



HAL
open science

Études des contraintes de croissance des arbres sur pied d'eucalyptus grandis et du chêne vert : caractérisation et valorisation sous forme de bois collé

Abdelmajid Daya

► **To cite this version:**

Abdelmajid Daya. Études des contraintes de croissance des arbres sur pied d'eucalyptus grandis et du chêne vert : caractérisation et valorisation sous forme de bois collé. Autre. Université Paul Verlaine - Metz, 2006. Français. NNT : 2006METZ015S . tel-01752462

HAL Id: tel-01752462

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01752462>

Submitted on 29 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



École Nationale d'Ingénieur de Metz

THÈSE

Présentée à



Université Paul Verlaine de Metz

Par

Abdelmajid DAYA

Pour l'obtention du grade de :
Docteur de l'Université Paul Verlaine de Metz

Spécialité : Sciences de l'Ingénieur
Option : Génie Mécanique

**ÉTUDE DES CONTRAINTES DE CROISSANCE DES ARBRES
SUR PIED D'EUCALYPTUS GRANDIS ET DU CHÊNE VERT
CARACTÉRISATION ET VALORISATION SOUS FORME DE
BOIS COLLÉ**

Soutenue le 30/11/2006 devant le jury composé de :

G. PLUVINAGE	Professeur à l'Université Paul Verlaine - Metz	Président
J F. JULLIEN	Professeur à l'INSA - Lyon	Rapporteur
J. GRIL	Directeur de Recherche au CNRS - LMGC Montpellier	Rapporteur
G. DUCHANOIS	Maître de Conférence à l'ENSTIB - Nancy I	Examineur
Z. AZARI	Professeur à l'Université de Picardie	Examineur
P. JODIN	Ingénieur de Recherche à l'Université Paul Verlaine - Metz	Directeur de Thèse
M. CHERGUI	Professeur à l'ENSEM - Casablanca	Co-Directeur de Thèse

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche entre dans le cadre d'un programme de valorisation du bois national, a été réalisé au sein du trois laboratoire. Le **Laboratoire de Contrôle et de Caractérisation des Matériaux (LCCM)** de l'**École Nationale d'Électricité et de Mécanique de Casablanca (ENSEM)**, la **Division de Recherche et d'Expérimentations Forestières (DREF)** du **Centre National de Recherche Forestière de Rabat (CNRF)** et le **Laboratoire de Fiabilité Mécanique (LFM)** de l'**Université Paul Verlaine de Metz**. Cette thèse est financée par le Comité Mixte Inter Universitaire Franco-Marocain (CMIUFM) du Projet d'Action Intégrée PAI N° MA/ 02/ 37.

J'exprime ma profonde gratitude à mes directeurs de thèse, Monsieur **P. JODIN** Ingénieur de recherches de l'**Université Paul Verlaine de Metz** et Monsieur **M. CHERGUI** Professeur à l'**ENSEM** de Casablanca, qui par leurs conseils judicieux, ont su me guider tout en préservant mon autonomie. J'aimerais aussi leur rappeler toute ma sincère reconnaissance.

Je tiens aussi à remercier Monsieur le Professeur **Z. AZARI**, qui a été d'un support scientifique et humain considérable.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous les membres de jury, pour l'honneur qu'ils me font d'accepter l'examen ce travail

J'adresse aussi mes remerciements à Monsieur **A. FAMIRI**, dont la combinaison rare de talents scientifiques et humains, a été à la fois un formidable exemple et une source d'apprentissage concentrée.

Mes remerciements vont enfin à tout ceux qui ont participé de près ou de loin à ce travail, en particulier les menuisiers de **CNRF**, mes amis et collègues du **Laboratoire de Contrôle et de Caractérisation des Matériaux (LCCM)** et du **Laboratoire de Fiabilité Mécanique (LFM)**.

À la mémoire de ma sœur *LEILA DAYA*

À mes parents

À mes frères

À mes soeurs

TABLES DES MATIÈRES

Tables des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
-----------------------	---

CHAPITRE 1 : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I- GÉNÉRALITÉS	4
I-1- Bois d'Eucalyptus	4
I-2- Bois de chêne vert	4
I-3- Essence à multi-usages et problèmes liés	5
I-3-1- Utilisations des Eucalyptus et de chêne vert	5
I-3-2- Facteurs limitant l'utilisation des eucalyptus et de chêne vert en bois d'œuvre	5
I-4- Les contraintes de croissance et leurs conséquences	5
I-4-1- Rappel anatomique	5
I-4-1-1- Structure anatomique du matériau bois	5
I-4-1-2- Eléments chimiques de la matière ligneuse	9
I-4-2- Origine des contraintes de croissance	10
I-4-2-1- Bois de réaction	11
I-4-2-2- Bois de compression	11
I-4-2-3- Bois de Tension	11
I-5- Mise en évidence des contraintes de croissance appelée des indicateurs des contraintes de croissance GSI	12
I-5-1- Méthode du prisme	12
I-5-2- Méthode des deux trous ou des deux rainures (ou méthode Wap's)	12
I-5-3- Méthode du trou unique	12
I-6- Conséquences des contraintes de croissance à l'abattage et au sciage	13
I-7- Les variations radiales des propriétés du bois	14
I-8- Comportement mécanique du bois	15
I-8-1- Grandeurs techniques du bois	15
I-8-2- Comportement élastique linéaire du bois	17
I-8-3- Influence des paramètres physiques sur le comportement élastique	18
II- LA COLLE ET STRUCTURES COLLÉES.	20
II-1- Introduction	20
II-2- Les mécanismes du collage -théories de l'adhésion	20
II-2-1- Modèle de la liaison chimique	20
II-2-2- Modèle mécanique	21
II-2-3- Modèle électrostatique	22
II-2-4- Modèle de la diffusion / interdiffusion	22
II-2-5- Modèle thermodynamique - Notion de mouillage	22
II-2-6- Modèle des couches de faible cohésion	24
II-2-7- Modèle du facteur dissipatif	25
II-2-8- Bilan de l'étude sur les théories de l'adhésion	26
II-3- Les adhésifs structuraux	27
II-3-1- Généralités sur les adhésifs structuraux	27
II-3-2- Les principales familles d'adhésifs	27
II-3-2-1- Les époxydes	28
II-3-2-2- Les polyuréthannes	28
II-3-2-3- Les acryliques	28

II-3-2-4- Les polyimides	29
II-3-2-5- Comparatif des performances des adhésifs structuraux	29
III- ASSEMBLAGE BOIS-COLLE	30
III-1- Introduction au collage du bois	30
III-2- Différents assemblages collés	30
III-2-1- Aboutage	32
III-2-2- Aboutage à entures multiples	32
III-2-3- Bois lamellé collé	33
III-3- Composite à base de bois	34
III-3-1- Le dommage mécanique	34
III-3-2- Les altérations d'ordre physico-chimique	35
III-3-2-1- Altération du bois	35
III-3-2-2- Altération des liaisons interfaciales	36
III-3-2-3- Altération du polymère	36
IV- PRÉSENTATION DES DIFFÉRENTS MODÈLES MÉCANIQUES UTILISÉS POUR PRÉVOIR LA RUPTURE DES ASSEMBLAGES COLLÉS.	37
IV-1- La mécanique linéaire de la rupture	37
IV-1-1- La fissuration des matériaux homogènes	37
IV-1-1-1- Approche en contraintes	37
IV-1-1-2- Approche énergétique	39
IV-1-1-3- Approche thermodynamique	39
IV-1-1-4- Lien entre l'approche en contraintes et l'approche énergétique	41
IV-1-2- La mécanique de la rupture interfaciale	43
IV-1-2-1- Approche en contraintes	43
IV-1-2-2- Approche énergétique	44
IV-1-3- Limitations de la mécanique linéaire de la rupture	44
IV-1-3-1- Évolution temporelle des trajets de fissuration	45
IV-1-3-2- Évolution spatiale du trajet de fissuration	45
IV-2- Mode de rupture du matériau bois collé	45
IV-2-1- Paramètres influençant la ténacité	45
IV-2-1-1- Influence du couple bois colle	45
IV-2-1-2- Influence de l'état de surface	46
IV-2-1-2-1- Influence mécanique	46
IV-2-1-2-2- Influence chimique	46
IV-2-1-3- Influence de l'humidité	47
IV-2-1-4- Influence de l'élasticité de la colle et de l'épaisseur du joint	47
IV-2-2- Autres critères de ruptures utilisés pour la modélisation des assemblages collés	48
IV-2-3- Détermination de l'énergie d'adhésion et de cohésion d'un joint de colle	48
V – DISCUSSIONS	50

CHAPITRE 2 : MATÉRIAU VÉGÉTAL ET MÉTHODE

I- CONTRAINTES DE CROISSANCE, CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET MODULES D'ÉLASTICITÉ DYNAMIQUE DES BOIS D'EUCALYPTUS GRANDIS ET DE CHÊNE VERT	52
I-1- Échantillonnage des arbres	52
I-2- Matériau végétal	52
I-3- Méthodes expérimentales	53
I-3-1- Mesure des indicateurs de contrainte de croissances GSI par la méthode du trou unique	53
I-3-2- Position des prélèvements des éprouvettes pour mesure de l'humidité et d'infradensité.	55
I-3-2-1- Humidité	57
I-3-2-2- Infradensité	57
I-3-3- Mesures des propriétés physiques et mécaniques de référence	57
I-3-3-1- Confection des éprouvettes	57
I-3-3-2- Méthode de mesure des propriétés physiques de base	59
I-3-3-2-1- Densité	59
I-3-3-2-2- Infradensité	59
I-3-3-2-3- Retraits	59
I-3-3-2-4- Anisotropie	59
I-3-3-3-Méthode de mesure des propriétés mécaniques par BING	59
II- COMPORTEMENT MÉCANIQUE PAR TRACTION DU BOIS MASSIF ET DU BOIS COLLÉ BOUT A BOUT ET EN BISEAU D'EUCALYPTUS GRANDIS ET DE CHÊNE VERT	60
II-1- Déroulement de l'étude sur les essais de traction	60
II-2- Séchage des planches	60
II-3- Confection des éprouvettes pour essai de traction	62
II-3-1- Caractéristiques géométriques des éprouvettes	62
II-3-2- Pression de collage	63
II-4- Essai de traction	64
II-4-1- Essais	64
II-4-2- Machine de traction	64
II-4-3- Montage de traction	64
II-4-4- Capteurs	64
II-4-5- Principe de l'essai de traction	64
II-4-6- Dispositif d'essai	65
II-5- Concepts statistiques	65
II-5-1- Théorie du maillon le plus faible	65
II-5-2- Analyse probabiliste selon Weibull	66
II-5-3- Dépouillements statistiques	66
III- TÉNACITÉ DU BOIS MASSIF ET DU BOIS COLLÉ D'EUCALYPTUS GRANDIS ET DE CHÊNE VERT	67
III-1- Démarche expérimentale	67
III-2- Fabrication des éprouvettes	67
III-3- Collage des éprouvettes	68
III-4- Déroulement des essais	69
III-5- Dispositif d'essai	69
III-6- Dépouillement des résultats de la ténacité du bois massif et du bois collé	69

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

I- CONTRAINTES DE CROISSANCE, CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET MODULES D'ÉLASTICITÉ DYNAMIQUE DES BOIS D'EUCALYPTUS GRANDIS ET DE CHÊNE VERT	72
I-1- Indicateurs des contraintes de croissance GSI	72
I-1-1- Eucalyptus grandis	72
I-1-2- Chêne vert	73
I-1-3- Profil expérimental des GSI	74
I-1-3-1- Bois d'Eucalyptus grandis	74
I-1-3-2- Bois de chêne vert	74
I-1-4- Profil modélisé des GSI	75
I-1-4-1- Bois d'Eucalyptus grandis	75
I-1-4-2- Bois de chêne vert	76
I-1-5- Coefficient de choix des arbres a abattu	78
I-2- Mesure d'humidité et d'infradensité sur les rondelles de la première bille	78
I-2-1- Profil d'humidité	78
I-2-1- Profil d'infradensité	80
I-3- Mesures des propriétés physiques et mécaniques de référence	81
I-3-1- Propriétés physiques de bases	81
I-3-2- Variabilité des propriétés physiques de base	82
I-3-2-1- Variabilité des densités (D_i)	82
I-3-2-2- Variabilité des retraits (R_i)	84
I-3-2-3- Variabilité de l'anisotropie (A)	85
I-3-3- Propriétés mécaniques par la méthode vibratoire BING	86
I-3-4- Variabilité des propriétés mécaniques par BING	86
I-4- Relation entre le module d'élasticité et l'infradensité ou la densité	88
I-4-1- Relation entre le module d'élasticité longitudinal et l'infradensité	88
I-4-2- Relation entre le module spécifique longitudinal et la densité	88
I-5- CONCLUSION	89
II- COMPORTEMENT MÉCANIQUE PAR TRACTION DU BOIS MASSIF ET DU BOIS COLLÉ BOUT A BOUT ET EN BISEAU D'EUCALYPTUS GRANDIS ET DE CHÊNE VERT	90
II-1- Courbe charge - déplacement	90
II-2- Variabilité des contraintes de rupture	
II-3- Tableau récapitulatif des essais de traction	92
II-4- Définition de la contrainte normale et de la cission	93
II-5- Détermination de la contrainte normale σ_α et de la cission τ_α	94
II-6- Généralisation sur d'autres angles d'aboutage par la représentation de Mohr Caquot	94
II-7- Fiabilité des assemblages par Weibull	96
II-7-1- Application du modèle de Weibull à deux paramètres	96
II-7-2- Calcul des paramètres de la distribution de Weibull	98
II-7-3- Facteurs de sécurités des assemblages	99
II-7-4- Superposition fiabilité-défaillance	101
II-8- CONCLUSION	102

III- TÉNACITÉ DU BOIS MASSIF ET DU BOIS COLLÉ D'EUCALYPTUS GRANDIS ET DE CHÊNE VERT	103
III-1- Courbe charge - déplacement de la fissure	103
III-2- Application du critère énergétique au bois massif et au bois collé.	104
III-2-1- Courbe de complaisances	104
III-2-2- Ténacité du bois massif et du bois collé	106
III-3- Confrontation de nos résultats expérimentaux avec d'autres méthodes.	107
III-4- Facteurs d'intensité des contraintes	109
III-5- Relation entre la ténacité et les indicateurs des contraintes de croissance	110
IV- Analyse des faciès de rupture	111
IV-1- Amorçage de la fissure	111
IV-2- Surfaces de rupture : visualisation de l'amorçage	112
IV-2-1- Bois massif	112
IV-2-2- Bois collé	112
IV-3- Propagation de la fissure	113
IV-3-1- Types de rupture	113
IV-3-2- Observation des faciès de rupture	113
IV-3-2-1- Bois massif	113
IV-3-2-2- Bois collé	114
V- CONCLUSION	114
CONCLUSION GÉNÉRALE	115
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIE	118

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'Eucalyptus et le chêne vert ont une fonction socio-économique majeure au Maroc. En effet, à part l'utilisation du bois des eucalyptus dans l'industrie de la pâte à papier et des perches et du chêne vert pour la charpente et la fabrication de manches d'outils agricoles et de différents objets utilitaires, ils ne fournissent que du bois de chauffage et du charbon de bois. La part des Eucalyptus et de chêne vert en bois d'œuvre reste assez limitée à cause de la libération des contraintes de croissance lors de l'abattage et du tronçonnage (développement de fentes et de déformations) génératrice de déformations indésirables.

Le manque de connaissance des caractéristiques technologiques (physiques et mécaniques) du bois feuillu d'Eucalyptus grandis et de chêne vert et la faible diffusion d'informations sur leurs qualités et leurs possibilités d'utilisation, contribuent à les écarter d'emplois industriels ou artisanaux potentiels.

La technique du bois reconstitué consiste, entre autre, à abouter les lamelles de bois massif purgées de leurs défauts majeurs puis à les assembler par collage après un rabotage. Il s'agit d'une technique à caractère valorisant qui peut être appliquée, a priori à ces deux feuillus. Les meilleurs procédés de valorisation résultent de la volonté de retrouver l'aspect du bois massif, à des degrés divers, afin d'accéder aux fabrications d'éléments à forte valeur ajoutée par exemple: menuiserie et ameublement.

L'objectif de cette étude est de caractériser et valoriser les bois d'Eucalyptus grandis et de chêne vert sous forme de bois collé afin de limiter les effets néfastes causés par la libération des contraintes de croissance et réduire le problème de nervosité de ces deux feuillus par la mise en œuvre de bois collé ou reconstitué en jugeant la qualité des assemblages.

Ce manuscrit se présente sous forme de trois parties distinctes mais complémentaires: le premier chapitre présente l'étude bibliographique, le deuxième chapitre expose la méthodologie expérimentale adoptée et décrit les différentes étapes des expériences menées à partir de l'arbre jusqu'à la fabrication des éprouvettes et le troisième chapitre est consacré à l'analyse des résultats et discussions.

Le chapitre 1 est une revue bibliographique et commence par présenter les bois d'Eucalyptus grandis et de chêne vert, explicitant les connaissances acquises concernant le phénomène des contraintes de croissance et le comportement mécanique du bois. Il rassemble aussi des données concernant la colle et les assemblages collés. Compte tenu de l'ampleur du domaine, ces généralités seront très vite axées sur le collage du bois, enfin on présentera les différents modèles mécaniques utilisés pour prévoir la rupture des assemblages collés.

Le chapitre 2 s'attachera à décrire l'expérimentation visant à définir avec précision les objectifs scientifiques poursuivis. Nous présenterons le matériel végétal, puis nous rappellerons les principes des méthodes expérimentales utilisées ainsi que les différents protocoles poursuivis.

L'ensemble des résultats et discussions sera rassemblé au troisième chapitre. Nous commencerons par confronter les mesures des indicateurs de contraintes de croissance par la méthode du trou unique sur les bois d'Eucalyptus grandis et de chêne vert. Nous présenterons ensuite les profils d'humidité et d'infradensité sur des rondelles de la première bille de ces deux espèces. Les caractéristiques physiques et les modules d'élasticité dynamiques estimés par la méthode vibratoire de BING (Beam Identification by Non destructive Grading) seront déterminés. Les modes de rupture et le comportement mécanique par traction du bois massif et du bois collé bout à bout et en biseau seront étudiés, la qualité des assemblages sera traitée par la loi de Weibull. Par le biais d'une approche de la mécanique linéaire de la rupture, la ténacité G_1 en terme du taux de restitution d'énergie du bois massif et du bois collé constitué en bois d'Eucalyptus grandis et de chêne vert a été déterminé par l'intermédiaire de la méthode des complaisances. Le facteur d'intensité de contrainte K_1 en mode I est déduit par la relation qui le lie avec la ténacité. Une analyse anatomique des faciès et des surfaces de rupture au stéréomicroscope viendra compléter l'étude.

En conclusion, nous récapitulerons les résultats obtenus au cours de cette étude et nous tenterons d'apporter des informations en vue d'améliorer l'utilisation de ces deux feuillus. Nous présenterons également des perspectives.

*CHAPITRE 1 :
ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE*

I- GÉNÉRALITÉS.

I-1- Bois d'Eucalyptus.

Au Maroc, les forêts d'eucalyptus s'étendent sur une superficie d'environ 208 000 ha en majorité concentrée autour de la plaine du Gharb (34 %) et le Rif (11,7 %). L'espèce la plus répandue est l'E. Camaldulensis avec 48 %, suivi de l'E. Gomphocephala avec 32%.

Les eucalyptus jouent un rôle primordial dans l'économie forestière du Maroc. Malgré sa superficie qui ne couvre que près de 5% de la surface totale de la forêt marocaine, la production du bois de cette essence représente environ 43 % de la production totale de produits ligneux, avec un total d'environ 450 000 m³ dont près de 90 000 m³ de bois de feu et environ 365 000 m³ de bois d'industrie et perches de toutes catégories. La part des eucalyptus dans la production de bois d'œuvre représente environ 15%.

L'exploitation des eucalyptus permet la création d'environ 1 912 000 Heures/Jour, soit 7 353 postes d'emploi. Les exportations de la pâte à papier issue des eucalyptus pour l'année 1996 ont enregistré une valeur de 285 Millions Dh. Les exportations de pâte à papier représentent 38 % de la valeur des exportations des principaux produits forestiers dans un secteur où nos exportations ne couvrent que 23 % de nos importations en matière du bois et ses dérivés. La production de miel des eucalyptus oscille autour de 4 000 tonnes par an, soit environ 70 % de la production nationale. L'extraction des huiles essentielles et des tanins des eucalyptus constitue aussi un domaine important qui peut contribuer à la rentabilité des reboisements de cette essence [1].

Les eucalyptus constituent la principale essence utilisée pour les boisements et les reboisements en raison de leur croissance rapide et de leur résistance à la sécheresse, à l'humidité et au feu.

I-2- Bois de chêne vert.

Le chêne vert occupe une superficie très grande au Maroc, soit 1.400.000 ha sur un total de 5 millions, ce qui lui permet de jouer un rôle important sur le plan socio-économique et écologique.

L'examen de la carte phyto-sociologique du Maroc [2], montre que le chêne vert est très réparti, et constitue de ce fait, l'élément essentiel de la forêt marocaine, ainsi, dans le Rif, il succède en altitude, au thuya, au chêne liège, au pin d'Alep, et arrive à 2200 m pour se mélanger au cèdre, sapin et aux chênes caducifoliés.

Au Maroc oriental, le chêne vert forme de beaux peuplements surtout sur la chaîne des Beni Snassen.

Dans le Haut et Moyen Atlas, il s'étend essentiellement sur le flanc atlantique pour former de très belles futaies en bioclimats sub-humide et humide, notamment dans le secteur Moyen Atlantique d'Azrou, Aïn leuh, Itzer et Khénifra entre 600 et 2900 m. Il est, aussi, sous forme réologisme de taillis ou de futaies, dans le secteur oriental du Haut Atlas (Tassaout, Aghbala). La station la plus méridionale du chêne vert se trouve dans le Jbel Kest de l'Anti Atlas [2].

Malgré leur importance socio-économique les secteurs des eucalyptus et du chêne vert sont confrontés à de nombreuses contraintes liées à la sylviculture, à l'exploitation, à la transformation et à l'état sanitaire des peuplements

I-3- Essence à multi-usages et problèmes liés.

I-3-1- Utilisations des Eucalyptus et de chêne vert.

Dans leur aire naturelle de répartition, les feuillus, en particulier les eucalyptus et le chêne vert ont très rapidement fait l'objet d'une valorisation croissante liée à une amélioration des connaissances de leurs propriétés. Aux utilisations traditionnelles, tels que le bois de feu, le charbon ou les structures en bois équarris, sont venus se greffer des emplois à plus haute valeur ajoutée tels que la construction de haut de gamme, l'ameublement, l'agencement intérieur, la production de placages décoratifs.

En dehors de l'aire naturelle de répartition, des plantations ont été mises en place afin de répondre à des impératifs ou des besoins variés:

- Protection et stabilisation des sols érodés et appauvris
- Production de combustible pour les populations locales (plantations villageoises)
- Fourniture de matière première pour la fabrication de pâte à papier (plantations industrielles)

I-3-2- Facteurs limitant l'utilisation des eucalyptus et de chêne vert en bois d'œuvre.

Les bois de feuillus se caractérisent par l'extrême variabilité de leurs propriétés et de leur comportement, cependant, la valorisation en bois d'œuvre de la plus part des espèces du genre reste typiquement limitée par les problèmes techniques que suscite leur première transformation:

- Lors de l'abattage, du tronçonnage et du sciage, la libération des contraintes internes provoque le développement de fentes et de déformations des bois.
- Durant le séchage, se développe le même type de défauts dus aux retraits de séchage élevés, anisotropes et hétérogènes à l'intérieur de la tige. L'effet des retraits souvent se cumule aux effets induits par la libération de contrainte de croissances résiduelles, et à ceux du collapse.

Ces défauts très pénalisants sont généralement fréquents chez les espèces de plantation à croissance initiale rapide (eucalyptus) et exploitées précocement.

I-4- Les contraintes de croissance et leurs conséquences.

I-4-1- Rappel anatomique.

I-4-1-1- Structure anatomique du matériau bois.

Le bois est un ensemble de tissus secondaires, à parois lignifiées, résultant du fonctionnement, vers l'intérieur, de l'assise génératrice cambiale libéro-ligneuse [3]. Il remplit dans l'arbre des fonctions bien déterminées:

- fonction de conduction de la sève brute ascendante allant de la racine de l'arbre jusqu'à la cime (vaisseau);
- fonction de soutien (trachéide, fibre);
- fonction de stockage, de restitution, d'élaboration et de transformation chimique des substances (parenchyme).

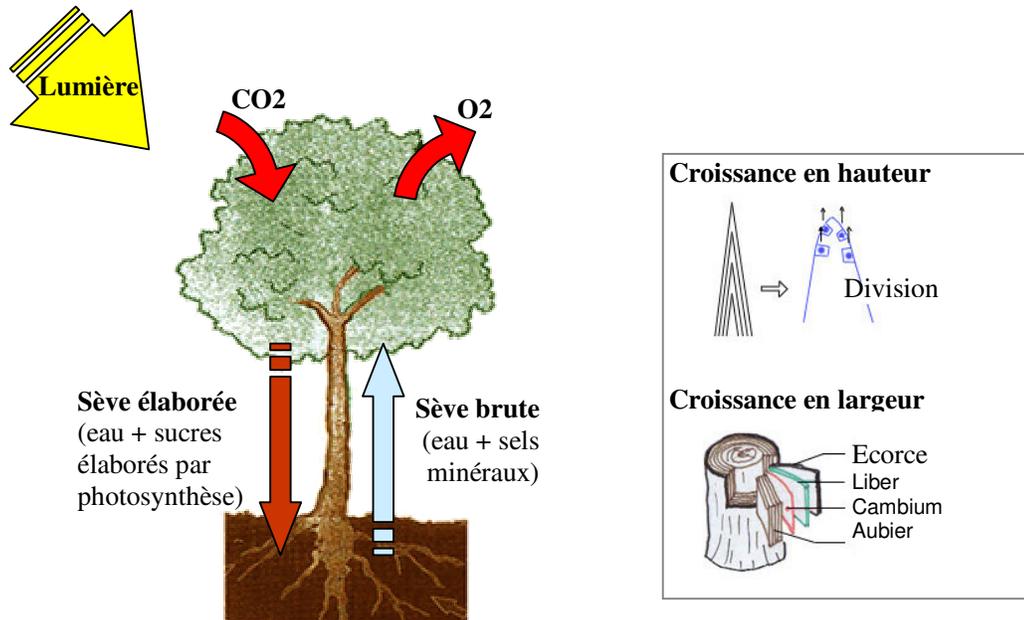


Figure 1.1 : Croissance du bois [3].

Ces tissus sont constitués de cellules issues par divisions de l'assise génératrice libéro-ligneuse qui se disposent spatialement selon un plan d'organisation spécifique: le plan ligneux (figure 1.2).

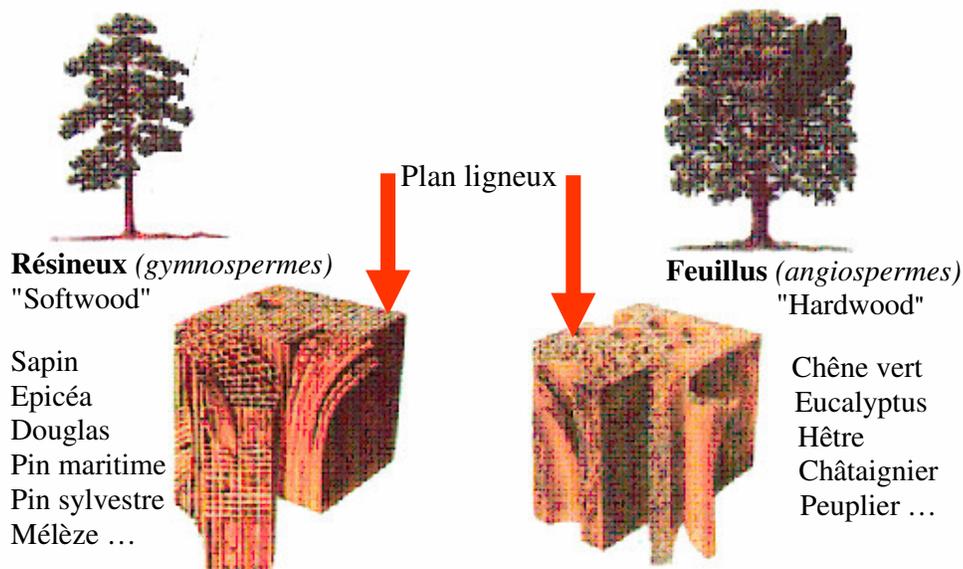


Figure 1.2 : Plan ligneux chez les résineux et chez les feuillus [3].

Chez les résineux, l'essentiel de la masse du bois est constituée par un seul type de cellules, les trachéides éléments fermés qui assurent le transport de la sève brute et assurent aussi la fonction de soutien.

La figure 1.3 représente une illustration du plan ligneux chez un gymnosperme.

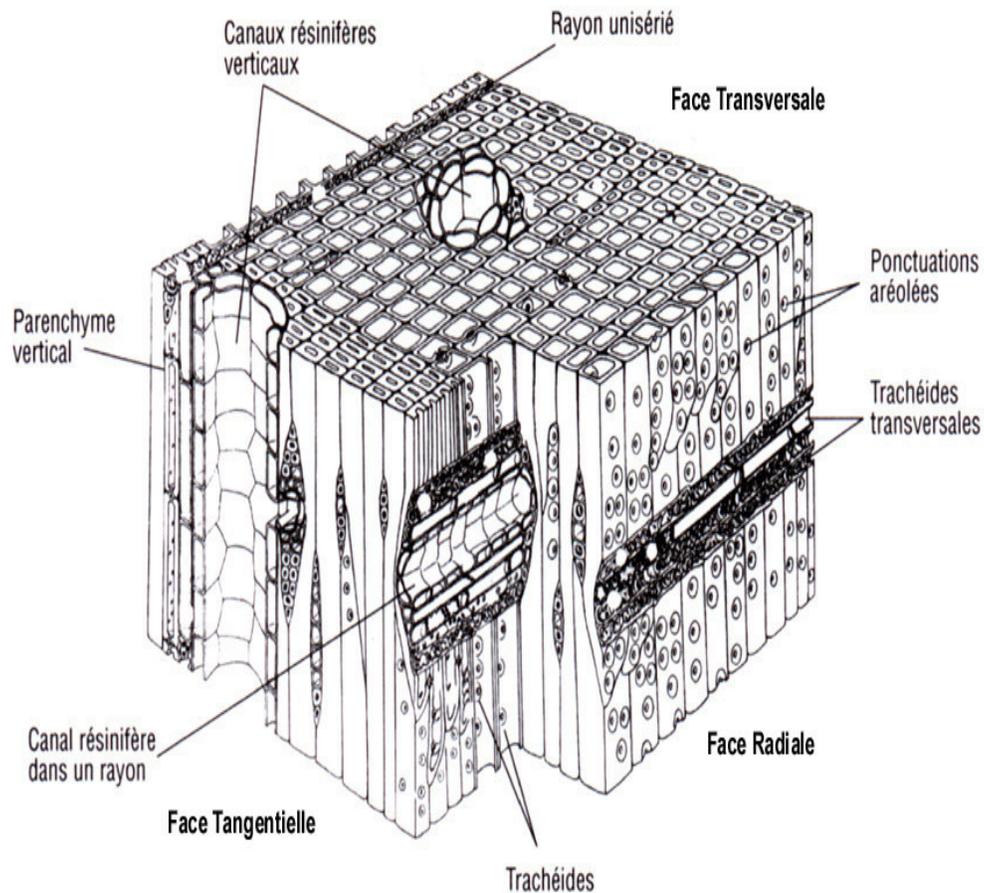
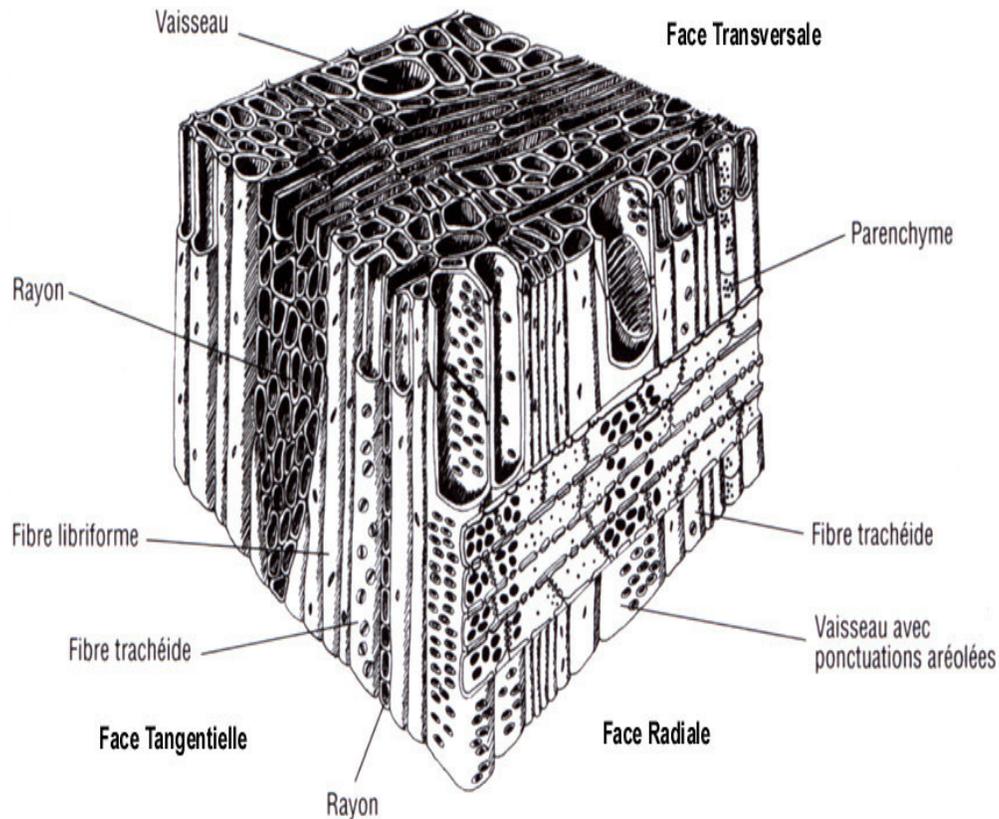


Figure 1.3: Description microscopique des bois résineux. Coupe transversale; coupe radiale; coupe tangentielle [3].

Chez les feuillus, le bois est constitué de plusieurs types de cellules dont l'importance quantitative peut être très variable:

- les éléments fibreux (éléments fermés et morts: fibres, trachéides.....) assurent uniquement une fonction de soutien (rigidité, résistance mécanique);
- les vaisseaux (éléments ouverts et morts) assurent le transport de la sève brute;
- les cellules de parenchyme axiales ou radiales, qui contiennent les matières nutritives (fonction de stockage). Ce sont les éléments vivants de l'aubier, ils peuvent constituer une partie importante du bois.

Un exemple de plan ligneux chez une angiosperme est reporté sur la figure 1.4.



**Figure 1.4: Description microscopique des bois feuillus.
Coupe transversale; coupe radiale; coupe tangentielle [3].**

La cellule ligneuse complètement différenciée présente, de l'extérieur vers l'intérieur, une couche intercellulaire, une paroi primaire et une couche secondaire. Cette paroi secondaire est elle-même divisée en trois couches. La première couche externe S_1 est composée de microfibrilles de cellulose dont les angles d'orientation varient de 60° à 80° par rapport à l'axe de la cellule. Une couche centrale S_2 composée d'une organisation dense de microfibrilles vient s'ajouter; l'angle des microfibrilles ne varie plus que de 5° à 30° . L'épaisseur de cette couche représente jusqu'à 85% de l'épaisseur totale de la membrane cellulaire.

L'orientation de la matière dans S_2 et l'importance de cette couche sont largement responsables du comportement physique de la paroi de la cellule ligneuse. Enfin, une couche interne S_3 appelée aussi couche tertiaire est constituée de microfibrilles dont l'angle avec l'axe de la cellule varie de 60° à 90° . Au cours de la formation de la paroi secondaire et de sa lignification se différencient, des zones de communication entre cellules appelées ponctuations et qui sont des zones d'interruption de la paroi secondaire.

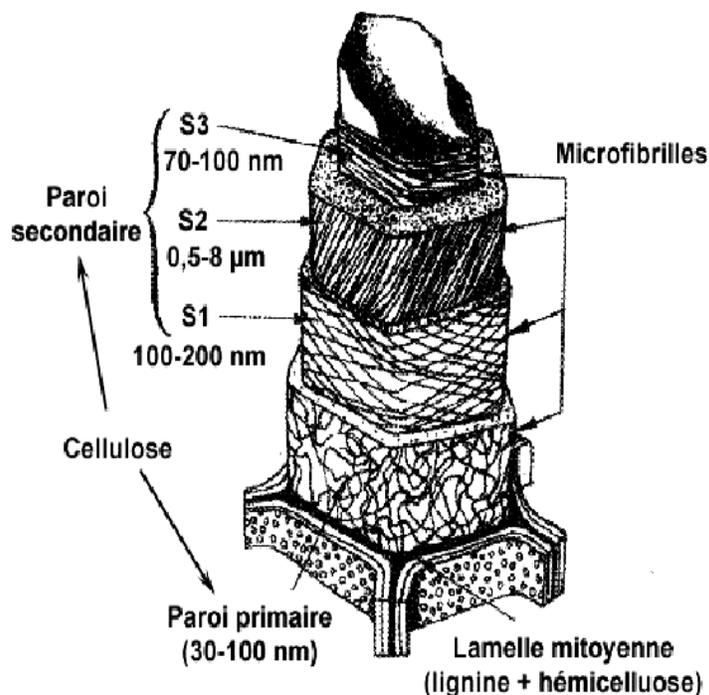


Figure 1.5: Organisation générale d'une paroi de cellule ligneuse [3].

I-4-1-2- Eléments chimiques de la matière ligneuse.

Les constituants chimiques majeurs dans la paroi de ce matériau végétal se présentent essentiellement sous trois formes: la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. Les proportions de ces éléments dans le bois sont variables d'une espèce à l'autre et d'un endroit à l'autre d'un même arbre.

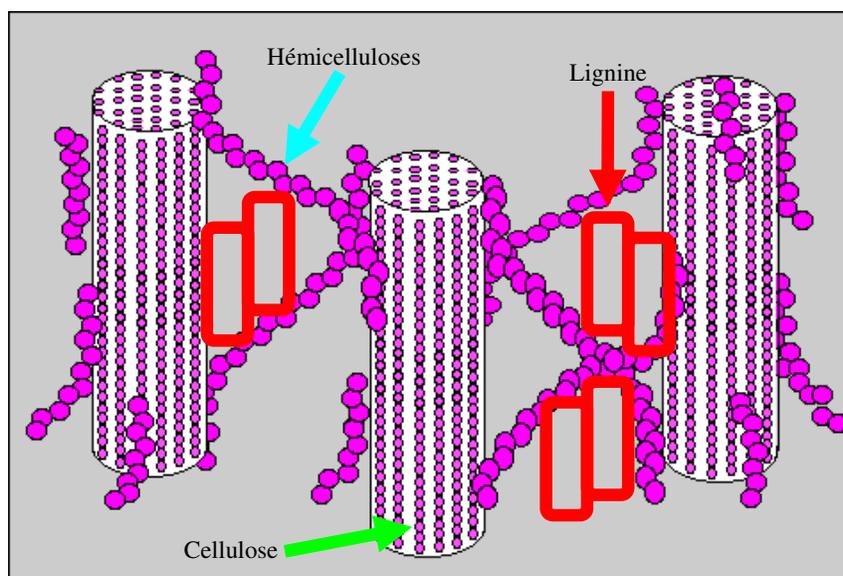


Figure 1.6: Eléments constitutifs de la matière ligneuse.

I-4-2- Origine des contraintes de croissance.

Tout au long de sa croissance, la structure du bois subit des transformations et des efforts. Il existe deux catégories de contraintes: les contraintes liées au poids propre de l'arbre et les contraintes internes de croissance qui résultent de la transformation physico-chimique des parois cellulaires.

En effet, les contraintes de croissance dites aussi contraintes de maturation apparaissent pendant la formation de la paroi secondaire des cellules. Au cours de la maturation, la cellule nouvellement formée a tendance à se rétrécir longitudinalement et à s'épaissir diamétralement (figure 1.7a). Ces déformations sont bloquées par l'adhérence de la jeune cellule aux cellules anciennes déjà rigidifiées. La nouvelle cellule se retrouve donc en précontrainte de tension suivant la direction longitudinale et de compression suivant la direction tangentielle [4] (figure 1.7b).

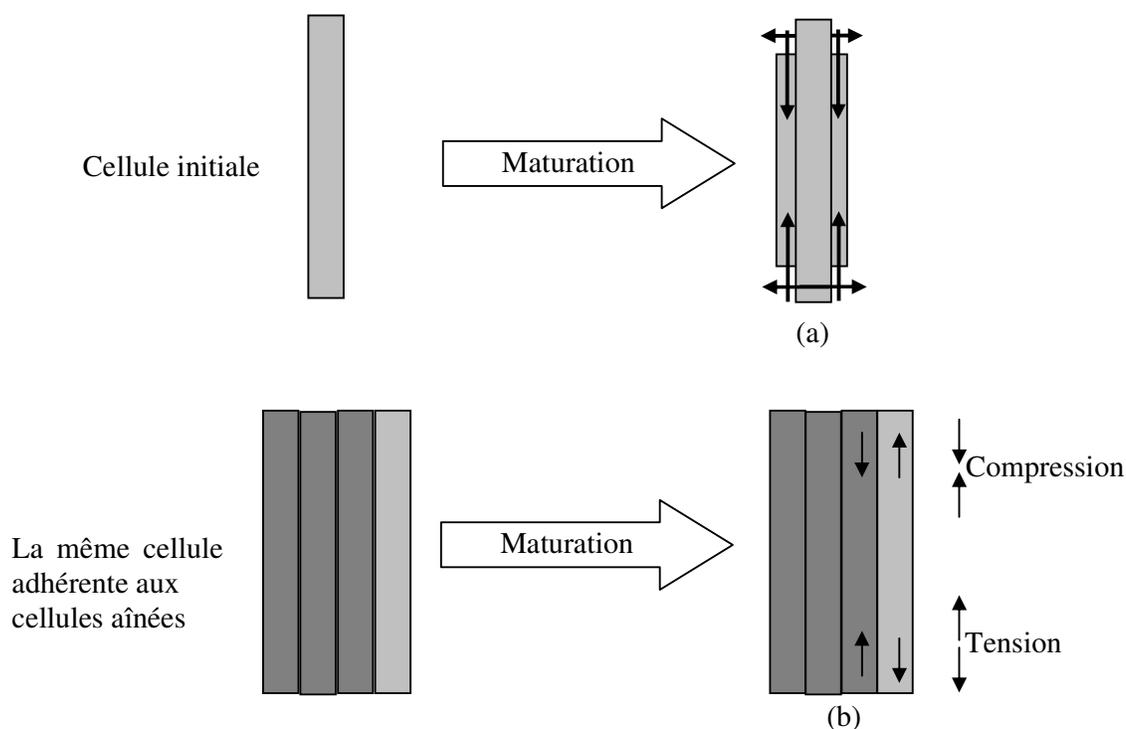


Figure 1.7: Principe de la mise en place des contraintes de croissance [5].

Par réaction, les cellules plus anciennes, qui étaient, d'après le même processus, initialement en tension, se trouvent moins tendues et ainsi de proche en proche jusqu'au centre de l'arbre ou le bois peut être en précontrainte de compression. Le profil des contraintes dans un arbre sur pied peut donc être schématisé comme sur la figure 1.8a.

Cette distribution des contraintes dans l'arbre est très favorable à son maintien face aux sollicitations. En effet, alors que le bois est très résistant en traction, sa structure cellulaire lui confère une résistance en compression plus faible (flambement des parois). Ainsi lors d'une flexion de la tige (liée au vent ou à un chargement du houppier par la neige), la face supérieure résiste sans difficulté à l'augmentation de tension et la face inférieure au lieu de se trouver comprimée se retrouve en moindre tension (figure 1.8b). L'arbre utilise ainsi son matériau constitutif dans sa meilleure plage de sollicitation.

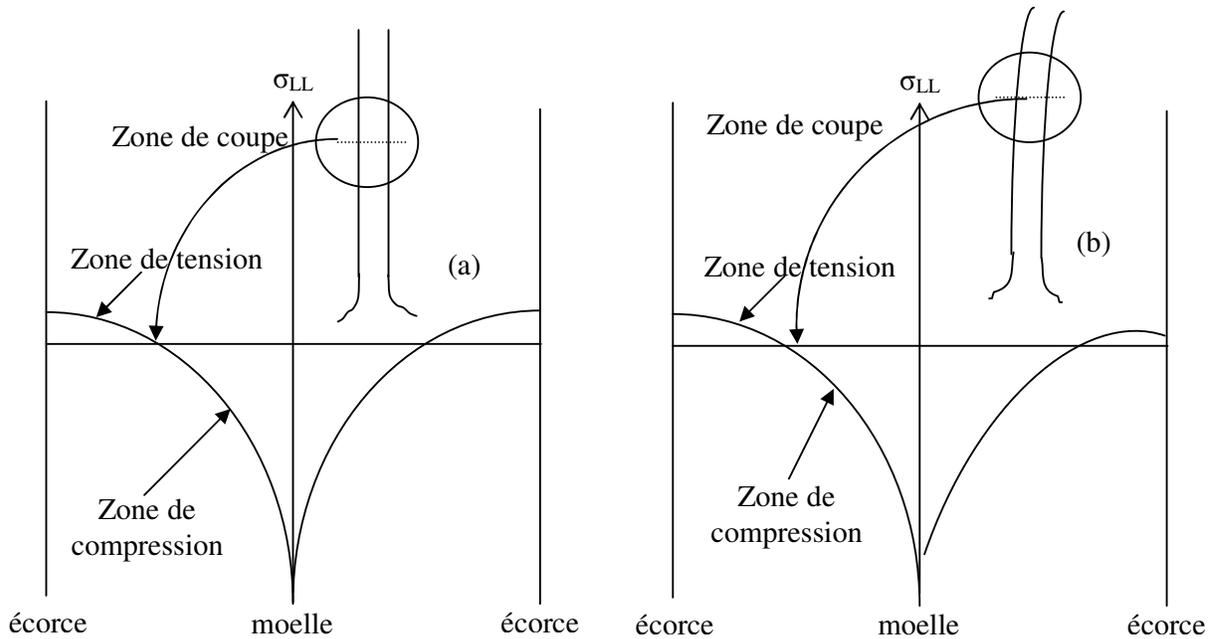


Figure1.8a : arbre équilibré droit

Figure1.8b : arbre en flexion

Figure1.8: Schématisation des contraintes dans l'arbre sur pied [4].

I-4-2-1- Bois de réaction.

Selon des principes similaires, l'arbre est capable de réagir à des sollicitations plus importantes (vent violent unidirectionnel, redressement de la tige principale après un déséquilibre du houppier ou un déchaussement partiel...).

I-4-2-2- Bois de compression.

Le bois de compression est produit quasi exclusivement par les résineux. Lors de la maturation, les cellules qui donneront le bois de compression, contrairement au bois normal ont une tendance au gonflement axial. Le blocage des déformations produit donc une précontrainte de compression. Cette compression sur la face inférieure tend à redresser l'axe de la tige.

I-4-2-3- Bois de Tension.

Les feuillus (eucalyptus et chêne vert) ont une stratégie opposée pour assurer le redressement des tiges: un bois à très forte précontrainte de tension est produit à la face supérieure. Cette forte contrainte de tension issue de la tendance à une forte rétraction axiale des cellules lors de la maturation.

I-5- Mise en évidence des contraintes de croissance appelées des indicateurs de contraintes de croissance GSI.

Deux procédés permettent d'estimer les indicateurs des contraintes de croissance dans les matériaux. Le premier consiste à mesurer les déformations qui résultent de découpes. En appliquant les lois rhéologiques qui relient les déformations et les contraintes, idem on peut remonter jusqu'à la valeur des contraintes. Le second consiste à mesurer des caractéristiques physiques ou mécaniques connues pour varier avec l'état de contrainte. Il s'avère que cette dernière méthode est trop délicate à appliquer au bois dans l'arbre car le comportement rhéologique est trop complexe et le matériau trop hétérogène.

A la surface des arbres sur pied, différentes méthodes de mesure ont été mises au point pour évaluer les déformations à la périphérie des arbres sur pied. Elles consistent à mesurer les déplacements résultants d'une découpe réalisée à proximité du point de mesure. Cette opération se fait dans les premières couches de bois après écorçage autour de la zone de mesure. Ces méthodes ne nécessitent pas l'abattage préalable de l'arbre et permettent ainsi de relever simplement et rapidement un grand nombre de données.

I-5-1- Méthode du prisme.

Une première méthode consiste à extraire un prisme à la surface de la tige écorcée. Ayant pris soin de choisir auparavant deux points de référence suivant une génératrice parallèle au fil de bois et séparée d'une distance connue, la mesure de la nouvelle distance entre ces deux points, suite au prélèvement de l'échantillon, nous permet d'atteindre la déformation de maturation longitudinale. Un troisième point de référence situé au milieu des deux autres permet de prendre en compte la courbure du prisme et d'atteindre le gradient radial de déformation de maturation [6, 7, 8].

I-5-2- Méthode des deux trous ou des deux rainures (ou méthode Wap's).

Cette méthode consiste à fixer des jauges [9, 10, 11] ou des capteurs extensométriques [12, 13] à la surface de la tige écorcée, orientés longitudinalement ou parfois tangentiellement. On évalue alors les déformations résiduelles libérées suite à des opérations de rainurage à proximité du point de mesure. On considère que la structure n'est plus contrainte localement lorsque la mesure n'est plus sensible à la profondeur des découpes. **Gueneau** [12] a suivi ce protocole en perçant deux trous de 30 mm de diamètre, à 5 mm de part et d'autre d'une jauge collée. Mais, il semble que cette technique sous estime d'environ 15% les déformations réelles [14].

I-5-3- Méthode du trou unique.

Cette méthode consiste à mesurer le déplacement instantané relatif de deux pointes fixées à la surface écorcée de l'arbre, suite au perçage d'un trou entre les deux. Les déplacements résultent de la modification du champ de contraintes provoquée par l'usinage du trou et peuvent donc être relié aux déformations bloquées dans l'arbre. Elle est classiquement appliquée à la mesure des contraintes résiduelles dans les matériaux élastiques, **Archer** en 1986 [14] l'a adaptée au cas des précontraintes du bois dans l'arbre sur pied. Elle présente de nombreux avantages: l'utilisation de jauges n'est pas indispensable car les déplacements mesurés sont importants (de l'ordre de 0,1 mm), le perçage du trou est facile et rapide à effectuer. La description de cette méthode est détaillée dans la partie expérimentale.

I-6- Conséquences des contraintes de croissance à l'abattage et au sciage.

Il existe des facteurs principaux limitant l'utilisation des bois nerveux (Eucalyptus, Chêne), notamment les déformations qui se manifestent lors des transformations successives du bois, depuis sa forme initiale dans l'arbre sur pied, jusqu'aux produits usinés [12, 14]. En particulier, après abattage et tronçonnage, des fentes apparaissent en bout des grumes: les bois se fendent à l'abattage et au tronçonnage même avant tout séchage [12]. Les fentes s'ouvrent en croix ou en étoile à partir de la moelle, débouchant parfois sur l'écorce et se propageant sur plusieurs mètres. On peut observer une petite fente à cœur sur presque tous les arbres mais le phénomène n'est catastrophique que chez certaines essences feuillues (figure 1.9), notamment les Eucalyptus et le Chêne vert. De plus, ces fentes seront plus fréquentes sur certains arbres, particulièrement les individus inclinés ou au houppier déséquilibré.



Figure 1.9: Fissure à une et plusieurs branches des bois feuillus.

D'autres études ont essayées de faire le parallèle entre une modélisation des contraintes en périphérie de l'arbre et les déformations dues à la libération de ces même contraintes. L'étude avait été faite sur des eucalyptus; le mode de sciage restait simple puisqu'il consistait à découper partiellement une grume en quatre quartiers (figure 1.10) et à mesurer l'écartement entre les quatre quartiers [15].

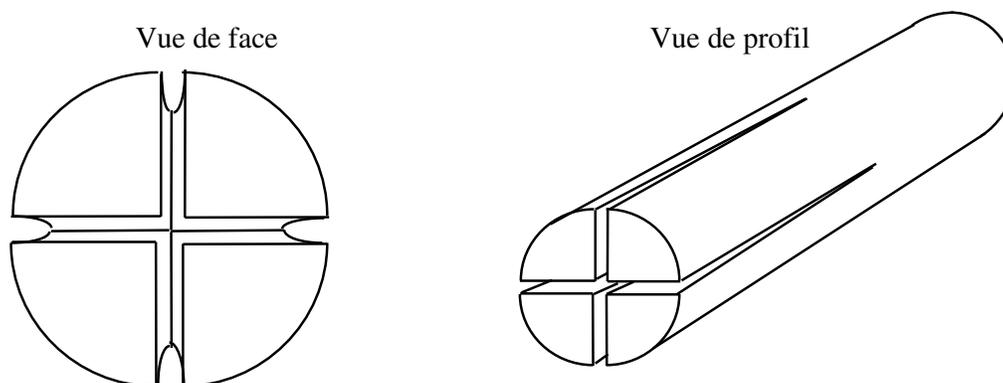


Figure 1.10: Mode de sciage en quatre quartiers.

Ces travaux ont permis de mettre en évidence la relation étroite qu'il y a entre les contraintes de maturation et les déformations de sciage. Outre les fentes d'abattage, les contraintes de croissance ont une incidence sur la qualité des sciages. Elles sont à l'origine des déformations traditionnellement rencontrées (la flèche de face, la flèche de rive, le tuilage et le gauchissement (figure 1.11)) lors du sciage des grumes. Les déformations induites par la libération des contraintes de croissance diminuent le rendement matière, augmentent les coûts de production et favorisent l'usure prématurée des outils de coupe. En effet, il arrive que la pièce de bois, pourtant solidement maintenue, puisse bouger pendant le sciage. La déviation de lame par rapport à son plan de coupe implique bien souvent une dégradation précoce des dents de la scie.

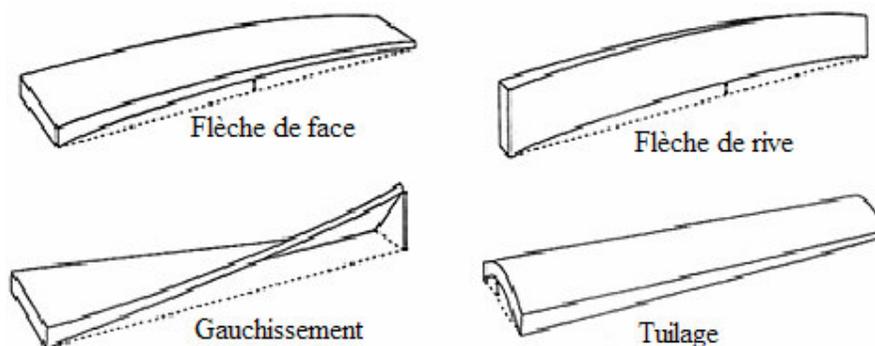


Figure 1.11: Déformations traditionnelles lors de sciage.

I-7- Les variations radiales des propriétés du bois.

Le processus de formation du bois est sujet à des modifications qualitatives et quantitatives qui vont conduire à des variations radiales des propriétés physiques (en particulier la densité) et mécaniques du bois dans l'arbre.

Les variations radiales peuvent être lentes et traduire l'effet du passage du bois juvénile au bois adulte. La transition du bois juvénile au bois adulte est le phénomène qui affecte le plus la qualité technologique du bois (figure 1.12).

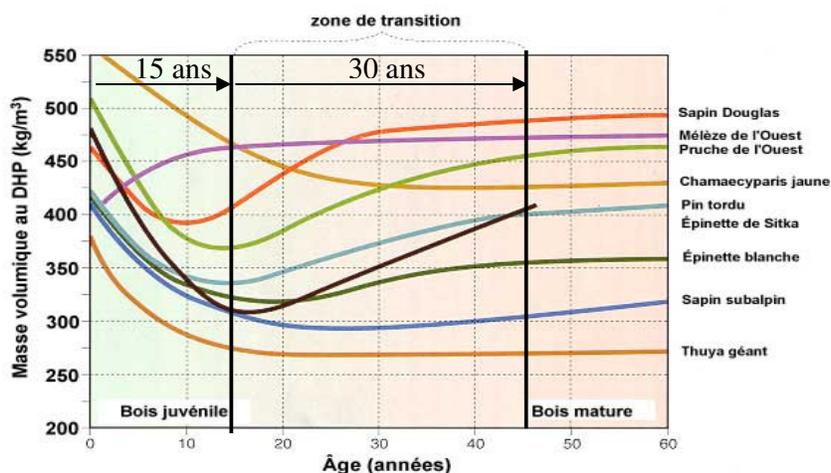


Figure 1.12: Masse volumique en fonction de l'âge cambial pour 9 bois résineux de l'Ouest (tiré de Jozsa et Middleton 1997) [16].

Sur un certain nombre d'espèces, le bois formé au début de la saison de croissance (bois initial BI) (figure 1. 13) a des caractéristiques différentes de celles du bois formé en fin de saison (bois final BF) (figure 1.13). Chez les feuillus, ce phénomène est surtout caractéristique des bois à zone initiale poreuse. Le bois initial est moins dense du fait de la présence de gros vaisseaux. Macroscopiquement, la proportion de ces deux bois (caractérisée par la texture) peut varier entre les cerne.

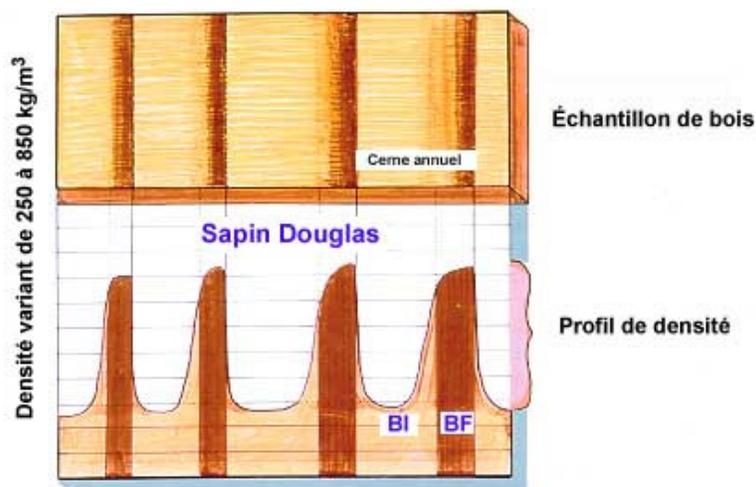


Figure 1.13: Variation de la masse volumique à l'intérieur des cerne annuels (tiré de Josza et Middleton 1997) [16].

I-8- Comportement mécanique du bois.

Les propriétés mécaniques du bois dépendent de la direction selon laquelle on les observe (matériau anisotrope), de sa teneur en eau, de sa température (thermoactivation), du temps (matériau viscoélastique), du niveau de contrainte (domaine plastique). La rhéologie du bois met en évidence le comportement complexe de ce matériau qui combine différentes propriétés comme l'élasticité, la plasticité, la viscoélasticité et la mécanosorption.

I-8-1- Grandeurs techniques du bois.

Pour repérer la structure locale du bois, on utilise généralement un référentiel (L, R, T) dont les axes coïncident avec les directions: longitudinale (L), radiale (R) et tangentielle (T) du bois. On peut l'examiner à l'aide de trois coupes (figure 1.14) ci-après:

- Coupe radiale dans un plan passant par la moelle, LR: bois sur maille, ou sur quartier;
- Coupe transversale perpendiculaire à l'axe du tronc, RT: bois de bout;
- Coupe tangentielle dans un plan excentré et parallèle à l'axe du tronc, LT: bois sur dosse.

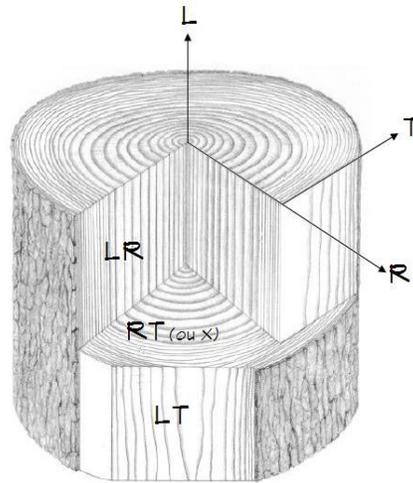


Figure 1.14: Les trois plans de référence.

Si, à ce tronc idéal, est lié un repère cartésien (O, e_1, e_2, e_3) tel que e_3 soit porté par son axe de révolution (figure 1.15), les symétries suggèrent de repérer chaque point P par les coordonnées cylindriques classiques (r, θ, z) et de lui associer un repère local orthonormé (P, e_r, e_θ, e_z) tel que:

$$\left\{ \begin{array}{l} e_r = \frac{\overrightarrow{OP'}}{r} \quad P' \text{ est la projection de } P \text{ dans le plan } (O, e_1, e_2) \\ e_z = e_3 \\ e_\theta = e_z \wedge e_r \end{array} \right.$$

Signalons, au passage que les directions naturelles R, T et L coïncident avec celles du repère cylindrique r, θ et z .

Le tronc modélisé est supposé non seulement parfait du point de vue géométrique, mais également dépourvu de défauts tels que nœuds, irrégularités de la direction des fibres et une éventuelle excentricité des cernes de croissance annuels. Dans cette hypothèse, le matériau présente en tout point deux plans de symétrie: le plan radial et le plan transverse.

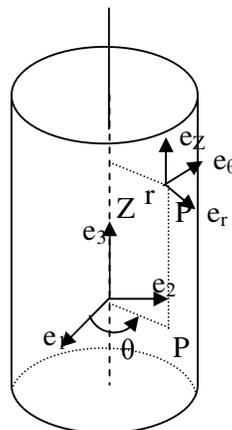


Figure 1.15: Tronc idéal, repère global et repère local.

I-8-2- Comportement élastique linéaire du bois.

Le comportement élastique linéaire d'un milieu continu subissant de faibles niveaux de déformation, s'exprime d'une manière générale par une relation linéaire entre les composantes du tenseur de contrainte et celles du tenseur des déformations ϵ_{ij} . Dans une base quelconque, on représente cette relation par la loi de HOOKE dont l'expression est la suivante:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \\ \epsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \end{array} \right. \quad (A.1)$$

Où C_{ijkl} et S_{ijkl} désignent respectivement les composantes du tenseur des rigidités élastiques et du tenseur des complaisances élastiques du quatrième ordre.

Dans le cas d'un matériau homogène, les coefficients C_{ijkl} et S_{ijkl} ne dépendent que de la nature du matériau et éventuellement de la température et de l'humidité.

Dans la mesure où l'hypothèse des petites perturbations est vérifiée, le matériau bois est considéré comme matériau élastique.

Pour simplifier les écritures des déformations et des contraintes, on adopte les conventions d'écriture suivantes [17], [18]:

Déformations

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_{rr} = \epsilon_R \\ \epsilon_{\theta\theta} = \epsilon_T \\ \epsilon_{zz} = \epsilon_L \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} 2\epsilon_{r\theta} = \gamma_{RT} \\ 2\epsilon_{zr} = \gamma_{LR} \\ 2\epsilon_{\theta z} = \gamma_{LT} \end{array} \right. \quad (A.2)$$

Contraintes

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{rr} = \sigma_R \\ \sigma_{\theta\theta} = \sigma_T \\ \sigma_{zz} = \sigma_L \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{r\theta} = \tau_{RT} \\ \sigma_{zr} = \tau_{LR} \\ \sigma_{\theta z} = \tau_{LT} \end{array} \right. \quad (A.3)$$

Ainsi la loi de comportement dans le repère naturel du bois (R, T, L) s'écrit en tenant compte des contractions d'indice conventionnelles:

$$\begin{pmatrix} \sigma_R \\ \sigma_T \\ \sigma_L \\ T_{TL} \\ T_{RL} \\ T_{RT} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & & & \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & & 0 & \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & & & \\ & & & C_{44} & & \\ & 0 & & & C_{55} & \\ & & & & & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_L \\ \gamma_{TL} \\ \gamma_{RL} \\ \gamma_{RT} \end{pmatrix} \quad (\text{A.4})$$

avec les symétries: $C_{12} = C_{21}$; $C_{13} = C_{31}$; $C_{23} = C_{32}$

Cette écriture matricielle fait apparaître le tenseur des rigidités élastiques C qui est le tenseur inverse de celui des complaisances, ou souplesses.

Avec le référentiel (R, T, L), la loi de comportement exprimée en fonction des souplesses est donnée directement en termes de grandeurs techniques et s'écrit sous la forme:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_L \\ \gamma_{TL} \\ \gamma_{RL} \\ \gamma_{RT} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E_R & \nu_{TR}/E_R & -\nu_{RL}/E_L & & & \\ -\nu_{RT}/E_T & 1/E_T & -\nu_{TL}/E_T & & 0 & \\ -\nu_{LR}/E_L & -\nu_{LT}/E_L & 1/E_L & & & \\ & & & 1/G_{TL} & & \\ & 0 & & & 1/G_{RL} & \\ & & & & & 1/G_{RT} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_R \\ \sigma_T \\ \sigma_L \\ \tau_{TL} \\ \tau_{RL} \\ \tau_{RT} \end{pmatrix} \quad (\text{A.5})$$

où:

E_R, E_T, E_L sont les modules d'Young dans les trois directions R, T, L,
 G_{TL}, G_{RL}, G_{RT} sont les modules de cisaillement,
 $\nu_{TR}, \nu_{RL}, \nu_{TL}$ sont les coefficients de Poisson,
 et avec les trois conditions:

$$\frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TR}}{E_T} \qquad \frac{\nu_{RL}}{E_R} = \frac{\nu_{LR}}{E_L} \qquad \frac{\nu_{TL}}{E_T} = \frac{\nu_{LT}}{E_L}$$

I-8-3- Influence des paramètres physiques sur le comportement élastique

La densité, l'humidité et la température influencent fortement sur le comportement mécanique du bois, dans une proportion qui dépend de la direction. Le plus souvent, les données sur l'ensemble du comportement élastique sont obtenues à l'état « sec » à la température ambiante (20°C) et au taux d'humidité de 12% à 15%. Pour d'autres densités, taux d'humidité et températures, il existe des modèles prévisionnels permettant une estimation du comportement considéré [18].

[17] **Guitard** a proposé des relations empiriques et des coefficients correcteurs, en distinguant le cas des feuillus et des résineux. Il définit ainsi le « feuillu standard » de densité 0,65 g/cm³ et le « résineux standard » de densité 0,45g/cm³, par des relations données dans le tableau I.1.

**Tableau 1.1: Modèles prévisionnels du comportement tridimensionnel élastique.
D'après Guitard (1987).**

	« feuillus » standard		« résineux » standard	
	H = 12% $\rho_0 = 0,65\text{g/cm}^3$ Effectif = 40		H = 12% $\rho_0 = 0,45\text{g/cm}^3$ Effectif = 38	
MPa = 10^6Pa	$S_{ij}^{-1} = \overline{S_{ij}^{-1}} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^B$	R	$S_{ij}^{-1} = \overline{S_{ij}^{-1}} + B(\rho - \rho_0)$	R
$S_{11}^{-1} = E_R$	$1800.(\rho/0,65)^{1,30}$	0,933	$1000 + 2370.(\rho - 0,45)$	0,705
$S_{22}^{-1} = E_T$	$1030.(\rho/0,65)^{1,74}$	0,920	$636 + 1910.(\rho - 0,45)$	0,744
$S_{33}^{-1} = E_L$	$14400.(\rho/0,65)^{1,03}$	0,917	$13000 + 41700.(\rho - 0,45)$	0,876
$-S_{12}^{-1} = \frac{E_R}{\nu_{RT}} = \frac{E_T}{\nu_{TR}}$	$2680.(\rho/0,65)^{1,41}$	0,888	$2050 + 5280.(\rho - 0,45)$	0,546
$-S_{23}^{-1} = \frac{E_L}{\nu_{LT}} = \frac{E_T}{\nu_{TL}}$	$31200.(\rho/0,65)^{1,09}$	0,805	$30800 + 101000.(\rho - 0,45)$	0,817
$-S_{31}^{-1} = \frac{E_R}{\nu_{RL}} = \frac{E_L}{\nu_{LR}}$	$37300.(\rho/0,65)^{0,913}$	0,727	$342000 + 117000.(\rho - 0,45)$	0,762
$S_{44}^{-1} = G_{TL}$	$971.(\rho/0,65)^{1,26}$	0,912	$745 + 989.(\rho - 0,45)$	0,533
$S_{55}^{-1} = G_{RL}$	$1260.(\rho/0,65)^{1,14}$	0,900	$1861 + 2080.(\rho - 0,45)$	0,676
$S_{66}^{-1} = G_{RT}$	$366.(\rho/0,65)^{1,74}$	0,851	$83,6 + 228.(\rho - 0,45)$	0,460

R est le coefficient de corrélation

II- LA COLLE ET STRUCTURES COLLÉES.

II-1- Introduction.

Le collage est une technique d'assemblage dont les applications dépassent largement le cadre du Génie Civil. On le retrouve en effet dans une multitude d'applications industrielles, allant de concepts simples à des réalisations complexes telles que l'assemblage de pièces aéronautiques.

Bien que le collage soit utilisé par l'homme depuis plus de trente siècles, les mécanismes qui gouvernent l'adhésion entre deux matériaux collés reste complexes et partiellement méconnus. La durabilité des assemblages collés est également un problème récurrent, d'une importance capitale pour les industriels, mais que les scientifiques ont toujours du mal à appréhender.

Ce chapitre est scindé en deux parties:

- Dans la partie II-2, nous rappellerons les différentes théories qui sont généralement invoquées pour expliquer le phénomène d'adhésion.
- La seconde partie II-3 sera consacrée à une description générale des adhésifs structuraux. Les phénomènes de vieillissement de ces adhésifs, les modèles phénoménologiques et physico-chimiques qui permettent de les simuler y seront également abordés.

II-2- Les mécanismes du collage -théories de l'adhésion.

Le collage permet d'assembler deux substrats par l'intermédiaire d'un tiers corps, 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 relevant de la physico-chimie, de la tribologie et 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 que nous allons maintenant présenter.

II-2-1- Modèle de la liaison chimique.

Il est parfois possible de créer à l'interface colle/substrat des liaisons covalentes ou ioniques lors de réactions chimiques. Ces liaisons seront autant de points d'ancrage qui assureront une grande résistance à la rupture et une bonne durabilité de l'assemblage.

Ces liaisons chimiques peuvent être créées de deux manières [20, 21, 22, 23, 24]:

- par réaction directe entre l'adhésif et le substrat; c'est par exemple le cas entre une résine époxyde et la couche d'oxyde superficielle d'un métal (figure 1.16);
- par l'intermédiaire d'un agent de couplage, c'est-à-dire d'une molécule compatible à la fois avec la colle et avec le substrat. C'est généralement la technique utilisée pour obtenir une bonne adhésion entre une matrice époxyde et des fibres de verre dans les matériaux composites (figure 1.17).

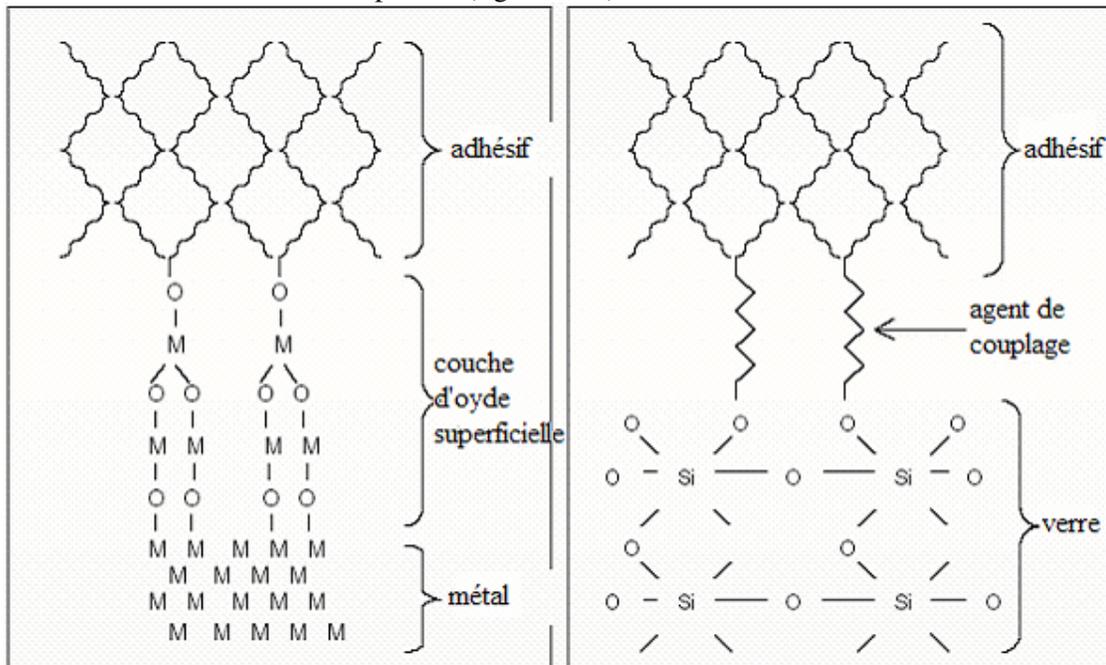


Figure 1.16: Exemple de liaison chimique directe entre adhérent et adhéru.

Figure 1.17: Utilisation d'un agent de couplage pour former une liaison chimique.

II-2-2- Modèle mécanique.

Proposé par **Mac Bain** et **Hopkins** [25], il considère que l'adhésion résulte essentiellement d'un ancrage mécanique des matériaux mis en contact. Le mécanisme mis en jeu est lié à la pénétration de la colle dans les porosités et les aspérités des substrats, ce qui permet de constituer de nombreux points d'ancrage après solidification de l'adhésif.

Si la liaison mécanique contribue à accroître l'adhésion par l'augmentation de l'aire de contact effective, et donc du nombre de liaisons interfaciales, elle peut également être un handicap. En effet, il est nécessaire que la colle mouille parfaitement les surfaces afin de ne pas piéger de bulles d'air dans les porosités, ce qui induirait des concentrations de contraintes et fragiliserait le joint. Une rugosité trop importante peut elle aussi être source de bulles d'air: il existe donc une rugosité optimale des substrats à assembler (figure 1.18).

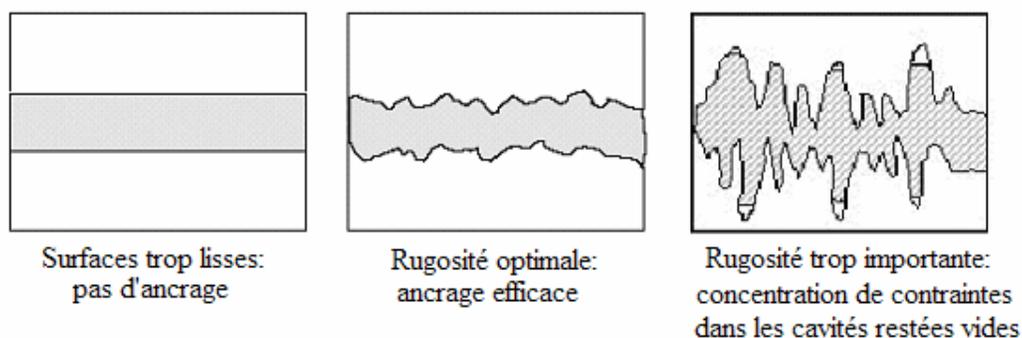


Figure 1.18: Influence de la rugosité des substrats sur l'ancrage mécanique, d'après [26].

Cette théorie trouve des applications essentiellement dans les collages de matériaux poreux (pièces en bois, en papier, en tissus) ou encore de métaux anodisés comme l'aluminium.

II-2-3- Modèle électrostatique.

Il fut développé par **Deryagin** et **Krotova** (1948) [27], après l'observation d'émissions d'électrons rapides lors de la fracture d'un cristal ou de la rupture d'un contact, puis fut repris par **Skinner** (1953) [28].

Lors du contact entre deux matériaux de propriétés électriques différentes, il y a transfert de charges et réajustement des niveaux de Fermi, ce qui provoque l'apparition d'une double couche électrique à l'interface, assimilable aux deux plaques d'un condensateur plan.

Ce modèle est valable pour des systèmes verre/polymère ou métal/polymère entre autres. Néanmoins, il comporte de nombreux points faibles et on peut se demander si la pression électrostatique adhésive est une cause de l'adhésion, ou simplement une conséquence des liaisons intermoléculaires fortes établies à l'interface.

II-2-4- Modèle de la diffusion / interdiffusion.

Proposée par **Voyustkii** [29], cette théorie s'applique essentiellement aux assemblages de polymères compatibles de type élastomère/élastomère. Les chaînes macromoléculaires des matériaux en contact (colle et substrat à chaque bord du joint) vont diffuser à l'interface selon un mécanisme, appelé reptation, qui sera décrit plus tard par **De Gennes** [30]. Cette interdiffusion assure la cohésion de l'assemblage grâce à la formation d'une interphase entre la colle et les substrats.

II-2-5- Modèle thermodynamique - Notion de mouillage.

Mis au point par **Sharpe** et **Schonhorn** [31], ce modèle met l'accent sur le mouillage du substrat par la colle. En effet, les colles étant mises en œuvre à l'état liquide dans la plupart des cas, il semble nécessaire de considérer leur étalement sur la surface de contact.

Le phénomène de mouillage traduit l'aptitude de l'adhésif à créer des liaisons de Van der Waals ou des liaisons de type acide-base (liaisons "hydrogène") avec le substrat. Bien que de faible énergie et de courte portée, ces forces compensent plus ou moins la disparition des forces de cohésion internes de la colle lors de l'augmentation de l'aire de contact avec le substrat. Selon le modèle, l'adhésion s'expliquerait donc par l'existence de ces forces de liaisons physiques.

Plusieurs grandeurs caractéristiques permettent de décrire cette adhésion thermodynamique. Il paraît intéressant de les définir et de donner ici leurs définitions et leurs expressions.

On peut ainsi calculer une énergie libre de surface γ , également appelée tension superficielle, qui correspond au travail à fournir pour augmenter la surface d'un composé d'une unité:

$$\gamma = \frac{dW}{dS} \quad (A.6)$$

De plus, lorsque l'on dépose une goutte de liquide sur un solide, celle-ci va s'étaler jusqu'à atteindre un état d'équilibre, caractérisé par l'angle de contact liquide/solide figure 1.19 et décrit par l'équation d'Young.

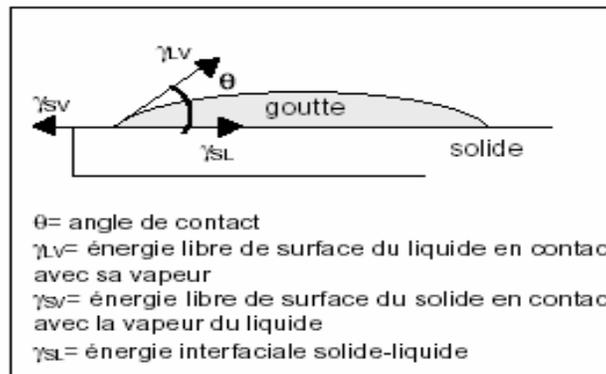


Figure 1.19: Etalement d'une goutte sur un substrat solide.

L'équation d'Young s'écrit: $\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos(\theta)$ (A.7)

Or, $\gamma_{SV} = \gamma_S - \pi_e$ (A.8)

où: π_e est la pression d'étalement due à la présence de vapeur. Elle représente la réduction de l'énergie de surface du solide dans le milieu environnant, due à la pression, à la température, aux contaminants susceptibles de s'adsorber sur la surface libre.

et γ_S est l'énergie libre de surface du solide dans le vide, qui sert de référence.

On obtient alors:

$$\gamma_s = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos(\theta) + \pi_e \quad (\text{A.9})$$

Enfin, Dupré définit une énergie d'adhésion W_a , également appelée énergie de Dupré en tenant compte du fait qu'il y a eu création d'une énergie libre interfaciale et perte d'énergie de cohésion lors de l'étalement de la goutte.

$$W_a = \gamma_L + \gamma_s - \gamma_{SL} \quad (\text{A.10})$$

En la combinant avec l'équation d'Young, on obtient l'équation de Young -Dupré:

$$W_a = \gamma_L (1 + \cos(\theta)) + \pi_e \quad (\text{A.11})$$

Plus le mouillage est bon (angle de contact θ nul ou très petit), plus l'énergie d'adhésion est grande.

On peut donner quelques valeurs d'énergies de surface pour des matériaux usuels:

Tableau 1.2: Exemples d'énergies de surface pour quelques matériaux courants (Données du CETIM-Centre Technique des Industries Mécaniques)

Matériau	Energie de surface (mJ/m ²)
Aluminium	840
Cuivre	1000
Verre	73
Plastiques	18-50
Epoxy	44
PVC	39
Caoutchouc	57
Polyéthylène	31

Cette théorie définit donc des conditions indispensables mais non suffisantes pour obtenir une bonne adhésion. Elle permet également d'appréhender le comportement des assemblages collés dans certains environnements spécifiques, comme le délaminage par réversibilité des liaisons interfaciales en milieu solvant par exemple.

II-2-6- Modèle des couches de faible cohésion

Il s'agit plus ici d'une théorie de la rupture des interfaces que d'un modèle d'adhésion. Dans le cas d'une forte cohésion de l'assemblage, la rupture n'a généralement pas lieu à l'interface, mais dans une couche voisine. **Bikerman [32]** postule donc dans les années soixante l'existence d'une interphase d'épaisseur finie entre les deux matériaux. Cette couche de faible cohésion, due à la présence d'imperfections provenant de la mise en œuvre (bulles d'air,...) et à la discontinuité entre les phases, constitue une zone de transition et présente des gradients de propriétés et de structure (figure 1.20).

Cette théorie permet de se placer à une échelle très fine car elle décrit l'interface en termes d'interactions moléculaires.

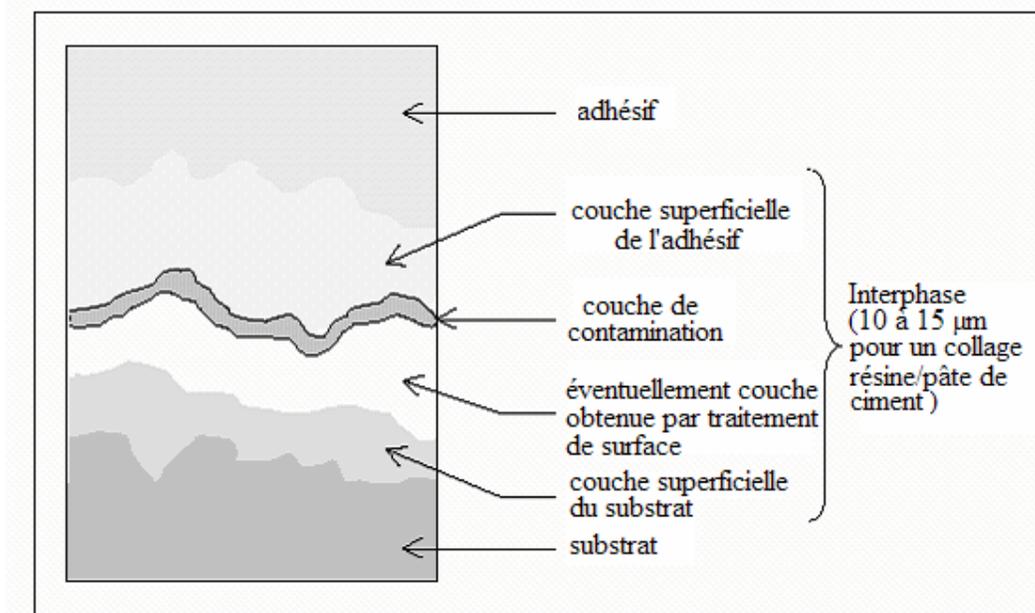


Figure 1.20: Couches de faible cohésion du modèle de Bikerman, d'après [32] (données numériques d'après [33]).

II-2-7- Modèle du facteur dissipatif.

Ce modèle fait intervenir la notion de rupture de l'interface et s'attache à calculer l'adhérence de l'assemblage collé [34]. Pour une fissure se propageant à l'interface d'un joint adhésif, l'énergie de rupture G est définie par la relation:

$$G = \gamma \times \psi \quad (\text{A.12})$$

C'est-à-dire par le produit de l'énergie de surface γ et du facteur de dissipation irréversible en volume ψ (qui est lié aux pertes visqueuses dans le cas des polymères).

Le phénomène de dissipation est amplifié par "l'effet ventouse", produit par de minuscules bulles d'air piégées au sein de l'adhésif, qui a été mis en évidence par **Leibler** [35] récemment. Il permet de mieux comprendre pourquoi l'énergie nécessaire pour décoller un assemblage est largement supérieure à l'énergie des forces de liaisons attractives entre molécules.

II-2-8-Bilan de l'étude sur les théories de l'adhésion

Chacune des théories présentées rend compte de phénomènes particuliers, mais ne permet pas à elle seule de décrire la globalité des mécanismes de l'adhésion.

On peut cependant considérer que le processus de collage se déroule en plusieurs grandes étapes qui font intervenir ces différents mécanismes de l'adhésion figure 1.21:

- mise en contact des substrats avec la colle;
- création de liaisons plus ou moins fortes et de portées variables, qui vont maintenir la cohésion de l'assemblage.

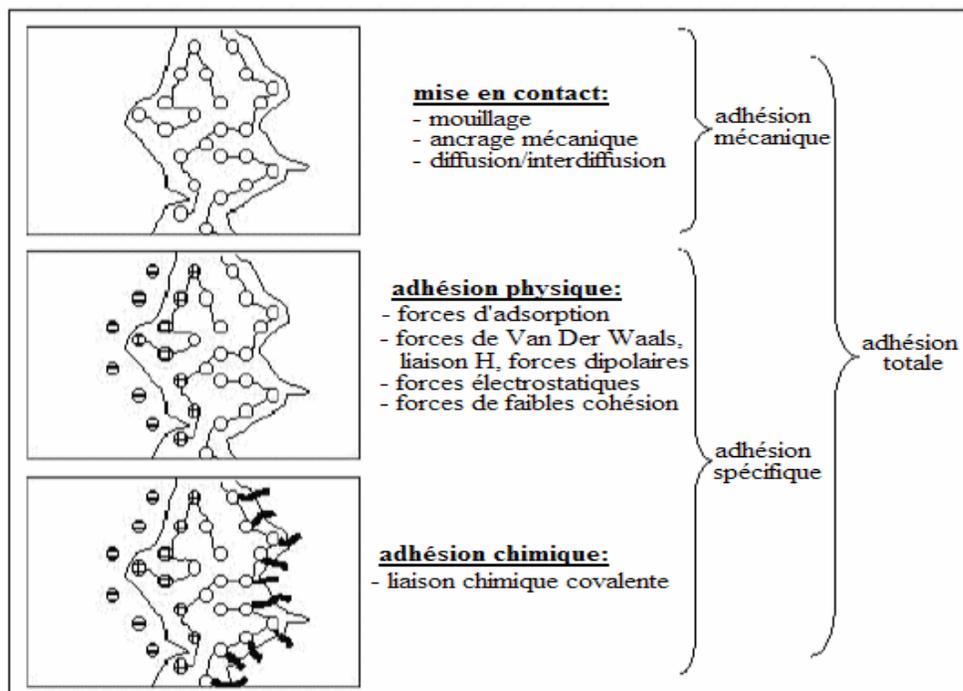


Figure 1.21: Décomposition du processus de collage suivant les principaux mécanismes d'adhésion mis en jeu, d'après [36].

Les énergies des différents types de liaisons sont rapportées dans le tableau 1.3.

Tableau 1.3: Energies des différents types de liaisons intermoléculaires, d'après [37].

Type de liaison		Energie (kcal/mol)
Liaisons chimiques	Ionique	100-250
	Covalente	15-170
	Métallique	27-83
Liaisons intermoléculaires	Liaison hydrogène ou acide/base	<12
	Dispersion (London)	<10
	Dipôle-dipôle (Keesom)	<5
	Dipôle-dipôle induit (Debye)	<0.5

II-3- Les adhésifs structuraux.

Les colles utilisées en génie civil sont des colles dites "structurales", c'est à dire qu'elles sont capables de conférer à un assemblage une résistance équivalente à celle des matériaux qui le constituent, tout en assurant le transfert des contraintes entre les deux substrats. Leur résistance en cisaillement doit être supérieure ou égale à 7MPa et les colles doivent être utilisables dans les conditions de chantier.

Les adhésifs structuraux, comme tous les polymères, présentent des propriétés physico-chimiques qui évoluent dans le temps en fonction de l'environnement auquel ils sont soumis. Ces phénomènes de vieillissement sont susceptibles d'affaiblir le joint de colle, et doivent donc être pris en compte dans les modèles de durabilité. Devant la multiplicité des phénomènes mis en jeu, il nous paraît nécessaire de réaliser un inventaire des connaissances actuelles, de manière à pouvoir dégager les paramètres les plus importants.

II-3-1- Généralités sur les adhésifs structuraux.

La notion de colle structurale est apparue dans les années 1940, en Grande-Bretagne et en Allemagne, lors de la mise au point des polyuréthanes et des colles phénoliques destinées aux assemblages métal/métal dans l'aéronautique. Leur science s'est depuis largement développée, permettant la mise au point d'adhésifs de plus en plus performants. Cependant, la nature et les propriétés fondamentales de ces polymères restent les mêmes.

II-3-2- Les principales familles d'adhésifs.

D'après une étude récente sur le collage [38], le secteur de la construction était le deuxième consommateur d'adhésifs en 2002 et représentait à lui seul 17% du marché mondial (3,6 milliards d'euros). Les époxydes et les polyuréthanes constituent la grande majorité des adhésifs utilisés dans ce secteur (90% en 1999).

Les colles, quel que soit leur état (liquide, pâte ou bien film), sont constituées de polymères organiques et appartiennent à l'une des trois catégories suivantes:

- les thermodurcissables, dont le réseau polymère possède une structure tridimensionnelle. Ils présentent une rigidité élevée et de très bonnes propriétés mécaniques,
- les thermoplastiques, constitués de chaînes linéaires, qui présentent en général des propriétés mécaniques inférieures à celles des thermodurcissables,
- les élastomères, très souples et peu résistants, mais qui présentent une très forte adhésivité.

Dans les deux premières catégories, on trouve les grandes familles de résines utilisées en génie civil et en construction en bois: les époxydes, les polyuréthanes, les composés acryliques et les polyimides.

II-3-2-1- Les époxydes.

Ce sont des thermodurcissables, mono ou bi-composants, qui se présentent sous la forme de produits liquides ou pâteux. Les époxydes [39, 40, 41] sont généralement utilisés pour réaliser des collages métal/métal ou métal/plastique qui sera soumis à des contraintes très élevées, notamment en cisaillement. Ils présentent une bonne adhésion sur la plupart des matériaux et une excellente résistance au vieillissement (en particulier, résistance aux huiles et aux solvants). Enfin, ils présentent une très bonne tenue en température.

L'utilisation d'une colle époxy monocomposant nécessite un préchauffage des parties à encoller et un étalement de la colle à une température supérieure à 120°C. De plus, ce type de colle est souvent nocif et relativement onéreux, ce qui explique la préférence de nombreux professionnels pour les adhésifs époxydes bi-composants.

II-3-2-2- Les polyuréthanes.

Lorsqu'ils sont réactifs sans solvant ou à très haut extrait sec, les polyuréthanes constituent d'excellents adhésifs structuraux, avec une bonne tenue au pelage et à la déchirure. Ils sont obtenus par polyaddition entre un isocyanate et des polyesters ou des polyéthers branchés comprenant plusieurs groupements hydroxyles. La réticulation est catalysée par l'humidité ambiante, les polyuréthanes passant d'un état pâteux à un état élastique.

Il s'agit en général de systèmes bi-composants, qui sont utilisés pour des collages mixtes entre substrats rigide/souple comme les assemblages métal/plastique. Les polyuréthanes se caractérisent par une élasticité et une souplesse importantes même à basse température, et possèdent une bonne adhérence, une excellente dureté et une résistance aux phénomènes de vieillissement. Leur prise est en général moins rapide que celle des époxydes. Leur résistance au cisaillement est plus faible que celle des autres colles structurales et leur mise en œuvre technique est très lourde (étalement difficile). Des polyuréthanes monocomposants se sont donc développés, auxquels on ajoute des activateurs pour accélérer la polymérisation.

II-3-2-3- Les acryliques.

Il existe de nombreuses colles à base acrylique, les plus courantes étant les cyanoacrylates et les méthacrylates. Elles sont obtenues par polymérisation anionique (cas des cyanoacrylates) ou par polymérisation radicalaire (cas des méthacrylates).

Ces adhésifs étaient réservés initialement aux assemblages métal/caoutchouc, mais leur usage s'est étendu aux collages de matériaux poreux et aux assemblages de précision ou de petites pièces. La mise en œuvre se fait par compression d'un film mince de monomères, qui peut adhérer à tous types de surfaces (même le téflon) sans utilisation d'un primaire d'adhésion. Les joints obtenus possèdent une résistance mécanique élevée et une bonne tenue aux solvants, mais leur résistance aux chocs et aux températures élevées est médiocre. On développe donc des 'acryliques modifiés' par adjonction d'un radical uréthane et d'un peroxyde activateur pour gagner en résistance au cisaillement et élargir la plage des températures d'utilisation.

II-3-2-4- Les polyimides.

Les polyimides sont des colles insolubles et infusibles, qui présentent l'avantage par rapport aux colles précédentes de résister aux très hautes températures. La réaction de réticulation se fait par polycondensation intermoléculaire entre un anhydride et une diamine secondaire, puis par polycondensation intramoléculaire, ce qui nécessite des températures élevées et de fortes pressions. La mise en œuvre des polyimides est donc très délicate.

II-3-2-5- Comparatif des performances des adhésifs structuraux

Les colles époxydes présentent de nombreux avantages par rapport aux autres systèmes:

- excellente adhérence sur tous les substrats tableau 1.4;
- bonnes propriétés mécaniques;
- résistance aux agressions chimiques et prise en eau modérée;
- bonne tenue en température.

Cet ensemble de propriétés justifie la prédominance des résines époxydes dans le domaine du collage structural, quel que soit le secteur industriel considéré.

Tableau 1.4: Compatibilité colle/matériau pour plusieurs matériaux de construction, d'après [42].

	Béton				
Béton	Ep Ps Pu Si	Bois			
Bois	Ep Ne Ni Pu Th	Ep Ne Pu Th	Métaux		
Métaux	Ep Ni Ps Si	Ep Ne Ps Pu	Ac An Cy Ep Ps	PVC	
PVC	Ni Pu	Ep Ni Th	Ep Ni	Th	Verre
Verre	Ep Si	Ep Si	Ac Ep Si	Ep Ni Th	Ac Ep Si

Ac : Acrylique modifiée, An : Acrylique anaérobie, Cy : Cyanoacrylate, Ep : Epoxyde,
 Ne : Néoprène, Ni: Nitrile, Ps : Polysulfure, Pu : Polyuréthane, Si : Silicone,
 Th : Thermofusible

III- ASSEMBLAGE BOIS-COLLE.

III-1- Introduction au collage du bois.

Le collage du bois connaît depuis ces dernières années un essor industriel important et couvre un vaste domaine d'applications (entre autre l'ameublement, les charpentes).

Il a permis la création de nouveaux matériaux répondant ainsi aux besoins actuels et à des caractéristiques bien particulières.

Ces produits sont aussi bien des produits de transformation:

- les panneaux sandwich d'isolation;
- les contre-plaqués;
- les panneaux agglomérés;
- Les éléments de construction (poutres lamellées collées par exemple).

En outre, on s'oriente de plus en plus vers une utilisation plus rationnelle de la matière première et notamment en se tournant vers le bois de petites dimensions et/ou des bois de moindre qualité.

Toutefois, 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 exprimée ci-dessous:

Résistance du substrat = Résistance adhésive = Résistance cohésive

III-2- Différents assemblages collés.

Il existe de nombreux types d'assemblage collés. Mais suivant la conception utilisée, la résistance de l'assemblage n'est pas la même figure 1.22.

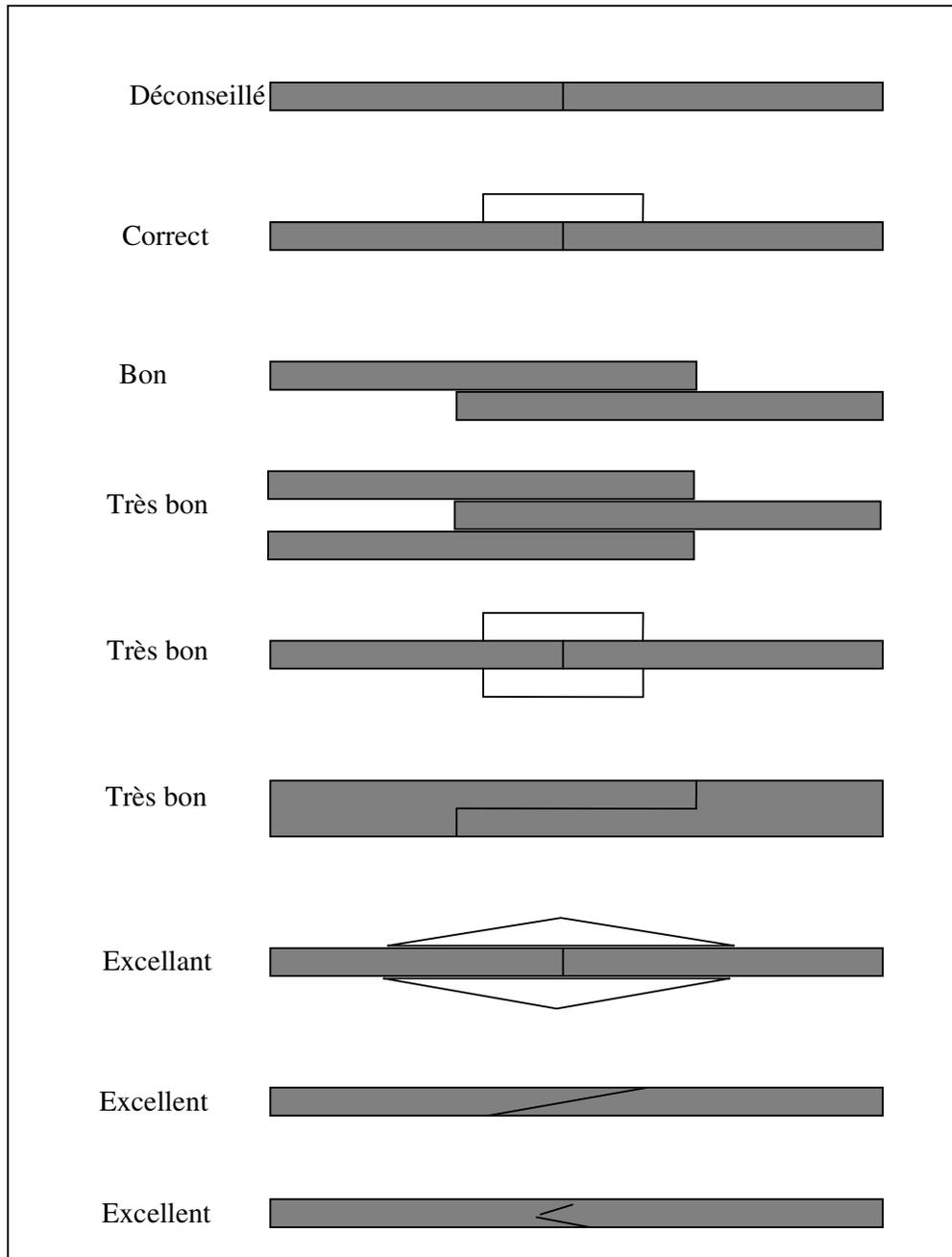


Figure 1.22: Les différentes conceptions des assemblages collés [43].

III-2-1- Aboutage.

Les premiers assemblages à entures ont débuté par les joints avec le profil scarf avec une pente généralement égale à 10% soit un angle de $5,7^\circ$ (6° environ). L'avantage principal de cet assemblage est l'efficacité car la surface totale est collée mais la perte en bois donc de matière première est importante. Puis l'évolution a conduit à utiliser les joints avec le profil en coin figure 1.23.

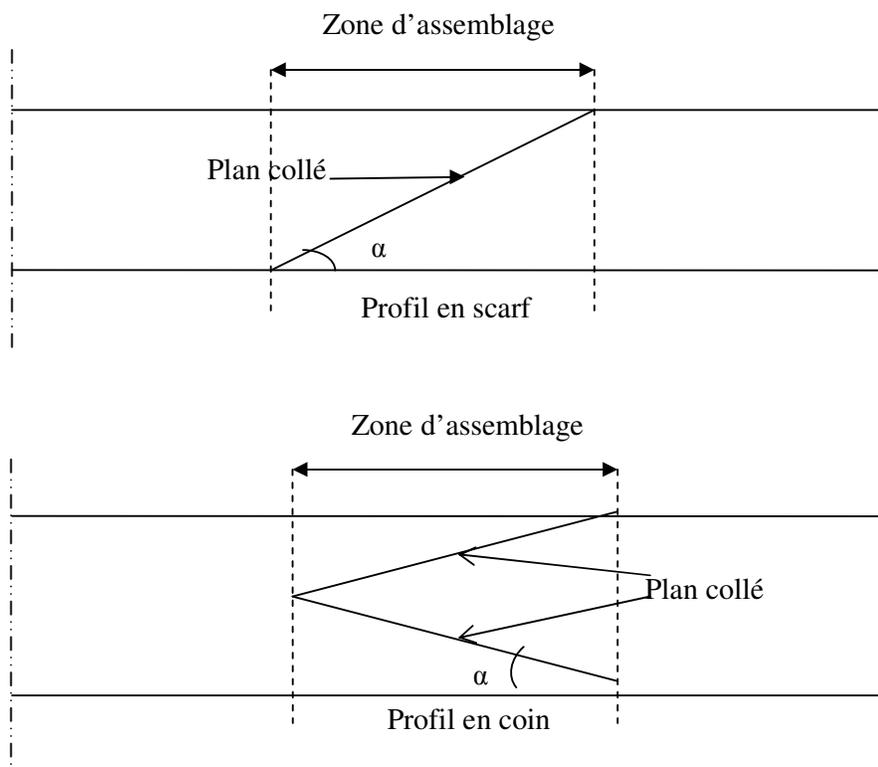


Figure1.23: Bois assemblé en scarf et en profil coin.

III-2-2- Aboutage à entures multiples.

Les nouvelles géométries d'aboutage ont apporté tout d'abord une réduction de la perte de bois dans la longueur des pièces assemblées mais aussi une caractéristique auto serrante à l'assemblage. Par la suite, on a constaté que plus on multiplie le nombre d'entures, plus on diminue la perte de bois, on améliore la caractéristique auto serrante de l'assemblage.

[44] Selbo a réalisé une étude complète sur l'enture en faisant varier les paramètres suivants: le pas, l'angle, l'épaisseur de l'extrémité de l'enture et le bois. Il est l'un des premiers à avoir élaboré des abaques sur l'enture. Depuis, l'aboutage par entures n'a cessé d'être perfectionné grâce à la mise au point des outils d'usinage d'entures très performants.

Cependant, les aboutages à entures multiples exigent un soin particulièrement rigoureux au moment de l'usinage des entures. On doit également veiller à ce que le temps d'attente entre l'usinage et l'encollage soit le plus court possible de manière à éviter les problèmes de déformations géométriques des entures à cause de l'humidité.

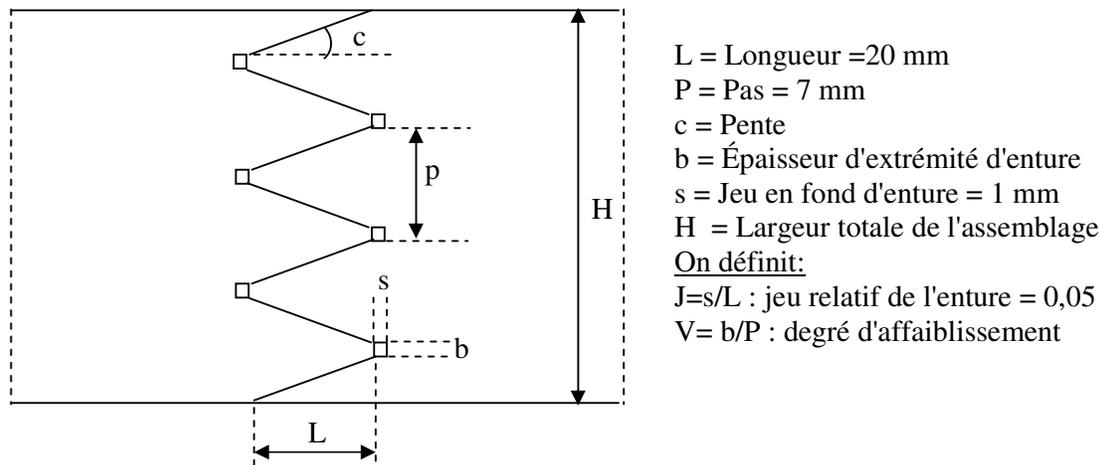


Figure 1.24: Bois assemblé en entures multiples.

III-2-3- Bois lamellé collé.

Le bois lamellé collé est un matériau de structure qui a permis d'élargir les usages traditionnels du bois. La raison essentielle est que les procédés de fabrication associés aux procédures de contrôle de qualité lui procurent des performances supérieures à celles du bois massif le constituant. En raison de la fabrication des lamelles continues aboutées, des poutres de section et de longueur infinies sont théoriquement possibles. Il est couramment produit des pièces d'une hauteur de 2 mètres ou 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. Des éléments à inertie variable peuvent également être produits.

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, pour les bois de basse qualité, par une plus grande résistance.

Les étapes de la fabrication sont les suivantes:

- Choix des planches à humidité stabilisée entre 12 et 18%, exemptes de défauts rédhibitoires 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;
- Rabotage de ces éléments;
- Encollage des faces;
- Mise sous pression de l'assemblage et maintien.

Les poutres peuvent être renforcées aux moyens d'éléments métalliques noyés dans la masse ou rapportés à l'extérieur, ou à l'aide de tissus de fibres utilisées dans la fabrication des matériaux composites, fixés par collage ou dans les joints de colle interplis [45].

Dans le projet de norme prEN 1194 [1995], les classes de résistance pour le bois lamellé collé sont définies tableau 1.5. La qualité des planches de bois nécessaire au respect des propriétés requises pour le bois lamellé collé est également notée. Les propriétés mécaniques des lamelles ont été calculées conformément à EN 384 et EN 408.

Tableau 1.5: Classe de résistance du bois lamellé collé selon le projet de norme prEN 1194 [46].

Classes de résistance	GL18	GL20	GL22	GL24	GL26	GL28	GL30	GL32	GL34	GL36
$f_{m,g,k}$ (MPa)	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36
$f_{t,0,g,k}$ (MPa)	12	14,5	15,5	17	18	19,5	20,5	22	23,5	26,5
$f_{c,0,g,k}$ (MPa)	21	22	23,5	26	27	28	29	30,5	31,5	32
$f_{v,g,k}$ (MPa)	1,8	1,8	1,9	2,1	2,5	2,5	2,6	2,9	3,2	3,5
$E_{0,moy,g}$ (MPa)	7900	8900	9900	10800	11700	12500	12500	13300	13600	14000
$G_{0,moy,g}$ (MPa)	490	550	620	670	730	780	780	830	850	870
$\rho_{g,k}$ (Kg/m ³)	320	330	350	360	380	400	400	430	430	450

Avec

$f_{m,g,k}$: résistance en flexion;

$f_{t,0,g,k}$: résistance en traction en parallèle au fil;

$f_{c,0,g,k}$: résistance en compression parallèle au fil;

$f_{v,g,k}$: résistance au cisaillement;

$E_{0,moy,g}$: module d'élasticité moyen;

$G_{0,moy,g}$: module de cisaillement moyen;

$\rho_{g,k}$: masse volumique;

k : indice représentant la caractéristique à 5% d'exclusion inférieure.

III-3- Composite à base de bois.

L'incidence d'un environnement dégradant sur les assemblages de bois prend des formes diverses liées aux comportements intrinsèques du substrat et de la colle ainsi que des principes favorisant les phénomènes de l'adhésion.

On peut dissocier les types de vieillissement des collages de bois selon les manifestations mécaniques de dommage (fissurations) et les altérations d'ordre physico-chimique (endommagement).

III-3-1- Le dommage mécanique.

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 [47]:

- 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) [48] suggère d'intervenir dans la disposition des lamelles au sein de la structure selon la figure 1.25.

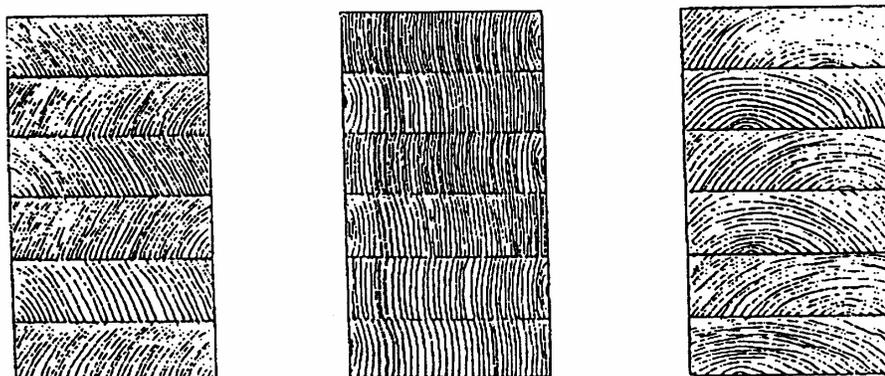


Figure 1.25: Agencement idéal de lamelles de bois dans la section des poutres lamellées collées.

III-3-2- Les altérations d'ordre physico-chimique.

Là encore, il faudra séparer les types d'agression physico-chimiques en fonction des zones et des éléments intervenant dans le collage:

- Le substrat (bois);
- L'interface;
- Le polymère.

III-3-2-1- Altération du bois.

Le bois est une matière organique naturellement sensible aux formes d'agressions chimiques liées à la présence de l'eau. Il est à long terme vulnérable aux attaques de types organiques (champignons, pourritures).

Elles n'apparaissent cependant qu'à des taux d'humidité supérieurs 20%, de façon aléatoire, et n'entrent pas dans le cadre des agressions de type physico-chimique.

Une immersion prolongée dans l'eau même à température élevée ne semble pas altérer la texture du bois. Cela malgré une absorption massive, excédant largement le taux à l'état de bois vert.

III-3-2-2- Altération des liaisons interfaciales.

Les interfaces collées sont des zones singulières qui favorisent l'accumulation et la progression de l'humidité. La présence d'eau entraîne localement des transformations physico-chimiques importantes [49]. Les contacts physiques sont le fait de la mouillabilité et de phénomènes thermodynamiques associés qui interviennent lors de l'encollage et de la phase de polymérisation.

Des modifications des paramètres de collage tels que la pression de serrage, dosage, mélange initial, ont des incidences sur la résistance immédiate des assemblages et aussi sur leur comportement au vieillissement.

La dégradation de la force d'adhésion ne peut trouver son explication qu'au travers de la connaissance des principes d'adhésion qui interviennent dans le collage du bois.

III-3-2-3- Altération du polymère.

Troughton [50] a tenté de caractériser le type d'évolution qui gouverne la décomposition des collages à base de résine au formol en effectuant un bilan chimique (contrôle des substances volatiles dégagées) lors d'un vieillissement dans une solution acide. Il observe principalement une réaction d'hydrolyse du polymère. Elle obéit à une loi d'activation thermique. Il soupçonne l'existence de réactions chimiques du second ordre liées à la destruction des liaisons interfaciales (adhésive).

IV- PRÉSENTATION DES DIFFÉRENTS MODÈLES MÉCANIQUES UTILISÉS POUR PRÉVOIR LA RUPTURE DES ASSEMBLAGES COLLÉS.

De nombreux modèles de la littérature ont été développés pour tenter de prévoir la fissuration et la rupture des assemblages collés. Ces modèles peuvent être classés selon deux grandes familles:

- ceux issus de la mécanique linéaire de la rupture;
- ceux qui considèrent une zone cohésive.

Nous présenterons ici les principaux modèles développés pour les matériaux homogènes ou bi-composants, en prenant soin de dégager leurs avantages et leurs inconvénients.

IV-1- La mécanique linéaire de la rupture.

La mécanique linéaire de la rupture sert aujourd'hui de cadre à la plupart des simulations numériques. En général, les solides fissurés sont considérés comme des matériaux idéalement élastiques. Lorsqu'ils sont soumis à un chargement monotone, la propagation des fissures est supposée intervenir de manière quasi-statique [51]. On présentera dans un premier temps la description du problème par une approche en contraintes, puis par une approche énergétique et on établira un parallèle entre les deux méthodes.

IV-1-1- La fissuration des matériaux homogènes.

IV-1-1-1- Approche en contraintes.

Après les travaux fondateurs de **Griffith** [52], **Williams** établit en 1957 [53] l'expression du champ des contraintes en tête de fissure pour un matériau parfaitement élastique soumis à un chargement statique, en petites déformations. Pour un problème à deux dimensions, cette expression s'écrit:

$$\sigma(r, \theta) = \frac{K_a}{\sqrt{r}} f_a(\theta) + j_a(r, \theta) \quad (\text{A.13})$$

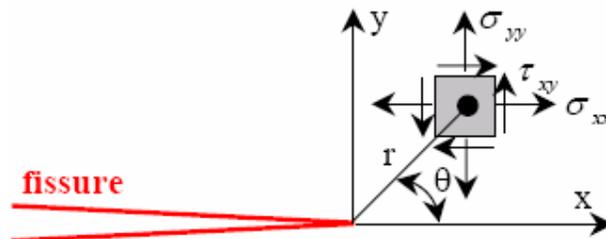


Figure 1.26: Définition des paramètres pour le calcul de K.

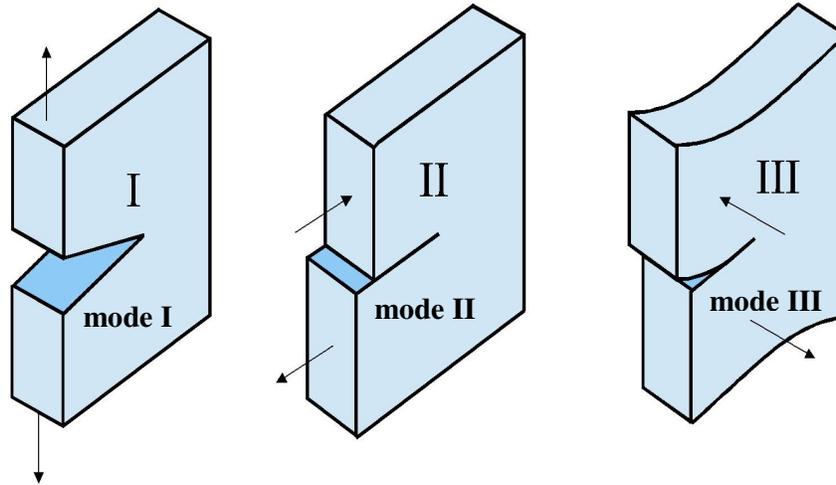


Figure 1.27: Définition des modes de sollicitation.

Avec: $\alpha=I, II$ ou III (traction normale, cisaillement plan et cisaillement anti-plan)
 Où: $\sigma(r, \theta)$ est la contrainte en un point du solide repéré par ses coordonnées polaires par rapport à la pointe de la fissure,
 K_α est un facteur d'intensité de contrainte dépendant du chargement et de la géométrie du matériau,
 $j_\alpha(r, \theta)$ est une fonction qui reste bornée quand r tend vers zéro et enfin $f_\alpha(\theta)$ est une fonction d'angle.

Cette formulation est valable quels que soient le chargement, la géométrie du problème ou encore le mode de propagation de la fissure. Pour un solide élastique homogène isotrope fissuré sur une longueur $2a$ et soumis à une traction normale σ_∞ à l'infini:

$$K_I = \sigma_\infty \sqrt{\pi \cdot a} \tag{A.14}$$

À partir de ce résultat, **Irwin [54]** suppose que la fissure se propage lorsque le facteur d'intensité de contrainte K_α dépasse une valeur critique $K_{\alpha c}$, d'où le critère de rupture suivant:

$$\text{Critère d'Irwin: } \begin{cases} K_\alpha < K_{\alpha c} \Rightarrow \Delta a = 0 \\ K_\alpha = K_{\alpha c} \Rightarrow \Delta a > 0 \end{cases} \quad \text{pour } \alpha = I, II \text{ ou } III$$

L'élasticité linéaire conduit donc à la divergence des contraintes en pointe de fissure. Or, du point de vue de la physique, les contraintes sont finies en tout point du solide. Cet inconvénient de l'approche locale peut être contourné en utilisant une approche énergétique globale.

IV-1-1-2- Approche énergétique.

En observant que l'énergie potentielle macroscopique du système varie avec la surface fissurée, Griffith décide d'introduire une énergie potentielle mécanique supplémentaire P qui traduit l'énergie de surface créée par l'avancement de la fissure. Il obtient ainsi un système conservatif, dont il pourra minimiser l'énergie totale E .

$$E(S) = P(S) + 2.S.\gamma \quad \text{ouverture de la fissure } dS \rightarrow E(S+dS) = P(S+dS) + 2.S.\gamma + 2.dS.\gamma$$

où: γ est l'énergie spécifique de surface créée par l'avancée de la fissure.

Sachant que le système cherche à minimiser son énergie, on aura $E(S+dS) \leq E(S)$. Si on définit un taux de restitution d'énergie G de la façon suivante:

$$G = -\frac{dP}{dS} \tag{A.15}$$

Alors, on peut en déduire un critère énergétique de propagation de la fissure:

$$\text{Critère de Griffith: } \begin{cases} G < 2.\gamma \Rightarrow \Delta a = 0 \\ G \geq 2.\gamma \Rightarrow \Delta a > 0 \end{cases}$$

Ce critère permet ainsi d'éviter les singularités de contraintes à la pointe de la fissure. Cependant, le phénomène de fissuration a été traité comme un processus réversible. Une résolution thermodynamique complète du problème, tenant compte de l'entropie, permet de transposer le taux de restitution de l'énergie à une description plus réaliste de la propagation de la fissure.

IV-1-1-3- Approche thermodynamique.

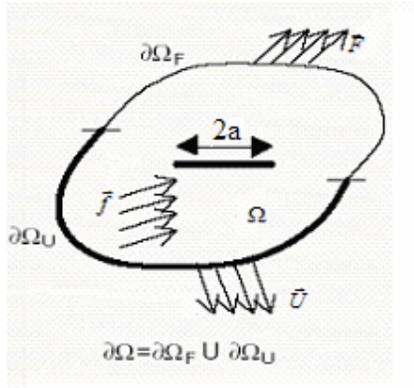
D'après le premier principe de la thermodynamique, en notant E l'énergie interne du système, C l'énergie cinétique, P_e la puissance des efforts extérieurs et P_{cal} la puissance calorifique échangée avec l'extérieur:

$$\frac{d}{dt}(E + C) = P_e + P_{cal} \tag{A.16}$$

Dans le cas d'un solide fissuré, il existe une singularité à la pointe de la fissure qui ne permet pas d'intégrer directement la dérivée de l'énergie du système. Une solution consiste à exclure une boule centrée sur la pointe de la fissure, dont on fait ensuite tendre le rayon vers zéro. On obtient le résultat suivant:

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \int_{\partial B_\epsilon} \underline{q}_0 \cdot \underline{n}_0 \cdot dS_0 = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \left\{ \int_{\partial B_\epsilon} (\rho_0 \cdot (e + c) \cdot \underline{n}_0 - \underline{t} \underline{n}_0 \cdot \underline{B} \cdot \underline{\nabla} \underline{u}) dS_0 \right\} \cdot a \tag{A.17}$$

où: B_ϵ est la boule centrée sur la pointe de la fissure et de rayon ϵ , dont une normale sortante est \underline{n} ;
 a est la longueur de la fissure;
 ρ est la masse volumique du matériau;
 e et c sont les quantités volumiques correspondant à E , l'énergie interne et C , l'énergie cinétique;
 \underline{q} est un flux sortant de chaleur sur la surface;
 $\underline{\underline{B}}$ est le tenseur de Boussinesq et \underline{u} est le déplacement;
 avec l'indice zéro qui indique que l'on considère ces différentes grandeurs dans la configuration de référence.



$\partial\Omega$: frontière solide
 $\partial\Omega_F$: partie de la frontière $\partial\Omega$ soumise à des efforts \vec{F}
 $\partial\Omega_U$: partie de la frontière $\partial\Omega$ soumise à des déplacements imposés \vec{U}
 \vec{f} : champ de forces volumiques
 a : longueur de la fissure
 ρ : masse volumique du solide
 $e(\epsilon)$: densité d'énergie élastique

Figure 1.28: Notations pour l'analyse thermodynamique de la fissuration.

Pour faire apparaître l'entropie s et la dissipation intrinsèque totale du système D , on applique le second principe de la thermodynamique, en excluant de même la pointe de la fissure:

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \left[\int_{\partial B_\epsilon} p_s \cdot d\Omega_0 + \int_{\partial B_\epsilon} \left(\frac{q_0 \cdot \underline{n}_0}{T} - \rho_0 \cdot s \cdot a \cdot \underline{n}_0 \right) \cdot dS_0 \right] = 0 \quad (A.18)$$

où: p_s est la production d'entropie volumique;
 s l'entropie volumique;
 et T est la température absolue.

Si on suppose que la température reste bornée:

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \left[\int_{\partial B_\epsilon} T \cdot p_s \cdot d\Omega_0 + \int_{\partial B_\epsilon} (q_0 \cdot \underline{n}_0 - \rho_0 \cdot T \cdot s \cdot a \cdot \underline{n}_0) \cdot dS_0 \right] = 0 \quad (A.19)$$

La dissipation est concentrée en pointe de fissure et s'exprime de la façon suivante:

$$D(a) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left[\int_{\partial B_\varepsilon} T.p_s . d\Omega_0 \right] = 0 \quad (A.20)$$

D'où en combinant le premier et le second principes de la thermodynamique, on en déduit que:

$$D(a) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left\{ \int_{\partial B_\varepsilon} (\rho_0 . (e - s.T + c) . \underline{n}_0 - \underline{t} n_0 . \underline{t} \underline{B} . \underline{\nabla} \underline{u}) dS_0 \right\} . a \quad (A.21)$$

On définit l'énergie libre interne du système par: $\psi = e - T.s$. Ce qui nous permis de définir le taux de restitution de l'énergie à la pointe de la fissure G:

$$G = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left\{ \int_{\partial B_\varepsilon} (\rho_0 . (\psi + c) . \underline{n}_0 - \underline{t} n_0 . \underline{t} \underline{B} . \underline{\nabla} \underline{u}) dS_0 \right\} \quad (A.22)$$

$$D(a) = G . a \quad (A.23)$$

G est positif et dépend de la longueur de la fissure. Il peut être considéré comme la force motrice de l'ouverture de la fissure. On peut alors utiliser le critère de propagation de la rupture fragile suivant:

$$\begin{cases} G < G_c \Rightarrow \Delta a = 0 \\ G = G_c \Rightarrow \Delta a \geq 0 \end{cases}$$

où: G_c est le taux critique de restitution de l'énergie, qui peut être définie comme la somme des énergies de surface et des énergies dissipées pendant la fissuration (plasticité, frottement). On a donc obtenu une égalité $G = G_c$, au lieu des inégalités figurant dans les critères précédents.

IV-1-1-4- Lien entre l'approche en contraintes et l'approche énergétique.

Ces deux approches sont reliées en calculant le travail effectué pour ouvrir la fissure d'une longueur (da) en mode I, dans le cas où la zone de cohésion (zone où les forces d'interaction interviennent) est négligeable par rapport à la longueur de la fissure. Ainsi, dans le cadre de la mécanique linéaire de la rupture, on pourra appliquer la formule d'**Irwin** [55], qui exprime le taux de restitution de l'énergie G en fonction du facteur d'intensité de contrainte K_I :

$$\text{Formule d'Irwin: } G = \frac{1}{2\mu} [(1 - \nu^*)(K_I^2 + K_{II}^2) + K_{III}^2] \quad (\text{A.24})$$

$$\text{En déformation planes } \nu^* = \nu \text{ et } G = \frac{1}{E} [(1 - \nu^2)(K_I^2 + K_{II}^2) + (1 + \nu)K_{III}^2] \quad (\text{A.25})$$

$$\text{En contrainte planes } \nu^* = \frac{\nu}{1 + \nu} \text{ et } G = \frac{1}{E} [(K_I^2 + K_{II}^2) + (1 + \nu)K_{III}^2] \quad (\text{A.26})$$

Pour un matériau orthotrope (bois), la relation entre le taux de restitution d'énergie (ténacité) G_I et le facteur d'intensité de contrainte K_I en mode I est donnée par (Annexe A):

$$G_I = -\frac{1}{2} \text{Im} d_{22} \left[\frac{\mu_1 + \mu_2}{\mu_1 \mu_2} \right] K_I^2 \quad (\text{A.27})$$

μ_1 et μ_2 sont les racines de l'équation:

$$d_{11}\mu^4 - 2d_{16}\mu^3 + (2d_{16} + d_{66})\mu^2 - 2d_{26}\mu + d_{22} = 0 \quad (\text{A.28})$$

d_{ij} : complaisances élastiques apparentes ($i, j = 1, 2, \dots, 6$)

$$d_{ij} = S_{ij} - \xi \frac{S_{i3}S_{j3}}{S_{33}} \quad (\text{A.29})$$

S_{ij} : complaisances élastiques, lorsqu'on est dans un état de déformation planes $\xi = 1$ et dans un état de contrainte planes $\xi = 0$.

Im est la partie imaginaire de [].

De plus, le taux de restitution de l'énergie G peut être calculé à partir de l'intégrale de **Rice** [56], notée J .

$$J = \int_{\Gamma} (w dy - T_i \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \cdot ds) \quad (\text{A.30})$$

Où Γ est un contour d'intégration entourant l'extrémité de la fissure (figure 1.29), ds l'élément de longueur sur Γ , T_i et u_i les composantes du vecteur contrainte et du vecteur déplacement en un point de Γ . La densité d'énergie de déformation w est définie quant à elle par:

$$w = \int_0^{\epsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (\text{A.31})$$

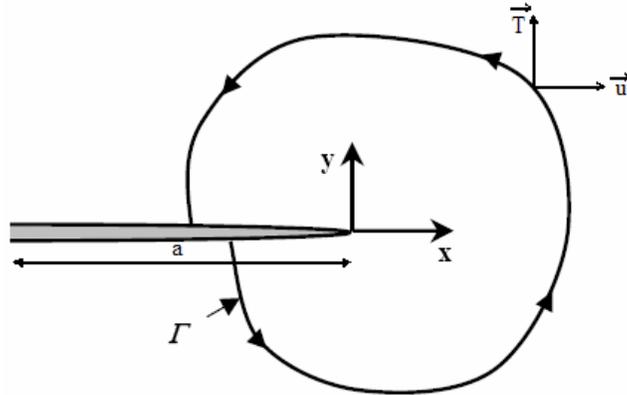


Figure 1.29: Contour arbitraire autour de l'extrémité d'une fissure.

Alors, pour une fissure se propageant rectilignement dans la direction de x , cette relation devient:

$$G=J \quad (A.32)$$

IV-1-2- La mécanique de la rupture interfaciale.

Puisque nous allons par la suite nous intéresser à la propagation des fissures dans les assemblages collés, il est nécessaire d'étudier les développements de ces approches dans le cas d'une propagation de fissure à l'interface entre deux matériaux.

IV-1-2-1- Approche en contraintes.

D'après les travaux de Williams [57], England [58] puis Erdogan [59], il existe un cisaillement interfacial au niveau de la fissure entre les deux matériaux, qui rend impossible toute distinction entre les modes I et II de fissuration. La singularité en pointe de fissure s'exprime alors sous la forme suivante:

$$\sigma(r, \theta) = K.f(\theta).r^{-\lambda} \quad (A.33)$$

où: K est un facteur d'intensité de contrainte complexe, liant les effets de tension et de cisaillement en tête de fissure,

r et θ représentent les coordonnées polaires;

$f(\theta)$ est une fonction d'angle;

λ est l'ordre complexe de la singularité défini par la relation suivante:

$$\lambda = -\frac{1}{2} \pm i.\xi \quad \text{avec } \xi \text{ une constante dépendant des matériaux à l'interface.}$$

Le saut de déplacement entre les lèvres de la fissure qui peut alors être calculé présente une fréquence d'oscillations de plus en plus élevée au fur et à mesure qu'on approche de la pointe de la fissure, la partie imaginaire pouvant même devenir négative. Cette zone d'interpénétration des lèvres de la fissure est une zone de contact.

On peut remarquer que lorsque le paramètre ξ caractérisant les matériaux est petit, la valeur du champ des contraintes se rapproche de celui d'une fissure sollicitée selon les modes I et II plus classiques: $K_I + iK_{II}$, au-delà d'une valeur arbitraire de r .

IV-1-2-2- Approche énergétique.

Ici aussi, l'expression du taux de restitution de l'énergie G sera plus complexe [60] et il sera impossible de définir séparément les contributions des modes I et II: G_I et G_{II} . On peut cependant remarquer la dépendance de G avec l'angle de mixité modale, rendant l'écriture d'un critère de propagation de la rupture difficile puisque G sera fonction de l'avancée de la fissure.

$$G = \frac{\frac{1 + a_1(\nu)}{\mu_1} + \frac{1 + a_2(\nu)}{\mu_2}}{16 \cdot \cosh^2(\pi \xi)} \cdot K \cdot \bar{K} \quad (A.34)$$

Où: les paramètres a_i sont des constantes fonction du coefficient de Poisson et de l'hypothèse de travail (contraintes planes/déformations planes).

μ_i : module de cisaillement.

IV-1-3- Limitations de la mécanique linéaire de la rupture.

Si la mécanique linéaire de la rupture permet de résoudre efficacement les problèmes de propagation quasi-statique des fissures dans les matériaux élastiques homogènes isotropes, des situations plus complexes telles que les problèmes dynamiques, dissipatifs ou en milieux hétérogènes font apparaître ses faiblesses. Nous expliciterons donc les limitations rencontrées par la mécanique linéaire de la rupture, ainsi que les développements mis en place pour pallier ses faiblesses.

Les critères de Griffith sont des critères de propagation et non pas d'amorçage de la fissure. La mécanique linéaire de la rupture ne peut donc pas décrire le début de la fissuration dans le matériau, mais seulement l'évolution d'une fissure préexistante.

Pour contourner cette difficulté, diverses tentatives ont été proposées:

- définir des taux d'amorçage de fissure, basés sur l'énergie potentielle [61] ou obtenus en remplaçant le critère différentiel par un critère incrémental [62];
- se placer dans le cadre d'un problème de minimisation de l'énergie [63] et trouver l'état de fissuration qui minimise l'énergie de la structure, avec toutefois un coût numérique très important à prévoir;
- se placer en mécanique de la rupture ductile en étudiant les mécanismes physiques locaux conduisant à la fissuration, ce qui permet de travailler avec des lois de comportement plutôt que des critères de propagation [64], dans le cas de la fissuration des métaux);

- se tourner vers la mécanique de l'endommagement en introduisant la thermodynamique des processus irréversibles et en définissant une variable interne supplémentaire: l'endommagement du matériau [65]. C'est une approche efficace mais les grandeurs introduites sont difficiles à interpréter physiquement et la notion de surface de rupture disparaît.

IV-1-3-1- Évolution temporelle des trajets de fissuration:

L'évolution temporelle des trajets de fissuration soulève le problème de la propagation instable des fissures, des bifurcations et post-bifurcations. L'analyse de la dérivée seconde de l'énergie potentielle permet cependant de donner des conditions nécessaires de stabilité, en se basant sur la convexité stricte de l'énergie élastique.

IV-1-3-2- Évolution spatiale du trajet de fissuration.

Le critère de Griffith permet de déterminer la longueur de propagation de la fissure, mais pas la direction dans laquelle elle va se propager: l'évolution spatiale du trajet de fissuration reste donc indéterminée. On peut alors avoir recours à des critères de branchement, mais les mises en œuvre numériques restent très rares dans la littérature.

Les bords de la fissure créée sont considérés comme des bords libres.

Cependant, ceci n'est pas vrai dans la plupart des cas: on peut avoir des conditions de contact unilatéral, des effets de frottement ou encore une zone d'interpénétration des lèvres de la fissure. Il peut alors être intéressant de considérer des forces de résistance supplémentaires à l'interface au niveau de la zone de formation de la fissure: c'est ce que font les modèles de zone cohésive.

IV-2- Mode de rupture du matériau bois collé.

Deux types de ruptures peuvent apparaître:

- La rupture adhésive qui s'amorce à l'interface colle-bois;
- La rupture cohésive qui s'amorce à partir d'un défaut du type bulle ou microfissure dans le joint de colle lui-même.

IV-2-1- Paramètres influençant la ténacité [66].

Plusieurs auteurs ont publié des résultats montrant l'influence de quelques paramètres sur la ténacité des joints collés. Nous citons certains de ces paramètres.

IV-2-1-1- Influence du couple bois colle.

Takatani, Hamada et Sasaki [67] ont montré que la ténacité des assemblages collés, pour un type de colle et une épaisseur du joint de colle donnée, dépend des propriétés mécaniques et chimiques des substrats. Ces auteurs ont mis en évidence l'influence de l'essence (Hêtre et Epicéa) sur la ténacité d'un assemblage collé.

IV-2-1-2- Influence de l'état de surface.

L'influence de l'état de surface peut-être d'origine mécanique ou chimique.

IV-2-1-2-1- Influence mécanique.

Frühwald [68] a constaté que la ténacité diminue dans le cas des poutres lamellées collées rabotées avec des lames usées à la place de lames neuves. Il a montré que cette diminution était due à l'écrasement de la structure cellulaire du bois, ayant pour conséquence une adhérence insuffisante de la colle et surtout des ruptures par compression où par écrasement des faces à encoller. Il en conclut que l'état des cellules à l'interface a une influence sur la nature de la rupture qui peut-être soit cohésive soit adhésive.

Koutsky [69] a de son côté établi une relation entre la ténacité d'un assemblage en bois collé et la rugosité des faces à coller. Il a montré que la ténacité d'un assemblage poncé à la machine est plus faible que celle obtenue sur un assemblage similaire dont le ponçage a été réalisé manuellement voir figure 1.30. Cela est dû sans doute à l'effort exercé par la machine (par les rouleaux d'entraînement) occasionnant bien entendu un écrasement de la structure cellulaire du bois.

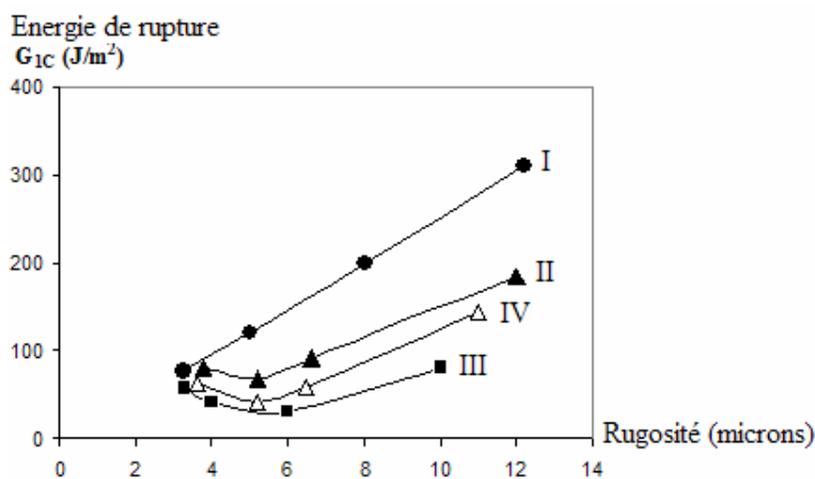


Figure 1.30: Influence mécanique sur la ténacité [69].

- I: la valeur la plus élevée est obtenue par un ponçage à la main;
- II-IV: sont des énergies de rupture de surfaces poncées à la machine dans le sens perpendiculaire de la propagation de la fissure;
- III: ponçage parallèle au sens de la propagation de la fissure.

IV-2-1-2-2- Influence chimique.

Koutsky [69] a montré l'importance de l'état chimique de la surface. Il s'avère que l'inactivation chimique du bois par carbonisation de la surface (four à 250°C) se traduit par une diminution sensible de la résistance.

IV-2-1-3- Influence de l'humidité.

Une évaluation réalisée par **Koutsky [69]** montre que la ténacité des assemblages collés diminue avec le taux d'humidité voir figure 1.31. Ce comportement est similaire à celui du bois massif.

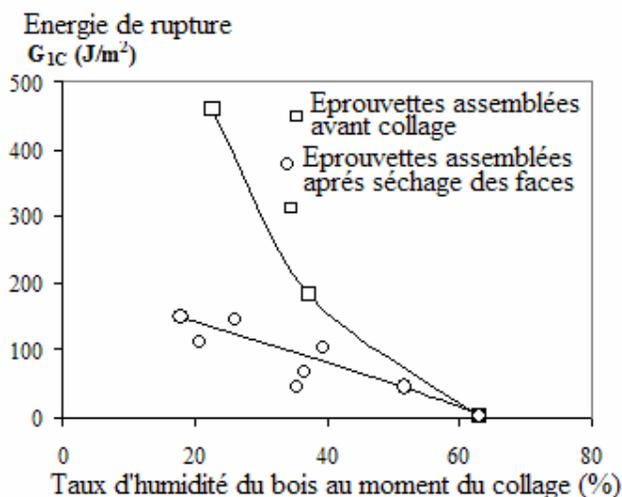


Figure 1.31: Influence du taux d'humidité sur la ténacité des joints de colle de résorcine phénolique [69].

IV-2-1-4- Influence de l'élasticité de la colle et de l'épaisseur du joint.

Takatani, Hamada, Sasaki [67] et **Haller [66]** ont mis en évidence l'influence du module de Young de la colle sur le comportement à la rupture. Pour ceci la rigidité d'une résine-époxy a été modifiée en y ajoutant une charge assouplissante (polysulfide).

Tableau1.6: Variation du taux de restitution d'énergie G_{1C} en fonction de l'épaisseur du joint de colle et du pourcentage d'assouplissement.

Adhésif	Epaisseur (mm)	Hinoki (G_{1C} (J/m ²))	Hêtre (G_{1C} (J/m ²))
E.P.0	0,1	150	210
	1,5	280	350
E.P.20	0,1	230	290
	1,5	540	470
E.P.40	0,1	380	490
	1,5	960	840
E.P.60	0,1	270	480
	1,5	810	1150

Le gain de la ténacité est particulièrement important pour les adhésifs ayant le module de Young le plus faible, ainsi que pour les joints de colle épais.

D'une manière générale, la ténacité d'un assemblage collé est déterminée par deux effets antagonistes.

- L'augmentation de la rigidité de la colle (effet positif);
- La diminution de la résistance cohésive de l'adhésif (effet négatif).

Les calculs numériques des contraintes dans un joint de colle montrent que les contraintes maximales dans le joint de colle sont d'autant plus faibles que son module de Young est petit [70].

IV-2-2- Autres critères de ruptures utilisés pour la modélisation des assemblages collés.

La modélisation de la rupture d'un assemblage collé utilise un critère local de rupture par le biais du facteur d'intensité de contrainte. **Duchanois [70]** a défini un facteur d'intensité de contrainte équivalent pour la distribution des contraintes à la pointe d'un défaut dans le joint de colle d'un assemblage collé.

L'analyse des contraintes en fond de fissure a permis de caractériser un facteur d'intensité de contrainte équivalent k_{1c}^{eq} qui peut être défini [71]:

- Soit à partir de la ténacité G_{1c} de l'assemblage collé

$$G_{1c}^{sys} = S^* (k_{1c}^{eq})^2 \quad (A.35)$$

Où S^* : la rigidité complexe du bois

- Soit à partir du facteur d'intensité de contrainte critique de la colle pure

$$k_{1c}^{eq} = C \left(\frac{E^*}{E} \right)^{\frac{1}{2}} k_{1c}^a \quad (A.36)$$

Où $E^* = 1/S^*$

E : le module de Young de l'adhésif;

C : une constante qui dépend de l'épaisseur de la colle et de la rigidité du bois.

IV-2-3- Détermination de l'énergie d'adhésion et de cohésion d'un joint de colle.

Andrews [72] a étendu sa théorie généralisée de la rupture à l'adhésion. Cette théorie prévoit que la ténacité est une fonction d'énergie élastique W^* , de la longueur du défaut a et d'une fonction de perte Φ_A qui tient compte de la non linéarité de loi de comportement du matériau. Cette ténacité appelée G_c est donnée par:

$$G_c = W^* . a . \Phi_A(W^*, a) \quad (A.37)$$

L'énergie de rupture cohésive et de rupture adhésive est calculée selon deux relations similaires à (IV.25) mais la fonction de perte diffère selon la nature du type de rupture.

- Pour la rupture cohésive:

$$G_c^{CO} = \frac{P_c^2}{E_a \cdot \Phi_A^{CO} \left(\frac{e}{a} \right)} \quad (A.38)$$

- Pour la rupture adhésive:

$$G_c^{AD} = \frac{P_c^2}{E_a \cdot \Phi_A^{AD} \left(\frac{e}{a} \right)} \quad (A.39)$$

Les fonctions de perte Φ_A^{CO} et Φ_A^{AD} sont données par les relations:

$$\Phi_A^{CO} = \left(\frac{1}{1-\nu^2} \right) \cdot \left[\frac{3}{32} \left(\frac{a}{e_c} \right)^2 + \left(\frac{4}{1-\nu \left(\frac{a}{e_c} \right)} + \frac{1}{\pi} \right)^{-1} \right] \quad (A.40)$$

$$\Phi_A^{AD} = \left(\frac{1}{1-\nu^2} \right) \cdot \left[\frac{3}{32} \left(\frac{a}{e_c} \right)^2 + \left(\frac{4}{1-\nu \left(\frac{a}{e_c} \right)} + \frac{2}{\pi} \right)^{-1} \right] \quad (A.41)$$

Où P_c : la pression critique;
 E_a : le module de Young de l'adhésive;
 ν : le coefficient de poisson;
 e_c : l'épaisseur de la colle.

Andrews estime que la comparaison des énergies de rupture permet de prévoir le type de rupture:

- Pour $G_A^{CO} < G_A^{AD}$: la rupture est cohésive.
- Pour $G_A^{CO} = G_A^{AD}$: la rupture est mixte.
- Pour $G_A^{CO} > G_A^{AD}$: la rupture est adhésive.

Haller et al [73] ont montré que le taux d'énergie disponible critique dépendait sensiblement de la nature de la rupture. Ce paramètre est plus grand si la rupture s'effectue dans la colle. Toutefois une rupture totalement cohésive n'est jamais observée, si effectivement la rupture s'amorce dans le joint, elle tend à présenter plus où moins rapidement un caractère adhésif afin de minimiser l'énergie nécessaire à sa propagation.

V – DISCUSSIONS.

Cette revue bibliographique nous a permis de montrer que les arbres sont le siège de contraintes de croissance dues essentiellement au cumul des couches de bois et à la maturation. La libération de ces contraintes de croissance lors de l'abattage et du tronçonnage dévalorise et empêche souvent l'utilisation des bois d'*Eucalyptus grandis* et du chêne vert comme bois d'œuvre.

De nombreux problèmes technologiques sont alors rencontrés durant les phases d'exploitation du bois, tels que principalement l'apparition de fentes à l'abattage ou de déformations au sciage. C'est ce qu'on appelle la "nervosité".

L'objectif visé par cette étude est la mesure des indicateurs des contraintes de croissance (Growth Stress Indicator GSI) au sein de trois arbres par espèce par la méthode du trou unique et la détermination des propriétés technologiques des bois d'*Eucalyptus grandis* et du chêne vert en vue de la valorisation dans l'industrie des lamellés collés.

Nous caractériserons l'aptitude technologique de l'*Eucalyptus grandis* et du chêne vert par un essai mécanique de traction suivant la norme NF B 51- 022 appliquée au bois massif et au bois collé.

A l'aide d'un paramètre intrinsèque du matériau bois, la résistance à la fissuration de ce deux feuillus en bois massif et en bois collé est étudiée sur des éprouvettes DCB afin de pouvoir prédire les caractères déterminants de l'apparition des fentes et appréhender les phénomènes de rupture. On se trouve ici dans le cas d'application de la mécanique de la rupture. Pour finir, on réalisera une comparaison des surfaces et des faciès de rupture de manière à valider les essais de rupture effectués.

*CHAPITRE 2 :
MATÉRIAU VÉGÉTAL ET MÉTHODE*

I- CONTRAINTES DE CROISSANCE, CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET MODULES D'ÉLASTICITÉ DYNAMIQUE DES BOIS D'EUCALYPTUS GRANDIS ET DE CHÊNE VERT.

I-1- ÉCHANTILLONAGE DES ARBRES

Afin d'aborder, d'une manière plus précise, l'étude des caractéristiques dendrométriques, les indicateurs des contraintes de croissance (GSI) et les propriétés physiques et mécaniques des bois d'Eucalyptus grandis et de chêne vert, il faut choisir un nombre d'échantillon représentatif de la population. Le nombre d'arbres à prélever a posé d'énormes problèmes. De ce fait, il a fait l'objet de plusieurs études. Dans notre cas on s'est basé sur les résultats de l'étude de LECLERQ (1979) [74] qui a limité ce choix entre 1 et 5 arbres mais à condition qu'ils soient sains, sans défauts et non fourchus. Le nombre d'échantillon réservé à notre travail est de 3 arbres, lesquels ont fait l'objet d'une description servant à les caractériser d'une manière précise.

I-2- MATÉRIAU VÉGÉTAL

La matière végétale utilisée pour cette étude est constituée de trois arbres d'Eucalyptus grandis provenant de Sidi Yahia du Gharb et trois arbres du chêne vert provenant de Ain Kharzouza de la forêt d'Azrou. Le choix de ces arbres a été effectué sur plusieurs critères à savoir:

- Diamètre supérieur à 30 cm et une hauteur de 1,30 m du sol.
- Une homogénéité le long du tronc.
- Absence de défauts: attaques parasitaire, champignons, pourriture, creux, Tronc bien élancé et ne présente pas des déformations.
- L'arbre présente le minimum de branches pour diminuer le nombre des nœuds.
- Hauteur totale importante.

Sur le tableau 2.1 nous avons reportés les mesures de quelques caractéristiques dendrométriques tels que la hauteur totale (h_t), la circonférence à 1,30m du sol ($C_{1,30}$), l'âge et l'épaisseur de l'écorce (E_e).

Tableau 2.1: Caractéristiques dendrométriques des arbres sur pied.

Espèces	N° Arbres	h_t (m)	$C_{1,30}$ (cm)	E_e (cm)	Age (ans)
Eucalyptus.grandis	1	32,5	135	0,82	≈ 45
	2	37	117	1,01	
	3	40	135	0,84	
chêne vert	1	15,35	130	1,06	≈ 85
	2	17	116	1,46	
	3	17	160,5	1,14	

A la suite du choix des arbres, nous avons marqué sur chaque arbre la direction nord et sud et on a écorcé chaque tronc au niveau 1,30 m afin de mesurer les indicateurs des contraintes de croissance (GSI).

I-3- MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Pour avoir des informations plus précises sur les espèces d'Eucalyptus grandis et de chêne vert, il est nécessaire de les caractériser moyennant des paramètres quantitatifs dendrométriques (tableau 2.1), des indicateurs des contraintes de croissance (GSI) et technologiques (propriétés physiques et mécaniques).

Plusieurs méthodes existent pour estimer les GSI [14, 75], bien qu'aucune norme n'existe encore, les deux méthodes les plus couramment employées sont: la méthode du trou unique (capteur CIRAD) et la méthode du capteur WAP'S. Les comparaisons entre ces deux méthodes donnent des bonnes corrélations sur le hêtre et l'eucalyptus, alors que sur le châtaignier la corrélation est moins satisfaisante [75]. La différence fondamentale entre ces deux méthodes réside au niveau de la profondeur de la mesure: la méthode WAP'S mesure les déformations à la surface du cerne (profondeur 1 à 2 mm), la mesure est donc très locale, alors que la méthode du trou unique étend la mesure sur plusieurs cernes (profondeur 10 à 20 mm).

Fournier et al [76] expriment, "en l'absence de norme établie", la nécessité d'avoir une méthode de référence permettant d'effectuer et de comparer des mesures et affirment de ce fait que le capteur CIRAD "serait l'outil le plus fiable" préconisant ainsi la méthode du trou unique. De plus, si l'on veut s'affranchir des différences qui existent entre le bois initial et le bois final dans le cerne, mieux vaut utiliser cette méthode qui réalise des mesures plus globales.

I-3-1- Indicateurs des Contraintes de Croissance GSI par la méthode du trou unique

Cette caractéristique mécanique intrinsèque du bois permet d'expliquer les efforts internes supportés par le bois des arbres sur pied. Ces contraintes se libèrent lors des opérations de transformation (de l'abattage au conditionnement) avec des effets néfastes: fentes en bout, roulure,etc. (problèmes majeurs chez les Eucalyptus). Afin d'estimer le niveau et le caractère plus au moins équilibré de ces indicateurs des contraintes de croissance en périphérie de l'arbre on utilise la procédure expérimentale du "trou unique" développé au CIRAD Forêt (**Fournier M et al. 1994**) [74], (**Baillères H. 1994**) [77]. Cette méthode consiste à mesurer le déplacement instantané relatif de deux pointes fixées à la surface écorcée de l'arbre, suite au perçage d'un trou entre les deux. Les déplacements résultent de la modification du champ de contraintes provoquée par l'usinage du trou et peuvent donc être reliés aux déformations bloquées dans l'arbre (Figure 2.1)

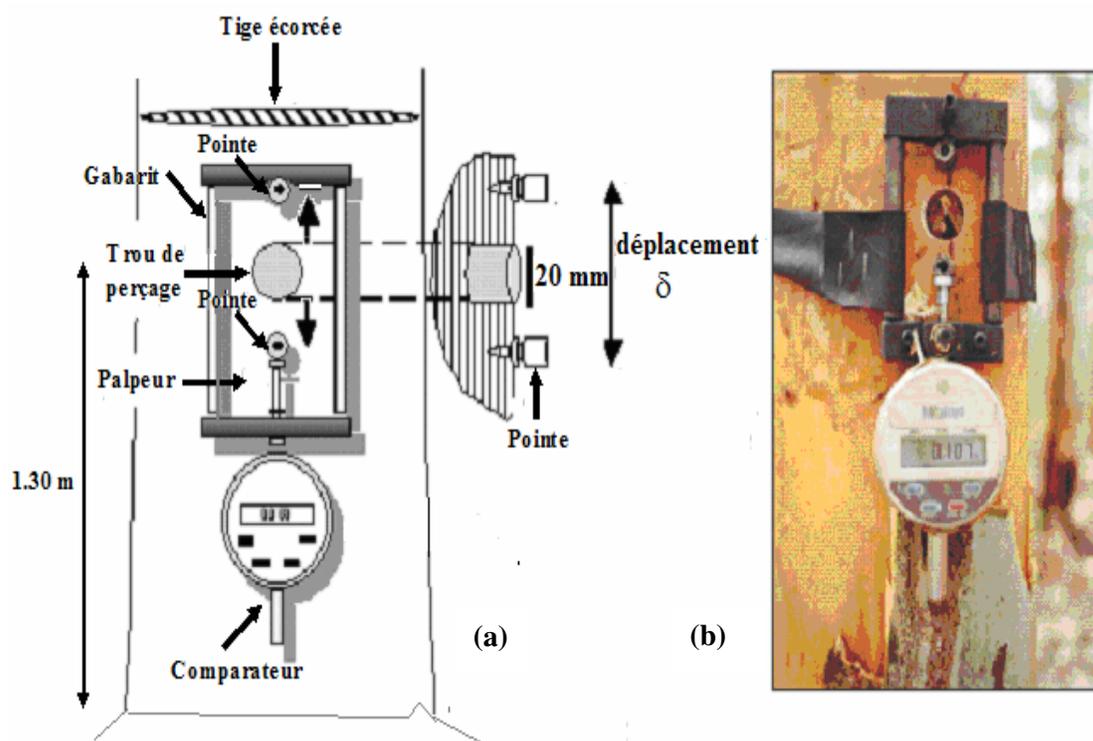


Figure 2.1: Schématisation (a) et photo (b) de la mesure des indicateurs des contraintes de croissance GSI par la méthode du trou unique développée au CIRAD-Forêt, (d'après F. Sassus 1998)[76].

Avant perçage, les deux pointes sont distantes de $D = 45 \text{ mm}$, le trou percé à égale distance de deux pointes a un diamètre de 20 mm . Les deux pointes sont alignées suivant la direction des fibres, car nous nous intéressons aux déformations dans la direction longitudinale. Un gabarit permet de positionner les pointes et de centrer le perçage. Le déplacement relatif δ est donné par un comparateur à lecture digitale avec une sensibilité de l'ordre de micron (marque MITUTOYO ; type Digimatic IDC ; référence 543-170B ; précision $3\mu\text{m}$; capacité 12 mm); la mesure est enregistrée dès que le comparateur indique une valeur stable alors que le forage se poursuit. La stabilisation a lieu pour une profondeur de trou variant entre 10 mm et 20 mm . Le déplacement intègre la tension à la surface du bois enlevé et les caractéristiques du bois restant sur pied [77]. Toutefois ce déplacement obtenu en μm ne correspond pas directement à une déformation. Il est nécessaire, pour le relier à une déformation résiduelle exprimée en μdef (soit 10^{-6} m/m), de le multiplier par un facteur ψ dépendant principalement du diamètre du trou, de la distance entre les deux pointes et des rapports d'anisotropie élastique dans le plan longitudinal-tangentiel (E_T/E_L , G_{TL}/E_L et $1/\nu_{TL}$).

Les calculs menés par (Archer R. R 1986) [14] puis (Baillères H et al.1994) [77] relient la variation de distance δ à l'état de contraintes. En négligeant la contribution de la contrainte tangentielle devant la contrainte longitudinale, ils estiment l'indicateur des contraintes de croissance GSI ε_L^m par : $\varepsilon_L^m = -\Psi_{Th} \delta$

Dans le cas des feuillus standards, la valeur du facteur Ψ_{Th} est de 12,3 [78]. Pour simplifier nous désignerons par la suite par GSI la mesure brute. Généralement, on réalise huit mesures effectuées sur l'arbre sur pied, à une hauteur de 1,30 m du sol et situées sur une couronne à un angle de 45° l'une par rapport à l'autre. Elles sont repérées par: 1, 2, 3,..., 8 en tournant dans le sens d'aiguille d'une montre (figure 2.2):

- la position 1 correspond au Nord
- la position 3 correspond à l'Est
- la position 5 correspond au Sud
- la position 7 correspond à l'Ouest

Sur les trois arbres de chaque espèce (l'Eucalyptus grandis et le chêne vert), la méthodologie a été la même.

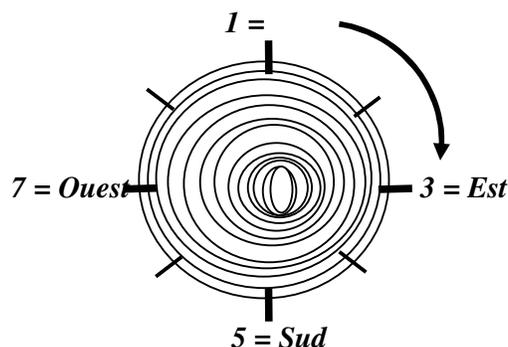


Figure 2.2: Localisation des mesures des GSI.

I-3-2- Position des prélèvements des éprouvettes pour mesure de l'humidité et d'infradensité.

Après la mesure des GSI, on a procédé à l'abattage à l'aide d'une scie, l'ébranchage et le tronçonnage des arbres en grumes. Nous avons noté pour chaque bille leur numéro par rapport à la bille du pied et le numéro de l'arbre. Les billes du pied ont été coupées à une longueur de 2,20 m, les autres sont de longueur variable en marquant pour chaque bille la direction nord et sud. Nous avons appliqué sur chaque bout de la grume un produit anti-fente.

Nous avons prélevé de la première bille de chaque arbre au niveau des mesures des GSI, une rondelle d'épaisseur 2,5 cm mise immédiatement dans un sac plastique hermétique pour déterminer les profils d'humidité et d'infradensité à partir des plateaux diamétraux.

Nous avons transporté les billes vers le Centre Nationale de Recherche Forestière (CNRF) où nous avons effectué une classification des billons et la confection des éprouvettes pour les propriétés physiques et mécaniques.

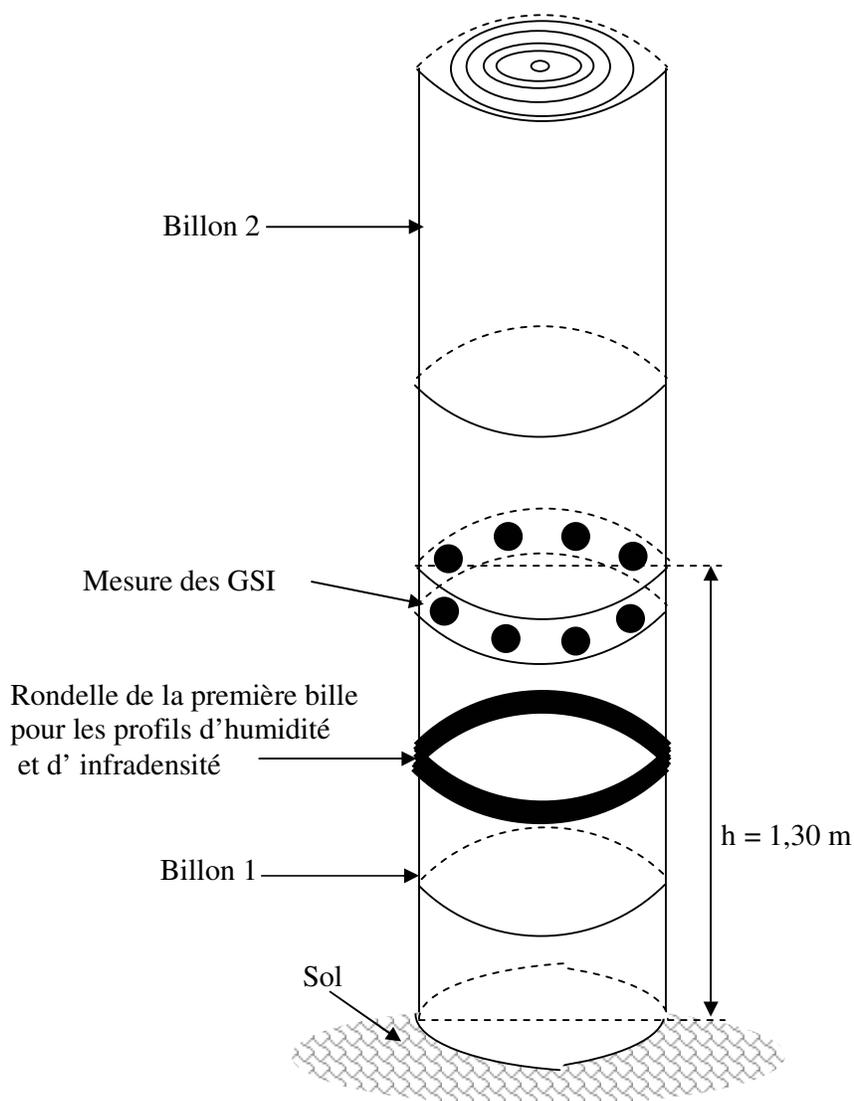


Figure 2.3: Position des différents prélèvement des échantillons dans le tronc.

Sur les rondelles d'épaisseur 2,5 cm, nous avons prélevé à partir du plateau diamétrale Nord-Sud des barrettes radiales à l'aide d'une scie (figure 2.4) et dont l'axe médian passait par la moelle.

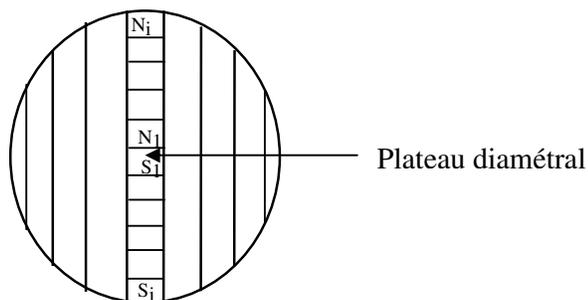


Figure 2.4: Barrette du plateau diamétral pour les profils d'humidité et d'infradensité

Ces barrettes servent à déterminer les profils d'humidité et d'infradensité.

I-3-2-1- Humidité

L'humidité (**H%**) d'un échantillon de bois est la quantité d'eau que renferme le bois considéré, exprimé en pour-cent de sa masse à l'état anhydre et définie par:

$$H = \frac{m_H - m_0}{m_0} \quad (\text{B.3})$$

Avec H: humidité du bois,
 m_H : masse humide,

I-3-2-2- Infradensité (**D_b**).

L'infradensité (**D_b**) exprimée en (g/cm³), est définie par le rapport entre la masse anhydre et le volume saturé de l'échantillon.

$$D_b = \frac{m_0}{V_s} \quad (\text{B.1})$$

Ce paramètre est important à considérer et représente pour chaque échantillon, le rapport de deux valeurs constantes contrairement à la densité, qui varie en fonction du taux d'humidité. La méthode de la poussée d'Archimède, permet de déterminer le volume de l'éprouvette, on pèse les échantillons humides dans l'air puis dans l'eau, on obtient le volume par la formule suivante:

$$V_s = \frac{m_s - m_a}{e} \quad (\text{B.2})$$

où

m_s : masse de l'échantillon dans l'eau (Kg)

m_a : masse de l'échantillon dans l'air (Kg)

e: masse volumique de l'eau

V_s : volume du même échantillon saturé en eau (m³)

Les échantillons sont ensuite séchés en étuve à 103°C ± 2°C pendant 16 heures. Cela jusqu'à l'obtention d'une masse constante puis pesée (m_0) à l'aide d'une balance au 1/1000ème de gramme

I-3-3- Mesures des propriétés physiques et mécaniques de référence.

I-3-3-1- Confection des éprouvettes.

Sur des billons des Eucalyptus grandis et de chêne vert, nous avons effectué un sciage en plot (sciage parallèle). À partir des planches diamétrales, nous avons confectionnés des éprouvettes pour la caractérisation physiques et mécaniques dont le résultat est illustré sur la figure 2.5.

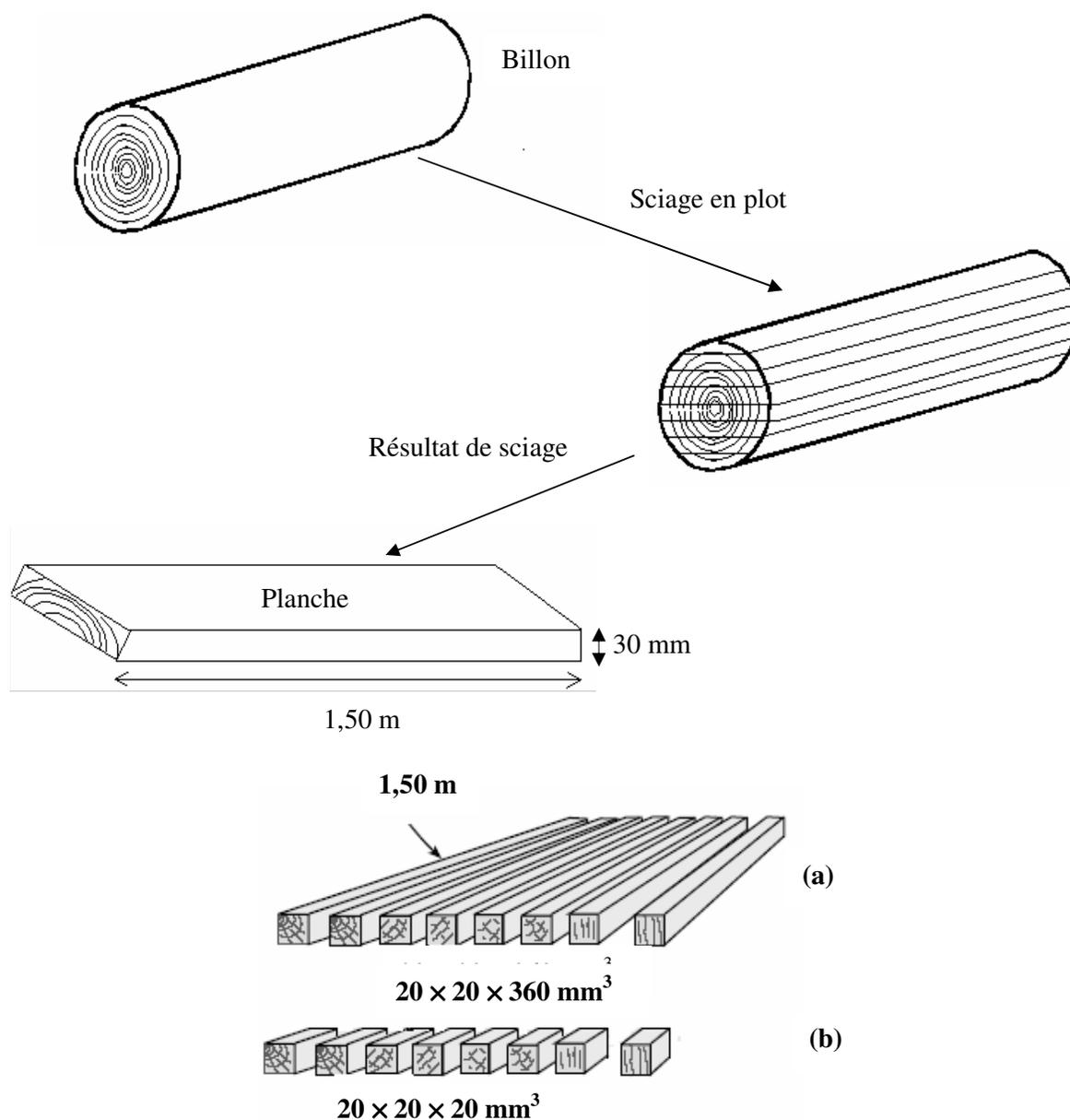


Figure 2.5: Confection du matériau d'essai

Des éprouvettes (figure 2.5a) prélevées ont pour dimensions $20 \times 20 \times 360 \text{ mm}^3$ (RTL) suivant la norme NF B 51- 008 et servent à déterminer les propriétés mécaniques par la méthode vibratoire appelée BING.

Des éprouvettes (figure 2.5b) découpées perpendiculairement aux fibres des planches et prélevées ont pour longueurs, largeurs et épaisseurs $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ (RTL) et servent à déterminer les propriétés physiques de base suivant les normes NF B 51- 004, NF B 51- 005.

I-3-3-2- Méthode de mesure des propriétés physiques de base.

On détermine, par pesée la masse de l'échantillon à l'état h, puis saturé dans l'eau et enfin anhydre après passage à l'étuve. A chaque opération on détermine les dimensions des éprouvettes à l'aide d'un capteur MITUTOYO. On utilise une balance de précision à 0,01 g permettant de peser à 0,5% près et une étuve ventilée permettant de maintenir la température à $103\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$.

I-3-3-2-1- Densité (à l'état h D_h et anhydre D_0).

La densité d'un bois est un paramètre très important qui vise à préciser la quantité massique de matière ligneuse contenue dans le volume du bois donné. Sa facilité de mesure ou d'estimation en fait donc un critère qualitatif de choix. Elle représente une grandeur particulière dans la mesure où le matériau est poreux, hétérogène et hygroscopique. Ce paramètre est déterminé comme le rapport entre la masse pesée et le volume de l'échantillon.

I-3-3-2-2- Retraits (R_r , R_t et R_v).

Le retrait (radial R_r , tangentiel R_t , volumique total R_v) représente la diminution des dimensions du bois suite à la réduction de son humidité sous le point de saturation des fibres. C'est un paramètre important à considérer. Il détermine partiellement la stabilité dimensionnelle des ouvrages en service.

I-3-3-2-3- Anisotropie (A).

L'anisotropie du retrait est exprimée par le rapport du retrait tangentiel au retrait radial. Elle donne une indication de l'importance des déformations qui peuvent apparaître lors du séchage en dessous du point de saturation des fibres.

Les expressions mathématiques permettant de déterminer ces paramètres sont à l'annexe B.

I-3-3-3-Méthode de mesure des propriétés mécaniques par BING.

Les constantes élastiques ont été mesurées sur des éprouvettes de dimension $20 \times 20 \times 360\text{ mm}^3$ (RTL) par la méthode vibratoire appelée « BING » reposant sur l'analyse des fréquences propres de résonance d'une éprouvette en réponse à une sollicitation impulsionnelle appliquée à l'une de ses extrémités (**BORDONNE**) [79]. L'éprouvette est placée sur deux bracelets élastiques de faible rigidité, un choc au niveau d'une des extrémités permet de solliciter les modes de vibration de cette éprouvette. Le signal transmis est enregistré à l'autre extrémité au moyen d'un microphone. Ce signal est traité par une procédure FFT (Fast Fourier Transform). À partir des dimensions géométriques, de la masse à une humidité d'environ 12%, des premiers modes de vibration de l'éprouvette et à l'aide de la théorie de Timoshenko sur les poutres flottantes, le module d'élasticité peut être estimé. La figure 2.6 illustre le schéma du dispositif de BING.

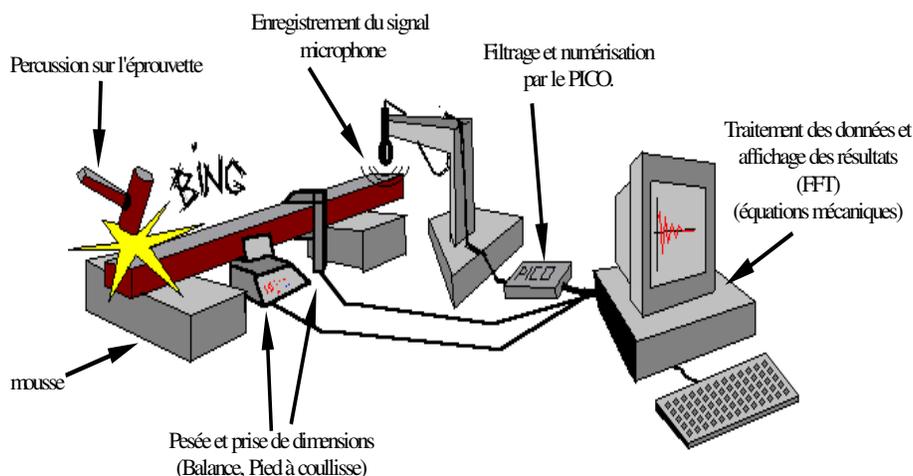


Figure 2.6: Dispositif de BING.

II- COMPORTEMENT MÉCANIQUE PAR TRACTION DU BOIS MASSIF ET DU BOIS COLLÉ BOUT A BOUT ET EN BISEAU D'EUCALYPTUS GRANDIS ET DE CHÊNE VERT.

II-1- Déroulement de l'étude sur les essais de traction.

Nous mettrons en évidence le comportement du bois massif et du joint de colle d'un assemblage bout à bout et en biseau lorsqu'ils sont soumis à un essai de traction. Nous voulons travailler sur les deux extrêmes, le premier assemblage bout à bout est considéré le plus mauvais et le second comme excellent.

Avant d'entreprendre de tels essais, il faut connaître les caractéristiques des différents composants de l'assemblage tels que le bois dans notre cas c'est l'Eucalyptus grandis et le chêne vert et la colle polyuréthane.

Le séchage est réalisé au CNRF à l'aide d'un séchoir traditionnel classique semi-industriel Cathild pour déterminer le taux d'humidité qui est un élément primordial lors de la phase de collage.

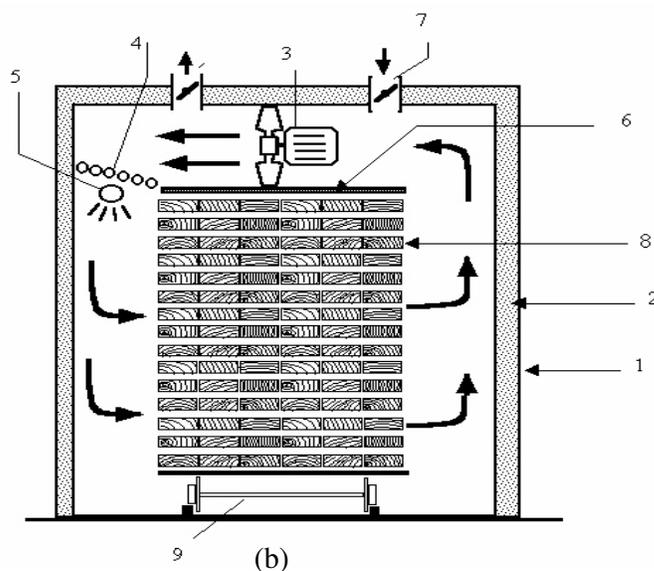
II-2- Séchage des planches.

Sécher un bois de feuillu dont on connaît les caractéristiques (densité, et nervosité) consiste à lui imposer le climat idéal pour qu'il sèche dans les impératifs de qualité exigée, mais le fait d'imposer n'importe quel climat peut être source de graves conséquences (collapse, fente, etc....), d'où l'idée d'appliquer un climat dynamique dont les conditions varient d'une façon continue en fonction de l'évolution de l'humidité du bois.

En général, le séchage des feuillus (Eucalyptus grandis et chêne vert) demande des conditions de température douces. Ces conditions de séchage douces sont réalisées dans un premier essai, les températures utilisées sont de l'ordre de 38 °C à 54 °C. Pour le second essai et afin d'accélérer le processus, les températures utilisées sont relativement élevées: elles sont de l'ordre de 46 °C à 58 °C, le troisième essai est le cas extrême: les températures sont trop élevées jusqu'à des valeurs comprises entre 48 °C et 66 °C.



(a)



(b)

Figure 2.7: Séchoir Cathild ((a): photo et (b): schéma)

1- cellule, 2-isolation, 3-ventilateur axial réversible, 4- batteries de chauffage, 5- rampes humidificatrices., 6-faux plafonds, 7- cheminées d'évacuation et d'entrée d'air, 8-pile de bois, 9- chariot de manutention.

II-3- Confection des éprouvettes pour essai de traction.

II-3-1- Caractéristiques géométriques des éprouvettes.

Une fois les planches stabilisées à une humidité d'environ 12,5%, on a procédé à la confection des éprouvettes de traction en bois massif, bois collé bout à bout et bois collé en biseau suivant la norme NFB51-022. Notre étude s'est limitée à la colle polyuréthane utilisé dans l'industrie du lamellé collé fournie par la société SEDEC à Temara au Maroc.

On ébauche la planche à partir de laquelle on usine l'éprouvette. La forme arrondie permettant de réduire la section est réalisée à l'aide d'une toupie. Ensuite, l'éprouvette est coupée en deux avec une scie à ruban en utilisant un montage permettant de régler l'angle d'aboutage α (bout à bout $\alpha = 0^\circ$, biseau $\alpha = 45^\circ$ et le bois massif $\alpha = 90^\circ$ choix de notation) figure 2. 8.

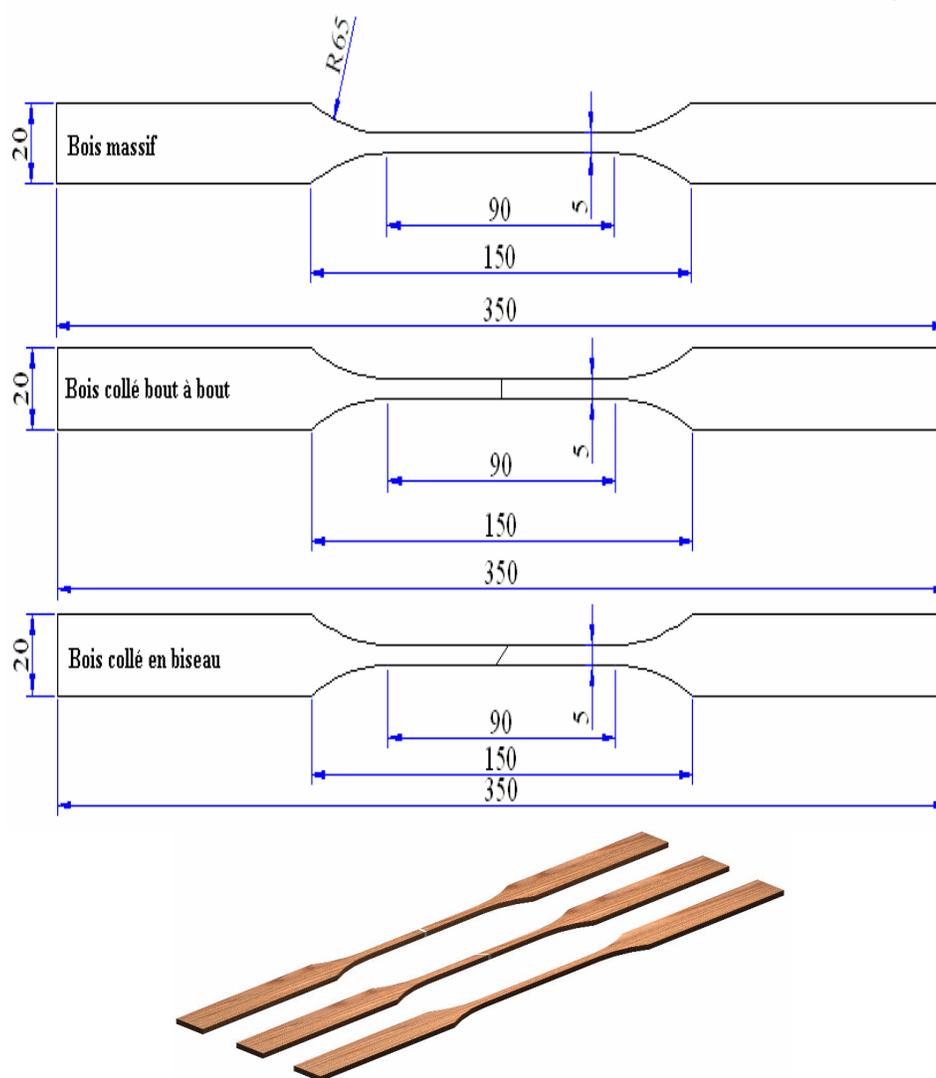


Figure 2.8: Caractéristiques géométriques des éprouvettes de traction.

II-3-2- Pression de collage.

Pour ces deux assemblages collés (bout à bout et biseau), la surface de collage S_C est différente. Pour obtenir une pression de collage constante de 8 bars ($0,8 \text{ N/mm}^2$) sur la surface collée pour l'ensemble des éprouvettes, la charge F_C que l'on devra appliquer sera différente pour l'assemblage en biseau.

La section utile des éprouvettes est déterminée à partir de 5 mm pour la largeur (l) et de 5 mm pour l'épaisseur (e). La pression de collage σ est:

$$\sigma = \frac{F}{S_C} \quad (\text{B.4})$$

Avec S_C : la surface de collage
 F : la charge normale à la surface de collage

Calcul de la charge à appliquer pour l'assemblage biseau figure 2. 9

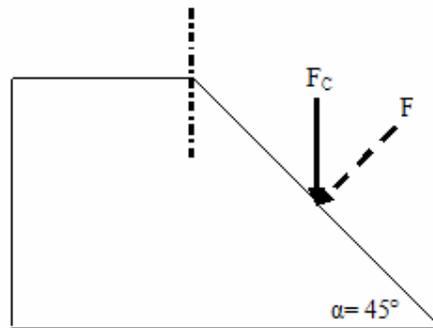


Figure 2.9: Exemple avec un angle d'aboutage de 45°

Calcul de la surface de collage S_C :

$$S_C = \frac{\text{épaisseur} \times l \text{ arg eur}}{\cos(\alpha)}$$

$$S_C = \frac{5 \times 5}{\cos(45^\circ)} = 35,34 \text{ mm}^2$$

Calcul de la charge normale F :

$$F = \sigma \times S_C$$

$$F = 0,8 \times 35,34 = 28,27 \text{ N}$$

Calcul de la charge verticale F_C

$$F_C = \frac{F}{\cos(\alpha)}$$

$$F_C = \frac{28,27}{\cos(45^\circ)} = 39,97 \text{ N} \approx 4 \text{ daN}$$

Pour l'assemblage bout à bout $F_C = F = 20 \text{ N} = 2 \text{ daN}$

Nous remarquons que la charge à appliquer pour un assemblage biseau est deux fois supérieure à celle de l'assemblage bout à bout.

Après collage, les éprouvettes sont stockées en chambre climatique (22° C d'humidité relative) pendant quelques jours.

II-4- Essai de traction.

II-4-1- Essais.

Pour le bois collé bout à bout, le bois collé en biseau et le bois massif (α égal à 0°, 45° et 90°), une série de 20 éprouvettes sans défauts a été confectionnée suivant la Norme Française NF 51- 022.

II-4-2- Machine de traction.

Ces essais de traction ont été réalisés sur une machine de traction TIRA TEST 28300E12 dont les caractéristiques sont:

- Cellule de charge: 300 KN
- Course de la traverse: 1000 mm
- Vitesse minimale de déplacement de traverse: 0,5 mm/mn
- Extensomètre: Trajet .traverse

L'essai est piloté par ordinateur

II-4-3- Montage de traction.

Sur la machine de traction, nous avons utilisé des mors à mâchoires pour l'amarrage de éprouvette.

Pendant l'essai de traction, la mâchoire supérieure se déplace verticalement à la vitesse régulière de 0,5 mm/mn, ce qui a pour effet d'appliquer la charge progressivement.

II-4-4- Capteurs.

Le but de ces essais est d'obtenir les valeurs du déplacement et de la charge de rupture appliquée.

Pour obtenir ces deux valeurs, nous avons utilisé le capteur de la cellule de charge qui nous donne la valeur de la charge à la rupture et le capteur de positionnement de la traverse supérieure pour celle du déplacement.

II-4-5- Principe de l'essai de traction.

On réalise l'essai de traction à la vitesse régulière de 0,5 mm/mn, et dès qu'il y a rupture de l'assemblage, l'ordinateur nous enregistre la courbe brute (charge-déplacement) qui sera conservée en mémoire dans la machine (figure 2.10).

II-4-6- Dispositif d'essai.



Figure 2.10: Montage d'essai sur éprouvette en traction.

II-5- Concepts statistiques.

II-5-1- Théorie du maillon le plus faible.

Cette théorie repose sur quelques hypothèses fondamentales: le solide peut être considéré comme la juxtaposition d'éléments parfaitement indépendants du point de vue de la rupture, et c'est celle de l'élément le plus faible qui entraîne la rupture du solide en entier.

Lorsque l'hypothèse du maillon le plus faible est correcte, on attribue à chaque élément une probabilité de rupture sous une contrainte (ou une déformation) donnée. Cette probabilité cumulée est $P_c(\sigma)$. La probabilité de survie vaut $1 - P_c(\sigma)$. Dans le cas de N éléments, elle vaut $[1 - P_c(\sigma)]^N$. La probabilité de rupture de l'ensemble des éléments est donnée par:

$$P_r(\sigma) = 1 - [1 - P_c(\sigma)]^N \quad (\text{B.5})$$

On peut aussi l'écrire sous la forme:

$$P_r(\sigma) = 1 - \exp\left\langle -N \ln\left(\frac{1}{1 - P_c(\sigma)}\right) \right\rangle \quad (\text{B.6})$$

Soit V_0 le volume de chaque élément et V le volume total, la probabilité de rupture devient alors:

$$P_r(\sigma) = 1 - \exp\left\langle -\frac{V}{V_0} \ln\left(\frac{1}{1 - P_c(\sigma)}\right) \right\rangle \quad (\text{B.7})$$

II-5-2- Analyse probabiliste selon Weibull.

L'application du concept du "maillon le plus faible" à un volume est proposée pour la première fois par **Weibull [80]** qui a abouti à une fonction de distribution de manière purement heuristique.

L'analyse de Weibull repose sur les hypothèses suivantes:

- Le matériau est homogène et isotrope de façon statistique
- La rupture est amorcée à partir d'un défaut unique considéré comme le plus critique. Ce défaut est en quelque sorte "maillon de la chaîne" le plus faible.

Si le matériau est homogène et isotrope, le nombre N de défauts dans le matériau est proportionnel au volume V soumis à un champ de contrainte. Weibull propose une fonction empirique pour exprimer la probabilité de survie $P_s(\sigma)$ sous la contrainte σ .

$$\begin{aligned}
 P_s(\sigma) &= \exp\left\langle -V \ln\left(\frac{(\sigma - \sigma_s)^{m_w}}{\sigma_0}\right) \right\rangle \text{ Pour } \sigma > \sigma_s \\
 P_r(\sigma) &= 1 \text{ Pour } \sigma \leq \sigma_s
 \end{aligned}
 \tag{B.8}$$

σ : contrainte appliquée

σ_0 : contrainte de normalisation

σ_s : contrainte seuil en dessous duquel la probabilité de rupture est nulle

m_w : module d'inhomogénéité appelé encore module de Weibull

La probabilité de rupture s'écrit:

$$P_r(\sigma) = 1 - \exp\left\langle -V \ln\left(\frac{(\sigma - \sigma_s)^{m_w}}{\sigma_0}\right) \right\rangle \text{ Pour } \sigma > \sigma_s
 \tag{B.9}$$

II-5-3- Dépouillements statistiques.

L'analyse de **Weibull [81]** à été très largement utilisée pour décrire la fréquence de la distribution des propriétés mécaniques des matériaux.

Les méthodes d'estimation des paramètres de la distribution de Weibull sont multiples. Citons principalement: la méthode des moindres carrés et la méthode des moments. Selon ces méthodes l'affectation de la probabilité cumulée de rupture pour chaque valeur expérimentale se fait par la méthode de la statistique de l'ordre.

Il existe plusieurs approximations de la probabilité cumulée:

$$P_r = \frac{i - 0,5}{N} \quad \text{Bliss [82]}
 \tag{B.10}$$

$$P_r = \frac{i - \alpha}{N - \alpha - \beta + 1} \quad \text{Ipsen et Jens [83]}$$

Où α et β sont des coefficients qui dépendent de la forme de la distribution; pour une distribution quelconque, on pose $\alpha = \beta = 0,3$ et i est le rang de l'essai correspondant dans le classement des N essais.

En pratique, pour N essais effectués les valeurs de la contrainte de la rupture sont classées dans une série croissante : $\sigma_{r1} < \sigma_{r2} < \dots < \sigma_{rN}$

III- TÉNACITÉ DU BOIS MASSIF ET DU BOIS COLLÉ D'EUCALYPTUS GRANDIS ET DE CHÊNE VERT.

Notre but est de comparer, à l'aide d'un paramètre intrinsèque au matériau, la résistance à la fissuration du bois massif et du bois collé afin de pouvoir prédire les caractères déterminants de l'apparition des fentes et appréhender les phénomènes de rupture. On se trouve ici dans le cas d'application de la mécanique de la rupture, puisqu'on cherche à étudier les conditions d'extension d'une fissure, en admettant que le bois possède au départ un défaut initial de longueur connue.

Nous avons cherché une configuration d'essai qui se rapproche le plus des conditions réelles d'extension des fentes. Le mode d'ouverture (mode I) semble être le mode prépondérant dans l'extension des fentes. Nous avons adopté des essais de traction sur des éprouvettes DCB (Double Cantiliver Beam). Ce mode I a l'avantage de tester les systèmes collés et de bien s'appliquer à la méthode de complaisance expérimentale.

III-1- Démarche expérimentale.

Nous allons préciser tous les éléments qui touchent à la réalisation des éprouvettes DCB. Le nombre des éprouvettes à prélever a posé d'énormes problèmes. De ce fait, il a fait l'objet de plusieurs études. Dans notre cas on s'est basé sur les résultats de l'étude de **Manaa [84]** qui a limité le choix à 16 éprouvettes. Nous avons choisi 5 éprouvettes de chaque arbre de chaque espèce. Ce choix est justifié si on obtient au minimum trois propagations de fissure, nous disposerons donc de 15 expériences proche de 16.

III-2- Fabrication des éprouvettes.

Le prélèvement des échantillons a fait l'objet d'un soin particulier. Les éprouvettes DCB (Double Cantiliver Beam) sont obtenues par découpage d'un même lot de bois, ne présentant pas de défauts (nœud, fissures résiduelles de séchage....) et loin du cœur. Nous avons utilisé du bois de bonne qualité séché sur un séchoir artificiel CATHILD dont l'humidité finale des planches est d'environ de 12%.

Un des problèmes majeurs de la fabrication des éprouvettes était la réalisation d'entailles. Le CNRF dispose d'un système de découpe adapté à la taille des échantillons. Le montage d'une scie circulaire sur un mini tour a permis d'exécuter la découpe avec précision du fond d'entaille. Cette découpe a été effectuée sur l'élément central du bois massif et bois collé. Pour pouvoir localiser le fond de fissure un côté du joint de colle est peint de vernis craquelant qui nous permet de repérer et mesurer facilement la longueur de la fissure a .

III-3- Collage des éprouvettes.

Notre étude s'est limitée à la colle polyuréthane utilisée dans l'industrie du lamellé collé fournie par la société SEDEC à Temara au Maroc.

Les plans à encoller sont nettoyés. La colle est appliquée sur les deux faces à coller. Le positionnement des éprouvettes pendant le serrage effectué sur une presse avec une pression constante de l'ordre 0,7 MPa est soigneusement contrôlé.

Avant d'entamer les essais sur des éprouvettes DCB, un temps de stabilisation et de polymérisation de quelques mois été nécessaire pour limiter l'influence des contraintes résiduelles.

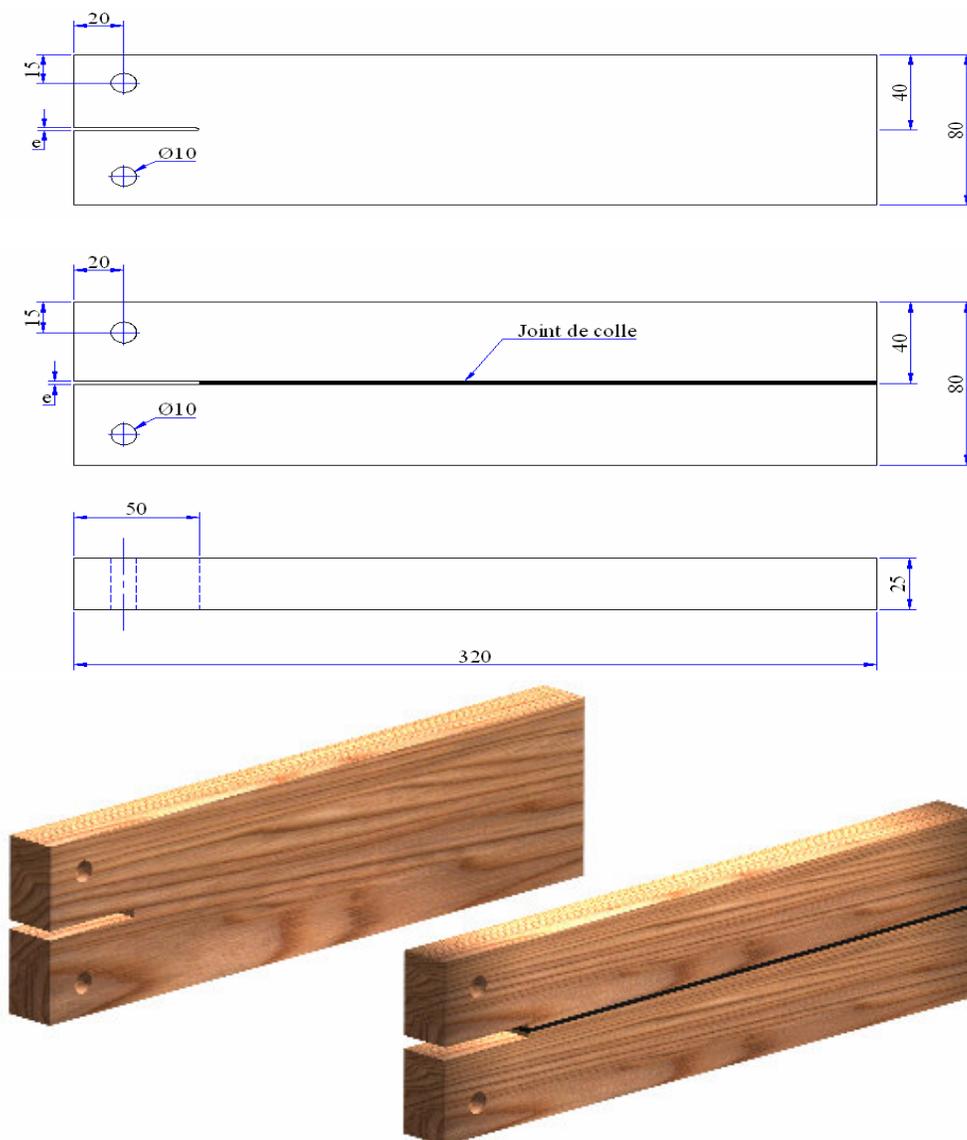


Figure 2.11: Caractéristiques géométriques des DCB.

III-4- Déroulement des essais.

Les essais sont réalisés sur une machine TIRA TEST 28300E12 (Figure 2.12) à vitesse de déplacement de la traverse imposée constante 1 mm/mn. Nous avons conçu et réaliser un système d'amarrage pour ce type d'éprouvette. La machine est pilotée par un ordinateur qui enregistre la courbe charge-déplacement de la traverse. Un vernis déposé sur la face de l'éprouvette permet de visualiser la propagation de la fissure. La longueur de la fissure a été mesurée l'aide d'une règle. Nous avons assimilé le déplacement de la traverse à celui des points d'application de la charge, compte tenu du faible niveau de chargement.

Les essais sur une seule éprouvette DCB nous ont permet le tracé d'une courbe de complaisance. En effet une série de chargement, suivi d'une propagation de fissure da. Un déchargement puis d'une remise en charge pour une nouvelle propagation de fissure da, ainsi de suite...La longueur de fissure a été mesurée à chaque incrément de propagation.

III-5- Dispositif d'essai.



Figure 2.12: Montage d'essai sur éprouvette DCB en traction.

III-6- Dépouillement des résultats de la ténacité du bois massif et du bois collé

Le but de l'étude expérimentale est la mesure de la ténacité G_{Ic} du bois massif et du bois collé des espèces d'Eucalyptus grandis et de chêne vert a nécessité la mesure des grandeurs suivantes pour une longueur de fissure a:

- P_c , la charge critique appliquée à l'éprouvette,
- δ , l'ouverture des lèvres de la fissure.

La courbe charge-déplacement des lèvres de la fissure permet de déterminer la complaisance C de l'éprouvette DCB. Elle est définie par:

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (\text{B.11})$$

Pour l'approximation de la courbe de complaisance en fonction de la fissure a , nous avons opté pour un lissage des points expérimentaux en utilisant une fonction exponentielle de type:

$$C = \alpha \exp(\beta \times a) \quad (\text{B.12})$$

α et β sont déterminés pour chaque éprouvette avec un coefficient de corrélation $R^2 \longrightarrow 1$. Elle permet d'obtenir facilement la valeur de dC/da .

La ténacité du couple bois-colle peut être déterminée à l'aide d'une méthode énergétique dite globale. Si on considère les matériaux élastiques linéaires ce qui peut être le cas du bois à l'état sec et de la colle polyuréthane utilisée, nous pouvons estimer la ténacité par le calcul du taux de restitution d'énergie:

$$G_{1c} = \frac{P_c^2}{2b} \frac{\partial C}{\partial a} \quad (\text{B.13})$$

Avec P_c : Charge critique appliquée au système
 a : Longueur initiale de la fissure
 b : Epaisseur de l'éprouvette
 C : Complaisance

La ténacité représente l'énergie nécessaire pour créer deux surfaces de valeur bda , ou b est l'épaisseur de l'éprouvette et da l'incrément unitaire de longueur de fissure.

Nous avons remarqué que la fissure ne se propage pas de la même quantité d'une face à l'autre de l'éprouvette. Dans le calcul de G_{1c} nous avons pris la moyenne des deux valeurs trouvées. Cette dissymétrie peut provenir:

- À des défauts de collage
- À une répartition irrégulière des cernes annuels et leur texture
- Aux imperfection du montage.

La relation entre le taux de restitution d'énergie (ténacité) G_{1c} et le facteur d'intensité des contraintes K_{1c} en mode I est donnée par (Annexe A):

$$K_{1c}(a) = \left(\frac{G_{1c}(a)}{-\frac{1}{2} \operatorname{Im} \left[d_{22} \left(\frac{\mu_1 + \mu_2}{\mu_1 \mu_2} \right) \right]} \right)^{1/2} \quad (\text{B.14})$$

Où μ_1 et μ_2 sont les racines de l'équation: $d_{11}\mu^4 - 2d_{16}\mu^3 + (2d_{16} + d_{66})\mu^2 - 2d_{26}\mu + d_{22} = 0$

d_{ij} : complaisances élastiques apparentes ($i, j = 1, 2, \dots, 6$)

$$d_{ij} = S_{ij} - \xi \frac{S_{i3}S_{j3}}{S_{33}}$$

S_{ij} : complaisances élastiques, lorsqu'on est dans un état de déformation planes $\xi = 1$ et dans un état de contrainte planes $\xi = 0$.

La partie imaginaire se trouve entre crochet de [].

*CHAPITRE 3 :
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS*

I- CONTRAINTES DE CROISSANCE, CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET MODULES D'ÉLASTICITÉ DYNAMIQUE DES BOIS D'EUCALYPTUS GRANDIS ET DE CHÊNE VERT.

I-1- Indicateurs des contraintes de croissance GSI.

Les résultats obtenus des indicateurs des contraintes de croissance GSI vont être présentés en termes de déplacement, c'est-à-dire à partir de la valeur directement lue sur le capteur. Les GSI mesurées à la périphérie de l'arbre, caractérisent l'état mécanique du bois dans les toutes dernières années.

I-1-1-Eucalyptus grandis.

Le tableau 3.1 présente, pour les trois arbres choisis d'Eucalyptus grandis, les huit valeurs de GSI mesurées, les valeurs moyennes, maximum, minimum et le contraste max-min.

Tableau 3.1: Résultats des mesures des GSI pour les trois arbres d'Eucalyptus grandis.

N° d'arbre	GSI (μm)								Moy	Max	Min	Max-Min
	1	2	3	4	5	6	7	8				
1	52	47	69	66	70	84	82	53	65	84	47	37
2	120	152	82	81	138	93	81	85	104	152	81	71
3	65	34	47	105	90	73	88	96	75	105	34	71

La figure 3.1 donne une représentation polaire des GSI pour les trois arbres d'Eucalyptus grandis et illustre ses distributions sur la couronne des mesures.

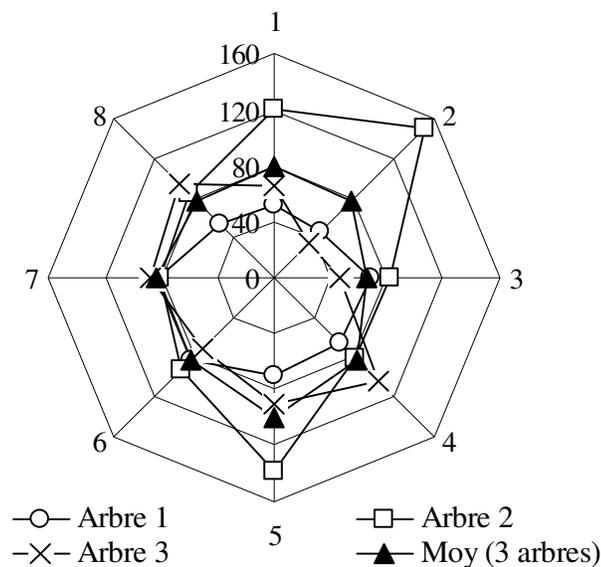


Figure 3.1: Représentation polaire des GSI pour les trois arbres d'Eucalyptus grandis.

L'arbre 2 présente des valeurs élevées qui dépassent nettement la moyenne, par contre l'arbre 1 et 3 peuvent être considérés comme relativement équilibrés. Ces valeurs moyennes de GSI laissent apparaître une différence nette entre les arbres et suggèrent que l'arbre 2 est plus fréquemment soumis à de fortes tensions que les arbres 1 et 3.

I-1-2- Chêne vert.

Le tableau 3.2 présente, pour les trois arbres choisis du chêne vert, les huit valeurs de GSI mesurées, les valeurs moyennes, maximum, minimum et le contraste max-min.

Tableau 3.2: Résultats des mesures des GSI pour les trois arbres de chêne vert

N° d'arbre	GSI (μm)								Moy	Max	Min	Max-Min
	1	2	3	4	5	6	7	8				
1	0	12	12	6	51	37	32	38	24	51	0	51
2	60	15	22	31	13	12	26	32	26	60	12	48
3	18	11	12	9	4	7	23	22	13	23	4	19

La figure 3.5 donne une représentation polaire des GSI pour les trois arbres du chêne vert et illustre ses distributions sur la couronne des mesures.

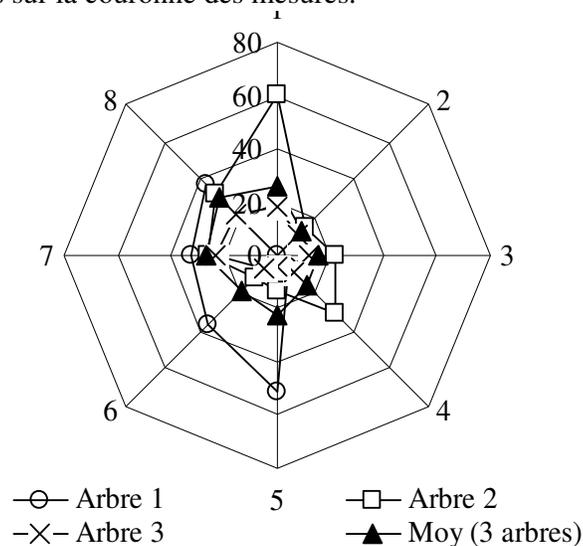


Figure 3.2: Représentation polaire des GSI pour les trois arbres du chêne vert.

Les arbres 1 et 2 présentent des valeurs moyennes de GSI similaires, par contre l'arbre 3 peut être considéré comme relativement équilibré avec des valeurs moyennes deux fois inférieures à celles des arbres 1 et 2. Ces valeurs moyennes de GSI laissent apparaître une différence nette entre les arbres et suggèrent que les arbres 1 et 2 sont plus fréquemment soumis à des fortes tensions.

I-1-3- Profil expérimental des GSI.

I-1-3-1- Bois d'Eucalyptus grandis

La figure 3.3 donne une représentation angulaire des profils de GSI mesurées sur les trois arbres ainsi que la moyenne d'Eucalyptus grandis. Cette représentation consiste à centrer le profil sur la plus forte valeur de GSI. En général on constate une dissymétrie angulaire qui peut être plus au moins marquée. Dans notre cas on observe des profils plats (arbre 1 et 3) et aigus (arbre 2).

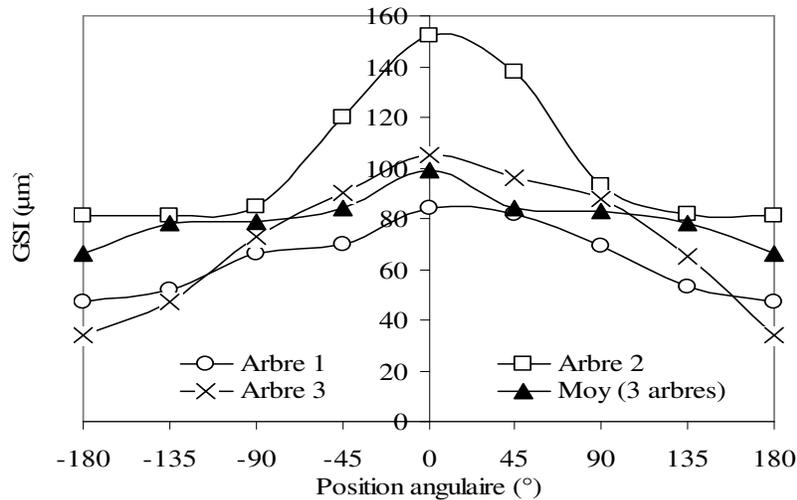


Figure 3.3: Profil expérimental des GSI centrés sur la valeur maximale pour les trois arbres d'Eucalyptus grandis et sa moyenne.

I-1-3-2- Bois de chêne vert

La figure 3.4 donne une représentation angulaire des profils de GSI mesurées sur les trois arbres de chêne vert ainsi que la moyenne. Cette représentation consiste à centrer le profil sur la plus forte de GSI. Dans notre cas on observe des profils aigus (arbre 1 et 2) et plats (arbre 3).

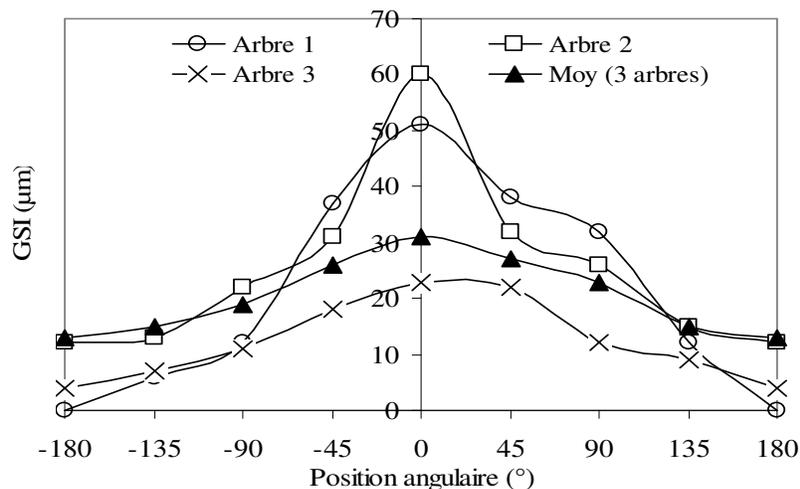


Figure 3.4: Profil expérimental des GSI centrés sur la valeur maximale pour les trois arbres de chêne vert et sa moyenne.

I-1-4- Profil modélisé des GSI.

Un profil typique des variations angulaires des indicateurs des contraintes de croissance GSI contenant du bois de tension se caractérise, en général, par une forte valeur encadrée par deux valeurs intermédiaires relativement moyennes, les autres valeurs sont plus faibles. Ces variations peuvent être décrites par des fonctions de types sinusoïdales [14, 85].

À partir des profils expérimentaux, nous avons utilisé l'ajustement décrit par le modèle proposé par Sassus [78, 85]

$$GSI(\theta) = GSI_{\min} + (GSI_{\max} - GSI_{\min}) m^{\frac{|\theta - \theta_0|}{\delta\theta}}$$

Où θ est la position angulaire variant entre $\theta_0 - \pi$ et $\theta_0 + \pi$. La largeur du pic $\delta\theta$ est définie comme étant l'étendue angulaire où le GSI est plus proche du maximum que du minimum:

$$GSI(\theta) \geq \frac{GSI_{\max} + GSI_{\min}}{2} \text{ pour } \theta \in [-\delta\theta, \delta\theta]$$

Les paramètres m et $\delta\theta$ permettent de décrire une large gamme de formes de pic. L'ensemble des paramètres est ajusté par le minimum de la différence des carrés entre la courbe modèle et le profil moyen. Nous avons trouvé, pour l'ajustement $m = 2$, $\theta_0 = 1,5^\circ$ et $\delta\theta = 40^\circ$.

I-1-4-1- Bois d'Eucalyptus grandis

L'Eucalyptus grandis se distingue par une valeur moyenne du pic de $100 \mu\text{m}$, ce qui montre qu'il y a deux classes de profils moyens construits à partir de la distribution des valeurs maximales des GSI (figure 3.5). La première classe dont les GSI sont inférieures à $100 \mu\text{m}$ est quasi symétrique et peu contrastée (arbre 1 et 3). La deuxième classe dont les GSI sont supérieures à $100 \mu\text{m}$ se caractérise par un profil plus au moins aigu (arbre 2).

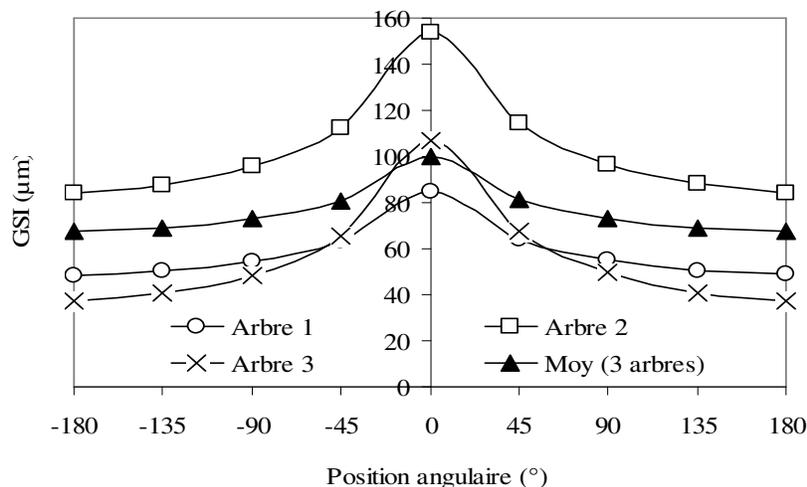


Figure 3.5: Profil modélisé des GSI centrés sur la valeur maximale pour les trois arbres d'Eucalyptus grandis et sa moyenne.

On constate que l'ajustement réalisé est excellent entre le profil expérimental et le profil modélisé, ce qui confirme la pertinence du modèle utilisé (figure 3.6).

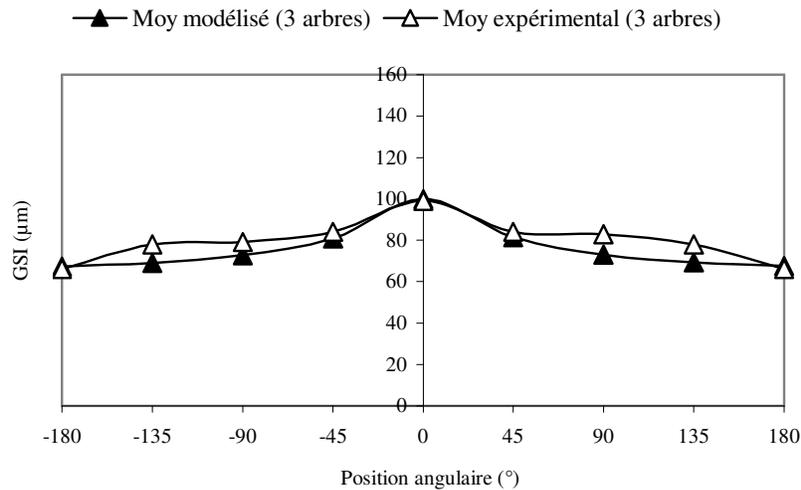


Figure 3.6: Profil modélisé et expérimental des GSI d'Eucalyptus grandis.

Pour les trois arbres la valeur minimale de GSI, correspond au bois normal. L'Eucalyptus grandis se comporte de manière similaire aux Eucalyptus camaldulensis [85] et Eucalyptus gomphocephala [86].

I-1-4-2- Bois de chêne vert

Le chêne vert se distingue par une valeur moyenne du pic de 30 µm, ce qui permet de dire qu'il y a deux classes de profils moyens construits à partir de la distribution des valeurs maximales des GSI (figure 3.7). La première classe dont les GSI sont supérieures à 30 µm est quasi symétrique et peu contrasté (arbre 1 et 2). La deuxième classe dont les GSI sont inférieures à 30 µm se caractérise par un profil plus au moins plat (arbre 3). Pour les trois arbres la valeur minimale de GSI, correspond au bois normal.

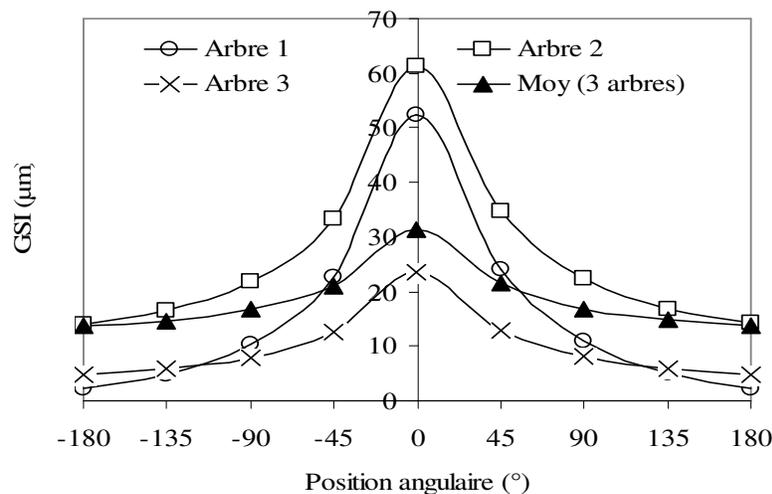


Figure 3.7: Profil modélisé des GSI centrés sur la valeur maximale pour les trois arbres de chêne vert et sa moyenne.

On constate que l'ajustement réalisé est excellent le profil expérimental et le profil modélisé, ce qui confirme la pertinence du modèle utilisé (figure 3.8).

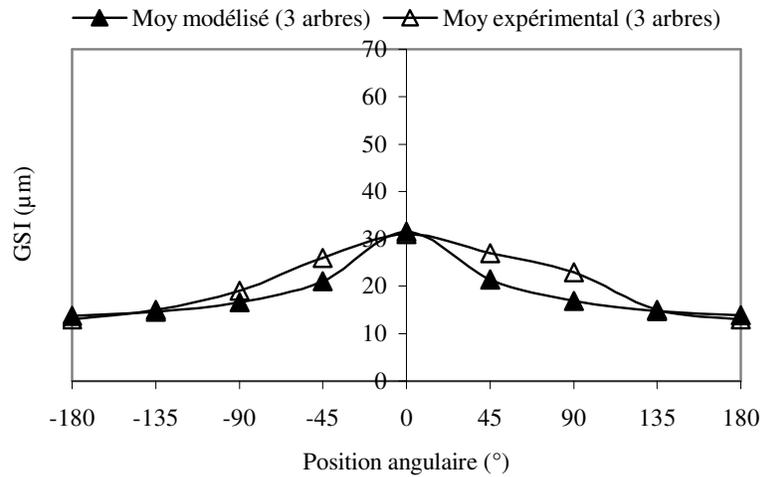


Figure 3.8: Profil modélisé et expérimental des GSI de chêne vert.

À titre de comparaison de ces deux feuillus, l'observation des courbes de la distribution cumulée des fréquences de GSI (figure 3.9) laisse toute fois apparaître une différence nette entre ces deux essences. En effet, au niveau des valeurs des GSI, 75% d'*Eucalyptus grandis* ont des déformations inférieures à 90 µm, cette valeur était à 31 µm pour le chêne vert. Cette différence peut être expliquée, soit par l'effet d'âge (45 ans pour l'*Eucalyptus grandis* et 85 pour le chêne vert) ou soit par la vitesse de croissance qui est rapide pour l'*Eucalyptus grandis* et lente pour le chêne vert.

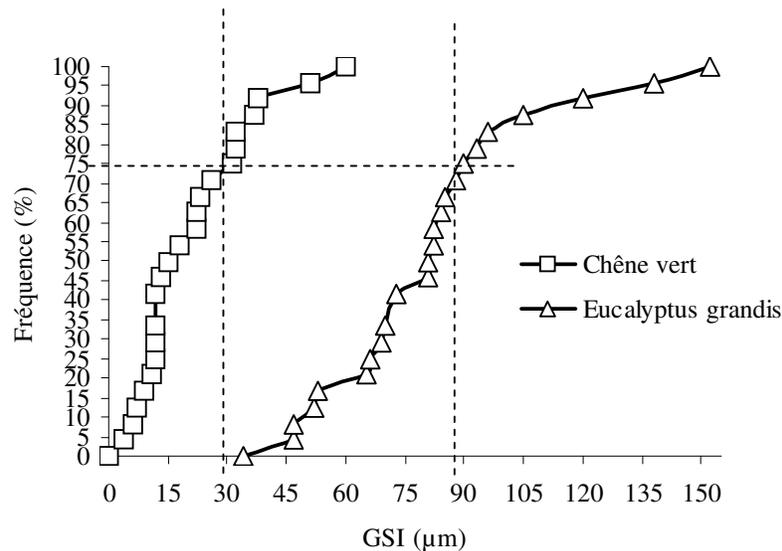


Figure 3.9: Distribution cumulée des GSI d'*Eucalyptus grandis* et de chêne vert.

1-1-5- Coefficient de choix des arbres à abattre.

À partir des valeurs des indicateurs des contraintes, nous avons défini un coefficient de choix qui peut être utilisé par les forestiers pour abattre les arbres. Nous proposons le coefficient C suivant:

$$C = \frac{GSI_{Max} + GSI_{Min}}{\sum_{j=1}^8 GSI_j}$$

Le coefficient C est considéré comme un paramètre propre des arbres présentant des tensions maximales et minimales sur les faces du tronc.

Tableau 3.3: Coefficient de choix pour abattre des arbres d'Eucalyptus grandis et de chêne vert.

Essence	Eucalyptus grandis			Chêne vert		
Arbre	1	2	3	1	2	3
C	0,25	0,28	0,23	0,27	0,34	0,25

Les arbres 2 des bois d'Eucalyptus grandis et de chêne vert qui ont subi de fortes tensions, ont un coefficient de choix C élevé par rapport aux arbres 1 et 3. Nous proposons pour l'abattage de choisir des arbres à faible coefficient de choix, ce qui limite les risques de fissuration sur les billons.

I-2- Mesure d'humidité et d'infradensité sur les rondelles de la première bille.

À partir du plateau diamétral des rondelles d'épaisseur 2,5 cm orientées dans la direction Nord-Sud, les barrettes radiales ont été confectionnées de dimension 20×20×20 mm³ (cf. chapitre matériau végétal et méthode) pour déterminer l'évolution radiale de l'humidité et de l'infradensité.

Les variations radiales peuvent être lentes et traduire l'effet du passage du bois juvénile (≈15 ans) au bois adulte. La transition du bois juvénile au bois adulte (≈ 30 ans) est le phénomène qui affecte le plus la qualité technologique du bois (cf. chapitre étude bibliographique p14).

I-2-1- Profil d'humidité.

Les profils de l'**humidité** des bois d'Eucalyptus grandis (figure 3.10a) et de chêne vert sont similaires (figure 3.10b)

Les pics des profils d'humidité et d'infradensité du bois d'Eucalyptus grandis et de chêne vert pourraient s'expliquer par la taille des éprouvettes qui a permis un prélèvement de part et d'autre de la zone de transition entre l'aubier et le bois adulte.

Sur des arbres âgés (cas de notre étude), le bois juvénile a des propriétés physiques assez différentes du bois adulte, on remarque aussi des différences de ces propriétés entre le bois de cœur et la périphérie. La présence du bois de réaction et en particulier le bois de tension chez l'Eucalyptus grandis et le chêne vert peuvent expliquer la variation de l'humidité et d'infradensité.

I-3- Mesures des propriétés physiques et mécaniques de référence.

Le manque de connaissance des caractéristiques technologiques (physiques et mécaniques) du bois feuillu d'Eucalyptus grandis et du chêne vert et la faible diffusion d'informations sur leurs qualités et leurs possibilités d'utilisation nécessitent, la détermination des ces propriétés. Elles permettent ainsi de mieux connaître ces deux feuillus et donnent une classification en qualité [87].

I-3-1- Propriétés physiques de base.

Le tableau 3.4 présente les principaux résultats concernant les propriétés physiques (humidité, densités, infradensité, retraits et anisotropie) des arbres étudiés. Les valeurs indiquées correspondent à des moyennes obtenues et leurs écart-types sur 90 éprouvettes testées des trois arbres confondus pour chaque essence.

Tableau 3.4: Caractéristiques physiques du bois d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.

	Eucalyptus grandis		Chêne vert	
	Moy	Ecart-type	Moy	Ecart-type
h (%)	13,76	0,60	17,04	1,03
D_h	0,56	0,11	0,90	0,05
D₀	0,53	0,11	0,84	0,05
D_b	0,46	0,08	0,70	0,03
Rr (%)	5,90	1,34	8,69	0,92
Rt (%)	8,95	1,53	10,38	1,20
Rv (%)	15,54	2,61	20,11	1,88
A	0,67	0,15	0,85	0,10

Densité (D_i).

Le bois d'Eucalyptus grandis présente une densité à l'état h (**D_h**) moyenne inférieure de 38% à celle du chêne vert et de 37% concernant la densité anhydre (**D₀**). Il est vraisemblable que cette valeur inférieure soit la conséquence des caractéristiques anatomiques du bois [88], [89]. Les valeurs moyennes des densités répertoriées du bois d'Eucalyptus grandis varient de 0,45 à 0,60 (bois mi-lourd) et celui de chêne vert de 0,60 à 0,95 (bois lourd). Ces valeurs sont en accord avec celles de **Fechtal** [90] et **Daya** [91].

Infradensité (D_b).

Des commentaires similaires à ceux qui concernent la densité peuvent s'appliquer ici. L'Eucalyptus grandis présente une infradensité moyenne inférieure de 34% à celui du chêne vert.

Retrait radial (Rr) et tangentiel (Rt).

Le chêne vert présente un retrait radial (Rr) supérieur de plus de 32% à celui d'Eucalyptus grandis et de 14% concernant le retrait tangentiel (Rt).

Retrait volumétrique total (Rv).

L'Eucalyptus grandis présente une meilleure stabilité dimensionnelle, avec un retrait volumique total inférieur de 23% à celui du chêne vert.

L'anisotropie (A).

L'anisotropie dépend davantage du retrait radial que du retrait tangentiel. Cette constatation, a déjà été observée par Mazet et Nepveu [92]. Ces deux feuillus sont fortement anisotropes, ceci est expliqué par leurs nervosités.

Les caractéristiques physiques concordent avec la littérature pour l'Eucalyptus grandis [93, 94] et pour le chêne vert [95, 96].

I-3-2- Variabilité des propriétés physiques de base.

Les Box plot ou "boîte à moustaches" (Annexe D) ont l'avantage de comparer statistiquement les valeurs moyennes des observations de deux populations (30 éprouvettes/arbre/espèce). Dans notre cas, il s'agit de comparer les valeurs moyennes par espèce et par arbre des paramètres physiques de base.

I-3-2-1- Variabilité des densités (D_i).

La variabilité des densités (D_i) entre les arbres de chaque espèce est importante. On remarque des valeurs des densités (D_i) supérieures à la moyenne sur les arbres 2 d'Eucalyptus grandis et de chêne vert qui ont subi de forte tension.

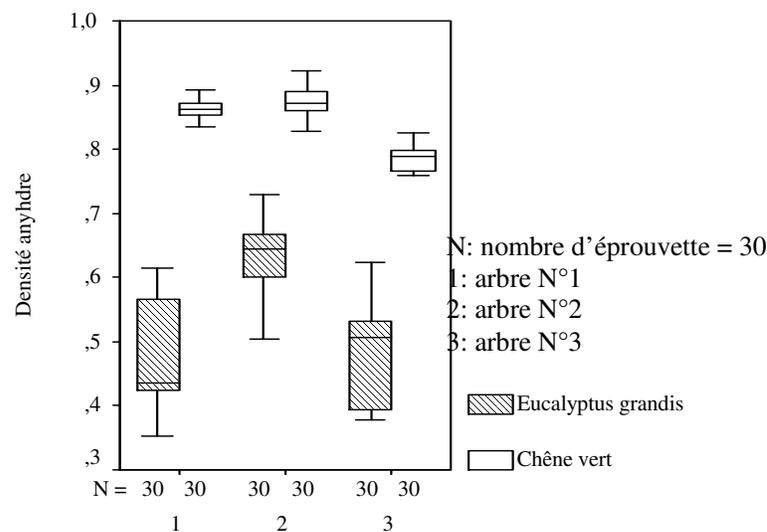


Figure 3.12: Représentation graphique en box plot de densité anhydre d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.

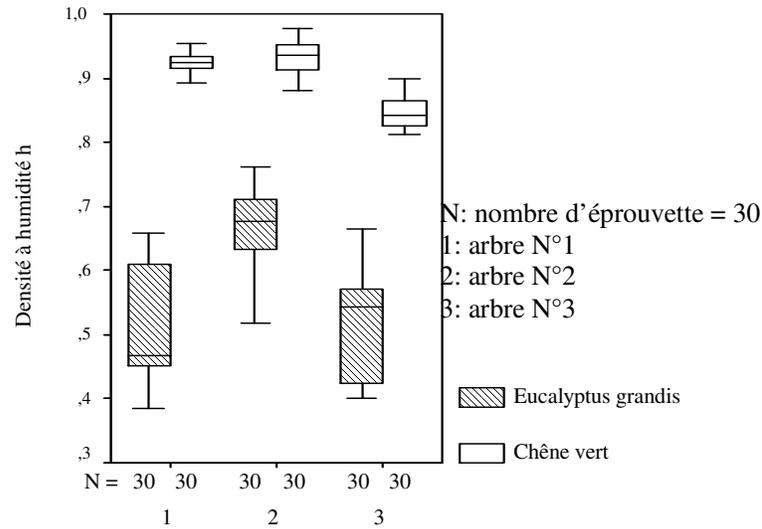


Figure 3.13: Représentation graphique en box plot de la densité à l'humidité h d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.

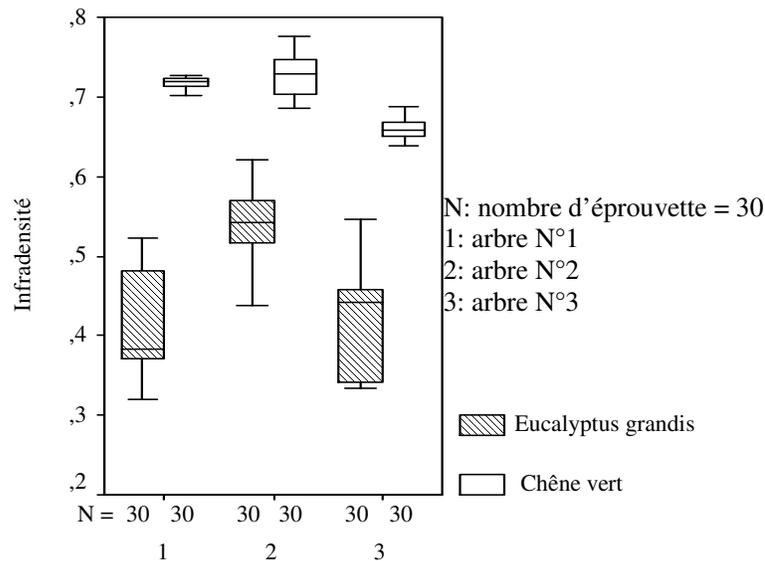


Figure 3.14: Représentation graphique en box plot de l'infradensité d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.

Le bois d'Eucalyptus grandis est moins dense que le chêne vert.

I-3-2-2- Variabilité des retraits (R_i).

Le retrait de chêne vert est plus marqué que celui d'Eucalyptus grandis. La variabilité des retraits (R_i en %) entre les arbres de chaque espèce est peu importante.

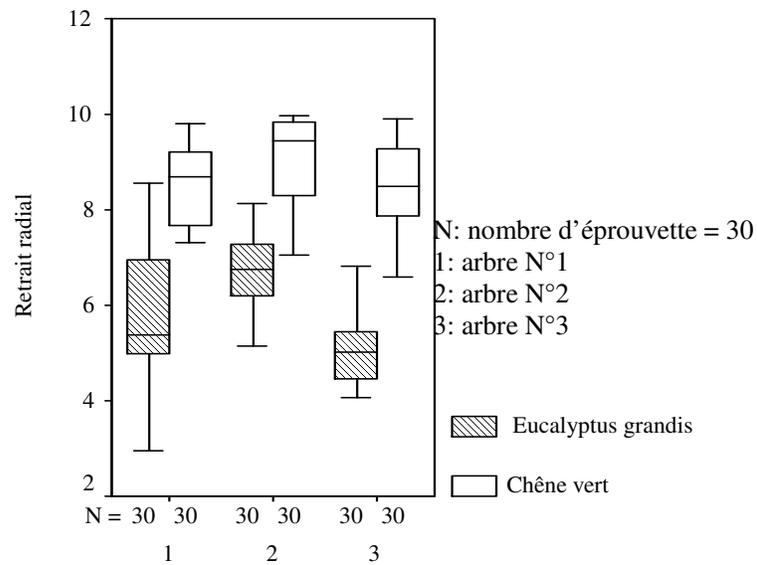


Figure 3.15: Représentation graphique en box plot du retrait radial d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.

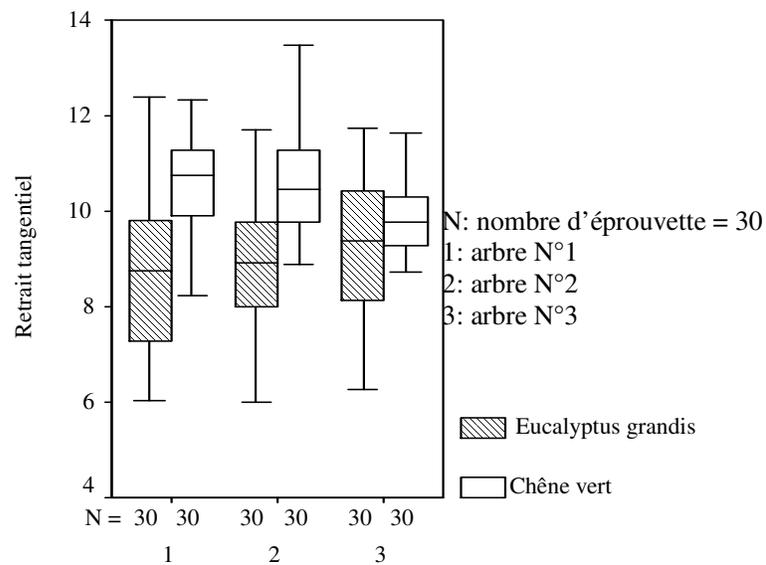


Figure 3.16: Représentation graphique en box plot du retrait tangentiel d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.

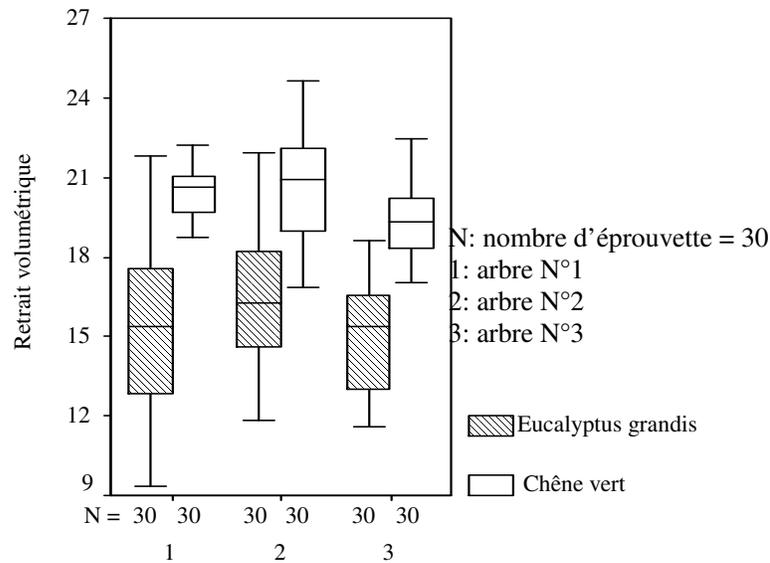


Figure 3.17: Représentation graphique en box plot du retrait volumétrique d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.

I-3-2-3- Variabilité de l'anisotropie A.

La variabilité de l'anisotropie (A_i) entre les arbres de chaque espèce est importante. La dispersion la plus importante est obtenue pour les arbres 1 de ces deux espèces.

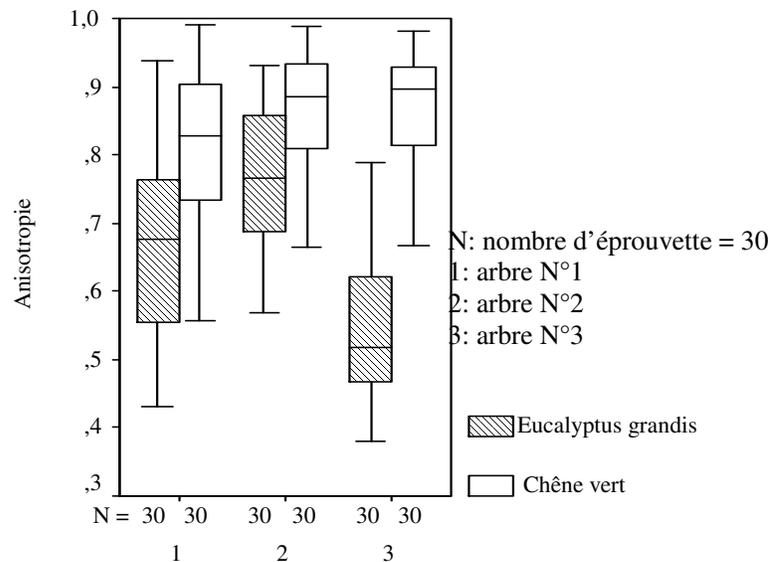


Figure 3.18: Représentation graphique en box plot de l'anisotropie d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.

Sur les échantillons des trois arbres étudiés (30 éprouvettes/arbre/espèce), les box plots montrent qu'il y a des différences significatives de propriétés physiques entre ces deux espèces. Le chêne vert est plus dense avec un retrait plus marqué et moins stable que l'Eucalyptus grandis, mais ces deux essences sont fortement anisotropes.

I-3-3- Propriétés mécaniques par la méthode vibratoire BING.

Le tableau 3.5 présente les principaux résultats des modules d'élasticités dynamiques (module d'élasticité de Bernoulli E_b , module d'élasticité de Timoshenko E_t et module de cisaillement de Timoshenko G_t) des arbres étudiés par la méthode vibratoire BING. Les valeurs indiquées correspondent à des moyennes obtenues et leurs écart-types sur 90 éprouvettes testées des trois arbres confondus pour chaque essence.

Tableau 3.5: Caractéristiques mécaniques (E_b , E_t et G_t) par BING des bois d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.

	<i>Eucalyptus grandis</i>		<i>Chêne vert</i>	
	Moy	Ecart-type	Moy	Ecart-type
E_t (MPa)	14300	2663	15100	1425
G_t (MPa)	800	439	1300	435
E_b (MPa)	13400	2476	14300	1366

Module d'élasticité dynamique. L'eucalyptus grandis et le chêne vert présentent une rigidité moyenne presque similaire. **Benamor [97]** et **Gerard [15]** ont montré respectivement que la valeur du module d'élasticité statique en flexion quatre points du chêne vert d'Hérault est de 14GPa et de 12GPa pour d'eucalyptus du Congo.

I-3-4- Variabilité des propriétés mécaniques par BING.

Les Box plot ont l'avantage de comparer statistiquement les valeurs moyennes des observations de deux populations (30 éprouvettes/arbre/espèce). Dans notre cas, il s'agit de comparer les valeurs moyennes par espèce et par arbre des modules d'élasticité par BING.

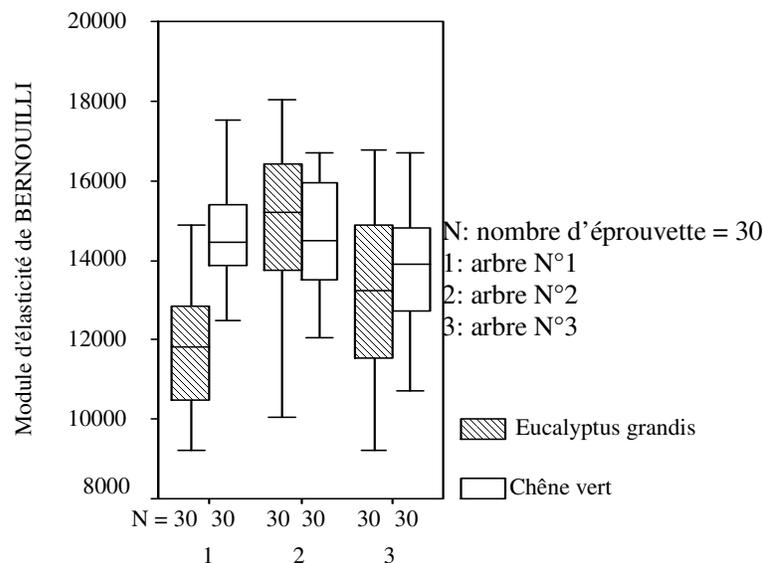


Figure 3.19: Représentation graphique en box plot du module d'élasticité dynamique de Bernoulli E_b d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.

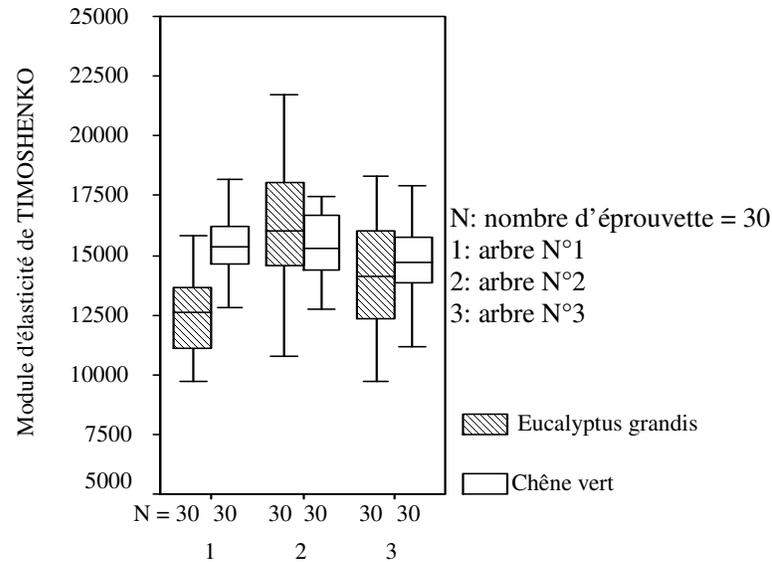


Figure 3.20: Représentation graphique en box plot du module d'élasticité dynamique de Timoshenko E_t d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.

Les dispersions sont pratiquement identiques des modules d'élasticité de Bernouilli et de Timoshenko pour les trois arbres d'Eucalyptus grandis et de chêne vert. L'étalement le plus important est observé pour les arbres 2 et 3 d'Eucalyptus grandis.

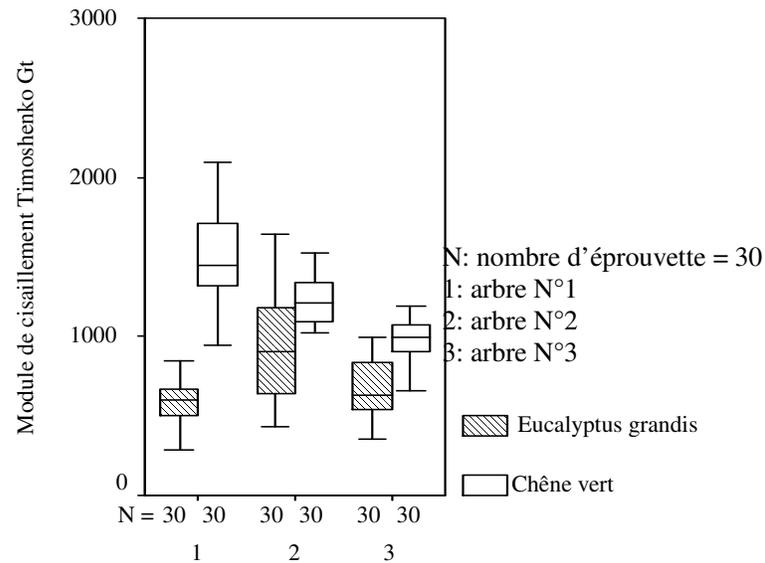


Figure 3.21: Représentation graphique en box plot du module de cisaillement dynamique de Timoshenko G_t d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.

La variabilité est importante pour le module de cisaillement de Timoshenko. La dispersion la plus importante est obtenue pour l'arbre 1 de chêne vert et l'arbre 2 d'Eucalyptus grandis.

Sur les échantillons des trois arbres étudiés (30 éprouvettes/arbre/espèce), les box plots montrent qu'il n'y a pas de différence significative des propriétés mécaniques des deux espèces.

I-4- Relation entre le module d'élasticité et l'infradensité ou la densité.

Les propriétés élastiques du bois sont sensibles aux variations de l'état physique des matériaux considérés [18]. Parmi les paramètres physiques dont l'influence est certaine nous avons retenu l'infradensité et la densité.

I-4-1- Relation entre le module d'élasticité longitudinal et l'infradensité.

La figure 3.22 montre une relation statistiquement significative entre l'infradensité et le module d'élasticité longitudinal pour toutes les éprouvettes confondues, mais les variations d'infradensité n'expliquent que 15% pour l'Eucalyptus grandis et 2% pour le chêne vert de la variation du module d'élasticité. D'autres paramètres comme l'âge, la vitesse de croissance et la composition chimique peuvent expliquer les variations constatées.

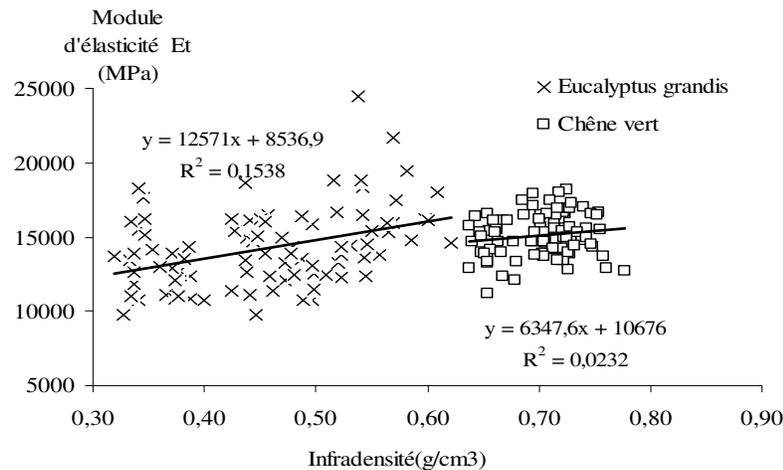


Figure 3.22: Relation entre le module d'élasticité dynamique et l'infradensité.

I-4-2- Relation entre le module spécifique longitudinal et la densité.

Les variations élevées du module spécifique (rapport entre E_t et D_h) figure 3.23 confirment l'influence d'autres paramètres que la densité. Il n'y a pas de relation significative entre ce module spécifique et la densité du bois.

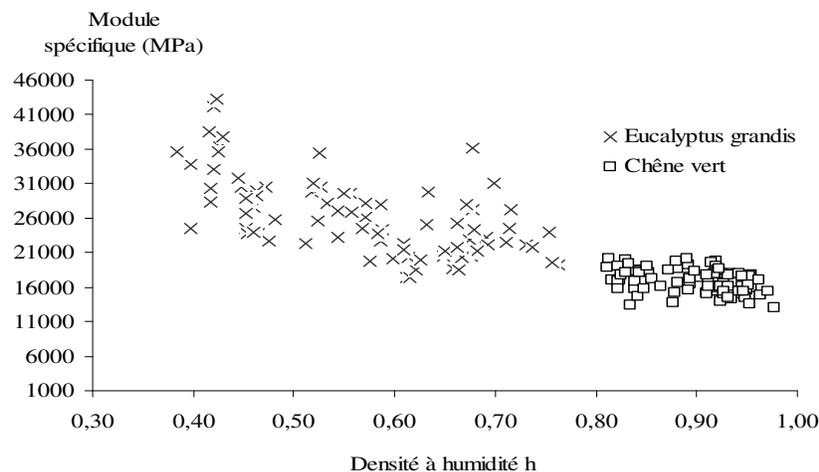


Figure 3.23: Relation entre le module spécifique et la densité à humidité h .

Nous avons remarqué que les plus grandes valeurs des propriétés physiques et des modules d'élasticité déterminées par la méthode de BING dans cette étude correspondent à l'arbre qui a la forte tension c'est-à-dire l'arbre N°2 qui a la plus forte valeur d'indicateur des contraintes de croissance GSI.

I-5- CONCLUSION

L'étude des indicateurs des contraintes de croissances GSI a montré d'une manière générale que les deux essences se comportent de manières différentes. En effet, pour l'Eucalyptus grandis espèce à croissance rapide 75% des valeurs des GSI mesurées sont inférieures à 90 µm, cette valeur était seulement à 31 µm pour le chêne vert espèce à croissance lente.

L'étude de la variation d'humidité et d'infradensité sur les rondelles montre que l'humidité et l'infradensité sont quasiment constantes dans le bois juvénile tandis qu'elles augmentent dans le bois adulte avec une chute à la périphérie.

Les caractéristiques obtenues dans cette étude permettent de classer le bois de chêne vert en un bois dur et l'Eucalyptus grandis en un bois mi-dur, nerveux, de fort retrait et une rigidité moyenne. Ces caractéristiques imposent le choix du mode de débit, du mode de séchage de ces deux essences et de mieux les utiliser sous forme de petits bois.

L'Eucalyptus grandis et le chêne vert présentent une nervosité élevée. Cet inconvénient trouve son origine dans la forme de la base du tronc qui conduit à une excentricité du cœur et à la formation de bois tension. Cette nervosité est un argument souvent avancé par l'industrie de transformation pour se désintéresser du bois d'Eucalyptus grandis et de chêne vert.

Nous allons voir si les différences de structures ont quelques influences sur la résistance de ces deux matériaux (Eucalyptus grandis et chêne vert) en traction, en particulier sur des éprouvettes en bois massif, bois collé bout à bout (assemblage le plus mauvais) et bois collé en biseau (assemblage le meilleur).

II- COMPORTEMENT MÉCANIQUE PAR TRACTION DU BOIS MASSIF ET DU BOIS COLLÉ BOUT A BOUT ET EN BISEAU D'EUCALYPTUS GRANDIS ET DE CHÊNE VERT.

Nous présenterons les résultats de l'étude du comportement du bois massif et du joint de colle d'un assemblage collé bout à bout et collé en biseau d'Eucalyptus grandis et de chêne vert lorsqu'ils sont soumis à un essai de traction. Nous avons travaillé sur les deux cas extrêmes, le premier assemblage bout à bout est considéré le plus mauvais et le second comme excellent. La fiabilité du collage est étudiée par la loi de Weibull à deux paramètres.

II-1- Courbe charge déplacement.

Les figures 3.24 et 3.25 représentent les courbes charge déplacement d'Eucalyptus grandis et de chêne vert pour le bois massif, bois assemblé bout à bout et bois assemblé en biseau.

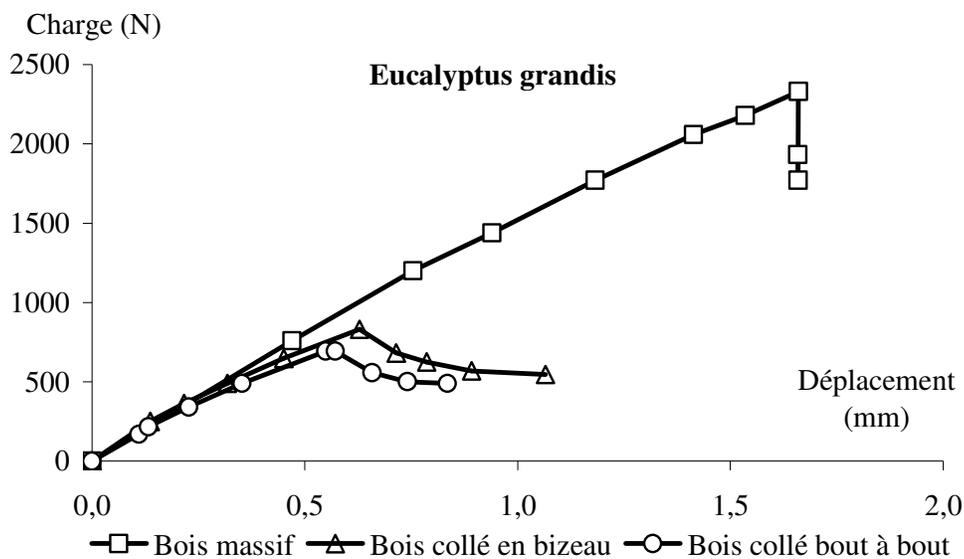


Figure 3.24: Courbe charge déplacement de traction du bois d'Eucalyptus grandis.

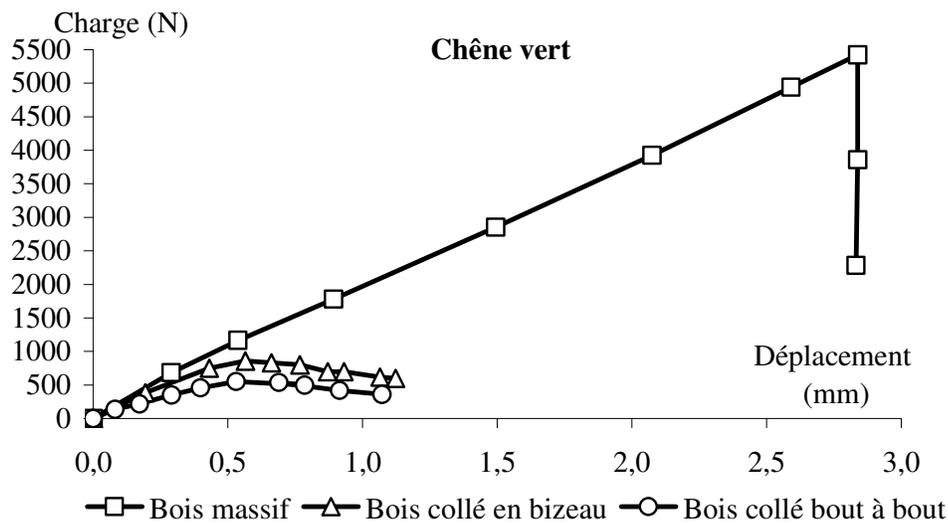


Figure 3.25: Courbe charge déplacement en traction du bois de Chêne vert.

Le bois massif des deux espèces présente une supériorité du comportement à celui du bois collé bien qu'il soit fragile et que la non linéarité du bois collé en biseau ou en bout à bout est due au joint de la colle polyuréthane (figures 3.24 et 3.25).

II-2- Variabilité des contraintes de rupture.

La représentation graphique en box plot (figures 3.26, 3.27 et 3.28) a l'avantage de comparer statistiquement les valeurs moyennes de la contrainte à la rupture (20 éprouvettes/arbre/espèce) du bois massif, bois collé en biseau et bois collé bout à bout d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.

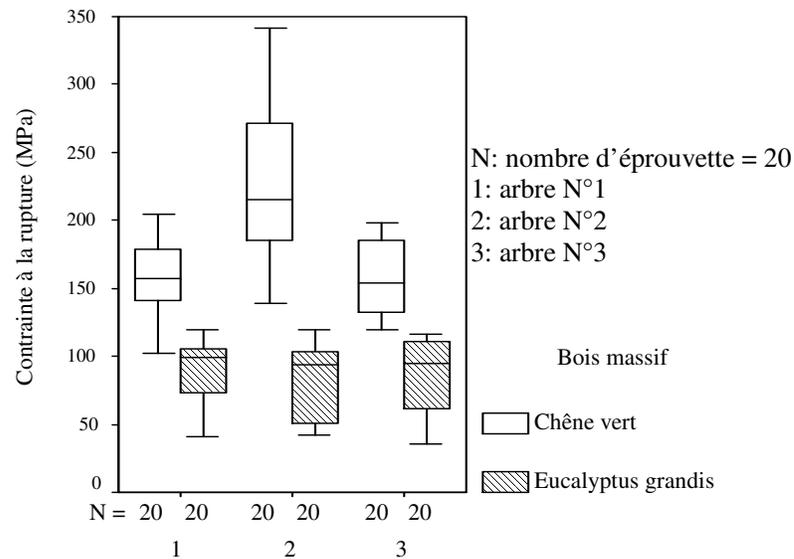


Figure 3.26: Représentation graphique en box plot de la contrainte à la rupture du bois massif d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.

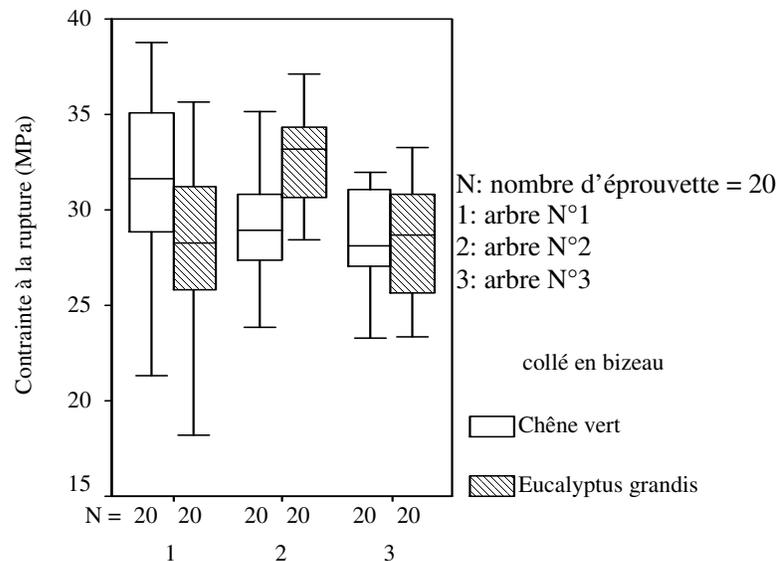


Figure 3.27: Représentation graphique en box plot de la contrainte à la rupture du bois collé en biseau d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.

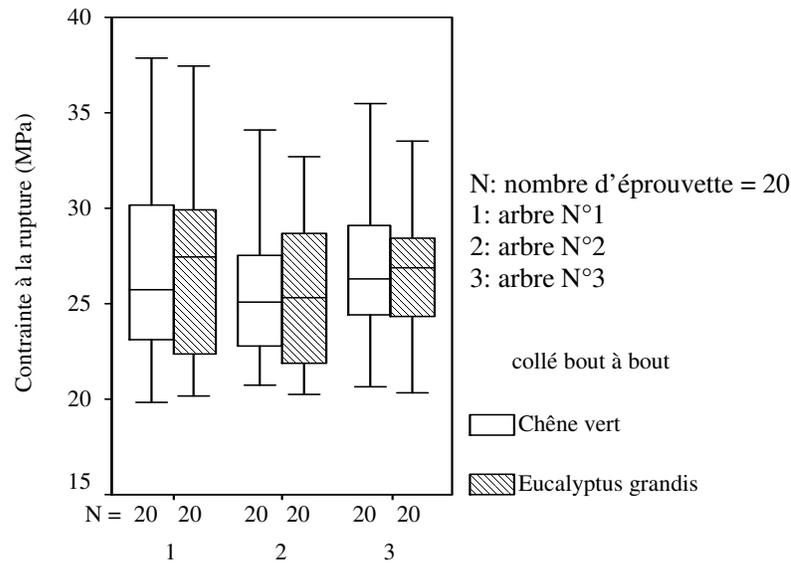


Figure 3.28: Représentation graphique en box plot de la contrainte à la rupture du bois collé bout à bout d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.

Les dispersions des valeurs de la contrainte de rupture sont pratiquement identiques pour le bois collé en biseau et le bois collé bout à bout. L'étalement le plus important est observé sur les éprouvettes issues de l'arbre 1 d'Eucalyptus grandis et de chêne vert.

II-3- Tableau récapitulatif des essais de traction.

Les tableaux 3.6 et 3.7 regroupent les résultats du bois massif (assimilé à un angle d'aboutage de $\alpha = 90^\circ$), du bois collé en biseau ($\alpha = 45^\circ$) et du bois collé bout à bout ($\alpha = 0^\circ$) d'Eucalyptus grandis et du Chêne vert (20 éprouvettes/nature/espèce).

Tableau 3.6: Tableau récapitulatif des essais de traction sur le bois d'Eucalyptus grandis.

Eprouvettes issue d'Arbre N°	Eucalyptus grandis	Charge de rupture (N)	Contraite de rupture σ_r (MPa)	Déplacement à rupture (mm)
1	Massif	2216,84	88,67	2,08
2	Massif	2031,60	81,26	1,77
3	massif	2157,77	86,31	1,98
1	Biseau	710,59	28,42	0,79
2	Biseau	805,93	32,24	0,73
3	Biseau	709,53	28,38	0,70
1	bout à bout	680,19	27,21	0,64
2	bout à bout	636,70	25,47	0,61
3	bout à bout	660,69	26,37	0,62

Tableau 3.7: Tableau récapitulatif des essais de traction sur le bois du Chêne vert.

Eprouvettes issue d'Arbre N°	Chêne vert	Charge de rupture (N)	Contrainte de rupture σ_r (MPa)	Déplacement à rupture (mm)
1	Massif	3966,95	158,68	2,71
2	Massif	5672,44	226,90	1,83
3	massif	3954,51	158,18	2,26
1	Biseau	777,79	31,11	0,71
2	Biseau	723,53	28,94	0,68
3	Biseau	704,89	28,19	0,69
1	bout à bout	672,30	26,90	0,63
2	bout à bout	645,45	25,82	0,64
3	bout à bout	672,05	26,88	0,62

On constate que la contrainte de rupture σ_r augmente lorsque l'angle d'aboutage augmente c'est-à-dire de l'assemblage bout à bout ($\alpha = 0^\circ$) à l'assemblage en biseau ($\alpha = 45^\circ$) au bois massif ($\alpha = 90^\circ$). Cependant nous étudions l'évolution de la contrainte de rupture σ_r , plus particulièrement la contrainte de cisaillement (cission) τ_α et la contrainte normale critique σ_α au niveau du joint de colle.

II-4- Définition de la contrainte normale et de la cission.

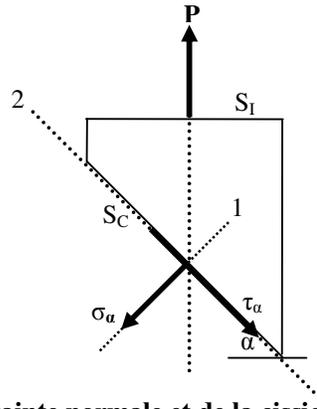


Figure 3.29: Définition de la contrainte normale et de la cission au niveau du joint de colle.

Dans la direction 1: Contrainte normale

$$P_\alpha = P \times \cos(\alpha)$$

$$\sigma_\alpha = \frac{P_\alpha}{S_C} = \frac{P \times \cos(\alpha)}{\frac{S_1}{\cos(\alpha)}} = \frac{P}{S_1} \times \cos^2(\alpha) = \sigma \times \cos^2(\alpha)$$

Dans la direction 2: Cission

$$P_\alpha = P \times \sin(\alpha)$$

$$\tau_\alpha = \frac{P_\alpha}{S_C} = \frac{P \times \sin(\alpha)}{\frac{S_1}{\cos(\alpha)}} = \frac{P}{S_1} \times \sin(\alpha) \times \cos(\alpha) = \sigma \times \sin(\alpha) \cos(\alpha)$$

II-5- Détermination de la contrainte normale σ_α et de la cission τ_α

Tableau 3.8: Tableau récapitulatif de la contrainte normale σ_α et de la cission τ_α sur le bois d'Eucalyptus grandis.

Eprouvettes issue d'Arbre N°	Eucalyptus grandis	Charge de rupture (N)	Contrainte normale σ_α (MPa)	Cission τ_α (MPa)
1	Massif	2216,84	-	-
2	Massif	2031,60	-	-
3	massif	2157,77	-	-
1	Biseau	710,59	14,21	14,21
2	Biseau	805,93	16,12	16,12
3	Biseau	709,53	14,19	14,19
1	bout à bout	680,19	27,21	-
2	bout à bout	636,70	25,47	-
3	bout à bout	660,69	26,37	-

Tableau 3.9: Tableau récapitulatif de la contrainte normale σ_α et de la cission τ_α sur le bois du Chêne vert.

Eprouvettes issue d'Arbre N°	Chêne vert	Charge de rupture (N)	Contrainte normale σ_α (MPa)	Cission τ_α (MPa)
1	Massif	3966,95	-	-
2	Massif	5672,44	-	-
3	massif	3954,51	-	-
1	Biseau	777,79	15,56	15,56
2	Biseau	723,53	14,47	14,47
3	Biseau	704,89	14,09	14,09
1	bout à bout	672,30	26,90	-
2	bout à bout	645,45	25,82	-
3	bout à bout	672,05	26,88	-

Pour le bois massif et le bois collé bout à bout, nous sommes en présence d'une rupture en traction. C'est la contrainte normale qui gouverne ce mode de rupture. Pour le bois collé en biseau il y'a une rupture qui associe à la fois la traction et le cisaillement. Le type de rupture est cohésif pour le bois collé bout à bout et pour le bois collé en biseau alors que dans le bois massif la rupture est dans la section réduite de l'éprouvette.

Nous avons étudié le cas deux angles d'aboutage ($\alpha = 0^\circ$ et $\alpha = 45^\circ$). La représentation Mohr Caquot nous a permis de déterminer graphiquement la contrainte normale et tangentielle pour d'autres angles d'aboutage.

II-6- Généralisation sur d'autres angles d'aboutage par la représentation de Mohr Caquot

On peut déduire l'état de contrainte pour d'autres angles d'aboutage (15° , 30° , 60° et 75°) par le cercle de Mohr. En effet, on décompose l'état de contrainte sur le joint de colle en contrainte normale et tangentielle.

Où α : angle d'aboutage et φ : angle que fait la normale avec l'axe principal X.

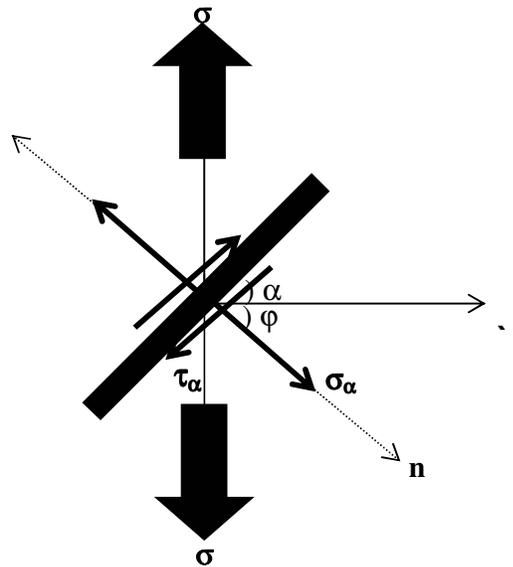


Figure 3.30: Contrainte normale et tangentielle au niveau du joint de colle.

Les équations paramétriques trouvées au II-3:

$$\sigma_{\alpha} = \sigma \times \cos^2(\alpha) = \frac{\sigma}{2}(1 + \cos(2\alpha))$$

$$\tau_{\alpha} = \sigma \times \sin(\alpha) \cos(\alpha) = \frac{\sigma}{2} \sin(2\alpha)$$

Nous a permet de tracer un cercle de centre $(\sigma/2, 0)$ est de rayon $\sigma/2$. L'angle d'aboutage $2\alpha=180^{\circ}$ qui correspond au bois massif dans notre cas, n'a pas de sens dans cette étude. Si on prend par exemple, le cas d'Eucalyptus grandis:

Pour $2\alpha = 0^{\circ}$, bois collé bout à bout $\sigma_{\alpha} = \sigma = 26,25$ (MPa)

Pour $2\alpha = 90^{\circ}$, bois collé en biseau $\sigma_{\alpha} = \sigma / 2 = \tau_{\alpha} = 14,84$ (MPa)

Compte tenu de la complexité du matériau bois et de sa grande variabilité, la contrainte de rupture augmente avec l'angle d'aboutage. La contrainte normale diminue entre 0° et 180° alors que la contrainte tangentielle augmente. Cette remarque est décrite par l'enveloppe de Mohr Caquot

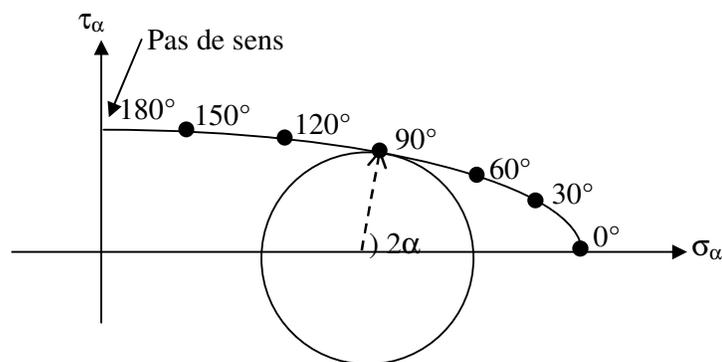


Figure 3.31: Représentation de Mohr Caquot

À partir de l'enveloppe Mohr Caquot (figure 3.31), on peut identifier et avoir une idée sur les valeurs de la contrainte normale et tangentielle, pour n'importe quel angle d'aboutage $2\alpha \in [0^\circ, 180^\circ [$.

II-7- Fiabilité des assemblages par Weibull.

Le bois massif ou lamellé collé est un matériau composite hétérogène dont la réponse mécanique doit être analysée de manière fiabiliste. De nombreux modèles statistiques ou probabilistes ont été développés sur le bois [98] mais aussi sur d'autres matériaux hétérogènes tel que le béton [99, 100].

Les bois d'Eucalyptus grandis et de chêne vert présentent de bonnes qualités mécaniques mais posent un problème de nervosité forte. L'approche fiabiliste de Weibull permet de quantifier la dispersion des résultats par le biais de la valeur du module de Weibull m , de calculer le facteur de normalisation σ_0 et de définir le facteur de sécurité pour une valeur de probabilité de rupture conventionnelle.

II-7-1- Application du modèle de Weibull à deux paramètres.

Le bois est un matériau quasi fragile, sa résistance est directement liée aux défauts présents (nœuds, gerces, fentes.....). Le modèle statistique de Weibull à deux paramètres permet d'obtenir la probabilité de rupture d'un élément en fonction de l'état de contrainte.

La probabilité de rupture ($P_r(\sigma)$) s'écrit:

$$P_r(\sigma) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right)$$

Avec: $P_r(\sigma)$: Probabilité de rupture
 σ_0 : Facteur de normalisation
 m : Module de weibull

La probabilité de rupture expérimentale est donnée par le rang médian de la distribution, spécifié comme:

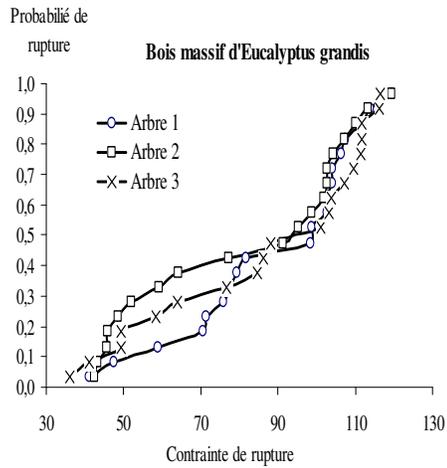
$$P_r = \frac{i - 0.3}{N + 0.4}$$

i est le de l'essai correspondant dans le classement des N essais.

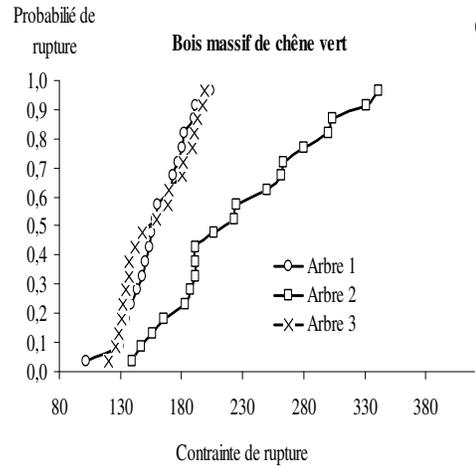
En pratique, pour N essais effectués les valeurs de la contrainte de la rupture sont classées dans une série croissante: $\sigma_{r1} < \sigma_{r2} < \dots < \sigma_{rN}$

Les figures 3.32 et 3.33 représentent respectivement l'évolution de la probabilité de rupture en fonction de la contrainte de rupture des éprouvettes issues des trois arbres du bois d'Eucalyptus grandis et de chêne vert (massif, collé en biseau et collé bout à bout).

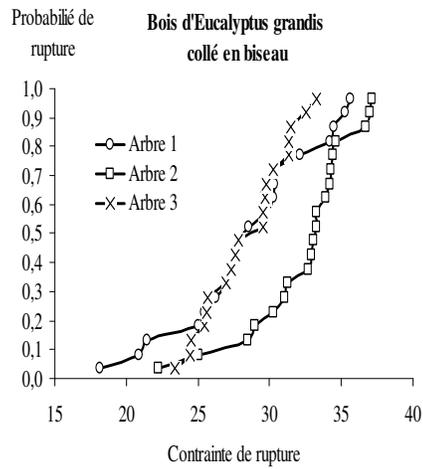
La dispersion la plus importante de la probabilité de rupture expérimentale en terme de contrainte de rupture est observée sur le bois massif (les trois arbres d'Eucalyptus grandis et l'arbre 2 de chêne vert) et sur le bois collé en biseau (arbre 2 d'Eucalyptus grandis et l'arbre 1 de chêne vert). Ceci pourrait s'expliquer par le fait que le bois est un matériau hétérogène, par les GSI, par la densité et par le type de l'assemblage et les conditions de collage.



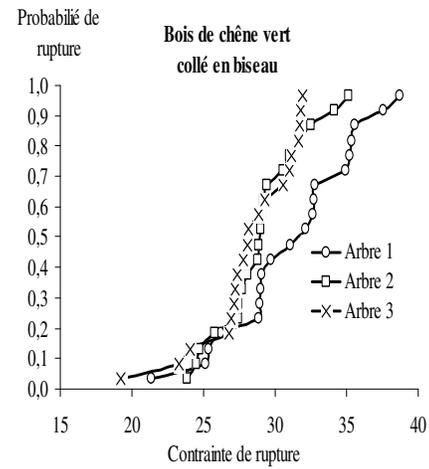
(a)



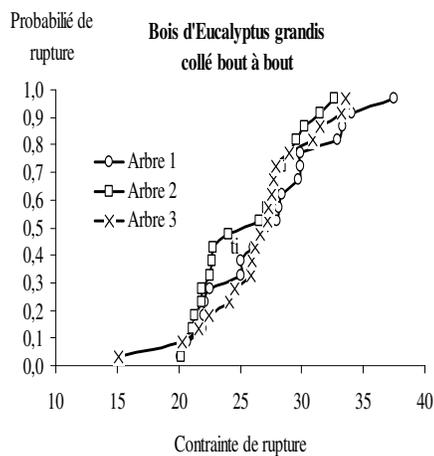
(a)



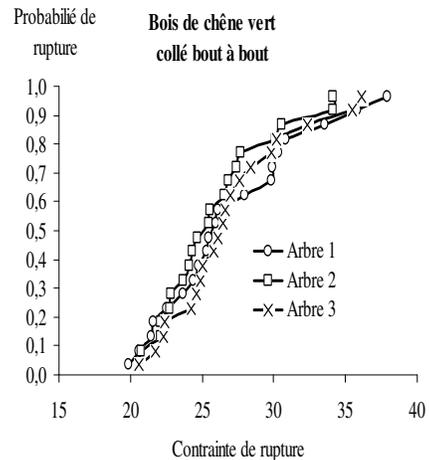
(b)



(b)



(c)



(c)

Figure 3.32: Probabilité de rupture en fonction de la contrainte de rupture des éprouvettes issues des trois arbres du bois d'Eucalyptus grandis (massif, collé en biseau et collé bout à bout).

Figure 3.33: Probabilité de rupture en fonction de la contrainte de rupture des éprouvettes issues des trois arbres du bois de chêne vert (massif, collé en biseau et collé bout à bout).

II-7-2- Calcul des paramètres de la distribution de Weibull

La méthode d'estimation des paramètres de la distribution de Weibull utilisée est la méthode des moments dont l'équation est:

$$Y = \text{LnLn}\left(\frac{1}{1 - P_r(\sigma)}\right) = m\text{Ln}(\sigma) - m\text{Ln}(\sigma_0)$$

Les tableaux 3.10 et 3.11 regroupent les paramètres de la loi de Weibull du bois d'Eucalyptus grandis et de chêne vert pour la distribution à deux paramètres. Ces valeurs ont été vérifiées par Jallouf [101] sur le logiciel mathématica 5.2.

Tableau 3.10: Paramètres de la loi de Weibull du bois d'Eucalyptus grandis pour la distribution à deux paramètres.

E. Grandis	Bois massif				Bois collé en biseau				Bois collé bout à bout			
	Arbre	1	2	3	Moy	1	2	3	moy	1	2	3
m	3,92	3,29	3,22	3,48	6,60	9,37	11,60	9,19	6,83	7,99	6,54	7,12
σ_0	98,72	89,94	96,28	94,98	30,42	33,91	29,59	31,31	29,02	26,95	28,30	28,09
σ_{moy}	88,67	81,26	86,31	85,42	28,42	32,23	28,38	29,68	27,21	25,47	26,43	26,37

Tableau 3.11: Paramètres de la loi de Weibull du bois de chêne vert pour la distribution à deux paramètres.

Chêne vert	Bois massif				Bois collé en biseau				Bois collé bout à bout			
	arbre	1	2	3	moy	1	2	3	moy	1	2	3
m	7,09	4,48	7,22	6,26	7,82	11,59	9,62	9,68	6,72	8,55	8,12	7,80
σ_0	169,17	247,47	168,14	194,93	33,01	30,18	29,62	30,94	28,69	27,23	28,42	28,11
σ_{moy}	158,69	226,90	158,18	181,25	31,11	28,94	28,20	29,42	26,89	25,81	26,88	26,53

Ou σ_{moy} : contrainte de rupture moyenne (MPa),
 σ_0 : facteur de normalisation (MPa)
 m: module de Weibull

Le module de Weibull m est un paramètre caractéristique du matériau et donne une idée de la dispersion. Il diminue quand la fragilité des matériaux augmente. Le bois massif d'Eucalyptus grandis et de chêne vert présente respectivement une grande dispersion des valeurs des contraintes de rupture mesurées, donc un module de Weibull m très faible en moyenne. Nous constatons que l'arbre du bois massif qui a le plus faible module de Weibull m, son bois collé a un module m le plus important (arbre 3 d'Eucalyptus grandis et arbre 2 du chêne vert).

Des essais de flexion, sur des éprouvettes en bois massif, la valeur de m est au voisinage de 9 pour l'Eucalyptus camaldulensis [102], d'environ 21 pour l'Eucalyptus gomphocephala [103] et dans notre étude est d'environ 3 pour l'Eucalyptus grandis. L'écart de m entre les espèces massifs d'eucalyptus est dû, soit à la structure anatomique ou soit à la densité qui est d'environ 0,83 pour l'Eucalyptus camaldulensis [102], 1,03 pour l'Eucalyptus gomphocephala [103] et 0,45 pour l'Eucalyptus grandis.

Sur le tableau 3,12 nous regroupons les paramètres intrinsèques de Weibull issu d'essai de flexion quatre points sur des éprouvettes de dimension (Longueur = 500 mm, Largeur = 100mm, épaisseur = 24mm) en bois massif et en bois abouté à entures multiples (Projet PRAD entre la DREF de Rabat et le CIRAD Forêt de Montpellier) [104].

Tableau 3.12: Paramètres de la loi de Weibull des bois d'eucalyptus E. grandis, E. gomphocephala et du sapin blanc pour la distribution à deux paramètres [104].

	Sapin blanc		E. grandis		E. gomphocephala	
	massif	abouté	massif	abouté	massif	abouté
m	6,52	10,56	7,29	9,67	20,65	8,45
σ_0	52,32	48,07	96,57	69,19	139,50	83,50
σ_{moy}	48,84	45,34	87,37	65,87	136,16	78,98

Le facteur de normalisation est légèrement supérieur à la contrainte de rupture moyenne qui est un paramètre intrinsèque de chaque arbre de chaque essence.

II-7-3- Facteurs de sécurité des assemblages.

La fiabilité du bois massif ou du bois collé est donnée par:

$$R(\sigma) = 1 - P_r(\sigma) = \exp\left(-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right)$$

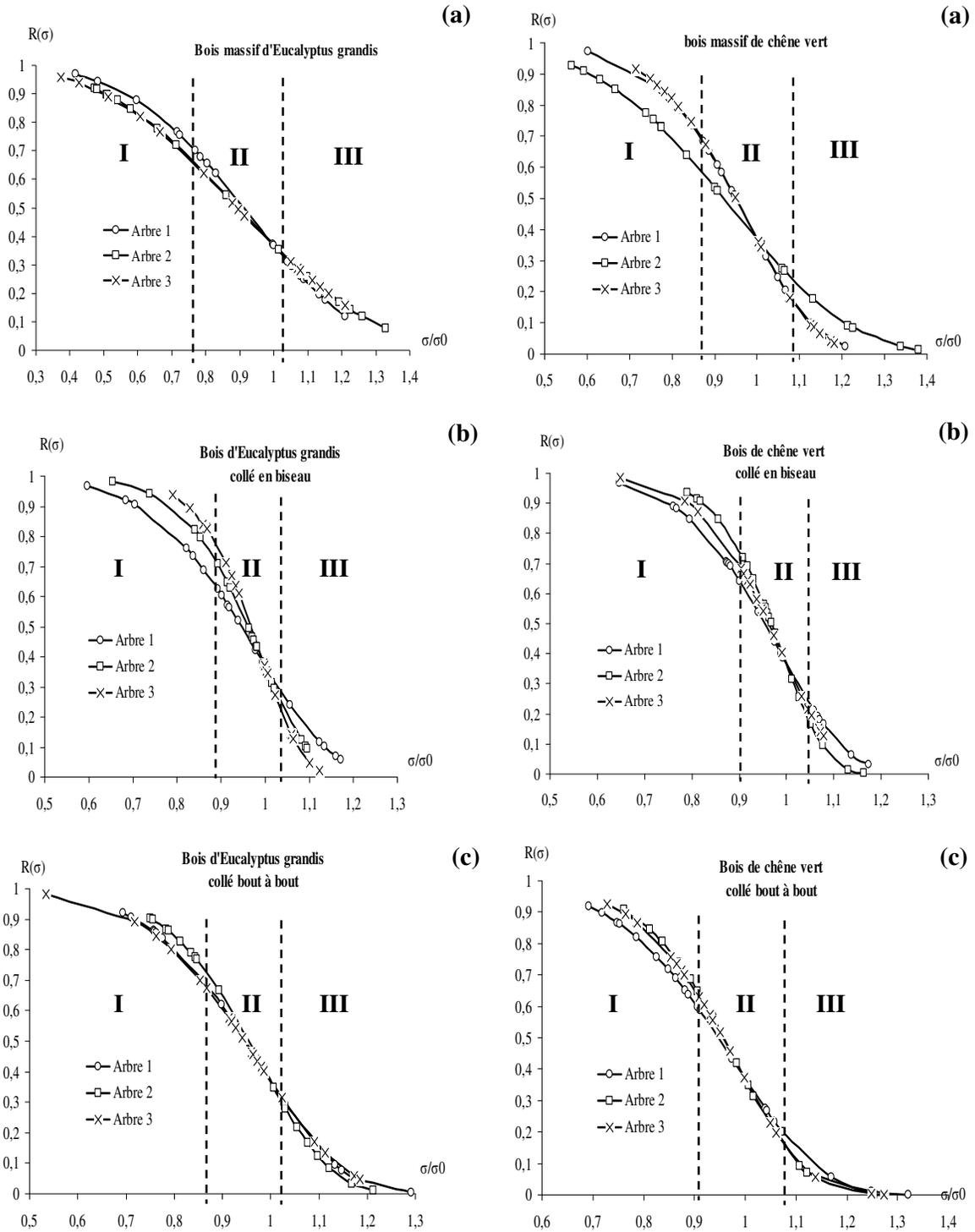
Nous avons rapporté respectivement sur les figures 3.34 et 3.35 l'évolution de la fiabilité $R(\sigma)$ en fonction du rapport de la contrainte de rupture en traction sur le facteur de normalisation (σ/σ_0) des éprouvettes issues de trois arbres du bois d'Eucalyptus grandis et de chêne vert (massif, collé en biseau et collé bout à bout).

Nous constatons la présence de trois domaines différents limités par le changement de la courbure.

Dans le premier domaine I: la fiabilité est maximale, elle est limitée par la contrainte d'utilisation, le coefficient de sécurité pour un effort de traction est de 2,17 pour le bois massif, 3,02 pour le bois collé en biseau et 4,48 pour le bois collé bout à bout d'Eucalyptus grandis, contre respectivement 2,45 pour le bois massif, 3,97 pour le bois collé en biseau et 6,82 pour le bois collé bout à bout de chêne vert. Dans la littérature le coefficient de sécurité pour le bois est 2,75 [71].

Dans le second domaine II: la fiabilité diminue linéairement en fonction de la contrainte. Ce domaine est limité par la contrainte limite d'élasticité.

Dans le troisième domaine III: la fiabilité diminue rapidement, ceci se traduit par une rupture brutale.



Figures 3.34: Évolution de la fiabilité en fonction de la contrainte de rupture sur le facteur de normalisation du bois d'Eucalyptus grandis (massif, collé en biseau et collé bout à bout).

Figures 3.35: Évolution de la fiabilité en fonction de la contrainte de rupture sur le facteur de normalisation du bois de chêne vert (massif, collé en biseau et collé bout à bout).

II-7-4- Superposition fiabilité défaillance

Contrairement à la fiabilité R, la défaillance Q qui évolue en sens inverse avec R et qui est la probabilité de rupture.

$$Q(\sigma) = 1 - R(\sigma) = \exp\left(-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right) = P_r(\sigma)$$

La superposition de la courbe de fiabilité et celle de la défaillance montre un inversement de situation au point d'intersection des deux courbes. Ce point se traduit par R = Q = 0,5 dont les valeurs de la contrainte de rupture sur le facteur de normalisation sont données sur le tableau 3.13.

Tableau 3.13: Contrainte de rupture sur le facteur de normalisation à R = Q = 0,5

σ / σ_0	Bois massif	Bois collé en biseau	Bois collé bout à bout
Eucalyptus grandis	0,900	0,961	0,950
Chêne vert	0,943	0,963	0,954

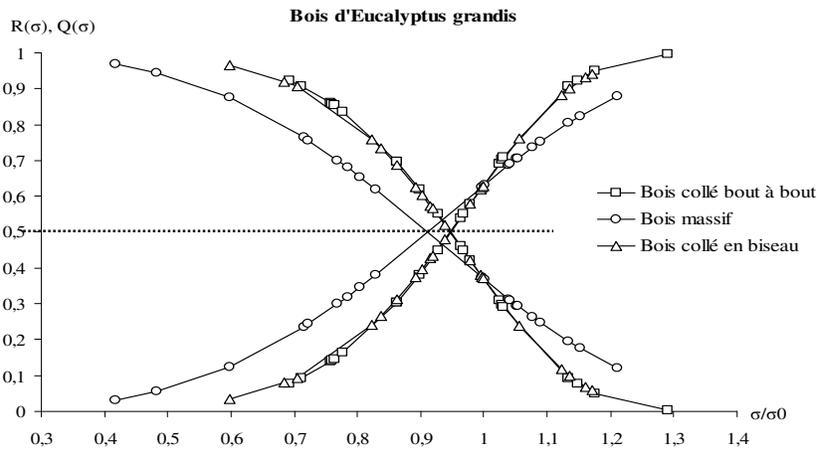


Figure 3.36: Superposition des courbes fiabilité et défaillance d'Eucalyptus grandis.

Le bois massif d'Eucalyptus grandis atteint le point d'intersection avant celui du bois collé (figure 3.36) cela veut que dire l'assemblage collé bout à bout et en biseau augmente la fiabilité du système collé.

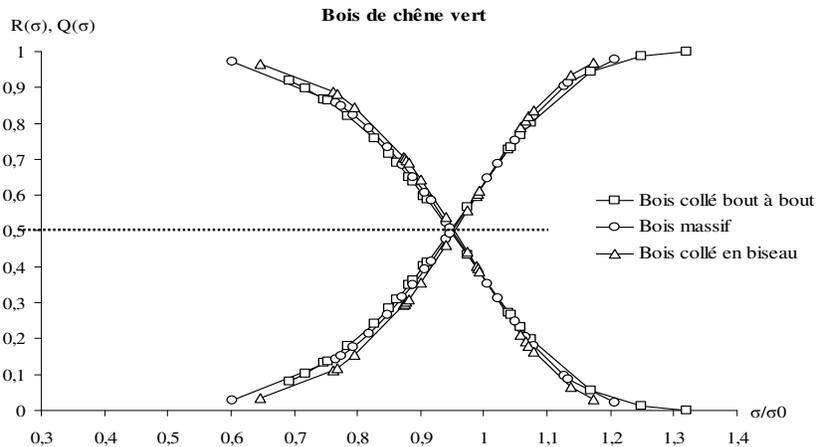


Figure 3.37: Superposition des courbes fiabilité et défaillance de chêne vert.

Le bois massif et le bois collé de chêne vert atteindront le point d'intersection au même moment (figure 3.37), cela veut que dire l'assemblage collé bout à bout et en biseau à une fiabilité similaire à celle du bois massif.

Nous pouvons juger que le collage serait une solution pour employer ces deux essences dans l'industrie des lamellés collés.

II-6- CONCLUSION

Dans cette partie nous avons comparé la contrainte à la rupture du bois massif et du bois collé en biseau et bout à bout d'Eucalyptus grandis et de chêne vert.

Le comportement mécanique en traction du bois massif est fragile tandis que le bois collé bout à bout et collé en biseau est non linéaire.

Le bois massif de chêne vert présente une contrainte de rupture deux fois supérieure à celle d'Eucalyptus grandis alors que le bois collé est presque similaire pour ces deux feuillus.

Sur le bois massif et le bois assemblé bout à bout, nous sommes en présence d'une rupture en traction gouvernée par la contrainte normale, tandis que la rupture du bois assemblé en biseau est associée à la fois la traction et le cisaillement.

Le bois massif d'Eucalyptus grandis et de chêne vert présentent respectivement une grande dispersion par rapport à celui du bois collé en biseau ou bout à bout, ce qui se traduit par un faible module de Weibull m . Ce module m peut être un paramètre de dimensionnement des assemblages comme le facteur de sécurité. La fiabilité du bois massif et du bois collé permet de quantifier les effets de la colle sur le comportement d'assemblage.

L'assemblage collé peut être une solution pour ces deux feuillus nerveux réputés difficiles puisque le collage minimise la dispersion en terme de contrainte de rupture. La fiabilité du bois collé est légèrement supérieure au bois massif d'Eucalyptus grandis et presque similaire au bois de chêne vert.

Nous allons voir dans la suite par le biais d'une approche par la mécanique linéaire de la rupture, la détermination de la ténacité G_{1c} (taux de restitution d'énergie) et le facteur d'intensité des contraintes K_{1c} du bois massif et du bois collé d'Eucalyptus grandis et de chêne vert. Une analyse des faciès et des surfaces de rupture au stéréomicroscope viendra compléter l'étude.

III- TÉNACITÉ DU BOIS MASSIF ET DU BOIS COLLÉ D'EUCLYPTUS GRANDIS ET DE CHÊNE VERT.

La résistance mécanique du bois massif et du bois collé d'Eucalyptus grandis et de chêne vert est déterminée par la méthode de complaisance qui consiste à mesurer la ténacité G_{Ic} en terme du taux de restitution d'énergie et d'en déduire le facteur d'intensité des contraintes K_{Ic} pour le bois massif et le bois collé. Une analyse anatomique des faciès et des surfaces de rupture par le stéréomicroscope viendra compléter l'étude.

III-1- Courbe charge-déplacement.

La figure 3.38 (a et b) montre l'allure générale de la courbe charge-déplacement obtenue dans le cas d'une éprouvette DCB en bois massif et en bois collé des espèces d'Eucalyptus grandis et de chêne vert soumis à un essai de traction en mode I.

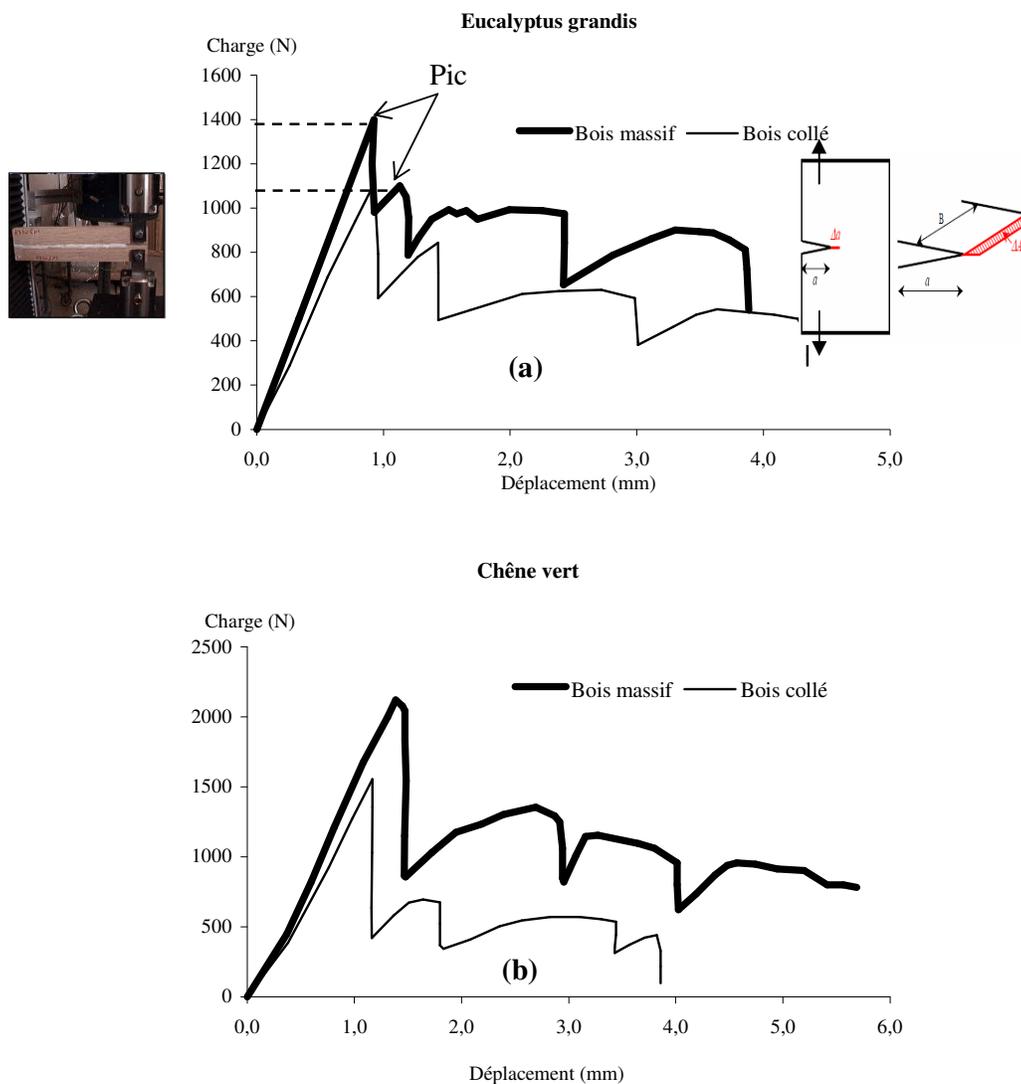


Figure 3.38: Courbe charge déplacement des éprouvettes DCB massives et collées des bois d'Eucalyptus grandis (a) et de chêne vert (b).

La force appliquée augmente progressivement et l'éprouvette DCB s'ouvre jusqu'à la propagation brutale de la fissure, provoquant ainsi la décharge élastique. Ce phénomène se répète jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette. L'allure des courbes (figure 3.38) des éprouvettes en bois massif ou collé sont similaires pour les deux espèces. Nous remarquons que la charge appliquée diminue d'une façon significative avec la longueur de la fissure.

La mesure de la force à la rupture lors de ces essais permet de déterminer la ténacité. Les caractéristiques charge-déplacement présentent des domaines élastiques et non élastiques. Nous supposons qu'il n'y a pas de propagation de fissure avant le pic de la charge et que le comportement non linéaire avant les autres pics est dû à un développement de microfissures. La diminution de rigidité engendrée après chaque pic est due à une augmentation de longueur de la fissure.

III-2- Application du critère énergétique au bois massif et au bois collé.

Pour chaque éprouvette DCB, nous avons tracé la complaisance en fonction de la fissure a . La complaisance C est la pente de la courbe charge-déplacement dans sa partie linéaire donnée par:

$$C = \frac{\delta}{P}$$

Où P : est la charge

δ : l'ouverture de la fissure.

Pour l'approximation de la courbe de complaisance en fonction de la longueur de la fissure a , nous avons opté pour un lissage des points expérimentaux en utilisant une fonction exponentielle, ce qui permet d'obtenir facilement la valeur de dC/da .

La ténacité G_{1c} (ou le taux de restitution d'énergie) représente l'énergie nécessaire pour créer deux surfaces de valeur bda , où b est l'épaisseur et da l'incrément unitaire de longueur de fissure, est donnée par:

$$G_{1c} = \frac{P^2}{2b} \frac{\partial C}{\partial a}$$

III-2-1- Courbe de complaisances.

La figure 3.39 illustre l'évolution de la complaisance C en fonction de la longueur de la fissure pour des bois massifs et collés des espèces d'Eucalyptus grandis (figure 3.39a) et de chêne vert (figure 3.39b).

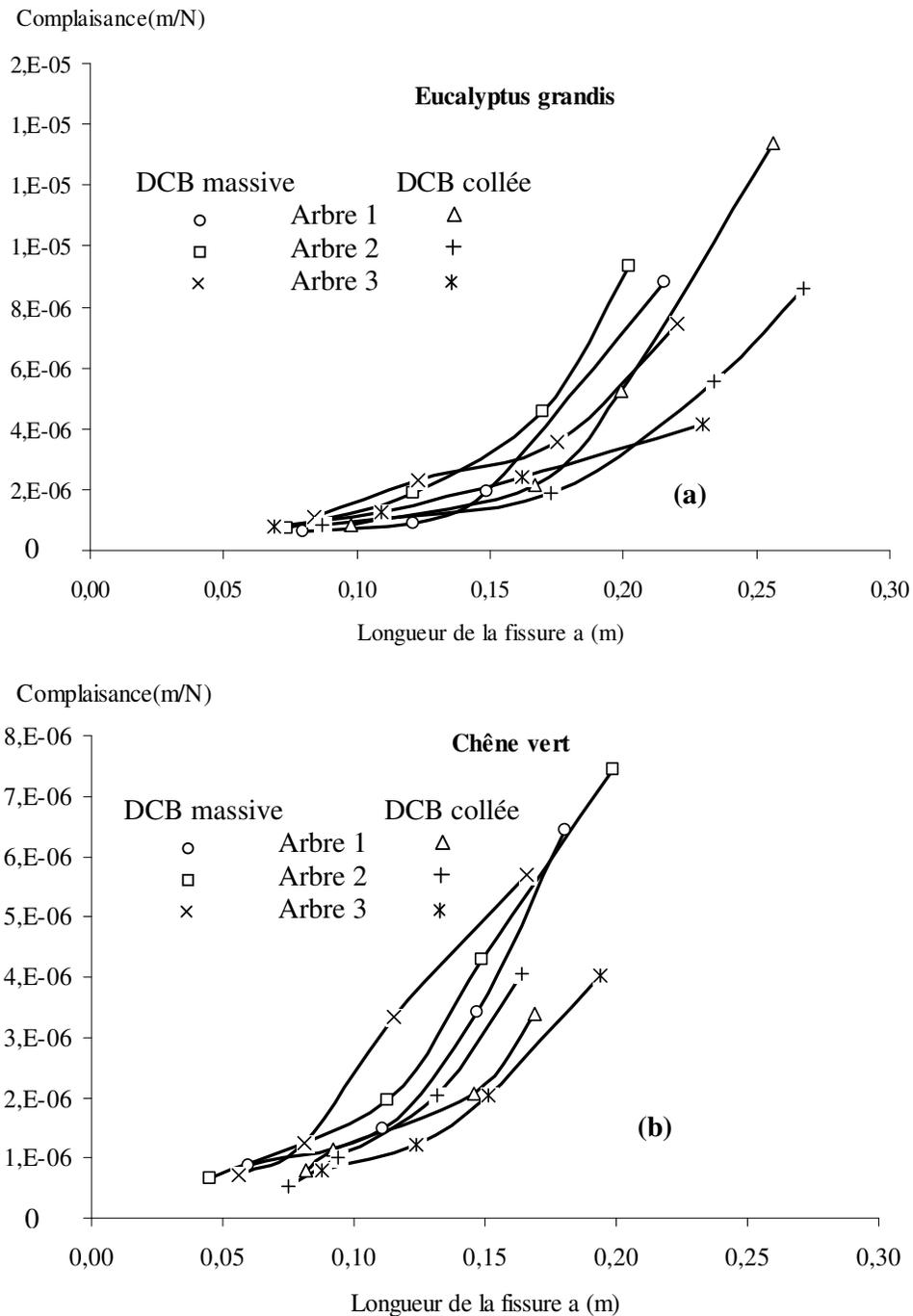


Figure 3.39: Courbe de complaisance des éprouvettes DCB massives et collées issus des bois d'Eucalyptus grandis (a) et de chêne vert (b).

La complaisance mesurée sur du bois collé est similaire à celle mesurée sur du bois massif. Nous remarquons que la rigidité des deux essences diminue en fonction de la longueur du défaut. Le joint de colle en polyuréthane n'a donc pas d'influence notable sur la rigidité de l'éprouvette.

III-2-2- Ténacité du bois massif et du bois collé

La ténacité résultant des courbes de complaisance est représentée sur les figures 3.40.

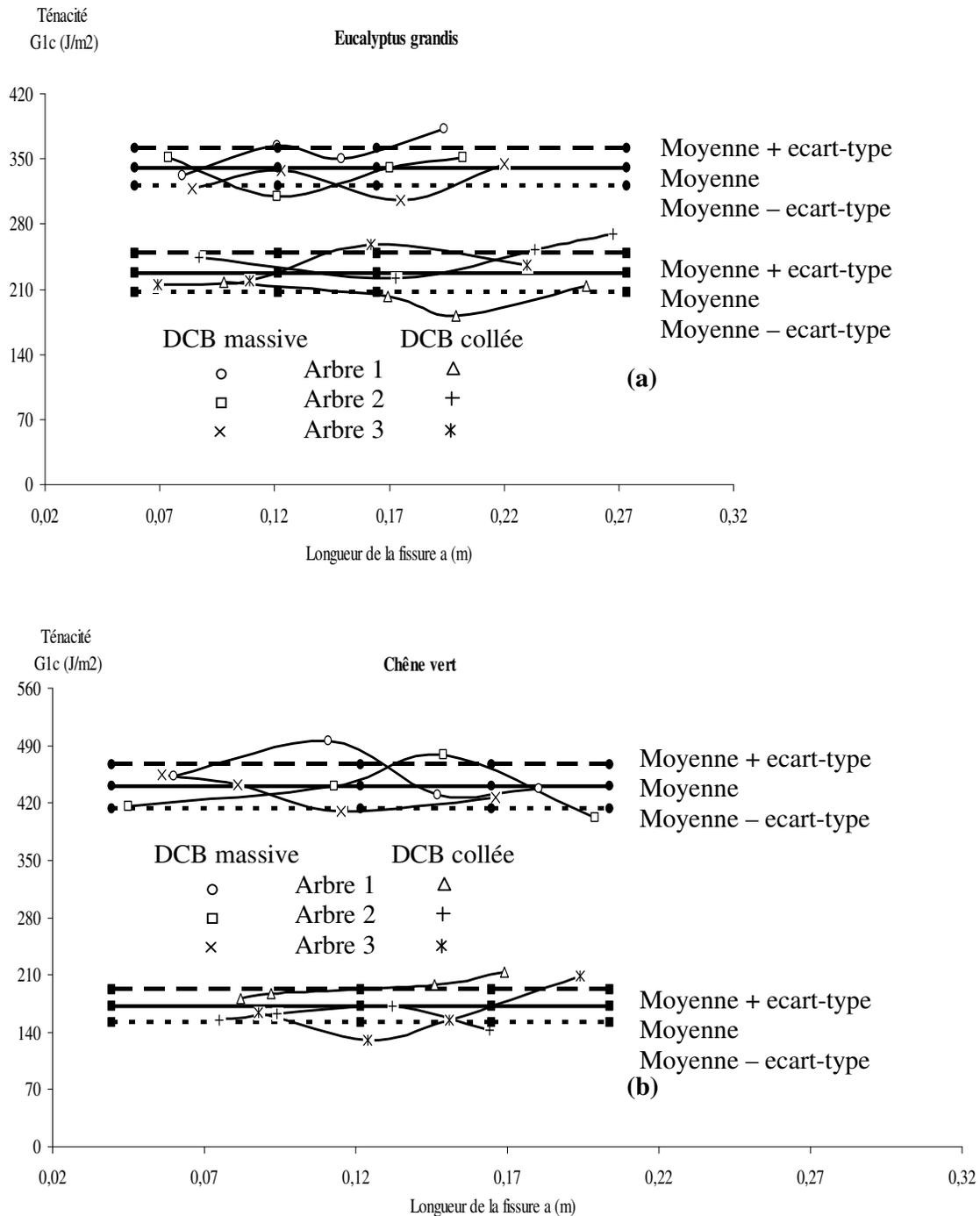


Figure 3.40: Ténacité en fonction de la longueur de la fissure. Moyenne des trois arbres et de chaque arbre du bois massif et du bois collé d'Eucalyptus grandis (a) et de chêne vert (b).

La figure 3.40 illustre que la ténacité du bois massif des deux espèces est beaucoup plus élevée que celle du bois collé et que le bois massif de chêne vert est plus tenace que l'Eucalyptus grandis. Ceci pourrait s'expliquer par les différences anatomiques de ces deux espèces feuillus, d'âge et structure particulière (bois de tension), la colle utilisée et aussi par des ruptures aléatoires dans la colle ou dans le bois.

Nous constatons que la majorité des valeurs de la ténacité se trouve dans une bande limitée entre la valeur moyenne plus l'écartype et moins l'écartype. Elle est indépendante de la longueur de la fissure. Les résultats expérimentaux montrent que les valeurs de la ténacité G_{1c} pour le bois massif et le bois collé des espèces d'Eucalyptus grandis et de chêne vert vérifient cette indépendance ce qui permet de dire que la ténacité G_{1c} est bien une caractéristique des matériaux étudiés.

La colle utilisée dans cette étude est le polyuréthane, ses caractéristiques [105] sont groupées dans le tableau 3.14 avec ceux des bois massifs et collés d'Eucalyptus grandis et de chêne vert:

Tableau 3.14: Constantes rhéologiques et ténacité des matériaux étudiés.

	Eucalyptus grandis		Chêne vert		Colle polyuréthane
	massif	collé	massif	collé	
E_R (MPa)	1680	1907	2023	2078	2133
E_T (MPa)	879	1506	1296	1715	
E_L (MPa)	14300	8217	15100	8617	
ν_{RT}	0,67	0,51	0,65	0,50	0,35
ν_{TR}	0,36	0,36	0,42	0,39	
ν_{LT}	0,47	0,41	0,45	0,40	
ν_{TL}	0,03	0,19	0,04	0,20	
ν_{RL}	0,04	0,20	0,05	0,20	
ν_{LR}	0,38	0,37	0,40	0,38	
G_{TL} (MPa)	914	852	1080	935	790
G_{RL} (MPa)	1215	1003	312	551	
G_{RT} (MPa)	1359	1075	460	625	
G_{1c} (J/m ²)	341	227	440	172	

Le comportement des bois massifs et collés est orthotrope et la colle est isotrope. La ténacité du bois massif ou collé est supérieure à celle de la colle pure pour les deux essences.

La validité des travaux que nous avons réalisés avec ceux de la littérature .

III-3- Confrontation de nos résultats expérimentaux avec d'autres méthodes.

La ténacité (ou le taux de restitution d'énergie) peut être déterminée de plusieurs façons. Dans notre étude nous avons choisi trois autres méthodes pour les comparer avec la méthode expérimentale de la complaisance:

- Méthode relative à la norme ASTM D 3433-75

$$G_{1c}^{ASTM} = \frac{4P_c^2}{E_L b^2} \left[\frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h} \right]$$

- Eprouvette DCB considérée comme deux poutres encastrées

$$G_{1c}^{ASTM} = \frac{4P_c^2}{E_L b^2} \left[\frac{3a^2}{h^3} + 0.3 \frac{E_L}{G_{LT} h} \right]$$

Avec P_c : Charge critique appliquée au système
 a : Longueur initiale du fissure
 b : Epaisseur de l'éprouvette
 E_L : module d'élasticité longitudinale de flexion
 G_{LT} : Module de cisaillement correspondant au plan LT

- Calculs par éléments finis (Castem 2000) (annexe C)

Les tableaux 3.15 et 3.16 regroupent les valeurs de la ténacité moyenne des trois arbres de chaque espèce avec leur coefficient de variation (CV: est une mesure de la dispersion relative correspondant au rapport de l'écart-type à la moyenne et exprimé sous forme de pourcentage) et de chaque arbre pour le bois massif et le bois collé d'Eucalyptus grandis et de chêne vert.

Tableau 3.15: Comparaisons des Ténacités expérimentales, deux poutres encastrées, ASTM D3433-75 et Castem2000. Moyenne des trois arbres et de chaque arbre du bois massif et du bois collé d'Eucalyptus grandis.

G_{1c} (J/m ²)	N° d'arbre Moyenne (CV)	Expérimentale	deux poutres encastrées	ASTM D3433-75	Castem2000
Bois massif d'eucalyptus grandis	1	357 (6)	337 (15)	306 (19)	-
	2	339 (6)	292 (28)	247 (23)	-
	3	326 (6)	314 (26)	274 (32)	-
	moyenne	341	314	276	339
Bois collé d'eucalyptus grandis	1	198 (11)	232 (17)	210 (15)	-
	2	253 (9)	206 (32)	182 (38)	-
	3	232 (8)	224 (18)	196 (24)	-
	moyenne	227	221	196	224

Tableau 3.16: Comparaisons des Ténacités expérimentales, deux poutres encastrées, ASTM D3433-75 et. Castem Moyenne des trois arbres et de chaque arbre du bois massif et du bois collé de chêne vert.

G_{1c} (J/m ²)	N° d'arbre Moyenne (CV)	Expérimentale	deux poutres encastrées	ASTM D3433-75	Castem2000
Bois massif de chêne vert	1	454 (7)	472 (40)	403 (42)	-
	2	434 (8)	399 (31)	344 (36)	-
	3	433 (4)	412 (36)	352 (36)	-
	moyenne	440	428	366	435
Bois collé de chêne vert	1	195 (7)	194(26)	168 (31)	-
	2	158 (8)	147 (16)	128 (15)	-
	3	164 (8)	164 (26)	140 (23)	-
	moyenne	172	168	145	170

Nous remarquons que les résultats expérimentaux que nous avons réalisés, sont en bon accord avec ceux déterminés par l'utilisation du code CASTEM 2000 et par la méthode de deux poutres encastées, cependant une différence significative avec ceux obtenus par la méthode de l'ASTM

III-4- Facteurs d'intensité des contraintes.

Le facteur d'intensité de contraintes peut être défini à partir de ténacité G_{Ic} du système par:

$$G_{Ic} = S^* \cdot K_{Ic}^2 = \sqrt{\frac{S_{11} \cdot S_{22}}{2}} \left[\sqrt{\frac{S_{22}}{S_{11}}} + \frac{2S_{12} + S_{66}}{2S_{11}} \right]^{1/2} \cdot K_{Ic}^2$$

S_{ij} : Tenseur des complaisances élastiques.

La valeur de la complaisance complexe S^* d'Eucalyptus grandis et de chêne vert est donné sur le tableau 3.17.

Tableau 3.17: Valeur de complaisance complexe S^*

S^* (MPa ⁻¹)	Eucalyptus grandis	Chêne vert
	1,2710 ⁻⁹	8,8410 ⁻¹⁰

Les tableaux 3.18 et 3.19 regroupent les valeurs moyennes du facteur d'intensité des contraintes critique des trois arbres de chaque espèce avec leur coefficient de variation (CV) et de chaque arbre pour le bois massif et le bois collé d'Eucalyptus grandis et de chêne vert.

Tableau 3.18: Facteur d'intensité des contraintes critique. Moyenne des trois arbres et de chaque arbre du bois massif et du bois collé d'Eucalyptus grandis.

K_{Ic} (MPa.m ^{1/2})	N° d'arbre Moyenne (CV)	Expérimentale	Castem2000
Bois massif d'Eucalyptus grandis	1	0,530 (17)	-
	2	0,516 (16)	-
	3	0,507 (11)	-
	moyenne	0,518	0,516
Bois collé d'Eucalyptus grandis	1	0,395 (11)	-
	2	0,446 (16)	-
	3	0,427 (14)	-
	moyenne	0,423	0,419

Tableau 3.19: Facteur d'intensité des contraintes critique . Moyenne des trois arbres et de chaque arbre du bois massif et du bois collé de chêne vert.

K_{Ic} (MPa.m ^{1/2})	N° d'arbre Moyenne (CV)	Expérimentale	Castem2000
Bois massif de chêne vert	1	0,717 (19)	-
	2	0,701 (15)	-
	3	0,700 (15)	-
	moyenne	0,706	0,702
Bois collé de chêne vert	1	0,470 (13)	-
	2	0,423 (10)	-
	3	0,431 (12)	-
	moyenne	0,440	0,438

La valeur du facteur d'intensité des contraintes critique déterminée simultanément par l'utilisation du code CASTEM 2000 et déduite expérimentalement est très proche.

Les travaux de **P. Jodin [73]** sur la ténacité ont montré que celle-ci dépend du rapport entre les propriétés élastiques de l'essence du bois et celle de la colle pure.

III-5- Relation entre la ténacité et les indicateurs des contraintes de croissance

La figure 3.41 représente la moyenne de chaque arbre des ténacités expérimentales du bois massif et du bois collé d'Eucalyptus grandis et de chêne vert en fonction des indicateurs des contraintes de croissance. On observe que l'écart de la ténacité est très important entre le bois massif et le bois collé de chêne vert alors qu'il est faible pour le bois d'Eucalyptus grandis quand l'indicateur des contraintes de croissance GSI augmente.

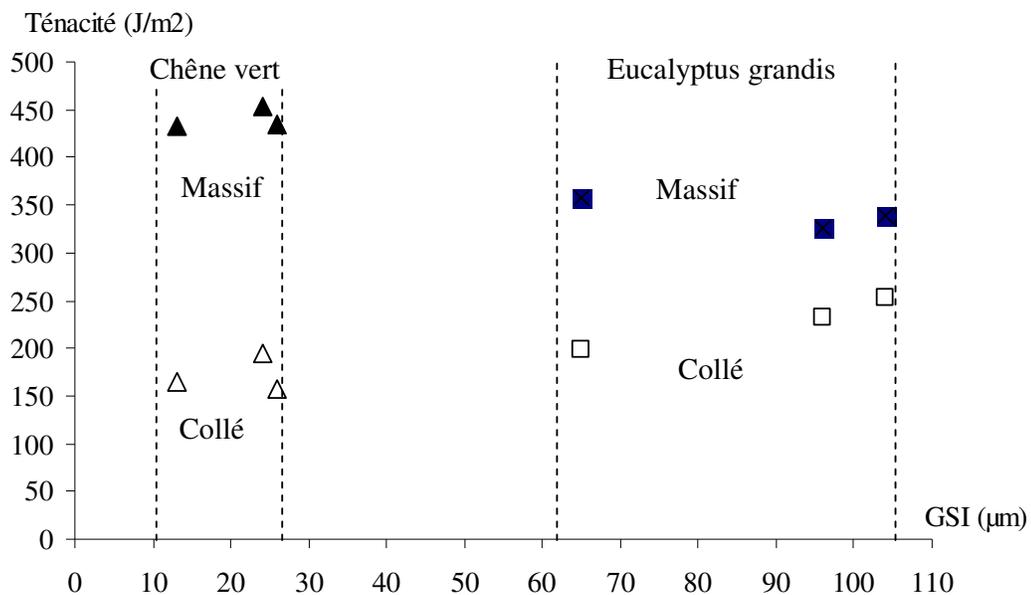


Figure 3.41: Ténacité moyenne par arbre du bois massif et du bois collé en fonction des indicateurs des contraintes de croissance GSI.

Nous allons voir comment s'effectue l'amorçage et la propagation de la fissure à travers les éléments longitudinaux et radiaux pour le bois massif et à travers la colle pour le bois collé des essences d'Eucalyptus grandis et de chêne vert.

IV- Analyse des faciès de rupture

L'analyse des faciès de rupture a été réalisée à CEMGI du LPEE de Casablanca, à l'aide d'un stéréomicroscope avec un grossissement $\times 2.5$ (figure 3.42). Cet appareil est un microscope optique conçu pour l'examen visuel, sur la base des connaissances scientifiques et techniques plus récentes et destiné à la photomicrographie et vidéoscopie d'objets microscopiques. Il présente un interfaçage et piloté par un logiciel de traitement ZEISS.



Figure 3.42: Observation du faciès de rupture à l'aide d'un stéréomicroscope.

IV-1- Amorçage de la fissure.

Dans le bois massif, la fissure s'amorce dans le plan présentant le moins de résistance, les bandes de rayons forment une surface plane dans la configuration de propagation (TL), ils forment par conséquent la zone privilégiée lors de la rupture. Au niveau du fond d'entaille, la fissure peut démarrer à plusieurs niveaux.

Dans le bois collé, la fissure s'amorce dans le joint de colle.

IV-2- Surfaces de rupture: visualisation de l'amorçage.

IV-2-1- Bois massif.

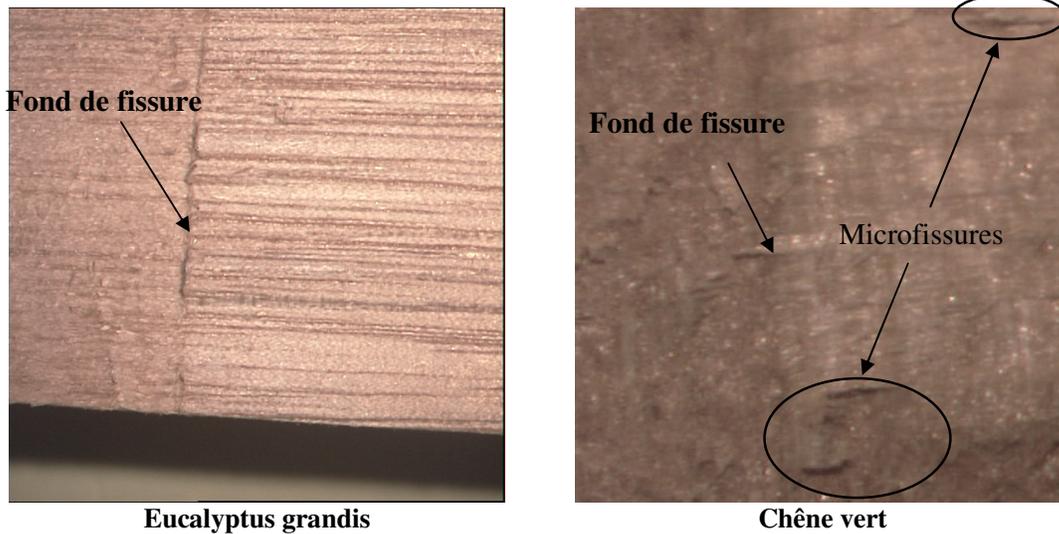


Figure 3.43: Amorçage de la fissure d'une éprouvette DCB massive (grossissement x 2.5).

Sur la figure 3.43, la fissure démarre sur une longue bande, on ne distingue qu'un seul plan de rupture pour les deux espèces. Un fond de fissure moins facile à observer chez le chêne vert avec des microfissures sur les bords. L'uniformité, homogénéité et la continuité longitudinale des éléments sur la surface de rupture sont indicatrices de la résistance rencontrée lors de l'amorçage de la fissure.

IV-2-2- Bois collé

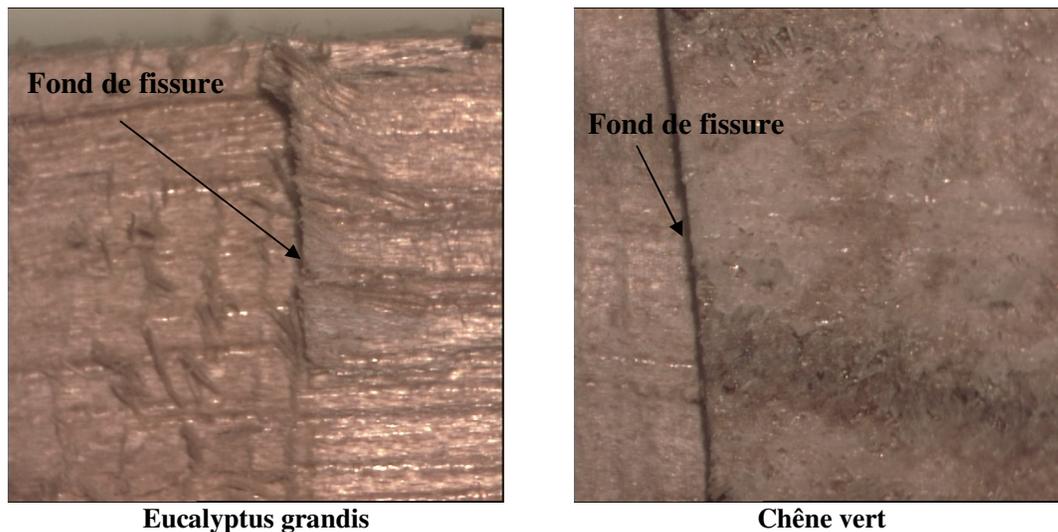


Figure 3.44: Amorçage de la fissure d'une éprouvette DCB collée (grossissement x 2.5).

Deux sortes d'amorçage de la fissure sont remarquées sur le bois d'*Eucalyptus grandis*, une dans le bois et l'autre dans le joint de colle et un fond de fissure perturbé par la présence de la colle. Pour le bois de *chêne vert*, l'amorçage est observé uniquement sur le joint de colle. Nous pouvons constater que la pénétration de la colle est plus importante sur le bois d'*Eucalyptus grandis*.

IV-3- Propagation de la fissure.

IV-3-1- Types de rupture.

Une fois la fissure amorcée, elle doit se propager à travers le tissu cellulaire formé d'éléments de formes et de tailles irrégulières. Il s'agit de voir comment s'effectue la rupture des éléments soudés entre eux par la lamelle moyenne. La fissure peut:

- 1- Soit traverser l'ensemble de la paroi: **rupture intracellulaire.**
- 2- Soit contourner la paroi cellulaire et traverser le ciment intercellulaire, on a: **rupture intercellulaire.**
- 3- Soit couper la cellule transversalement: **rupture transcellulaire.**

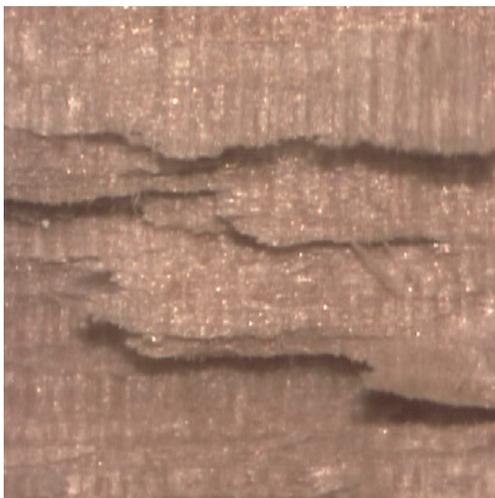
La taille des cellules d'une part et l'épaisseur de la paroi d'autre part pouvant influencer le type de rupture.

IV-3-2- Observation des faciès de rupture.

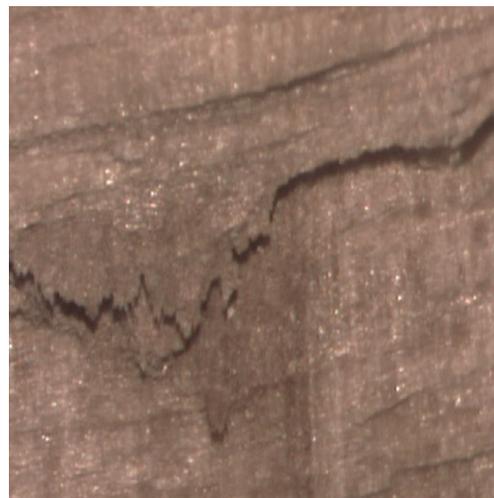
IV-3-2-1- Bois massif.

A certains endroits de la surface de rupture, on visualise non pas la bande de rayon mais uniquement leur trace sur le bois de la couche inférieure. La partie manquante est sur l'autre face de l'échantillon rompu (figure 3.45). Ceci montre deux choses:

- 1- Premièrement que la paroi des bandes de rayons est restée intacte, on a donc une rupture de type **intercellulaire.**
- 2- Deuxièmes qu'il y'a eu un sectionnement transverse des cellules et donc une rupture de type **transcellulaire.** Cette rupture s'accompagne d'une décohésion locale des cellules.



Eucalyptus grandis



Chêne vert

Figure 3.45: Propagation de la fissure d'une éprouvette DCB massive (grossissement x 2.5).

IV-3-2-2- Bois collé.

La propagation de la fissure a toujours lieu dans le joint de colle sur l'échantillon DCB du bois de chêne vert, la rupture est donc **cohésive** (figure 3.46), alors que sur le bois d'Eucalyptus grandis la propagation de la fissure est **mixte**, dans le bois et dans la colle (figure 3.46).

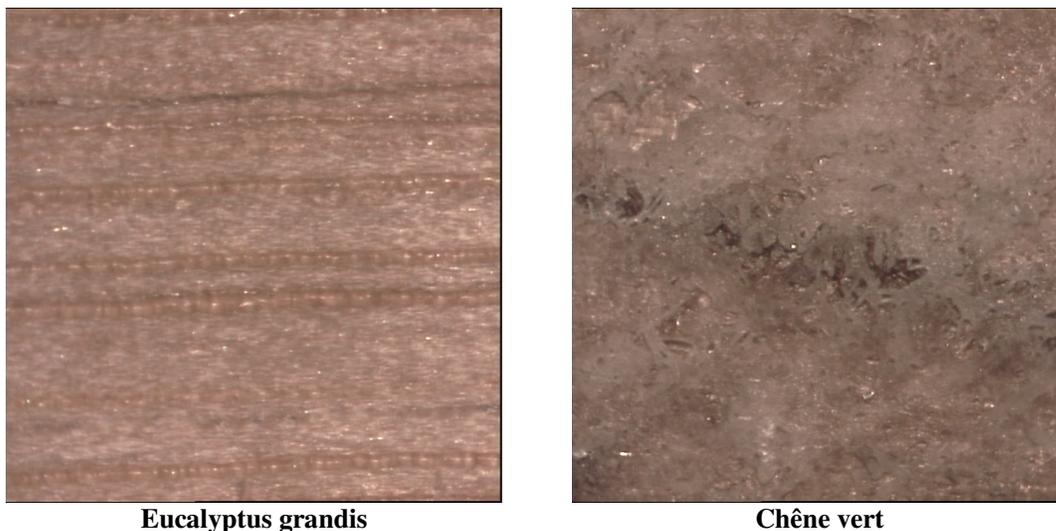


Figure 3.46: Propagation de la fissure d'une éprouvette DCB collée (grossissement x 2.5).

V- CONCLUSION

La mesure du taux de restitution de l'énergie ou la ténacité du bois massif et du bois collé d'Eucalyptus grandis et de chêne vert est réalisée par la méthode expérimentale de la complaisance. Elle vérifie bien que G_{IC} est une caractéristique intrinsèque du matériau bois et pour le couple bois colle. Le bois massif de ces espèces est plus tenace que le bois collé, cependant le bois collé à une ténacité supérieure à celle de la colle. La ténacité mesurée par la méthode expérimentale est très proche à celle déduite par le code d'éléments finis Castem 2000 et légèrement supérieure à celle calculé par d'autres méthodes.

L'analyse des faciès de rupture par la stéréomicroscope nous a révélé que dans le bois massif, la fissure s'amorce dans le plan présentant le moins de résistance alors que dans le bois collé elle s'amorce dans le joint de colle pour le chêne vert, et à la fois dans la colle et dans le bois pour l'Eucalyptus grandis. Lors de la propagation de la fissure les types de rupture observés dans le bois massif sont intercellulaires et transcellulaires, alors que dans le bois collé, ils sont toujours adhésifs pour le chêne vert et mixtes pour l'Eucalyptus grandis (alternativement dans le bois et dans la colle).

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail a permis dans un premier temps de caractériser deux feuillus marocains, une essence à croissance rapide qui est l'Eucalyptus grandis et l'autre à croissance lente qui est le chêne vert par:

- 1- La mesure des indicateurs des contraintes de croissance (GSI) afin d'évaluer les précontraintes du bois dans l'arbre par la méthode du trou unique.
- 2- La détermination des propriétés physiques de base et les modules d'élasticité par la méthode vibratoire de BING.

En deuxième lieu d'étudier le comportement mécanique de ces deux essences sous forme de bois massif et de bois collé par traction pour lui trouver des débouchés dans l'industrie des lamellés collés à l'aide:

- 1- Des essais de traction sur du bois massif, du bois collé bout à bout et en biseau afin de comparer leurs contraintes de rupture et de visualiser le mode de rupture.
- 2- Des essais de rupture en mode I sur des éprouvettes DCB en bois massif et en bois collé pour évaluer la ténacité par la méthode expérimentale de complaisance et en déduire le facteur d'intensité des contraintes. L'amorçage et la propagation de la rupture ont été observés à l'aide de la stéréomicroscopie.

L'étude des indicateurs des contraintes de croissance GSI a montré d'une manière générale que les deux essences se comportent de manières différentes. En effet, pour l'Eucalyptus grandis, espèce à croissance rapide, 75% des valeurs des GSI mesurées sont inférieures à 90 μm contre seulement 31 μm pour le chêne vert, espèce à croissance lente.

Les caractéristiques obtenues dans cette étude permettent de classer le bois d'Eucalyptus grandis en un bois mi-dur et le chêne vert en bois dur, à fort retrait et rigidité moyenne similaire. L'Eucalyptus grandis et le chêne vert présentent une nervosité élevée. Cet inconvénient trouve son origine dans la forme de la base du tronc qui conduit à une excentricité du cœur et à la formation de bois tension. Cette nervosité est un argument souvent avancé par l'industrie de transformation qui se désintéresse du bois d'Eucalyptus grandis et de chêne vert.

Le comportement mécanique en traction du bois massif est fragile tandis que le bois collé bout à bout et bois collé en biseau est légèrement ductile. Le bois massif de chêne vert présente une contrainte de rupture deux fois supérieure à celle d'Eucalyptus grandis alors que le bois collé est presque similaire pour ces deux feuillus.

Sur le bois massif et le bois assemblé bout à bout, nous sommes en présence d'une rupture en traction gouvernée par la contrainte normale, tandis que la rupture du bois assemblé en biseau associe à la fois la traction et le cisaillement.

La mesure du taux de restitution de l'énergie ou la ténacité du bois massif et du bois collé d'*Eucalyptus grandis* et de chêne vert est réalisée par la méthode expérimentale de la complaisance. Le bois massif de ces espèces est plus tenace que le bois collé, cependant le bois collé a une ténacité supérieure à celle de la colle. La ténacité mesurée par la méthode expérimentale et déterminée par CASTEM est très proche et légèrement supérieure à celle calculée par d'autres méthodes.

L'analyse des faciès de rupture par la stéréomicroscopie nous a révélé que dans le bois massif, la fissure s'amorce dans le plan présentant le moins de résistance alors que dans le bois collé elle s'amorce dans le joint de colle pour le chêne vert et à la fois dans la colle et dans le bois pour l'*eucalyptus grandis*. Lors de la propagation de la fissure, les types de ruptures observées dans le bois massif sont intercellulaire et transcellulaire, alors que dans le bois collé elle est toujours cohésive pour le chêne vert et mixte pour l'*eucalyptus grandis* (à la fois dans le bois et dans la colle).

L'utilisation des bois d'*Eucalyptus grandis* et de chêne vert sous forme de petit bois minimise les effets des contraintes de croissances et les effets de retraits. L'assemblage collé peut être une de solution pour ces deux espèces nerveux puisque le collage minimise la dispersion en terme de contrainte de rupture en traction. Ces deux essences peuvent remplacer beaucoup de bois importé et qui reviennent chers.

La poursuite de ce travail doit s'orienter vers:

- 1- L'étude du comportement au vieillissement des collages. Les éprouvettes de compression cisaillement des essences d'*eucalyptus grandis* et de chêne vert permettent d'explorer les différents mécanismes de dégradation qui concernent à la fois l'aspect mécanique et physico-chimiques, et au travers des aspects diffusionnels, le dimensionnement de l'éprouvette.
- 2- L'étude de la tenue mécanique des éléments lamellés collés. L'éprouvette de flexion E.N.F offre un excellent support expérimental pour évaluer le comportement spécifique de l'interface des collages structuraux des bois.
- 3- Le choix d'un mode de séchage adéquat pour ces deux feuillus, afin d'éviter l'apparition de collapse et définir ainsi les performances technico-économiques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] ANDRE M.

L'écologie des eucalyptus : son application au Maroc
Mémoires de la société des sciences naturelles du Maroc. 1949

[2] BOUDY P.

Economie forestière Nord Afrique
Tome 2, Fasc I et II, Monographie et traitement des essences forestières.
Ed. Larousse, Paris V. p529-878. 1950

[3] KELLER R.

Structures – Composition – Formation du bois. Cours de D.E.A.
Sciences du bois. E.N.G.R.E.F , p.p15 , 1994

[4] FOURNIER M., CHANSON B., THIBAUT B. GUITARD D.

Mécanique de l'arbre sur pied: modélisation d'une structure en croissance soumise à des chargement permanents, évolutifs. partieII-Analyse tridimensionnelle des contraintes de maturation, cas du feuillu standard.
Ann Sci For 48, 527-546. 1991.

[5] CLAIR B.

Etude des propriétés mécaniques et du retrait au séchage du bois à l'échelle de la paroi cellulaire: essai de compréhension du comportement macroscopique paradoxale du bois de tension à couche gélatineuse.
Thèse de doctorat en Sciences du Bois à ENGREF, 2001

[6] NICHOLSON J E.

A rapid method for estimating longitudinal growth stresses in logs.
Wood Science and Technology, 5: 40-48, 1971.

[7] SAURAT J., GUENEAU P.

Growth stress in beech.
Wood Science and Technology, 10 : 111-123, 1976.

[8] CHARDIN A., DE LAFOND C., SALES C., THIEL J.

Etude des espèces à fortes contraintes de croissance de la forêt naturelle de guyane.
Revue Bois et Forêts des Tropiques, 8 : 13-35, 1986

[9] KIKATA Y.

The effect of lean growth stress in Pinus densiflora.
Mokuzai Gakkaishi, 18 (9): 443-449, 1972.

[10] GUENEAU P.

Contraintes de croissance.
Cahiers Scientifiques 3, Centre Technique Forestier Tropical, Nogent sur Marne, 1973.

[11] OKUYAMA T., KAWAI A., KIKATA Y.

Growth stress and uneven gravitational stimulus in trees containing reaction wood.
Mokuzai Gakkaishi, 29: 190-196, 1983.

- [12] GUENEAU P., SAURAT J., TRENARD Y.**
Contraintes de croissances.
Rapport, Centre Technique du bois, Paris, 50p, 1974.
- [13] FERRAND J C.**
Recherche des solutions pratiques à apporter aux problèmes posés par les contraintes de croissance des arbres forestiers.
Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1981.
- [14] ARCHER R R.**
Growth stresses and strains in trees.
Springer Series in Wood Science New York, 1986.
- [15] GERARD J.**
Contraintes de croissance, variations internes de densité et module d'élasticité longitudinal, et déformations de sciage chez les eucalyptus de plantation.
Thèse de Doctorat en sciences du bois, Université de Bordeaux I. 1994.
- [16] JOZSA L A., MIDDLETON G R.**
Les caractéristiques déterminant la qualité du bois: Nature et conséquences pratiques.
Forintek Canada Corp. Publication spéciale SP-34F. p42. 1997.
- [17] UEDA K.**
Basic studies on the elastic deformation of wood.
Research bulletins of the College Experiment Forest. Hokkaido University. 40 (3), 627-708, 1983.
- [18] GUITARD D.**
Mécanique des matériaux bois et composite
Capadues-Editions. Collection Nabla. p238, 1987.
- [19] PALKA L C.**
Predicting the effect of specific gravity, moisture, temperature and strain rate on the elastic properties of softwood.
Wood Sciences and Technologie. 7, 127-141,1973.
- [20] HAINES D W., LEBAN J. M. , HERBE C.**
Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic material by the resonance flexure method with comparison to static flexure and other dynamic methods.
Wood Science and Technology, vol 30, pp253-262, 1982.
- [21] LAVIELLE L., SCHULTZ J.**
L'adhésion polymère-métal
Matériaux et Techniques, pp 215-222, Juin-Juillet 1984.
- [22] VALLAT M F.**
Joints adhésifs et mesure de leur résistance
Matériaux et Techniques, pp27-30, Juillet-Août 1989.

[23] BARQUINS M., FADEL K.

Adhésion et collage
Découverte, 271, pp 31-46, 1999.

[24] PETIT J A.

Bases scientifiques de l'assemblage par collage
Matériaux et Techniques, 4-5, pp 3-10, 1992.

[25] MAC BAIN J W., HOPKINS D G.

On adhesives and adhesive action
Journal of Physical Chemistry, pp 188-204, 1925.

[26] MONTERNOT H., BENALET D., ANCENAY H.

Guide du collage du CETIM
Paris: Lavoisier, pp 232, 1978

[27] DERYAGIN B V., KROTOVA N A.

Doklady Akademii Nauk SSSR, 61, p 849, 1948.

[28] SKINNER S M., SAVAGE R L., RUTZLER I E.

Electrical phenomena in adhesion: electron atmospheres in dielectrics
Journal of Applied Physics, 24, pp 438, 1953.

[29] VOYUTSKII S S.

Autohesion and adhesion of high polymers
New-York: Wiley Interscience, 1963.

[30] DE GENNES P G.

Reptation of a polymer chain in the presence of fixed obstacles
Journal of Chemical Physics, 55, pp 572-579, 1971.

[31] SHARPE L H., SCHONHORN H.

Surface energetics, adhesion and adhesive joints
In: Contact angle, wettability and adhesion / ed par F.M. FOWKES
Washington: American Chemical Society, pp 189 - (Advances in Chemistry Series, 43) , 1964

[32] BIKERMAN J J.

Causes of poor adhesion: weak boundary layers
Industrial and Engineering Chemistry, 59, 9, pp 40-44, 1967.

[33] BENZARTI K., CHAUSSADENT T., MOUTON Y.

Adhesively bonded joints in civil engineering: some physico-chemical aspects interesting mechanical behaviour
In: Novel Approaches in Civil Engineering / ed. par M. FREMOND et F. MACERI
Berlin: Springer-Verlag, pp 91-101 - (Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics), 2004.

- [34] GENT A N., SCHULTZ J.**
Effect of wetting liquids on the strength of adhesion of viscoelastic materials
Journal of Adhesion, 3, 1, p 281, 1972.
- [35] GAY C., LEIBLER L.**
Theory of tackiness
Physical Review Letter, 82, pp 936-939, 1999.
- [36] SCHINDEL- BIDINELLI E H.**
Pratique du collage industriel
Paris: Lavoisier, pp264 - (Technique et Documentation), 1992.
- [37] HAIDARA H.**
Mécanismes fondamentaux du mouillage et de l'adhésion
JADH'2001 (8-12 Octobre 2001 ; Lège-Cap Ferret)
Société Française du Vide - 11èmes Journées d'Etude sur l'Adhésion, - Session de Formation -
pp 1-19, 2001.
- [38] CARLAC'H D., HEMERY Y.**
Etude prospective sur le collage en France
Etude réalisée par Développement et Conseil pour le compte de la Digitp/Simap, pp237,
décembre 2002.
<http://www.industrie.gouv.fr/pdf/collage.pdf>
- [39] Pour en savoir plus sur le collage**
<http://materiaux.ecam.fr/savoirplus/collage/+Collage.html>
- [40] LAGRACIE I., SAINT-DRENANT S.**
Le collage structural
Etude réalisée en décembre 1998.
http://www.utc.fr/dess/gti/accueil/05_techno_cles/collage_structural/collage.htm
- [41] YOUNG R J., LOVELL P.A.**
Introduction to Polymers - Second Edition
Londres: Chapman &Hall, pp443, 1991.
- [42] SUAREZ J C., DIEZ DE ULZURRUN I., BIEZMA M V., et al.**
Case studies in adhesives selection
Journal of Materials Processing Technology, vol. 143-144, pp 219-224, 2003.
- [43] HELENE G.**
Industries et techniques, n°746, Les adhésifs industriels, pp167-172, 1994.
- [44] SELBO M L.**
Effect of joint geometry on tensile strength of finger joints
Forest products journal, pp 390-400, septembre 1963.
- [45] MOULIN J M.**
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, 1989.

[46] Comité technique.

Structure en bois - Bois lamellé collé – Classe de résistance et détermination des valeurs caractéristiques.

Etabli par le comité technique CEN/TC 124, 1995.

[47] JEANDEAU J P.

Collage structural : la fin de l'empirisme.

CETIM Information, n°100, Avril 1987.

[48] ADERA,

Colle et adhésifs.

Stage adhésion, Bordeaux 1985.

[49] ARAGOA E.

Eude de l'endommagement de composite par des essais de choc en flexion.

Thèse de docteur Ingénieur, Université de Bordeaux I, 1986.

[50] THOUGHTON G E.

Accelerated aging of glue-wood bonds

Wood Science, Vol.1, n°3, 1969.

[51] MAUGIS D.

Contact, Adhesion and Rupture of elastic solids

Berlin: Springer-Verlag- pp414 - (Solid State Sciences - 130), 2000.

[52] GRIFFITH A A.

The phenomenom of rupture and flow in solids

Philosophical Transaction of the Royal Society (London), A221, pp 163-198, 1920.

[53] WILLIAMS M L.

On the stress distribution at the base of a stationary crack

Journal of Applied Mechanics, 79, pp 109-144, 1957.

[54] IRWIN G R.

Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate

Journal of Applied Mechanics, 79, pp 361-364, 1957.

[55] IRWIN G R.

Fracture mechanics

In: Structural Mechanics / Ed. par J.N. GOODIER et N.J. HOFF

Elmsford: Pergamon, pp 557-591, 1960.

[56] RICE J R.

Mathematical Analysis in the mechanics of fracture

In: Fracture - volume 2 / Ed. par H. LIEBOWITZ

New-York: Academic, pp191-311, 1968.

[57] WILLIAMS M L.

The stresses around a fault or a crack in dissimilat media

Bulletin of the Sismological Society of America, 49, 2, pp 199-204, 1959.

[58] ENGLAND A H.

A crack between dissimilar media
Journal of Applied Mechanics, 32, pp 400-402, 1965.

[59] ERDOGAN F.

Stresses distribution in bonded dissimilar materials with cracks
Journal of Applied Mechanics, 32, pp 403-410, 1965.

[60] MALYSHEV B M., SALGANIK R L.

The strength of adhesive joints using the theory of crack
International Journal of Fracture Mechanics, 1, pp 114-128, 1965.

[61] LEGUILLON D., MARION G., HARRY R., et al.

Amorçage du délaminage entre bords libres des stratifiés croisés. Etude de deux critères
In: Comptes Rendus des Onzièmes Journées Nationales sur les Composites (JNC11, 1998, Arcachon)- Volume II / Ed. par J. LAMON et D. BAPTISTE
Paris: AMAC, pp 1379-1388, 1998.

[62] HASHIN Z.

Finite thermoelastic fracture criterion with application to laminate cracking analysis
Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 44, 7, pp 1129-1145, 1996.

[63] FRANCFORT G A., MARIGO J J.

Revisiting brittle fracture as an energy minimization problem
Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 46, 8, pp 1319-1342, 1998.

[64] LEMAITRE J., CHABOCHE J L.

Aspect phénoménologique de la rupture par endommagement
Journal de Mécanique Appliquée, 2, pp 317-365, 1978.

[65] GERMAIN P., NGUYEN Q.S., SUQUET P.

Continuum thermodynamics
Journal of Applied Mechanics, 3, pp 1010-1020, 1983.

[66] HALLER. P.

Mesure de la ténacité du bois collé. Modélisation de la ténacité par la méthode des éléments finis et la mécanique de la rupture.
Mémoire de thèse doctorat de l'I.N.P.Lorraine, 1987.

[67] TAKATANI M., HAMADA R., SASAKI H.

Testing method for cleavage fracture, Toughness of glue lines in bonded wood.
Mokuzai Gakkaishi, vol.30,n°2, pp130-138, 1984.

[68] FRÜHWALD A.

Influence of planing parameters on glue line strength of laminated beams.
Federal Research Centre for Forestry and Forest Products Hamburg/ FRG 1976.

[69] KOUTSKY J A.

Recent Results on Fracture Toughness of Bonded Wood. Department of Chemical Engineering. University of Wisconsin, Madison.

[70] DUCHANOIS G.

Mesure de la ténacité et l'étude du comportement mécanique des joints bois-colle. Thèse, INPL., 1984.

[71] PLUVINAGE G.

La rupture du bois et de ses composites. CEPADUES Edition, ISBN 2.85428.292.2. 1992.

[72] ANDREWS E., FUKORITI Y.

Generalised Fracture Mechanics. Journal of material science n°12, pp1307-1319. 1977.

[73] HALLER P., JODIN P., PLUVINAGE G.

Simulation numérique des assemblage collés en bois par éléments finis Applications industrielles. Revue d'optimisation des structures et CAO, pp, 121-138, 1987.

[74] LECLERCQ A.

Influence du milieu et du traitement sur la qualité du bois de hêtre. Thèse doct. sci. agron, Fac. univ. Sci. agron., Gembloux, Belgique, 1979.

[75] FOURNIER M.

Mécanique de l'arbre sur pied : maturation, poids propre, contraintes climatiques dans la tige standard. Thèse de doctorat en sciences du bois. INP de Lorraine. 1989.

[76] FOURNIER M., CHANSON B. BAILLERES H.

Mesure des déformations résiduelles de croissances à la surface des arbres. Observations sur différentes espèces. Annales des Sciences Forestières 51(2) : 249-266p, 1994.

[77] BAILLERES H.

Précontraintes de croissance et propriétés mécano-physiques de clones d'Eucalyptus (Pointe Noire-Congo): hétérogénéités, corrélations et interprétations histologiques. Thèse de Doctorat en sciences du bois, Université de Bordeaux I., 1994.

[78] SASSUS F.

Déformations de maturation et propriétés du bois de tension chez le hêtre et le peuplier : mesures et modèles. Thèse de l'ENGREF en Sciences du Bois, B. Thibaut, Editor. Montpellier, 1998.

[79] BORDONNE P A.

Module dynamique et frottement intérieur dans le bois- Mesures sur poutres flottantes en vibrations naturelles. Thèse de Doctorat, Spécialité Sciences du bois, Institut National Polytechnique de lorraine 1989.

[80] WEIBULL W J.

Proc. Ing. Vetenskapsakad Akad. 151, 1939.

[81] WEIBULL W J.

A statistical Distribution Function of Wide Applicability
Journal. Appl. Mech., 18 pp. 293-297, 1951.

[82] BLISS C J.

Ann. Appl. Biol. N°24, pp. 815-852, 1937.

[83] IPSEN J. JENS N k.

Acta. Path. Microbiol. Scand., 21. pp. 343-381, 1944.

[84] MANAA R.

Etude de la ténacité des assemblages bois-colle Résorcine-phénol-formol
Thèse de doctorat en sciences du bois. INP de Lorraine. 1995.

[85] LAGHDIR A.

Modélisation de la fissuration en bout de grume liée aux contraintes de croissance-
Application au Eucalyptus.
Thèse de l'Université de Montpellier 2, 2000.

[86] FAMIRI A.

Contribution à la caractérisation et à la valorisation du bois de la forêt marocaine. Cas des
eucalyptus et du chêne vert.
Thèse d'état Es-sciences physiques, Université Mohamed V, Rabat 2005.

[87] DAYA A., ChERGUI M., JODIN P., FAMIRI A., AZARI Z., ELGHORBA M.

Etude comparative de quelques propriétés physiques et mécaniques des bois d'eucalyptus
grandis et de chêne vert.
7^{ème} Congrès de Mécanique, pp141-143, 19-22 avril Casablanca, Maroc 2005.

[88] ZOBEL B J., SPRAGUE J R.

Juvenile wood in forest tree.
Berlin, Allemagne: Springer-verlag, pp300, 1998.

[89] NEPVEU G.

Variabilité. Le bois matériau d'ingénierie.
Nancy, France : Arbolor, pp128-182, 1994.

[90] FECHTAL M.

Caractéristique technologique du bois du Chêne vert et les possibilités de son utilisation dans
la fabrication du parquet.
Ann. Rech. For. Maroc, 1997.

[91] DAYA A., CHERGUI M., JODIN P., ELGHORBA M., AZARI Z.

Modélisation des structures en bois sollicitées en flexion quatre points
3^{ème} Journées d'Etudes Techniques, Avril, Marrakech, Maroc 2004.

[92] MAZET J. P., NEPVEU G.

Relation entre les caractéristiques de retrait et densité du bois chez le pin sylvestre, le pin pectiné et l'épicéa commun.
Ann. Sci. For. 48, pp 87-100. 1991.

[93] FAMIRI. A.

Contribution à l'étude des propriétés physiques et physicochimique du bois d'eucalyptus. Cas du E. grandis x E. camaldulensis.
Thèse de 3^{ème} cycle, Faculté des Sciences, Rabat. 1996.

[94] DAYA A., CHERGUI M., ELGHORBA M., FAMIRI A., ZIANE E.

Valorisation des petits bois d'eucalyptus par aboutage à entures multiples: Approche statistique.
6^{ème} Congrès de Mécanique, pp118-119, Avril, Tanger, Maroc 2003.

[95] BETRI S.

Propriétés technologiques du Chêne vert pubescent en comparaison avec d'autres Chêne. Forêt méditerranéenne, T XVI, 1, 48-53. 1995.

[96] MARCHAL R.

Propriétés des bois de Chêne vert et de Chêne pubescent en Forêt méditerranéenne, XVI, 4, 425-437. 1995 .

[97] BENAMOR S.

Valorisation en parquet et en tournerie des Chênes verts du département de l'Hérault. Mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts. 1998.

[98] ROSOWSKY D.

Stochastic modeling of lumber properties, probabilities and materials tests, models and application.
Ed D. Breyse NATO Series, Vol269, pp 119-129. 1994.

[99] ROSSI P., PIAU J M.

The usefulness of statical models to describe damage and fracture in concrete, France-US Workshop on strain Localization and size effect due to cracking and damage.
LMT Cachan, France. 1988.

[100] BREYSSE D.

Probabilistic formulation of damage-evolution law of cementitious composite.
J. Eng. Mech., ASCE, Vol. 116, 7, pp 1389-1410. 1989.

[101] JALLOUF S G.

Approche probabiliste du dimensionnement contre le risque de rupture.
Thèse de l'Université Paul Verlaine de Metz, Janvier 2006.

[102] ANBARI K., EL KORTBI M., EL GHORBA M., AKEF A

Etude de la résistance mécanique du bois d'eucalyptus camaldulensis.
Revue Marocaine du Génie Civile, N°90 – Novembre / Décembre 2000.

[103] DAYA A., CHERGUI M., JODIN P., ELGHORBA M., AZARI Z., FAMIRI A.
Étude de la rupture du bois d'eucalyptus massif et collé par application du modèle de Weibull.
Ann. Rech. For. Maroc, T (36), 148-154. 2003.

[104] DAYA A.
Caractérisation technologique du bois d'Eucalyptus sur des structures lamellées collées à
entures multiples.
Mémoire de DESA en Mécanique Appliquée, ENSEM-Casablanca, 16 Novembre 2001.

[105] JERONE M G
An improved method for fracture cleavage testing of adhesively-bonded wood
Masters of Sciences, Blacksburg, Virginia, 2001



ANNEXES

ANNEXE A : TAUX DE RESTITUTION D'ÉNERGIE G_1 ET FACTEUR D'INTENSITÉ DE CONTRAINTE K_1

1- Taux de restitution d'énergie

Griffith en 1920 fut le premier à aborder le problème de la rupture en termes énergétiques. Soit un matériau contenant une fissure de longueur a . Une extension Δa de cette fissure (figure A1) s'accompagnera des variations d'énergie suivantes :

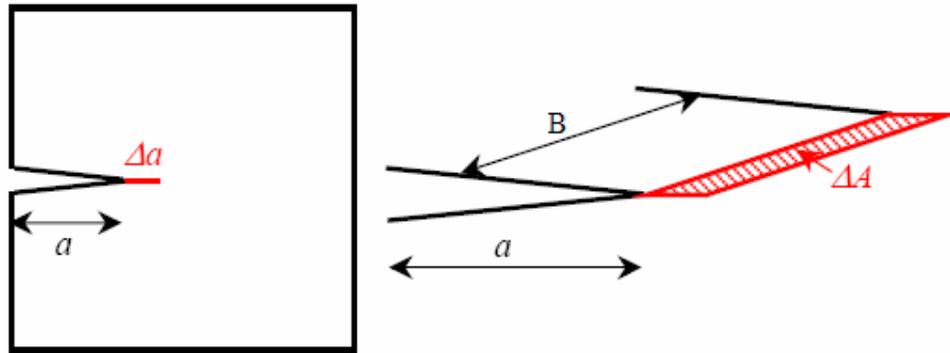


Figure A1 : Propagation de la fissure sur une longueur Δa

$$\Delta W_{\text{ext}} = \Delta W_{\text{elas}} + \Delta U$$

avec

ΔW_{ext} la variation d'énergie appliquée (due aux forces extérieures),

ΔW_{elas} la variation d'énergie élastique (emmagasinée),

ΔU l'énergie dépensée lors de la propagation de la fissure sur la longueur Δa .

Le taux de restitution d'énergie introduit par Griffith est défini comme l'énergie libérée par unité de surface créée, lors d'une avancée de fissure.

$$G = \frac{\partial(W_{\text{ext}} - W_{\text{elas}})}{\partial S} = \frac{\partial U}{\partial S} = 2\gamma$$

avec γ l'énergie spécifique de création de surface

Il y'a propagation de la fissure lorsque $G \geq 2\gamma$

2- Expression du taux de restitution d'énergie G

Soient deux fissures de longueurs voisines a et $a + da$. Dans le domaine élastique linéaire, l'allure des courbes (force- déplacement) est décrite dans la figure A2.

À force imposée, l'énergie nécessaire à la propagation de la fissure a à $a + da$ est égale à l'aire du triangle hachuré.

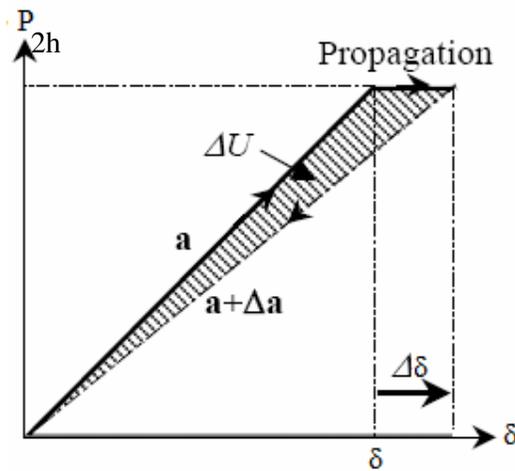


Figure A2 : Courbe force-déplacement

Soit :

$$\Delta U = \int_0^P [\delta(a + \Delta a) - \delta(a)] dP$$

En prenant le premier terme du développement en série de Taylor, on écrit :

$$\delta(a + \Delta a) - \delta(a) \cong \left(\frac{\partial \delta}{\partial a}\right) \Delta a$$

Avec la formule de la complaisance $C = \frac{\delta}{P}$; on a :

$$\left(\frac{\partial \delta}{\partial a}\right) = P \left(\frac{\partial C}{\partial a}\right)$$

Il vient alors :

$$\Delta U = \left(\frac{\partial C}{\partial a}\right) \Delta a \int_0^P P \cdot dP = \frac{1}{2} P^2 \Delta a \left(\frac{\partial C}{\partial a}\right)$$

L'énergie de propagation unitaire G est donc égale à $\frac{\Delta U}{\Delta a}$, c'est à dire

$$G = \frac{1}{2} P^2 \frac{\partial C}{\partial a}$$

Pour les modes d'ouverture et de cisaillement, le taux de restitution critique G_C est obtenu avec la force de rupture P_C .

3- Facteur d'intensité de contrainte K_I

Le modèle de la poutre reposant sur une infinité d'appuis élastiques nous a servi pour déterminer, l'expression du facteur d'intensité de contrainte K_I pour l'éprouvette DCB (Double Cantilever Beam).

Pour tenir compte de l'anisotropie due à l'orientation des axes matériels, la raideur d'un appui élastique est prise proportionnelle au module transversal apparent ; soit $k=2b/d_{22}h$, avec k la raideur d'un ressort par unité de longueur, b est l'épaisseur de la poutre, h la demi hauteur de l'éprouvette et d_{22} est la souplesse transversale. La figure A3 définit la modélisation, la sollicitation en mode I, ainsi que les dimensions de l'éprouvette.

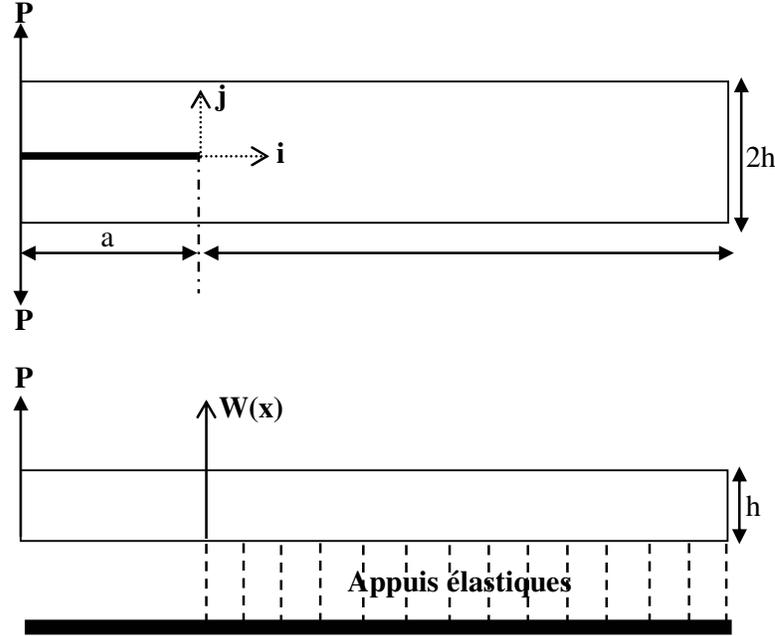


Figure A3 : Eprouvette DCB et la modélisation

L'équation de la déformée due au seul moment de flexion est telle que

$$\frac{d^4 w(x)}{dx^4} + 4\lambda^4 H(x)w(x) = 0$$

Avec $\lambda = \left(\frac{1}{h}\right)\left(\frac{6d_{11}}{d_{22}}\right)^{1/4}$; $\begin{cases} H(x) = 1 & \text{si } x > 0 \\ H(x) = 0 & \text{si } x < 0 \end{cases}$

La résolution de l'équation différentielle donne :

$$\begin{cases} w(x) = \left(\frac{6Pd_{11}}{bh^3\lambda^3}\right) \left[\frac{\lambda^3 x^3}{3} + a\lambda^3 x^2 - \alpha\lambda x + \beta \right] & \text{si } x < 0 \\ w(x) = \left(\frac{6Pd_{11}}{bh^3\lambda^3}\right) \left[a\lambda \sin \lambda x \operatorname{sh} \lambda x - \frac{(\alpha-1)}{2} \sin \lambda x \operatorname{ch} \lambda x + \beta \cos \lambda x \operatorname{ch} \lambda x - \frac{(\alpha+1)}{2} \cos \lambda x \operatorname{sh} \lambda x \right] & \text{si } x > 0 \end{cases}$$

Où

$$\alpha = \frac{(\operatorname{sh} \lambda x)^2 + (\sin \lambda x)^2}{(\operatorname{sh} \lambda x)^2 - (\sin \lambda x)^2} + 2a\lambda \left(\frac{\operatorname{sh} \lambda x \operatorname{ch} \lambda x + \sin \lambda x \cos \lambda x}{(\operatorname{sh} \lambda x)^2 - (\sin \lambda x)^2} \right)$$

et

$$\beta = \frac{\operatorname{sh} \lambda x \operatorname{ch} \lambda x + \sin \lambda x \cos \lambda x}{(\operatorname{sh} \lambda x)^2 - (\sin \lambda x)^2} + a\lambda \left(\frac{(\operatorname{sh} \lambda x)^2 + (\sin \lambda x)^2}{(\operatorname{sh} \lambda x)^2 - (\sin \lambda x)^2} \right)$$

La flèche au point d'application de la charge est donnée par :

$$w(-a) = \left(\frac{2Pd_{11}}{bh^3\lambda^3} \right) \left[2\lambda^3 a^3 + 6\lambda^2 a^2 \left(\frac{\text{sh}\lambda x \text{ch}\lambda x + \sin\lambda x \cos\lambda x}{(\text{sh}\lambda x)^2 - (\sin\lambda x)^2} \right) + 6\lambda a \left(\frac{(\text{sh}\lambda x)^2 + (\sin\lambda x)^2}{(\text{sh}\lambda x)^2 - (\sin\lambda x)^2} \right) + 3 \left(\frac{\text{sh}\lambda x \text{ch}\lambda x - \sin\lambda x \cos\lambda x}{(\text{sh}\lambda x)^2 - (\sin\lambda x)^2} \right) \right]$$

La flèche due au cisaillement dans la partie libre peut être prise en compte, soit :

$$w_{\text{CIS}}(-a) = \frac{6 Pd_{33}}{5 bh} a$$

La complaisance est donnée par :

$$C_1(a) = 2 \frac{(w(-a) + w_{\text{CIS}}(-a))}{P}$$

$$C_1(a) = \left(\frac{4Pd_{11}}{bh^3\lambda^3} \right) \left[2\lambda^3 a^3 + 6\lambda^2 a^2 \left(\frac{\text{sh}\lambda x \text{ch}\lambda x + \sin\lambda x \cos\lambda x}{(\text{sh}\lambda x)^2 - (\sin\lambda x)^2} \right) + 6\lambda a \left(\frac{(\text{sh}\lambda x)^2 + (\sin\lambda x)^2}{(\text{sh}\lambda x)^2 - (\sin\lambda x)^2} \right) + 3 \left(\frac{\text{sh}\lambda x \text{ch}\lambda x - \sin\lambda x \cos\lambda x}{(\text{sh}\lambda x)^2 - (\sin\lambda x)^2} \right) \right] + \frac{12ad_{33}}{5bh}$$

Le taux de restitution d'énergie $G_1(a)$ et le facteur d'intensité de contrainte $K_1(a)$ pour une éprouvette DCB constitué d'un matériau anisotrope peuvent être déterminés analytiquement en connaissant la complaisance $C_1(a)$:

$$G_1(a) = \frac{P^2}{2B} \frac{\partial C_1(a)}{\partial a} \quad \text{et} \quad K_1(a) = \left(\frac{G_1(a)}{-\frac{1}{2} \text{Im} \left[d_{22} \left(\frac{\mu_1 + \mu_2}{\mu_1 \mu_2} \right) \right]} \right)^{1/2}$$

Où μ_1 et μ_2 sont les racines de l'équation :

$$d_{11}\mu^4 - 2d_{16}\mu^3 + (2d_{16} + d_{66})\mu^2 - 2d_{26}\mu + d_{22} = 0$$

d_{ij} : complaisances élastiques apparentes ($i, j = 1, 2, \dots, 6$)

$$d_{ij} = S_{ij} - \xi \frac{S_{i3}S_{j3}}{S_{33}}$$

S_{ij} : complaisances élastiques, lorsqu'on est dans un état de déformation planes $\xi = 1$
et dans un état de contrainte planes $\xi = 0$.

Im est la partie imaginaire de []

ANNEXE B : PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DU MATÉRIAU BOIS

1- Eau dans l'eau bois – Taux d'humidité

Le bois, matériau fortement hygroscopique, peut contenir une grande quantité d'eau qui se décline en deux classes. Dans le bois, dit frais, la masse d'eau prédominante est appelée "eau libre". Il s'agit de l'eau contenue dans les lumens cellulaires, nécessaire au fonctionnement physiologique de l'arbre. Un autre type d'eau, contenue dans les parois cellulaires, est appelé eau "liée" ou "hygroscopique". Le taux d'humidité est défini comme la quantité d'eau totale (eau libre + eau liée) ramenée à la masse de matière sèche de la pièce de bois. C'est donc une grandeur adimensionnelle exprimée en pour-cent (de matière sèche), et qui peut être supérieur à 100

$$H = \frac{m_{\text{eau}}}{m_0} = \frac{m_H - m_0}{m_0}$$

Avec H : humidité du bois,

m_{eau} : masse totale d'eau contenue dans le bois (eau libre + liée)

m_H : masse humide,

m_0 : masse anhydre

Le taux d'humidité d'une pièce de bois s'équilibre en fonction des conditions (température et humidité relative) de l'air dans lequel elle est plongée. La détermination du point d'équilibre d'un échantillon se fait généralement à l'aide d'abaques obtenus expérimentalement et appelés "isothermes de sorption".

2- Retrait (ou Gonflement) du bois

Le retrait (ou gonflement) est le phénomène qui décrit les variations dimensionnelles qui s'opèrent lors d'un changement de teneur en eau. Il ne fait intervenir que l'eau située dans les parois cellulaires. Lors d'un séchage, le retrait ne s'exprime donc qu'à partir du moment où, l'eau libre ayant déjà été évacuée des lumens, l'eau liée commence à s'extraire des parois. Cette limite est appelée **Point de Saturation de Fibres (PSF)** ou plus justement Point de Saturation des Parois Cellulaires.

- L'expérience montre que le retrait ou gonflement est fortement anisotrope $R_t > R_r \gg R_L$
- Pour caractériser les variations du volume, on introduit le **coefficient du retrait volumique R_v** :

$$R_v = \frac{V_H - V_0}{V_0} * 100$$

Avec V_H : volume du bois à l'humidité H.

V_0 : volume du bois à l'état anhydre.

3- Masse volumique et densité

La densité ou masse volumique est un paramètre physique qui vise à préciser la quantité de matière ligneuse contenue dans le volume donné de bois.

3-1-Densité à l'humidité H

$$D_H = \frac{m_H}{V_H}$$

m_H : Masse de l'éprouvette à l'humidité H.

V_H : Volume de l'éprouvette à l'humidité H.

3-2- Densité anhydre

$$D_0 = \frac{m_0}{V_0}$$

Avec m_0 : Masse anhydre.

V_0 : Volume anhydre.

3-3- Densité basale ou infradensité

$$D_b = \frac{m_0}{V_S}$$

Avec m_0 : Masse anhydre.

V_S : Volume saturé.

4- Commentaires

De nombreux auteurs proposent une masse volumique de la matière ligneuse proprement dite de l'ordre de $D^* = 1,5 \text{ g/cm}^3$. Il est possible donc d'estimer la fraction volumique des espaces intercellulaires pour un bois de masse anhydre D_0 .

- Généralement le bois des feuillus est plus dense que le bois des résineux.
- Les divers bois couvrent plage de densité anhydre qui s'étend de $0,1\text{g/cm}^3$ pour les essences moins denses à $1,25\text{g/cm}^3$ pour les essences les plus denses.
- Les bois d'importance industrielle s'étagent de $0,35\text{g/cm}^3$ à $0,80\text{g/cm}^3$.

ANNEXE C : Calculs par éléments finis (Castem 2000)

1- Modélisation numérique

La modélisation numérique a été menée sur le logiciel CASTEM 2000 afin de déterminer les distributions des contraintes, le calcul de la ténacité et le calcul des facteurs d'intensité de contraintes.

2- Programmation

CASTEM 2000 est un code de calcul d'analyse des structures à travers la méthode des éléments finis. Ce code a été développé par le Département de Mécanique et Technologie (DMT) du Commissariat à l'Energie Atomique en France (CEA). C'est un système complet, qui intègre les fonctions de calcul, les fonctions de construction du modèle pré processeur et de traitement des résultats post processeur.

Le langage utilisé, pour définir les instructions fonctionnelles du processus, est un langage appelé « GIBIANE » qui permet, en particulier, un échange facile de renseignements entre l'utilisateur et le programme.

3- Préparation du modèle de calcul

Le modèle de calcul représente l'ensemble des données préparées pour décrire les caractéristiques complètes du problème à analyser. Il peut être décrit par le schéma de la figure c.1.

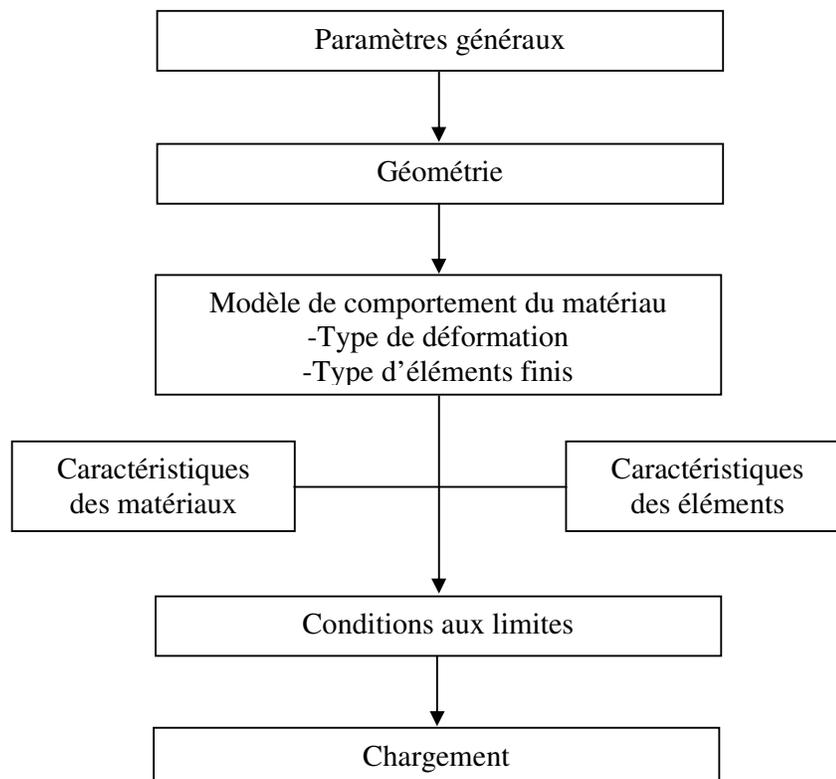


Figure c.1 : Etapes à suivre pour la programmation

4- Modélisation et analyse des contraintes dans les éprouvettes DCB

Pour expliquer l'amorçage et la propagation de la fissure à partir de l'entaille, il est nécessaire de déterminer la distribution de la contrainte à fond d'entaille par le calcul par éléments finis. La modélisation bidimensionnelle de l'éprouvette DCB, soumise à un chargement en traction, est illustrée sur les figures c-2-a et c-2-b. Les valeurs des contraintes appliquées pour le calcul sont les mêmes que celle appliquées au cours des essais.

Un programme de préparation de données, pour le calcul par éléments finis, à été réalisé. Au début de ce programme nous avons défini :

- La géométrie des éprouvettes DCB en bois massif et en bois collé ;
- Le type d'éléments: éléments triangulaires à 6 noeuds (TRI6) ;
- Le comportement: bois matériau élastique linéaire orthotrope et la colle matériau élastique isotrope.

Tableau c-1 : Constantes rhéologiques du bois d'Eucalyptus grandis et de chêne vert (E et G en MPa)

	E_R	E_T	E_L	ν_{RT}	ν_{TR}	ν_{LT}	ν_{TL}	ν_{RL}	ν_{LR}	G_{TL}	G_{RL}	G_{RT}
Eucalyptus grandis	1680	879	14300	0,67	0,36	0,47	0,03	0,04	0,38	914	1215	312
Chêne vert	2023	1296	15100	0,65	0,42	0,45	0,04	0,05	0,40	1080	1359	460

Tableau c-2 : Caractéristiques de la colle polyuréthane

Colle polyuréthane	E (MPa)	ν	G (MPa)
	2133	0,35	790

- Condition aux limites : l'éprouvette DCB bloquée suivant Y et le chargement dans les trous.

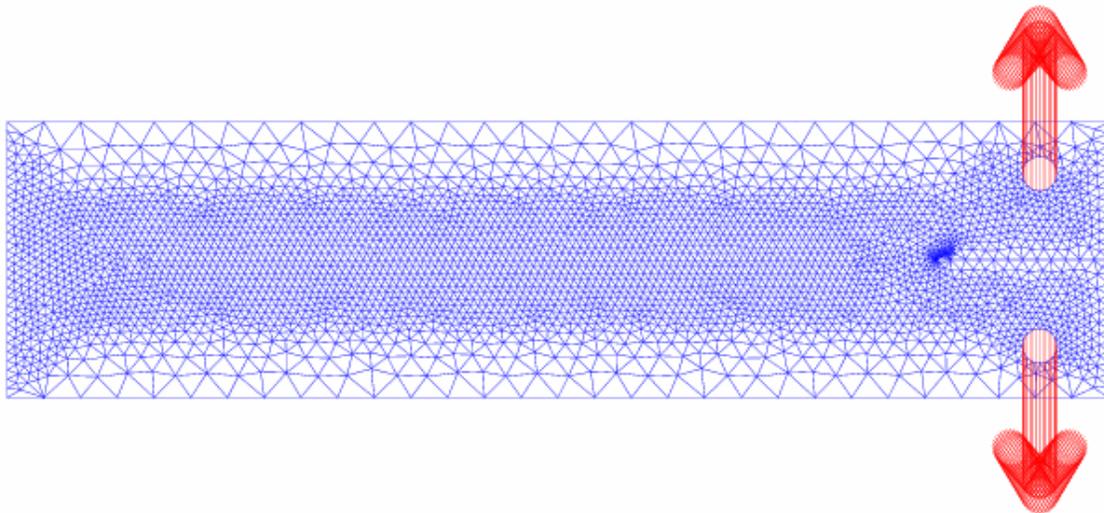


Figure c-2-a : Maillage et chargement de l'éprouvette DCB en bois massif

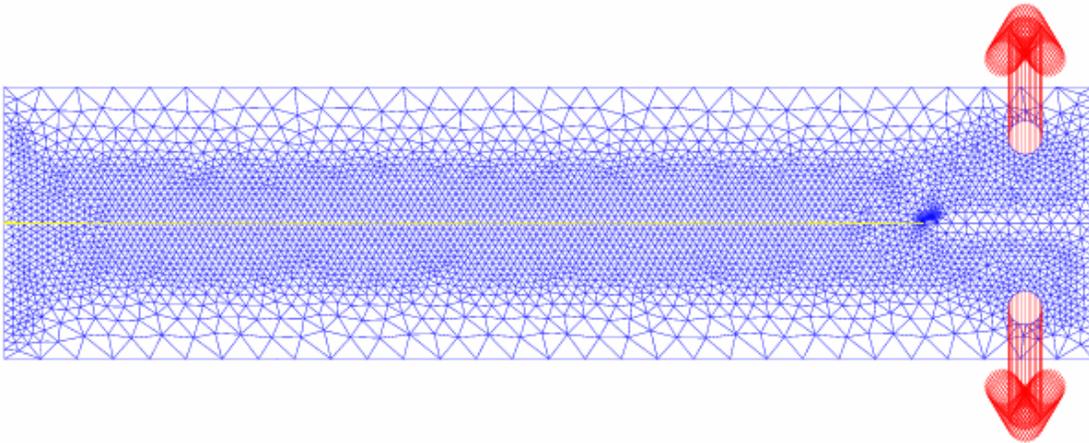


Figure c-2-b : Maillage et chargement de l'éprouvette DCB en bois collé

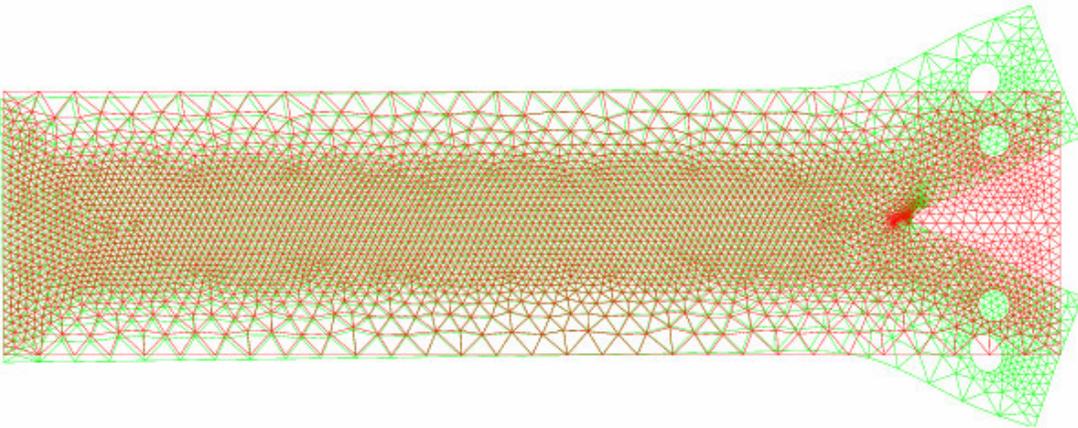


Figure c-3-a : Déformée de l'éprouvette DCB en bois massif

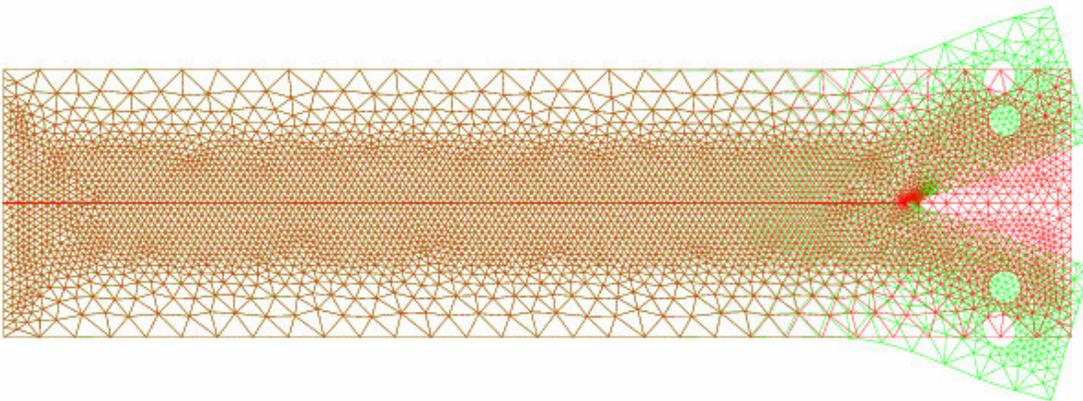


Figure c-3-b : Déformée de l'éprouvette DCB en bois collé

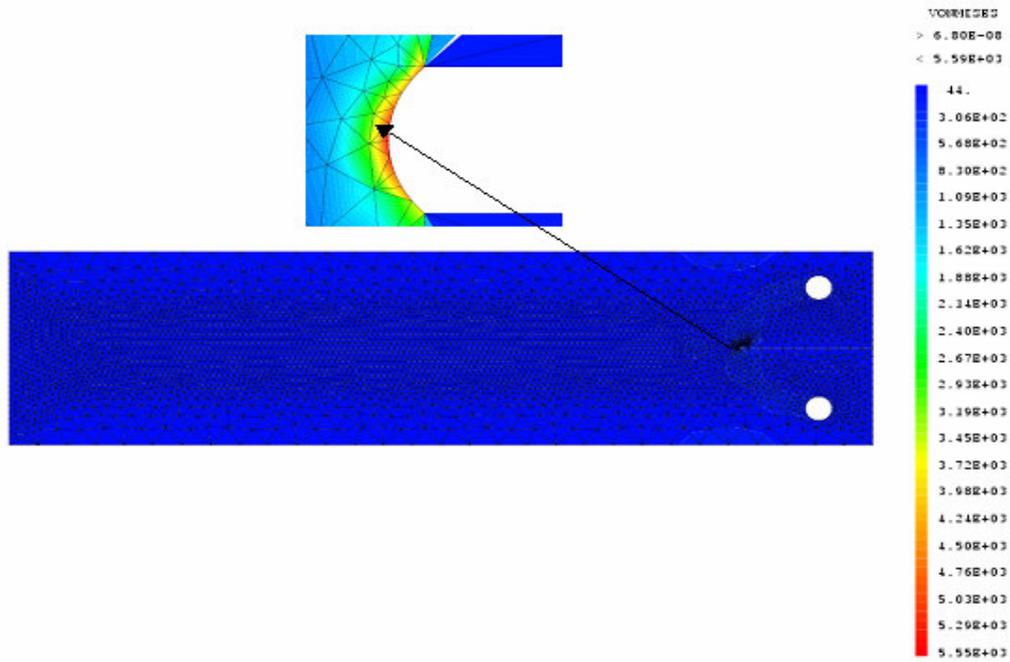


Figure c- 4-a : Distribution des contraintes Von Mises sur une éprouvette DCB en bois massif.

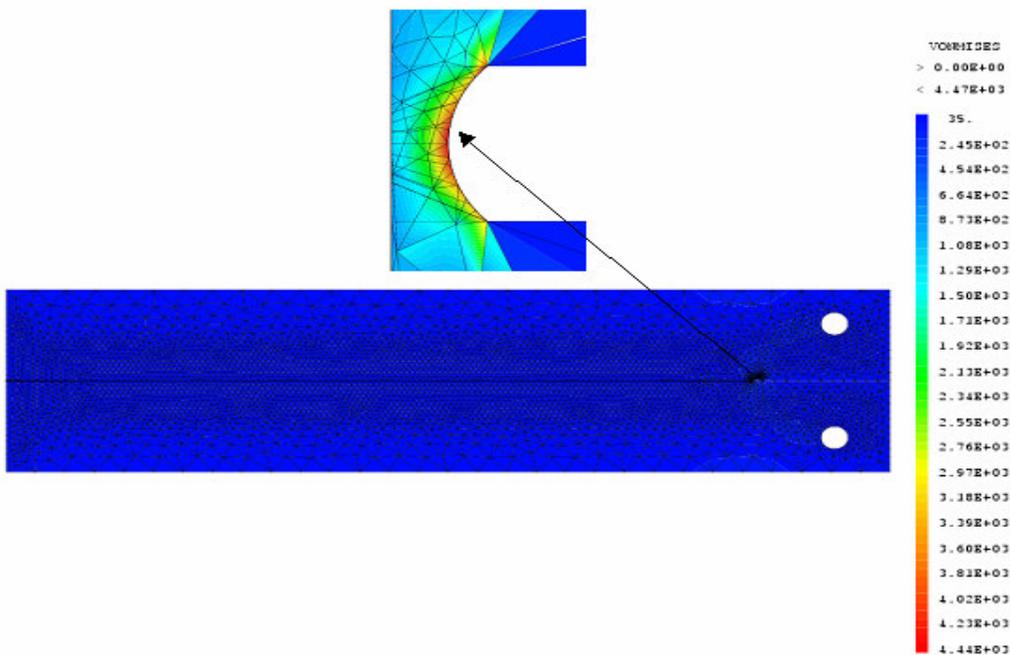


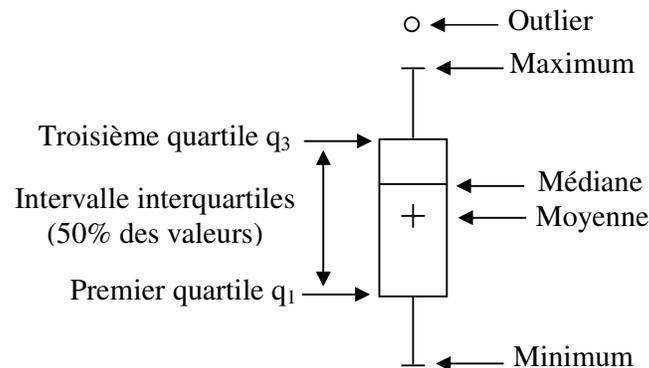
Figure c- 4-a : Distribution des contraintes Von Mises sur une éprouvette DCB en bois collé

Nous avons calculé la ténacité G_1 par la procédure G-THETA du code CASTEM et le facteur K_{1C} par la formule suivante : $G_{1C} = S^* \times K_{1C}^2$

ANNEXE D : Box Plot ou Boite à moustaches

Une "**boîte à moustaches**" (traduction française du terme "**Box and Whiskers Plot**", ou en abrégé "**Box Plot**") est une représentation graphique de quelques paramètres de distribution d'une variable, inventée par Tukey en 1977. Il en existe plusieurs variantes. Celle utilisée ici est une version simplifiée affichant pour chaque série:

- **les premier et troisième quartiles** (q_1 et q_3) : bordures inférieure et supérieure de la boîte rectangulaire
- **la médiane**: trait horizontal long au sein de la boîte rectangulaire
- **la moyenne**: marque plus (+) au sein de la boîte, pouvant être confondue avec la médiane
- **les extrémités inférieure et supérieure des moustaches**: marques en forme de tiret (-) située sur le trait vertical, et correspondant respectivement à la plus petite donnée supérieure à $q_1 - 1,5 * (q_3 - q_1)$ et à la plus grande donnée inférieure à $q_3 + 1,5 * (q_3 - q_1)$
- **les minimum et maximum**: marques extrêmes en forme de cercle (o); si le minimum ou le maximum n'est pas confondu avec le tiret d'extrémité de moustache, c'est qu'il s'agit d'une valeur **atypique** ("**outlier** ").



Le box plot permet de visualiser rapidement:

- **La plus ou moins forte concentration** des valeurs : autour de la médiane (intervalle interquartiles, hauteur de la boîte) et celle des queues de distribution (les pattes, chacune 25 % des valeurs).

Remarque : la hauteur de la boîte représente 50 % des valeurs, plus cette hauteur est grande (petite) plus les valeurs correspondantes sont étalées (concentrées).

- **La symétrie** de la distribution : position de la médiane dans la boîte et globalement; différence de longueur des pattes. Plus la moyenne s'écarte de la médiane plus la distribution est asymétrique (attention aux valeurs aberrantes qui influence la valeur de la moyenne) et inversement plus la médiane et la moyenne sont proches plus la distribution est symétrique. Lorsque la médiane est inférieure à la moyenne, les valeurs inférieures sont plus fortement concentrées, les valeurs supérieures plus fortement étalées.

Le box plot permet aussi de comparer visuellement la distribution d'une variable à l'intérieur des sous-populations formant l'échantillon, par la construction d'un box plot pour chacune des sous-populations sur un même graphique (même échelle). La position des indicateurs de tendance centrale et la variabilité de la distribution dans chacune des sous-populations peuvent ainsi être comparées.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1 : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

- Figure 1.1 :** Croissance du bois.
- Figure 1.2 :** Plan ligneux chez les résineux et chez les feuillus.
- Figure 1.3:** Description microscopique des bois résineux. Coupe transversale; coupe radiale; coupe tangentielle.
- Figure 1.4:** Description microscopique des bois feuillus. Coupe transversale; coupe radiale; coupe tangentielle.
- Figure 1.5:** Organisation générale d'une paroi de cellule ligneuse.
- Figure 1.6:** Eléments constitutifs de la matière ligneuse.
- Figure 1.7:** Principe de la mise en place des contraintes de croissance.
- Figure 1.8:** Schématisation des contraintes dans l'arbre sur pied.
- Figure 1.8a:** Arbre équilibré droit.
- Figure 1.8b:** Arbre en flexion.
- Figure 1.9:** Fissure à une et plusieurs branches des bois feuillus
- Figure 1.10:** Mode de sciage en quatre quartiers.
- Figure 1.11:** Déformations traditionnelles lors de sciage.
- Figure 1.12:** Masse volumique en fonction de l'âge cambial pour 9 bois résineux de l'Ouest.
- Figure 1.13:** Variation de la masse volumique à l'intérieur des cernes annuels.
- Figure 1.14:** Les trois plans de référence.
- Figure 1.15 :** Tronc idéal, repère global et repère local.
- Figure 1.16:** Exemple de liaison chimique directe entre adhérent et adhérent.
- Figure 1.17:** Utilisation d'un agent de couplage pour former une liaison chimique.
- Figure 1.18:** Influence de la rugosité des substrats sur l'ancrage mécanique.
- Figure 1.19:** Etalement d'une goutte sur un substrat solide.
- Figure 1.20:** Couches de faible cohésion du modèle de Bikerman.
- Figure 1.21:** Décomposition du processus de collage suivant les principaux mécanismes d'adhésion mis en jeu.
- Figure 1.22:** Les différentes conceptions des assemblages collés.
- Figure 1.23:** Bois assemblé en scraf et en profil coin
- Figure 1.24:** Bois assemblé en entures multiples.
- Figure 1.25:** Agencement idéal de lamelles de bois dans la section des poutres lamellées collées.
- Figure 1.26:** Définition des paramètres pour le calcul de K.
- Figure 1.27:** Définition des modes de sollicitation.
- Figure 1.28:** Notations pour l'analyse thermodynamique de la fissuration.
- Figure 1.29:** Contour arbitraire autour de l'extrémité d'une fissure.
- Figure 1.30:** Influence mécanique sur la ténacité.
- Figure 1.31:** Influence du taux d'humidité sur la ténacité des joints de colle de résorcine phénolique.

CHAPITRE 2 : MATÉRIAU VÉGÉTAL ET MÉTHODE

- Figure 2.1:** Photo et description schématique de la mesure des indicateurs des contraintes de croissance GSI par la méthode du trou unique développée au CIRAD-Forêt.
- Figure 2.2:** Localisation des mesures des GSI.
- Figure 2.3:** Position des différents prélèvements des échantillons dans le tronc.
- Figure 2.4:** Barrette du plateau diamétral pour les profils d'humidité et d'infradensité.
- Figure 2.5:** Confection du matériau d'essai.
- Figure 2.6:** Dispositif de BING.
- Figure 2.7:** Séchoir Cathild.
- Figure 2.8:** Caractéristiques géométriques des éprouvettes de traction.
- Figure 2.9:** Exemple avec un angle d'aboutage de 45°.
- Figure 2.10:** Montage d'essai sur éprouvette de traction.
- Figure 2.11:** Caractéristiques géométriques de DCB.
- Figure 2.12:** Montage d'essai sur éprouvette DCB en traction.

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

- Figure 3.1:** Représentation polaire des GSI pour les trois arbres d'Eucalyptus grandis.
- Figure 3.2:** Représentation polaire des GSI pour les trois arbres du chêne vert.
- Figure 3.3:** Profil expérimental des GSI centrés sur la valeur maximale pour les trois arbres d'Eucalyptus grandis et sa moyenne.
- Figure 3.4 :** Profil expérimental des GSI centrés sur la valeur maximale pour les trois arbres de chêne vert et sa moyenne.
- Figure 3.5:** Profil modélisé des GSI centrés sur la valeur maximale pour les trois arbres d'Eucalyptus grandis et sa moyenne.
- Figure 3.6 :** Profil modélisé et expérimental des GSI d'Eucalyptus grandis.
- Figure 3.7:** Profil modélisé des GSI centrés sur la valeur maximale pour les trois arbres de chêne vert et sa moyenne.
- Figure 3.8 :** Profil modélisé et expérimental des GSI de chêne vert.
- Figure 3.9:** Distribution cumulée des GSI d'Eucalyptus grandis et de chêne vert.
- Figure 3.10:** Profils d'humidité des rondelles en bois d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.
- Figure 3.11:** Profils d'infradensité des rondelles en bois d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.
- Figure 3.12:** Représentation graphique en box plot de densité anhydre d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.
- Figure 3.13:** Représentation graphique en box plot de la densité à l'humidité H d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.
- Figure 3.14:** Représentation graphique en box plot de l'infradensité d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.
- Figure 3.15:** Représentation graphique en box plot du retrait radial d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.
- Figure 3.16:** Représentation graphique en box plot du retrait tangentiel d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.
- Figure 3.17:** Représentation graphique en box plot du retrait volumétrique d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.
- Figure 3.18:** Représentation graphique en box plot de l'anisotropie d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.

- Figure 3.19:** Représentation graphique en box plot du module d'élasticité dynamique de Bernouilli E_B d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.
- Figure 3.20:** Représentation graphique en box plot du module d'élasticité dynamique de Timoshenko E_T d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.
- Figure 3.21:** Représentation graphique en box plot du module de cisaillement dynamique de Timoshenko G_T d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.
- Figure 3.22:** Relation entre le module d'élasticité dynamique et l'infradensité.
- Figure 3.23:** Relation entre le module spécifique et la densité.
- Figure 3.24:** Courbe charge déplacement de traction du bois d'Eucalyptus grandis.
- Figure 3.25:** Courbe charge déplacement en traction du bois de Chêne vert.
- Figure 3.26:** Représentation graphique en box plot de la contrainte à la rupture du bois massif d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.
- Figure 3.27:** Représentation graphique en box plot de la contrainte à la rupture du bois collé en biseau d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.
- Figure 3.28:** Représentation graphique en box plot de la contrainte à la rupture du bois collé bout à bout d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.
- Figure 3.29:** Définition de la contrainte normale et de la cission au niveau du joint de colle.
- Figure 3.30:** Contrainte normale et tangentielle au niveau du joint de colle.
- Figure 3.31:** Représentation de Mohr Caquot
- Figure 3.32:** Probabilité de rupture en fonction de la contrainte de rupture des éprouvettes issues des trois arbres du bois massif d'Eucalyptus (massif, collé en biseau et collé bout à bout).
- Figure 3.33:** Probabilité de rupture en fonction de la contrainte de rupture des éprouvettes issues des trois arbres du bois massif de chêne vert (massif, collé en biseau et collé bout à bout).
- Figure 3.34:** Évolution de la fiabilité en fonction de la contrainte de rupture sur le facteur de normalisation du bois massif d'Eucalyptus grandis (massif, collé en biseau et collé bout à bout).
- Figure 3.35:** Évolution de la fiabilité en fonction de la contrainte de rupture sur le facteur de normalisation du bois massif de chêne vert (massif, collé en biseau et collé bout à bout).
- Figure 3.36:** Superposition des courbes fiabilité et défaillance d'Eucalyptus grandis.
- Figure 3.37:** Superposition des courbes fiabilité et défaillance de chêne vert.
- Figure 3.38:** Courbe charge déplacement des éprouvettes DCB massives et collées des bois d'Eucalyptus grandis (a) et de chêne vert (b).
- Figure 3.39:** Courbe de complaisance des éprouvettes DCB massives et collées issus des bois d'Eucalyptus grandis (a) et de chêne vert (b).
- Figure 3.40:** Ténacité en fonction de la longueur de la fissure. Moyenne des trois arbres et de chaque arbre du bois massif et du bois collé d'Eucalyptus grandis (a) et de chêne vert (b).
- Figure 3.41:** Ténacité moyenne par arbre du bois massif et du bois collé en fonction des indicateurs de contraintes de croissances GSI.
- Figure 3.42:** Observation à la stéréoscopie du faciès de rupture.
- Figure 3.43:** Amorçage de la fissure d'une éprouvette DCB massive.
- Figure 3.44:** Amorçage de la fissure d'une éprouvette DCB collée.
- Figure 3.45:** Propagation de la fissure d'une éprouvette DCB massive.
- Figure 3.46:** Propagation de la fissure d'une éprouvette DCB collée.

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1 : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

- Tableau 1.1:** Modèles prévisionnels du comportement tridimensionnel élastique.
Tableau 1.2: Exemples d'énergies de surface pour quelques matériaux courants (données du CETIM - Centre Technique des Industries Mécaniques).
Tableau 1.3: Energies des différents types de liaisons intermoléculaires.
Tableau 1.4: Compatibilité colle/matériau pour plusieurs matériaux de construction.
Tableau 1.5: Classe de résistance du bois lamellé collé selon le projet de norme prEN 1194.
Tableau 1.6 : Variation du taux de restitution d'énergie G_{1C} en fonction de l'épaisseur du joint de colle et du pourcentage d'assouplissement.

CHAPITRE 2 : MATÉRIAU VÉGÉTAL ET MÉTHODE

- Tableau 2.1:** Caractéristiques dendrométriques des arbres sur pieds.

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

- Tableau 3.1:** Résultats des mesures des GSI pour les huit arbres d'Eucalyptus grandis.
Tableau 3.2: Résultats des mesures des GSI pour les huit arbres de chêne vert.
Tableau 3.3: Coefficient de choix pour abattre des arbres d'Eucalyptus grandis et de chêne vert.
Tableau 3.4: Caractéristiques physiques et du bois d'Eucalyptus grandis et du Chêne vert.
Tableau 3.5: Caractéristiques mécaniques par BING des bois d'Eucalyptus grandis et de Chêne vert.
Tableau 3.6: Tableau récapitulatif des essais de traction sur le bois d'Eucalyptus grandis.
Tableau 3.7: Tableau récapitulatif des essais de traction sur le bois du Chêne vert.
Tableau 3.8: Tableau récapitulatif de la contrainte normale σ_α et de la cisssion τ_α sur le bois d'Eucalyptus grandis.
Tableau 3.9: Tableau récapitulatif de la contrainte normale σ_α et de la cisssion τ_α sur le bois du Chêne vert.
Tableau 3.10: Paramètres de la loi de Weibull du bois d'Eucalyptus grandis pour la distribution à deux paramètres.
Tableau 3.11: Paramètres de la loi de Weibull du bois de chêne vert pour la distribution à deux paramètres.
Tableau 3.12: Paramètres de la loi de Weibull des bois d'eucalyptus E. grandis, E. gomphocephala et du sapin blanc pour la distribution à deux paramètres.
Tableau 3.13: Contrainte de rupture sur le facteur de normalisation à $R = Q = 0,5$
Tableau 3.14: Constantes rhéologiques et ténacité des matériaux étudiés.
Tableau 3.15: Comparaisons des Ténacités expérimentales, deux poutres encastées, ASTM D3433-75 et Castem2000. Moyenne des trois arbres et de chaque arbre du bois massif et du bois collé d'Eucalyptus grandis.

- Tableau 3.16:** Comparaisons des Ténacités expérimentales, deux poutres encastrées, ASTM D3433-75 et Castem2000. Moyenne des trois arbres et de chaque arbre du bois massif et du bois collé de chêne vert.
- Tableau 3.17 :** Valeur de complaisance complexe S^*
- Tableau 3.18:** Facteur d'intensité de contraintes critiques. Moyenne des trois arbres et de chaque arbre du bois massif et du bois collé d'Eucalyptus grandis.
- Tableau 3.19:** Facteur d'intensité de contraintes critiques. Moyenne des trois arbres et de chaque arbre du bois massif et du bois collé de chêne vert.

RÉSUMÉ

L'objectif visé par cette étude est la mesure des indicateurs de contrainte de croissance (GSI) des bois d'Eucalyptus grandis et de chêne vert et la détermination des propriétés technologiques en vue de la valorisation de ces deux espèces sous forme de bois collé. Trois arbres d'Eucalyptus grandis et de chêne vert ont été étudiés. Des éprouvettes de traction en bois massif, bois collé (bout à bout et en biseau) et des éprouvettes DCB en bois massif et en bois collé ont été confectionnées. La qualité de l'assemblage est traitée par un modèle probabiliste basé sur l'approche statistique de Weibull permettant de prédire la fiabilité des systèmes collés.

Les GSI, mesurés à la périphérie des arbres, caractérisent l'état du bois formé dans les toutes dernières années. La distribution des GSI a révélé d'une manière générale que ces deux essences se comportent de manières différentes. L'Eucalyptus grandis et le chêne vert présentent une nervosité élevée. Ces caractéristiques obtenues permettent de classer le chêne vert en un bois dur et l'Eucalyptus grandis en bois mi-dur. Les deux essences sont nerveuses, de forts retraits et une rigidité moyenne.

Le bois massif d'Eucalyptus grandis et de chêne vert présente un comportement fragile avec une contrainte de rupture du chêne vert deux fois plus grande que celle d'Eucalyptus grandis. Le bois collé bout à bout ou en biseau de ces deux espèces présente des contraintes de rupture presque similaires. Le module de Weibull m du bois massif de ces deux espèces est faible à celui du bois collé.

La mesure de la ténacité (ou taux de restitution de l'énergie) du bois massif et du bois collé d'Eucalyptus grandis et de chêne vert s'est faite par la méthode de complaisance. Le bois massif de ces espèces est plus tenace que le bois collé, ce dernier a une ténacité plus élevée que celle de la colle polyuréthane. La valeur moyenne de la ténacité déterminée expérimentalement est en bon accord à celle obtenue par le code élément fini CASTEM 2000, la méthode de deux poutres encastées et par la méthode de l'ASTM D3433-75.

Dans le bois massif, la fissure s'amorce dans le plan présentant le moins de résistance et les types de rupture observés lors de sa propagation sont intercellulaires et transcellulaires. Dans le bois collé la fissure s'amorce dans le joint de colle pour le chêne vert, et à la fois dans la colle et dans le bois pour l'Eucalyptus grandis. Alors que sa propagation est toujours adhésive pour le chêne vert et mixte pour l'Eucalyptus grandis (alternativement dans le bois et dans la colle).

Mots-clés : Eucalyptus grandis, Chêne vert, contrainte de croissance, GSI, propriétés physiques, bois massif, bois collé, éprouvette de traction, éprouvette DCB, Weibull, rupture.