'analyses des causes et des effets réels. Le surpâturage constitue aussi une menace permanente pour le couvert forestier.

La dégradation des zones forestières nationales atteindrait un rythme de 45 000 à 50 000 hectares par an, toutes formes de dégradation confondues, mais à 90 % causée par les incendies de forêts (DGF 1997). D'autres facteurs de dégradation sont liés à la pauvreté du monde rural qui est à l'origine du surpâturage, des coupes de bois illicites à des fins

domestiques, et de l'extension des terrains cultivés à la lisière des forêts. L'absence d'une gestion moderne sur le terrain contribue aussi à l'état actuel de dégradation des forêts qui porte atteinte au maintien et à la durabilité du patrimoine forestier national (Mate 2003).

### 1.5.1. Contraintes socioéconomiques

Dans son travail, Ferka (2006) analyse et distingue trois faits socioéconomiques à l'origine de la dégradation du couvert forestier :

- Le faible développement des activités non agricoles, particulièrement industrielles.
- La croissance encore forte de la population rurale.
- L'exiguïté des terres agricoles disponibles

La combinaison de ces trois faits socioéconomiques est à l'origine d'une pression des populations rurales sans ressources ou à ressources très limitées sur les forêts, et surtout sur les terres dites " à vocation forestière ".

### 1.5.2. Les incendies

L'analyse temporelle des feux durant les années passées a montré que sur la période 1985-2010, 42 555 feux au total ont parcouru une superficie forestière de 910 640 ha, ce qui correspond à une moyenne annuelle de 1 637 feux et 35 025 ha de surface brûlée.

Le nombre des incendies varie suivant les années, entre un minimum de 595 feux en 1989 et un maximum de 3 439 feux en 2010 (Meddour-Sahar 2012, DGF 2007).

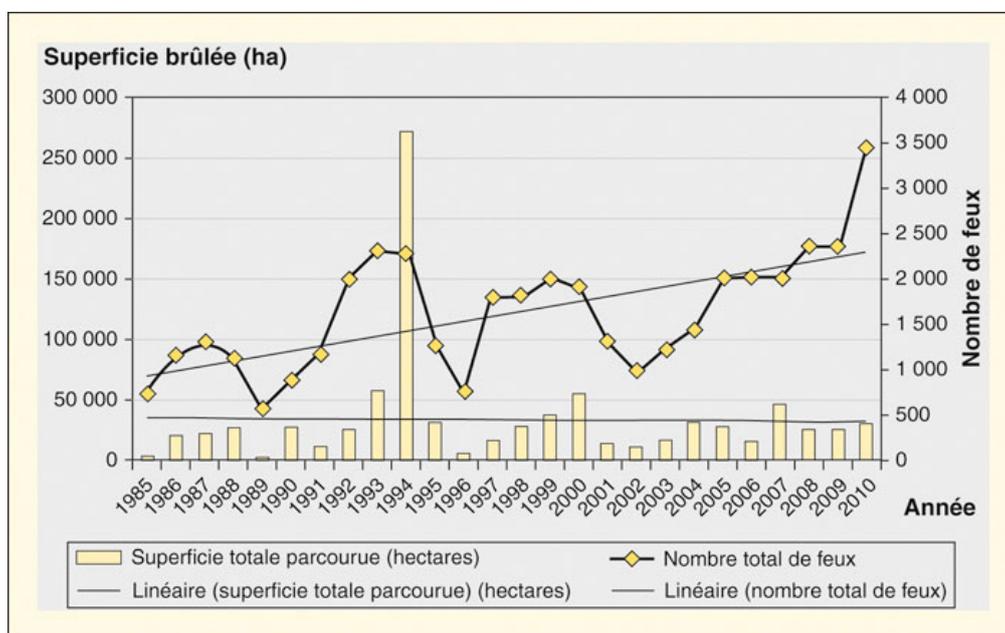


Figure 1.1.9 : Evolution annuelle du nombre de feux et des superficies parcourues par le feu en Algérie sur la période 1985-2010 (Meddour-Sahar 2012)

### 1.5.3. Le surpâturage

Le surpâturage est associé à un broutage excessif de la végétation et des jeunes plants forestiers qui bloque toute régénération, épuise les ressources disponibles, dégrade les parcours et les soumet à l'érosion.

Dans les zones arides et semi-arides d'Afrique du Nord, le surpâturage est généralement considéré comme une cause essentielle de la dégradation des écosystèmes naturels (Le Houerou 1968; Montero et Canellas 1998; Benabdeli 1996; Ghazi et Lahouati 1997)

## 1.6. La stratégie actuelle pour le développement forestier en Algérie

Afin de développer la forêt algérienne et de trouver des solutions permettant une meilleure contribution du secteur forestier au développement du pays, de nombreux travaux, études, programmes et projets de recherche ont été menés à bien. Des moyens humains et financiers très importants ont été mis à disposition pour atteindre cet objectif.

Les grands projets de l'administration forestière qui s'inscrivent dans le cadre de la stratégie de l'Etat pour atteindre ses objectifs sont les suivants (Ferka 2006) :

### *Le cadastre forestier national*

L'opération cadastrale a été mise en œuvre en l'an 2000 ; elle consiste à délimiter, border, cartographier et planimétrer la propriété forestière et alfatière.

### *L'inventaire forestier national*

L'inventaire forestier national initié en 2000 est organisé et structuré autour des deux actions suivantes :

- Mise en place d'un système d'information géographique (SIG) permettant le stockage et la mise à jour des données collectées ;
- Etablissement d'un plan national de développement forestier et alfatier.

### *Le plan national de reboisement*

Il est utile de rappeler que le taux de boisement actuel est de 16% pour le nord de l'Algérie, alors que la norme généralement admise se situe entre 20 et 25%.

Tous les reboisements qui ont été effectués depuis 30 ans ont pratiquement échoué. Ils se sont révélés non rentables financièrement et ne peuvent aujourd'hui être qualifiés de reboisement de protection ni de production (Letreuch 2001).

Considérée comme une nécessité impérieuse par le plan national de développement, la politique de reboisement a souvent été considérée comme une utopie, les reboisements ne s'improvisant pas et nécessitant des moyens de mise en place et de suivi dans le temps (Greco 1966).

A cet effet, l'Etat a engagé en 2003 un plan de reboisement s'étalant sur 10 ans (2003-2013) consistant en la plantation de 3 millions d'hectares supplémentaires( Zerrouk 2006).

L'extension et la préservation du barrage vert sont parmi les principaux objectifs de la stratégie de l'Etat.

***L'aménagement des périmètres de bassins versants***

Les territoires menacés par les effets néfastes du ruissellement et de la torrencialité couvrent 12 millions d'hectares dont la moitié sur les versants les plus sensibles à l'érosion. Des études ont été menées afin de déterminer les moyens à mettre en œuvre pour protéger et restaurer les douze millions d'hectares de terres menacées par l'érosion (Ferka 2006, DGF 2007).

***Le développement des zones de montagne***

Le développement de l'agriculture de montagne s'intègre parfaitement dans le développement rural (des activités agro-pastorales orientées essentiellement sur l'arboriculture rustique – olivier, figuier, etc (Ferka 2006).

***Le renforcement du cadre institutionnel forestier et juridique***

- L'amélioration des capacités d'intervention de l'administration forestière par le renforcement de sa base scientifique et technologique et la mise en place d'un système d'information et de statistique efficace ;
- L'amélioration de la législation forestière par l'étude, la révision, l'amendement et l'adaptation de la loi régissant le secteur des forêts et le renforcement des activités de recherche forestière (DGF 2007).

Grâce à des ratifications, l'administration forestière a pu s'engager dans sa stratégie de développement forestier à travers le Plan National de Reboisement (PNR), la création d'aires protégées, et le Programme d'action national (PAN) de lutte contre la désertification. De plus, dans le cadre de la mise en œuvre de la convention sur la diversité biologique, l'Algérie (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement) a élaboré une Stratégie Nationale et un Plan d'action définissant les mesures générales pour la conservation *in situ* et l'utilisation durable de la biodiversité sur son territoire. Toutes ces actions traduisent la volonté de l'Etat de protéger ses ressources et de respecter ses engagements envers la communauté internationale (Document DGF 2007 ; Ferka 2006).

## Conclusion

La forêt méditerranéenne en général et la forêt algérienne en particulier sont aujourd'hui menacées notamment par les effets du changement climatique, l'augmentation des feux de forêt, la sécheresse, le surpâturage, et de la pression démographique.

La forêt algérienne se situe davantage dans un rôle de protection que de production alors que les besoins en bois du pays vont en augmentant.

Cependant, durant la dernière décennie, des actions ont été conduites à l'échelle nationale et internationale pour tenter de freiner le phénomène de dégradation forestière au niveau national.

En Algérie, une stratégie forestière a été mise en place. Ses objectifs sont de définir une démarche et des actions prioritaires à mettre en œuvre pour le développement futur du secteur des forêts et de la nappe alfatière (objectif 2030), en prenant en compte notamment des évolutions futures des facteurs de risque tant internes qu'externes.

Partie 1 : Etude bibliographique

Chapitre 2 : Le bois : caractéristiques et  
fonctionnalités

## Introduction

Le bois présente de nombreuses qualités qui en font un matériau de construction par excellence. La grande variabilité de ses caractéristiques lui permet de s'adapter à une large gamme de domaines d'applications, depuis la construction et tous les emplois en structure, jusqu'à l'emballage, l'isolation, l'ameublement, les produits à haute valeur ajoutée tels que l'ébénisterie, la tableterie, le tournage, la sculpture, et la lutherie. L'utilisation de ce matériau présente d'énormes avantages en termes esthétiques, techniques, économiques et écologiques.

La connaissance des propriétés anatomiques, physiques et mécaniques du matériau bois est indispensable pour optimiser ses applications finales et le choix des essences correspondantes. Le bois est un matériau d'origine biologique, et ses propriétés sont de ce fait très variables d'une espèce à une autre, au sein d'un même genre ou d'une même famille botanique, mais également entre individus d'une même espèce, entre peuplements ou au sein d'un même peuplement.

La provenance et les conditions de croissance de l'arbre influent aussi sur les propriétés physiques et mécaniques de son bois.

Dans un même individu, ces propriétés sont aussi très variables, la grume constituant un volume de matière hétérogène dont les propriétés évoluent :

- Radialement, du cœur vers la périphérie, à cause d'un triple phénomène : (i) évolution progressive du bois juvénile au bois adulte (ii) de vieillissement du bois (duraminisation avec transformation de l'aubier en duramen) ; (iii) de variations radiales plus rapides à l'intérieur d'un même cerne, particulièrement marquées chez les bois de plantation.
- Suivant la circonférence, en relation avec la présence d'un bois aux propriétés particulières, le bois de réaction (bois de tension chez les feuillus, bois de compression chez les résineux).
- Suivant la hauteur, de la base de l'arbre jusqu'au houppier (variations les moins marquées à l'intérieur de l'arbre).

La microstructure fibreuse, orientée selon l'axe longitudinal de l'arbre (sens du fil), et le mode de croissance de l'arbre par couches externes successives (les cernes) confèrent au bois une anisotropie caractéristique.

Du fait de cette anisotropie, les propriétés physiques et mécaniques varient suivant :

- La direction axiale (aussi appelée longitudinale), parallèlement au fil du bois, c'est-à-dire suivant l'axe de croissance de l'arbre.
- La direction radiale, suivant le rayon (de la moelle à l'écorce).
- La direction tangentielle, perpendiculairement aux directions radiale et axiale.

## 2.1. Généralités sur le matériau bois

### 2.1.1. Anatomie et structure

#### Anatomie- structure – les différentes échelles

##### Niveau microscopique

La performance du matériau en termes de rapport entre la résistance mécanique et la densité est due à la composition microstructurale du bois. Les cellules du bois se composent de plusieurs couches et ont une structure lamellée.

L'organisation cellulaire est unique pour chaque essence de bois. Celle des résineux reste relativement homogène alors que celle des feuillus est plus variable entre espèces. On distingue trois grandes catégories de bois en fonction de leur structure : les bois à zone initiale poreuse, bois à pores diffus ou bien bois à pores semi-diffus. Le chêne afarès et le chêne zéen sont des bois à zone initiale poreuse (figure 1.2.4 et 1.2.5). (Coté 1994).

Plusieurs autres paramètres ou facteurs comme la présence de nœuds, les fissures transversales ou longitudinales (produites par le séchage), les variations de pente du fil, sont à l'origine de la très grande variabilité de la qualité et de la résistance du bois. Un bois considéré comme « idéal » aurait des fibres parfaitement droites, n'aurait aucun nœud ni fissure interne et aurait une structure anatomique homogène. (Nguyen 2010).

### 2.1.2. Les principales caractéristiques du comportement physique du matériau bois

- **Matériau hygroscopique**

Le bois est un matériau hygroscopique c'est-à-dire qu'il adsorbe et désorbe de l'eau en fonction de l'humidité relative et de la température de l'air qui l'entoure. Ce facteur influence ses dimensions et ses propriétés mécaniques. Le bois tend à se stabiliser à un taux d'humidité d'équilibre (Héq) en fonction des conditions ambiantes.

La teneur en eau ou teneur en humidité du bois (H%) est le rapport entre la masse d'eau qu'il contient sur sa masse anhydre. H s'exprime en pourcent et peut avoir une valeur supérieure à 100% notamment pour les bois très légers et très poreux comme le peuplier.

- **Matériau anisotrope**

Les propriétés du bois varient selon la direction considérée ce qui fait du bois un matériau anisotrope. Il présente alors trois directions principales (longitudinale, radiale et tangentielle) et trois plans ligneux bien définis : le plan transversal (radial-tangentiel) qui est perpendiculaire à l'axe de la tige ; le plan radial (radial-longitudinal) qui est perpendiculaire aux cernes de croissance et le plan tangentiel (tangentiel-longitudinal) qui est parallèle aux cernes de croissance de la tige.

- **Matériau poreux**

Le « réseau cellulaire » qui est formé par les parois, les lumens et les ponctuations des différents éléments cellulaires fait du bois un matériau poreux. On peut citer quelques aspects quantitatifs qui caractérisent les matériaux poreux comme l'espace poreux et la distribution des tailles des pores (Almeida 2006).

- **Structure cellulaire**

Les essences du bois peuvent être classées en deux principales catégories: les résineux (ou conifères) et les feuillus. La différenciation se fait sur le système de reproduction, mais aussi sur leur microstructure (Navi 2005).

Chez un feuillu, le bois est constitué de vaisseaux, de parenchyme, de fibres, et de rayons ligneux. Chaque tissu a un rôle bien précis.

Les vaisseaux conduisent la sève brute. Les fibres servent au soutien de l'arbre et assurent sa stabilité et sa résistance mécanique.

Le bois des feuillus contient également du parenchyme et des rayons ligneux pour stocker les réserves. Les rayons ligneux sont généralement composés de plusieurs files de cellules. Ils permettent également la conduction radiale, du centre vers la périphérie de l'arbre.

Chez un résineux, le transport de la sève brute et le soutien de l'arbre sont assurés par un seul type d'éléments : les trachéides. Ces trachéides constituent en moyenne 90% du matériau. Le bois des résineux contient des rayons ligneux qui sont unisériés (composés d'une seule ligne de cellules). De nombreuses espèces résineuses présentent des canaux résinifères, dans les sens axial et radial.

Les figures 1.2.1 et 1.2.2 montrent les directions principales du bois et la structure tridimensionnelle générale des feuillus et des résineux .

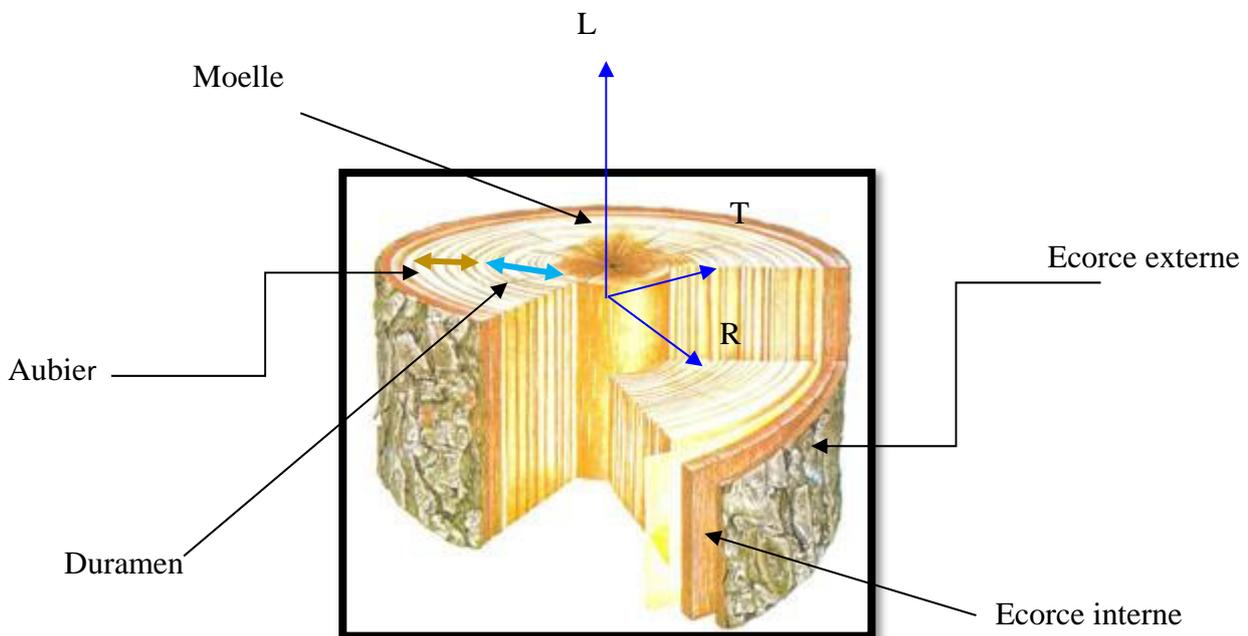


Figure 1.2.1: Les directions du bois et ses principaux constituants à l'intérieur de la tige  
(coupe transversale d'un tronc d'arbre)

### Description macroscopique

En vue macroscopique, nous observons sur la Figure 1.2.2 une partie périphérique appelée aubier formée par le cambium côté interne de la tige, et qui correspond au bois physiologiquement actif (Keller 1994). La sève brute circule dans l'aubier, de façon ascendante.

Le cambium correspond à la zone où sont fabriquées les couches de tissus cellulaires, entre l'aubier et l'écorce.

Côté externe, le cambium fabrique du liber qui est une zone de tissu qui conduit la sève élaborée, à proximité de l'écorce.

En vieillissant, les cellules initialement vivantes dans l'aubier cessent de fonctionner et constitue la partie inerte du bois dans la partie centrale de l'arbre appelée duramen ou bois de cœur (Coté 1994). Chez toutes les espèces, le duramen présente une meilleure résistance à la pourriture et à l'attaque d'insectes xylophages que l'aubier qui est toujours très peu durable. Cette caractéristique est due à la présence de molécules biologiquement actives synthétisées lors de la duraminisation, ainsi qu'à la disparition de substances de réserve consommées par les agents de dégradation biologique (Amusant 2004 ; Wong *et al.* 2005).

Le cambium est constitué de deux types de cellules initiales (voir structure microscopique), allongées longitudinalement ou non et appelées respectivement *initiales fusiformes* et *initiales de rayon*. L'architecture du bois en dépend, car il est formé :

- d'un système axial de tissu orienté longitudinalement et dérivé des cellules initiales fusiformes qui donneront les trachéides, les vaisseaux et les fibres
- d'un système radial de tissus orientés transversalement qui comprend les rayons ligneux et qui dérivent des cellules initiales de rayon.

Les alternances de zones claires et sombres correspondent aux cernes annuels. Un cerne représente la production de cellules de bois au cours d'une année. En comptant le nombre de cernes, il est possible de connaître l'âge des bois.

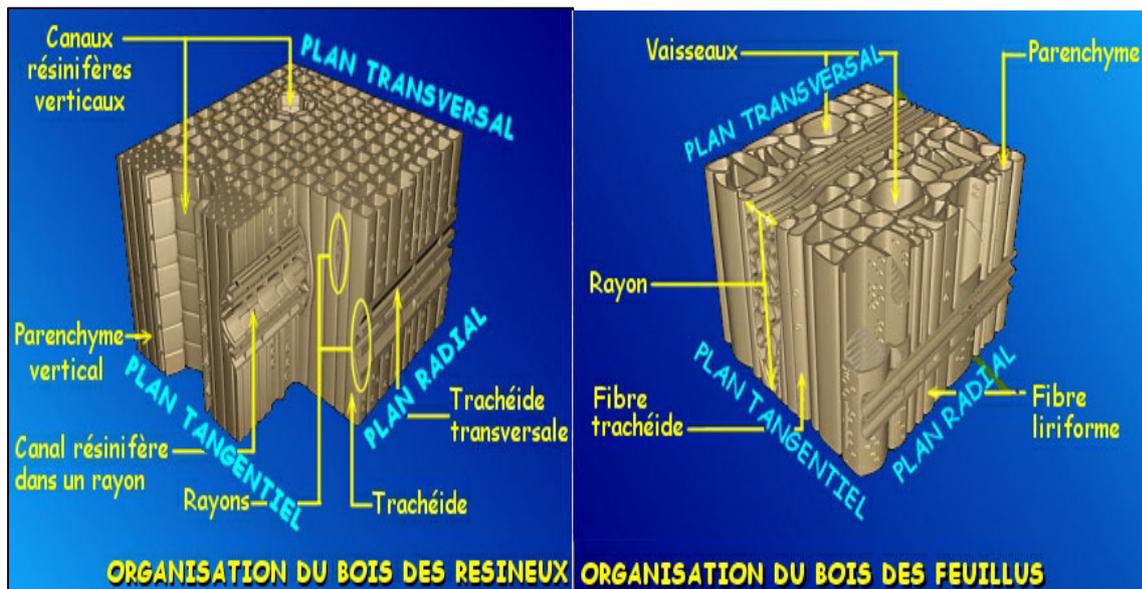


Figure 1.2.2: La structure microscopique du bois d'un résineux et d'un feuillus

Dans les zones tempérées avec alternance de saisons, la croissance dans la direction radiale s'effectue en deux étapes au cours d'une année. Ce mécanisme implique le changement progressif de morphologie des sections des cellules qui conduit à la distinction des cernes de croissance d'une année à l'autre.

Ainsi, on remarque une diminution de la dimension de la cellule lorsqu'on passe du bois initial au bois final, accompagnée d'une augmentation de l'épaisseur des membranes. Cette évolution correspond à une adaptation à la conduction en début de saison de végétation et au soutien à la fin. Le développement cellulaire s'interrompt pendant la saison hivernale. Par conséquent, à l'interface de ces différentes zones et en particulier entre les cernes, des fissures peuvent s'amorcer (Dinkel 1997).

Les figures suivantes montrent la structure microscopique des trois bois étudiés suivant le plan transversal, radial et tangentiel.

Ces photos ont été réalisées par M. Jean-Claude Cerre, spécialiste en macrophotographie du bois, à partir d'échantillons que nous lui avons fournis.



Coupe dans le plan transversal (x40)

Figure 1.2.3: Vue microscopique de bois de pin d'Alep dans le plan transversale (x 40) – Macrophotographie Jean-Claude Cerre

Les coupes de bois en vue microscopique montrent clairement la structure et la composition cellulaire du bois de pin d'Alep. En coupe transversale, on observe des trachéides de gros diamètre et à parois plus fines, des rayons qui traversent la coupe, et des canaux résinifères.

En coupe tangentielle, on distingue clairement les trachéides en éléments verticaux et les rayons qui traversent les différents cernes radialement.

La coupe a été réalisée sur du bois de printemps qui présente des trachéides de grand diamètre qui assurent la conduction ; par contre, le bois d'été présente des trachéides de plus faible diamètre qui assurent essentiellement le soutien.

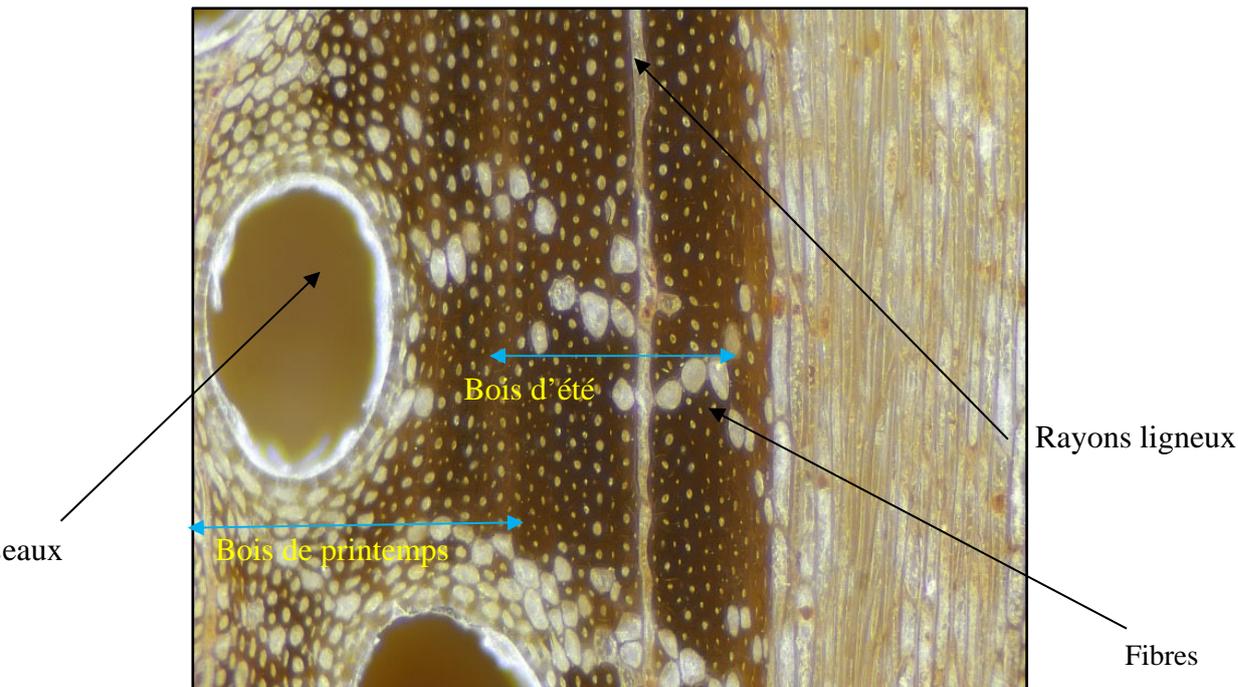


Figure 1.2.4: Vue microscopique de bois de chêne afarès dans le plan transversale (x 40) – Photo Jean-Claude Cerre.

L'étude et l'analyse microscopique du bois suivant ces différentes orientations permettent d'expliquer les observations macroscopiques et d'identifier les éléments constitutifs de chaque bois.

Les photos du chêne afarès et du chêne zéen montrent des structures voisines pour les deux essences avec quelques différences mineures.

En coupe transversale du chêne afares, on observe une partie plus dense qui est un bois d'été dans lequel on distingue quelques petits vaisseaux et une autre partie moins dense qui est le bois de printemps dans lequel apparaissent de nombreux vaisseaux de très fort diamètre. D'autres, de faible diamètre, les fibres, entourent les vaisseaux. Ils ont principalement un rôle de soutien.

Des rayons fins ou épais s'intercalent dans les cernes.

On observe la même structure pour le bois de chêne zéen en coupe transversale avec un nombre important de rayons disposés régulièrement et des fibres très nombreuses.

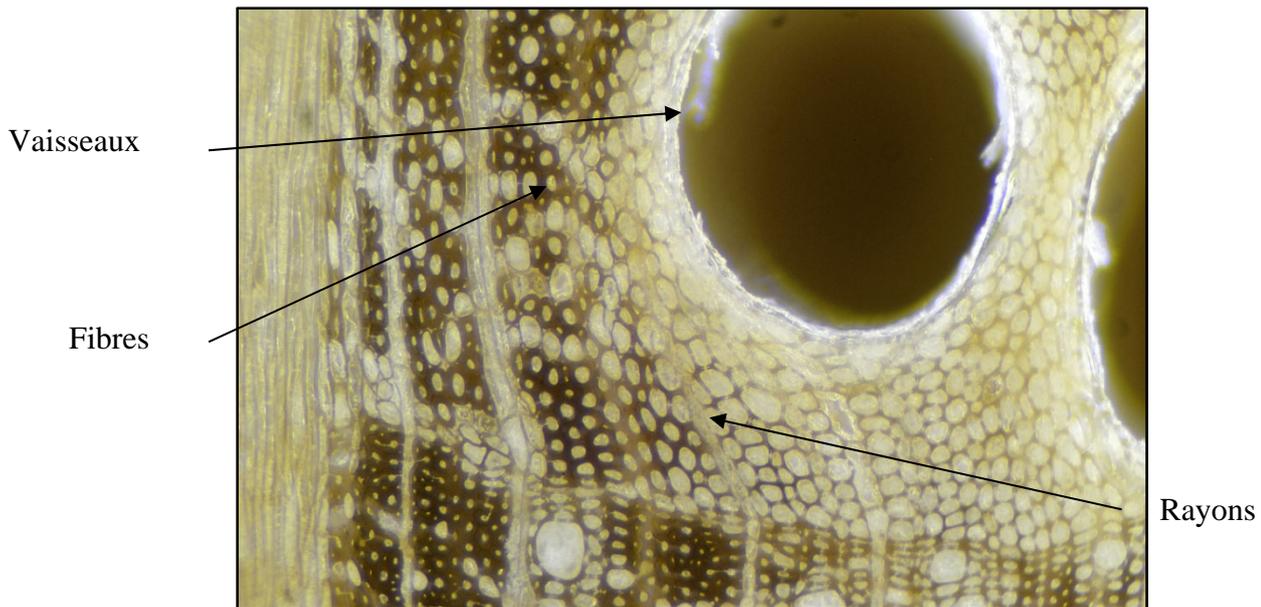


Figure 1.2.5: Vue microscopique de bois de chêne zéen dans le plan transversal (x 40) –  
Photo Jean-Claude Cerre

## 2.2. Propriétés physiques

### 2.2.1. Relation entre la structure anatomique du bois et ses propriétés physiques

Les recherches et les études réalisées sur le matériau bois ont montré que ses caractéristiques anatomiques sont liées à ses propriétés physiques telles que le retrait et le gonflement, la perméabilité, le point de saturation des fibres (PSF), et les caractéristiques mécaniques. Les effets de la structure anatomique du bois sur ses propriétés physiques sont étroitement liés à la porosité du bois.

La relation entre la structure anatomique et l'amplitude du retrait du bois a été étudiée par Trenard et Guéneau (1977) qui ont montré que la morphologie cellulaire à l'échelle microscopique (notamment les dimensions des lumens et l'épaisseur des parois) explique mieux le retrait que les grandeurs macroscopiques telles que la largeur des cernes.

Leclercq (1981) a constaté sur le hêtre que le retrait volumique total augmente avec la proportion de fibres à faible lumen (rayon entre 2,5 et 3,7  $\mu\text{m}$ ), et avec la longueur et le diamètre des fibres les plus étroites. Ce retrait diminue avec l'accroissement du diamètre des fibres à lumen plus large (rayon entre 3,7 et 7,5  $\mu\text{m}$ ). Selon ce même auteur, la liaison retrait-épaisseur des parois explique aussi la liaison observée entre la masse volumique et le retrait. Keller et Thiercelin (1975) ont constaté que les gros rayons du bois de hêtre sont négativement liés aux retraits radial et tangentiel.

Arévalo (2002) a étudié l'effet de la structure du bois et des substances extractibles sur le gonflement du bois d'acajou. Il a remarqué que les paramètres anatomiques qui affectent le gonflement radial et tangentiel du bois de cette espèce sont la forme des rayons et des vaisseaux. Néanmoins, leur effet sur le gonflement du bois est moindre comparé à celui des substances extractibles.

Plusieurs travaux ont aussi montré la relation entre le retrait et la masse volumique des bois présentant une faible quantité d'extractibles (Stamm 1964; Skaar 1988; Noack et al. 1973). Toutefois, la présence de substances extractibles dans les parois cellulaires augmente la stabilité dimensionnelle du bois ce qui limite le retrait (Hernández 1989 ; Choong et Achmadi 1991; Mantanis et al. 1995 ; Arévalo 2002 ; Brémaud 2006).

En relation avec le caractère anisotrope du bois, le rapport moyen du changement dimensionnel pour toutes les espèces est d'environ 1/20/40 (L/R/T). Selon (Skaar 1988), il y a quatre théories pour expliquer l'anisotropie transversale:

- La théorie des restrictions radiales, où les tissus radiaux limitent le mouvement radial d'autres cellules. Cette théorie est la plus ancienne ;
- La théorie de l'interaction bois initial / bois final où le bois final a un retrait tangentiel plus élevé que le bois initial ;
- Les différences de retrait et de gonflement suivant les directions tangentielles et radiales sont causées par les différentes propriétés dimensionnelles des couches qui forment la paroi cellulaire;
- Les différents angles d'orientation des microfibrilles de la couche S2 : cet angle serait plus élevé dans les parois radiales que les parois tangentielles ce qui génère une plus grande expansion des parois radiales suivant la direction tangentielle.

Selon Skaar (1988), plusieurs mécanismes peuvent être à l'origine de l'anisotropie transversale du retrait/gonflement du bois, ces mécanismes variant suivant les espèces.

Concernant l'anisotropie du bois en relation avec sa perméabilité, la structure anatomique du bois des feuillus suivant la direction longitudinale fait que le mouvement de liquides suivant cette direction peut être, en ordre de grandeur, de 10 000 à 100 000 fois supérieur au mouvement suivant les directions radiale et tangentielle (Siau 1995). Ce rapport serait moins élevé pour les résineux.

L'influence de la structure du bois sur les relations eau-bois a fait l'objet de nombreux travaux. La plupart de ces études ont porté sur la perméabilité du bois et sur les mouvements de l'eau à travers ce matériau (Stamm 1967; Behr et al. 1969; Tesoro *et al.* 1974; Thomas 1976; Gonzalez et Siau 1978; Murmanis et Chudnoff 1979; Choong et Tesoro 1989; Choong *et al.* 2001). Ces travaux ont montré l'importance du rôle des vaisseaux dans la perméabilité longitudinale. Tesoro *et al.* (1974) ont comparé la perméabilité de plusieurs espèces résineuses et feuillues et ont constaté que la plus faible perméabilité des résineux est probablement liée au plus faible rayon des pores, à la disposition différenciée des capillaires des résineux et à la présence de torus (*épaississement lenticulaire de la paroi interne des ponctuations*). Dans le cas des feuillus, les auteurs ont constaté que pour les espèces à zone poreuse et semi-poreuse, environ 20% des espaces effectifs des pores du bois d'aubier sont responsables d'environ 80% du mouvement des gaz, contre 30% des espaces pour les espèces à pores diffus.

La présence de trois zones de perméabilité agissant en parallèle a été mise en évidence par (Gonzalez et Siau 1978) sur du bois de hêtre et d'eucalyptus. Ces zones sont formées par différents types de cellules, les plus perméables étant les vaisseaux, suivis par le parenchyme axial et les fibres ; une troisième zone imperméable correspondrait aux rayons. Ces résultats sont confirmés à ceux de Behr *et al.* (1969).

La structure anatomique du bois influence la façon dont l'eau est retenue dans ce matériau. Choong et Tesoro (1989) ont déterminé la pression capillaire des différentes espèces en

utilisant la méthode de centrifugation à partir de la saturation intégrale des échantillons. Lors de la centrifugation des feuillus, la plupart de l'eau retirée vient des gros capillaires et la réduction de l'humidité du bois a été plus graduelle dans le bois à zone poreuse que dans le bois à pores diffus en raison de la sortie progressive de l'eau des pores de tailles différentes. Les espaces poreux des feuillus sont composés de fibres de faibles diamètres, avec punctuations simples et non perforées, ce qui rend difficile la sortie de l'eau. Un autre facteur qui affecte la sortie de l'eau du bois des espèces feuillues est la présence de cellules de parenchyme qui peuvent retenir l'eau liquide.

### 2.2.2. Le point de saturation des fibres

Le point de saturation des fibres (noté PSF, exprimé en %) correspond au taux d'humidité du bois saturé en eau liée en dessous duquel le bois va commencer à sécher en se contractant. Skaar (1988) le définit comme une caractéristique importante du bois qui régit les changements de ses propriétés .

La figure 1.2.6 schématise le phénomène d'évacuation de l'eau libre (sans retrait) puis de l'eau liée (avec retrait) dans une pièce de bois en cours de séchage.

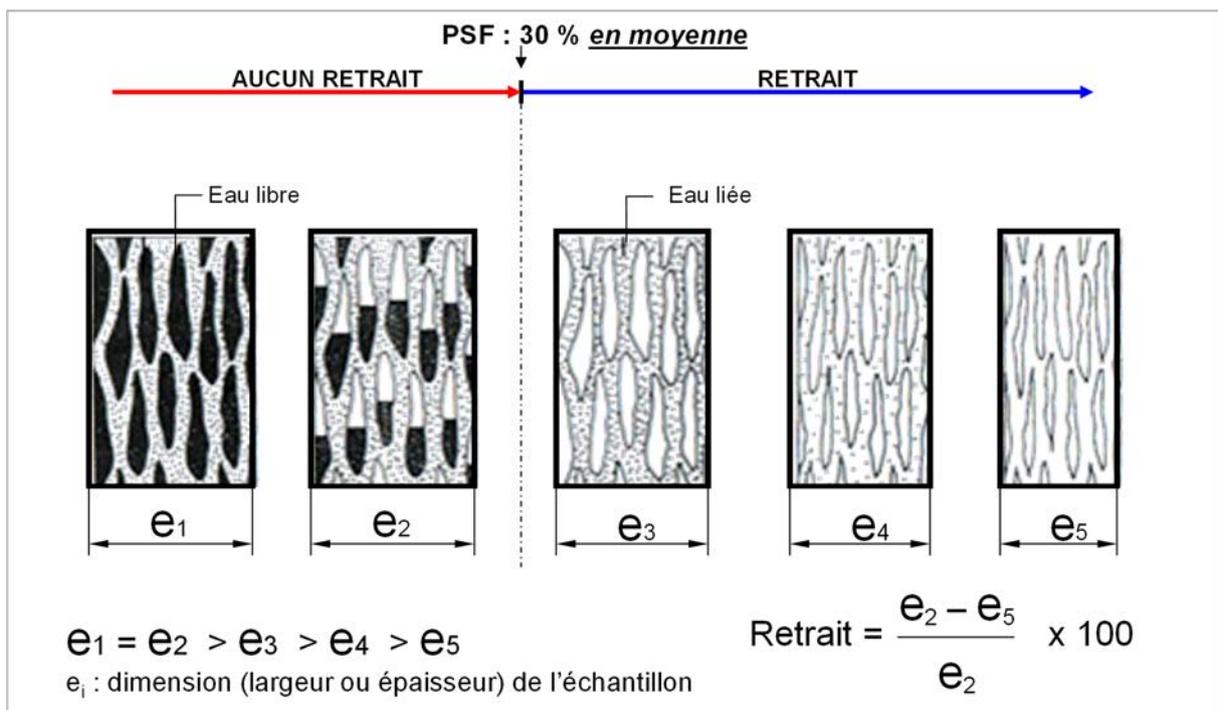


Figure 1.2.6 : L'eau libre et l'eau liée dans le bois.

Suivant les essences, le PSF varie habituellement entre 20 et 40%, avec une moyenne d'environ 30% comme souvent mentionné dans la littérature.

Le PSF est une grandeur difficile à mesurer. A l'échelle macroscopique (avivés, équarris...), il s'agit davantage d'un concept que d'une réalité physique précise.

En effet, dans une pièce de bois en cours de séchage, le taux d'humidité de la périphérie de la pièce diminue beaucoup plus rapidement que celui du cœur et le PSF est atteint beaucoup plus rapidement.

Pour mesurer ce PSF de façon satisfaisante, il est nécessaire :

. D'utiliser des éprouvettes dont la taille et la géométrie assurent des conditions de séchage les plus uniformes possibles,

. De stabiliser ces éprouvettes dans une ambiance climatique dont l'humidité et la température doivent être contrôlées avec précision.

#### 2.2.2.1. Les différentes méthodes de détermination de PSF

Plusieurs méthodes peuvent être mises en œuvre pour déterminer le PSF :

- Courbes de sorption : cette méthode est basée sur l'extrapolation des isothermes d'adsorption jusqu'à 100% d'humidité relative (HR). Cette méthode peut générer plusieurs erreurs (Stamm 1971 ; Siau 1995)
- Plaque de tension (en adsorption) ou plaque poreuse : cette méthode permet d'étudier en détail les relations eau-bois sous des HR entre 99% et 99,99% (Stamm 1971; Fortin 1979).
- Technique de centrifugation : cette technique consiste à forcer l'eau liquide à sortir du bois. L'utilisation de cette méthode sur des espèces imperméables peut générer des valeurs erronées (Perem 1954). Chong et Tesoro (1989) ont obtenu des PSF supérieurs à 30 %.
- Deux autres techniques permettent de mesurer directement la quantité d'eau liée aux parois cellulaires. La technique de résonance magnétique nucléaire (RMN) (Araujo et al. 1994) et la technique DSC (calorimétrie différentielle à balayage, = *differential scanning calorimetry*) (Simpson et Barton 1991; Repellin et Guyonnet 2005; Zelinka et al. 2012; Zauer et al. 2014).
- Méthode par mesure du coefficient de retrait surfacique : cette méthode est basée sur le calcul de retrait surfacique à partir des retrait radial et tangentiel ; un coefficient de retrait surfacique est déterminé en faisant le rapport entre le retrait surfacique et le PSF. **Cette méthode que nous avons utilisée a été détaillée au chapitre 1 de la partie 3 Méthodes et Résultats.**

#### 2.2.2.2. Les facteurs qui affectent le PSF

Plusieurs facteurs affectent le point de saturation des fibres (Skaar 1988) :

- La quantité d'extractibles exerce un effet inversement proportionnel sur le PSF, les extractibles agissant comme une charge ou comme des agents de remplissage des pores et même de blocage des voies d'accès à l'intérieur des membranes.
- Le PSF augmente avec la température jusqu'à 0°C ; pour les températures entre 0°C et 140°C, le PSF diminue à un taux moyen de 0,93% d'humidité par élévation de 10°C (Siau 1995).

Le PSF augmente avec la diminution de la masse volumique du bois, particulièrement au-dessous de  $400 \text{ kg/m}^3$  (Feist et Tarkow 1967).

- Plusieurs facteurs peuvent influencer et par conséquent causer des erreurs lors de la détermination du PSF en désorption, comme par exemple l'eau liquide qui peut rester « piégée » dans le lumen des éléments ligneux les moins perméables (rayons cellulaires) (Menon et al. 1987; Hernández et Bizoñ 1994).

Certains travaux laissent entendre que cette hypothèse ne se serait pas toujours réaliste. Stevens (1963) a montré que le retrait du bois de hêtre se produit même au-dessus de la saturation des membranes (figure 1.2.7). Ses valeurs de retrait ont été obtenues à l'équilibre d'humidité de telle manière que la présence d'un gradient d'humidité comme cause possible du début du retrait soit peu probable.

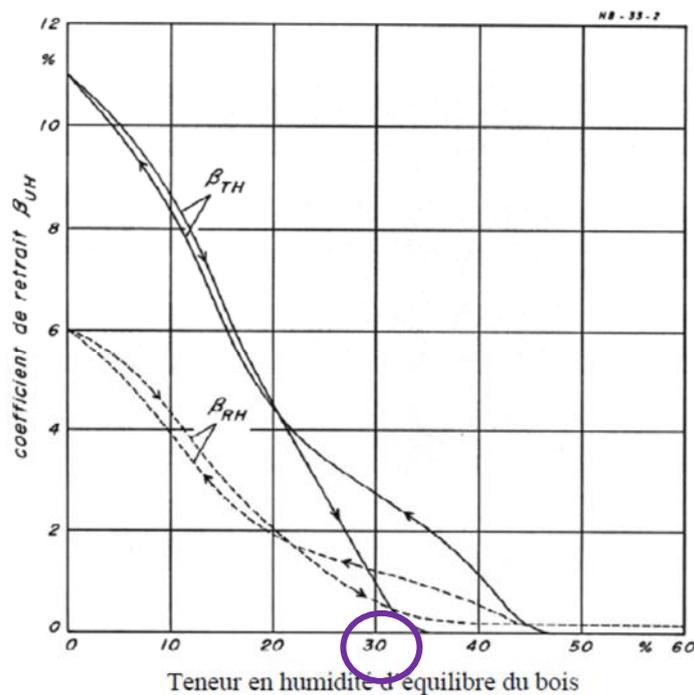


Figure 1.2.7 : Retraits radial et tangentiel du bois de hêtre en fonction de son humidité d'équilibre en adsorption et en désorption à environ  $25^\circ\text{C}$  (d'après Stevens 1963).

Les résultats du travail de Hernández et Bizoñ (1994) montrent clairement que le retrait et la résistance en direction tangentielle sont affectés même au-dessus du point de saturation des fibres PSF. En désorption, la perte d'eau hygroscopique du bois d'érable à sucre (famille des feuillus) a débuté à environ 42,5% H<sub>éq</sub>.

L'analyse de l'ensemble des études réalisées sur le point de saturation des fibres indique que l'eau liquide et l'eau liée peuvent coexister dans une certaine plage d'humidité du bois en dessous du PSF. À cause de ce comportement, (Siau 1995) et d'autres chercheurs (Menon *et al.* 1987; Hernández et Bizoñ 1994) ont montré que l'utilisation du terme PSF est erronée, car il ne s'agit pas d'un « point » spécifique.

### **2.2.3. Le collapse**

#### **Vocabulaire et définitions**

Le séchage du bois est un des procédés les plus délicats à gérer et à maîtriser dans la chaîne de transformation ; parmi les problèmes liés à ce procédé, on trouve le collapse ; Kuo et Arganbright (1978) et Blakemore et Northway (2009) le définissent comme une forme sévère de retrait qui se produit dans la plupart d'espèces de bois.

D'après Panshin et de Zeeuw (1980), Hart (1984) et Chafe (1985), le phénomène du collapse se produit au début du séchage, en présence d'eau liquide, c'est-à-dire au-dessus du PSF, alors que le retrait normal a lieu dans le domaine hygroscopique. Lors du retrait de séchage, un rétrécissement des parois cellulaires est observé au fur et à mesure que l'eau liée s'évapore, alors que le collapse provoque la fermeture des vides cellulaires (Tiemann 1941; Panshin et de Zeeuw 1980; Chafe 1985).

Les bois à faible perméabilité sont sensibles au collapse, en association avec des valeurs élevées de tension capillaire (Siau 1984, 1995).

Les conséquences du collapse sont multiples : surfaces des bois inégales et rugueuses, gauchissement des bois sciés, surfaces ondulées (Bariska 1992 ; Siau 1995). Kuo et Arganbright (1978) montrent que les éléments du bois les plus sensibles au collapse sont les trachéides et les fibres tandis que les vaisseaux et le parenchyme axial sont moins sensibles.

## **2.3. Aspect mécanique**

Le bois est un matériau anisotrope, ses propriétés mécaniques dépendent de la direction selon laquelle on les observe. De plus, d'autres facteurs comme la teneur en eau, la température, le temps, le niveau de contrainte jouent un rôle important sur ses qualités.

### **2.3.1. Les facteurs influençant le comportement mécanique du bois**

Il est particulièrement important de prendre en compte la variabilité des propriétés du bois dans la conception des structures en bois.

Les variations de résistance du bois au sein d'une même essence sont souvent très importantes, et dépendent de la direction de sollicitation. Weibull (1951) a bien expliqué la répartition de la résistance du bois. Les résistances en traction transversale et en cisaillement du bois sont faibles par rapport à la résistance longitudinale en compression.

De nombreux paramètres affectent le comportement mécanique du bois, nous allons en présenter les principaux

#### **2.3.1.1. Les nœuds**

Les nœuds présents dans le bois sont les cicatrices des branches. Ils sont sains et adhérents lorsqu'ils sont issus de la partie vivante de la branche, noirs et non adhérents si la branche est morte.

D'après WH: WEM (1987), un nœud modifie localement la direction du fil du bois ; il fragilise la pièce et réduit la section effective de la pièce portante, modifiant ainsi son anisotropie et diminuant ses résistances mécaniques.

L'anisotropie des résistances mécaniques est aussi influencée par la qualité du nœud ; un nœud dit « adhérent » ou « sain » sera mécaniquement moins pénalisant qu'un nœud « mort ». De plus, un nœud est très souvent associé à des variations locales de l'orientation des fibres qui peuvent atteindre 90° par rapport à la direction générale du fil. Ceci induit souvent des excentrement d'effort et localement des contraintes très élevées. Enfin, à l'endroit où les fibres changent de direction autour des nœuds apparaissent des contraintes transversales pour une sollicitation axiale (Kollmann 1984).

Les résineux se distinguent des feuillus par une régularité de la disposition des nœuds.

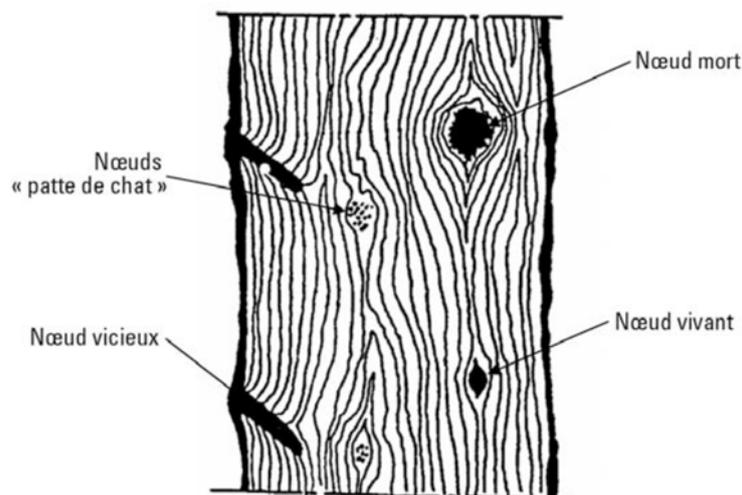


Figure 1.2.8: Différents types de nœuds dans le bois

### 2.3.1.2. L'orientation des fibres

Harris (1989) explique le phénomène de fil tors chez certains arbres, phénomène qui correspond à une orientation en spirale des fibres autour du tronc. Ce fil tors est courant chez certaines espèces (*Pinus radiata*, *Caryocar glabrum*) et rare chez d'autres (*Picea abies*, *Hymenaea courbaril*). Cette caractéristique, qui est une particularité de la croissance du bois, affecte sa qualité et peut entraîner des déformations importantes lors du séchage.

Les recherches en mécanique du bois montrent que les propriétés mécaniques du matériau dépendent de l'orientation de la sollicitation par rapport à celle du fil ; les meilleures performances sont enregistrées dans le sens longitudinal. D'après Baumann (1922), repris par Côté (1984), la résistance en traction est davantage affectée par l'augmentation de la déviation du fil suivant l'orientation de la sollicitation que la résistance en flexion ou en compression.

### 2.3.1.3. Bois juvénile et bois de réaction

Dans un arbre, les premiers cernes d'accroissement au centre de la tige (5 à 20 suivant les espèces et les conditions de croissance) présentent des caractéristiques différentes de celles du bois périphérique arrivé à maturité (Nepveu 1994). Ce bois est appelé bois juvénile ; il présente une masse volumique, une résistance et une élasticité plus faibles que le bois adulte particulièrement chez les résineux (Nepveu 1994 ; Harris 1988). En revanche pour les feuillus tropicaux, certaines espèces forestières favorisent la croissance en hauteur par rapport à la croissance en diamètre en réponse à une forte compétition interspécifique, et développent alors un bois juvénile plus rigide et souvent plus dense (McLean et al. 2011).

Ce type de défaut très pénalisant est fréquent chez les espèces feuillues de plantation à croissance rapide exploitées précocement. Il est principalement dû à la présence de **bois de tension** associé à des contraintes de croissance élevées et formé généralement dans un secteur angulaire (d'un seul côté du tronc) à certaines périodes de la croissance.

Le bois de tension est formé par l'arbre en réaction à des événements extérieurs. Il permet aux tiges de se réorienter afin d'assurer une position favorable à l'arbre en réaction au vent, à des accidents de croissance, ou par rapport à la lumière. Les propriétés physiques et mécaniques du bois de tension sont différentes de celles du bois dit « normal », ce qui induit des hétérogénéités radiales et suivant la circonférence.

Chez les résineux, le bois de réaction est appelé bois de compression alors que chez les feuillus, il s'agit de bois de tension.

### 2.3.1.4. La densité

La densité est la première propriété à connaître pour qualifier un bois et ses potentialités d'utilisation. Elle est reliée, plus ou moins étroitement, avec ses principales propriétés physiques et mécaniques ainsi qu'avec certaines caractéristiques de mise en œuvre.

Les différences de densité entre les espèces sont dues aux différences de structure anatomique. Plus les parois cellulaires des bois sont épaisses, plus les bois sont denses (Carlquist 1988).

De nombreuses études ont montré des très fortes corrélations entre la densité et les caractéristiques mécaniques des bois, notamment l'élasticité en flexion et la contrainte de rupture parallèle au fil (Guitard 1994 ; Zink-Sharp 2003). Bodig et Jayne (1982) et Guitard et El Amri (1987) ont déterminé de façon systématique les régressions entre les constantes d'élasticité des bois dont la densité diffère de celle d'un bois dit « standard », de densité 0,65 pour les feuillus et 0,45 pour les résineux.

Bodig et Jayne (1982) ont étudié l'influence de la densité sur les propriétés mécaniques du bois (figure 1.2.9) et utilisé l'équation suivante

$$Y = aD^b$$

Avec :

Y : propriété élastiques

D : densité du bois,

a et b : constantes liées à chaque essence de bois avec  $b > 1$ .

La figure 1.2.9 met en évidence la relation directe entre une propriété mécanique de référence, la résistance en compression, et la densité.

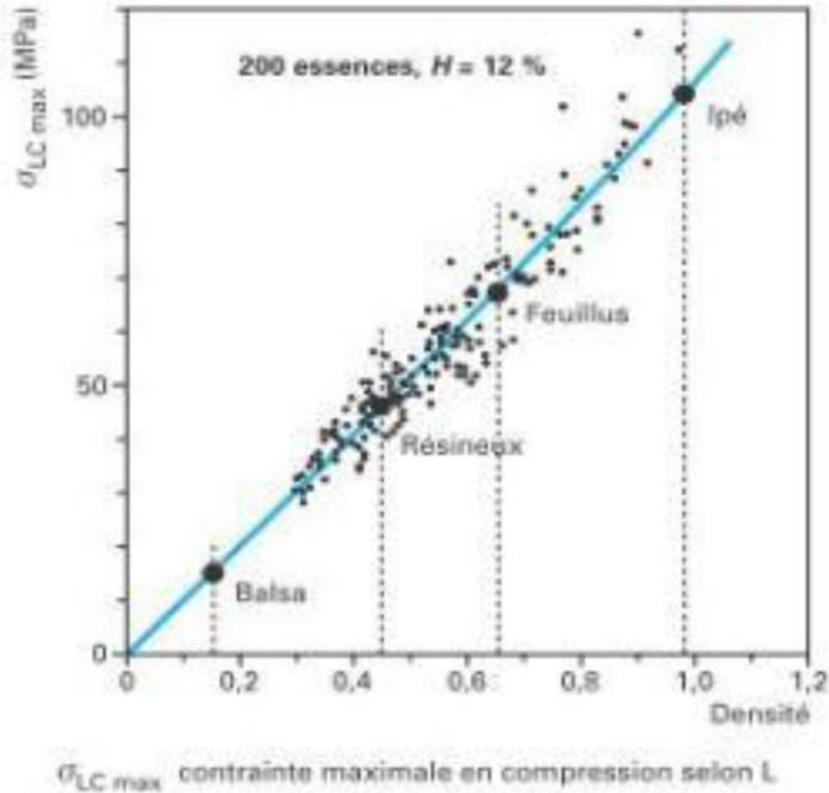


Figure 1.2.9 : Relation entre contrainte de rupture en compression et densité

2.3

### 2.3.1.5. La température

Bodig et Jayne (1982) expliquent que les propriétés élastiques du bois diminuent avec l'augmentation de la température. Siimes (1967) remarque que pour un même taux d'humidité, l'augmentation de la température diminue la résistance mécanique du bois. Sulzberger confirme cette observation en présentant des courbes de décroissance du module d'élasticité de plusieurs essences de bois en fonction de la température (repris par Kollmann 1984).

L'effet de la température sur la résistance mécanique du bois est amplifié lorsque l'humidité, augmente (Tang 1972).

Les travaux de Salamon (1963) viennent aussi illustrer ces résultats. D'après cet auteur, la diminution des propriétés mécaniques due à l'augmentation de la température est plus faible pour un bois de densité élevé (Kollmann 1984). Notons par ailleurs, que la résistance à la

traction est moins affectée par l'effet température du bois que les autres sollicitations (flexion et compression).

### 2.3.1.6. L'humidité

L'influence de l'humidité sur le comportement mécanique du bois a fait l'objet de nombreuses recherches. L'objectif principal de ces travaux a souvent été de montrer l'influence du comportement hydrique du bois sur ses caractéristiques élastiques (Panshin et Zeeuw 1970 ; Guitard 1987 ; Navi et Heger 2005). D'une façon générale, les résistances mécaniques du bois diminuent linéairement avec l'humidité, plus ou moins rapidement, jusqu'à leur stabilisation au point de saturation des fibres (Guitard 1987; Wood Handbook 1987 ; Gerhards 1982).

Schlyter et Winberg (1929) ainsi que Hoffmeyer ont observé une diminution linéaire de la limite d'élasticité et ont montré que 1% d'augmentation de la teneur en humidité du bois entraîne une diminution de 3% à 4% de la limite élastique dans la direction longitudinale.

## 2.4. Le vieillissement du bois

Exposé à l'extérieur, le bois est soumis à l'agression conjuguée : du soleil, de la pluie, de l'humidité ambiante, du froid qui, en l'absence de protection, le font vieillir prématurément.

Après une exposition plus ou moins prolongée à l'extérieur, le bois commence à perdre sa couleur d'origine, puis progressivement se teinte en gris. Cette modification d'aspect est essentiellement due à l'action du rayonnement ultraviolet émis par la lumière solaire. Ce grisaillement s'accompagne d'une érosion très lente des couches superficielles du bois, de l'ordre de 2 à 4 mm par siècle.

Parallèlement à cette évolution d'aspect, le bois, en ambiance extérieure, est soumis à de brusques changements d'humidité dus aux variations climatiques. Ces variations rapides créent des tensions importantes dans les pièces et sont à l'origine de variations dimensionnelles, déformations, gerces, fentes, ouverture des assemblages, etc.

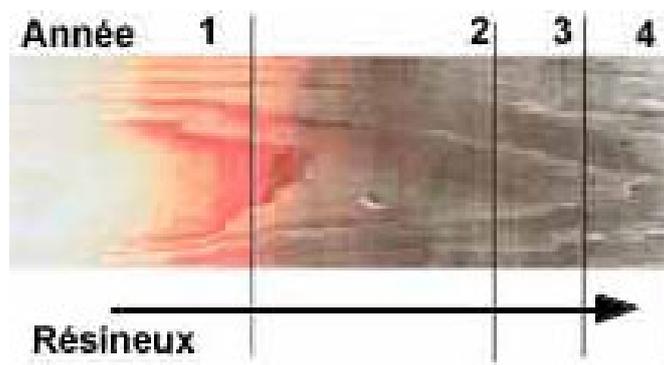


Figure 1.2.10: Dégradation de bois pendant le vieillissement

La simulation des conditions de vieillissement du bois en accélérant le processus a été étudiée à l'aide de différents dispositifs conçus spécialement à cet effet ; ainsi, le Weatherometer à lampe au xénon (Williams 1983; Feist 1988; Middleton 1993; Richter et al. 1995) et le Hex-House (Ingrassia 1964) permettent l'obtention de résultats probants en quelques semaines.

Généralement, les méthodes de vieillissement accéléré testent en accéléré les effets des radiations UV et de l'humidité sur le produit fini (Arnold et al. 1991).

Back et Sandström (1982) affirment que le Weatherometer à lampe au xénon) est très utile pour l'évaluation du comportement du film et des propriétés de surface du substrat. Ce type de machine peut accélérer les effets du vieillissement naturel de 5 à 20 fois, en fonction de la condition d'exposition choisie (Arnold et al. 1991). Selon Feist et Mraz (1978), sous certaines conditions d'essai, 2 400 heures de vieillissement artificiel correspondent à 4 ou 5 ans de vieillissement naturel.

Le Weatherometer à lampe au xénon utilisé par Middleton (1993) a été ajusté pour l'émission de radiations de l'ordre de 0,55 W/m<sup>2</sup> à 340 nm. Les températures de l'air et de l'eau ont été fixées respectivement à 34°C et à 17°C. Les cycles ont consisté en 18 minutes continues d'irradiation UV et de vaporisation d'eau suivies de 102 minutes d'irradiation seule. Les échantillons vernis ont été ainsi vieillis pour des périodes de 1000, de 2000 et de 3000 heures.

Le même dispositif a été utilisé par Feist (1988) et Richter et al. (1995) pour évaluer les performances de plusieurs types de revêtements, en appliquant des cycles de 20 heures de lumière et de 4 heures de lumière combinée avec de l'eau.

Feist (1988) a appliqué une température de 45 ± 2°C et une humidité relative de 50 ± 2%. Dans le même objectif, Williams (1983) a appliqué uniquement des radiations UV pour évaluer des vernis polyuréthane.

## 2.5. Durabilité du bois

La durabilité naturelle du bois est sa capacité à résister aux attaques biologiques en l'absence de tout traitement protecteur. Elle varie significativement selon les essences de bois et, dans une même essence, elle est plus élevée dans le duramen que dans l'aubier qui n'est en général pas résistant (Loubinoux et Kilbertus 1994).

La durabilité du bois est évaluée pour chaque agent de dégradation sur le duramen de l'essence. Les deux principaux agents biologiques responsables de la dégradation du bois sont les insectes (termites, coléoptères, capricornes, Lyctus, vrillettes) et les champignons lignivores. En milieu marin, le bois peut aussi être attaqué par des térébrants marins (tarets). Les champignons nécessitent un minimum d'humidité pour se développer (20%). De plus, les conditions climatiques jouent un rôle important, augmentent ou diminuent les risques d'attaques biologiques, la chaleur et l'humidité favorisant le développement des agresseurs biologiques.

Un bois dont l'humidité en service est inférieure à environ 20 % présente peu de risques d'être attaqué par les champignons.

Des températures inférieures à 5° C environ empêchent tout développement des champignons. De même, des bois immergés ou portés à des températures élevées (de l'ordre de 60° C) ne sont jamais attaqués par les champignons quelle que soit leur durabilité naturelle.

### ***Résistance aux champignons***

La norme NF EN 350, en cours de révision en 2016, définit des classes de durabilité naturelle du bois contre des champignons lignivores :

- bois très durables : classe DC1 (durability class 1),
- bois durables : classe DC2,
- bois moyennement durables : classe DC3,
- bois faiblement durables : classe DC4,
- bois non durables : classe DC5.

***Résistance aux insectes des bois secs (lyctus, bostryches, vrillettes)***

La grande majorité des bois commercialisés n'est pas attaquée par les insectes de bois sec, à condition que ces bois soient mis en œuvre sans aubier. Lorsque l'aubier est peu distinct, il est préférable de traiter les bois contre les insectes de bois sec. Certaines essences sont attaquées dans la totalité du bois et demandent des précautions particulières à l'état sec. Les bois sciés ou les produits finis ne sont attaqués que s'ils contiennent encore de l'aubier et une teneur en amidon suffisante.

Selon la norme NF EN 350, une essence est classée sensible (classe DC S, nommée « classe S ») si elle est attaquée pendant un essai mené en laboratoire. Dans le cas contraire, elle est considérée comme durable (classe DC D, nommée « classe D »).

***Résistance aux termites***

La norme NF EN 350 définit 3 classes de durabilité naturelle vis-à-vis des termites :

- bois durables : classe DC D (durability class D),
- bois moyennement durables : classe DC M,
- bois sensibles : classe DC S.

Si un bois n'est pas naturellement durable, un traitement chimique peut être appliqué pour éviter les dégradations. Le choix du traitement chimique dépend de l'imprégnabilité du bois et des conditions d'utilisation définissant ainsi la classe d'emploi (CE) que le bois doit couvrir. L'imprégnabilité du bois influe de manière significative sur l'efficacité du traitement et dépend de sa perméabilité et de son taux d'humidité (Loubinoux et Kilbertus 1994).

Partie 1 : Etude bibliographique

Chapitre 3 : les composites à base de bois  
massif

## Introduction

Les composites à base de bois sont des matériaux techniques de très haute performance. Le développement de ces matériaux est basé sur la connaissance du bois et de sa variabilité, des processus d'élaboration, de la caractérisation et de la modélisation des matériaux composites. Ce chapitre a pour objectif de présenter les principales familles de ces matériaux, d'en dresser une typologie et d'expliquer les principales activités de recherche conduites pour étudier leur comportement mécanique.

Un matériau composite peut être défini comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs.

Les premiers composites de type bois lamellé-collé ont été mis au point au début du 20<sup>ème</sup> siècle par l'allemand Otto Hetzer. Ce charpentier inventif avait eu l'idée de remplacer les assemblages avec pièces métalliques par des collages à la caséine ce qui permettait de s'affranchir des problèmes liés aux connexions bois-métal. Entre 1906 et 1907, le brevet de ce nouveau matériau est déposé en Allemagne, en France et en Suisse, et le lamellé-collé se développera par la suite pour s'imposer dans tout le secteur de la charpente.

Durant ces dernières années, les techniques de collage du bois ont pris un essor tout particulier, dans une gamme d'applications, notamment en menuiserie, en ameublement, en structure portante (charpentes, ossature). Elles permettent de concevoir de nouveaux matériaux ayant caractéristiques très spécifiques qui répondent à de multiples besoins actuels bien particuliers.

Les produits obtenus par collage du bois sont multiples :

- panneaux sandwich d'isolation;
- contreplaqués ;
- panneaux de particules ;
- carrelets trois plis ;
- éléments de construction de type poutres lamellées-collées et lamellées-aboutées.

Ces produits permettent de mieux valoriser la matière-première, notamment les bois de petites dimensions et/ou les bois déclassés ou de deuxième choix (Dinkel1997).

La réalisation correcte du collage nécessite la connaissance de la destination de l'ouvrage et de ses conditions d'environnement ou de sollicitations.

La résistance d'un assemblage collé est essentiellement déterminée par deux facteurs. D'une part la résistance cohésive de la colle et d'autre part, la résistance adhésive qui représente la mesure de l'adhérence entre l'adhésif et le substrat. L'optimisation de l'assemblage collé a pour but de renforcer le maillon le plus faible de la chaîne :

$$\text{Résistance du substrat} = \text{Résistance adhésive} + \text{Résistance cohésive}$$

### 3.1. Les composites à base de bois

#### 3.1.1. Le bois lamellé-collé

Le bois lamellé-collé est un matériau de structure qui a permis d'élargir les usages traditionnels du bois. Les procédés de fabrication, associés à des procédures rigoureuses de contrôle de qualité, lui confèrent des performances supérieures à celles du bois massif le constituant. En théorie, la fabrication de lamelles continues aboutées permet la production de poutres de section et de longueur infinies. Il se fabrique couramment des pièces d'une hauteur de 2 mètres et d'une longueur de 30 à 40 mètres. La possibilité de courber les lamelles avant leur encollage permet la production d'éléments courbes très esthétiques.

En raison du procédé de fabrication, les nœuds sont répartis plus aléatoirement dans la poutre conduisant à un matériau plus homogène. L'influence d'une seule zone d'amorce de rupture aux nœuds est limitée. Elle se traduit par une variabilité plus réduite et une plus grande résistance, pour les bois de basse qualité.

Les étapes de la fabrication sont les suivantes:

- Choix des planches à humidité stabilisée entre 12 et 18%, exemptes de défauts inadmissibles par usinage ;
- Tri de ces planches en fonction de leurs propriétés mécaniques évaluées par un essai de flexion ;
- Choix de l'emplacement des plis dans la poutre, les plus résistants vers l'extérieur ;
- Entourage des extrémités et aboutage par collage sous pression pour obtenir les longueurs nécessaires : cas des bois massifs reconstitués (=BMR) ou des bois lamellés-aboutés (= BLA) ;
- Rabotage de ces éléments ;
- Encollage des faces ;
- Mise sous pression et maintien de l'assemblage (Daya 2006).

Les poutres peuvent être renforcées à l'aide d'éléments métalliques noyés dans la masse ou rapportés à l'extérieur, ou à l'aide de tissus de fibres utilisés dans la fabrication des matériaux composites, fixés par collage ou dans les joints de colle inter-plis (Moulin 1989).

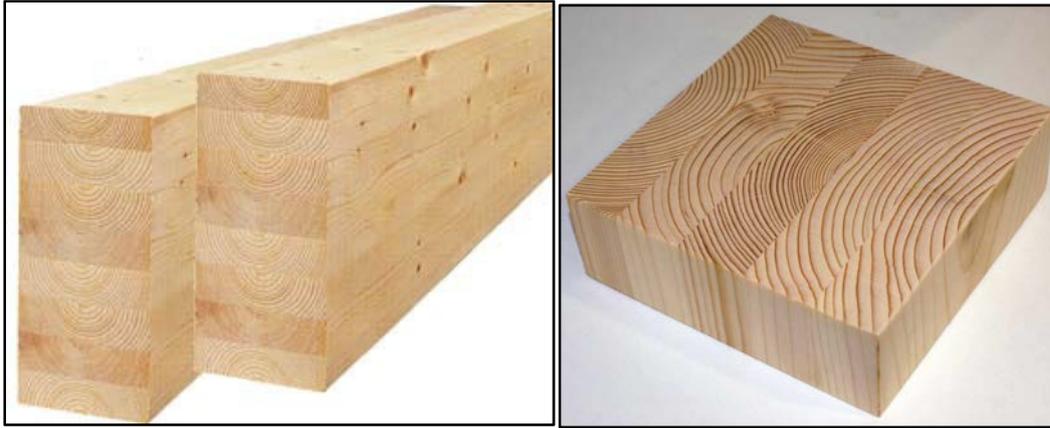


Figure 1.3.1 : Bois lamellé-collé

### 3.1.2. Les carrelets bois trois plis

#### 3.1.2.1. Définition

Le carrelet trois plis est un produit composé de trois lamelles de bois collées entre elles selon des normes bien précises. Les deux lamelles extérieures sont sans nœud et le pli central est abouté dans certains cas de façon à obtenir une meilleure stabilité et une résistance mécanique supérieure aux carrelets en bois massif.

#### Description du produit

- Les carrelets 3 plis sont particulièrement indiqués pour la production de fenêtres en bois.
- Ils n'ont pas vocation à être employés comme éléments de structure tels que les ossatures-bois, les pergolas, les aménagements structurels intérieurs ou extérieurs.

De plus, pour mieux garantir la qualité du produit, il doit être verni ou traité (selon le lieu de destination) avec des produits spécifiques qui conservent ses propriétés.



Figure 1.3.2: Carrelet trois plis en Pin

**3.1.2.2. Avantages d'utilisation**

- Stabilité dimensionnelle permettant de limiter les risques de déformation ;
- Rigidité lors de la mise en œuvre ;
- Possibilité d'utiliser des produits de forte épaisseur et mixité des matériaux des profilés de menuiserie pour répondre notamment aux exigences d'amélioration de l'isolation thermique des bâtiments ;
- Réduction du prix de revient en optimisant le rendement matière par l'aboutage ;
- Valorisation et récupération de bois de deuxième choix pour obtenir des pièces de grande dimension ;
- Meilleure stabilité tout en respectant l'aspect naturel du bois.

**3.1.2.3. Les différents types de carrelet trois-plis**

- Carrelets 3 plis croisés et non croisés selon le pli central
- Carrelets 3 plis aboutés ou non aboutés

**3.1.2.4. Les domaines d'utilisation des carrelets**

- Huisserie
- Menuiserie extérieure et intérieure
- Meuble
- Poutre
- Décoration et aménagement



Figure 1.3.3: Différents domaines d'utilisation des carrelets

### 3.1.3. Le comportement mécanique des composites à base de bois

La connaissance des mécanismes de fissuration et de déformation est primordiale à maîtriser pour améliorer les outils de conception des structures en bois.

L'étude du comportement mécanique des composites à base de bois et des phénomènes d'endommagement associés ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche.

Parmi les études récentes réalisées sur ce sujet, Bohan (2012) a modélisé le comportement mécanique d'assemblages-bois, en étudiant le comportement global de différents assemblages.

En utilisant les résultats de Pacher et al. (1996), il montre que la procédure de dimensionnement des structures doit combiner l'analyse globale de la structure et l'analyse locale des liaisons.

La loi de comportement des assemblages bois est influencée par les propriétés intrinsèques du bois et des organes, la constitution des liaisons (bois-bois, bois-métal), la configuration géométrique et la nature des sollicitations transmises. De nombreuses configurations d'assemblages peuvent exister grâce aux multiples façons de transmettre les efforts entre les éléments.

#### 3.1.3.1. Le dommage mécanique

Dinkel (1997) a défini le terme de dommage comme étant associé étymologiquement à la notion de dégât tels que les trous ou le délaminage par exemple. Ces dégâts peuvent être de nature microscopique (défauts ponctuels, linéaires ou plans) ou macroscopiques comme les fissures dans le cas de chargement mécanique. Ainsi le dommage d'un matériau est défini par les modifications irréversibles de sa structure interne.

Les dégradations qui ont pour origine les effets de retrait résultant de gradients d'humidité importants, se manifestent par l'apparition de fissures dans la masse du bois. Lorsque le joint s'est trouvé affaibli par l'effet de l'eau ou de la température, on observe un délaminage.

On distingue ainsi trois modes de rupture selon Jeandeau (1987) :

- Une rupture dans le bois;
- Une rupture cohésive dans le polymère;
- Une rupture adhésive à l'interface.

La reconstitution par collage (lamellé-collé et aboutage) confère à l'élément de bois assemblé une remarquable stabilité face au retrait en réduisant considérablement le gauchissement et les effets de vrille longitudinale.

Toutefois un gain en stabilité dimensionnelle implique souvent un accroissement des champs de contrainte au niveau des interfaces de colle, dont l'intensité dépend de l'agencement des lamelles de bois.

Le Centre Technique du Bois et de l'Ameublement (CTBA) suggère d'intervenir dans la disposition des lamelles au sein de la structure selon la figure 1.3.4., en les positionnant suivant la même orientation de façon à limiter les hétérogénéités de retrait.

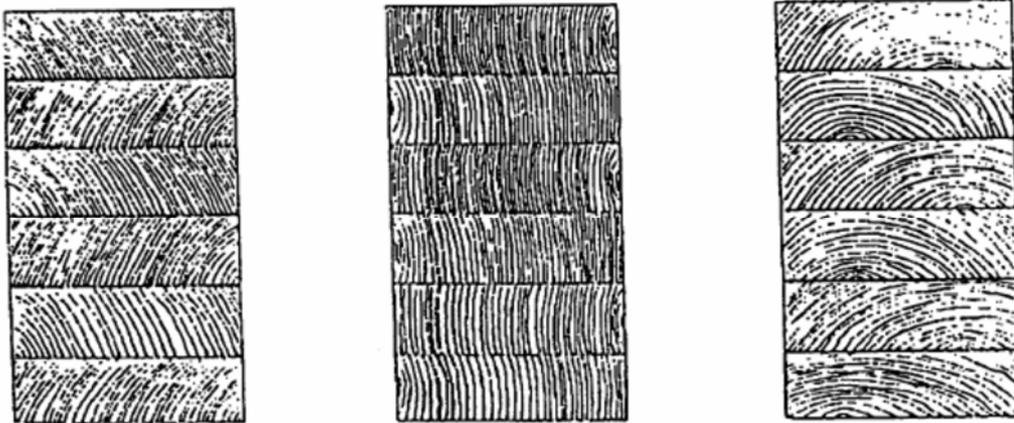


Figure 1.3.4 : agencement idéal de lamelles de bois dans la section des poutres lamellées collées (lamelles d'orientation voisines assemblées entre elles).

### L'endommagement

L'endommagement d'un matériau est défini par les modifications de ses propriétés comme la perte de rigidité, la diminution de la durée de vie ou des déformations de fluage sous l'effet de sollicitations cycliques ou de fatigue par exemple.

Une étude récente sur la détection et l'évaluation de l'endommagement mécanique du bois par émission acoustique a été réalisée par (Dahou *et al.*2015). Cette étude a eu comme objectif la détermination des propriétés mécaniques et des mécanismes d'endommagement du bois massif épicéa et de bois lamellés-collés de pin ; un essai de fissuration en traction provoquée par l'enfoncement d'un coin (*Wedge Splitting Test*) a été utilisé. Pour analyser et suivre l'endommagement du bois durant cet essai, la technique d'émission acoustique (EA) a été utilisée.

Plusieurs paramètres ont été étudiés et suivis durant les différentes phases de l'essai de traction comme la localisation cumulée des événements acoustiques et les paramètres des signaux (énergie, amplitude, etc.). L'objectif était de mesurer les évolutions liées aux phénomènes de structure et le positionnement des défauts. Les résultats obtenus ont montré une très bonne corrélation entre les courbes force-CMOD (le CMOD représente l'ouverture de l'entaille ou *Crack Mouth Opening Displacement*) et l'activité acoustique. La largeur de la zone de microfissuration a été aussi estimée à partir des cartes de localisation.

La comparaison entre les courbes force CMOD montre un comportement proche pour les deux types d'éprouvettes mais avec une phase élastique plus importante pour les éprouvettes en bois lamellé collé.

Ces résultats montrent que :

- La différence entre les deux éprouvettes de bois massif de même géométrie est non significative puisqu'elle est inférieure à 10%.

- Une légère augmentation de la zone de microfissuration est observée pour l'éprouvette en lamellé collé qui a une géométrie plus élevée (4 mm plus large que la moyenne des deux éprouvettes en massif).
- La différence au niveau de la largeur de la bande accompagnant le front de la fissure peut être due à l'épaisseur plus importante pour l'éprouvette en bois lamellé collé, ainsi qu'au déphasage ou à un chemin de fissure plus tortueux entre les deux faces et à des mécanismes d'endommagement différents (Dahou et al.2015).

En effet, pour le bois lamellé collé, la rupture a été observée au niveau de la direction tangentielle du bois avec des gondolements (gauchissements) au niveau des faciès de rupture.

Ces résultats viennent confirmer ceux obtenus antérieurement par plusieurs auteurs (Aicher *et al.* 2001 ; Reiterera *et al.* 2000 ; Schniewind *et al.* 1996, Ando *et al.* 2006, Ritschelf *et al.* 2014; Landis et Whittaker 2000 ; Lamy *et al.* 2015) qui ont étudié les problèmes liés aux fissurations dans le bois.

## 3.2. Etat de l'art sur la technique d'aboutage

Les bois d'ingénierie (= EWP, *Engineered Wood Products*) sont des produits souvent plus performants que le bois massif obtenus à partir de bois reconstitués par collage dont l'utilisation est de plus fréquente dans l'industrie de la construction. Les techniques d'aboutage à entures multiples se sont largement développées durant ces dernières années et sont révélées d'un intérêt majeur pour l'industrie de matériau bois car adaptées à une très large gamme d'applications.

### 3.2.1. Aboutage

Les premiers assemblages à entures correspondaient à des profils de type scarf tels que présentés sur la figure 1.3.5, avec une pente généralement égale à 10% soit un angle d'environ 6°. Ce type d'assemblage présente une bonne efficacité car la surface de contact collée est importante, mais la perte en bois est moins importante avec ce type d'usinage (Dinkel 1997).

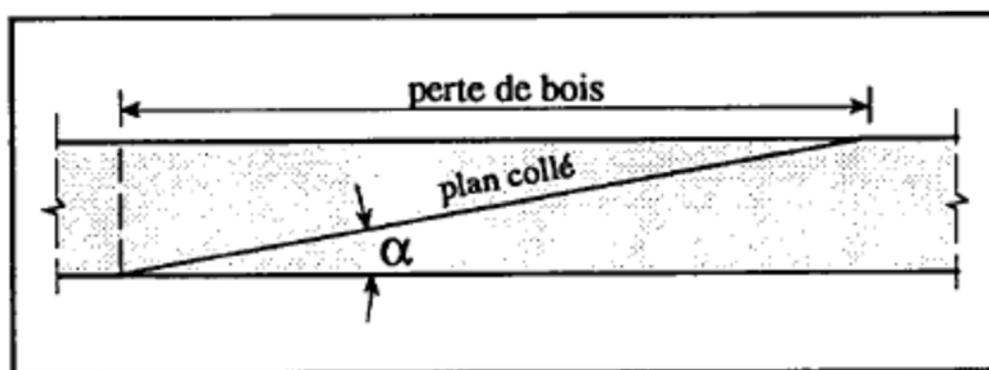


Figure 1.3.5 : Profil en scarf d'aboutage

Les joints avec profil en coin ont été par la suite utilisés ainsi que les assemblages de type « trait de Jupiter ».

### 3.2.2. L'aboutage par entures multiples

L'aboutage du bois par entures multiples est utilisé depuis les années 1900. Ce procédé est basé sur l'utilisation de coupes en biseau afin de coller les pièces entre elles. La faible résistance de l'aboutage bout à bout (*end-to-end*) a conduit au développement de la coupe en biseau, tout en améliorant la qualité de collage et les qualités mécaniques des pièces reconstituées. De nombreuses recherches ont été conduites pour améliorer l'efficacité et la résistance des joints sans pour autant augmenter le volume de bois utilisé. Le système d'assemblage à entures multiples est celui qui présente les meilleures performances.

L'aboutage à entures multiples est défini comme un assemblage longitudinal réalisé par collage de pièces de bois de fil et aux extrémités desquelles ont été pratiqués des coins trapézoïdaux semblables, appelés entures (CTBA Centre Technique du Bois 1973).

Il est aussi défini comme un joint entre les extrémités de deux pièces de bois dont les extrémités ont été profilées en une série de saillies qui s'emboîtent (CSA 1992). Ces saillies sont pratiquées perpendiculairement aux faces étroites ou aux grandes faces (joints horizontaux ou verticaux).

Cette technique d'assemblage a été améliorée par la mise au point de nouvelles géométries d'entures qui ont réduit la perte de bois dans la longueur des pièces assemblées et qui ont favorisé la caractéristique auto-serrante de l'assemblage. La multiplication du nombre d'entures diminue la perte de bois et améliore cette caractéristique.

En Europe, l'Allemagne (Institut Otto Graf) a été le premier pays à définir une norme (Din 68 140) pour cet assemblage dont l'utilisation s'est développée rapidement en construction-bois (Molliard et Zearo 2008).

En France, deux normes définissent principalement les systèmes d'aboutage à entures multiples : NF EN 385 - Aboutages à entures multiples dans les bois de construction. Exigences de performance et exigences minimales de fabrication ; NF EN 387 - bois lamellé-collé. Aboutages à entures de grandes dimensions.

Fisette et Rice (1988) montrent que ce système d'assemblage présente de multiples avantages.

Des bois déclassés ou de second choix peuvent être utilisés afin d'obtenir un produit fini de meilleure qualité dont la résistance et l'esthétique seront améliorées du fait de l'élimination des défauts indésirables. La technique d'aboutage permet d'obtenir des pièces de très grande longueur, très recherchées pour de nombreuses applications structurales.

L'utilisation de cette technique permet d'obtenir des pièces de bois de grande longueur à partir d'éléments de petite dimension résultant souvent d'une récupération de bois mis au rebut.

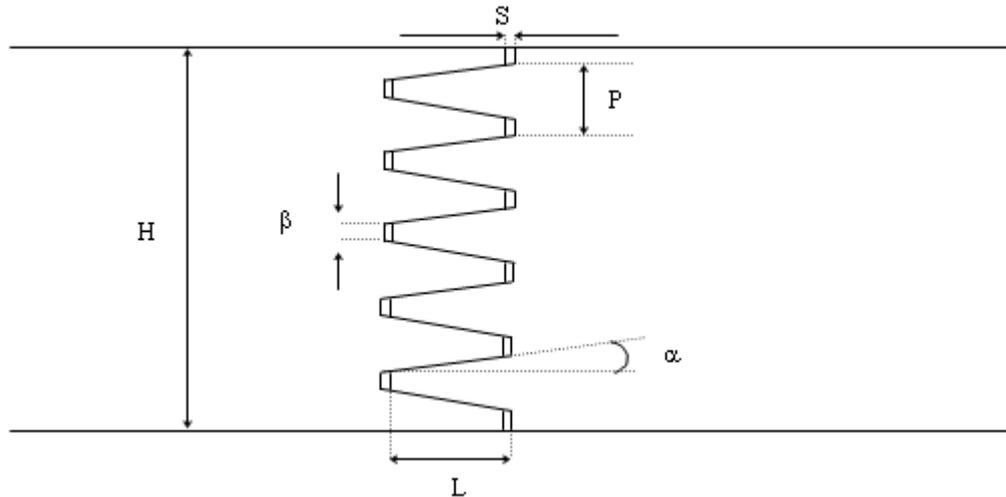


Figure 1.3.6: Description de la géométrie du profil d'aboutage

L : longueur

P : pas

 $\beta$  : épaisseur de l'extrémité de l'enture $\alpha$  : pente

S : jeu au fond de l'enture

H : largeur totale de l'assemblage

Les entures peuvent être usinées suivant la largeur (joint vertical) ou suivant l'épaisseur (joint horizontal). En joint vertical, la surface est plus importante pour concevoir la forme des entures bien qu'une tête de découpe plus large avec davantage de couteaux soit requise (Forest Products Laboratory 1999). Le joint horizontal est plus commun en Amérique du Nord et sert surtout à la fabrication de bois abouté pour la construction (Forintek 2001).

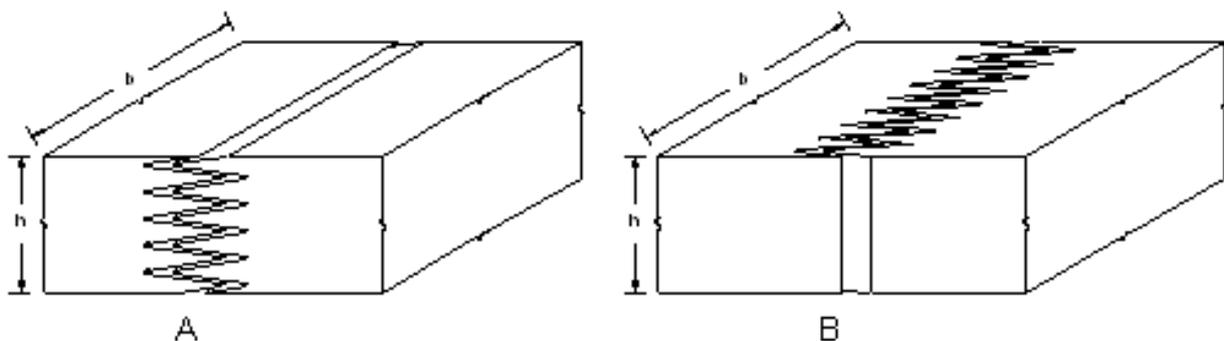


Figure 1.3.7 : profil d'un joint horizontal (A) et vertical (B)

### 3.2.3. Facteurs qui affectent la qualité des aboutages

La technique d'aboutage dépend d'un très grand nombre de paramètres (nature du bois, type de colle, procédé, etc.) dont l'ajustement conditionne directement la qualité du produit final.

Plusieurs facteurs affectent la résistance mécanique des assemblages à entures. Certains sont liés au matériau bois lui-même tels que l'espèce et ses caractéristiques (masse volumique, structure anatomique, teneur en extraits, etc.) alors que d'autres sont liés aux procédés de fabrication, au type d'équipements utilisés, à la nature des adhésifs, aux paramètres de collage (temps de durcissement, pression d'assemblage, temps ouvert, temps fermé), à l'orientation des entures dans la pièce, à la géométrie des joints (Selbo 1963), (Strickler 1967), (CTB Centre technique du bois 1973), (Fröblom 1975), (Strickler 1980), (Jokerst 1981), (Morkved 1982) et (Jokerst 1981).

La performance d'un assemblage à entures multiples dépend des propriétés du bois, de la géométrie des entures et de la qualité du collage (Bustos 2003). Le tableau 1.3.1 présente les multiples facteurs qui influent sur la performance mécanique d'un bois abouté.

Tableau 1.3.1 : Les principaux facteurs affectant la résistance mécanique des bois aboutés (d'après Fröblom 1975)

Les propriétés	Les facteurs
<b>Propriétés du bois</b>	Anatomie
	Masse volumique
	Proportion de bois final
	Nœuds (grandeur, quantité et localisation)
	Bois de tension ou de compression
<b>Géométrie des joints</b>	Type de joint
	Paramètres de profil de joint
	Direction de coupe des joints
<b>Caractéristiques de production</b>	Séchage et conditionnement
	Tronçonnage des blocs
	Type d'adhésif
	Pression d'assemblage
	Contrôle de la qualité dans l'usine

#### 3.2.3.1. Effets des propriétés du bois

Les propriétés du bois affectent la qualité de fabrication des joints à entures multiples. On retrouve ainsi des problèmes liés à la masse volumique, à la teneur en humidité, aux défauts (nœuds, moelle, gerces, etc), à la pente du fil et à la température du bois. Moody (1970) observe que la présence de moelle dans les joints diminue la résistance mécanique du bois de pin du sud. L'aptitude d'un bois au collage dépend de ses propriétés physiques, densité, porosité, teneur en humidité, retraits et gonflements (FPL 1999).

Bodig et Jayne (1982) montrent que la masse volumique et l'humidité du bois sont les deux caractéristiques qui affectent le plus les propriétés mécaniques d'un bois ou d'un assemblage. Fröblom (1975) souligne que la masse volumique est un des facteurs qui affecte la résistance

mécanique des assemblages à entures multiples. Ainsi, Samson (1985) a constaté que les variations de masse volumique entre les différentes pièces d'un assemblage sont à l'origine des variations de module d'élasticité des pièces aboutées.

### ***Masse volumique***

Le *Wood Handbook* (FPL 1999) mentionne que la résistance d'un joint de colle augmente lorsque la densité du bois augmente jusqu'à 700 à 800 kg/m<sup>3</sup> (à 12% d'humidité), puis décroît au-delà. Par ailleurs, (Sellers *et al.* 1988), à travers une étude sur l'effet du pH, de la perméabilité et de la densité sur l'aptitude au collage de bois de feuillus, ont montré que la densité est un facteur déterminant pour la résistance au cisaillement du plan de colle avec des adhésifs de types urée et résorcinol-phénol.

Bustos *et al.* (2003) et Sellers *et al.* (1988) expliquent que les bois qui présentent une densité élevée et une faible porosité nécessitent un temps d'assemblage plus élevé. L'étude réalisée en comparant entre le chêne rouge (bois à zone poreuse) et l'érable à sucre (bois à pores diffus) a montré que le chêne rouge nécessite deux fois plus de temps que l'érable à sucre lors de l'application de la pression d'assemblage afin de développer 50 % de la résistance.

### ***Teneur en humidité du bois***

D'après Jokerst (1981), le bois utilisé pour l'aboutage doit être préalablement séché à une teneur en humidité convenable pour un collage adéquat. Il est recommandé de sécher le bois à une teneur en humidité équivalente à celle qu'il atteindra lors de sa tenue en service (teneur en humidité d'équilibre variant généralement entre 6% et 17% selon la nature de la colle utilisée). De plus, l'Association des manufacturiers de bois de sciage du Québec 1999 explique que l'écart d'humidité entre deux pièces collées ensemble ne devrait pas dépasser 5%.

Ngangué (2000) a étudié l'impact du taux d'humidité sur la performance mécanique des joints d'épicéa collés avec une colle phénol-résorcinol formaldéhyde. Des paires de pièces de bois de même taux d'humidité ont été testés à 8%, 12%, 16% et 20%. Des combinaisons de paires de pièces à différentes teneurs en humidité ont été également évaluées. L'écart de taux d'humidité entre les paires était de 0%, 4%, 8% et 12%. La performance du collage a été évaluée à l'aide d'un essai de cisaillement des joints de colle. Une valeur optimale de 13,5% a été enregistrée pour les blocs de bois ayant une même teneur en humidité. Cependant, aucune différence significative n'a été observée de 8% à 20%. Des différences significatives ont été observées lorsque la teneur en humidité variait entre les blocs. Ngangué (2000) considère qu'une trop grande variation de taux d'humidité fera que l'énergie destinée à la prise de l'adhésif sera absorbée plutôt par le bois, en diminuant ainsi le taux de réticulation de la colle.

### ***Température***

Une étude réalisée par l'Association des manufacturiers de bois de sciage du Québec (1999) montre qu'une basse température peut induire un retard dans la prise de la colle tandis qu'une température élevée peut provoquer une diminution du temps de prise de la colle et activer le durcissement.

**Les nœuds**

Plusieurs auteurs ont montré que les propriétés mécaniques du bois sont très sensibles à la présence de nœuds. Bodig et Jayne (1982) considèrent que les lamelles de bois à jointer doivent être sélectionnées sans nœuds pour éviter des amorces de rupture.

D'après Samson (1980), les amorces de rupture sont reliées à des anomalies dans les entures correspondant principalement à des nœuds. Une distance minimale entre le nœud et la base des entures est donc généralement exigée. Cette distance est égale à trois fois le diamètre d'un nœud (Raknes 1982). Par ailleurs, Pellicane *et al.* (1987) ont mentionné que des nœuds de 6 mm à 13 mm de diamètre ont diminué la résistance mécanique à la traction de bois aboutés.

**3.2.3.2. Effets de la géométrie des joints**

L'effet de la géométrie des joints a été étudié par divers auteurs : Richards et Goodrick (1959) pour l'étude de la résistance à la traction des joints en scarf ; Selbo (1963), Richards (1963), Selbo (1975a), Ayarkwa *et al.* (2000a) sur l'effet du type de colle sur la qualité d'assemblage des entures multiples.

***Paramètres de profil des joints***

Le profil d'une enture multiple (figure 1.3.6) est déterminé par quatre paramètres : la longueur (L), le pas (P), la pointe  $\beta$  ou épaisseur de l'extrémité de l'enture et la pente de l'enture ( $\theta$ ) (Fisette et Rice 1988). Ces paramètres sont interdépendants les uns des autres de sorte que la modification d'un de ces paramètres changent automatiquement les autres selon l'équation suivante (Jokerst 1981, Selbo 1963) :

S : jeu au fond de l'enture

$$S = \tan \theta = \frac{\frac{1}{2}P - \beta}{L}$$

Richards et Goodrick (1959) ont évalué l'effet de la pente de l'enture sur la résistance mécanique à la traction du bois de pin du sud. Quatre rapports de pente ont été utilisés pour l'étude : 1/6, 1/9, 1/12, et 1/15. La pente de 1/15 a permis d'obtenir une résistance de 82 % (la résistance mécanique à la traction du bois massif), alors que la pente de 1/6 n'a permis d'atteindre que 54% de cette résistance. De plus, le CTB (1973) explique qu'une pente faible assure un bon collage de bois dans le sens du fil, ce qui augmente la résistance mécanique.

Selbo (1963) a réalisé une étude complète sur l'aboutage à entures en faisant varier les paramètres géométriques le pas, l'angle, l'épaisseur de l'extrémité de l'enture et l'essence de bois. Il a étudié le comportement au collage de deux résineux (épinette de Sitka et sapin douglas) et d'un feuillu plus dense (chêne blanc). Les effets combinés de trois largeurs de l'extrémité de l'enture  $\beta$ , de six pentes et de six pas ont été évalués.

L'auteur montre que l'augmentation des états de surface et la diminution de la pente assurent une résistance mécanique au cisaillement plus élevée. De plus, la résistance en traction longitudinale augmente avec la diminution de la pente des entures. Les entures doivent alors être assez longues et à faibles pentes afin de disposer d'une bonne surface de collage.

D'autres auteurs montrent aussi qu'il est important de maintenir les extrémités des entures les plus minces possibles pour atteindre de meilleures performances. Strickler (1980) recommande ainsi que l'épaisseur des entures n'excède pas 0,8 mm.

Pour Morkved (1982), la longueur des entures n'aurait théoriquement que peu d'importance sur les performances des joints tant que la surface de l'extrémité des entures reste constante.

Le tableau suivant présente les paramètres étudiés par Ayarkwa *et al.* (2000a) qui ont évalué l'effet de la géométrie et de la pression d'assemblage sur la résistance en flexion de trois feuillus africains tropicaux (Obeche, Moabi et Makoré). Trois géométries et trois pressions d'assemblage ont été étudiées.

Tableau 1.3.2 : Les paramètres de joint de l'enture étudié par Ayarkwa *et al.* (2000a)

Type	Longueur (L)	Pas (P)	Pointe ( $\beta$ )	Pente ( $\alpha$ )
F1	10 mm (0,40 pouce)	3,7 mm (0,15 po)	0,6 mm (0,02 po)	1/6
F2	18 mm (0,72 po)	3,7 mm (0,15 po)	0,6 mm (0,02 po)	1/12
F3	20 mm (0,80 po)	6,0 mm (0,24 po)	0,6 mm (0,02 po)	3/20

Les résultats montrent que le profil des entures a un effet significatif sur la résistance en flexion (MOR), mais pas sur la rigidité en flexion (MOE). Le profil F2 présente les meilleures performances ; l'efficacité des joints diminue quand la densité du bois augmente.

### ***Types de configuration de joints***

Le choix de la configuration des joints est de première importance car il conditionne directement la résistance mécanique de l'assemblage.

Selbo (1975) a étudié la résistance mécanique à la traction longitudinale de divers types de joints par rapport à celle du bois massif (fig. 1.3.8). Les joints à entures multiples (figure 1.3.8 B, C, D) présentent une meilleure résistance à la traction longitudinale que les bois collés bout à bout (fig. 1.3.8 (A)). Le joint à biseau plat (1.3.8 E) est à l'origine des joints à entures multiples. Les performances des joints à biseau plat ont été étudiées par Jessome (1958), Stieda (1958), Richards et Goodrick (1959) et Selbo (1975a). Ce type de joint est le plus performant parmi tous les types de joints. Cependant, son utilisation ne s'est pas développée car il engendre une perte de matière importante et ne permet pas d'assurer une bonne précision dans l'alignement des pièces (Jokerst 1981).

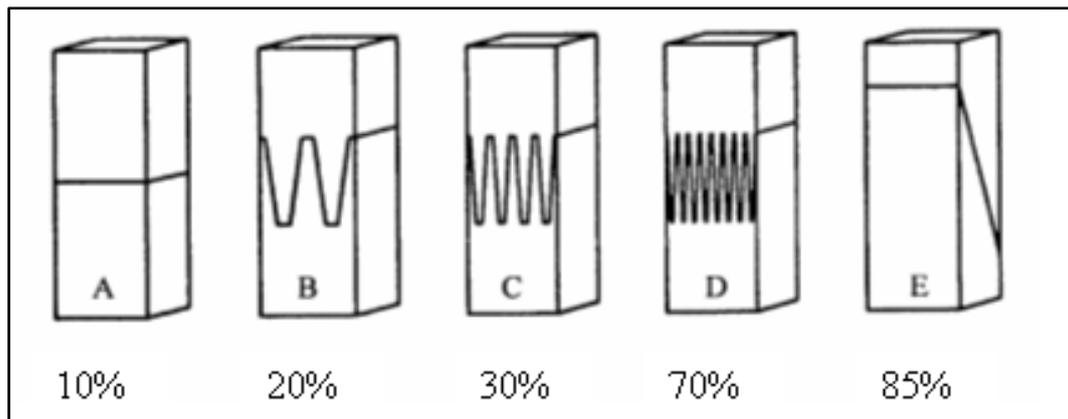


Figure 1.3.8 : effet du type de joint sur la résistance mécanique à la traction par rapport à celle du bois massif (d'après Selbo 1975).

Selon River (1991), le premier inconvénient des joints à entures multiples est lié au fait qu'ils présentent plusieurs points de concentration de contraintes, un à chaque extrémité d'enture, ce qui réduit leur efficacité structurale par rapport à celle du joint de type biseau plat (River *et al.* 1991).

#### **Orientation des entures**

De nombreuses configurations de joints sont utilisées par les fabricants, les plus courantes sont les configurations sans épaulement, mâle-femelle et inversée (figure 1.3.9, Bustos 2003).

Bustos *et al.* (2003a) ont conduit une étude sur l'aboutage de l'épicéa selon différentes configurations de joints horizontaux (sans épaulement, mâle-femelle et inversée). Les trois configurations avaient les mêmes caractéristiques géométriques.

Les auteurs ont montré que les joints sans épaulement présentent les meilleures performances.

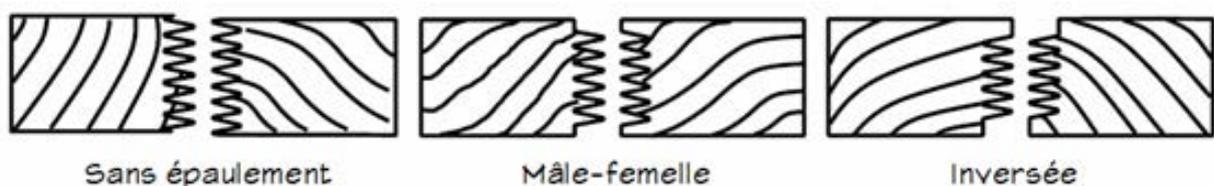


Figure 1.3.9: Types de configuration des joints A : sans épaulement, B : mâle-femelle, C : inversée (Bustos 2003)

#### **3.2.3.3. Effet des paramètres de production**

##### **Pression d'assemblage**

Fisette et Rice (1988) ont étudié les performances d'aboutages réalisés avec deux résineux, le pin blanc (*Pinus strobus*) et la pruche du Canada (*Tsuga canadensis*). Ils mentionnent qu'il est important d'appliquer une pression adaptée afin que les pièces soient bien assemblées, mais il ne faut pas que cette pression endommage les extrémités des entures.

Les auteurs concluent que 0,24 MPa et 0,35 MPa ont les deux pressions de serrage optimales respectivement pour le pin blanc et la pruche du Canada.

Bustos (2003) et Bustos *et al.* (2003b) ont étudié six pressions d'assemblage pour l'aboutage d'épinette noire ( $M_v = 448 \text{ kg/m}^3$ ) ; ils ont montré que la valeur de 3,4 est la pression optimale pour cette essence et cette pression assure une performance en traction maximale.

### ***Type d'adhésif***

King et Chen (2001) expliquent que l'adhésif utilisé dans les aboutages à entures multiples doit avoir un temps de durcissement court et un excellent pouvoir adhésif afin d'assurer la tenue des pièces avant toute manipulations ultérieures.

Vrazel et Sellers Jr. (2004) ont testé trois types d'adhésif - résorcinol formaldéhyde (RF), polyuréthane combiné à un polymère en émulsion aqueuse (PU/AEP), soja-résorcinol-formaldéhyde combiné (RF/Soya) - pour abouter du Douglas, du pin du Sud (groupe d'espèces du sud des Etats-Unis) et du Keruing (*Dipterocarpus* spp.). Les auteurs ont obtenu de meilleures performances en traction et en flexion pour le Keruing abouté avec un adhésif de type (RF) ; ces résultats sont expliqués par le fait que le Keruing ( $780 \text{ kg/m}^3$ ) est plus dense que le Douglas ( $550 \text{ kg/m}^3$ ) et le pin du Sud ( $580 \text{ kg/m}^3$ ).

### ***Coupe des entures***

La qualité des états de surface est un paramètre important à prendre en compte pour assurer la qualité des aboutages.

Sellers Jr. *et al.* (1988) expliquent qu'un usinage mal conduit génère des surfaces rugueuses ou au contraire trop lisses (surfaces dites « glacées ») et endommage les fibres de bois en surface. Le collage de surfaces mal usinées nécessite d'augmenter la quantité d'adhésif utilisée.

Ils précisent que les bois denses, souvent difficiles à coller, doivent présenter tout particulièrement de très bons états de surface afin d'assurer la qualité du collage.

## **Conclusion**

L'apparition et le développement de ces nouvelles techniques et procédés ont permis d'élargir l'utilisation de matériau bois et le développement de la filière bois d'ingénierie qui a fait de ce matériau un élément de construction, d'isolation, aux caractéristiques esthétiques appréciées.

L'optimisation des procédés de fabrication des assemblages bois collé exige le contrôle et le suivi de tous les paramètres de la chaîne de fabrication.

## Partie 1 : Etude bibliographique

### Chapitre 4 : le collage dans l'industrie du bois

## Introduction

Le collage est un procédé d'association de bois ou matériaux à base de bois très ancien. Cette technique se développe de plus en plus dans l'industrie de seconde transformation du bois, notamment pour la fabrication des panneaux, en ameublement, en menuiserie et en construction. L'apparition de nouveaux procédés de mise en œuvre permet d'obtenir des produits innovants et performants qui peuvent être obtenus en production artisanale, semi-industrielle ou industrielle en respectant des critères environnementaux.

De plus en plus, le collage du bois constitue un élément majeur de la transformation du bois et permet d'améliorer la qualité des produits. Sa mise en œuvre nécessite un matériel spécialisé qu'il faut choisir en respectant des critères technico-économiques bien déterminés.

A l'origine, les colles ont été fabriquées en utilisant des matériaux d'origine naturelle, surtout animale et végétale, mais aujourd'hui on trouve les composés chimiques multiples qui entrent dans la composition des adhésifs et ce qui permet d'offrir aux utilisateurs une large gamme de produits.

Les adhésifs sont obtenus par mélange de plusieurs constituants ayant chacun une fonction déterminée (agents mouillants, antioxydants, de réticulation, charges, fongicides, solvants) et d'un ou de plusieurs composants collants (résines, élastomères) qui assurent la résistance du collage réalisé. C'est le composant collant principal qui définit le type chimique de la colle, et donne son nom à la colle.

On peut considérer qu'une colle à bois remplit correctement son rôle si elle a des joints au moins aussi résistants que le bois lui-même, ce qui se traduit aux essais par une rupture en dehors du plan de collage avec arrachement des fibres.

### 4.1. Le collage du bois

Dans l'industrie du bois, le secteur du collage, notamment le collage des bois tropicaux, est sans doute celui qui a le plus progressé depuis les années 80. La mise sur le marché de nouveaux adhésifs toujours plus performants permet de coller tous les bois sans restriction,

Quelles que soient leurs caractéristiques, avec des exigences accrues de résistance à l'eau et de résistance mécanique.

Ces avancées technologiques permettent d'optimiser l'utilisation des bois tropicaux grâce au collage d'une partie de la ressource forestière et des débits difficilement utilisables en l'état : essences secondaires, grumes mal conformées ou de petit diamètre, bois présentant des défauts importants, bois déclassés, déchets de scierie.

Le bois massif reconstitué permet d'obtenir un matériau stable et homogène. L'association par collage d'essences d'aspects très différents offre de nouvelles perspectives pour intégrer davantage le bois dans des réalisations de haut de gamme et le collage du bois à d'autres matériaux est devenu possible.

La fabrication de produits collés requiert une parfaite conception des joints. Plusieurs paramètres peuvent être très pénalisants s'ils sont mal contrôlés pendant la fabrication. Un des facteurs déterminants est l'état des surfaces à encoller. En effet, celles-ci doivent être lisses et exemptes de tous composés contaminants tels que les poussières, les fibres arrachées, les résines et huiles..., susceptibles d'empêcher la pénétration de l'adhésif dans le bois. D'autres paramètres sont tout aussi importants pour permettre un assemblage résistant. Une humidité du bois trop élevée empêche le mouillage de la surface. Quant à la température, elle accélère le durcissement de la colle. Les bois à encoller doivent être propres, secs et rester dans cet état jusqu'à l'encollage (Elbez 1991).

Le collage des bois tropicaux paraît limité par des contraintes liées aux caractéristiques particulières de certaines essences et à la nécessité de respecter les règles de l'art. Cependant, des études menées notamment au Cirad ont montré que le collage de bois présentant des défauts marqués ou des caractéristiques extrêmes donne des résultats satisfaisants si les conditions de mise en œuvre préconisées sont respectées.

Le choix de l'adhésif sera fonction de l'emploi final du produit collé, du système de production, du temps d'assemblage nécessaire et du temps de pressage souhaité.

## 4.2. Les principaux types de colles

### 4.2.1. Les adhésifs aminoplastes

Ces colles mono ou bi-composants, thermodurcissables, assurent un collage irréversible obtenu ou accéléré par la chaleur. Ces colles ne sont pas thermoplastiques. On en distingue 4 principales catégories :

Les **colles phénoliques** (phénol-formol, = PF) sont mono-composant sans durcisseur ; elles nécessitent une température élevée ; elles sont très utilisées pour la fabrication des contreplaqués.

Les **colles résorcine** (résorcine-phénol-formol, = RPF) ont été les premières colles industrielles pour la charpente ; elles donnent d'excellents résultats pour des applications extérieures et ont une excellente résistance au feu.

Les **colles urée-formol** (UF) sont des bi-composants (résine + durcisseur) utilisées à froid ou à chaud ; l'application séparée de la résine et du durcisseur est possible.

Les **colles mélamine-urée-formol** (MUF) sont des bi-composants (résine + durcisseur) utilisées à froid ou à chaud ; l'application séparée de la résine et du durcisseur est possible. Ce sont des colles structurelles, notamment utilisées en lamellé-collé.

### 4.2.2. Les adhésifs thermoplastiques

Ces colles sont réversibles à la chaleur ; on en distingue quatre principales catégories :

Les **colles vinyliques** (polyacétate de vinyle, ou acétate de polyvinyle, = PVAc) sont des mono ou bi-composants (bi-composant avec durcisseur pour un classement D4) ; elles sont non structurelles.

Les **colles éthyl-vinyl-acétate** (EVA) sont des mono-composant ; elles ont une faible résistance à l'eau. Elles ont été très utilisées pour le collage du PVC (polychlorure de vinyle). Elles tendent à disparaître.

Les **colles hot-melt**, à base EVA (éthyl-vinyl-acétate), sont thermo-fusibles. Le collage se fait par refroidissement après fusion vers 200°C. Elles sont principalement utilisées dans l'emballage.

Les **colles néoprène** sont solvantées avec une base acétone. Elles tendent à disparaître au profit de **colles néoprène aqua-spray** (colle néoprène en phase aqueuse) qui sont des colles contact, avec application manuelle et adhésion instantanée. Elles sont très élastiques, avec une faible tenue à l'eau. Elles sont très utilisées dans l'industrie du canapé.

#### 4.2.3.        Les autres adhésifs

Les **colles EPI** (*Emulsion Polymer Isocyanates*) constituent un bon compromis entre les colles vinyliques et les colles polyuréthanes. Elles sont bi-composants.

Les **colles polyuréthane** (PUR) sont des mono-composants (réaction à l'humidité) ou des bi-composant (= PURbi, réaction chimique avec le durcisseur) thermodurcissables.

Les **colles époxy** sont toujours bi-composants. Bien que présentant une très bonne adhésion, elles sont très peu utilisées dans l'industrie du bois car très onéreuses. Leur emploi se limite à des collages intérieurs dans la fabrication de bateaux.

#### 4.2.4.        Les colles issues de la chimie verte

De nouvelles colles issues de la chimie verte et fabriquées à partir de végétaux tel que le maïs, la pomme de terre, le soja, etc., ont été développées.

Les premières productions industrielles utilisant ces adhésifs « bio » ont été prometteuses ; les réactions physiques et chimiques de ces adhésifs avec les bois sont différentes de celles observées avec les colles conventionnelles ; les processus de fabrication de ces colles sont aussi très différents.

Le développement de ces colles reste cependant limité par les problèmes de régularité et de sécurisation des approvisionnements en matières premières, ainsi que par la variabilité de leurs caractéristiques.

### 4.3.        Classification des collages

Une classification des colles a été établie en fonction de leur résistance à l'humidité et de leur niveau de sollicitation. Elle est régie par les normes NF EN 204 (avril 2002) *Classification des colles thermoplastiques pour bois à usages non structuraux* (= classification « D ») et NF EN 12765 (avril 2002) *Classification des colles à bois à résine thermodurcissable à usages non structuraux* (= classification « C ») qui définissent 4 classes :

**D1 et C1** : applications en intérieur à une température dépassant occasionnellement 50°C pendant une courte durée ; l'humidité du bois est de 15% maximum.

**D2 et C2** : applications en intérieur avec occasionnellement de courtes périodes d'expositions à l'eau ou à des atmosphères humides ; l'humidité du bois ne doit pas excéder 18 %.

**D3 et C3** : applications en intérieur avec de fréquentes expositions de courte durée à l'eau ruisselante, aux condensations, à des atmosphères humides, et/ou avec des expositions à une forte humidité ; applications en extérieur, en milieu abrité non exposé aux intempéries.

**D4 et C 4** : applications en intérieur avec des expositions longues et fréquentes à l'eau ruisselante, aux condensations ; applications en extérieur avec exposition aux intempéries mais avec une protection de surface adaptée (vernis ou peintures).

Pour ces quatre classes, le bois de référence est le hêtre pour les essais en laboratoire.

#### 4.4. Mécanismes régissant le collage du bois

Le collage est une technique ancestrale utilisée depuis très longtemps mais les mécanismes qui régissent le phénomène d'adhérence et d'adhésion sont complexes et restent en partie méconnus. La résistance et la durabilité des assemblages collés sont des problèmes récurrents et d'une importance capitale pour les industriels, et de nombreuses recherches sont engagées sur le sujet.

La technologie actuelle des collages permet d'éviter des assemblages mécaniques conventionnels onéreux et lourds à mettre en œuvre. Les colles assurent une adhésion et une cohésion entre deux supports-bois supérieures à celles du bois massif.

Un bon collage doit prendre en compte les paramètres intrinsèques du bois : taux d'humidité, densité, mouillabilité. Les conditions d'usinage et de fabrication dépendent de la nature des productions et des adhésifs choisis.

Le collage permet d'assembler deux substrats par l'intermédiaire d'un troisième composé qui est le plus souvent un adhésif polymère. Pour que l'assemblage soit performant et durable, il est nécessaire d'obtenir un niveau d'adhésion satisfaisant entre adhérent et support. Cette condition implique une bonne compréhension des mécanismes qui sont à l'origine du phénomène d'adhésion.

La réalisation d'un collage consiste à mettre en contact des surfaces imparfaites et à établir des liaisons physiques ou chimiques entre ces surfaces par le biais de l'adhésif. Il existe de nombreuses théories (mécanique thermodynamique et chimique) relevant de la physico-chimie ou d'autres disciplines, qui rendent compte de ces interactions entre adhérent et support. Cependant, aucune de ces théories ne permet d'expliquer à elle seule le phénomène d'adhésion, car celui-ci résulte de la superposition de nombreux mécanismes élémentaires (Daya 2006).

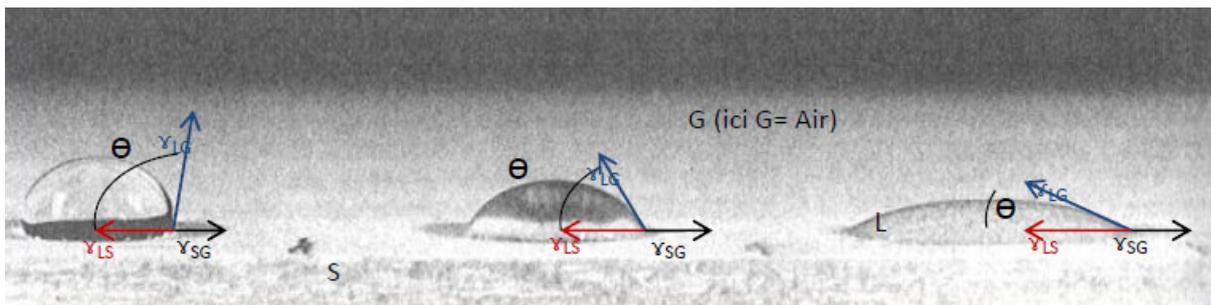
Dépendant de l'adhésif et du support utilisé, chaque théorie a son importance ; cependant, dans le cas du collage du bois, chacune des théories joue plus ou moins un rôle pour la formation d'un assemblage correct. Ces mécanismes font encore l'objet d'un débat au sein de la communauté scientifique (Bourreau 2011).

#### 4.4.1. Mouillabilité, grammage de colle et temps d'assemblage

La **mouillabilité** est la base de la théorie de l'adhésion par absorption thermodynamique. De manière générale, la mouillabilité est un critère de caractérisation de ce qui se passe lorsqu'un liquide arrive en contact avec un solide. Toutes les théories interviennent dans le phénomène d'adhésion, mais la mouillabilité joue un rôle déterminant pour les adhésifs.

La mouillabilité est une action physique complexe qui dépend de plusieurs facteurs, mais en premier lieu de la valeur de l'angle de contact entre la goutte de colle et son support, et de la tension superficielle.

Pour tout corps (liquide, solide, gazeux) des forces (d'attraction) maintiennent la cohésion entre les molécules qui le composent. Au sein même d'un corps, la somme de ces forces est nulle, mais à l'interface de deux corps, elle devient non nulle et engendre une tension superficielle, notée  $\gamma$ , qui explique la forme sphérique d'une goutte, caractérisée par l'angle  $\theta$  mesurée entre la tension superficielle Liquide/Solide et la tension Liquide/Gaz (figure 1.4.1) (Bécué 1999).



Support imperméable

Mouillabilité parfaite

Trop forte absorption

Figure 1.4.1: Illustration de la mouillabilité du bois

Comme le montre la figure ci-dessus, plus  $\theta$  est faible, plus le liquide s'étale sur la surface et donc plus le support est mouillant. Cependant, un mouillage trop important n'est pas conseillé car il s'accompagne d'une pénétration excessive de la colle.

Il est à noter que cette technique de mouillage a été élaborée en considérant des surfaces parfaitement planes et homogènes. Selon Wålinder (2000), la nature hygroscopique du bois, combinée à sa porosité, influence largement la mesure de mouillabilité (angle de contact) due à une pénétration directe du liquide dans ce matériau, jusqu'à ce qu'il soit complètement saturé avec ce même liquide (Scheikl *et al.* 2002).

La mesure de ces tensions de surface présente un intérêt majeur puisque ces tensions sont en étroite corrélation avec l'adhérence d'un support bois par une résine (Elbez et Bentz 1991 ; Elbez 1986). Le phénomène d'adhérence est représenté par le pourcentage de fibres de bois arrachées lors d'un essai mécanique de rupture par cisaillement (essai normalisé et obligatoire pour apprécier la bonne tenue d'un joint de colle).

Le **grammage** ou la consommation est la valeur qui correspond à la quantité de colle appliquée sur une surface donnée. On la mesure en grammes par mètre carré.

Pour obtenir un bon collage, il faut déposer une quantité optimale d'adhésif, c'est-à-dire ni trop ni trop peu.

Les grammages de colle à appliquer dépendent de la mouillabilité des supports mais aussi des conditions de fabrication et des temps d'assemblage.

Le **temps d'assemblage** est le temps passé entre l'encollage et le pressage ; il se décompose en un temps d'assemblage ouvert (TAO) qui est le temps entre l'encollage et l'assemblage des pièces à coller, et un temps d'assemblage fermé (TAF) qui est le temps entre l'assemblage des pièces à coller et le pressage.

Le temps ouvert dépend beaucoup de l'épaisseur et de la quantité de colle appliquée, mais aussi de la température et des mouvements de l'air ambiant qui peuvent provoquer le séchage prématuré du film de colle. Le temps ouvert de l'adhésif doit être supérieur au délai qui s'écoule entre l'encollage et l'assemblage.

#### **4.4.2.        Pénétration de la colle**

La pénétration de la colle est liée à la mouillabilité des supports ; elle est plus difficile pour les bois à forte densité ou à teneur élevée en extractibles (Ipé, Basralocus, Robinier ...) ; elle dépend aussi de la porosité du bois qui est très élevée pour certaines essences (Hêtre, Sapelli, Samba, ...).

La quantité de colle appliquée dépend de l'essence à coller, du temps d'assemblage, et de l'orientation de l'usinage par rapport au fil du bois ; ainsi, une orientation transversale, telle que celle du bois de bout des entures, nécessite une application importante de colle.

#### **4.4.3.        Pression de collage**

Le pressage permet d'assembler deux pièces de bois en garantissant leur planéité pour obtenir une épaisseur de joint de colle constante. Il participe au parfait jointement des éléments de bois collés. Il facilite la pénétration de la colle dans les pores du bois ce qui améliore l'adhésion mécanique.

Les pressions à appliquer dépendent de la nature de la production et de la mouillabilité des bois. L'état de surface des bois avant encollage est important et ne doit pas présenter de variations d'épaisseur supérieure à 0,2 mm.

#### **4.4.4.        Polymérisation des adhésifs**

Après encollage et pressage, les adhésifs durcissent par polymérisation, soit par évaporation du solvant (polymérisation physique des colles PVAc, néoprènes), soit par réaction chimique (polymérisation chimique des colles UF, MUF, PUR)

#### **4.4.5.        Stabilisation**

Afin d'améliorer la productivité, le collage est souvent activé à l'aide de durcisseurs réactifs pour les aminoplastes, et par une augmentation de la température. Une stabilisation est

nécessaire en sortie de presse pour permettre une polymérisation complète du joint de colle, et un refroidissement du panneau à température ambiante.

Pour les tests de contrôle de classification de résistance, une période de stabilisation de 1 semaine à 15 jours est imposée par les organismes de certification.

#### 4.5. Facteurs influençant la mouillabilité de surface et la qualité d'adhérence

La mouillabilité peut être influencée par de nombreux paramètres dont :

- L'essence de bois utilisée, du fait de ses propriétés anatomiques et chimiques particulières (Shupe *et al.* 2001, in Cool 2011) ;
- Le procédé d'usinage utilisé, avec notamment l'influence très importante des paramètres de coupe sur la rugosité de surface obtenue (de Moura 2006 ; Outahyon 2008 ; Cool 2011).

D'après de Moura et Cool (2006 ; 2011), l'augmentation des paramètres de la rugosité montre que cette dernière améliore les propriétés du mouillage du bois ; ils concluent qu'il existe une forte corrélation entre la rugosité et la mouillabilité.

Par ailleurs, les travaux de Nussbaum (1999), Gindl *et al.* (2004), Šernek *et al.* (2004), Cool (2011) ont montré que le temps passé entre l'usinage de la surface et le moment où le test de mouillabilité était réalisé avait une influence significative sur les résultats obtenus. Les auteurs l'expliquent par un phénomène d'oxydation ou de vieillissement rapide des surfaces en fonction du temps (après usinage). Les propriétés de mouillabilité du bois se détériorent donc avec le temps.

Wenzel (1936), Triboulot (1984), Maldas et Kamdem (1999) ont conclu que la rugosité joue un rôle important sur les propriétés de mouillage d'un bois.

L'augmentation de la rugosité semble accélérer la dispersion du liquide sur la surface (Wenzel 1936 ; Parker et Taylor 1966; Lewis et Forrestal 1969).

Wei *et al.* (2006) ont étudié l'effet du ponçage et du rabotage sur la mouillabilité en considérant que la surface de bois est influencée par le procédé d'usinage.

Les auteurs ont observé une absorption plus constante de l'adhésif pour les surfaces poncées et l'inverse pour les surfaces rabotées ; ils précisent que le taux de mouillage est plus élevé même si l'angle de contact initial des surfaces rabotées est élevé. L'endommagement cellulaire et l'obstruction des cellules du bois poncé seraient responsables de cet effet.

Feist *et al.* (1985) expliquent que les surfaces très rugueuses peuvent présenter des éléments anatomiques qui ne sont pas fermement liés à la surface. Ceux-ci risquent de se détacher suite à des cycles de gonflement et de retrait créant ainsi des zones de faiblesses à la surface. Une surface rugueuse est donc davantage perméable.

Hernández (1994) a observé une meilleure résistance à l'adhésion après un cycle de vieillissement pour les surfaces d'érable à sucre ayant subi un rabotage. L'auteur suppose que le rabotage périphérique induit davantage de microfissures et que celles-ci affectent l'adhésion.

## Conclusion

Le collage du bois présente un intérêt majeur dans le domaine des matériaux. Cependant, la maîtrise et l'optimisation de ce procédé exigent le contrôle de plusieurs paramètres lors du collage du bois, ces paramètres jouent un rôle déterminant de la qualité du produit final collé.

Le développement des techniques de collage contribue à optimiser l'utilisation des bois en assurant une meilleure valorisation d'une partie de la ressource ou de la production qui ne peut être que très difficilement utilisée en l'état :

- essences faiblement disponibles dans les massifs forestiers et qu'il est donc nécessaire d'utiliser en association avec d'autres espèces,
- grumes mal conformées ou de petit diamètre (bois d'éclaircie) dont il n'est pas possible de tirer des sciages de dimension commerciale acceptable,
- essences difficiles à transformer (faibles rendements au sciage, problèmes de séchage),
- bois présentant des défauts importants qui doivent être purgés ou dont les caractéristiques particulières rendent très délicate une utilisation sous forme massive (très forts retraits de séchages, comportement technologique très hétérogène).
- bois sciés déclassés, déchets de scierie.

La production de bois massif reconstitué (BMR) par collage offre de nombreux avantages. Ainsi, le nouveau matériau obtenu présente des propriétés plus homogènes que celles du bois massif, et les produits finaux se caractérisent par une plus grande stabilité. Les techniques de reconstitution par collage permettent de s'affranchir des contraintes de dimension et d'élargir les possibilités d'utilisation du bois.

## Partie 2 : Matériels

### Chapitre 1 : matériels (collecte de bois, échantillonnage des éprouvettes et fabrication des composites)

## Matériel

### 1.1. Origines des bois étudiés

Les bois utilisés sont d'origine algérienne et proviennent de deux wilayas du nord du pays, la wilaya de Bouira et la wilaya de Béjaïa.

#### \* Wilaya de Bouira

La wilaya de Bouira se situe dans la région centre-nord du pays à environ 120 km au sud-est d'Alger ; elle est caractérisée par un climat qui est chaud et sec en été, froid et pluvieux en hiver. La pluviométrie moyenne est de 660 mm/an au nord et de 400 mm/an dans la partie sud. Les températures varient entre 20 et 40°C de mai à septembre et de 2 à 12°C de janvier à mars. Le territoire de la Wilaya de Bouira est caractérisé par 5 grands espaces géographiques: la Dépression Centrale, la Terminaison Orientale de l'Atlas blidéen, le versant du Djurdjura, la Chaîne des Bibans et les Hauts Reliefs du Sud, et dépression Sud Bibanique.

Les zones boisées tiennent une place importante dans la wilaya, elles occupent 112 250 ha (25,20% de la superficie totale de la wilaya). Les principales essences forestières sont le pin d'Alep, le chêne vert et le chêne liège, et le cèdre de l'atlas (sud Djurdjura)

Cette zone est caractérisée par un relief montagneux (jusqu'à 2308 mètres, point culminant Djebel Lalla khedidja sur la chaîne du Djurdjura) fortement disséqué par un réseau hydrographique important, donnant lieu à une grande diversité de paysages et de milieux physiques. La zone de prélèvement est située sur le versant sud semi-aride du Djurdjura.

#### \* Wilaya de Béjaïa

Le deuxième lieu de prélèvement est la wilaya de Béjaïa qui se situe en bordure de la mer Méditerranée, à 180 km à l'est d'Alger. Le climat de Béjaïa est de type subtropical, selon la classification de climat, avec des hivers doux et pluvieux et des étés chauds et secs. La wilaya reçoit en moyenne 670 à 1000 mm de pluies par an. Les températures sont douces sur le littoral (hiver doux, été chaud), un peu moins dans la vallée de la Soummam. En revanche, la zone de montagne subit des gelées fréquentes. Les vents dominants sont les vents du nord-ouest (vents marins qui s'engouffrent facilement dans la vallée de la Soummam).

**La zone de montagne** est formée de la chaîne des Bibans Babors et de l'ensemble Akfadou-Gouraya ; elle occupe les trois quarts de la superficie totale de la Wilaya et présente des pentes partout supérieures à 25%. Les sols en majorité siliceux sont érodés. La superficie forestière totalise 122500 ha, soit 38% de la superficie totale de la wilaya (Ministère de l'Agriculture 2009).

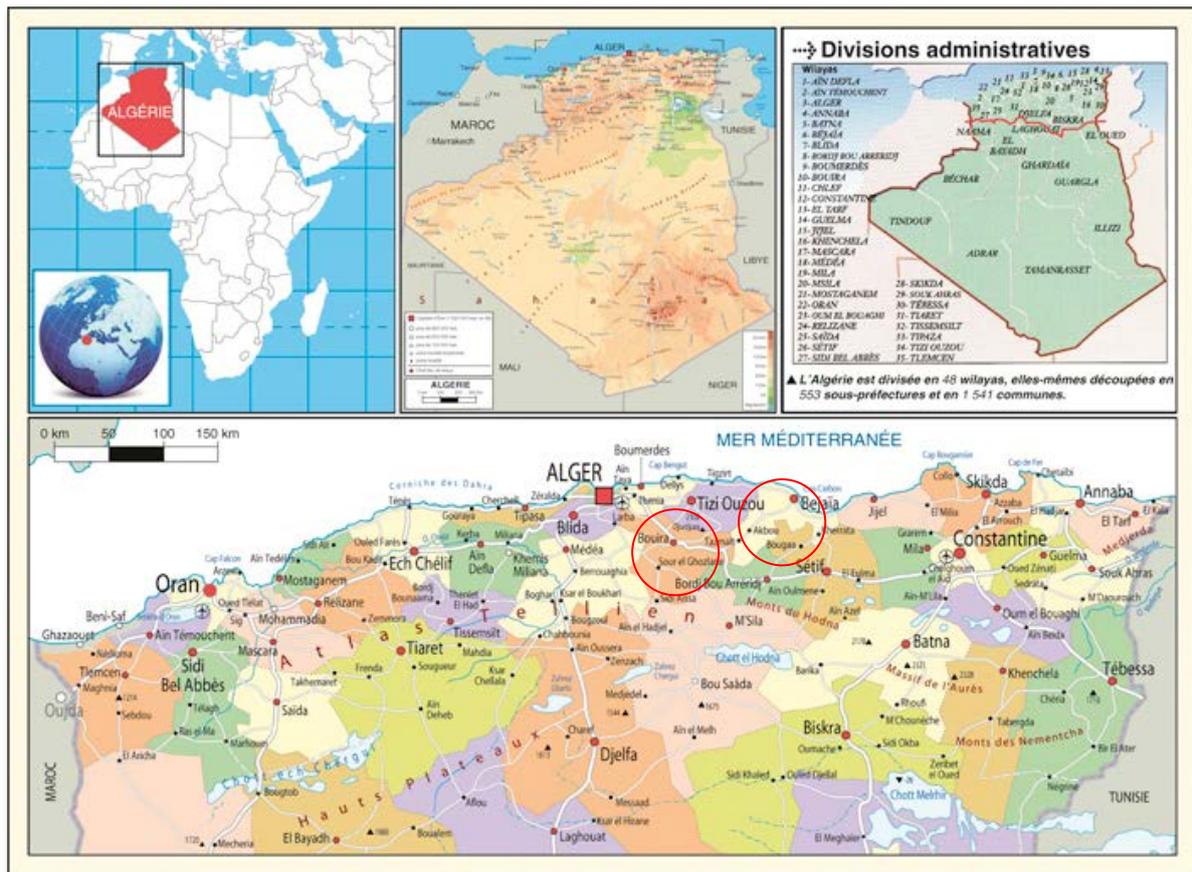


Figure 2.1.1 : Division administrative de l'Algérie de Nord : les deux sites de prélèvement sont repérés par un cercle rouge

## 1.2. Caractéristiques des sites de prélèvements

Les bois ont été échantillonnés dans les deux stations forestières de Haizer (région de Bouira) pour le pin d'Alep et de Akfadou (région de Béjaïa) pour le chêne afarès et le chêne zéen.

### 1.2.1. Station forestière d'Akfadou

La forêt d'Akfadou est une vaste étendue boisée. Elle constitue un des plus importants massifs forestiers de l'Afrique du Nord. Ses bois possèdent toutes les caractéristiques dignes des forêts nordiques ; cette forêt domaniale de l'Akfadou, administrativement dépendante des conservations des forêts de Tizi-Ouzou et de Béjaïa, représente 18% de la chênaie caducifoliée algérienne. Elle se distingue par sa structure globale régulière, sa production soutenue et par sa diversité floristique. La lisière forestière est d'une superficie d'environ 400 hectares et une densité importante qui atteint par endroits 1000 arbres /hectare.

Elle est essentiellement composée de peuplements de chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.), de chêne afarès (*Q. afares* Pomel) et de chêne liège (*Quercus suber* L.). Ces peuplements présentent une mosaïque d'âges divers.

Le chêne zéen est l'essence dominante jusqu'à 1 646 m d'altitude où il occupe environ 45 % de la superficie boisée.

Le chêne afarès abonde sur quelques lignes de crête, les versants sud et sud-ouest et les terrains caractérisés par des sols plus ou moins argileux. Le plus souvent, il est situé au-dessous de 1 250 m d'altitude. Les peuplements purs occupent environ 15 % de la forêt d'Akfadou et sont localisés le long de la ligne de crêtes menant de la borne 11 à Agoulmime Aberkane, à Laoudda Tamokrante, à Lazella, à Timri el Vaz, Tala-Kitane et l'axe Adekar-Agoulmime Aberkane (autour du vide de Laâzib, Messaouden 2008).

Les peuplements mixtes de chêne zéen et de chêne afarès se retrouvent partout dans les zones de transition. Il en est de même pour les peuplements mixtes de chêne zéen et de chêne liège, limités à une altitude de 1 100 m. Ces peuplements mixtes couvrent environ 25 % de la zone boisée. Quant au chêne liège à l'état pur, il occupe 15 % de la zone périphérique de l'Akfadou. De gros chênes zéens et afarès, âgés de plus de 500 ans, sont présents dans de nombreux sites. Ces individus témoignent de l'origine ancestrale de la chênaie de l'Akfadou (Messaoudène 1989).

L'Aulne glutineux (*Alnus glutinosa*), l'If (*Taxus baccata*) et le Houx (*Ilex aquifolium*) méritent aussi une attention particulière. Ils colonisent partout les stations les humides de l'Akfadou (marécages), au voisinage des sources et cours d'eau où ils forment parfois de très beaux bouquets. Parmi les espèces caducifoliées figurent aussi l'Erable (*Acer obtusatum*), le Sorbier (*Sorbustorminalus*) et le merisier (*Cerasus avium*). L'Erable peut parfois co-dominer avec le chêne zéen, voire même dominer pour constituer de véritables Erablières occupant des surfaces cependant assez réduites. Quant au Sorbier et le Merisier, bien qu'assez fréquents, ils sont rarement abondants. Bien que l'aire de ces espèces soit limitée dans l'Akfadou, leur intérêt sur le plan écologique est important (Messaouden 2008).

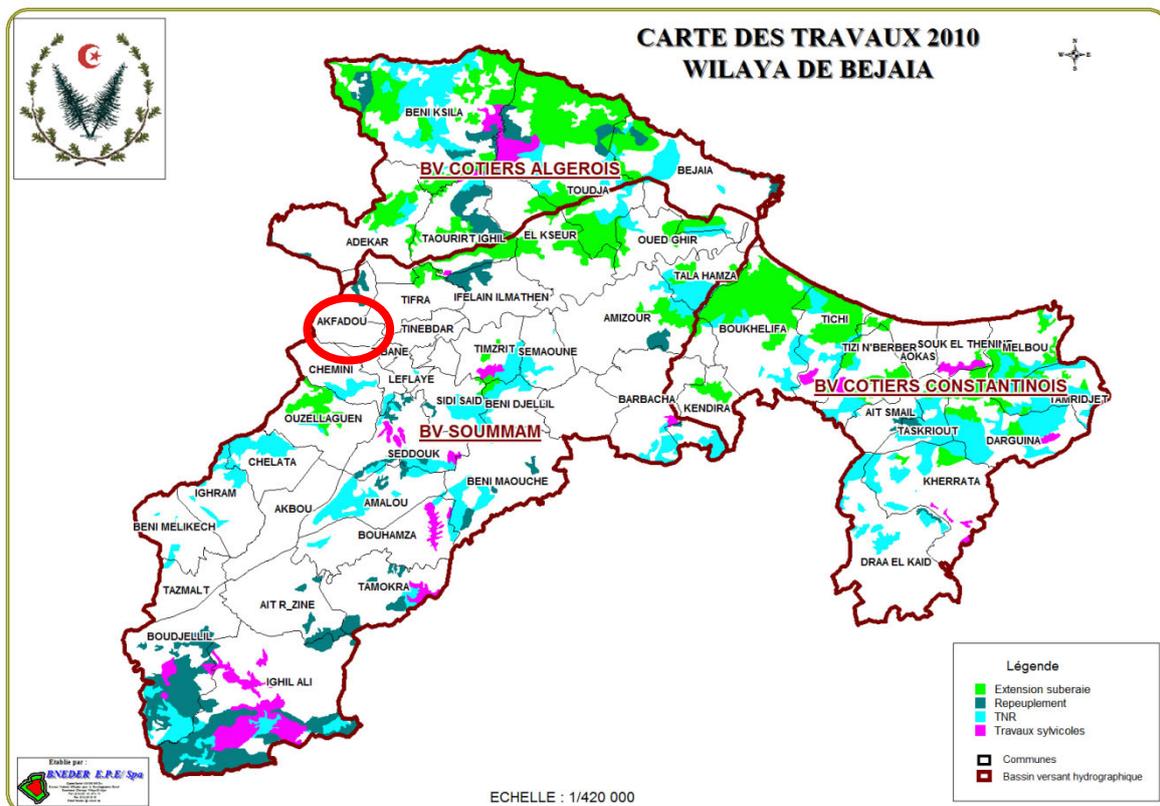


Figure 2.1.2 : Carte des travaux forestiers (Bejaia) Source : BNEDEP 2009.



Figure 2.1.3 : Forêt d'Akfadou (Béjaia –Algérie) (DERBAL W.)

### **1.2.2. Station forestière Haizer**

La zone forestière de Haizer se situe dans la partie nord-est de la wilaya de Bouira. La commune comporte 21 villages et s'étend sur superficie de 8900 ha, avec une densité de 206 habitants au Km<sup>2</sup>.

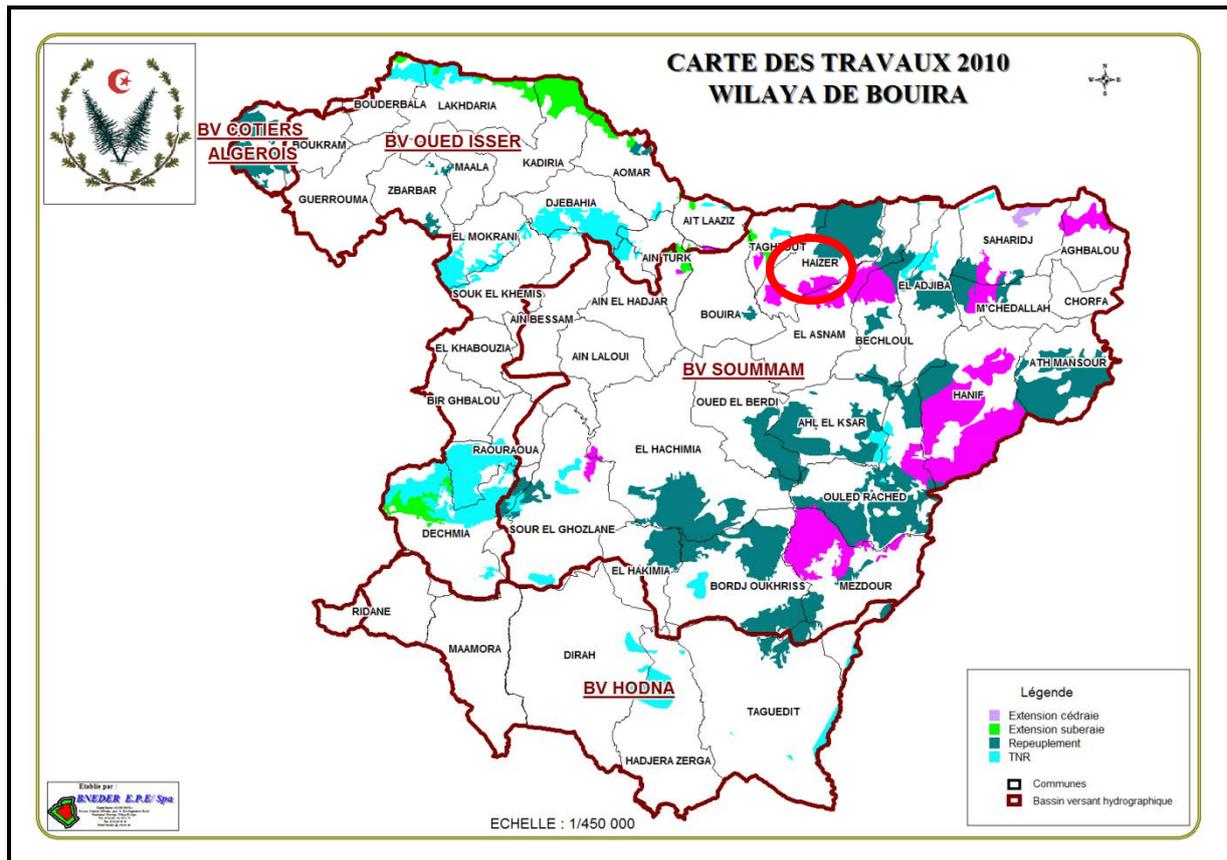


Figure 2.1.4 : Carte des travaux forestiers (Bouira)

Source : BNEDER 2009.

### 1.3. Les critères de prélèvement

- Pour chaque espèce, 4 ou 5 arbres de 8 à 13 m de hauteur et de 40 à 55 cm de diamètre (arbres considérés comme mature et constitués majoritairement de bois adulte) ont été sélectionnés.
- Le découpage des arbres a été fait à 1,30 m du sol.
- Les bois tronçonnés sous forme de grumes de 1,3 m ont été transportés à l'usine de transformation de bois.
- Par ailleurs, des billons de 50 cm ont été débités pour les éprouvettes des essais normalisés. Ces billons de 50 cm ont été transportés à l'Université de Boumerdès pour le prélèvement des échantillons destinés à déterminer les propriétés physiques et mécaniques des trois essences étudiées.
- La fabrication des produits aboutés puis lamellés (carrelets trois plis) a été réalisée dans l'entreprise de transformation des bois TRANSBOIS (Béjaïa - Algérie)

Tableau 2.1.1 : Critères de prélèvement

	Nombre d'arbres	Hauteur (m)	Diamètres (cm)	Nombre de billons / arbre
<b>Pin d'Alep</b>	4	8 à 11	40 à 50	7
<b>Chêne afarès</b>	5	12 à 13	50 à 55	9
<b>Chêne zéen</b>	5	11 à 13	52 à 55	8



Figure 2.1.5 : Sélection puis abattage des arbres.



Figure 2.1.6 : Collecte des billons tronçonnés (chêne afarès).

## 1.4. Logique d'échantillonnage

Dans cette partie, nous présentons la méthode de prélèvement des éprouvettes pour la détermination des propriétés technologiques des trois essences.

### 1.4.1. Description du protocole de prélèvement des éprouvettes pour les essais normalisés

Nous décrivons ici la démarche complète adoptée pour l'élaboration des échantillons pour les essais physico-mécaniques ; les bois échantillonnés ont suivi plusieurs phases depuis le conditionnement des billons dans un bassin d'eau jusqu'à la découpe des éprouvettes.

#### 1.4.1.1. Conditionnement des billons dans l'eau

Les billons de 50 cm de longueur qui ont été tronçonnés ont été transportés à l'atelier-bois (Université de Boumerdès) et conditionnés dans l'eau dans un bassin pendant 10 jours afin que le bois exsude la résine.



Figure 2.1.7 : Conditionnement des billons dans l'eau.

#### 1.4.1.2. Traçage des billons

A la fin du conditionnement, les billons ont été récupérés dans le bassin et nous avons procédé au traçage transversal des éprouvettes le long d'un diamètre en veillant à obtenir une bonne orientation (cernes le plus parallèles possible à une face des éprouvettes, figure 2.1.8)

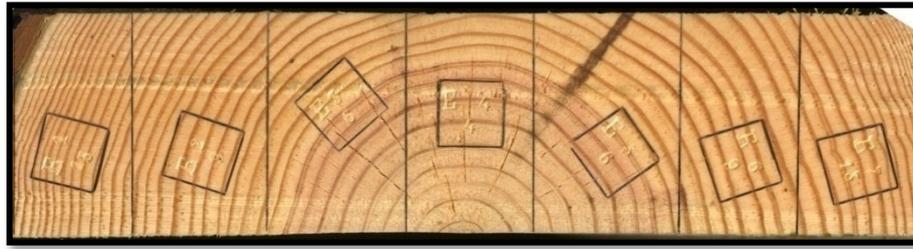


Figure 2.1.8 : Traçage transversal des éprouvettes le long d'un diamètre (photo D.Guibal).

### 1.4.1.3. Usinage des éprouvettes

Des plans de débits ont donc été établis pour chaque planche de façon à optimiser le nombre d'éprouvettes par planche. Les opérations d'usinage successives permettant d'obtenir les éprouvettes ont été les suivantes : sciage, dégauchissage, rabotage et mise au format. Les dimensions des différentes éprouvettes sont précisées dans chaque partie correspondant à chaque type d'essai.

#### *Sciage des billons*

Le sciage des billons a été réalisé à l'aide d'une tronçonneuse suivant le traçage réalisé pour avoir des plateaux diamétraux de 50 cm de longueur et 5 cm d'épaisseur.

#### *Rabotage des surfaces*

Le rabotage des plateaux découpés a permis de ramener les débits à 30 mm d'épaisseur, débits dans lesquels ont été prélevés les ébauches des éprouvettes d'essai destinées aux mesures de masse volumique, de densité, de retrait radial et tangentiel, et de propriétés mécaniques (flexion statique, compression, cisaillement).



Figure 2.1.9 : Dégauchissage, rabotage et mise au format des bois débités (DERBAL W).

#### *Découpe des éprouvettes*

Le prélèvement des éprouvettes pour les essais a été réalisé sur une scie à table selon le traçage réalisé en se conformant aux différentes normes en vigueur pour chaque caractéristique :

- Norme française NF B51-005 (09-1985) « Bois - Détermination de la masse volumique »

Cette norme décrit la méthode permettant de déterminer la masse volumique du bois ; selon cette norme, les éprouvettes d'essai pour la mesure de la masse volumique sont de forme cubique et de 20 x 20 mm de section.

- Norme française NF B51-006 (09-1985) « Bois - Détermination du retrait »

Cette norme fixe les méthodes permettant de déterminer les variations de volume d'une éprouvette de bois caractérisées par le retrait volumique total, le retrait dans le sens radial et dans le sens tangentiel du bois ; elle précise les éprouvettes d'essai sont de forme cubique et de 20 x 20 mm de section.

- Norme européenne EN 314-1 (2005) décrivant l'essai de cisaillement

Selon cette norme, les éprouvettes d'essai pour la détermination du module de cisaillement sont de forme rectangulaire, avec une section de 20 x 20 mm et 200 mm de longueur ; elles présentent deux entailles comme le montre la figure 2.1.11. Cette norme originellement utilisée pour le contreplaqué définit une méthode d'essai transposable au bois massif.

- Norme française NF B51-007 (09-1985) « Bois - Essai de compression axiale »

Cette norme fixe la méthode permettant de déterminer, sous un effort progressivement croissant, une contrainte de rupture en compression exercée parallèlement au fil du bois.

Selon cette norme, les éprouvettes ont la forme d'un prisme droit de section carrée de 20 mm de côté et une longueur parallèle au fil du bois de 60 mm.

- Norme française B51-008 (1987) « Bois - Essai de flexion statique - Détermination de la résistance à la flexion statique de petites éprouvettes sans défaut »

Selon cette norme, les éprouvettes d'essai de flexion quatre points pour la détermination de la contrainte en flexion longitudinale sont de forme rectangulaire de section carrée de 20 mm de côté et 360 mm de longueur.

**Schéma synoptique des éprouvettes destinées aux essais physiques et mécaniques**

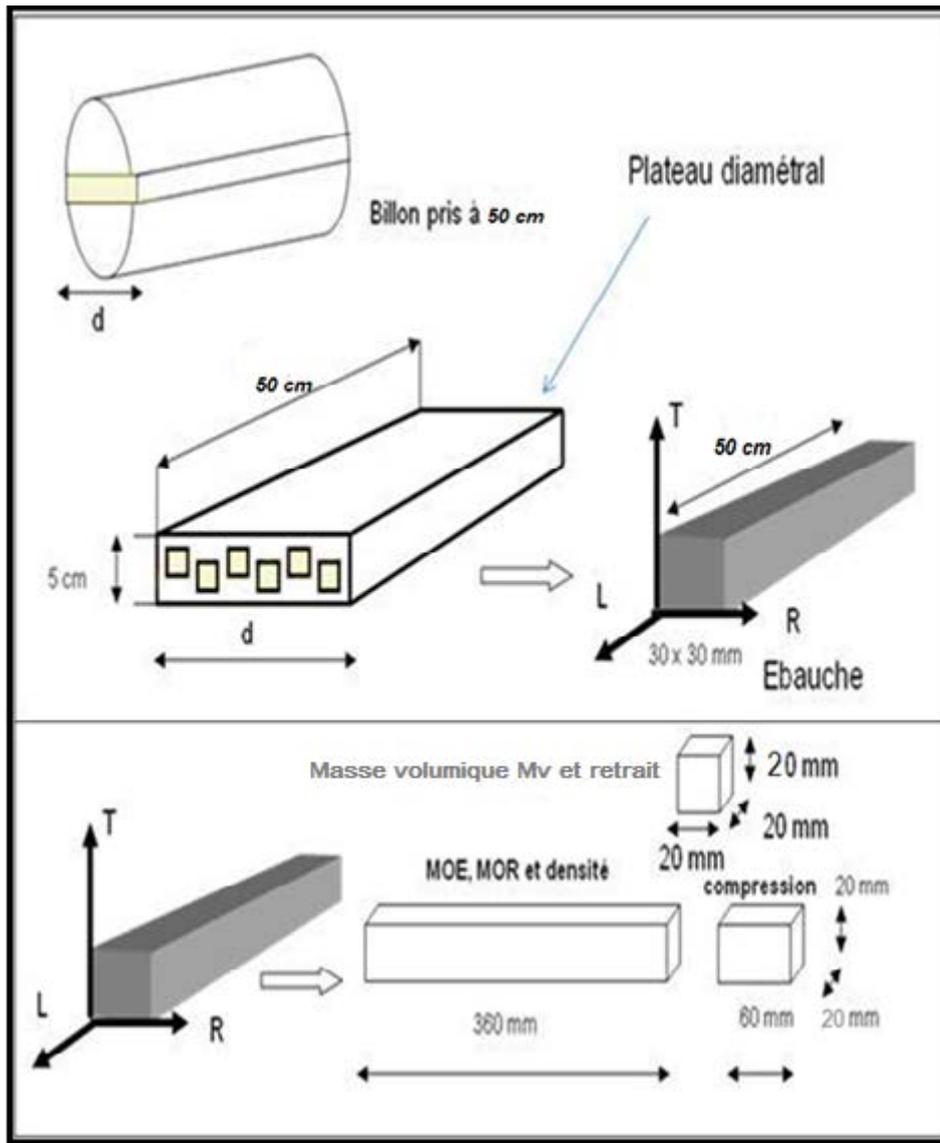


Figure 2.1.10 : Schémas synoptique de découpage des éprouvettes

Eprouvettes d'essai de cisaillement avec entailles ( EN 314-1,2005)

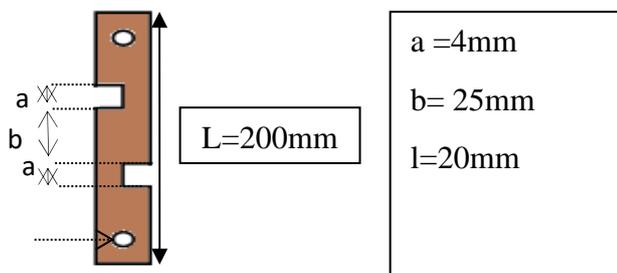


Figure 2.1.11 : Eprouvette d'essai de cisaillement

### 1.4.2. Prélèvement spécifique des éprouvettes pour la mesure du point de saturation des fibres (= PSF)

Les éprouvettes d'essai pour la mesure du point de saturation des fibres (20 \*25 mm de section transversale et 10 mm de hauteur) ont fait l'objet d'un mode de prélèvement spécifique, parallèlement aux prélèvements pour les autres essais physiques et mécaniques : prélèvements initiaux dans 2 billons provenant de 2 arbres et prélèvements complémentaires dans des barreaux de 400 mm de longueur et 20\*25 mm de section destinés aux essais de la méthode Bing et qui présentaient des défauts.

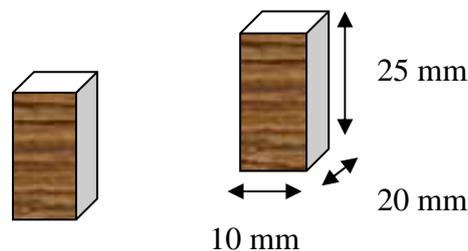


Figure 2.1.12 : Echantillonnage et marquage des éprouvettes pour l'essai de PSF.

Les 2 types de produits reconstitués par collage et caractérisés, les aboutages à entures multiples et les carrelets trois plis, ont été fabriqués dans l'unité de transformation de l'entreprise Transbois.

## 1.5. Chaîne de transformation du bois jusqu'à la fabrication des carrelets trois plis

Les grumes tronçonnées en billons de 1,30 m ont été transportées à l'entreprise Transbois (Béjaïa) qui a pris en charge la totalité de la transformation, depuis le sciage des billons jusqu'à la fabrication des produits lamellés-aboutés et des carrelets trois plis.

L'âge des quatre arbres est estimé compris entre 30 et 40 ans mais n'est pas connu précisément.

La traçabilité des bois en provenance de chacun des quatre arbres n'a pas été suivie car l'objectif de l'étude n'était pas d'analyser les différences de comportement du bois inter-individus.

Les opérations successives réalisées selon la Norme XP CEN/TS 13307-1&2 (2010-01-01) dont le séchage et la transformation des bois jusqu'à la fabrication des carrelets trois plis sont décrites dans la partie qui suit.

Il faut remarquer que cette procédure a été mise en œuvre selon les conditions et les moyens disponibles au niveau de l'usine Transbois à Béjaïa.

Cette entreprise se caractérise par une activité intégrée de transformation du bois, depuis le sciage jusqu'à la fabrication de produits finis. Elle connaît des difficultés récurrentes à sécuriser son approvisionnement en bois, tant sur un plan qualitatif que quantitatif. De ce fait, elle est en recherche permanente de nouvelles essences potentiellement valorisables pour la fabrication de produits élaborés (*engineered wood products*), notamment des produits composites reconstitués par collage.

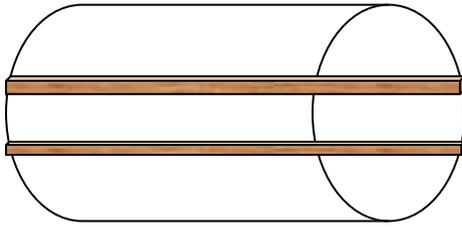
Les produits reconstitués par collage, aboutages à entures multiples et carrelets trois plis, ont été fabriqués puis qualifiés et caractérisés conformément aux procédures définies dans la norme XP CEN/TS 13307-2 (janvier 2010) du billon de bois jusqu'aux produits finis.

Cette norme vise à spécifier la méthode de contrôle et les essais de performances des liaisons de collage (lamellation et aboutage) utilisés dans la production d'ébauche et de profilés semi-finis en bois pour des applications en menuiserie.

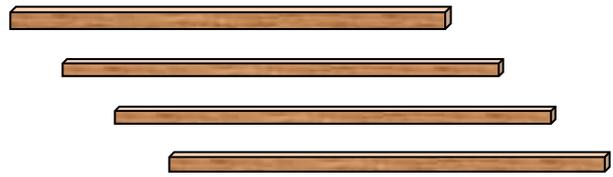
### 1.5.1. Débit, mise aux dimensions et conditionnement des bois

#### \* *Sciage des bois*

Les billons ont été sciés en plateaux de 35 mm d'épaisseur : sciage parallèle à l'aide d'une scie de tête Branta (diamètre des volants : 1800 mm ; largeur des frets des volants : 285 mm ; motorisation : 150 cv).



Des billons de 1,30 m



Plateaux sciés

Figure 2.1.13 : sciage des billons.

### *Délicage*

Les plateaux ont été délicés en lamelles de 35 mm d'épaisseur et 120 mm de largeur (hauteur maximum de sciage : 100mm ; diamètre des lames : 480 mm).



Figure 2.1.14 : Plateaux délicés en lamelles de 35 mm d'épaisseur

### *Séchage*

Pour les trois essences, les lamelles ont été séchées en séchoir traditionnel durant quatre jours hors stabilisation (figure 2.1.15) en utilisant un programme de séchage standard de l'entreprise (humidité initiale des bois : 60 % ; humidité finale : 8 à 10 % ; température maximum : 60 °C). Les lamelles de chêne avaient fait l'objet d'un pré-séchage à l'air de trois semaines afin de limiter la durée d'encombrement du séchoir, alors que celles de pin ont été directement séchées artificiellement



Figure 2.1.15 : Séchage des plateaux de bois.

### *Délicage et rabotage*

Après la phase de séchage, les bois ont été rabotés à l'aide d'une raboteuse à table afin d'obtenir des surfaces parfaitement planes et des états de surface homogènes nécessaires pour le collage.

## 1.5.2. Préparation de l'adhésif et composition des carrelets

### *Les caractéristiques des colles*

La fabrication des composites a été réalisée en deux phases : (1) à Béjaïa dans l'usine de transformation de Transbois ; (2) à Montpellier dans la menuiserie de Cirad.

Pour la 1<sup>ère</sup> série de fabrication chez Transbois, une colle vinylique 1 mono-composant a été utilisée.

Pour la 2<sup>ème</sup> série de fabrication au Cirad, deux colles ont été utilisées : une colle Emulsion Polymer Isocyanates (EPI 1989) et une colle vinylique 2 mono-composant.

Une telle fabrication en 2 phases en mettant en œuvre 3 colles permet dans un premier temps de comparer 2 fabrications différentes mettant en œuvre un même type de colle (vinylique mono-composant), puis une même fabrication mettant en œuvre 2 types de colle différents (vinylique et EPI).

La colle EPI présente un avantage très important en matière d'exigences sur les taux d'humidité du bois au collage, très inférieures à celles des colles vinyliques : ce taux doit être toujours strictement inférieur à 12% pour les colles vinyliques alors qu'il peut atteindre 15% pour les EPI.

Ce critère est très important dans notre situation car le séchage des bois a donné des résultats irréguliers avec certaines pièces dont le taux d'humidité a pu dépasser 12%.

- **Colle vinylique mono-composant** utilisée par Transbois

#### *Description*

Cette colle vinylique est utilisée pour le bois et pour ses produits dérivés, ainsi que pour d'autres matériaux tels que le papier, le carton, le tissu et le verre.

La colle est appliquée sur une seule face ; les surfaces doivent être bien préparées, sèches, lisses et propres.

L'entreprise Transbois utilise uniquement ce type de colle dans ses procédés de fabrication industrielle (panneaux aboutés lattés) du fait de ses facilités d'approvisionnement.

Tableau 2.1.2 : Spécifications de la colle vinylique mono composant

Spécifications	Colle vinylique
Viscosité	6000 à 9000 mPa.s
PH	5 environ
Densité	1200 kg/m <sup>3</sup>
<b>Informations collage</b>	
Type de presse	Le pressage peut être réalisé à froid ou à chaud.
Température du joint de colle	Température minimum d'utilisation : + 10°C
Temps de presse	Le temps de pressage varie selon l'intensité de la pression, la température, l'humidité et la nature du bois, ainsi que selon l'épaisseur du film de colle à bois.  Collage du bois/bois 20 min environ à + 10°C, 5 min à +20 °C, 3 min à + 30 °C.
Temps d'assemblage	Temps ouvert : 5 min à +20 °C
Grammage	---
Humidité du bois	L'humidité du bois doit être de 8 à 12% au maximum

- **Colle EPI 1989/Durcisseur 1993**

#### *Description*

La colle EPI 1989 en combinaison avec le durcisseur 1993 est destinée au collage bois sur bois. Elle donne des joints de colle résistants, avec un plan de collage très résistant aux hautes températures, au fluage et aux solvants.

Cette colle bi-composants est utilisée aussi bien pour des pressages à froid, à chaud ou en haute fréquence.

Tableau 2.1.3 : Spécifications du la colle EPI 1989

<b>Colle EPI 1989</b>	
<b>Spécifications</b>	
Viscosité	5000-14000mPas (colle) -150-450 mPas (durcisseur)
pH	6,0-8,0 (à 25°C) pour la colle
Densité	1290 kg/m <sup>3</sup> environ (colle) – 1240 kg/m <sup>3</sup> environ (durcisseur)
Propriétés du joint de colle	Le joint de colle remplit les conditions de la norme SS-EN 204-D4, JAS 112 et JIS K 6806. Le plan de collage a une adhérence élevée au fluage.
<b>Informations collage</b>	
Type de presse	Presse à chaud, presse à froid et presse haute fréquence.
Température du joint de colle	10°C à 70°C
Temps de presse	30 min à 20°C
Durée de vie du mélange collant	70 min à 15 °C, 1 heure à 20 °C
Temps d'assemblage	Ouvert : 7 minutes - fermé : 10 minutes
Mélange collant	100 :15 colle : durcisseur
Grammage	150-200g/m <sup>2</sup> , application double face
Humidité du bois requise	8-15%

- **La colle Vinylique 2**

### **Description**

La colle vinylique 2 est adaptée aux assemblages et placages toutes essences à prise lente ; elle est mono-composant prête à l'emploi. Elle nécessite de travailler sur des surfaces propres, sèches et parfaitement planes. Elle est aussi adaptée pour les placages de stratifiés à froid et à chaud sur panneaux de particules (sauf ignifugés).

Ses principaux avantages sont les suivants :

- Prête à l'emploi, à temps ouvert long, ininflammable, ne tache pas.
- Non toxique.
- N'abîme pas le tranchant des outils.
- Excellente résistance à l'arrachement.
- Résistance thermique jusqu'à 70°C.

Tableau 2.1.4 : Spécifications de la colle vinylique 2

Spécifications	Colle vinylique 2
Viscosité	7000 à 9000 mPa.s
PH	4,5 environ
Densité	1100 kg/m <sup>3</sup>
Propriétés du joint de colle	Bon comportement au fluage
<b>Informations collage</b>	
Type de presse	Presse à chaud, presse à froid et presse haute fréquence.
Température du joint de colle	Température minimum d'utilisation : + 8°C
Temps de presse	40 min à 20°C
Temps d'assemblage	Temps ouvert maximum à 20°C : 30 mn ; varie selon la porosité du support
Grammage	Un grammage de 150 g/m <sup>2</sup> environ pour un encollage simple face
Humidité du bois	L'humidité des bois doit se situer entre 8 et 12% pour les ouvrages d'ameublement intérieur.

### Mise en œuvre

- Colle prête à l'emploi ; il est nécessaire de bien l'homogénéiser avant utilisation.
- Contrôler la température de l'atelier avant application de la colle. Elle doit idéalement se situer entre 18 et 25°C.
- Les colles vinyliques sont des émulsions dans l'eau. Elles ne font leur prise que si au moins un des deux matériaux collés est absorbant.

### Supports

- Les surfaces doivent être parfaitement planes.
- Les usinages doivent être très précis afin d'éviter tout joint épais (jeu maximum de 0,2 mm) qui pourrait altérer le collage.

### Encollage

Appliquer la colle sur le support en couche mince et régulière à l'aide d'une encolleuse, d'une spatule, d'une brosse, etc. L'application se fait en encollage 1 ou 2 faces selon la porosité du bois, les conditions ambiantes (température et humidité) et suivant que l'on souhaite ou non rallonger le temps de travail.

### *Compositions des carrelets réalisés, choix de la configuration des orientations des cernes*

Quatre types de carrelets ont été fabriqués, trois compositions bois pur pour les trois essences pin d'Alep, chêne afarès et chêne zéen et une composition combinée (mixte) pin d'Alep-chêne afares.

Lors de la composition des carrelets, il est nécessaire de tenir compte de l'orientation des cernes sur chaque lamelle et de les apparier de façon à ce que les lamelles d'une même pièce soient toutes orientées de la même façon (schéma de la figure 2.1.16).

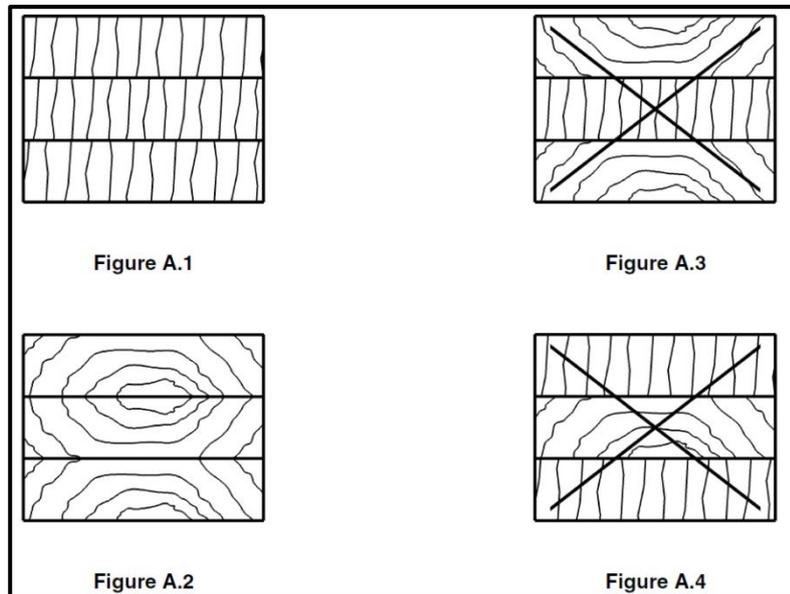


Figure 2.1.16 : Choix de la configuration des orientations de cernes lors de la composition des carrelets (schéma extrait de la norme NF EN 13307-1 / février 2007, *Ebauches et profilés semi-finis en bois pour usages non structurels – Partie 1 – Exigences*)

### ***Préparation de la colle, encollage et serrage des lamelles***

Les 2 colles vinyliques étaient prêtes à l'emploi.

Les 2 composants résine-durcisseur de la colle EPI ont été mélangés après dosé par pesage chacun d'entre eux selon les préconisations de la fiche technique.

Sur les surfaces préparées, la colle a été étalée au pinceau puis la composition, le serrage et le pressage ont été fait manuellement.

Pour la colle vinylique 1 mono-composant, le collage s'est opéré à chaud.

Pour les 2 colles EPI 1989 et vinylique 2 mono-composant, le collage s'est opéré à froid.

Le serrage des carrelets a duré 2 jours pour la colle vinylique1 mono-composant (collage à chaud) et 5 jours pour les deux autres colles (collage à froid).



Préparation des lamelles



Dépoussiérage des lamelles



Encollage des lamelles



Pressage

Figure 2.1.17 : Les différentes étapes de la fabrication des carrelets

### 1.5.3. Délignage et mise à longueur des profilés fabriqués

La mise à longueur des carrelets trois plis a été réalisée à l'aide d'une déligneuse à table et a permis d'obtenir des profilés de 50 mm de largeur et 75 mm d'épaisseur ; nous avons gardé la longueur des carrelets pour échantillonner les éprouvettes le long de chaque profilé.

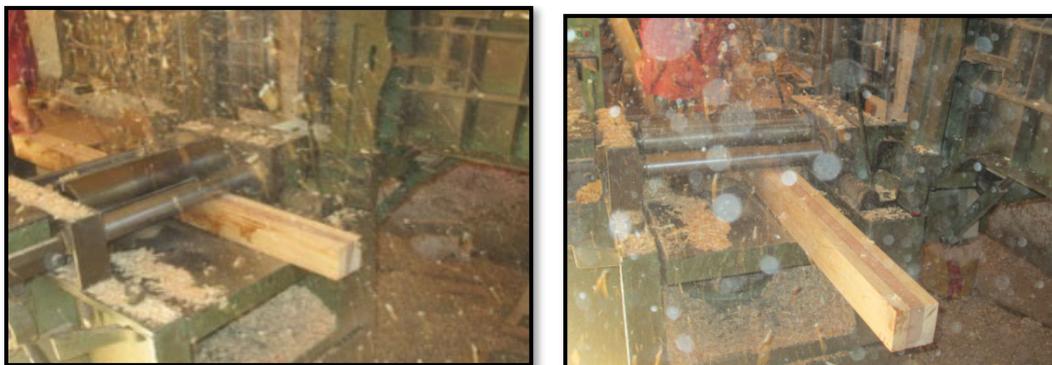


Figure 2.1.18: Mise à longueur de carrelet final (carrelets mixte à la sortie de la déligneuse)

## 1.6. Protocole de fabrication des aboutages à entures multiples

La fabrication des aboutages à entures multiples résulte d'une succession d'opérations de transformation et conditionnement des bois ; la procédure complète est détaillée ci-après

### 1.6.1. Sciage-séchage

Les deux premières étapes de sciage et séchage des bois sont identiques à celles mises en œuvre pour la préparation des bois destinés à la fabrication des carrelets :

1.Sciage des billons en plateaux de 35 mm d'épaisseur

2.Délignage des plateaux en lamelles de 30 mm d'épaisseur et 50 mm de largeur (hauteur maximum de sciage : 100 mm ; diamètre des lames : 480 mm)

3.Séchage des lamelles

De plus, des aboutages ont été fabriqués à partir de bois récupérés après deuxième transformation ou de bois déclassés après fabrication des carrelets.

### 1.6.2. Délignage des lamelles après séchage

Le délignage et le rabotage des surfaces ont été réalisés sur une raboteuse à 4 faces afin d'obtenir des lamelles les plus homogènes possibles en section avant de procéder au profilage des entures



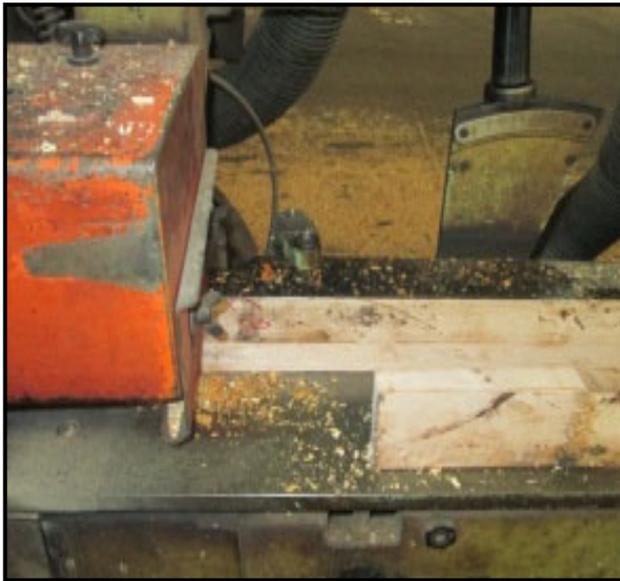
Figure 2.1.19: Délignage des lamelles.

### 1.6.3. Préparation de l'adhésif dans l'abouteuse

Préparation de l'adhésif dans l'abouteuse : colle vinylique à un composant, cette colle est la seule utilisée par l'entreprise Transbois pour la fabrication industrielle des panneaux aboutés lattés du fait de ses facilités d'approvisionnement.

### 1.6.4. Profilage des entures sans épaulement et collage des entures dans l'abouteuse

L'opération d'aboutage (profilage des entures, encollage, pressage) a été réalisée à l'aide d'une abouteuse Dimter DK 14.



Profilage des entures



Entures en cours d'encollage.

Figure 2.1.20 : Profilage des entures

### 1.6.5. Mise à dimensions des pièces aboutées

Les pièces aboutées ont été mise à longueur puis rabotées pour homogénéiser les états de surfaces en vue des essais de caractérisation.

## 1.7. Echantillonnage et préparation des éprouvettes

### 1.7.1. Préparation des carrelats

**Echantillonnage des éprouvettes pour les essais de délamination et l'essai de vieillissement sur la roue de Gardner**

Le long des composites carrelats trois plis fabriqués, nous avons échantillonné des éprouvettes de 50x75x50 mm suivant les prescriptions de la norme XP CEN/TS 13307-2 (2010).

Quatre profilés lamellés ont été sélectionnés pour chaque type de carrelat : pin d'Alep pur, chêne afarès pur, chêne zéen pur et carrelat mixte pin d'Alep - chêne afarès.



Figure 2.1.21 : Elaboration des éprouvettes prélevées dans les carrelets trois plis

### 1.7.2. Préparation des éprouvettes de bois abouté et bois massif

#### Eprouvettes de bois abouté

Les éprouvettes ont été fabriquées conformément aux préconisations de la norme XP CEN/TS 13307-1&2 (2010-01-01) *Ébauches et profilés semi-finis en bois lamellés-collés et assemblés par entures multiples pour usages non structurels* qui précise les dimensions des éprouvettes pour les essais de type initial de bois aboutés non structurels.

Leurs dimensions sont les suivantes :

- longueur : 400 mm ;
- largeur (face enturée) : 25 mm ;
- épaisseur : 20 mm.



Figure 2.1.22 : Eprouvette de bois abouté

## Conclusion

L'échantillonnage de bois a été réalisé conformément aux normes en vigueur dans le but de préparer les éprouvettes destinées aux essais de qualification des bois massifs, des bois aboutés et des bois lamellés.

La fabrication des aboutages et des carrelets a permis d'étudier le comportement des bois lors de l'opération de collage, d'identifier les contraintes survenues durant cette opération, et d'ajuster les paramètres du processus de fabrication de façon à limiter les défauts sur les pièces collées.

Durant cette opération, il a été possible de déterminer la conformité des produits composites par rapport aux attendus tels que définis dans les normes de référence.

## Partie 3 : Méthodes, résultats et discussions

### Chapitre 1 : Caractérisation physico-mécanique des bois

## Introduction

Les essais de la qualification du bois ont pour objectif de caractériser la matière première bois en déterminant ses propriétés technologiques, ses qualités intrinsèques et ses possibilités d'utilisation.

Les caractéristiques dépendent de l'essence, des particularités de la structure et de la nature de certains défauts (nœuds, fentes ...), c'est à dire du choix technologique du bois. Pour cela, les éprouvettes testées doivent être débitées soit sur des échantillons de bois convenablement choisis, soit sur des pièces prêtes à être mises en œuvre.

La détermination des propriétés technologiques et les principales utilisations des essences de bois de l'Algérie n'ont fait l'objet que d'un nombre limité de nombreux travaux de recherche. L'objectif de notre étude est de caractériser ces essences abondantes et de déterminer leurs propriétés qui sont de première importance pour toutes les applications en structure, les calculs de dimensionnement par les bureaux d'étude de construction et pour les calculs de surcote des éléments de structure.

Les essais sont effectués sur des éprouvettes de petites dimensions, sans nœuds ni défauts. Le prélèvement des échantillons pour chaque essai est expliqué dans la partie Matériels.

### 1.1. Détermination des propriétés physiques de chaque essence

La présence d'eau en proportion variable dans le bois agit sur son volume et sur son poids spécifique. Les principales caractéristiques déterminant l'état physique du bois sont les suivantes : la densité, la dureté, l'humidité et la rétractibilité volumétrique totale.

#### 1.1.1. Détermination de l'humidité du bois (NF B 51-004 - Sept 1985)

L'eau constitue la plus grande partie de la sève, imbibe les parois de la cellule ligneuse et remplit les méats cellulaires. La proportion d'eau, appelée taux d'humidité, contenue dans le bois varie d'une espèce à une autre, et pour une même espèce, le taux d'humidité varie selon la partie de l'arbre considérée, selon la saison d'abattage et selon la durée d'exposition à l'air libre pour les pièces débitées.

Les recherches sur le bois ont montré que cette teneur en humidité est minimum dans le tronc, moyenne dans les grosses branches, maximum dans les rameaux. De plus, l'aubier contient davantage d'eau que le cœur (duramen) car il constitue la partie vivante du bois dans laquelle circule la sève brute (sève brute provenant des racines et contenant uniquement de l'eau et des sels minéraux).

Selon la norme française NF B 51 004(1985), la teneur en humidité ou le taux d'humidité H (exprimé en %) d'un échantillon de bois est égal au rapport entre la masse totale d'eau qu'il contient (différence entre la masse du bois humide  $M_H$  et sa masse anhydre  $M_0$ ) et sa masse anhydre, multiplié par 100 pour obtenir un pourcentage. Compte tenu de cette formule, le taux d'humidité d'un bois peut être supérieur à 100%.

Pour déterminer les variations d'humidité au sein des arbres échantillonnés, nous avons découpé des disques le long des grumes sélectionnées.

Deux disques ont été découpés dans deux arbres pour chaque essence.

Un marquage a été ensuite effectué à la surface des rondelles pour identifier les échantillons à prélever et l'emplacement de chacun de ces échantillons sur la section (figure 3.1.1).

La dimension de ces éprouvettes est de 20 mm (L) x 20 mm (R) x 20 mm (T).



Figure 3.1.1 : Epreuve d'essai d'humidité  
(Photo DERBAL W.)

L'échantillon est rendu anhydre par passage dans une étuve réglée à  $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . La déshydratation complète est considérée comme atteinte lorsque la perte de masse relative entre deux pesées successives effectuées à 4 heures d'intervalle est inférieure ou égale à 0,5 % de la masse de l'éprouvette. Pour les échantillons de petit volume (quelques  $\text{cm}^3$ ), un séjour en étuve de 48 heures est suffisant.

L'humidité H des éprouvettes est calculée avec la formule suivante :

$$H(\%) = \frac{M_h - M_0}{M_0} \cdot 100$$

$M_h$  : La masse de l'échantillon à l'état humide,

$M_0$  : La masse de l'échantillon à l'état anhydre.

### 1.1.2. Détermination de la masse volumique (NF B 51-005 - 1985)

La masse volumique d'un bois déterminée à 12 % d'humidité selon la norme utilisée est une caractéristique technologique de base, la première à déterminer pour qualifier un bois.

Cette propriété est reliée, plus ou moins étroitement, avec les principales propriétés physiques et mécaniques du bois ainsi qu'avec certaines caractéristiques de mise en œuvre. Elle permet donc de qualifier et indirectement de déterminer les propriétés qui lui sont liées. Ces relations ont été déterminées par de nombreux auteurs : Kollmann et Cote (1968) ; Panshin et Zeeuw (1970) ; Noak (1971) ; Cailliez et Guéneau (1972) ; Leclercq (1980).

La structure du plan ligneux varie d'une espèce à une autre donc la masse volumique varie d'une espèce à une autre mais varie aussi à l'intérieur de l'espèce en fonction de différents critères :

- Dans une même espèce, la masse volumique varie suivant les conditions de croissance de l'arbre : conditions climatiques, conditions édaphiques (nature du sol), et exposition.
- La masse volumique varie aussi à l'intérieur du tronc, suivant la direction radiale principalement, mais aussi suivant la direction tangentielle (variations liées à la présence de bois de réaction) et longitudinale (de la base de l'arbre au sommet).
- Par ailleurs, la masse volumique varie en fonction de la teneur en eau. A cet effet, les normes Afnor définissent un taux d'humidité de référence de 12 % pour les différents tests de qualification.

Le centre technique du bois et de l'ameublement (CTBA1988) a établi une échelle permettant de classer les bois en fonction de leur masse volumique (tableau 3.1.1.).

Tableau 3.1.1 : Classement des bois en fonction de la masse volumique Mv

<b>Classes de masse volumique (à H=12% d'humidité)</b>	
<b>Mv &lt; 500 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Bois très léger</b>
<b>500 kg/m<sup>3</sup> &lt; Mv &lt; 650 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Bois léger</b>
<b>650 kg/m<sup>3</sup> &lt; Mv &lt; 800 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Bois mi-lourd</b>
<b>800 kg/m<sup>3</sup> &lt; Mv &lt; 950 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Bois lourd</b>
<b>Mv &gt; 950 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Bois très lourd</b>

Selon les préconisations de la norme française NF B 51-005 (1985), la mesure de la masse volumique à 12 % d'humidité relative a été faite sur des éprouvettes de forme cubique de 20 mm de côté et à une humidité relative de 12% ; la masse est mesurée à l'aide d'une balance électrique de 0,01 g de précision et le volume à l'aide d'un pied à coulisse.

Vingt éprouvettes de 20 mm (L) x 20 mm (R) x 20 mm (T) ont été utilisées pour chacune des 3 essences.



Figure 3.1.2: Echantillon d'essai de masse volumique



Figure 3.1.3 :Pesée des échantillons



Figure 3.1.4 : Détermination du volume

(Photo DERBAL W.)

Les résultats des mesures de la masse volumique  $M_v$  ont été exprimés à l'aide de la formule suivant :

$$M_v = \frac{M}{V} \quad (g/cm^3)$$

Où

M : la masse de l'échantillon à l'état stabilisé à 12% d'humidité (en g),

V : le volume de l'échantillon à l'état stabilisé à 12% d'humidité (en  $cm^3$ ).

### 1.1.3. Détermination du retrait radial et du retrait tangentiel (NF B 51 006 - 1985)

Selon la norme française NF B 51 006 (1985), les éprouvettes sont de forme cubique (20 mm de côté).

Après avoir été marqués, les échantillons sont immergés dans l'eau distillée jusqu'à la saturation pour atteindre le point de saturation des fibres, puis séchés dans une étuve à 105°C pour atteindre l'état anhydre. Cette procédure d'essai permet d'obtenir des dimensions stabilisées après saturation et des masses stabilisées à l'issue du séchage, ceci afin de déterminer le retrait radial et le retrait tangentiel.

Pour chacune des trois essences, 20 éprouvette sont été testées.

Durant le processus d'essais, les grandeurs suivantes ont été déterminées : masse humide des échantillons, masse saturée, masse anhydre, dimensions radiales et tangentielles après saturation et après déshydratation.

La mesure des dimensions radiales et tangentielles permet de déterminer les retraits linéaires de séchage.

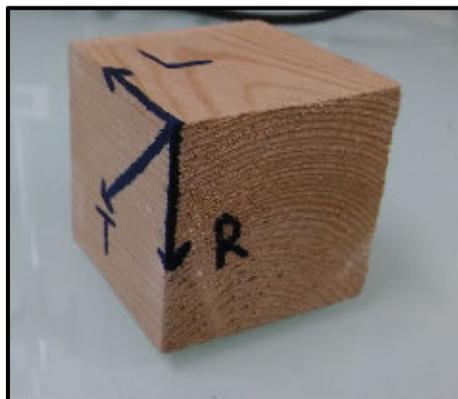


Figure 3.1.5 : Eprouvette d'essai avec marquage

Le retrait radial  $R_R$  et le retrait tangentiel  $R_T$  ont été déterminés en utilisant la formule ci-dessous telle que définie dans la norme de référence :

$$R_R = \frac{L_{RS} - L_{R0}}{L_{RS}} * 100$$

$$R_T = \frac{L_{TS} - L_{T0}}{L_{TS}} * 100$$

$L_{R_s}$  et  $L_{T_s}$  sont les dimensions des éprouvettes à l'état saturé respectivement dans le sens radial  $r$  et le sens tangentiel  $t$ .

$L_{R_0}$  et  $L_{T_0}$  sont les dimensions des éprouvettes à l'état anhydre respectivement dans le sens radial  $r$  et le sens tangentiel  $t$ .

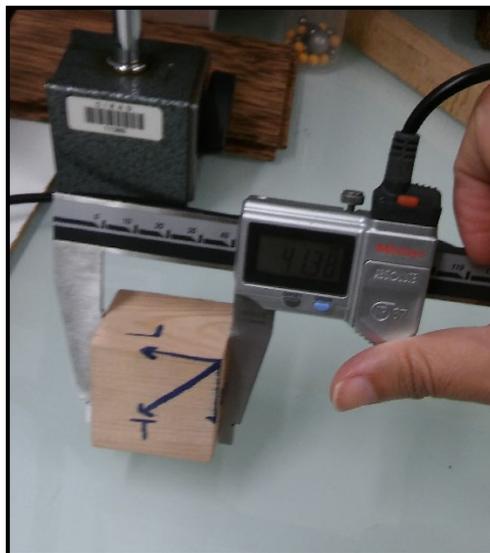


Figure 3.1.6 : Mesure des dimensions radial et tangentiel

#### 1.1.4. Détermination du point de saturation des fibres (PSF) des trois essences de bois

Une partie de l'eau contenue dans le bois vert remplit plus ou moins complètement les vides cellulaires et intercellulaires. L'évacuation de cette eau (appelée « eau libre ») s'effectue sans retrait du bois. Lorsque l'eau libre a entièrement disparu, le bois ne contient plus que de l'eau liée chimiquement aux parois des cellules, et dont le départ lors du séchage occasionne des phénomènes de retrait à l'origine de déformations du bois. Le Point de Saturation des Fibres (ou PSF) correspond au taux d'humidité du bois saturé en eau liée, taux en dessous duquel le bois commence à subir des variations dimensionnelles dues aux variations de conditions ambiantes (humidité relative, température).

Le PSF est un très bon indicateur du comportement du bois durant le séchage et de sa stabilité dimensionnelle après mise en œuvre (ou réciproquement de sa nervosité), lors d'échanges d'humidité entre le matériau et le milieu ambiant.

Les trois essences étudiées, le pin d'Alep (*Pinus halepensis*), le chêne zéen (*Quercus canariensis*) et le chêne afarès (*Quercus afares*), sont parmi les plus abondantes en Algérie mais leur utilisation reste limitée, notamment pour les deux chênes du fait de leur nervosité.

Cet essai dont l'objectif est de déterminer le PSF des trois essences étudiées permet aussi de déterminer l'infradensité du bois grâce à la détermination du volume saturé.

Pour chacune des 3 essences, le PSF a été déterminé sur 20 échantillons de 20 x 25mm de section transversale et 10 mm de hauteur prélevés dans 2 billons provenant de 2 arbres.

***Préparation et sélection des échantillons***

La démarche de prélèvement des échantillons pour cet essai est expliquée dans la Partie 2 « Matériels ».

Sur les échantillons sélectionnés et préparés (élimination au ciseau des échardes de bois au niveau des arêtes des éprouvettes), nous avons pratiqué un marquage des éprouvettes pour repérer leur orientation radiale et leur orientation tangentielle et pour repérer la zone de contact de la touche du comparateur (cercle noir sur les éprouvettes). Ce repérage de la zone de contact est nécessaire pour que la mesure des dimensions des éprouvettes à l'état saturé puis à l'état anhydre se fasse exactement au même endroit.

Les 3 essences sont identifiées à l'aide des 3 lettres P (pin d'Alep), Z (chêne zéen) et A (chêne afarès).



Figure 3.1.7 : Éprouvettes de retraits linéaires et PSF.

(Photo DERBAL W.)

***Protocole expérimental******Description de l'essai***

L'estimation du PSF est basée sur la mesure des variations de dimensions d'éprouvettes à différents paliers de stabilisation d'humidité, en suivant la variation de la masse et des dimensions des échantillons.

Initialement saturés en eau dans un autoclave (méthode du vide et pression), les échantillons ont été séchés et stabilisés en enceinte climatique successivement à des taux d'humidité voisins de 18%, 12% et 6% (soit respectivement 85% d'humidité relative de l'air et 30°C, 65% d'HR et 20°C, 30% d'HR et 20°C). Ils ont été ensuite stabilisés en étuve sèche jusqu'à l'état anhydre.

***Matériels utilisés :***

- Comparateur à 0,001 mm pour mesurer les dimensions radiales et tangentielles
- Balance à 0,001 g pour mesurer la masse des échantillons
- Enceinte climatique et étuve sèche
- Dessiccateur à sels

Les volumes saturés sont mesurés par déplacement d'eau selon le principe d'Archimède dans le but d'estimer l'infradensité du bois.

Le comparateur est relié à un ordinateur, le logiciel Cirad d'acquisition de données permet la prise et l'enregistrement de données mesurées par le dispositif d'essai.

La balance est reliée au même ordinateur ; le logiciel Startwedge permet l'enregistrement instantané des données relevées par la balance.

***Saturations des échantillons en autoclave (par vide et pression)***

Nous avons placé les échantillons sélectionnés dans des récipients en verre avant de les immerger dans de l'eau distillée afin de les saturer (figure 3.1.8). Les récipients ont été mis dans un autoclave durant 48heures, en réalisant une saturation par vide et pression afin d'accélérer le processus de vide et pression.



Figure 3.1.8 : Préparation des échantillons dans les récipients en verre.

(Photo DERBAL W.)



Figure 3.1.9 : Saturation des échantillons dans l'autoclave

(Photo DERBAL W.)

### ***Séchage et stabilisation en enceinte climatique***

\* Stabilisation à 85 % d'humidité relative de l'air et 30°C (équilibre hygroscopique voisin de 18 %).

Durée de cette 1<sup>ère</sup> étape : 19 jours

\* Stabilisation à 65 % d'humidité relative de l'air et 20°C (équilibre hygroscopique voisin de 12 %)

Durée de cette 2<sup>ème</sup> étape : 20 jours

\* Stabilisation à 30 % d'humidité relative de l'air et 20°C (équilibre hygroscopique voisin de 6 %)

Durée de cette 3<sup>ème</sup> étape : 20 jours

### ***Stabilisation en étuve sèche jusqu'à l'état anhydre***

La phase finale de stabilisation en étuve sèche ( $T^{\circ}\text{C} = 103^{\circ}\text{C}$ ) permet de déterminer la masse et les dimensions des échantillons à l'état anhydre. Compte tenu des petites dimensions des échantillons, cette étape a duré deux jours.



Figure 3.1.10 : Déshydratation des échantillons en étuve sèche.

(Photo DERBAL W.)

### *Détermination du volume, de la masse et des dimensions radiales et tangentielles des échantillons*

Les dimensions transversales (plan RT) des échantillons ont été mesurées sur les échantillons saturés et après chaque stabilisation. Ces dimensions ont été utilisées pour calculer les «variations surfaciques» entre l'état saturé et chacun des quatre états stabilisés.

La mesure du volume saturé de chaque éprouvette a été réalisée en utilisant le principe de la poussée d'Archimède (méthode de la double pesée). La masse saturée des échantillons a été mesurée à l'aide d'une balance à plateau avec une précision de 0,001g. Les dimensions saturées ( $R_{RS}$ ,  $R_{TS}$ ) dans les deux directions radiale et tangentielle ont été mesurées à l'aide d'un comparateur à 0,001mm.

Après les mesures, les éprouvettes ont été remises sous films plastiques en salle climatisée (20°C, 65%) pour stabilisation avant la seconde série de mesures.

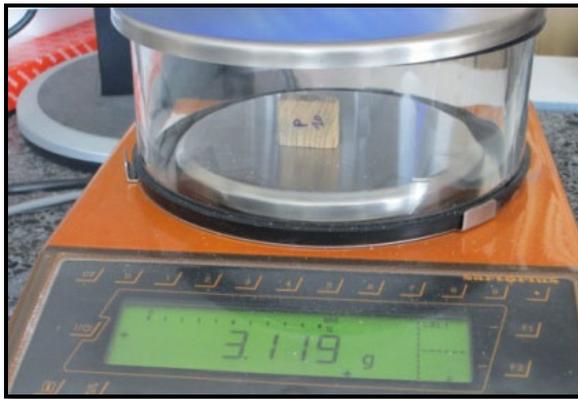


Figure 3.1.11 : Pesée des éprouvettes

(Photo DERBAL W.)

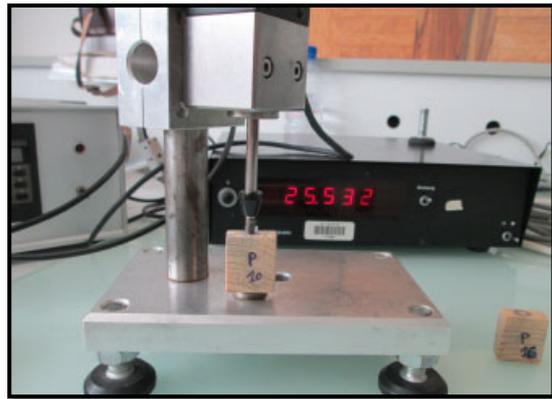


Figure 3.1.12 : Mesure des dimensions à l'aide d'un comparateur Heidenhain

(Photo DERBAL W.)



Figure 3.1.13 : Mesure du volume saturé d'une éprouvette utilisant le principe de la poussée d'Archimède (méthode de la double pesée).

De la même façon nous avons déterminé la masse des éprouvettes et les variations dimensionnelles radiales et tangentielles correspondantes à chaque état de stabilisation.

## 1.2. Résultats et discussion (partie physique)

L'objectif principal de ces recherches est la qualification physique et la classification des trois espèces de bois étudiées, ainsi que l'étude de leurs variations de propriétés.

La variabilité des propriétés d'une essence est un facteur particulièrement pénalisant lorsque l'on souhaite la valoriser sous forme de bois d'œuvre.

Les opérateurs de la 2<sup>ème</sup> transformation recherchent en effet un matériau aussi homogène que possible pour répondre à leurs contraintes de production.

La connaissance de cette variabilité est donc importante afin d'anticiper autant que possible les éventuels risques de malfaçon au niveau des produits finis.

L'analyse de la littérature montre que les propriétés physiques des 3 essences étudiées n'ont fait l'objet que de peu d'études et les données les concernant restent relativement limitées.

Ces propriétés sont la masse volumique, les retraits linéaires transverses de séchage et le point de saturation des fibres (= PSF). Les retraits et le PSF sont deux indicateurs majeurs de la stabilité dimensionnelle des bois et des risques de fentes et de déformations qui peuvent survenir pendant le séchage puis après la mise en œuvre.

### *Taux d'humidité*

Le tableau 3.1.2 reprend les résultats des mesures de taux d'humidité obtenues pour les trois essences.

Tableau 3.1.2 : Taux d'humidité des bois

	Pin d'Alep		Chêne Afarès		Chêne Zéen	
	Disque 1	Disque 2	Disque 1	Disque 2	Disque 1	Disque 2
Nombre d'éprouvettes par disque	20	19	18	18	16	20
Taux d'humidité moyen(%)	19,5	22,0	24,6	26,1	22,3	21,6

Les taux d'humidité moyens sont significativement différents d'une essence à une autre et d'un arbre à un autre.

Le taux moyen du pin d'Alep est plus faible que celui des chênes alors qu'on aurait pu s'attendre à un résultat inverse car le pin d'Alep est moins dense que les chênes.

Ce plus faible taux d'humidité pourrait s'expliquer par une forte concentration en résine dans la partie centrale des pins. Dans les cellules du bois, cette résine occupe les sites habituellement occupés par l'eau d'où un taux d'humidité plus faible.

La cartographie de la distribution du taux d'humidité a été réalisée sur la section d'une grume de pin d'Alep.

On observe de fortes variations donc certaines peuvent paraître aléatoires.

Cependant, le taux d'humidité est globalement plus élevé en périphérie, dans les zones de bois constituées d'aubier qui est toujours plus humide que le duramen.

Les zones plus sèches très localisées en périphérie peuvent correspondre à des secteurs de bois qui ont séché localement, avec deux hypothèses qui peuvent se conjuguer : (i) ces secteurs ont pu sécher après abattage de la grume, durant son stockage avant le prélèvement des disques ; (ii) le phénomène de séchage local a pu survenir sur l'arbre sur pied.

**Masse volumique**

Les résultats des mesures de masse volumique (protocole présenté précédemment) sont présentés dans le tableau 3.1.3.

Ce tableau présente 3 grandeurs caractéristiques pour cette variable - valeurs maximales, minimales, moyennes - et un qualificatif associé.

Tableau 3.1.3 : Masse volumique des trois essences

	Masse volumique moyenne (kg/m <sup>3</sup> )		
	Moyenne des maximums	Moyenne des minimums	Valeur moyenne générale
pin d'Alep	625	610	619(bois léger)
chêne afarès	946	861	920(bois lourd)
chêne zéen	1015	966	998(bois très lourd)

La qualification de la masse volumique  $M_v$  est définie en utilisant les classes suivantes :

$M_v \leq 500$  : bois très léger

$500 \leq M_v \leq 650$  : bois léger

$650 \leq M_v \leq 800$  : bois mi-lourd

$800 \leq M_v \leq 950$  : bois lourd

$M_v \geq 950$  : bois très lourd

Les résultats obtenus corroborent ceux disponibles dans la littérature :

le pin d'Alep est un bois considéré comme léger (masse volumique moyenne comprise entre 500 et 650) tandis que le chêne afarès est un bois lourd aux propriétés élevées (masse volumique moyenne comprise entre 800 et 950) et le chêne zéen un bois très lourd (masse volumique moyenne supérieure à 950).

Les distributions des masses volumiques mesurées pour les 3 essences sont présentées sous forme de box plot (tracé à l'aide du logiciel XLSTAT) sur la figure 3.1.14.

Ce mode de représentation de statistiques graphiques permet de comparer les 3 essences et de situer les distributions les unes par rapport aux autres.

Le *box plot* est une méthode simple développée par Tukey (1977) ; elle renseigne sur les traits caractéristiques de distributions de données (distribution empiriques) :

- Paramètre central (localisation de la distribution),
- Paramètre de la dispersion,
- Etalement de la distribution,
- Existence des valeurs extrêmes,
- Symétrie, asymétrie.

Cette méthode est particulièrement utile pour comparer plusieurs ensembles de données (juxtaposition de *box plot*).

La construction du *box plot* est basée sur la détermination de quantiles empiriques particuliers : médiane  $Q_{0,50}$ , le premier quartile  $Q_{0,25}$  et le deuxième quartile  $Q_{0,75}$ .

A partir des deux quartiles, on définit l'intervalle interquartile ("interquartile range") :  $IQR=Q_{0,75}-Q_{0,25}$  ; IQR est une mesure de dispersion de la distribution.

Le premier et le deuxième quartile sont représentés par les parties inférieure et supérieure du rectangle (*box*). La ligne horizontale intermédiaire représente la médiane. En générale, la largeur du *box* n'a pas de signification sauf dans certaines variations du *box plot* (la largeur peut dépendre de la taille de l'échantillon correspondant).

D'après la définition originale de Tukey, les bras du *box plots* sont construits de manière suivante :

- Le bras supérieur s'étend jusqu'à la plus grande valeur inférieure ou égale à  $Q_{0,75}+1,5 IQR$ ,
- Le bras inférieur s'étend jusqu'à la plus petite valeur supérieure ou égale à  $Q_{0,25}-1,5 IQR$ .

Toute donnée observée en dehors de l'intervalle  $I=[Q_{0,25}-1,5 IQR ; Q_{0,75}+1,5 IQR]$  est représentée par un point individuel ; elle est considérée comme une valeur extrême (ou une donnée aberrante suivant la nature des observations).

Une propriété importante du *box plot* est sa résistance aux perturbations pouvant affecter les données (valeurs extrêmes, erreurs de mesures ...). A la différence de la moyenne et de l'écart-type, la médiane et les quartiles sont en effet peu sensible à l'existence de données extrêmes dans un échantillon.

Sur certaines variantes des *box plots*, il est possible d'apporter davantage d'information sur la nature des distributions:

- Les "Notched Box plots" (mode de représentation que nous avons retenu) permettent de mettre en évidence que la différence de position entre deux médianes est significative (ou non).
- Sur les "Vase plots", la largeur du *Box* en un point est proportionnelle à la densité locale estimée en ce point (Lesnoff,1992).

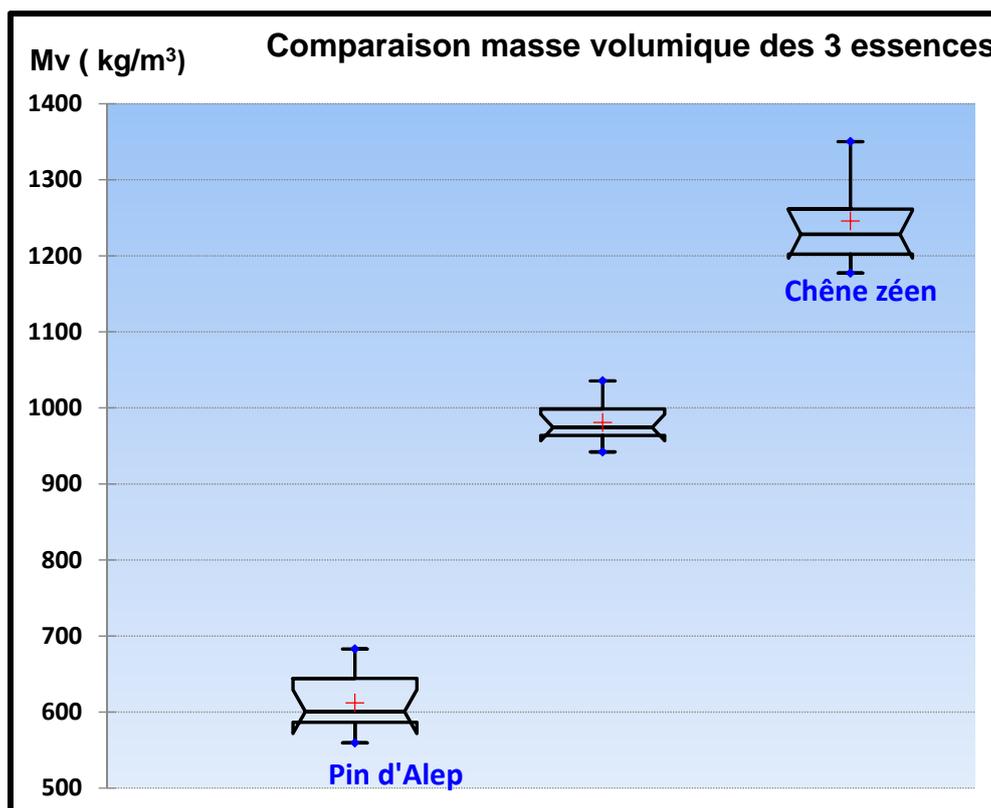


Figure 3.1.14 : Représentation graphique en box plot de la masse volumique des trois essences

Le graphe met en évidence clairement les différences de position entre les distributions. Les décalages entre les encoches montrent que les différences entre les médianes des distributions sont significatives.

#### ***Retrait radial total et tangentiel total***

Ces premiers résultats de retraits de séchage correspondent à une première série d'essais permettant une première approche de ces caractéristiques. Une seconde série de résultats sera présentée à l'issue de la présentation de ceux sur le point de saturation des fibres, sachant que le protocole de détermination de cette caractéristique intègre les mesures nécessaires aux retraits de séchage (variations de dimensions entre l'état saturé et l'état anhydre).

Le tableau 3.1.4 présente la synthèse des résultats des mesures de retrait radial et de retrait tangentiel obtenus pour les 3 essences.

Spécifiquement pour le chêne afarès, les mesures ont été réalisées de façon discriminante dans l'aubier et dans le duramen.

Tableau 3.1.4 : Les retraits radiaux et tangentiels

	Pin d'Alep	Chêne Afarès	Chêne Zéen
Retrait radial moyen (%)	4,6	6,9 (aubier) 5,3 (duramen)	6,5
Retrait tangential moyen (%)	4,9	12,9 (aubier) 11,7 (duramen)	16,4

Les qualifications du retrait radial total  $R_r$  et du retrait tangential total  $R_t$  sont définies en utilisant les classes suivantes :

**Classes de retrait radial total :**

- $R_r \leq 3,8 \%$  : retrait faible
- $3,8 \% \leq R_r \leq 6,5 \%$  : retrait moyen
- $R_r \geq 6,5 \%$  : retrait élevé

**Classes de retrait tangential total :**

- $R_t \leq 6,5 \%$  : retrait faible
- $6,5 \% \leq R_t \leq 10 \%$  : retrait moyen
- $R_t \geq 10 \%$  : retrait élevé

Les résultats présentés dans le tableau montrent que :

- le pin d'Alep présente un retrait radial moyen (compris entre 3,8 et 6,5 %) et un retrait tangential faible (inférieur à 6,5%),
- le chêne afarès présente un retrait radial moyen dans le duramen mais élevé dans l'aubier (supérieur à 6,5 %), et un retrait tangential élevé aussi bien dans l'aubier que dans le duramen (supérieur à 10%),
- le chêne zéen présente un retrait radial moyen à élevé (très légèrement au-dessus du seuil de 6,5%) et un retrait tangential très élevé (16,45 très supérieur au seuil de 10%).

Pour les deux chênes, les valeurs très élevées de retrait linéaire, tant radial que tangential, et les très fortes différences entre retrait radial et retrait tangential ( $R_t - R_r$ ) expliquent les difficultés de séchage. Ces résultats montrent que pour ces deux essences, une attention toute particulière devra être portée à cette opération si l'on veut obtenir en final des produits sciés et séchés qui répondent aux attentes et aux besoins des opérateurs de la filière de 2<sup>ème</sup> transformation.

Ces valeurs de retrait sont intéressantes à comparer à celles disponibles dans la littérature. Ainsi, (Messoudène et al 2008) ont déterminé les caractéristiques physiques de chêne zéen issus de huit stations forestières différentes ; ils concluent que le retrait axial et l'anisotropie de retrait sont les deux paramètres dont la variabilité est la plus élevée et que l'effet station n'apparaît significatif au seuil de 5 % que pour ces deux paramètres.

La comparaison de nos résultats à ceux obtenus pour d'autres chênes du pourtour méditerranéen, ou de chênes européens ou d'Amérique du nord montre que le chêne zéen et le chêne afarès sont les deux espèces dont les retraits sont les plus élevés (tableau 3.1.5).

Ce tableau reprend les résultats obtenus par différents auteurs sur différentes espèces de chêne : Deret-Varcin 1983 ; Marchal 1995 ; Beaudoin 1996 ; Marchal 1995 (*Quercus ilex*) ; Dautrebande 1989 (*Quercus afarès*).

Tableau 3.1.5 : Comparaison des retraits de différents chênes

Essences	Retrait radial total en (%)	Retrait tangentiel total en (%)
<b>Chêne zéen (Akfadou)</b>	<b>6,5</b>	<b>16,4</b>
<b>Chêne afarès (Akfadou)</b>	<b>6,9</b>	<b>12,9</b>
Chêne vert*	4,7	10,3
Chêne pubescent*	4,5	9,1
Chêne sessile*	3,4	13
Chêne pédonculé*	3,1	12,5
Chêne à gros fruits*	4,2	5,4
Chêne blanc*	4,7	6,0
Chêne rouge*	3,6	6,7

\* : Tropix base de données Cirad

De la même façon que pour les chênes, nous avons comparé nos résultats obtenus sur le Pin d'Alep à ceux disponibles dans la littérature pour des espèces considérées comme voisines du pin d'Alep pour les usages qui en sont faits (résultats issus du logiciel Tropix 7.5.1).

Tableau 3.1.6 : Comparaison des retraits de différents pins

Essences	Retrait radial total (en %)	Retrait tangentiel total (en %)
<b>Pin d'Alep (Bouira)</b>	<b>4,6</b>	<b>4,9</b>
Pin sylvestre*	5,2	8,3
Pin maritime*	4,6	9
Pin des Caraïbes*	3,8	7,1
Pin à crochets*	4,9	6,4

\* : Tropix base de données Cirad

Par rapport aux quatre autres pins utilisés pour la comparaison, le pin d'Alep que nous avons testé présente un retrait radial proche de ceux des autres espèces. Il est similaire à celui du pin maritime. Ces deux essences sont souvent comparées compte tenu de la similarité de leurs propriétés et de leurs usages. Seul le retrait radial du pin des Caraïbes (provenance Nlle-Calédonie) est plus faible, mais en raison des inclusions de résine à cœur très fréquentes dans cette essence et qui biaisent les résultats obtenus pour cette essence.

En revanche, le retrait tangentiel du pin d'Alep est très inférieur à celui des autres espèces. En conséquence du faible retrait tangentiel, la faible différence entre le retrait radial et le retrait tangentiel révèle la faible anisotropie de ce bois pour les retraits de séchage.

Ce résultat va dans le sens des retours obtenus auprès des opérateurs de la filière bois sur le comportement au séchage de cette essence. La qualité intrinsèque du pin d'Alep est considérée comme très satisfaisante. Cependant, c'est la présence de nœuds fréquents et souvent de gros diamètres qui limite de façon effective les possibilités de valorisation en bois d'œuvre de cette essence.

Pour les chênes, c'est la qualité intrinsèque du bois qui limite les possibilités de valorisation, notamment les retraits de séchage très élevés et très anisotropes, à l'origine du développement de fentes et de déformations sur les bois sciés et séchés.

#### ***Point de saturation de fibres (PSF) et retraits linéaires de séchage associés***

La connaissance du point de saturation des fibres permet de mieux connaître le comportement des bois durant le séchage et leur stabilité dimensionnelle après mise en œuvre. Ce paramètre est sans doute celui qui renseigne le mieux sur l'incidence des échanges d'eau entre le bois et son environnement ambiant sur sa stabilité dimensionnelle et l'éventuel développement de défauts dus à ce manque de stabilité : fentes et déformations.

Ces paramètres de stabilité ont été déterminés après stabilisation des échantillons testés à plusieurs états hygrométriques, jusqu'à l'état anhydre.

Leurs dimensions transversales, dans le plan RT, sont mesurées après saturation puis après chaque stabilisation : ces dimensions sont utilisées pour calculer les « variations surfaciques » entre l'état saturé et chacun des quatre états stabilisés.

L'utilisation du retrait surfacique pour déterminer le PSF permet de s'affranchir des différences de comportement du bois suivant la direction radiale et tangentielle : le PSF déterminé à partir de l'évolution du retrait radial entre l'état saturé et l'état anhydre apparaît toujours différent de celui déterminé à partir de l'évolution du retrait tangentiel.

Sur chacune des courbes [Taux d'humidité] = f [Variations surfaciques du plan RT], le PSF de chaque échantillon est déterminé en extrapolant l'ordonnée à l'origine. Afin de visualiser la variabilité des résultats obtenus, les 3 graphes ci-dessous présentent les valeurs des PSF obtenus individuellement pour chaque éprouvette pour chacune des 3 essences. Cette variabilité est beaucoup élevée pour les 2 chênes que pour le pin d'Alep. Ces valeurs individuelles par éprouvette sont ensuite moyennées pour qualifier chaque essence (tableau ci-après).

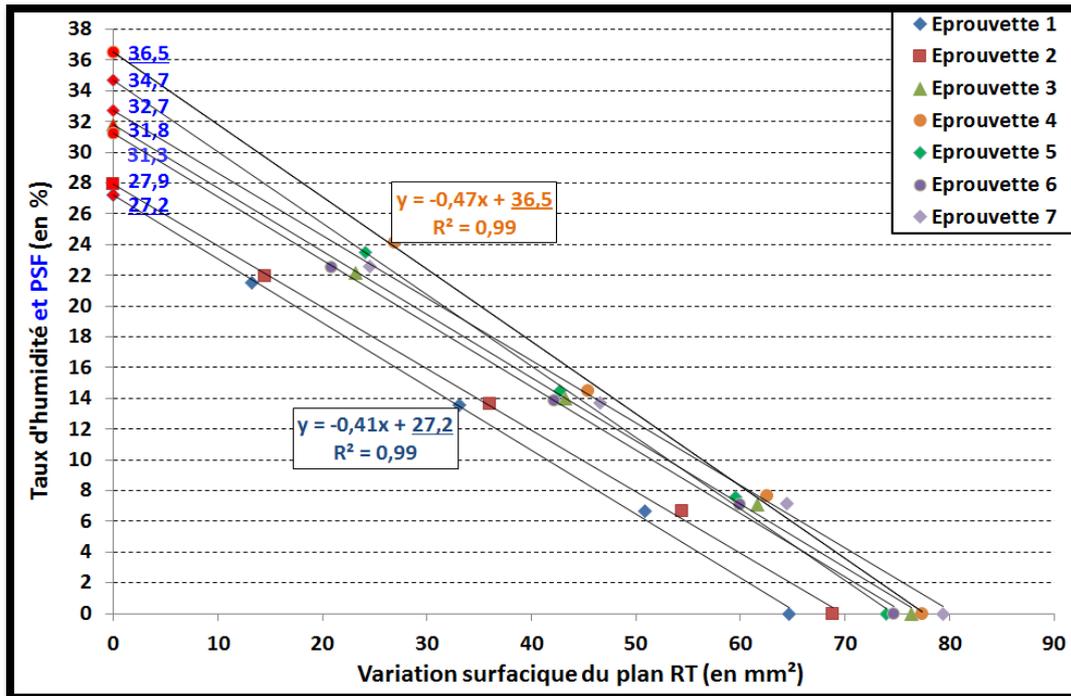


Figure 3.1.15: Détermination du PSF du Chêne Zéen : ordonnée à l'origine des courbes

[Taux d'humidité] = f[Variations surfaciques du plan RT].

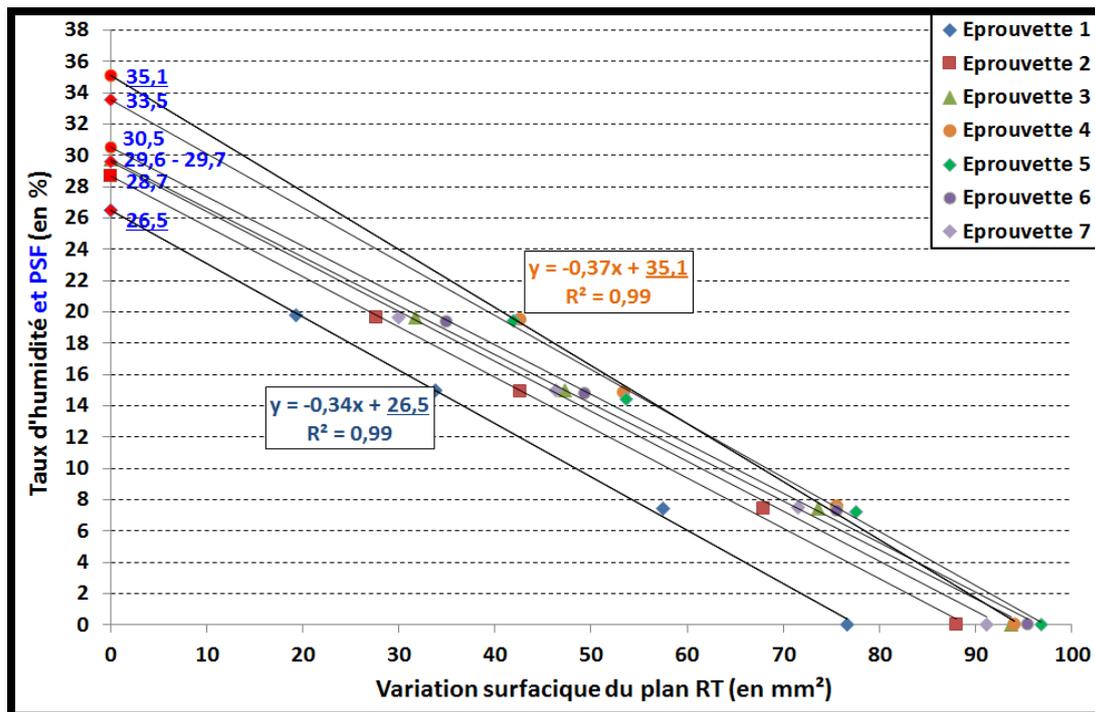


Figure 3.1.16 : Détermination du PSF du Chêne Afrès : ordonnée à l'origine des courbes

[Taux d'humidité] = f [Variations surfaciques du plan RT].

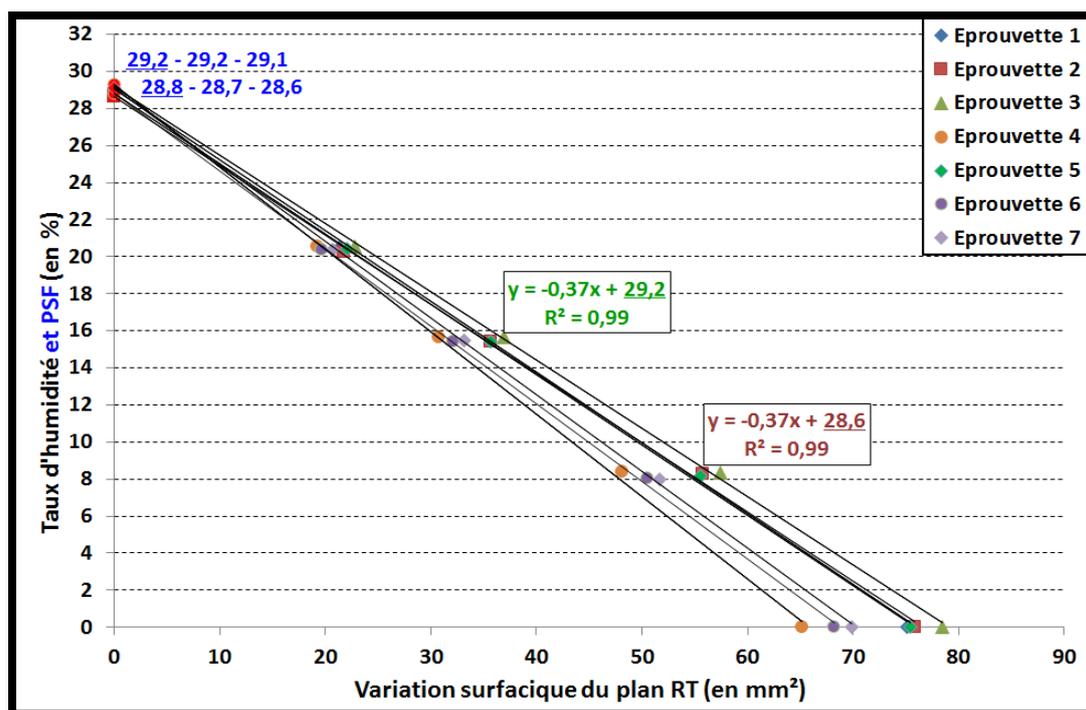


Figure 3.1.17 : Détermination du PSF du Pin d'Alep : ordonnée à l'origine des courbes

$$[\text{Taux d'humidité}] = f[\text{Variations surfaciques du plan RT}].$$

Le tableau suivant récapitule les résultats de PSF obtenus :

essences	Numéro éprouvette							Moyenne
	1	2	3	4	5	6	7	
Pin d'Alep	29,2	29,2	29,1	28,8	28,7	28,6	28,8	28,9
Chêne zéen	36,5	34,7	32,7	31,8	31,3	27,9	27,2	31,7
Chêne afarès	35,1	33,5	30,5	29,6	29,7	28,7	26,5	30,5

Les tendances observées sur les 3 essences pour le point de saturation des fibres rejoignent celles observées pour les retraits linéaires de séchage :

Des 3 essences, le pin d'Alep a le PSF le plus bas, inférieur au seuil de 30% habituellement considéré comme la valeur moyenne pour le bois. Ce résultat va dans le sens de l'analyse précédente sur les résultats de retraits : la qualité intrinsèque du bois de pin d'Alep est satisfaisante, les problèmes de fentes et de déformations survenant lors du séchage étant liés à la présence de nœuds qui perturbent la stabilité dimensionnelle des débits.

Les PSF des deux chênes dépassent le seuil de 30%, résultat qui va dans le même sens que ceux obtenus pour les retraits. La moyenne du PSF du chêne zéen apparaît la plus élevée, de la même façon que son retrait tangentiel est aussi le plus élevé (pour tous les bois, ces deux caractéristiques sont en général bien corrélées). Un test non paramétrique de Mann-Whitney

sur les résultats obtenus pour les 2 chênes ne met cependant en évidence aucune différence significative entre les deux échantillons. La p-value calculée étant supérieure au niveau de signification (seuil  $\alpha=0,05$ ), on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle  $H_0$  « La différence de position des échantillons est égale à 0 ».

Il faut cependant noter que bien que les valeurs moyennes des PSF des deux chênes soient supérieures à 30%, on aurait pu s'attendre à des valeurs bien supérieures (au moins  $> 35\%$ ) compte tenu de la réputation de « nervosité » de ces deux essences. Cette nervosité pourrait s'expliquer davantage par leurs retraits de séchage élevés ou par leur forte sensibilité aux variations d'humidité, facteur qui contribue aussi au manque de stabilité d'un bois.

Simultanément à la détermination du PSF, les mesures de variations de dimension radiale et tangentielle entre l'état saturé et l'état anhydre sont utilisées pour calculer les retraits linéaires transverses totaux des échantillons testés.

Le tableau 3.1.7 présente les résultats généraux obtenus pour les deux retraits linéaires et les graphiques suivants présentent les distributions de valeur obtenues sous forme de box plots pour les deux chênes.

Tableau 3.1.7 : Retraits linéaires transverses moyens des 3 essences déterminées lors d'essai de PSF

	Pin d'Alep	Chêne Afares	Chêne Zéen
Retrait radial total (%)	5,4	7,1	8,1
Retrait tangentiel total (%)	7,2	9,7	16,6

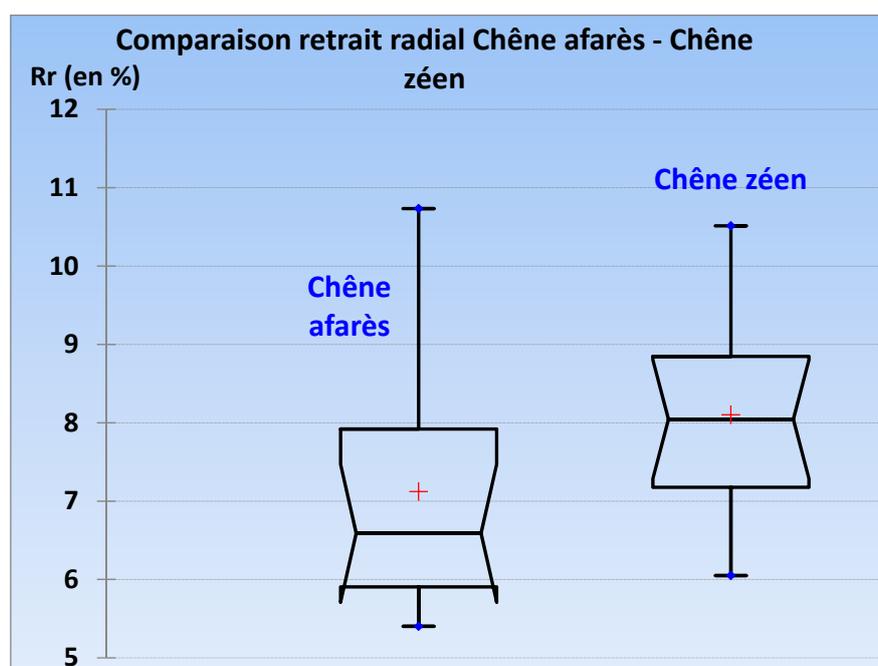


Figure 3.1.18 : Représentation graphique de la distribution du retrait radial total pour le chêne afares et le chêne zéen

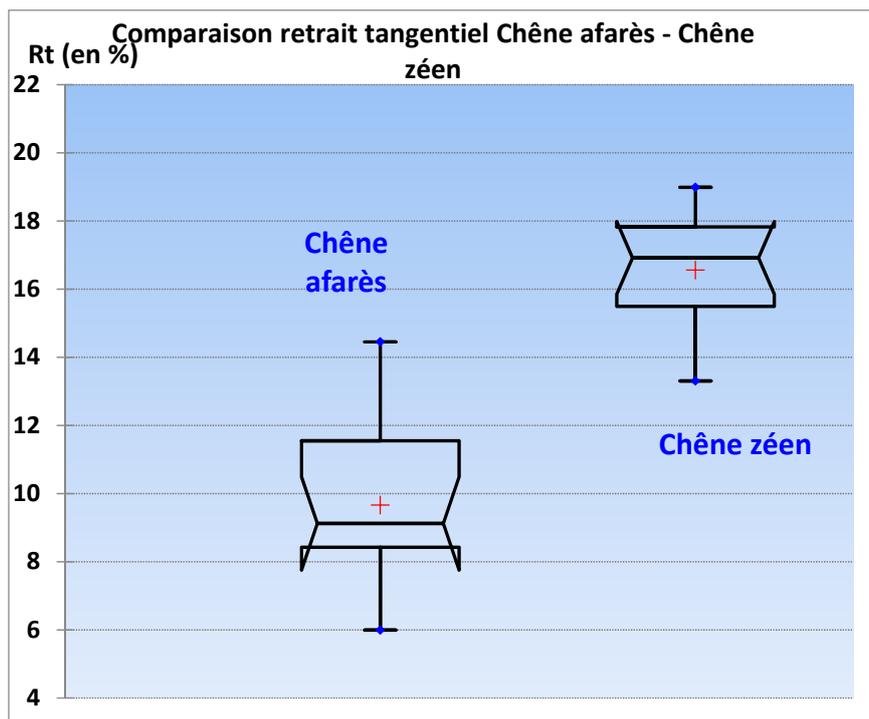


Figure 3.1.19: Représentation graphique de la distribution du retrait tangentiel pour le chêne afarès et le chêne zéen.

Dans un premier temps, la comparaison des valeurs obtenues précédemment lors de mesures spécifiques de retraits et celles obtenues lors de la détermination du point de saturation des fibres révèle une grande similarité des résultats malgré le fait d'avoir travaillé sur des échantillons différents avec des protocoles différents.

Quelques différences mineures sont cependant observées pour la seconde série d'expérimentation : retrait tangentiel légèrement plus élevé pour le pin d'Alep, retrait tangentiel du chêne afarès plus faible et retrait radial du chêne zéen plus élevé.

Contrairement à ce qui avait été montré pour le PSF (absence de différence significative entre les deux chênes), l'analyse des *box plots* démontre la différence de comportement au séchage des deux chênes avec des retraits systématiquement et significativement différents. La position des deux médianes et celle des deux distributions comparées sont décalées ; le décalage entre les encoches (notches) des deux *box* indique que la différence de position entre les médianes des distributions est significative. Cette différence est plus marquée pour le retrait tangentiel que pour le retrait radial.

De la même façon, contrairement au PSF des deux essences dont les valeurs ne sont pas apparues particulièrement très élevées, les valeurs de retrait des deux chênes, tant retrait radial que retrait tangentiel, atteignent des niveaux très importants.

Le retrait radial d'un bois est considéré comme élevé au-dessus de 6,5% ; il est de 7,1% et 8,1% respectivement pour le chêne afarès et le chêne zéen. De même, le retrait tangentiel est considéré comme élevé au-dessus de 10% ; il est de 9,7% et surtout de 16,6% respectivement pour le chêne afarès et le chêne zéen. C'est pour cette dernière essence que deux retraits de séchage transverses sont les plus révélateurs de la nervosité du bois, ce que ne montrait pas de façon nette les valeurs de PSF.

### Infradensité

Comme les retraits linéaires de séchage, la détermination du PSF permet simultanément de déterminer l'infradensité des échantillons testés.

Le tableau 3.1.8 présente les résultats globaux obtenus (minimums, maximums et moyennes) et le graphe suivant permet de comparer les distributions de valeurs pour les deux chênes présentées sous forme de box plots.

Tableau 3.1.8 : Résultats généraux des mesures d'infradensité pour les trois essences

	Pin d'Alep			Chêne Afarès			Chêne zéen		
Infradensité (ID)	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.
	0,43	0,51	0,46	0,57	0,66	0,62	0,65	0,76	0,71

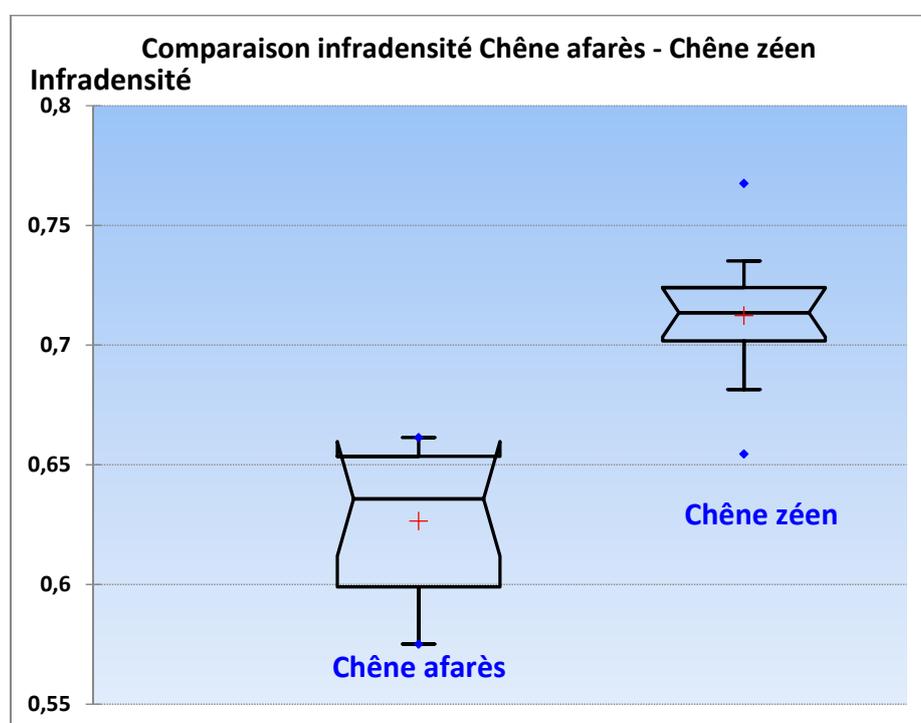


Figure 3.1.20 : Distribution d'infradensité pour les deux chênes

Les tendances sur les résultats obtenus rejoignent en toutes logiques celles obtenues pour la masse volumique :

Des 3 essences, le pin d'Alep est le plus léger suivi par le chêne afarès puis le chêne zéen.

Les écarts entre les infradensités sont cependant moins élevés, en valeur relative, que les écarts entre masses volumiques. Ceci est lié à la méthode même de mesure puis de calcul de l'infradensité (masses anhydres et volumes saturés utilisés) qui a tendance à « écraser » les différences entre essences. Pour le chêne zéen, la distribution de valeurs est globalement moins dispersée que celle du chêne afarès, mais les valeurs extrêmes sont davantage éloignées de la médiane.

Il est à noter que la différence de porosité entre les deux chênes a pu jouer sur les écarts d'infradensité relevés. En effet, lors de la détermination de cette caractéristique, la mesure du volume saturé des échantillons se fait par double pesée (principe d'Archimède). Le protocole de mesure prévoit le risque d'absorption d'eau des échantillons durant leur immersion qui pourrait biaiser la mesure ; les éprouvettes sont de ce fait recouvertes d'un imperméabilisant pour bloquer cette absorption. Ce blocage est d'autant plus efficace que le bois présente une faible porosité, d'où un impact possible de cette caractéristique anatomique sur la mesure du volume saturé donc la détermination de l'infradensité.

### 1.3. Détermination des propriétés mécaniques

La détermination des propriétés mécaniques des bois est de première importance pour tous les emplois en structure, tant pour les bois massifs que pour les produits dérivés.

Quels que soient ces domaines d'utilisation, il est nécessaire de connaître les propriétés mécaniques du matériau ainsi que son comportement sous différentes sollicitations, ceci afin d'utiliser le bois dans les meilleures conditions (Avale 1984).

Ces caractéristiques sont déterminées suivant des protocoles définis dans des normes spécifiques à chacune des sollicitations envisagées.

#### 1.3.1. Détermination de la contrainte de rupture en flexion statique et calcul de module d'élasticité longitudinal (B 51-008 -1987)

**Détermination de l'humidité des échantillons avant les essais.**

##### *Echantillonnage*

Pour chaque essence, nous avons sélectionné 4 éprouvettes dont nous avons suivi l'évolution de la masse et donc de l'humidité.

Une première mesure de masse des échantillons a été faite à l'état initial humide avant l'étape de stabilisation.

- Les quatre éprouvettes de chaque essence (pin d'Alep, chêne afarès et chêne zéen) ont été conditionnées dans la chambre climatique à  $T= 20^{\circ}\text{C}$ ,  $H= 65\%$ , soit des conditions permettant d'obtenir un taux d'humidité d'équilibre théorique du bois de 12%.
- Une éprouvette témoin de chaque essence a été déshydratée dans une étuve sèche à  $T=105^{\circ}\text{C}$  pour obtenir l'humidité de départ des bois.

Les masses sont mesurées chaque jour durant toute la période de stabilisation jusqu'à l'obtention d'une masse stable des éprouvettes (environ 10 jours de suivi).

**Méthode de calcul des résultats** Le taux d'humidité est déterminé à intervalles de temps réguliers en utilisant comme référence le taux mesuré sur les éprouvettes témoins.

A t=0

$$H = \frac{P_H - P_0}{P_0} * 100$$

A t=1jour

$$H' = \frac{P_{H'} - P_0}{P_0} * 100$$

$P_0$  : la masse de l'échantillon à t=0j

$P_H$  : la masse humide de l'échantillon à t=1j

H : humidité à t=0j

$H'$  : humidité à t=1j

Le calcul de l'humidité finale des échantillons selon la formule suivante est obtenu à partir des équations précédentes.

On déduit  $P_0$  à partir de l'équation (1)  $P_0 = \frac{P_H}{\frac{H}{100} + 1}$

On remplace  $P_0$  dans l'équation (2) pour obtenir l'équation finale de calcul

$$H' = \left( \frac{P_{H'}}{\left( \frac{P_H}{\left( \frac{H}{100} + 1 \right) - 1} \right)} \right) * 100$$

Le tableau suivant récapitule les résultats obtenus.

Tableau 3.1.9 :Taux d'humidité des trois essences lors de l'essai

Echantillon	$P_H$ (g)	$P_0$ (g)	$H'$ (%)
Pin d'Alep			
Eprouvette 1	122,08	121,34	16,0
Eprouvette 2	116,80	116,41	16,3
Eprouvette 3	115,68	114,95	16,0
Eprouvette témoin	119,60	102,43	<b>16,8</b>

Chêne Afarès			
Eprouvette 1	178,45	175,91	15,9
Eprouvette 2	178,99	177,58	16,4
Eprouvette 3	183,82	182,28	16,4
Eprouvette témoin	179,5	152,96	<b>17,4</b>
Chêne Zéen			
Eprouvette 1	194,65	186,34	13,8
Eprouvette 2	199,89	192,27	14,4
Eprouvette 3	168,47	162,34	14,6
Eprouvette témoin	192,32	161,76	<b>18,9</b>

#### *Principe de l'essai de flexion quatre points*

Selon la norme française B 51-008 (1987), cet essai consiste à déterminer la contrainte de rupture d'une éprouvette de bois sans défaut par flexion sous une charge progressivement croissante, exercée perpendiculairement au fil du bois.

La machine d'essai permet d'assurer une augmentation de charge progressive et régulière ou une vitesse constante de déplacement de la tête mobile. La mesure de la charge se fait avec une précision d'au moins 1%.

L'essai de flexion quatre points permet d'étudier le comportement du matériau et de déterminer la contrainte de déformation lors de l'application d'un effort à au milieu d'une éprouvette reposant sur deux appuis. La mesure de la flèche de l'éprouvette à la fin de l'essai permet d'obtenir le module d'Young  $E_L$ .

Les paramètres de flexion déterminés ont été le module d'Young  $E_L$  (ou module d'élasticité en flexion statique) et la contrainte de rupture en flexion statique  $\sigma_F$ .

Les essais ont été réalisés suivant la norme B 51-008 (1987) sur des éprouvettes de dimensions 360 mm (L) x 20mm (R) x 20 mm (T).

Pour chaque essence, 20 éprouvettes ont été utilisées.

#### *Contrainte de rupture en flexion longitudinale (flexion 4 points)*

Les essais mécaniques de flexion 4 points ont été réalisés à l'aide d'une machine universelle Zwick de modèle ZE250 piloté à un ordinateur équipé du logiciel test Xpert V9.0.

Cette machine d'essai universelle dispose d'un capteur de force de 250 KN ; elle est reliée à une chaîne d'acquisition qui permet d'enregistrer simultanément la contrainte appliquée et la déformation mesurée.



Figure 3.1.21 : Epreuve d'essai de flexion  
(Photo DERBAL W.)

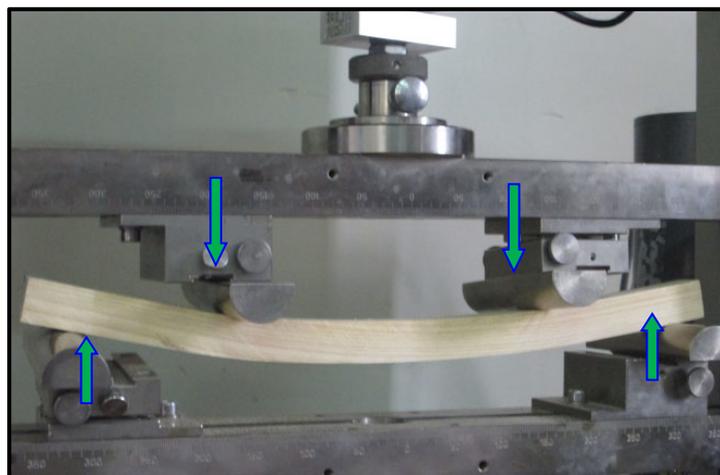


Figure 3.1.22: Essai de flexion quatre points  
(Photo DERBAL W.)

Pour chaque essai, l'évolution de la force a été enregistrée et la mesure de la contrainte à la rupture a été effectuée avec un déplacement de la traverse à une vitesse constante de 4 mm/min jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La charge maximale appliquée  $P$  a été enregistrée.

Les résultats ont été calculés comme suit :

**Calcul du module d'élasticité longitudinal**

Le module d'élasticité longitudinal du bois (ou module d'Young) détermine son aptitude à se déformer de manière élastique, c'est-à-dire de manière réversible.

Ce module, noté  $E_L$ , est déterminé de façon normalisée sur les bois à 12% d'humidité ; c'est une propriété majeure pour les emplois en structure où les pièces de bois sont fréquemment sollicitées en flexion statique suivant leur plus grande direction.

Cette propriété caractérise la proportionnalité entre la charge et la déformation. C'est un indicateur de la rigidité du bois. Plus sa valeur est faible, plus le matériau tend à se déformer de manière élastique c'est-à-dire qu'il est flexible.

Le module d'élasticité, exprimé en MPa, a été calculé à partir de l'équation suivante, en se référant à la norme NF B 51-016 (1987).

$$E_L = \frac{P * (l - a) * (2l^2 + 2la - a^2)}{8 * b * h^3 * f}$$

$E_L$  : module d'élasticité en flexion (MPa) ;

$P$  : charge totale de flexion (N) ;

$l$  : distance entre les axes des appuis cylindriques (mm) ;

$a$  : distance entre les axes des têtes de chargement (mm) ;

$b$  : largeur de l'éprouvette (mm) ;

$h$  : hauteur de l'éprouvette (mm) ;

$f$  : flèche en milieu de l'éprouvette (mm).

### **Détermination de la contrainte de rupture en flexion**

Cette caractéristique, notée  $F_{12}$  ou  $\sigma_F$ , est de première importance dans tous les calculs de structure pour la conception d'ouvrages en bois.

Elle correspond à la contrainte qu'il est nécessaire d'appliquer dans la zone centrale d'une éprouvette reposant sur deux appuis pour atteindre sa rupture après chargement progressif.

Elle est déterminée de façon standard sur des bois à 12% d'humidité selon une procédure normalisée. La contrainte de rupture en flexion statique est fonction de la force maximale atteinte à la rupture de l'éprouvette ( $P_{max}$ ), rupture qui peut être franche ou progressive

La contrainte de rupture  $\sigma_F$ , exprimée en MPa, a été déterminée avec l'équation ci-dessous en se référant à la norme B51-008 (1987).

$$\sigma_F = \frac{3 * P * (l - a)}{2 * b * h^2}$$

$\sigma_F$  : contrainte de rupture en flexion (MPa) ;

- P : charge totale de flexion (N) ;  
l : distance entre les axes des appuis cylindriques (mm) ;  
a : distance entre les axes des têtes de chargement (mm) ;  
b : largeur de l'éprouvette (mm) ;  
h : hauteur de l'éprouvette (mm).

### 1.3.2. Méthode de détermination de module d'élasticité longitudinal et module de cisaillement transverse par méthode vibratoire (méthode BING®),

#### *Description de la méthode*

La méthode BING<sup>(R)</sup> s'appuie sur l'étude des vibrations d'une pièce de bois. L'analyse spectrale des vibrations naturelles de flexion et/ou de compression permet d'identifier les fréquences propres d'une poutre à partir de sa réponse à une excitation impulsionnelle appliquée à une de ses extrémités. La détermination d'une ou plusieurs fréquences de vibration du système permet de déduire les propriétés mécaniques de l'échantillon testé. Le mode de sollicitation peut être en compression, en flexion sur chant ou en flexion à plat ; dans le cas présent, il s'agit d'une flexion sur chant.

Le Cirad a conçu, développé et mis en œuvre le dispositif BING<sup>(R)</sup> pour obtenir rapidement des modules d'élasticité en flexion ( $E_L$ ) et des modules de cisaillement transverses (G) par analyse et interprétation du spectre des vibrations naturelles d'une pièce en bois.

La chaîne de mesure est composée d'un laser, d'un amplificateur avec filtrage intégré, d'un convertisseur analogique numérique et du programme BING<sup>(R)</sup> installé sur un ordinateur. Dans la chaîne de mesure d'origine, l'enregistrement des vibrations des pièces testées était assuré par un microphone. Pour le dispositif de laboratoire du Cirad, ce microphone a été par la suite remplacé par un laser dont l'utilisation améliore la précision et la fiabilité de l'enregistrement des vibrations. Des essais comparatifs réalisés au Cirad ont montré une très bonne corrélation avec les résultats obtenus par des essais classiques de flexion (3 et 4 points) sur des éprouvettes en bois de toutes dimensions, de toutes sortes d'essences, avec ou sans défauts (Brancheriau 2011, 2013).

La masse volumique, nécessaire pour le calcul des deux caractéristiques mécaniques, est déterminée directement à partir de la mesure des dimensions et la pesée des éprouvettes, préalablement à leur mise en vibration.

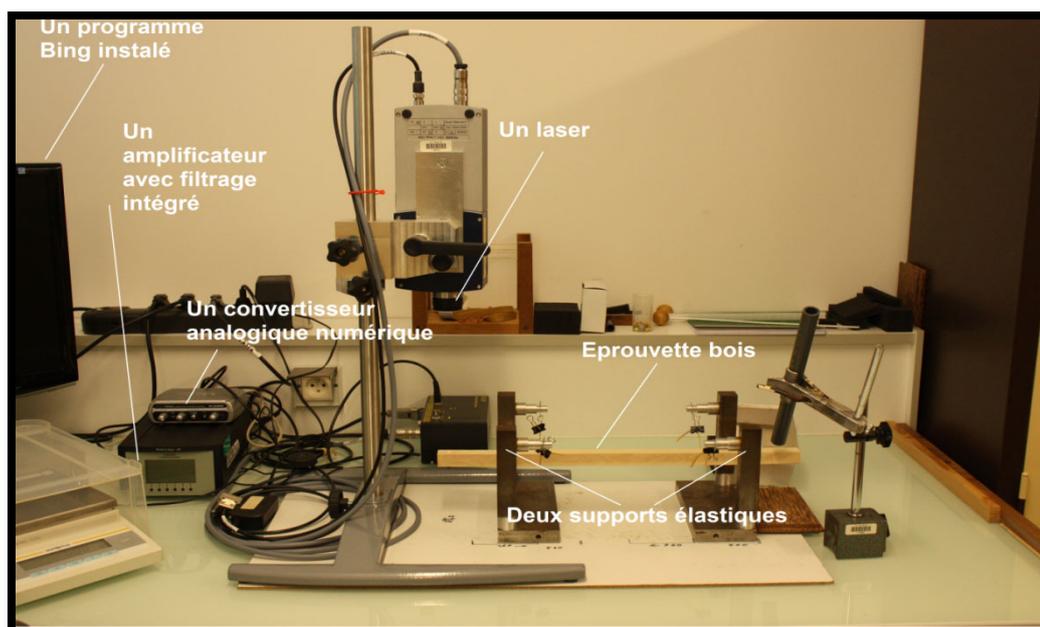


Figure 3.1.23: Dispositif d'essai Bing (CIRAD)

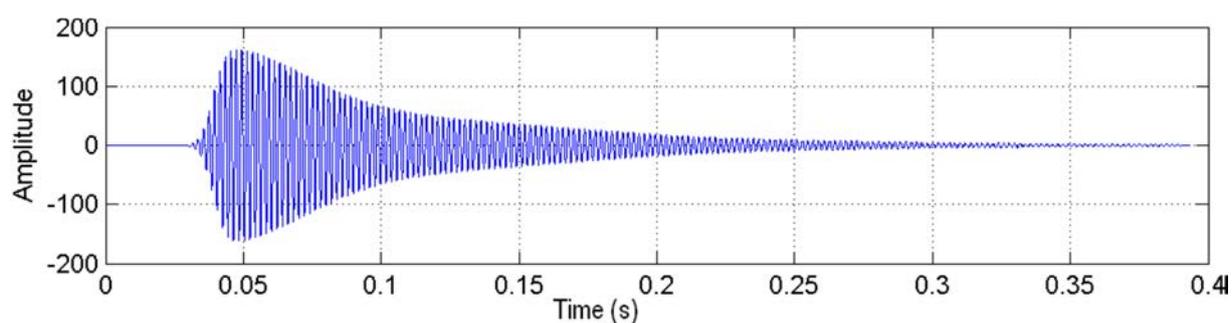


Figure 3.1.24: Magnitude de la transformée de Fourier

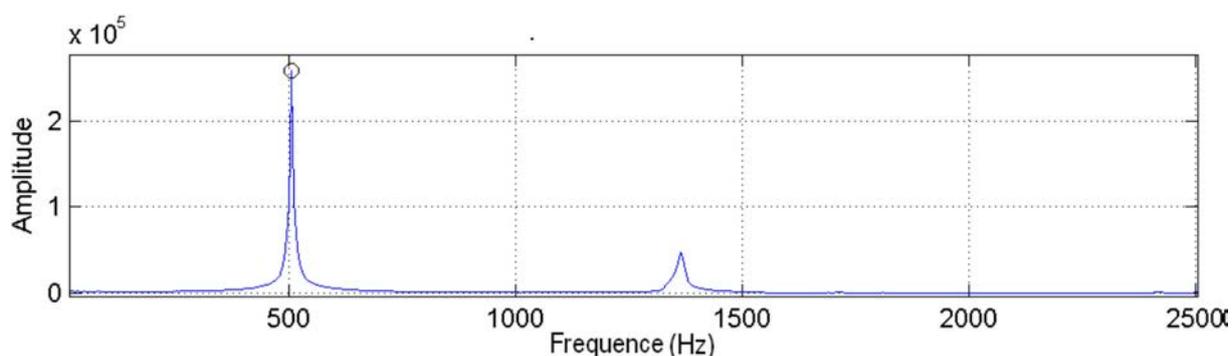


Figure 3.1.25 : Signal analytique associé aux modes de fréquence

Le mode opératoire se divise en 3 principales phases : la détermination de la masse volumique, la détermination du module d'élasticité et du module spécifique et la détermination du coefficient d'amortissement.

### 1.3.3. Essai de compression axial NF B 51-007 (1985)

*Contrainte de rupture en compression*

La résistance à la compression axiale correspond à la résistance du bois suivant la direction parallèle aux fibres jusqu'à la rupture des éprouvettes.

L'essai de compression uni-axiale est effectué suivant la norme française NF B 51-007.

Pour chaque essence, 15 éprouvettes ont été utilisées.

Les dimensions des éprouvettes ont de 60 mm (L) x 20 mm (R) x 20 mm (T) (figure 3.1.26).

Les essais de compression axiale ont été réalisés sur une presse de capacité maximale 100kN, disposant de deux plateaux dont l'un est muni d'une rotule comme le montre la figure 3.1.26.

Un effort continu est appliqué avec une vitesse constante de déplacement de la traverse mobile de 5 mm/min de façon à atteindre l'effort maximal après 1 à 2 minutes de chargement.

Durant l'essai, l'évolution de la charge a été enregistrée jusqu'à la rupture de l'éprouvette comme le montre les graphes dans la partie Résultats.

La presse est équipée d'une base, de deux colonnes verticales, et d'une plaque supérieure fixée à la traverse mobile, et d'un mécanisme de contrôle. Un élément de plus faible diamètre est vissé à la plaque supérieure pour faciliter le positionnement et le centrage de l'échantillon tandis qu'un joint hémisphérique de grand rayon rend cette plaque facilement orientable pour tenir compte du manque de parallélisme des faces mises en contact.

La presse est pilotée par un ordinateur, le logiciel Control permet d'actionner la presse et d'enregistrer les données après chaque essai. Ce logiciel d'acquisition de données permet de créer un fichier de données brutes constitué des valeurs de charges et de déformations.

La formule suivante nous a permis de calculer les valeurs de résistance à la compression :

$$\sigma_c (MPa) = \frac{P}{a * b}$$

Avec :

- P : charge maximale (N) ;
- a et b : dimensions de la section transversale de l'éprouvette (mm) ;



Figure 3.1.26 : Mise en place de l'essai de compression axiale (Photo DERBAL W.)

### 1.3.4. Essai de Cisaillement EN 314-1 (2005)

La contrainte de rupture en cisaillement définit la résistance du bois au glissement des fibres (des trachéides) les unes par rapport aux autres dans le plan considéré (longitudinal-radial ou longitudinal-tangentiel).

L'essai de cisaillement a été effectué selon la procédure définie dans la norme NF EN 314-1, en utilisant une machine d'essai universelle Zwick de type Z250 pilotée par un ordinateur équipé de logiciel test Xpert V9.0.

#### *Principe d'essai*

L'objectif de l'essai est d'étudier la résistance du bois suivant un mode de sollicitation en cisaillement ; ce mode de sollicitation est fréquent dans tous les emplois en structure.

Les éprouvettes doivent être centrées dans le dispositif de serrage afin que la charge puisse être transmise de la machine d'essai à la surface de cisaillement par l'intermédiaire des extrémités des éprouvettes, ceci sans sollicitation transversale ; un glissement est permis uniquement au début de la mise en charge. Le serrage est réalisé sur les faces. L'application d'une charge à vitesse constante est nécessaire pour que la rupture se produise en  $30 \pm 10$  secondes.

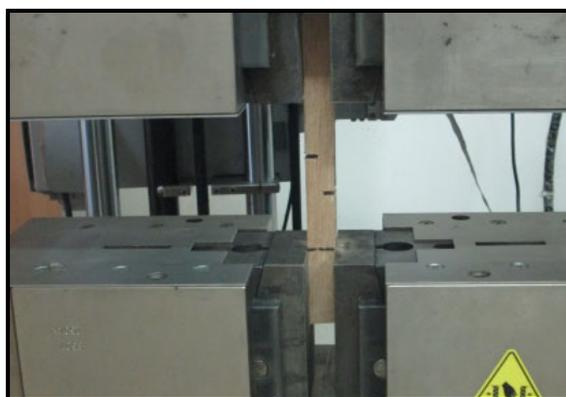


Figure 3.1.27: Essai de cisaillement.

(Photo DERBAL W.)

Pour chaque essence, 15 éprouvettes ont été préparées pour cet essai exécuté selon la norme EN 314-1.

La résistance au cisaillement  $f_v$ , exprimée en Newton par millimètre carré (N/mm<sup>2</sup>), est obtenue en utilisant la formule suivante :

$$f_v = \frac{F}{b * a}$$

F : charge de rupture de l'éprouvette, en Newton ;

b : hauteur de cisaillement, en mm (b=25 mm) ;

a : largeur de cisaillement, en mm (a=25).

## 1.4. Résultats et discussions (partie mécanique)

### *Contrainte de rupture en flexion statique et module d'élasticité longitudinal*

Le tableau 3.1.10 présente les valeurs moyennes obtenues pour les deux caractéristiques.

Tableau 3.1.10: Contrainte de rupture en flexion statique et module d'élasticité longitudinal

Paramètres	Pin d'Alep	Chêne afarès	Chêne zéen
Contrainte de rupture (MPa)	152	179	195
Module d'élasticité longitudinal (MPa)	9520	11050	12140

Les figures ci-après présentent les enregistrements obtenus lors des essais mécaniques en utilisant les valeurs issues de la machine d'essai de flexion quatre point.

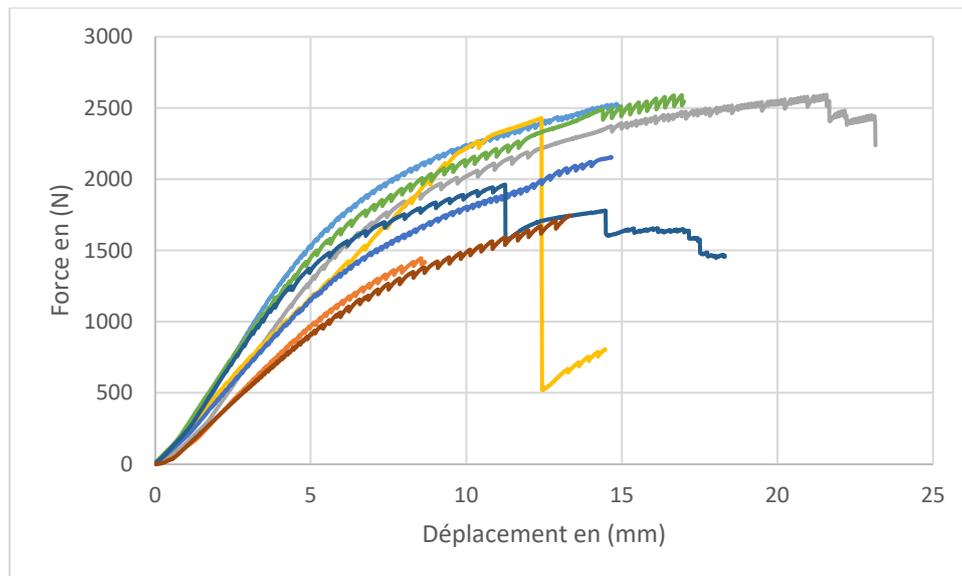


Figure 3.1.28: Courbe force-déplacement chêne afarès (essai de flexion quatre points)

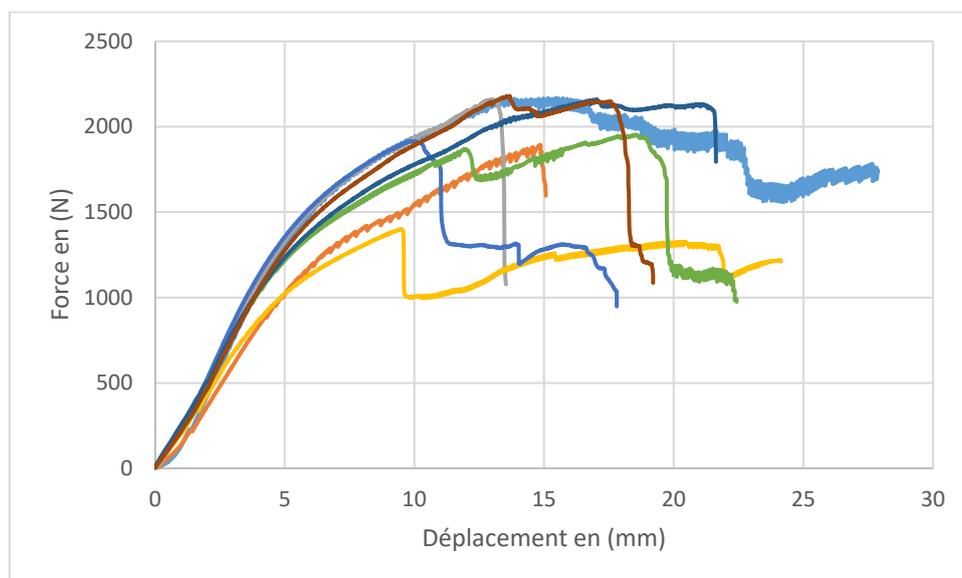


Figure 3.1.29: Courbe force-déplacement pin d'Alep (essai de flexion quatre points)

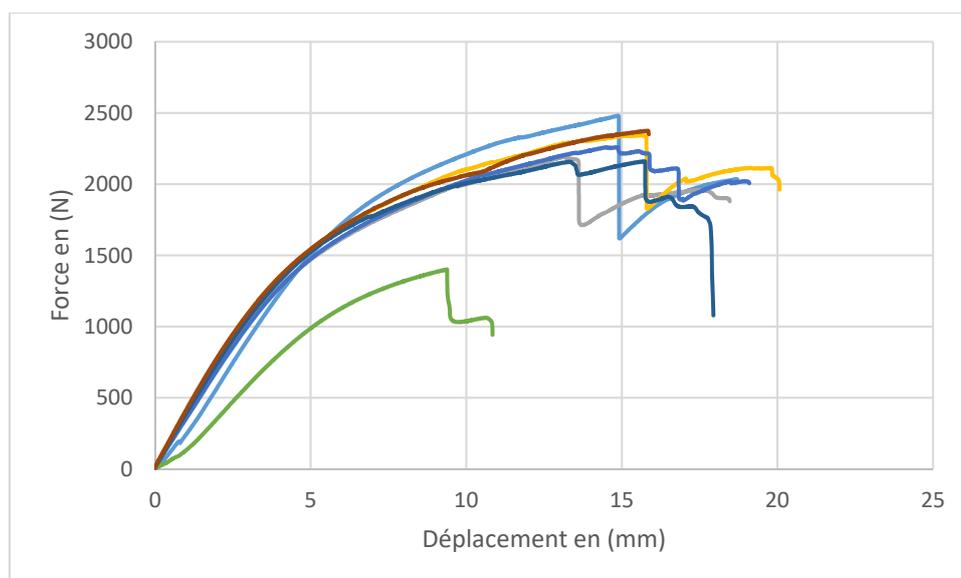


Figure 3.1.30 : Courbe force-déplacement chêne zéen (essai de flexion quatre points)

Dans la continuité des résultats obtenus pour la masse volumique, les mesures de contrainte de rupture en flexion et de module d'élasticité longitudinal montrent que le pin d'Alep se situe en dessous des deux chênes.

Il peut être considéré comme un pin aux propriétés tout à fait équivalentes, voire supérieures à celles d'autres espèces du genre auquel il est parfois comparé.

Le tableau ci-dessous présente ces deux caractéristiques mécaniques pour cinq espèces de Pin (valeurs issues du logiciel Tropix).

Tableau 3.1.11: Comparaison des caractéristiques mécaniques

Essences	Contrainte de rupture en flexion (MPa)	Module d'élasticité longitudinal (MPa)
<b>Pin d'Alep (Bouira)</b>	<b>152</b>	<b>9520</b>
Pin sylvestre*	97	12900
Pin maritime*	80	8800
Pin des Caraïbes*	85	11600
Pin à crochets*	90	9200

\* : Tropix base de données Cirad

Comme on pouvait s'y attendre à partir des résultats obtenus pour la masse volumique, les deux chênes présentent l'un comme l'autre des propriétés mécaniques très élevées.

Avec des valeurs respectivement de 179 MPa et 195 MPa d'une part, le chêne afarès et le chêne zéen présentent une contrainte de rupture en flexion très élevée (limite entre valeur moyenne et valeur élevée fixée à 125MPa). En revanche, les valeurs de module d'élasticité longitudinal moyen des deux essences restent moyennes, et sont indicatrices d'une relative souplesse de ces deux bois en rapport à leur résistance à la rupture

Ces résultats confirment les réelles potentialités d'utilisation en structure de ces deux essences pour une très large gamme d'emplois. Ces potentialités sont cependant à moduler car elles doivent prendre en compte les caractéristiques de stabilité des bois.

Nous avons vu au chapitre précédent que l'utilisation des deux espèces de chêne étudiées restait limitée par leur faible stabilité dimensionnelle.

De plus, pour des emplois en structure, l'utilisation de ces deux essences reste limitée par la disponibilité en pièces de dimensions suffisantes telles que demandées en construction.

Bien que pour ces deux essences, il soit possible de disposer de pièces de plus grande dimension sans nœud que pour le pin d'Alep, les techniques de reconstitution par collage semblent particulièrement adaptées pour valoriser au mieux ces bois sans perte de rendement matière excessive.

Les graphes force-déplacement enregistrés pour les 3 essences montrent des profils tout à fait conventionnels avec une première phase d'augmentation linéaire de la charge appliquée, suivi par une phase non linéaire jusqu'à la charge maximale correspondant à la rupture.

Les plus grandes disparités de résultats sont observées chez le pin d'Alep, ceci sans doute du fait de la présence de défauts internes dans le bois qui interfèrent sur la fin de la phase élastique et sur le point de rupture de l'éprouvette. Bien que ces essais aient été conduits sur des éprouvettes apparemment sans défaut, la présence de défauts internes, non visibles près profilage, est toujours possible.

Pour cette essence, la phase élastique de certaines éprouvettes apparaît en effet divisée en deux parties ; il semblerait qu'une première rupture se soit produite à la fin d'une « première » phase élastique, sans doute rupture partielle liée à la présence d'un défaut interne, puis que l'éprouvette soit repartie en phase élastique avant la rupture définitive.

Ce phénomène n'est pas du tout observé sur les deux chênes, les éprouvettes pour ces deux essences étant très probablement totalement exemptes de défauts internes, ceci en relation avec la structure même du bois de ces deux feuillus.

La comparaison des résistances mécaniques du pin d'Alep à celles d'autres espèces de pins est fortement à l'avantage de la première.

Sa contrainte à la rupture en flexion est très supérieure à celle des autres pins (près de 2 fois la valeur du pin maritime !). Ceci peut sans doute être expliqué par les conditions de croissance du pin d'Alep qui ne fait l'objet d'aucune sylviculture ; son statut est donc proche de celui d'une espèce de forêt naturelle, avec en conséquence un impact direct sur son niveau de qualité et sur ses propriétés.

### *Compression axiale*

Tableau 3.1.12 : Résultats de la contrainte de rupture en compression axiale

	Contrainte de rupture (valeurs moyennes en MPa)
Pin d'Alep	46
Chêne afarès	47

Chêne zéen	60
------------	----

Le pin d'Alep apparaît en toutes logiques le moins résistant pour cette caractéristique, mais suivi de près par le chêne afarès.

Les deux essences se situent à la limite entre une résistance faible et une résistance moyenne (seuil à 45 MPa).

Avec 60 MPa, le chêne zéen est le plus résistant (résistance moyenne, le seuil entre le niveau moyen et le niveau élevé se situant à 75MPa) ce qui corrobore les résultats obtenus pour la masse volumique et les autres propriétés mécaniques.

Cette (relative) faiblesse du chêne afarès peut être expliquée par la structure anatomique du bois et la nature de sa porosité qui influent directement sur la résistance mécanique suivant la direction longitudinale.

Globalement, les deux chênes apparaissent relativement faibles sur cette propriété, ceci sans impact sur leurs potentialités d'emploi en structure compte tenu de son caractère peu discriminant lorsqu'il s'agit de sélectionner une essence en fonction de ses caractéristiques mécaniques pour des utilisations en construction.

Le tableau ci-dessous présente les valeurs comparées de la contrainte de rupture en compression du pin d'Alep et de quatre autres espèces de Pin dont on peut le rapprocher (valeurs issues du logiciel Tropix).

Tableau 3.1.13: Les valeurs comparées

Essences	Contrainte de rupture en compression (MPa)
<b>Pin d'Alep (Bouira)</b>	<b>46</b>
Pin sylvestre*	48
Pin maritime*	38
Pin des Caraïbes*	45
Pin à crochets*	42

\* : Tropix base de données Cirad

Contrairement à ce qui avait été observé pour la contrainte de rupture en flexion, le pin d'Alep se situe au même niveau que les autres espèces de Pin pour la résistance en compression ; il est quasiment équivalent au pin sylvestre et légèrement supérieur aux autres pins.

Ce résultat confirme ceux présentés pour les précédentes propriétés mécaniques qui révèlent les bonnes qualités mécaniques du pin d'Alep d'Algérie.

Il faut noter que parmi les espèces présentées dans le tableau, c'est au pin maritime qu'il est le plus souvent comparé compte tenu de sa répartition géographique et de l'existence fréquente de peuplements en mélanges.

Tant pour sa résistance en flexion, son module d'élasticité longitudinal que pour sa résistance en compression, le pin d'Alep algérien apparaît systématiquement supérieur au pin maritime.

Les figures ci-après présentent les enregistrements obtenus lors des essais de compression pour les 3 essences.

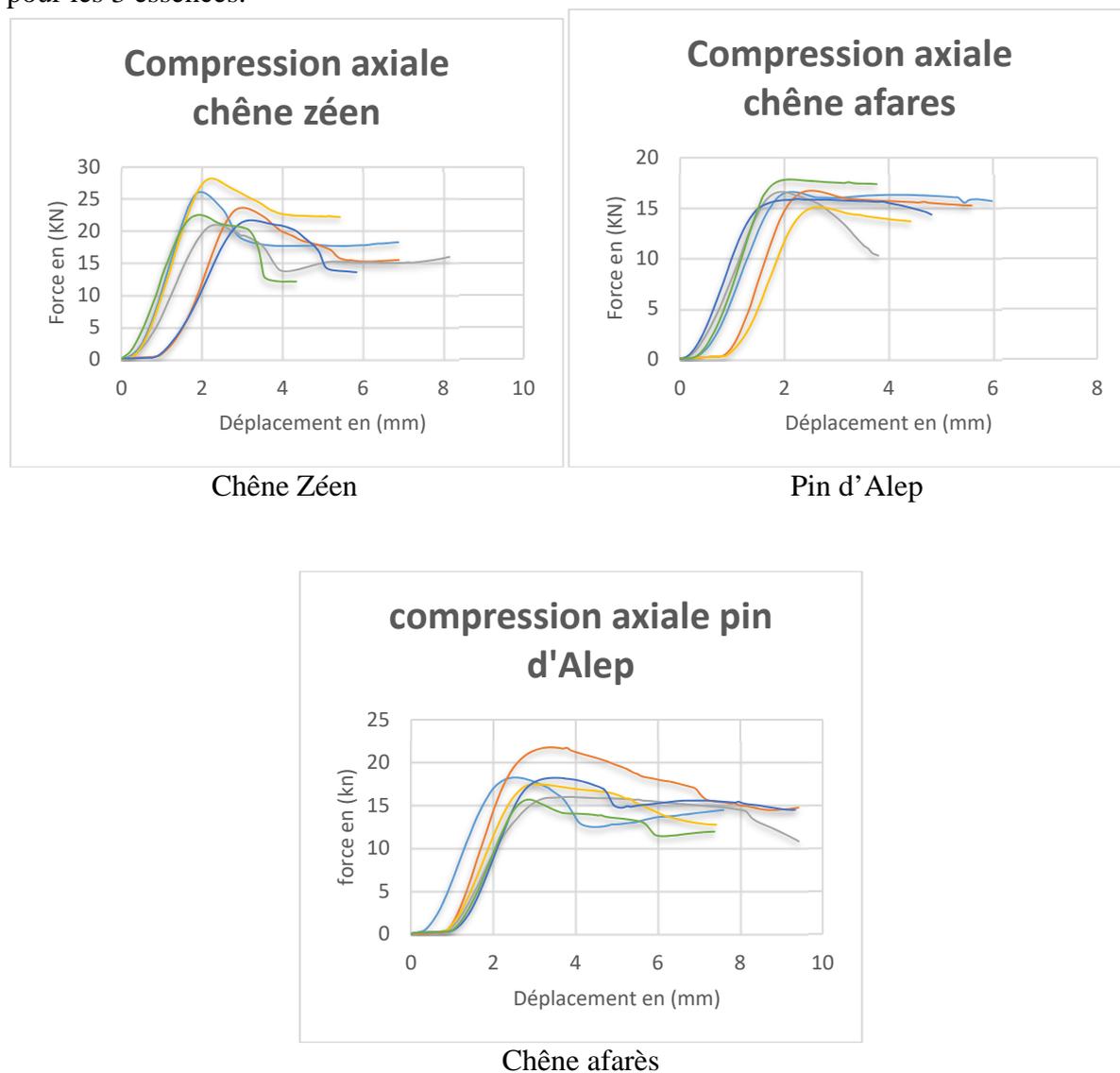


Figure 3.1.31 : Courbes force-déplacement : essai de compression axiale

Comme pour les essais de flexion, les graphes force-déplacement enregistrés pour les 3 essences montrent des profils tout à fait conventionnels avec une première phase d'augmentation linéaire de la charge appliquée, suivi par une phase non linéaire jusqu'à la charge maximale correspondant à la rupture.

Par rapport à la situation précédente, on observe une plus grande homogénéité des résultats et des courbes.

En particulier, on observe le même niveau de variabilité des profils pour le pin d'Alep que pour les 2 chênes.

En compression, la présence de défauts dans le bois de pin d'Alep interfère sans doute moins sur la fin de la phase élastique et sur le point de rupture de l'éprouvette que lors de l'essai en compression.

**Cisaillement**

Le tableau suivant récapitule les résultats des valeurs moyennes de la contrainte de rupture en cisaillement et du module de cisaillement des trois bois étudiés.

Tableau 3.1.14: Module de cisaillement et contrainte de cisaillement

	Résistance au cisaillement (MPa)	Module de cisaillement (valeurs moyennes en MPa) Méthode BING
Pin d'Alep	3,33	1417
Chêne afarès	4,41	1615
Chêne zéen	4,69	1625

Les valeurs de contraintes de rupture en cisaillement obtenues confirment les niveaux de résistance mécanique des 3 essences obtenus pour les autres caractéristiques.

Le pin d'Alep présente une résistance moindre que les deux chênes. Cependant, comme pour la résistance en compression, on observe un moindre écart en les 3 essences que celui observé en flexion. Ceci peut être expliqué par les phénomènes mis en jeu lors de la rupture des éprouvettes, en relation avec la structure anatomique des bois et l'impact relatif de la porosité sur les faciès de rupture.



Figure 3.1.32 : Rupture d'éprouvette d'essai de cisaillement (chêne afarès).

**Conclusion**

L'objectif principal des travaux présentés dans ce chapitre était de qualifier et classer les trois espèces testées par rapport à leurs propriétés physiques et mécaniques.

Une des finalités était d'évaluer le niveau de variabilité de ces propriétés sachant que cette variabilité constitue toujours un handicap pour les entreprises de transformation qui envisagent de valoriser une essence forestière sous forme de bois d'œuvre.

Ces entreprises souhaitent en effet travailler sur une matière première la plus homogène possible pour limiter les aléas dus aux variations de comportement des bois.

Il est donc crucial que les mécanismes qui régissent cette variabilité soient connues, et si possible contrôlés et maîtrisés afin de minimiser les contraintes de production. La campagne de caractérisation physique et mécanique des trois essences a ainsi permis de mieux cerner leurs variations de comportement technologique.

Les mesures de masse volumique ont montré que le pin d'Alep est en moyenne un bois léger alors que le chêne afarès et le chêne zéen sont respectivement lourd et très lourd.

Un retrait radial moyen est observé chez le pin d'Alep et le duramen de chêne afarès. Ce retrait radial est moyen à élevé chez le chêne zéen. Il est élevé dans l'aubier de chêne afarès. Le retrait tangentiel est faible chez le pin d'Alep, élevé chez le chêne afarès (aubier et duramen) et très élevé chez le chêne zéen. Ces caractéristiques doivent être prises en compte lors du choix de l'utilisation de ces bois.

Les deux chênes sont des essences difficiles à sécher ; ce comportement peut être expliqué par les retraits linéaires de séchage très élevés, tant suivant la direction radiale que tangentielle, ainsi que par les différences élevées entre le retrait tangentiel et le retrait radial ( $R_t - R_r$ ).

Le point de saturation des fibres du pin d'Alep est plus faible que celui des deux chênes. Il est en moyenne inférieur à 30% alors que celui des deux chênes est supérieur à cette valeur-seuil. Pour les retraits linéaires de séchage, on retrouve ce même positionnement relatif des trois essences les unes par rapport aux autres.

Ces résultats confirment la meilleure stabilité dimensionnelle du pin d'Alep par rapport aux deux chênes, meilleure stabilité qui se traduit par un meilleur comportement au séchage ; pour cette essence, le développement de défauts de séchage (fentes, déformations) est en grande partie dû à l'importance et à la fréquence des nœuds qui nuisent à la stabilité physique des bois.

Les résultats obtenus pour les caractéristiques mécaniques vont dans le même sens que ceux obtenus pour les caractéristiques physiques.

En moyenne, la contrainte de rupture en flexion et le module d'élasticité longitudinal du pin d'Alep sont inférieurs à ceux du chêne afarès et du chêne zéen.

En revanche, les propriétés mécaniques du pin d'Alep sont au même niveau, voire supérieures à celles d'autres espèces de pin (pin maritime, pin à crochets) qui se situent sur les mêmes créneaux d'utilisation.

Les résultats de propriétés mécaniques très élevées obtenus pour les deux chênes concordent avec ceux obtenus pour la masse volumique.

L'ensemble de ces résultats confirment les réelles potentialités d'utilisation en structure de ces deux essences pour une très large gamme d'emplois. Ces potentialités sont cependant à moduler car elles doivent prendre en compte les caractéristiques de stabilité du matériau. L'utilisation des deux espèces de chêne étudiées reste effectivement limitée par leur faible stabilité dimensionnelle.

## Partie 3 : Méthodes et Résultats

### Chapitre 2 : Qualification de l'aboutage à entures multiples

## Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la démarche suivie et les résultats obtenus pour la qualification des aboutages à entures multiples.

Les aboutages ont été qualifiés par des essais mécaniques de flexion (détermination de la contrainte de rupture) et des essais utilisant une méthode vibratoire pour déterminer le module d'élasticité longitudinal et le module de cisaillement transverse.

Ces essais ont été réalisés selon la norme *XP CEN/TS 13307-1&2* Ebauches et profilés semi-finis en bois lamellé-collé et assemblés par entures multiples pour usages non structurels ; partie 2 : Contrôle de production.

### 2.1. Caractérisation et qualification des aboutages

Pour valider la faisabilité de ce type de fabrication pour les bois sélectionnés et qualifier la tenue des aboutages, la résistance mécanique des bois aboutés a été comparée à celles des bois massifs.

Quatre caractéristiques de référence ont été étudiées :

- Masse volumique,
- Module d'élasticité longitudinal et module de cisaillement transverse par méthode vibratoire (méthode BING®),
- Contrainte de rupture en flexion longitudinale (flexion 4 points).

#### *Eprouvettes d'essai*

Comme décrit dans la partie Matériel, les éprouvettes sont élaborées conformément aux préconisations de la norme *XP CEN/TS 13307-1&2 (2010-01-01) Ébauches et profilés semi-finis en bois lamellé-collés et assemblés par entures multiples pour usages non structurels*.

Pour chacune des trois essences, plus de 40 éprouvettes ont été fabriquées pour le bois abouté et pour le bois massif. Elles ont été triées afin d'éliminer celles présentant des défauts internes identifiés après usinage ; ces défauts étaient particulièrement présents sur le chêne zéen et le chêne Afarès.



Figure 3.2.1 : Profil des entures multiples

(photo W. Derbal)

Avant essai, les éprouvettes ont été stabilisées en salle climatisée à 20 °C et 65 % d'humidité relative (taux d'humidité théorique du bois de 12 %) durant 25 jours.

La géométrie des entures est celle utilisée de façon standard par l'entreprise Transbois.

La figure 3.2.2 présente le détail du profil des aboutages (des entures).

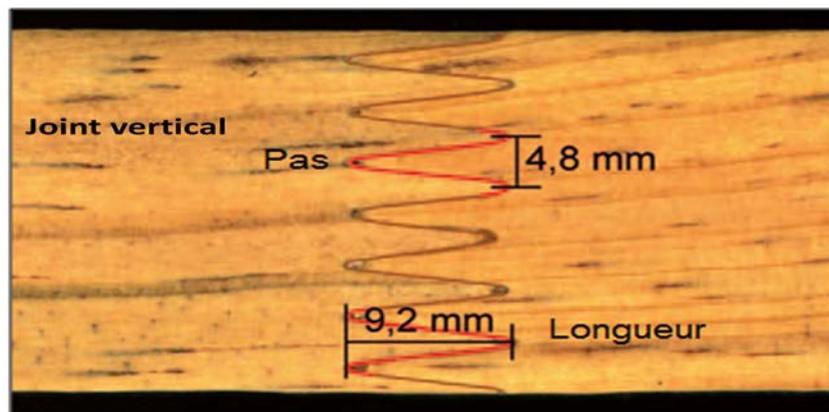


Figure 3.2.2 : Géométrie des entures multiples.

### 2.1.1. Détermination de la masse volumique, du module d'élasticité longitudinal et du module de cisaillement transverse par méthode vibratoire (méthode BING®)

Les principes et les modalités d'exécution de la méthode BING sont détaillés dans le chapitre 1 de la partie **Matériels**.

### 2.1.2.      Contrainte de rupture en flexion longitudinale (flexion 4 points)

L'objectif de l'essai est d'évaluer la résistance des éléments aboutés par rapport aux éléments en bois massif.

Les caractéristiques de l'essai sont les suivantes :

- \* Mesure en trois points de la largeur et de l'épaisseur de chaque éprouvette afin d'en déterminer une valeur moyenne.
- \* Positionnement des éprouvettes sur les rouleaux du bâti d'essais, l'espacement entre les rouleaux supérieurs devant être supérieur à 6 fois la hauteur de l'éprouvette : 150 mm dans le cas présent car la hauteur  $h$  des éprouvettes est de 25 mm (figures 3.2.3 et 3.2.4).
- \* Positionnement de la zone d'entures des éprouvettes avec aboutages dans l'espacement central, les aboutages étant visibles sur la face latérale.
- \* Enregistrement de la force maximale pour obtenir la rupture de chaque éprouvette.

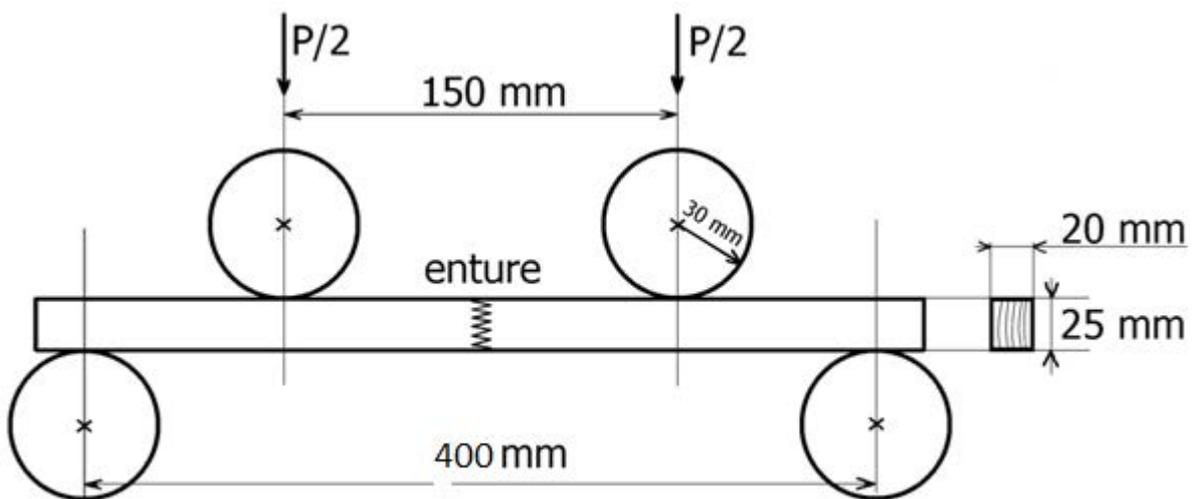


Figure 3.2.3 : Schéma du bâti d'essai de flexion (D. Guibal)

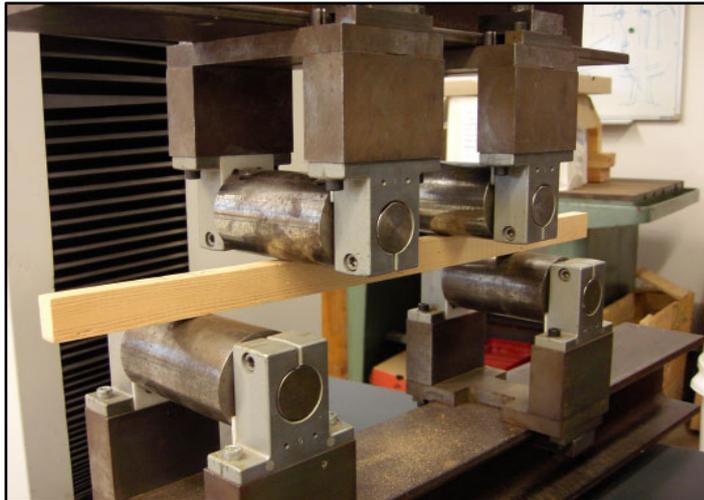


Figure 3.2.4 : Bâti utilisé pour les essais de flexion

(photo W. Derbal)

#### 2.1.2.1. Résistance en flexion statique et valeurs caractéristiques

Selon la norme-référence (norme XP CEN/TS 13307-2, 2010-01-01), les valeurs caractéristiques de l'essai de rupture en flexion statique sont définies de la façon suivante :

- **Résistance  $f_{mi}$  de chaque éprouvette  $i$**

$$f_{mi} = \frac{F_i \cdot L_i}{b_i \cdot t_i^2}$$

Avec :

$f_m$  : résistance en flexion, en MPa ;

$F$  : force maximale, en N ;

$L$  : espacement entre rouleaux, en mm ;

$b$  : largeur de la section transversale de l'éprouvette, en mm ;

$t$  : hauteur de l'éprouvette, en mm ;

$i$  : indice de la  $i^{\text{ème}}$  éprouvette.

- **Valeurs caractéristiques des échantillons aboutés**

Valeur moyenne  $\bar{f}_m$ .

Ecart-type et coefficient de variation CVa.

Valeur du 5<sup>ème</sup> percentile selon la formule :

$$f_{m05} = \bar{f}_m - 1,7 \cdot S_{fm}$$

Avec :

$f_{m05}$  : valeur du 5<sup>ème</sup> percentile de la résistance, en MPa ;

$\bar{f}_m$  : Valeur moyenne de la résistance, en MPa ;

$S_{fm}$  : écart-type, en MPa.

### Valeurs caractéristiques des échantillons massifs

. Valeur moyenne  $f_{mr}$

. écart-type e.t.

. Coefficient de variation CVm

Selon la norme XP CEN/TS 13307-2, l'interprétation des résultats nécessitera de plus la prise en compte du rapport Rb des valeurs moyennes de chacun des deux types d'éprouvettes :

$$Rb = \frac{f_{mr}}{\bar{f}_m}$$

#### 2.1.2.1. Qualification du collage et performances des entures

Selon la norme-référence (norme XP CEN/TS 13307-2, 2010-01-01), la qualité du collage des entures peut être considérée comme satisfaisante, comparativement à la résistance du bois massif, si les trois critères suivants sont respectés :

- $Rb \leq 2$  ( $Rb$  = rapport des valeurs moyennes des deux groupes d'éprouvettes, massives et aboutées) ;
- $f_{m05} \geq 17 \text{ N/mm}^2$  ;
- variabilité de la résistance dans un lot d'éprouvettes inférieure à 20 % (résistances prises en compte uniquement lorsque la rupture s'est produite dans l'aboutage).

## 2.2. Résultats et discussions

Dans cette partie nous présentons tous les résultats obtenus et nous comparons ensuite le bois massif et le bois abouté.

### 2.2.1. Comparaison des modules d'élasticité longitudinaux, des modules de cisaillement et des masses volumiques des bois massifs et aboutés

Les résultats obtenus pour les trois essences et les deux types de bois (massifs et aboutés) sont donnés dans le tableau 3.2.1.

La masse volumique des bois aboutés est systématiquement supérieure à celle des bois massifs pour les trois essences ; l'écart de masse volumique observé peut être lié à l'effet de la variabilité du bois (différence de qualité des bois sélectionnés pour le collage) auquel s'ajoute, dans une moindre mesure, la densification des bois aboutés due à la colle ; cet écart ne peut pas s'expliquer par des différences d'humidité entre les deux catégories de bois car les bois massifs et les bois aboutés ont été stabilisés de la même façon en chambre climatique avant les essais.

Tableau 3.2.1. : Comparaison bois massifs / bois aboutés pour les trois caractéristiques déterminées avec la méthode vibratoire

	Pin d'Alep		Chêne Afarès		Chêne Zéen	
	Massif (28)	Abouté (28)	Massif (21)	Abouté (21)	Massif (24)	Abouté (24)
(nombre d'éprouvettes testées)/ Paramètres déterminés						
Module d'élasticité longitudinal moyen E <sub>L</sub> (méthode Bing, en MPa) [écart-type]	10944 [1554]	10097 [2020]	14404 [1937]	14015 [1098]	14597 [1870]	14450 [832]
Module de cisaillement transverse moyen G (MPa) [écart-type]	1417 [1996]	1377 [591]	1615 [1027]	1543 [316]	1187 [199]	1607 [291]
Masse volumique moyenne M <sub>v</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) [écart-type]	557 [24]	637 [36]	806 [42]	912 [75]	898 [83]	1020 [68]

Pour chacune des trois essences, les deux propriétés mécaniques E<sub>L</sub> et G obtenues sur bois massif sont comparées à celles sur bois abouté. Compte tenu de la taille relativement limitée de ces échantillons, les distributions de valeurs ont été comparées deux à deux à l'aide d'un test non paramétrique : un test de Mann-Whitney a été retenu (test de rang applicable pour comparer deux échantillons).

Les résultats obtenus pour les trois essences sont repris dans le tableau 3.2.2.

Tableau 3.2.2 : Comparaison des caractéristiques mécaniques des bois massifs et aboutés : résultats du test (non paramétrique) de Mann-Whitney (test de rang)

Paramètres	Pin d'Alep		Chêne Afares		Chêne Zéen	
	E <sub>L</sub>	G	E <sub>L</sub>	G	E <sub>L</sub>	G
U (stat. de Mann-Whitney)	479	302	279	141	270	49
Espérance	392	392	221	221	288	288
Variance (U)	3724	3723	1580	1580	2351	2351
p-value (bilatérale)	0,156	0,14	0,145	0,047*	0,718	<0,0001*
alpha	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Hypothèse nulle H <sub>0</sub> : la différence de position des échantillons est égale à 0						
H <sub>0</sub> est rejetée si p-value < alpha						
* : p-value < alpha						

\* : p-value < alpha.

E<sub>L</sub> : modules d'élasticité en flexion ; G : modules de cisaillement transverses en (MPa)

Pour le module d'élasticité longitudinal, la différence entre le bois massif et le bois abouté est non significative pour les trois essences (l'hypothèse nulle est acceptée dans les trois cas).

Pour le module de cisaillement transverse, la différence entre le bois massif et le bois abouté est non significative pour le pin d'Alep ; elle est très significative au seuil 5 % pour le chêne zéen et peu significative pour le chêne afares (l'hypothèse nulle est rejetée dans les deux cas).

Pour le chêne zéen, le module de cisaillement moyen du bois massif est remarquablement bas. Cette faible valeur pourrait être liée à la structure particulière de ce bois dont la maillure est très marquée (rayons ligneux très importants) et dont le fil est très irrégulier, ainsi qu'à la présence de défauts internes (fentes) dans les éprouvettes massives.

Excepté pour cette caractéristique pour le chêne zéen, on peut considérer que les comportements des bois massifs et aboutés sont comparables.

### 2.2.2. Comparaison du comportement à la rupture en flexion des bois massifs et des bois aboutés

Les figures 3.2.5, 3.2.6 et 3.2.7 (*notched box plots* ou « boîte à moustaches à encoches ») présentent les distributions des contraintes de rupture en flexion pour les trois essences et pour les deux types de bois, massif et abouté.

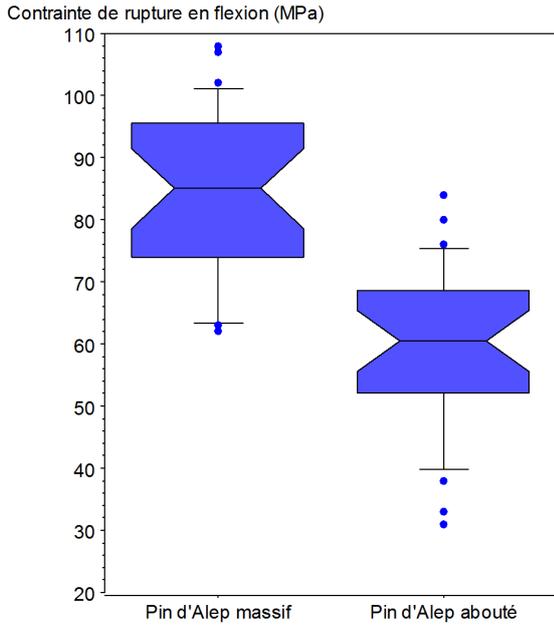


Figure 3.2.5 : Distribution des contraintes de rupture en flexion pour le pin d'Alep, *Pinus halepensis* Mill.

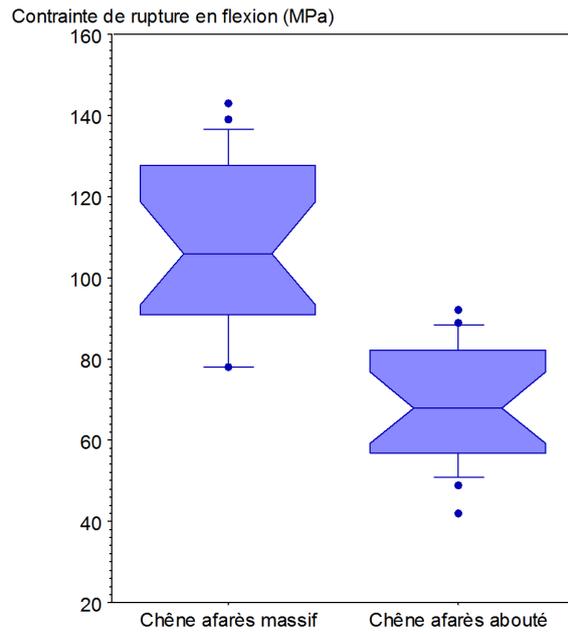


Figure 3.2.6 : Distribution des contraintes de rupture en flexion pour le chêne afarès, *Quercus afares* Pomel.

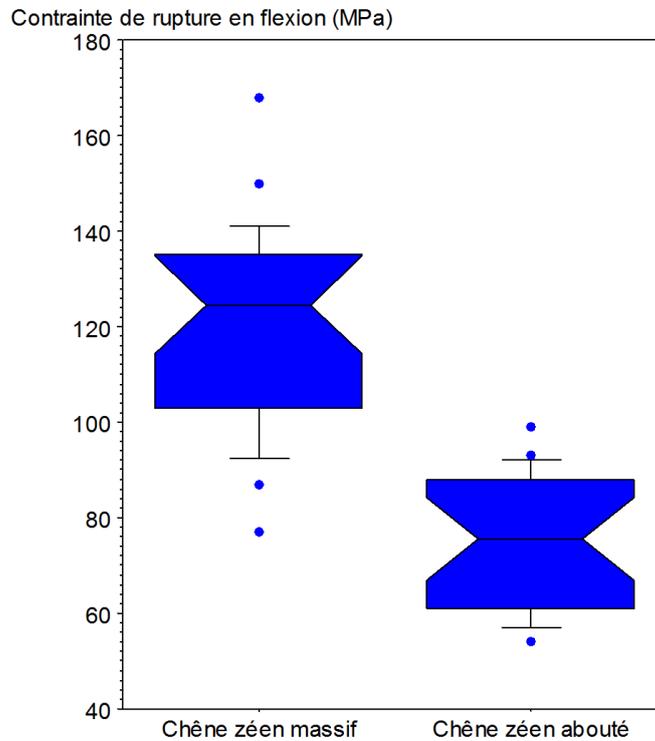


Figure 3.2.7 : Distribution des contraintes de rupture en flexion pour le chênezeen, *Quercus canariensis* Willd.

Les deux distributions « bois massif » et « bois abouté » sont décalées, le décalage entre les encoches (*notches*) des « boîtes à moustaches » indique que la différence de position entre les médianes des distributions est significative.

Pour chacune des trois essences, les contraintes de rupture des bois aboutés sont systématiquement inférieures à celles obtenues sur bois massif.

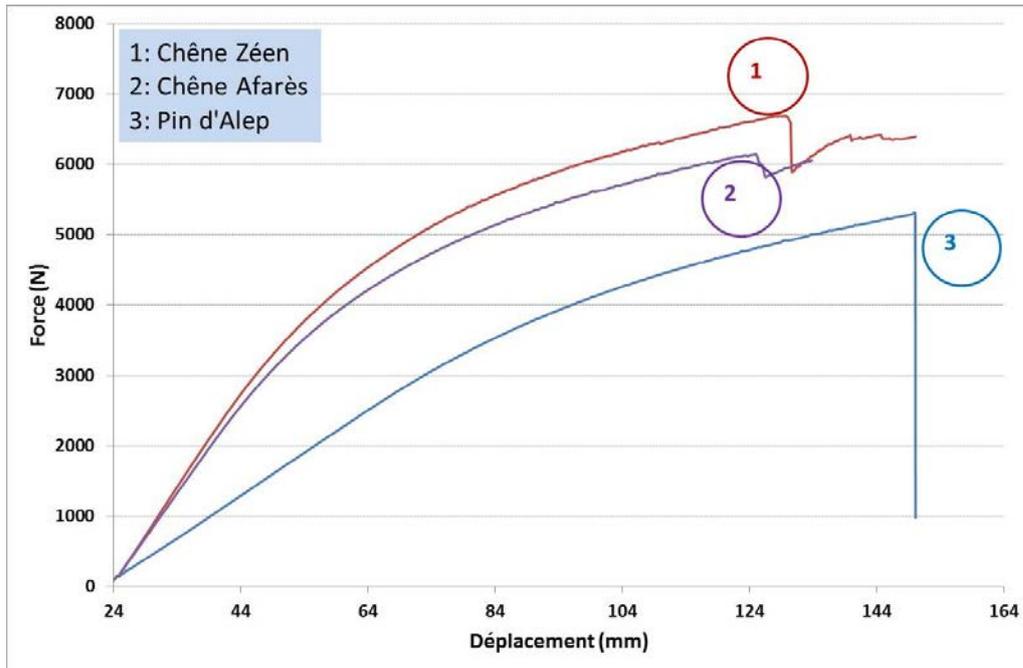


Figure 3.2.8: Courbe force-déplacement type pour la rupture en flexion des bois massifs du pin d'Alep, *Pinus halepensis* Mill., du chêne afarès, *Quercus afarès* Pomel, et du chêne zéen, *Quercus canariensis* Willd.

### Bois massifs

Le comportement à la rupture des trois essences et les niveaux de contraintes obtenus correspondent aux résultats disponibles dans la littérature (Messaoudene *et al.* 2008 ; Ameels, 1989 ; Berrichi, 1993 ; Langbour *et al.* 2011 ; Thibaut *et al.* 1992) : les moyennes des contraintes à la rupture pour le pin d'Alep, le chêne afarès et le chêne zéen sont respectivement de 85, 108 et 121 MPa.

Ces résultats couplés à ceux obtenus pour la masse volumique et le module d'élasticité montrent que : (1) le pin d'Alep testé est un bois léger aux propriétés mécaniques faibles à moyennes ; (2) le chêne Afarès est un bois mi-lourd à lourd aux propriétés mécaniques moyennes ; (3) le chêne zéen est un bois lourd associé à des propriétés mécaniques moyennes à élevées.

Les essais ont porté sur des petites éprouvettes normalisées sans défaut, ce qui a limité la variabilité des résultats due à la présence aléatoire des défauts, et a permis d'obtenir pour les

trois essences des faciès de rupture homogènes, associés à des courbes force-déplacement types en rupture en flexion 4 points (figure 3.2.8).

### **Bois aboutés**

Pour les bois aboutés, les valeurs de contrainte à la rupture en flexion sont en moyenne plus faibles que celles des bois massifs, respectivement 59 MPa pour le pin d'Alep, 68 MPa pour le chêne afarès et 75 MPa pour le chêne zéen.

La diminution de contrainte sur bois aboutés est plus faible pour le pin d'Alep que pour les deux chênes (diminution respectivement de 31 % pour le pin d'Alep contre 37 % et 38 % pour les deux autres essences) ; ceci est lié à la moins bonne qualité du collage et de l'assemblage des entures pour les deux chênes.

En effet, pour les trois essences, la qualité des aboutages réalisée dans l'entreprise s'est révélée fluctuante du fait d'un profilage des entures insuffisamment précis et/ou d'une pression de serrage lors du collage insuffisante (figures 3.2.9 et 3.2.10).

De plus, pour les trois essences, le séchage du bois a pu présenter une certaine hétérogénéité, avec pour certaines pièces des taux d'humidité supérieurs à ceux préconisés pour l'emploi d'une colle vinylique à un composant. Cette hypothèse n'a cependant pas pu être vérifiée car le taux de d'humidité des bois n'a pas été systématiquement mesuré avant aboutage

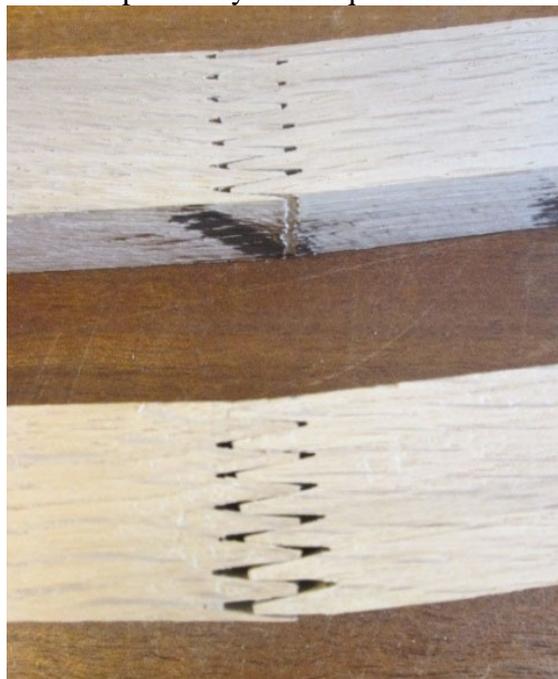


Figure 3.2.9 : Défauts d'aboutages (entures mal profilées ou pression de serrage insuffisante) : les entures ne sont pas ajustées.

Photo W. Derbal

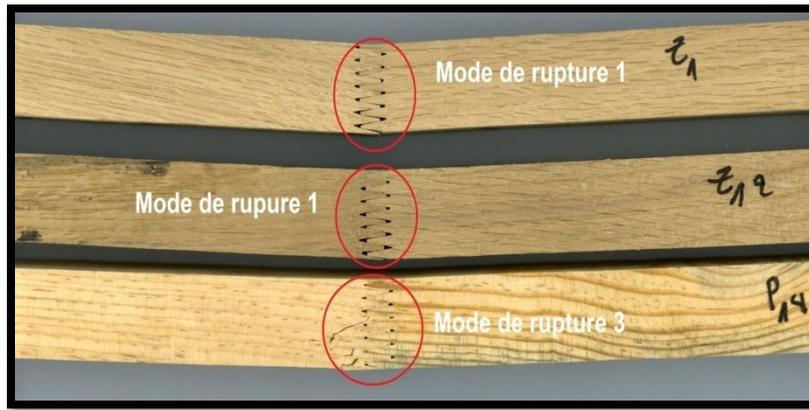


Figure 3.2.10 : Le manque d'ajustement des entures provoque un décollement des joints de colle sur les trois essences

Photo W. Derbal

Les aboutages avaient été cependant triés préalablement aux essais ce qui a permis de limiter la dispersion des résultats.

La pression de serrage lors de la fabrication des aboutages est celle habituellement utilisée par l'entreprise de façon indifférenciée pour toutes les essences ; les plus fréquemment utilisées sont les résineux.

De ce fait, les aboutages des deux essences les plus dures, le chêne zéen et le chêne afarès, ont été les plus pénalisés par ce défaut de fabrication.

### 2.2.3. Valeurs caractéristiques de la contrainte de rupture en flexion statique

Le tableau 3.2.3 reprend les valeurs caractéristiques déterminées à l'issue des essais de contrainte de rupture en flexion statique.

Ces valeurs sont indicatrices de la qualité du collage considérée ou non comme satisfaisante conformément aux préconisations de la norme de référence XP CEN/TS 13307-2

Tableau 3.2.3 : Valeurs caractéristiques pour la contrainte de rupture en flexion statique (bois massifs et bois aboutés).

Valeurs caractéristiques	pin d'Alep	chêne afarès	chêne zéen
<b>Bois massif</b>	28 éprouvettes	21 éprouvettes	24 éprouvettes
$f_{mr}$ (MPa)	84,2	108,0	121,3
e.t. (MPa)	13,7	20,3	21,0
CVm (%)	16,2	18,8	17,3
<b>Bois abouté</b>	28 éprouvettes	21 éprouvettes	24 éprouvettes
$\bar{f}_m$ (MPa)	58,7	68,2	75,2
$S_{fm}$ (MPa)	11,2	13,8	13,9
CVa (%)	19,0	20,3	18,5

$f_{m05}$ (MPa)	39,6	44,7	51,6
$Rb (= \frac{f_{mr}}{f_m})$	1,43	1,58	1,61

Les résultats contenus dans le tableau 3.2.3 montrent que, pour les trois essences, les valeurs caractéristiques obtenues sont conformes aux préconisations de la norme, excepté pour la variabilité de la résistance du chêne afarès abouté très légèrement supérieure à 20 % (20,3 %).

Pour les autres caractéristiques, on a bien :

- $Rb \leq 2$  ( $Rb$  = rapport des valeurs moyennes des deux groupes d'éprouvettes, massives et aboutées) ;
- $f_{m05} \geq 17 \text{ N/mm}^2$  ;
- $CV \leq 20\%$ .

Les éprouvettes présentant des défauts d'aboutage visibles (aboutages non jointifs en fond d'enture) ont été écartées car non conformes à ce que doit être ce type d'assemblage.

Cependant, les éprouvettes qui ont été conservées pour les essais car elles étaient apparemment conformes ont pu aussi être pénalisées par de mauvaises conditions de collage (pression de serrage insuffisante, imprécision de l'usinage des entures).

Une fabrication des aboutages avec un meilleur respect des règles de l'art aurait très probablement donné de meilleurs résultats même si ceux obtenus dans le cas présent peuvent être considérés comme satisfaisant.

## Conclusion

Les résultats obtenus lors de cette partie de travail, en utilisant la technique d'aboutage à entures multiples ont montré un très bon comportement des bois en générale, ce qui signifie la réussite de profilé réalisé avec la colle vinylique utilisé.

en comparant les caractéristiques des bois massifs aux celles des bois abouté à travers l'étude de la qualité de la tenue des aboutages, nous avons constaté que la rigidité et la résistance des bois ont été trop proches.

## Partie 3 : Méthodes et Résultats

### Chapitre 3 : étude du comportement mécanique et qualification du collage des carrelets trois plis

## Introduction

Aujourd'hui on assiste à une demande croissante de carrelets bois trois plis notamment pour le domaine de la menuiserie. Ce composite massif présente de nombreux avantages : stabilité dimensionnelle, produits présentant très peu de défauts éliminés lors de la mise à dimension des pièces, homogénéité de qualité. Cependant, certaines interrogations demeurent concernant son vieillissement et les risques de délamination des plis liés à la qualité du collage (CERIBOIS).

### 3.1. Etude du comportement mécanique des carrelets

L'objectif principal des essais conduits sur les carrelets 3-plis est de caractériser et qualifier ces composites massifs fabriqués en pin d'Alep, chêne afarès et chêne zéen, ainsi qu'en pin d'Alep et chêne afarès en mélange.

Cette qualification passe par l'évaluation du plan de colle des lamelles et la détermination de la résistance à l'humidité des carrelets par un essai de délamination pour la classe de service 1 (portes et fenêtres intérieures) et classe de service 2 (portes et fenêtres extérieures abritées de la pluie) conformément à la norme XP CEN/TS 13307-1&2 (2010-01-01).

De plus, un essai de vieillissement accéléré a été réalisé sur la roue Gardner.

Trois colles ont été mises en œuvre pour fabriquer ces carrelets trois plis :

- une colle vinylique<sup>1</sup> mono composant utilisée par l'usine TRANSBOIS,
- une Emulsion Polymer Isocyanate *Casco Adhesives* (EPI 1989),
- une colle vinylique<sup>2</sup> mono composant.

#### *Echantillonnage et éprouvettes d'essai*

Conformément aux prescriptions de la norme XP CEN/TS 13307-2 utilisée comme référence, échantillonnage de 16 à 22 éprouvettes a été constitué par type de produit ; ces éprouvettes ont été découpées dans quatre profilés lamellés pour chaque type de carrelet et selon chaque colle utilisée.

Le détail de la procédure de fabrication et de prélèvement des échantillons a été donné dans le chapitre Matériels.

Les dimensions des éprouvettes sont les suivantes :

- longueur : 50 mm ;
- largeur : 50 mm ;
- épaisseur : 75 mm.

**Partie 3 : Méthodes et résultats Chapitre 3: Etude du comportement mécanique et qualification du collage des carrelets trois plis**

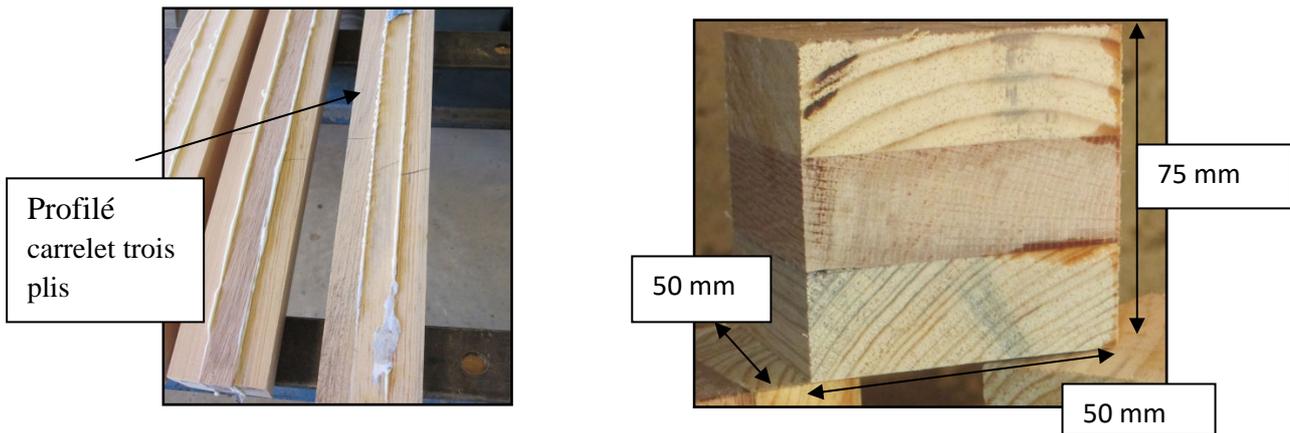


Figure 3.3.1 : Fabrication des éprouvettes d'essais à partir des carrelets

(Photo : W. Derbal)

Le tableau suivant synthétise les différentes compositions de carrelets étudiées et les colles utilisées

Tableau 3.3.1 : Données sur les éprouvettes d'essai de délamination

Types de colle	Types de carrelets et nombre d'éprouvette			
	pin d'Alep pur	chêne afarès pur	chêne zéen pur	Mélange pin d'Alep-chêne afarès
Colle vinylique 1 (mono composant)	22	20	19	20
La colle EPI 1989	20	20	18	18
Colle vinylique 2 (mono composants)	18	16	16	18

### 3.1.1. Détermination de la résistance à l'humidité : Essai de délamination suivant la norme XP CEN/TS 13307-1&2 (2010-01-01)

Avant essai, les éprouvettes ont été stabilisées en salle climatique à 20°C et 65% d'humidité relative (taux d'humidité théorique du bois de 12%).

#### Evaluation du plan de colle Mesure de plan de colles

Selon cette norme référence, les exigences de conditionnement sont différentes pour la classe de service 1 et 2.

Pour la classe de service 1, les éprouvettes sont simplement conditionnées dans une étuve ventilée.

**Partie 3 : Méthodes et résultats Chapitre 3: Etude du comportement mécanique et qualification du collage des carrelets trois plis**

Pour la classe de service 2, les éprouvettes sont immergées dans un bain thermostaté puis conditionnées dans une étuve ventilé.

Durant cet essai, les deux facteurs contrôlés sont la température de bain et de l'étuve et le temps de conditionnement.

Note

**Bain thermostaté** : c'est un récipient dans lequel un lot d'éprouvette peut être complètement immergé, doté d'une résistance pour chauffer l'eau, d'un thermocouple pour réguler la température, et d'un dispositif de brassage de l'eau pour homogénéiser la température de l'eau.

**3.1.1.1. Détermination de la masse volumique des carrelets**

La détermination de la masse volumique  $M_v$  des carrelets est nécessaire car cette propriété intervient dans la formule qui permet d'apprécier la qualité du collage en fonction du taux de délamination mesuré (*Quantification de la délamination : calcul des résultats*).

La masse volumique a été déterminée selon la norme française NF B 51-005 (1985).

La masse  $M$  des échantillons est obtenue à l'aide d'une balance de précision (+/- 0,01 g) et le volume  $V$  est déterminé à partir des dimensions des éprouvettes mesurées à l'aide d'un pied à coulisse.

$$M_v = \frac{M}{V} \quad (\text{kg/m}^3)$$

Le tableau 3.3.2. présente les résultats obtenus pour les 12 catégories de produits.

Tableau 3.3.2 : Masse volumique  $M_v$  des carrelets

	Masse volumique moyenne $M_v$ (kg/m <sup>3</sup> ) par type de carrelet			
	Carrelets en Pin d'Alep pur	Carrelets en Chêne Afarès pur	Carrelets en Chêne Zéen pur	Carrelets mixte Pin d'Alep - Chêne Afares
Colle vinylique 1	628	869	979	694
Colle EPI	543	908	1008	700
Colle vinylique 2	576	853	962	689

Commentaires : La masse volumique des carrelets est évidemment fonction de celle des essences de bois utilisées pour leur fabrication mais aussi de celle de l'adhésif employé pour le collage des lamelles. Elle dépend aussi de la capacité d'absorption des bois ainsi que de la viscosité de la colle.

### **Partie 3 : Méthodes et résultats Chapitre 3: Etude du comportement mécanique et qualification du collage des carrelets trois plis**

C'est pour le pin d'Alep, essence dont la masse volumique est la plus faible, que l'on observe les différences de densité les plus importantes entre les 3 types de carrelets collés, dans un rapport de 1 à 1,16 entre les collages EPI et les collages vinylique 1.

Pour les deux chênes, les variations sont moindres, essentiellement du fait de la plus forte densité .

#### **3.1.1.2. Essai de délamination pour la classe de service 2 (produits abrités de la pluie - portes et fenêtres extérieures)**

Avant de commencer l'essai, nous avons mesuré les dimensions des plans de colle de chaque éprouvette à l'aide d'un réglet :

- Largeur à 0.1mm près ;
- Longueur à 1mm près.

Les plans de colle ont été numérotés sur chaque éprouvettes pour assurer la traçabilité des mesures comme le montre la figure ci-dessous



Figure 3.3.2 : Eprouvette avec numérotation des plans de colle.

(DERBAL W.)

**Partie 3 : Méthodes et résultats Chapitre 3: Etude du comportement mécanique et qualification du collage des carrelets trois plis**

*Succession des étapes de conditionnement dans le bac*



Figure 3.3.3 : Le bain thermostaté.

(DERBAL W.)

- Préparation des bacs de conditionnement dont l'eau est chauffée à (20°C) ;
- Immersion des éprouvettes dans les bacs préparés pendant 180 min à 20°C;
- Monter la température de l'eau à (60 ±2)°C en l'espace de 60 min;
- Maintenir la température de l'eau à 60°C pendant (180 ±10) min;
- Redescendre la température de l'eau à 20°C en 60 min;
- Maintenir la température de l'eau à 20°C pendant 16 h;



Figure 3.3.4 : Epreuves dans le bac d'eau

(DERBAL W.)

- Conserver dans les conditions climatiques standards sèches (23°C,30%H) pendant 72h;

### Partie 3 : Méthodes et résultats Chapitre 3: Etude du comportement mécanique et qualification du collage des carrelets trois plis



Figure 3.3.5 : Eprouvette dans l'étuve ventilée à la sortie de bain thermostaté  
(DERBAL W.)

A la sortie de l'étuve, nous avons remarqué que les éprouvettes présentaient de nombreuses fissures au niveau du matériau (fentes superficielles) et des déformations.

Ces fentes et déformations peuvent être expliquées par la lente immersion dans l'eau et le séchage dans l'étuve pendant trois jours qui ont généré des contraintes mécaniques dans le bois.

Nous avons pu observer aussi différents degrés d'ouverture des plans de colle en fonction des essences et des collages réalisés.

L'essai de délamination réalisé sur les carrelets trois plis pour la classe de service 2 « produits abrités de la pluie -portes et fenêtres extérieures » a montré une grande agressivité pour les carrelets fabriqués avec la colle vinylique1.

Avec les deux autres colles, nous avons observé un meilleur comportement des collages : moins de plans de colle ouverts et ouvertures moins marquées.

#### 3.1.1.3. Essai de délamination pour la classe de service 1 (Portes et fenêtres intérieures)

La procédure d'essai selon la norme XP CEN/TS 13307-1&2 (2010-01-01) pour cette classe de service est la suivante :

- Mesurer la longueur totale des plans de collage pour chaque éprouvette ;
- Sécher le lot d'éprouvettes sélectionné dans les conditions climatiques chaudes pendant 16 h (étuve ventilée avec de l'air à 50°C);
- Refroidir les éprouvettes dans les conditions climatiques de référence pendant 2 heures (chambre climatique à 20°C et 65% d'H%).

**Partie 3 : Méthodes et résultats Chapitre 3: Etude du comportement mécanique et qualification du collage des carrelets trois plis**

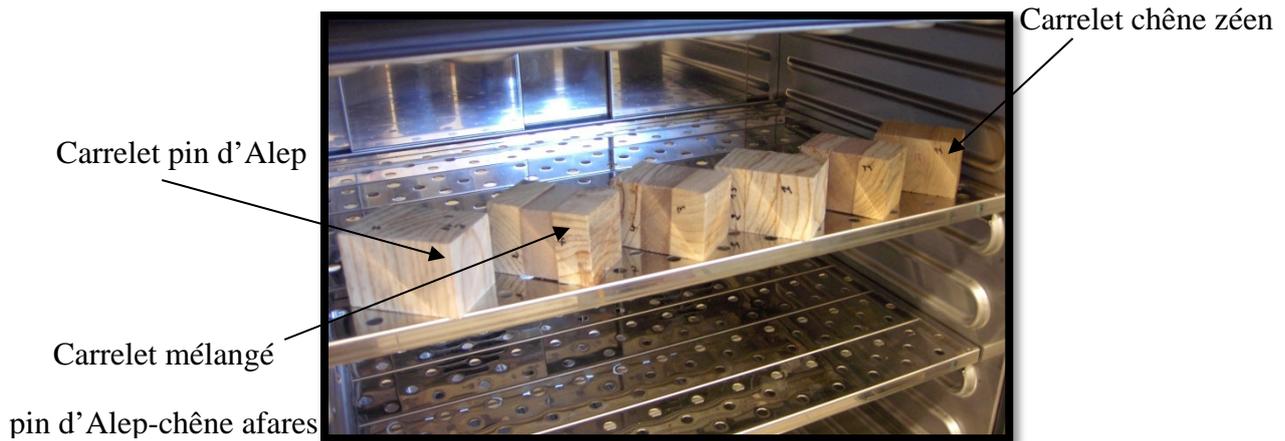


Figure 3.3.6 : Epreuves prélevées dans les carrelets 3-plis conditionnés en étuve ventilée

(Photo W. Derbal)

Pour cette classe de service 1 « Portes et fenêtres intérieures », l'essai de délamination a montré un très bon comportement pour les quatre types de carrelets fabriqués en utilisant les trois colles.

A la sortie de l'étuve, les fentes dans le bois et dans les plans de collage étaient peu nombreuses et peu marquées.

Les éprouvettes ont été peu endommagées compte tenu du mode de conditionnement moins agressif pour les bois.

#### 3.1.1.4. Evaluation de la délamination : méthode de mesure des ouvertures de joints de collage

Pour déterminer le niveau de délamination des joints de collage après la phase de conditionnement puis de stabilisation des échantillons, nous avons utilisé une jauge d'épaisseur 0,2 mm afin de mesurer les ouvertures de joints de collage correspondues, l'application est présentée dans quelques étapes récapitulatives suivantes :

- Application de la jauge contre les plans de colle transversaux de chaque éprouvette
- Maintenir la jauge à 65mm de sa pointe libre;
- Vérification de la pénétration de la jauge, si elle est supérieure à 1mm sans flambage, le joint est considéré comme étant ouvert et sa longueur est mesurée au millimètre près

**Partie 3 : Méthodes et résultats Chapitre 3: Etude du comportement mécanique et qualification du collage des carrelets trois plis**



Figure 3.3.7: Méthode de mesure de l'ouverture des joints en utilisant la jauge d'épaisseur de 0,2mm

(DERBAL W.)

La longueur du joint ouvert correspond à la somme de tous les joints ouverts aux deux extrémités;

***Qualification du comportement des carrelets après conditionnement et stabilisation***

Dans les tableaux suivants, nous exprimons le comportement des éprouvettes après chaque essai en se basant sur les ouvertures des plans de colle considérés, type de carrelet et la classe de service. Ce comportement a été exprimé par un décollement total des lamelles, un décollement partiel et enfin absence de décollement.

***Classe de service 1 (par type de colle et par type de carrelet)***

Tableau 3.3.3 : Comportement des carrelets en fonction du type de colle et selon l'essence (classe 1)

Types de colle	Comportement des carrelets			
	Pin d'Alep pur	Chêne Afares pur	Chêne Zéen pur	Mélange Pin d'Alep-Chêne Afares
Colle vinylique (mono composant)	Absence de décollement	Décollements dans quelques éprouvettes	Décollements dans quelques éprouvettes	Absence de décollement
Colle EPI	Absence de décollement	Absence de décollement	Absence de décollement	Absence de décollement
Colle vinylique (bi composant)	Absence de décollement	Absence de décollement	Absence de décollement	Absence de décollement

**Partie 3 : Méthodes et résultats Chapitre 3: Etude du comportement mécanique et qualification du collage des carrelets trois plis**

*Classe de service 2 (par type de colle et par type de carrelet)*

Tableau 3.3.4 : Comportement des carrelets en fonction de type de la colle (classe 2)

Types de colle	Comportement des carrelets			
	Pin d'Alep pur	Chêne Afares pur	Chêne Zéen pur	Mélange Pin d'Alep-Chêne Afares
Colle vinylique mono composant 1	Décollement total des lamelles	décollement partiel	décollement partiel	décollement partiel
Colle EPI	Absence de décollement	Absence de décollement	décollement partiel	Absence de décollement
Colle vinylique - mono composant 2	décollement partiel	décollement partiel	décollement partiel	décollement partiel



Décollement partiel des lamelles en classe de service 2 pour les carrelets mixte (pin d'Alep-chêne afarès colle vinylique 1,

Décollement partiel des lamelles en classe de service 2 pour les carrelets chêne zéen (colle EPI).

Figure 3.3.8 : Comportement des bois à la fin de l'essai.

### 3.1.1.5. Quantification de la délamination : calcul des résultats

*Calcul du taux de délamination*

Après avoir déterminé la longueur totale des plans de colle sur les deux sections transversales avant la phase de conditionnement, nous avons mesuré la longueur cumulée des joints ouverts sur les deux sections transversales après conditionnement pour pouvoir calculer le taux de délamination  $D_i$  de chaque éprouvette  $i$  suivant la formule :

**Partie 3 : Méthodes et résultats Chapitre 3: Etude du comportement mécanique et qualification du collage des carrelets trois plis**

$$D_i = 100 * \frac{\sum J_{0i}}{\sum J_i}$$

- $\sum J_{0i}$  : longueur cumulée des joints ouverts sur les deux sections transversales ;
- $\sum J_i$  : longueur cumulée des plans de colle sur les deux sections transversales.

Pour l'ensemble des éprouvettes, l'estimation haute du taux moyen de délamination est calculée selon la formule :

$$D_{ml} = D_m + (K \times S_D)$$

**D<sub>ml</sub>** : estimation haute du taux de délamination moyen des éprouvettes ;

**D<sub>m</sub>** : taux de délamination moyen des éprouvettes ;

**S<sub>D</sub>** : écart type ;

**K** : 0,31 pour 30 éprouvettes (coefficient fixé arbitrairement par la norme) ;

Selon la norme XP CEN/TS 13307-2, le collage est considéré comme satisfaisant si:

$$D_{ml} \leq \left( 33 \times \frac{M_v}{1000} - 7 \right) \%$$

avec :

**D<sub>ml</sub>** : Estimation haute du taux de délamination moyen des éprouvettes ;

**M<sub>v</sub>** : masse volumique du lot en kilogramme par mètre cube (kg/m<sup>3</sup>) ;

### 3.2. Résultats et discussions

Les résultats des essais de délamination sont présentés successivement pour chacune des trois colles testées (vinylique 1, EPI, vinylique 2), pour les quatre catégories de carrelets (pin d'Alep, chêne zéen, chêne afarès, mixte pin d'Alep – chêne afarès) et pour les deux classes de service 1 et 2 ciblées.

Ces résultats sont synthétisés sous forme de tableaux présentant les quatre paramètres qui permettent de qualifier les collages : Mv moyenne des carrelets, taux de délamination moyen Dm (en %), estimation haute du taux moyen de délamination Dml (en %), paramètre seuil  $[(33 \times Mv/1000) - 7]$ .

#### Colle vinylique mono composant 1

Tableau 3.3.5 : Résultats des calculs de délamination pour le collage vinylique mono composant

Type de carrelet	Mv moyenne des carrelets	Taux de délamination moyen (Dm, en %)		Estimation haute du taux moyen de délamination (Dml, en %)		Valeur seuil $(33 \times Mv/1000) - 7$
		Classe1	Classe 2	Classe1	Classe2	
Carrelet Pin d'Alep pur	628	0	83,4	0	85,2	13,7
Carrelet Chêne Afares pur	869	4,8	14,5	6,7	16,5	21,7
Carrelet Chêne Zéen pur	969	5,2	27,2	7,1	34,6	25,0
Carrelet mixte Pin d'Alep-Chêne Afares	694	2,2	33,3	3,4	40,2	15,9

\* Pour la colle vinylique mono composant 1, le collage peut donc être considéré comme satisfaisant en classe de service 1 pour les quatre catégories de carrelets pour lesquels on a systématiquement  $D_{ml} \leq ((33 \times Mv/1000) - 7)$ .

Les estimations hautes du taux moyen de délamination  $D_{ml}$  sont cependant les plus élevées pour les deux chênes, résultat auquel on pouvait s'attendre compte tenu de la densité et des retraits de séchage élevés de ces essences.

**Partie 3 : Méthodes et résultats Chapitre 3: Etude du comportement mécanique et qualification du collage des carrelets trois plis**

Le meilleur résultat est obtenu pour le pin d'Alep, essence résineuse présentant le moins de difficultés de collage malgré la présence de résine.

Pour les carrelets mixtes pin d'Alep – chêne afarès, le résultat est intermédiaire.

\* En revanche, pour la classe de service 2, le collage ne satisfait pas aux conditions requises pour trois des quatre types de carrelets : le protocole d'essai est sans doute trop agressif pour les éprouvettes collées, en particulier durant la phase finale de séchage qui suit la phase de trempage dans l'eau chaude très agressive pour les plans de collage.

De façon assez surprenante, le collage est satisfaisant en classe de service 2 pour les carrelets de chêne Afarès. On aurait davantage pu s'attendre à ce type de résultat pour le pin d'Alep. Une explication peut être avancée en relation avec la structure anatomique du bois (voir les conclusions en fin de chapitre).

**Colle EPI 1989**

Tableau 3.3.6 : Résultats des calculs de délamination pour le collage EPI

Type de carrelet	Mv moyenne des carrelets	Taux de délamination moyen (Dm, en %)		Estimation haute du taux moyen de délamination (Dml, en %)		Valeur seuil (33 x Mv/1000) - 7
		Classe 1	Classe 2	Classe1	Classe2	
Carrelet Pin d'Alep pur	543	0	0	0	0	10,9
Carrelet Chêne Afares pur	908	0,16	1,9	0,26	3,13	23,0
Carrelet Chêne Zéen pur	1008	0	24,5	0	26,9	26,3
Carrelet mixte Pin d'Alep-Chêne Afares	700	0	3,35	0	4,0	16,1

\* Pour la colle EPI, le collage donne de très bons résultats pour les quatre séries de carrelets en classe de service 1, avec une absence totale de décollements excepté pour le chêne afarès pour lequel quelques décollements très ponctuels ont été observés, mais très largement au-dessous du seuil de tolérance.

**Partie 3 : Méthodes et résultats Chapitre 3: Etude du comportement mécanique et qualification du collage des carrelets trois plis**

Même pour une essence très dense et à retraits de séchage élevés comme le chêne zéen, l'absence de décollements confirme le très fort pouvoir adhésif de la colle EPI.

Ce résultat conforte aussi les perspectives de valorisation d'essences au comportement technologique difficile par les techniques de reconstitution par collage, sous réserve de mettre en œuvre des colles très techniques comme les EPI.

\* En classe de service 2, les résultats sont très satisfaisants pour les carrelets de pin d'Alep, de chêne afarès et les carrelets mixtes. Pour le pin d'Alep, on observe comme en classe 1 une absence totale de décollement ce qui confirme la très bonne aptitude au collage de cette essence.

Pour le chêne afarès et les carrelets mixtes, des décollements ponctuels sont observés mais très largement au-dessous du seuil de tolérance. Même pour une essence très dense et à retraits de séchage très élevés comme le chêne, la colle EPI donne de très bons résultats.

Seuls les collages du chêne zéen donnent des résultats en dessous du seuil de tolérance (le Dml vaut 26,9 alors que la valeur seuil est de 26,3). On peut considérer qu'en améliorant le processus de collage (qualité des états de surface, qualité du séchage, respect encore plus scrupuleux des règles de l'art), il aurait été possible d'obtenir un Dml inférieur à la valeur seuil. Ce résultat montre cependant que le chêne zéen demeure une essence dont le collage est particulièrement délicat.

**Colle vinylique monocomposant 2**

Tableau 3.3.7 : Résultats des calculs de délamination pour la colle vinylique 2

Type de carrelet	Mv moyenne des carrelets	Taux de délamination moyen (Dm, en %)		Estimation haute du taux moyen de délamination (Dml, en %)		Valeur seuil (33 x Mv/1000) -7
		Classe 1	Classe 2	Classe 1	Classe 2	
Carrelet Pin d'Alep pur	576	0	16,4	0	21,8	12,0
Carrelet Chêne Afares pur	853	0	27,4	0	31,1	21,1
Carrelet Chêne Zéen pur	962	0	12,5	0	20,1	24,7
Carrelet mixte Pin d'Alep-Chêne Afares	689	0	18,9	0	25,7	15,7

### **Partie 3 : Méthodes et résultats Chapitre 3: Etude du comportement mécanique et qualification du collage des carrelets trois plis**

\* Pour la colle vinylique monocomposant 2, le collage donne d'excellent résultats pour les quatre séries de carrelets en classe de service 1, avec une absence totale de décollements pour les quatre séries, soit pour le chêne zéen des résultats même supérieurs à ceux obtenus avec le collage EPI.

Ces résultats confirment qu'en classe de service 1, l'utilisation d'une colle vinylique est suffisante même pour des essences très « difficiles » (bois très denses et à retraits de séchage très élevés), sous réserve de procéder à un collage en respectant parfaitement les règles de l'art : respect de tous les paramètres de collage suivant les préconisations du fabricant.

\* En classe de service 2, le collage ne satisfait pas aux conditions requises pour trois des quatre types de carrelets : comme pour la colle vinylique 1, le protocole d'essai apparait trop agressif pour les éprouvettes collées, en particulier durant la phase finale de séchage qui suit la phase de trempage dans l'eau chaude très agressive pour les plans de collage.

Le collage apparait satisfaisant uniquement pour le chêne zéen (alors que c'était le cas pour le chêne Afarès avec la colle vinylique 1).

#### **Comparaison des trois colles et impact de la structure du bois sur la qualité du collage**

\* Pour la classe de service 1, les trois colles donnent des résultats satisfaisants et apparaissent adaptées aux contraintes d'utilisation correspondantes. Pour le pin d'Alep, essence considérée habituellement comme facile à coller, le comportement des trois colles est équivalent alors que des différences entre colles sont observées pour les chênes et pour les carrelets mixtes. Pour ces produits, la colle vinylique 1 donne des résultats moindres que les deux autres colles même si ces résultats restent dans le domaine des valeurs acceptables.

Les deux colles vinyliques et la colle EPI conviennent donc quel que soient les bois pour une utilisation en classe de service 1.

\* Pour la classe de service 2, seule la colle EPI donne des résultats satisfaisants ce qui correspond à ce que l'on attendait de cet adhésif réservé à des usages sous contraintes dans des ambiances climatiques exposées. Ce résultat doit cependant être modulé pour le chêne zéen qui n'atteint pas la valeur seuil même s'il en est très proche.

Chacune des deux colles vinyliques donne cependant des résultats conformes à la norme pour une espèce de chêne, chêne afarès pour la colle vinylique 1, chêne zéen pour la colle vinylique 2. Le niveau de conformité n'est cependant pas très marqué et l'emploi de colle vinylique en classe de service 2 pour les chênes durs reste aléatoire.

Par ailleurs, comme pour l'étude des aboutages, il faut rappeler que la comparaison des deux colles vinyliques ne correspond pas uniquement à une comparaison d'adhésifs mais aussi à une comparaison de conditions de fabrication. Le collage à l'aide de la vinylique 1 a été réalisé en conditions industrielles associées obligatoirement à un moindre respect rigoureux des règles de l'art, alors que le collage à l'aide de la vinylique 2 a été conduit dans des conditions de laboratoire. Les différences de résultats entre les deux collages peuvent être en partie expliquées par ces différences de conditions de fabrication.

### **Partie 3 : Méthodes et résultats Chapitre 3: Etude du comportement mécanique et qualification du collage des carrelets trois plis**

Les coupes anatomiques de chêne afarès et de chêne zéen (figures 1.2.3 et 1.2.4 page 32 et 33) révèlent pour les deux essences la présence de vaisseaux de gros diamètres associés à une porosité élevée. Le bois de pin d'Alep présente de minces trachéides.

La structure anatomique de ces bois a un impact direct sur leur capacité à absorber la colle mais leur densité influe aussi directement sur cette caractéristique.

Ainsi, les résultats obtenus pour les trois essences viennent conforter ceux de l'étude conduite par Ayarkwa *et al.* (2000b) sur les adhésifs de type isocyanate, résorcinol formaldéhyde (RF) et mélamine-formaldéhyde (MF) pour l'aboutage de trois bois tropicaux (Obeche, Makore et Moabi). Cette étude montre la performance des adhésifs semble liée à la densité du bois, les adhésifs les plus visqueux présentant une meilleure efficacité pour les bois de basse densité (bois Obeche de densité 351 kg/m<sup>3</sup>) et une plus faible efficacité pour les bois les plus denses (bois Moabi de densité 819 kg/m<sup>3</sup>). Un adhésif de type MF est par contre mieux adapté aux bois de haute densité (Makore 677 kg/m<sup>3</sup> et Moabi 819 kg/m<sup>3</sup>) car un bois dense nécessite un adhésif moins visqueux, donc plus liquide, qui pénètre plus rapidement et efficacement dans le matériau. Un bois moins dense permet une pénétration rapide même pour des adhésifs très visqueux.

### **3.3. Essai de vieillissement accéléré**

Un essai de vieillissement accéléré (vieillissement artificiel) complémentaire aux essais de délamination a été conduit sur les carrelets 3-plis.

Cet essai utilise une roue de Gardner qui est un dispositif permettant de simuler artificiellement le vieillissement d'aspect ou de structure d'une pièce de bois naturel ou revêtu d'un produit de finition et mise en œuvre en milieu extérieur exposé.

Dans notre cas, l'objectif de l'essai était de mettre en évidence l'évolution de la tenue d'un bois collé lors d'une utilisation en milieu extérieur exposé.

#### **Principe de l'essai de vieillissement**

Pour l'opération de vieillissement artificiel, les échantillons de bois sont fixés sur la roue de Gardner qui permet de simuler l'alternance eau - air - UV solaires à laquelle serait soumise une pièce de bois mise en œuvre en milieu extérieur exposé.

La durée d'un cycle de vieillissement est de 90 minutes, période durant laquelle chaque pièce fixée à la roue subit successivement une phase d'immersion (un quart du cycle, soit 22,5 mn) dans un bac d'eau à température ambiante, puis d'émersion (la moitié du cycle, soit 45 mn) suivie d'une exposition sous une rampe de lampes UV (un quart du cycle, soit 22,5 mn) de 300W.

Le cycle de vieillissement dure 3 semaines ce qui correspond à un vieillissement naturel d'une durée moyenne d'une année.

Pour chaque type de carrelet et chaque type de colle utilisée, 12 éprouvettes ont été sélectionnées.

### Partie 3 : Méthodes et résultats Chapitre 3: Etude du comportement mécanique et qualification du collage des carrelets trois plis

Sur chaque éprouvette, la longueur des plans de la colle dans le plan transversal a été mesurée.

Les éprouvettes ont été ensuite vissées sur le roulant de la roue (figure 3.3.9).

Ces éprouvettes ont les mêmes dimensions que celles utilisées pour l'essai de délamination.

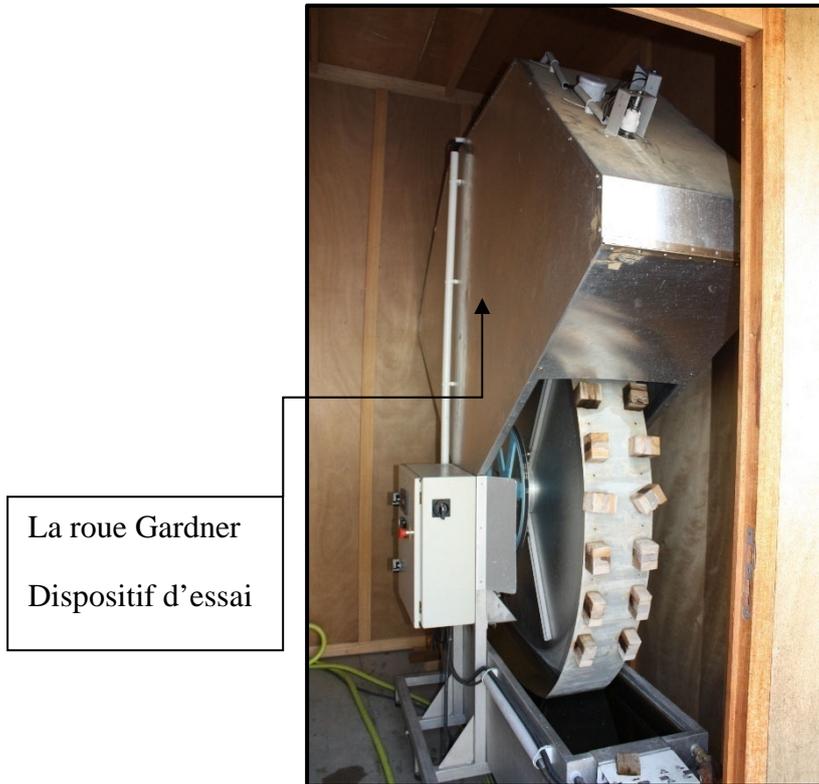


Figure 3.3.9 : Mise en place de l'essai de vieillissement sur la roue Gardner



Figure 3.3.10 : Les différentes composantes ou phases de l'essai de vieillissement

(Photo W. Derbal)

*Suivi de l'essai*



Figure 3.3.11 : Etat des éprouvettes à la fin d'essai

(DERBAL W.)

L'exposition des échantillons sur la roue de vieillissement a duré 3 semaines ce qui correspond à une durée réelle de vieillissement de 1 an.

La procédure d'analyse de ce type d'essai de vieillissement n'est régi par aucune norme et l'interprétation des résultats ne peut se faire que de façon comparative entre les différents produits testés.

Contrairement aux autres essais de qualification des collages, l'impact du traitement subi par les éprouvettes a généré le plus de dommages sur les collages EPI.

Sur ces éprouvettes, nous avons observé de nombreux décollements associés à des endommagements très marqués des éprouvettes, en particulier pour les carrelets de pin d'Alep et de chêne zéen.

Pour les autres produits, les décollements ont été très peu marqués.

Ces résultats peuvent être expliqués par une réaction des collages EPI aux UV alors que les collages vinyliques y ont été beaucoup moins sensibles.

L'essai à la roue de Gardner n'avait pas pour objectif de tester le vieillissement de surface des éprouvettes et de qualifier les modifications d'aspect.

### **Partie 3 : Méthodes et résultats Chapitre 3: Etude du comportement mécanique et qualification du collage des carrelets trois plis**

Cependant, nous avons pu noter que l'aspect des échantillons de Pin d'Alep a peu évolué alors que les échantillons de Chêne Afarès et de Chêne se sont éclaircis de façon très marquée. Pour ces deux essences, cette modification d'aspect est liée aux modifications chimiques survenues dans les tannins contenus dans ces bois liées à l'effet couplé des UV et de l'humidité. Cet éclaircissement correspond en fait à une perte très significative du niveau de rouge.

#### ***Résultats et discussions***

Cet essai de vieillissement sur les carrelets trois plis a été réalisé de façon ponctuelle par rapport aux essais de délamination conduits en respectant un protocole normalisé.

Il a permis d'obtenir des informations additionnelles sur le comportement des produits collés et sur leur mode de vieillissement dans des conditions extrêmes.

Il a montré le très fort impact des UV sur le vieillissement des collages EPI alors que les collages vinyliques ont été peu affectés ce qui est un résultat surprenant.

Le changement de couleur des éprouvettes de chêne zéen et chêne afarès a montré que l'éventuelle utilisation de ces bois en milieu extérieur exposé nécessiterait au préalable un traitement de surface approprié.

#### **Conclusion :**

La finalité des essais de délamination était de qualifier ces composites massifs fabriqués en pin d'Alep, chêne afarès et chêne zéen, ainsi qu'en pin d'Alep et chêne afarès en mélange.

La qualité des plans de collage a été évaluée par un essai de délamination pour la classe de service 1 (portes et fenêtres intérieures) et pour la classe de service 2 (portes et fenêtres extérieures abritées de la pluie) conformément à la norme XP CEN/TS 13307-1&2 (2010-01-01).

Selon cette norme-référence, les exigences de conditionnement sont différentes pour la classe de service 1 et 2.

Pour que les produits collés soient en conformité avec les pré-requis de la classe de service 1, les échantillons à tester font l'objet d'un simple conditionnement dans une étuve sèche ventilée.

Les conditions diffèrent pour la classe de service 2 : les éprouvettes sont plongées dans de l'eau à température contrôlée (bain thermostaté) et sont ensuite stabilisées dans une étuve ventilée.

La température de l'eau et la durée de stabilisation sont les deux paramètres contrôlés durant toute l'opération.

### **Partie 3 : Méthodes et résultats Chapitre 3: Etude du comportement mécanique et qualification du collage des carrelots trois plis**

La détermination de l'aptitude des collages à résister aux conditions des classes de service 1 et 2 passe par l'estimation de la délamination des plans de collage. Pour se faire, après avoir conditionnés puis stabilisés les échantillons, on mesure l'ouverture des joints de collage.

\* **Colle vinylique 1** : le collage des quatre types de carrelots donne des résultats satisfaisants pour la classe de service 1 (taux de délamination inférieur au seuil critique).

Les carrelots de pin d'Alep donnent les meilleurs résultats, cette essence paraissant la plus apte au collage malgré le facteur limitant que constitue la résine.

Les résultats sont plus mitigés pour les carrelots mixtes pin d'Alep -chêne afarès.

En revanche, les carrelots de pin d'Alep, de chêne zéen et les carrelots mixtes donnent des résultats insuffisants à l'issue de l'essai correspondant aux conditions requises pour la classe de service 2. Ces conditions de sollicitations sont trop sévères pour assurer la tenue du collage (double effet du séchage des éprouvettes puis de l'immersion dans l'eau chaude).

Pour cette classe de service, les carrelots de chêne afarès donnent de bons (et inattendus) résultats.

\* Colle EPI : pour les quatre types de carrelots, les résultats sont conformes aux préconisations de la norme pour la classe de service 1 ; aucun décollement n'est observé sauf pour le chêne afarès.

Des résultats similaires sont obtenus pour la classe de service 2, trois des quatre types de carrelots donnant des résultats conformes aux préconisations de la norme ; l'absence totale de décollement chez le pin d'Alep est indicatrice de l'excellent comportement de cette essence lors du collage (classe de service 1 et 2).

Les carrelots de chêne afarès et les carrelots mixtes présentent quelques décollements très limités, systématiquement inférieurs aux valeurs-seuil de la norme. La colle EPI apparaît donc bien adaptée aux essences « difficiles », c'est à dire à densité et retraits de séchage élevés.

En revanche, les résultats obtenus pour le chêne zéenne satisfont pas aux préconisations de la norme.

\* Colle vinylique 2 : les collages des quatre types de carrelots sont conformes aux préconisations de la norme pour la classe de service 1.

Pour cette classe de service, l'emploi d'une colle vinylique apparaît donc suffisant pour une large gamme d'essences, y compris pour celles à densité et retraits de séchage élevés.

En revanche, pour la classe de service 2, la colle vinylique n'apparaît pas adaptée : les conditions d'essais sont trop sévères (effet couplé de la température et de l'humidité) et les plans de collage ne résistent pas aux sollicitations hygrothermiques auxquels ils sont soumis.

Partie 3 : Méthodes, résultats et discussions

Chapitre 4 : application des carrelets 3-plis en conditions réelles d'utilisation – fabrication de prototypes

## Introduction

Les performances mécaniques des carrelets ont été évaluées (chapitre 3) et les résultats encourageants obtenus ont montré que parmi les trois essences testées, le pin d'Alep est celle qui présente les meilleures potentialités pour une valorisation sous forme de produits reconstitués par collage, carrelets 3-plis dans le cas présent.

Au-delà des essais de laboratoire pour évaluer les performances de ces carrelets 3-plis en pin d'Alep, il a donc paru judicieux de confirmer ces performances en conditions réelles d'utilisation à travers la conception et la réalisation de produits finis ou semi-finis.

### 4.1. Fabrication et validation des performances de prototypes d'éléments de menuiserie

Une partie des carrelets fabriqués pour les essais de laboratoire a été réservée puis utilisée pour fabriquer des prototypes de menuiserie constitués d'un dormant, d'un battant et d'un volet.

Ces fabrications ont été réalisées en Algérie dans l'entreprise partenaire et à Montpellier, dans l'atelier du Cirad.

Cette fabrication n'a posé aucun problème particulier sur chacun des deux sites de fabrication ; les carrelets constituent une matière première très stable et très bien adaptée à ce type de produits (figures 3.4.1 et 3.4.2).



Figure 3.4.1 : Prototype de menuiserie fabriqué à partir de carrelets 3-plis en pin d'Alep, constitué d'un dormant et d'un battant(photos D. Guibal)



Figure 3.4.2 : Prototype de menuiserie fabriqué à partir de carrelets 3-plis mixte Pin d'Alep-Chêne afarès, constitué d'un volet et d'un battant

(Photos DERBAL W.)

## 4.2. Essais de durabilité naturelle en conditions réelles d'utilisation

### 4.2.1. Présentation

Bien que les meilleurs résultats de collage aient été obtenus pour une classe de service 1, des prototypes ont été fixés sur des cadres installés sur le site expérimental du Cirad à Montpellier (figure 3.4.3) pour tester le comportement des bois collés en conditions réelles d'utilisation en milieu extérieur,



Figure 3.4.3 : Site d'essais en conditions réelles d'utilisation du CIRAD

Le suivi de l'évolution de leur aspect et du développement d'éventuelles dégradations biologiques s'étale sur une durée de 3 ans.

Des relevés ont déjà été réalisés après 6 mois d'installation sans que des dégradations majeures n'aient été observées.

Les relevés suivants s'effectueront à 12 mois, 18 mois, 24 mois, 30 mois et 36 mois.



Jour 1



Après 6 mois

### 4.2.2. Protocole de suivi

Le protocole de suivi mis en place définit plusieurs types de relevés à effectuer avec la périodicité préalablement définie.

#### *Mesures d'humidité*

Les mesures d'humidité se font à l'aide d'un humidimètre à pointes type Gann préalablement étalonné.

#### *Relevés d'altérations physiques et biologiques*

Différentes approches sont utilisées pour évaluer le vieillissement et l'altération des bois au cours du temps.

Le suivi bisannuel porte sur l'examen :

- des déformations physiques subies par les bois (tuilages, ...)
- des altérations physiques (fissures, gerces, fentes, ...)
- du grisaillement lié à l'effet des UV ;
- du développement de champignons de décoloration ;
- du développement de champignons de pourriture ;
- de l'attaque des bois par des insectes xylophages.

Un état initial a été fait au moment de l'installation. Ensuite, le dispositif expérimental est examiné au bout de 6 et de 12 mois.

Ce sont essentiellement les développements de champignons de décoloration qui ont été examinés dans un premier temps (selon une adaptation de la norme XP X 41-549 « Efficacité de l'évaluation fongicide des produits de protection temporaire des sciages frais – Méthode sur site »), le temps d'exposition étant trop court à l'issue du premier relevé pour détecter des attaques de champignons de pourriture.

Plusieurs méthodes normalisées permettent d'évaluer la gravité d'attaques occasionnées par des champignons de pourriture sur des bois exposés en classe d'emploi 3.

Ces méthodes n'ont pour le moment pas été appliquées en raison du temps d'exposition, trop court pour permettre un développement quantifiable d'agents de pourriture du bois dans cette classe d'emploi.

Ces méthodes sont les suivantes :

NF EN 330 (*L-joint method*)

Classement	Description	Définition
0	sain	Aucun signe de détérioration.
1	attaque légère	Légère décoloration, souvent foncée et striée, aucun ramollissement ou affaiblissement significatif du bois.
2	attaque modérée	Décolorations distinctes, mais sous forme de taches et stries discrètes avec des petites zones de pourriture (bois ramolli, affaibli); pas plus de 25% de la zone visible est affecté.
3	attaque sévère	Ramollissement et affaiblissement marqué du bois, caractéristique d'une pourriture par les champignons et sous forme de taches et stries importantes; incontestablement plus de 25% de la zone visible est affecté.

**Partie 3 : Méthodes et résultats** **Chapitre 4 : Application des carrelots 3-plis en conditions réelles d'utilisation – fabrication de prototypes**

4	rupture	Pourriture très grave et importante; le tenon peut souvent se casser facilement
---	---------	---

CEN/TS 12037 (*lap-joint method*)

Classement	Description	Définition
0	sain	Aucun signe de pourriture.
1	attaque légère	Signes visibles de pourriture, mais pas de ramollissement ou d'affaiblissement significatif du bois.
2	attaque modérée	Zones de pourriture (bois ramolli, affaibli) caractérisée sur 3 cm <sup>2</sup> maximum et sur 2 à 3 mm de profondeur.
2+	attaque modérée +	Se rapprochant de 3, attaque sévère.
3	attaque sévère	Ramollissement et affaiblissement marqué du bois, caractéristique d'une pourriture par les champignons. Plus de 3 cm <sup>2</sup> nettement atteints sur une profondeur de 3 à 5 mm, ou de 5 à 10 mm sur quelques cm <sup>2</sup> .
3+	attaque sévère +	Se rapprochant de 4, rupture.
4	rupture	Pourriture très sévère et étendue; les éléments de l'assemblage pouvant facilement être cassés.

Cette approche sera utilisée lors du suivi de l'évolution des bois dans les semestres à venir.

## Conclusion générale et perspectives

## Conclusion générale et perspectives

### Conclusion générale et perspective

L'objectif principal de cette étude était de contribuer à une amélioration des connaissances du comportement technologique d'essences algériennes insuffisamment utilisées afin de mieux les valoriser.

Dans un premier temps, les caractéristiques physiques et mécaniques des bois ont été étudiées, la connaissance de ces caractéristiques étant nécessaire pour ajuster les paramètres de fabrication pour l'étude du comportement au collage.

Deux techniques de reconstitution par collage ont été considérées :

. Aboutage à enture multiples dont la mise en œuvre a permis d'obtenir des produits qui dans un second temps ont été qualifiés (résistances mécaniques et qualité de collage) et dont les caractéristiques ont été comparées à celles des bois massifs.

. Lamellation et fabrication de composites carrelés 3-plis en utilisant des associations pures et mixtes des bois étudiés, et en utilisant trois types de colles ; dans ce second volet, nous avons étudié le comportement des produits reconstitués par collage en vue d'une application en classe de service 1 et 2 (milieu intérieur et milieu extérieur abrité), puis évalué le vieillissement des plans de colle par un essai de vieillissement accéléré.

Les caractéristiques physiques et mécaniques des bois massifs pour les trois essences correspondent aux résultats disponibles dans la littérature : le bois de pin d'Alep est léger et faiblement à moyennement résistant, le bois de chêne afarès est mi-lourd à lourd et moyennement résistant, et le bois de chêne zéen est lourd et moyennement à très résistant.

Le retrait radial du pin d'Alep est moyen et son retrait tangentiel est faible. Le retrait radial du chêne afarès est différent dans l'aubier et dans le duramen, respectivement élevé et moyen dans ces deux types de bois ; son retrait tangentiel est élevé. Le retrait radial du chêne zéen est moyen à élevé et son retrait tangentiel est très élevé.

Les deux chênes sont deux essences difficiles à sécher ce qui pose des problèmes aux entreprises de transformation ; ce comportement au séchage est lié aux retraits linéaires élevés, tant suivant la direction radiale que tangentielle, et à la forte différence de retraits linéaires transverses (retrait tangentiel – retrait radial).

Les résultats obtenus pour le point de saturation des fibres (PSF) pour les 3 essences sont en accord avec ceux des retraits de séchage, autres indicateurs de stabilité du bois : le PSF du pin d'Alep est très inférieur à celui des deux chênes ; il est en moyenne inférieur à 30%, valeur-seuil en dessous de laquelle on considère qu'un bois est plutôt stable ; en terme de stabilité, le comportement du pin d'Alep peut donc être considéré comme satisfaisant.

Les PSF des deux chênes sont supérieures à cette valeur-seuil ce qui concorde avec les valeurs de retraits de séchage obtenues (retraits élevés).

Les caractéristiques mécaniques du pin d'Alep (contrainte de rupture en flexion et module d'élasticité longitudinal) sont inférieures à celles des deux chênes qui, de façon très prévisible, sont très élevées.

Elles sont cependant d'un niveau suffisant pour pouvoir utiliser cette essence dans des emplois structurels.

Ces caractéristiques sont d'un niveau comparable à celles d'autres espèces de pins qui se situent sur les mêmes créneaux d'utilisation, notamment en structure ; c'est le cas notamment du pin maritime.

## Conclusion générale et perspectives

Une analyse comparative des caractéristiques mécaniques des bois aboutés et des bois massifs a été conduite afin de déterminer la qualité de tenue des aboutages. Cette comparaison a concerné quatre caractéristiques : la masse volumique, la contrainte de rupture en flexion statique (essai standard de flexion 4 points), puis, en utilisant une méthode spécifique d'analyse du spectre des fréquences de résonance du bois (méthode dite « Bing »), le module d'élasticité longitudinal et le module de cisaillement transverse.

Les préconisations de la norme XP CEN/TS 13307-2 (2010-01-01) *Ébauches et profilés semi-finis en bois lamellé-collés et assemblés par entures multiples pour usages non structurels* ont été retenues pour cet essai ; ces préconisations concernent la contrainte de rupture en flexion statique.

Les modules d'élasticité longitudinaux des bois massifs sont comparables à ceux des aboutages, ceci pour les trois essences étudiées.

Par contre, quelle que soit l'essence considérée, les bois aboutés présentent une contrainte de rupture en flexion statique plus faible que celle des bois massifs. Cette différence de comportement peut être expliquée par une forte hétérogénéité des aboutages ; le profilage de certaines entures est apparu peu précis d'où un mauvais ajustement des pièces aboutées accentué par une pression de serrage trop faible par rapport aux préconisations requises.

Par ailleurs, la qualité du séchage est apparue très variable, certaines pièces ayant pu présenter un taux d'humidité trop élevé par rapport aux préconisations liées aux conditions d'utilisation de la colle vinylique 1.

Les valeurs caractéristiques de contrainte de rupture en flexion concordent cependant avec les valeurs-seuils indiquées dans la norme de référence et qui sont indicatrices de la qualité des aboutages.

Les essais de lamellation avaient pour objectif d'étudier la faisabilité d'une telle technique pour les trois essences étudiées et de comparer les performances de trois colles, deux colles vinyliques et une colle EPI (Emulsion Polymer Isocyanate).

✓ Pour la **colle vinylique 1**, les quatre types de carrelets satisfont aux conditions d'utilisation en classe de service 1 (milieu intérieur).

Le pin d'Alep est l'essence qui présente la meilleure aptitude au collage, ceci malgré les exsudations de résine.

Les carrelets pin d'Alep - chêne afarès donnent des résultats légèrement en retrait.

Les résultats obtenus pour la classe de service 2 sont nettement moins probants : pour trois types de carrelets, les collages n'ont pas résisté aux conditions d'essai ; une immersion des bois dans l'eau chaude à une température relativement élevée (60°C) suivi d'un séchage dans une étuve ventilée ont eu raison des plans de collage qui n'ont pas tenu.

Seuls les carrelets de chêne afarès ont résisté à ce traitement hygrothermique ; ce résultat positif aurait été davantage attendu pour le pin d'Alep dont l'aptitude au collage est globalement la meilleure. Ce résultat inattendu pour le chêne afarès pourrait être lié à la structure anatomique du bois.

✓ Le collage **EPI** des quatre types de carrelets est satisfaisant en classe de service 1 ; aucun décollement n'est observé sauf pour les carrelets de chêne afarès (quelques décollements réduits et limités, en dessous de la valeur seuil mentionnée dans la norme).

## Conclusion générale et perspectives

Ces résultats confirment l'excellente qualité adhésive de la colle EPI, même pour des essences réputées « difficiles » (densité et retraits de séchage élevés).

Ce type de colle très technique apparaît donc particulièrement adapté pour valoriser des essences nerveuses par la fabrication de bois massifs reconstitués.

Excepté pour le chêne zéen, les collages ont tous résisté aux conditions d'essais correspondants à la classe de service 2. Le pin d'Alep présente les meilleurs résultats, aucun décollement n'étant observé ; cette essence apparaît particulièrement adaptée à une valorisation par collage. Les carrelets en chêne afarès et les carrelets mixtes présentent quelques décollements, mais à un niveau inférieur au maximum toléré suivant les préconisations de la norme.

Pour le chêne zéen, bien que les résultats ne soient pas conformes aux prérequis, on peut raisonnablement considérer qu'un meilleur respect des règles de l'art (états de surface des pièces à coller, contrôle du taux d'humidité, conditions générales de collage) aurait permis d'obtenir de meilleurs résultats. Le chêne zéen reste cependant une essence très difficile à coller.

✓ Pour les conditions d'essais correspondant à la classe de service 1, les quatre types de carrelets fabriqués à partir de la **colle vinylique 2** donnent de très bons résultats : aucun décollement observé et résultats du chêne zéen supérieurs à ceux du collage EPI.

Une colle vinylique apparaît donc suffisante pour des conditions d'utilisation correspondant à la classe de service 1, quels que soient les essences mises en œuvre, même pour celles réputées difficiles à coller (densité et retraits de séchage élevés), à conditions de respecter les préconisations de mise en œuvre de la colle.

Pour les conditions d'utilisation en classe de service 2, comme pour la colle vinylique 1, le collage n'est pas satisfaisant pour trois des quatre types de carrelets.

Alors que pour la colle vinylique 1, seuls les carrelets en chêne afarès avaient résisté aux conditions d'essais, ce sont les carrelets en chêne zéen qui ont donné des résultats satisfaisants en classe de service 2.

L'étude a montré que de nombreux paramètres affectent la qualité d'un bois reconstitué par collage ; ces résultats confirment ceux de travaux antérieurs.

En particulier, il apparaît que la microstructure du bois peut jouer un rôle important sur la qualité d'imprégnation de la colle qui conditionne directement la tenue du plan de collage entre deux pièces en contact. De plus, le choix d'un adhésif adapté est indispensable si un processus de fabrication industrielle est envisagé, processus durant lequel les règles de l'art sont toujours plus difficiles à respecter que dans un processus de collage en laboratoire.

Les résultats obtenus en laboratoire se devaient d'être confirmés par des essais en conditions réelles d'utilisation permettant d'évaluer les performances des produits collés, à travers la fabrication d'éléments constructifs.

Ces éléments ont été fabriqués en pin d'Alep qui, à l'issue des essais, est apparue être l'essence la plus performante en collage.

Des éléments de menuiserie ont été ainsi fabriqués à partir de carrelets en pin d'Alep (dormant, battant, volet).

Ces produits ont été fabriqués simultanément en Algérie dans l'entreprise-partenaire et au Cirad.

## Conclusion générale et perspectives

Ils ont été installés sur le site expérimental du Cirad à Montpellier pour des essais de vieillissement longue-durée ; la durée de ces essais (3 ans) dépasse largement le cadre de la présente étude. Après 6 mois d'installation sur site, aucune dégradation d'origine biologique majeure n'a été observée.

Une analyse technico-économique du processus de fabrication de ces prototypes avait été initialement envisagée. Cette analyse a été dans un second temps écartée compte tenu du manque flagrant de données fiables nécessaires pour procéder à une reconstitution des coûts aboutissant à une estimation du prix de revient du produit, objectif finalisé de ce type d'analyse.

### *Perspectives*

Les résultats obtenus à l'issue de cette étude sont encourageants car ils montrent que la fabrication de produits reconstitués, en particulier par l'application des techniques d'aboutage et de lamellation est possible pour des essences insuffisamment utilisées bien qu'abondantes dans les forêts algériennes.

Ces techniques sont particulièrement intéressantes car elles permettent de s'affranchir de la présence de défauts, souvent nombreux dans ces bois. Il faut rappeler que ces essences ne font l'objet d'aucune sylviculture au détriment de la qualité du bois.

L'entreprise Transbois, intéressée par ces résultats, devrait continuer l'expérience en initiant un processus de fabrication préindustrielle, envisageable compte tenu de la disponibilité de la ressource.

La plupart de ces peuplements forestiers tendent à vieillir sur pied car leur production est actuellement supérieure aux prélèvements. Leur exploitation créatrice de valeur ajoutée devrait inciter à améliorer les pratiques sylvicoles associées, sous réserve de la mise en place d'une gestion durable garantissant la pérennisation de cette ressource.

Par ailleurs, l'analyse de l'ensemble des résultats obtenus dans le domaine du collage fait émerger deux axes majeurs de recherche & innovation :

- Utilisation de nouvelles techniques pour étudier les différents mécanismes d'endommagement et de délamination dans les bois assemblés par collage (aboutage à entures multiples et lamellé-collé).
- Etude de la résistance des plans de collage par utilisation de techniques avancées permettant d'identifier les micro-endommagements dans le plan de colle.

## Références bibliographiques

- Ameels M., 1989. Etude des propriétés technologiques et anatomiques de *Quercus canariensis* Willd. Des massifs forestiers de l'Akfadou et de Beni-Ghobri en Algérie. Mémoire d'ingénieur, Université de Louvain, Belgique, 127pp.
- Amusant N., 2004. Decay resistance in *Dicoryniaguianensis* Amsh.: analysis of inter-tree and intra-tree variability and relations with wood colour. *Annals of forest science*, 61(4): 373-380pp.
- Almeida G., 2006. Influence de la structure du bois sur ses propriétés physico-mécaniques à des teneurs en humidité élevées. Thèse de doctorat, Département des Sciences du Bois et de la Forêt, Faculté de Foresterie et de Géomantique, Université Laval, Québec, 232 pp.
- Arévalo ., 2002. Influence des composantes secondaires et de la structure anatomique sur les propriétés physico-mécaniques du bois d'acajou (*Swietenia macrophylla* King). Thèse de Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec. 146pp.
- Arnold, M., J. Sell et W.C. Feist., 1991. Wood weathering in fluorescent ultraviolet and xenon arc chambers. *Forest Products Journal*, 41(2):40-44pp.
- Ayarkwa, J., Hirashima, Y., et Sasaki, Y., 2000a. Effect of finger geometry and end pressure on the flexural properties of finger-jointed tropical African hardwoods. *Forest Products Journal*, 50(11/12), 53-63pp.
- Aicher S., L. Hoflin L., G. Dill-Langer G., 2001. Damage evolution and acoustic emission of wood at tension perpendicular to fiber. vol.59., n° 1-2, 104-116pp.
- Ando K., Hirashima Y., Sugihara M., Hirao S., Sasaki Y., «Microscopic processes of shearing fracture.
- AFNOR., 2010. Ebauches et profilés semi-finis en bois lamellé-collé et assemblés par entures multiples pour usages non structurels ; partie 2 : Contrôle de production. Norme *XP CEN/TS 13307-1&2*, (2010), France, 7-16 pp.
- BNEDER (Bureau national d'études pour le développement rural), 2009. Plan national de développement forestier (PNDF). Rapport de synthèse nationale. Alger, Algérie, 87pp .
- Benabdeli K., 1996. Aspects physionomico-structuraux et dynamique des écosystèmes forestiers faces à la pression anthropozoogène dans les monts de Tlemcen et les Monts de Dhaya. Algérie occidentale. thèse de Univ. Djilali Liabes de Sidi Bel Abbés, 3-56pp .
- Berrichi M., 1993. Contribution à l'étude de la production et de la qualité du bois de trois espèces du genre *Quercus* : chène vert (*Q. rotundifolia* Lamk.) ; chène-liège (*Q. suber* L.) ; chène zeen (*Q. faginea* Lamk.) : cas des monts de Tlemcen. Thèse magister, Ina, El-Harrach (Alger), Algérie, 175pp.
- Bougadoum B., 1992. Assistance météorologique à la prévention et à la lutte contre les incendies de forêts. In : Ciesla W.M, Rijks D, eds. Séminaire, Météorologie et incendies de forêts , Rabat.
- Bourreau D., 2011. Etude de faisabilité de lamellé-collé endémique en Guyane Française. Thèse présentée à la faculté de génie civil de l'université des Antilles et de la Guyane, École doctorale pluridisciplinaire : Santé, Environnement et Sociétés dans les Amériques, Guyane-France, 44-55pp.
- Behr, A.E., I.B. Sachs, B.F. Kukachka et J.O. Blew. 1969. Microscopic examination of pressure treated wood. *Forest Products Journal*, 19(8):31-40pp.
- Bodig, J. and B. Jayne., 1982. *Mechanics of wood and wood composites*, V.N. Reinhold, Editor. 1982: New York.
- Bariska, M. 1992. Collapse phenomena in eucalypts. *Wood Science and Technology*, 26(3):165-179pp.

## Références bibliographiques

Back., Sandström., 1982. Critical aspects on accelerated methods for predicting weathering resistance of wood based panels. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 40:61-75pp.

Bustos A.C., 2003. Optimisation du procédé d'aboutage par entures multiples du bois d'épinette noir. Doctorat en sciences du bois, Faculté de Foresterie et Géomatique, Université Laval-Québec, Canada, 157pp.

Bustos, C., Mohammad, M., Hernandez, R. E., et Beaugard, R. 2003b. Effects of curing time and end pressure on the tensile strength of finger-jointed black spruce lumber. *Forest Products Journal*, 53(11/12), 85pp.

Bustos, C., Beaugard, R., Mohammad, M., et Hernandez, R. E. 2003a. Structural performance of finger-jointed black spruce lumber with different joint configurations. *Forest Products Journal*, 53(9), 72pp.

Bohan Xu., 2009. Modélisation du comportement mécanique d'assemblages bois avec prise en compte de critères de rupture. Génie des procédés. thèse de Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2009. . Ecole Doctorale sciences Pour L'ingénieur De Clermont-Ferrand, France.

Bécué, J.P., 1999. *Chimie du Collage: L'adhérence*, E.S.B, Editor. 1999.

Brancheriau L., 2011. Vibrations de poutre. Caractérisation acoustique du matériau bois pour son utilisation en structure. Sarrebruck, Allemagne, Editions universitaires européennes, 240pp.

Brancheriau L., 2013. Caractérisation acoustique et ultrasonore des produits bois et composites. Habilitation à diriger des recherches, Université Montpellier 2, Montpellier, France, 122pp.

CTFT (centre technique forestier tropical), 1970. résultats des essais effectués sur les chênes zéén et Afares D'Algérie , adresse : 45 bis, avenue de la belle Gabrielle, 94 NOGENT sur Marne. Centre centrale de coopération économique.

Côté, W.A., 1984. The Structure of Wood and the Wood Cell Wall, in *Principles of Wood Science and Technology*, Springer-Verlag, Editor. 1984: Berlin. 52pp.

Choong, E.T. et S.S. Achmadi., 1991. Effect of extractives on moisture sorption and shrinkage in tropical woods. *Wood and Fiber Science*, 23(2):185-196pp.

Choong, E.T. et F.O. Tesoro. 1989. Relationship of capillary pressure and water saturation in wood. *Wood Science and Technology*, 23:139-150pp.

Carlquist, S.J., 1988. *Comparative Wood Anatomy*. Springer Series in Wood Science, Berlin. 4-11pp.

CTBA Centre Technique du Bois., 1973. Etude technico-économique de l'aboutage. Série III, Travail Mécanique du Bois-Usinage-Fabrication des Matériaux Dérivés du Bois, Cahier n°92, France, 56pp.

CSA., 1992. Bois débité des résineux CAN/CSA-O141-91. Etobicoke, Ontario: Association Canadienne de Normalisation.

Cool J., 2011. Optimisation de l'usinage de finition du bois d'épinette noire pour fins d'adhésion. thèse de l'Université Laval, Canada.

Coman R., 2010. Effet des paramètres de coupe sur l'aboutage de l'épinette noire à haute masse volumique. Mémoire de maître es sciences (M.Sc.), Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec, Canada, 85pp.

## Références bibliographiques

CERIBOIS site internet: <http://www.ceribois.com/contact.html>

DGF (Direction générale des forêts)., 2007. politique forestière nationale et stratégie d'aménagement et de développement durable des ressources forestières et alfatières, Alger, Algérie.

Dilem k., 1992. Contribution a l'étude du déterminisme de quelques propriétés de Base du bois de pin d'Alep (pinus halepensis Mill), thèse de doctorat à l'INPL, France.

DGF., 2000. Etude prospective du secteur forestier en Algérie. Alger, Algérie, 86pp.

Dinkel O., 1997. Étude et modélisation de l'endommagement d'un assemblage collé bois-bois sollicité en traction. Thèse de Doctorat de l'Université Paul Verlaine de Metz, Spécialité : Sciences de l'Ingénieur, Option : Génie Mécanique, France, 164pp.

Daya A., 2006. Etude des contraintes de croissance des arbres sur pied d'eucalyptus grandis et du chêne vert - Caractérisation et valorisation sous forme de bois collé. Thèse de Doctorat de l'Université Paul Verlaine de Metz, Spécialité : Sciences de l'Ingénieur, Option : Génie Mécanique, France, 157pp.

De Moura LF., 2006. Etude de trois procédés de finition des surfaces du bois d'érable a sucre pour fins de vernissage. thèse de l'Université Laval, Canada.

Dahou Zohra, Jacqueline Saliba, Zoubir-Mehdi Sbarta Antoine Boniface, Stéphane Morel., 2015. Détection et évaluation de l'endommagement mécanique du bois par émission acoustique. Rencontres Universitaires de Génie Civil, Bayonne, France.

Dagenais C., 2007. Aboutage de l'érable a sucre pour la fabrication de produits de bois d'ingenierie structuraux. Memoire de maitre es sciences (M.Sc.), Departement des sciences du bois et de la foret, Universite Laval, Quebec, Canada, 131 pp.

Derbal W., Zerizer A., Gerard J., Guibal D., 2015. Caractérisation d'aboutage à entures multiples pour trois essences d'Algérie. Bois et Forets Des Tropiques, N° 325 (3): 59-70 pp.

Derbal W., Zerizer A., Gerard J., Guibal D., 2015. Point de saturation des fibres (PSF) de trois essences d'Algérie .Groupement de recherche (sciences du bois)- 4èmes journées scientifiques de GDR Bois 4 au 6 novembre 2015- Clermont-Ferrand.

Derbal W., Zerizer A., Gerard J., Guibal D., 2014. Essais de délamination sur des composites massifs (carrelets 3-plis) fabriqués à partir des bois Algériens. Journées Scientifiques du Groupement de Recherches (GDR) Sciences du bois 12-14 Novembre 2014 Nancy .

Derbal W., Zerizer A., Gerard J., Guibal D., 2014. Mise en œuvre de la technique de l'aboutage à entures multiples pour développer l'utilisation d'essences locales en Algérie. (colloque international Eco matériaux) Conférence Matériaux 2014 - 24 au 28 novembre-Montpellier -Fédération française des matériaux.

Derbal W., Zerizer A., Gerard J., Guibal D., 2014. Valorisation de trois essences de bois algériennes en produit à forte valeur ajoutée par la technique de l'aboutage à entures multiples . Colloque International CMMS14 -12 et 13 novembre 2014, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie.

Derbal W., Zerizer A., Gerard J., Guibal D., 2013. Caractérisation physico-mécanique de trois espèces de bois algériens en vue de la fabrication de carrelets 3-plis pour des menuiseries intérieures. GDR bois 3544, CNRS, Ecole des ponts . 19-21 Novembre 2013, Paris France.

## Références bibliographiques

- Elbez, G. and D. Bentz., 1991. Le collage du bois. La technologie du bois, ed. CTBA. Paris
- Elbez, J., 1996. La mouillabilité: Aspect Théoriques et Expérimentaux. CTBA. 16pp.
- FAO., 2013. Etat des forêts méditerranéenne . Contributeurs : Marion Briens, Dominique Legros, Edouard Michel, Plan Bleu, France.
- Ferka Z N., 2006. impact de l'occupation spatio-temporelle des espaces sur la conservation de l'écosystème forestier. Cas de la commune de tessala, magister en foresterie, option : gestion et conservation des écosystèmes, université abou bekr belkaïd tlemcen Algérie..
- FAO., 2010. Evaluation des ressources forestières mondiales 2010. Rapport national, Algérie. FRA2010/003. Rome. <http://www.fao.org/docrep/013/al439f/al439f.pdf>,
- FAOSTAT., 2013. Annuaire statistique de la FAO- Algérie. Rome, Italie.
- Feist, W.C. et H. Tarkow., 1967. A new procedure for measuring fiber saturation points. Forest Products Journal, 17(10):65-68 pp.
- Feist., 1988. Role of pigment concentration in the weathering of semitransparent stains. Forest Products Journal, 38(2):41-44pp.
- Feist., Mraz., 1978. Comparison of outdoor and accelerated weathering of unprotected softwoods. Forest Products Journal, 28(3):38-43pp.
- Forest Products Laboratory., 1999. Wood Handbook. Wood as an engineering material. General Technical. Report FPL-GTR-113. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, WI. EU. 463 pp.
- Forintek Canada Corp. 2001. Carte routière technologique. Bois de sciage et produits à valeur ajoutée. Québec, QC. Canada. 133 pp.
- Fröblom, J. 1975. Factors affecting the quality of finger joints manufactured in commercial jointing machines. Paperi-Ja-Puu. 57(12):877-885pp.
- Fisette, P. R., et Rice, W. W. 1988. An analysis of structural finger-joints made from two northeastern species. Forest Products Journal, 38(9), 40-44pp.
- Ghazi a. et Lahouati R., 1997- Algérie 2010. Sols et ressources biologiques. Inst. Nat. Etudes de Stratégie Globale. 38-45pp.
- GRECO J., 1966. L'érosion, la défense et la restauration des sols. Le reboisement en Algérie. Pub. Ministère de l'agriculture et de la réforme agraire, 393pp.
- Gonzalez, G.C.T. et J.F. Siau., 1978. Longitudinal liquid permeability of american beech and eucalyptus. Wood Science, 11(2):105-110pp.
- Goulet, M. et R.E. Hernández., 1991. Influence of moisture sorption on the strength of sugarmaple wood in tangential tension. Wood and Fiber Science, 23(2):197-206pp.
- Guitard D., 1994. Comportement Mécanique du Bois, in Le Bois Matériau d'Ingénierie, Arbolor, Editor. 1994: Nancy. 91-122pp.
- Guitard, D., 1987. mécanique du matériau bois et composites, ed. Cepadues-Editions. 1987, Nancy. 238pp.
- Gerhards, C.C., 1982. Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: An analysis of immediate effects. Wood and Fiber Science, 1982. 14(1):4-36pp.

## Références bibliographiques

- Green, D.W. et D.E. Kretschmann. 1994. Moisture content and the properties of clear Southern pine. Res. Pap. FPL-RP-531. USDA Forest Service., Prod. Lab., Madison, WI.EU.28 pp.
- Gindl M, Reiterer A, Sinn G, Stanzl-Tschegg SE., 2004. Effects of surface ageing on wettability, surface chemistry, and adhesion of wood.HolzalsRoh- und Werkstoff62:273–280pp.
- Hernández, R.E. 1989., Influence des composantes secondaires et du contrefil sur les propriétés physico-mécaniques de bois tropicaux. Thèse de Ph.D., Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec. 186pp.
- Hernández, R.E. 1983., Relations entre l'état de sorption et la résistance du bois d'érable à sucre en traction tangentielle. Thèse de M.Sc., Département d'exploitation et utilisation des bois, Université Laval, Québec. 77pp.
- Hernández, R.E. et M. Bizoň. 1994. Changes in shrinkage and tangential compression strength of sugar maple below and above the fiber saturation point. Wood and Fiber Science, 26(3):360-369pp.
- Harris, J.M., 1989. Spiral Grain and Wave Phenomena in Wood Formation.Springer Series in Wood Science, ed. T.E. Timell.1989, Syracuse, New-York. 214pp.
- Harris, J.M.,1988. Spiral Grain Angle and Wave Phenomena.Springer Series in Wood Science, ed. T.E. Timell.1988, Syracuse, New-York.
- Hanhijärvi, A., P. Galimard, and P. Hoffmeyer.,1998. Duration of load behaviour of different sized straight timber beams subjected to bending in variable climate. HolzalsRoh- und Werkstoff, 1998. 56: 285-293pp.
- Hernández RE, Cool J.,2008a. Evaluation of Three Surfacing Methods on Paper Birch Wood in Relation to Water- and Solvent-Borne Coating Performance. Wood and Fiber Science 40:459–469pp
- Hernández, R.E. 1994. Effect of two wood surfacing methods on the gluing properties of sugar maple and white spruce. Forest Products Journal, 44(7/8):63-66pp.
- Ingrassia, A.P., 1964.Hex-House Weathering test for siding products. Forest Products Journal, 14(7): 313-315pp.
- Jokerst, R. W. 1981.Finger-jointed Wood Products (Research Paper FPL-382).Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Jeandeau J P., 1987.Collage structural : la fin de l'empirisme. CETIM Information, n°100.
- Jessome, A.P. 1958. The efficiency of scarf joints.Department of Northern affairs and National Ressources.Forestry branch.Forest Products Laboratories of Canada.Ottawa, Canada.18 pp.
- Kadi hanifih., 1998. L'alfa en Algérie. Thèse en Science.USTHB Bab Ezzouar, Alger, 270 pp.
- Kadik B., 1987. Contribution a l'étude de pin d'Alep (*pinushalepensis* Mill) en Algérie, dendrométrie morphologie. Office des publications universitaires (OPU) Alger. 580pp.
- Kaouane., 1987.Analyse dendrométrique d'un peuplement de chêne zéen dans la forêt de Guerrouch (Jijel). Mémoire d'ingénieur INA, El Harrach, Alger, 78pp.
- Kuo, M.-L. et D.G. Arganbright. 1978. SEM observation of collapse in wood. IAWA Bulletin, 2-3:40-46pp.

## Références bibliographiques

<https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/WOODNAT/document/Fiche-proprietes-bois-phy.html>

Keller R. et F. Thiercelin. 1975. Influence des gros rayons ligneux sur quelques propriétés du bois de hêtre. *Annales des Sciences Forestières*, 32(2):113-129pp.

Kelsey, K.E. 1956. The shrinkage intersection point – its significance and the method of its determination. *Forest Products Journal*, 6:411-416pp.

Kollmann, F.F.P.,1984. *Mechanics and Rheology of Wood*, in *Principles of Wood Science and Technology*, Springer-Verlag, Editor.1984: Berlin. p. 292-414pp.

Keller., 1994. La Constitution du Bois, in *Le Bois Matériau d'ingénierie*, Arbolor, Editor: Nancy. 13-51pp.

King T. et G. Chen. 2001. Adhesive and wood. *Specialty Wood Journal* 4(6):14-18pp.

Letreuch B. N, 2001.De la nécessité d'établir des stratégies de reboisement en Algérie sur la base de la biodiversité. *Revue. Ecosystème n°1, Vol 1*, 64-66pp.

Le Houerou H.N., 1968.La désertification du Sahara septentrional et des steppes.

Louni D., 1994. Les forêts algériennes. *Foret méditerranéenne*, 15 (1) : 59-63pp.

Leclercq, A. 1981. Relations entre la structure anatomique du bois de hêtre et ses propriétés physiques et mécaniques. *Bulletin de Recherches Agronomiques de Gembloux*, 16(1):3-26pp.

Loubinoux, B. and G. Kilbertus., 1994. La préservation du bois techniques et produits de préservation, in *Le Bois Matériau d'Ingénierie*, Arbolor, Editor. 1994.365-376pp.

Leandro Passarini.,2015.Étude du comportement physique des bois au-dessus et au-dessous du point de saturation des fibres. thèse Doctorat en sciences du bois Philosophie, université Laval Québec Canada.

Lamy F., Takarli M., Angellier N., Dubois F., Pop O., 2015.Acoustic Emission Technique for fracture analysis in wood materials ». *International Journal on Fracture*, Vol.192, 2015,57-70pp.

Landis E.N.,Whittaker D. B.,2000.Acoustic emission and the fracture energy of wood. *Condition Monitoring of Materials and structure Conference*, May 21-24, 2000, Austin, Texas, United States, Publisher,21-29pp.

Lewis, A.F. et L.J. Forrester. 1969. *Adhesion of coatings*. In: *Treatise on Coatings. Volume 2. Characterization of Coatings: Physical Techniques*. Marcel Dekker, 57-98pp.

Langbour P., Gerard J., Guibal D., Mahlani K., 2011. Caractérisation technologique et valorisation en bois d'œuvre du pin d'Alep de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. *Foret Méditerranéenne*,32 (3): 263-270pp.

Meddour Sahar O., Derridj A., 2012. Bilan des feux de forêts en Algérie : analyse spatio-temporelle et cartographie du risque (période 1985-2010). *Science et Changements Planétaires / Sècheresse*, 23 (2) : 133-141pp.

## Références bibliographiques

- Messaoudene M., Tafer M., Loukkas A., Marchal R., 2009. Etude de quelques propriétés physiques du bois de chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd) de la forêt des Aït Ghobri (Algérie). *Bois et Forêts des Tropiques*, CIRAD de Montpellier, 39-50pp.
- Messaoudene M., 2008. Stratégie d'aménagement et de développement durable de la forêt de l'Akfadou : état actuel, potentialités et perspectives. Institut National de la Recherche Forestière Station Régionale, 3pp.
- Montero G., Canellas I., 1998. *Salviculturaygestionsoslenible de sistemas forestales*.
- Messaoudene M., Tafer M., Loukkas A., Marchal R., 2008. Propriétés physiques du bois de chêne zéende la foret des Ait Ghobri (Algérie). *Bois et Forêts des Tropiques*, 298 (4): 37-48pp.
- Ministere De L'agriculture., 1992. *Le secteur agricole et les perspectives de sa promotion et de son développement : rapport général*, 207pp.
- Ministere De L'agriculture., 1997. *Données macro-économiques sur l'agriculture algérienne : Perspectives 1996–2000*. 47pp.
- Ministere De L'agriculture., 2000. *Plan National de Développement Agricole -L'agriculture dans l'économie nationale*. 42-96pp.
- Mantanis, G.I., R.A. Young et R.M. Rowell. 1994. Swelling of wood. Part 1. Swelling in water. *Wood Science and Technology*, 28:119-134pp.
- Menon, R.S., A.L. Mackay, J.R.T. Hailey, M. Bloom, A.E. Burgess et J.S. Swanson., 1987. An NMR determination of the physiological water distribution in wood during drying. *Journal of Applied Polymer Science*, 33:1141-1155pp.
- Middleton., 1993. *Coating/wood substrate behaviour in Dacrydiumcu pressinum, Podocarpusdacrydioides and Pinus radiata weather boards*. *Wood Science and Technology*, 27(5):357-371pp.
- Mille G. (ed.), Louppe D. (ed.). 2015. *Mémento du forestier tropical*. Versailles : Ed. Quae, 1198 p.
- McLean, J.P., et al., 2011. The decreasing radial wood stiffness pattern of some tropical trees growing in the primary forest is reversed and increases when they are grown in a plantation. *Annals of forest science*, 2011. 68: 681-688pp.
- Moulin J M. 1989. *Etude d'un nouveau composite à base de bois renforcé par fibre de verre : le L.C.R. (Lamellé Collé Renforcé)*. Thèse de doctorat, Université de Metz, France.
- Molliard et Zearo., 2008. *Résistance mécanique des pièces aboutées. (Rapport d'un projet de fin d'études. ENSTIB)*. Epinal, France.
- Mohammad, M. 2002. *Finger-joint Process Optimization for Structural Applications*
- Morkved, K. 1982. *Production, marketing and use of finger-jointed sawnwood: an overview. Proceedings of Production, Marketing and use of finger-jointed sawnwood, United Nations Economic Commission for Europe. Du 15 au 19 Septembre 1980. La Haye, Pays-Bas. 7-13pp.*
- Moody, R.C. 1970. *Tensile strength of finger-joints in pith-associated and non-pith-associated southern-pine 2 by 6's*. USDA Forest Service. Forest Product Laboratory. FPL 138. Madison, 20 pp.
- Maldas, D.C. et D.P. Kamdem. 1999. *Wettability of extracted southern pine*. *Forest Products Journal*, 49(11/12):91-93pp.
- Nedjraoui D., 1990. *Adaptation de l'alfa (Stipa tenacissimaL) aux conditions stationnelles*. Thèse Doct. Sciences, USTHB, Alger, 256p.

## Références bibliographiques

Nguyen Trung Viet Anh.,2010. multi renforcement du bois lamellé collé étude théorique et expérimentale, soutenue le 17 septembre 2010, thèse de doctorat à l'école nationale des ponts et chaussées, Prais, France.

Navi, P. and F. Heger.,2005. Comportement thermo-hydrromécanique du bois ed. P.p.e.u. romandes. 2005, Lausanne. 298pp.

Noack, D., E. Schwab, et A. Bartz., 1973. Characteristics for a judgement of the sorption and swelling behavior of wood.Wood Science Technology, 7:218-236pp.

Nepveu, G., 1994.Variabilité, in Le Bois Matériau d'Ingénierie, Arbolor, Editor: Nancy. 127-177pp.

Ngangué, Y. 2000. Drying engineered wood products and their components: Impact of moisture content on performance of finger jointing.Project N° 2419, Canadian Forest Service.E-3392.Forintek .Canada.398 pp.

Nussbaum RM ., 1999. Natural surface inactivation of Scots pine and Norway spruce evaluated by contact angle measurements.Holz als Roh- und Werkstoff 57:419–424pp.

NF EN 385 (Aboutages a entures multiples dans les bois de construction. Exigences de performance et exigences minimales de fabrication)

NF EN 387 Bois lamellé-collé. Aboutages a entures de grandes dimensions.

NF EN 385 (Aboutages a entures multiples dans les bois de construction

NF EN 387 (Bois lamellé-collé. Aboutages a entures de grandes dimensions.)

NF EN 204 avril 2002. Classification des colles thermoplastiques pour bois à usages non structuraux (= classification « D »)

NF EN 12765 avril 2002. Classification des colles à bois à résine thermodurcissable à usages non structuraux (= classification « C »)

NF EN 301 novembre 2013. Adhésifs de nature phénolique et aminoplaste, pour structures portantes en bois - Classification et exigences de performance

NF B51-005 (09-1985) Bois - Détermination de la masse volumique. AFNOR

NF B51-006 (09-1985) Bois - Détermination du retrait. AFNOR

NF B51-007 (09-1985) Bois - Essai de compression axiale. AFNOR

NF B51-008 (1987) Bois - Essai de flexion statique quatre points- Détermination de la résistance à la flexion statique de petites éprouvettes sans défaut. AFNOR

NF EN 314-1 2005. Bois –Essai de cisaillement .AFNOR

Outahyon A .,2008. Influences de paramètres d'usage et de stockage sur les propriétés fonctionnelles des surfaces de bois de douglas. thèse de doctorat à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers.

Pellicane, P. J., Stanfill-Mcmillan, K., et Tichy, R. J. 1987. Effects of knots near the finger of finger-jointed dimension lumber. Forest Products Journal, 37(5),13-16pp.

Perem, E., 1954. Determination of the fiber saturation point of wood by centrifuging. Journal of Forest Products Research Society, 4:77-81pp.

Panshin, A.J. and C.d. Zeeuw., 1970.Text book of Wood Technology.Vol. 1. 1970, New York: McGraw-Hill Book.

Parker, R.S.R. et P. Taylor. 1966. Adhesion and adhesives. Pergamon Press, Oxford, 142 pp.

Pommier R., Muszynski L., 2007. Evaluation du comportement d'un assemblage bois colle par méthodes de caractérisation optiques. 25es rencontres de l'AUGC, Bordeaux, France, 23-25 mai 2007, 8 pp.

## Références bibliographiques

- Rabhi Kh., 2011. Ajustement de modèles hauteur – circonférence – âge pour le chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) dans la forêt d'Akfadou (Tizi ouzou); effet de la densité et de la station. Mémoire de Magister en Foresterie, Université Abou bekr Belkaïd, Tlemcen, Algérie.
- Richter, K., W.C. Feist et M.T. Knaebe., 1995. The effect of surface roughness on the performance of finishes. Part 1. Roughness characterization and stain performance. *Forest Products Journal*, 45(7/8):91-97pp.
- River, B.H, C.B. Vick et R.H. Gillespie. 1991. Wood as an adherend. Dans: *Treatise on Adhesion and adhesives*. Édité par J. Dean Minford. Marcel Dekker. New York, NY. 1-230pp.
- Richards, D.B. et F.E. Goodrick. 1959. Tensile strength of scarf joints in Southern Pine. *Forest Prod. J.* 9(6):177-179pp.
- Raknes, E. 1982. The influence of production conditions on the strength of finger-joints. *Proceedings of Production, Marketing and use of finger-jointed sawnwood*, United Nations Economic Commission for Europe. Du 15 au 19 Septembre 1980. La Haye, Pays-Bas. 155-168pp.
- Ritschelf., Zhouy., Brunnera. J., Fillbrandt., Niemz., 2014. Acoustic emission analysis of industrial plywood materials exposed to destructive tensile load. *Wood Science and Technology*, 48(3), 2014, p.611-631pp.
- Skaar, C. 1988. *Wood-water relations*. Springer-Verlag, New York. 283 pp.
- Siau, J.F. 1995. *Wood: Influence of moisture on physical properties*. Virginia Polytechnic Institute and State University, VA. 227 pp.
- Stamm, A.J., 1964. *Wood and cellulose science*. Ronald Press, New York. 549 pp
- Stamm, A.J. 1971. Review of nine methods for determining the fiber saturation points of wood and wood products. *Wood Science*, 4(2):114-128pp.
- Simpson, L.A. et A.F.M. Barton. 1991. Determination of the fiber saturation point in wholewood using differential scanning calorimetry. *Wood Science and Technology*, 25:301-308pp.
- Stevens, W.C. 1963. The transverse shrinkage of wood. *Forest Products Journal*, 13(9):386-389pp.
- Siimes, F.E., 1967. The effects of specific gravity, moisture content, temperature and heating time on the tension and compression strength and elasticity properties perpendicular to the grain of Finnish pine, spruce and birch wood and the significance of these factors on the checking of timber at kiln drying 1967, Helsinki.
- Sellers, T.Jr., J.R. McSweeney et W.T. Nearn. 1988. *Gluing of eastern hardwoods: A review*. General technical report SO-71. USDA. Forest Service. Nouvelle-Orléans, Louisiane. 30 pp.
- SELBO M.L., 1963. Effect of joint geometry on tensile strength of finger-joints. *Forest Products Journal*, 13(9) : 390-400pp.
- Strickle R, M. D. 1980. *Finger-Jointed Dimension Lumber - Past, Present, and Future*. *Forest Products Journal*, 30(9), 51-56pp.
- Strickler, M.D. 1967. Impression finger jointing of lumber. *Forest Product* 17(10):23-28pp.
- Selbo, M.L. 1975a. End and corner joint construction. Dans: *Adhesive bonding of wood*. Technical bulletin N°1512. USDA. Forest Service., Washington, 49-55pp.
- Samson, M. 1985. Potential of finger-jointed lumber for machine stress-rated lumber grades. *Forest Prod.* 35(7/8):20-24pp.

## Références bibliographiques

Schniewind A.P, Quarles S.L. Lee S.H.1996. Wood fracture, acoustic emission, and the drying process Part 1. Acoustic emission associated with fracture, *Wood Science and Technology*, Vol.30, 273-281pp.

Scheikl, M., et al., 2002. Wood Adhesion and Glued Products, in *COST Action*, Leemput, Editors.

Šernek M, Kamke FA, Glasser WG., 2004. Comparative analysis of inactivated wood surfaces. *Holzforschung*.

Thomas, R.J., 1976. Anatomical features affecting liquid penetrability in three hardwood species. *Wood and fiber*, 7(4): 256-263pp.

Tang, R.C., 1972. The effect of shear and poisson's ratio in the static bending of wood beams. *Wood Science and Technology*, 1972. 6(4): p. 302-313pp.

Trenard, Y. et P. Guéneau., 1977. Relation entre la structure anatomique du bois et l'amplitude du retrait du bois. *Holzforschung*, 31:194-200pp.

Troughton, G.E et S. Chow. 1980. Finger-jointing kiln-dried and unseasoned white spruce lumber using the "WFPL Method". *Forest Prod.*30(12):48-49pp.

Tesoro, F.O., E.T. Choong et O.K. Kimbler. 1974. Relative permeability and the gross pore structure of wood. *Wood and Fiber*, 6(3):226-236pp.

Triboulot, P. 1984. Réflexions sur les surfaces et mesures des états de surface du bois. *Annales des sciences forestières*, 41(3):335-354pp.

Thibaut B., Loup C., Chanson B., Dilem A., 1992. La valorisation du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en zone méditerranéenne française. *Forêt Méditerranéenne*, 13 (3) : 226-233pp.

USDA, Forest Service., 1974. Wood handbook: Wood as an engineering material. USDA Agriculture Handbook 72. Forest service. Washington, 431pp.

Vrazel, M., et Sellers JR., 2004. The effects of species, adhesive type, and cure temperature on the strength and durability of a structural finger-joint. *Forest Products Journal*, 54(3), 66-75pp.

Wenzel, R.N. 1936. Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Industrial and Engineering Chemistry*, 28(8):988-994pp.

Wei, H., N. Ul kem, D. Berk et G.J. Kubes. 2006. Wetting and absorption on wood surface with surfactants. *Paper and Timber*.88(1):51-55pp.

WH:WEM.,1987. Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. Agriculture Handbook, F.P. Laboratory, Washington. 44-21pp.

Williams, R.S.,1983. Effect of grafted UV stabilizers on wood surface erosion and clear coating performance. *Journal of Applied Polymer Science*, 28:2093-2103pp.

Wong, A.H.H., et al., 2005. Natural Durability of Tropical Species with Emphasis on Malaysian Hardwoods -Variations and Prospects. in International Research Group on Wood Protection. Bangalore, India.

Zelinka, S.L., M.J. Lambrecht, S.V. Glass, A.C. Wiedenhoef tet D.J. Yelle., 2012. Examination of water phase transition in Loblolly pine and cell wall components by differential scanning calorimetry. *Thermochemica Acta*, 533:38-45pp.

## Références bibliographiques

Zauer, M., J. Kretschmar, L. Großmann, A. Pfriem et A. Wagenführ., 2014. Analysis of the pore-size distribution and fiber saturation point of native and thermally modified wood using differential scanning calorimetry. *Wood Science and Technology*, 48(1):177-193pp.

Zink-Sharp, A., 2003. Mechanical Properties of Wood. *Wood Quality and Its Biological Basis*, 197-209pp.

Zerrouk D., 2006. La forêt algérienne face aux caprices du temps. *El Watan, le quotidien indépendant*.

# Annexes

## Annexe A

### Détermination de PSF

#### Méthode par mesure du coefficient de retrait surfacique :

Cette méthode utilise des éprouvettes de dimensions 25 x 20 x 10 mm selon les directions R, T, L.

Ces éprouvettes sont saturées par trempage dans l'eau distillée pendant environ 48 heures en subissant deux cycles de dépression-pression pour parfaire la saturation.

Les éprouvettes ainsi saturées sont pesées à l'aide d'une balance électronique pour obtenir la masse saturée.

Les dimensions suivant les directions R et T à l'état saturé sont également mesurées.

Le volume saturé est mesuré sur une balance selon le principe d'Archimède.

Les éprouvettes de bois sont ensuite placées dans une enceinte climatique réglée en température et humidité relative de l'air respectivement sur 30°C - 85% Hr, 20°C – 65% Hr, 20°C – 30% Hr pour être ramenées successivement à une humidité du bois théorique de 18%, 12%, 6%.

Les dimensions et la masse sont prises respectivement à 18%, 12%, 6 % et 0%.

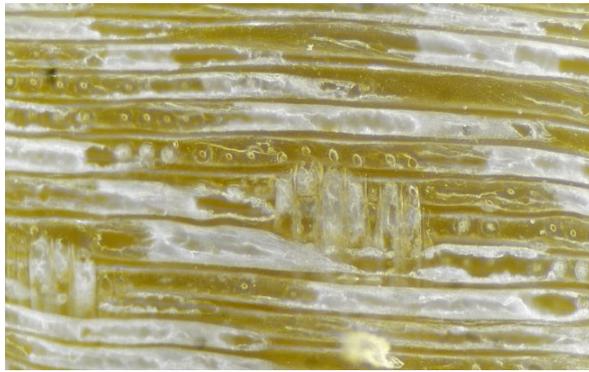
Pour passer de 6% d'humidité à l'état anhydre, les éprouvettes sont maintenues à l'étuve pendant 48 heures à une température de 103°. La teneur en eau (X %), les retraits radial (RR) et tangentiel (RT) sont calculés.

A partir des retraits radial et tangentiel, le retrait surfacique a été calculé avec la formule  $((RT + RR) + (RT*RR)/100)$  ; il est quasiment identique au retrait volumique. Le coefficient de retrait surfacique a été ensuite déterminé en faisant le rapport entre le retrait surfacique et le PSF.

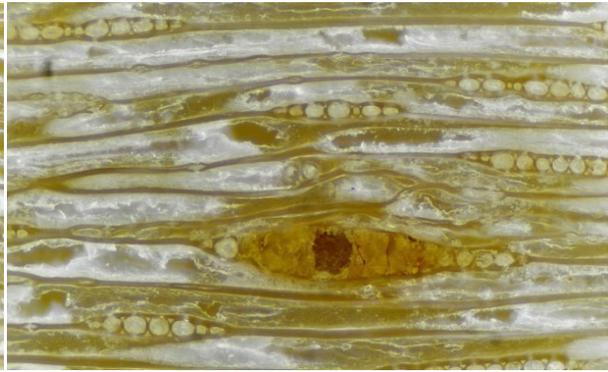


## Annexe B

Les coupes microscopique des bois

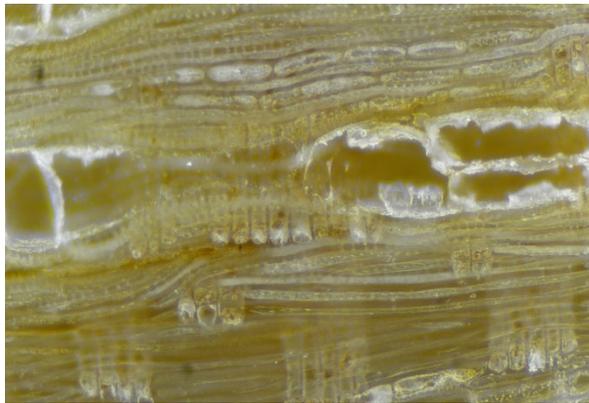


Pin d'Alep radial (\*40)

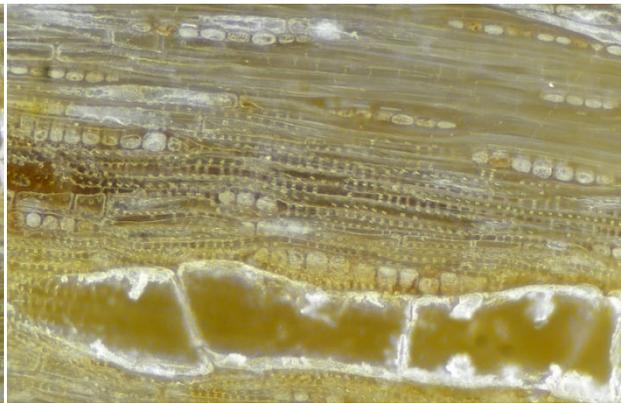


Pin d'Alep tangentiel (\*40)

Vue microscopique de bois de pin d'Alep dans le plan radial et tangentiel (x 40)

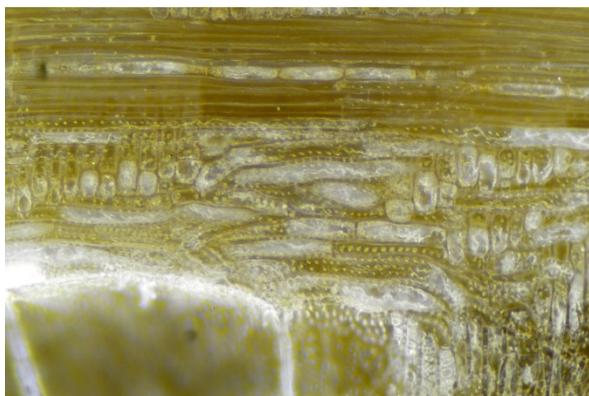


Chêne afarès radial (\*40)



Chêne afarès tangentiel (\*40)

Vue microscopique de bois de chêne afarès dans le plan radial et tangentiel (x 40)



Chêne zéen radial (\*40)



Chêne zéen tangentiel (\*40)

Vue microscopique de bois de chêne zéen dans le plan radial et tangentiel (x 40)