



HAL
open science

Etude et modélisation de l'endommagement d'un assemblage collé bois-bois sollicité en traction

Olivier Dinkel

► **To cite this version:**

Olivier Dinkel. Etude et modélisation de l'endommagement d'un assemblage collé bois-bois sollicité en traction. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Paul Verlaine - Metz, 1997. Français. NNT : 1997METZ006S . tel-01777194

HAL Id: tel-01777194

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01777194>

Submitted on 24 Apr 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>

6 M1992

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ DE METZ

par

Olivier DINKEL

en vue de l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE METZ

Mention : Sciences de l'Ingénieur n° 7642
Intitulé : Sciences du bois

Titre

**Étude et modélisation de l'endommagement d'un
assemblage collé bois-bois sollicité en traction**

soutenue le 16 Juin 1997, devant la Commission d'Examen :

Mr PLUVINAGE G., Professeur, Université de Metz	: Président
Mr ELBEZ G., C.T.B.A., Paris	: Rapporteur
Mr VERGNE A., Professeur, Université de Clermont-Ferrand	: Rapporteur
Mr ADJANOHOUN G., C.T.B.A., Paris	: Examineur
Mr JODIN Ph., Ingénieur de Recherche, Université de Metz	: Examineur
Mr LEBIENVENU M., Professeur, E.N.I. de Metz	: Examineur

BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE - METZ	
N° inv.	19970125
Cote	S/M3 97/6
Loc	Magasin

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au sein du groupe Bois du Laboratoire de Fiabilité Mécanique de l'Université de Metz. Je tiens à remercier Monsieur le Professeur Guy **PLUVINAGE** pour m'avoir accueilli dans son Laboratoire et pour son aide et soutien moral et également scientifique.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur **Philippe JODIN**, Ingénieur de Recherche, pour les encouragements prodigués tout au long de cette étude, son aide pour la réalisation des programmes informatiques et ses orientations scientifiques et techniques.

Je remercie chaleureusement Monsieur **Gérard ELBEZ** du Centre Technique du Bois et de l'Ameublement de Paris et Monsieur le Professeur **Alain VERGNE** de l'Université de Clermont-Ferrand d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse.

Que les membres du jury, Monsieur **Georges ADJANOHOUN** du Centre Technique du Bois et de l'Ameublement de Paris et Monsieur le Professeur **Michel LEBIENVENU** de l'École Nationale d'Ingénieurs de Metz, qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail, soient ici remerciés.

Merci aussi aux membres du Laboratoire qui ont su entretenir une communication sans laquelle rien n'est possible.

Que tous mes amis et collègues soient assurés de mon amitié et de l'estime que je leurs porte.

Mes remerciements vont aussi tout particulièrement à l'ensemble du personnel technique et administratif du Laboratoire de Fiabilité Mécanique et de l'Université de Metz. Leur contribution a été essentielle dans la réalisation de ce travail. Qu'il me soit donné ici de leur exprimer ma reconnaissance pour leur sollicitude et leur efficacité.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

INTRODUCTION	9
CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	11
I-1 Généralités	11
I-2 Le bois	11
I-2-1 Origine du bois	12
I-2-2 Fonctions du bois	12
I-2-2-1 Fonction de conduction	12
I-2-2-2 Fonction mécanique	12
I-2-2-3 Fonction physiologique	12
I-2-3 Structure du bois	12
I-2-4 Structure microscopique du bois	13
I-2-5 Comportement mécanique du bois	14
I-2-5-1 Élasticité linéaire des matériaux anisotropes	14
I-2-5-2 Élasticité linéaire des matériaux orthotropes	15
I-2-5-3 Orthotropie du bois	16
I-2-6 Constantes rhéologiques du bois	17
I-3 La colle	18
I-3-1 Généralités sur les colles	18
I-3-2 Les colles industrielles	18
I-3-2-1 Structure macromoléculaire de la colle	19
I-3-2-2 Adhésifs utilisés dans l'industrie du bois	20
I-3-3 Les colles à base phénoliques	20
I-3-3-1 Généralités	20
I-3-3-2 La colle résorcine	21
I-3-3-3 Caractéristiques mécaniques	21
I-3-4 Lois de comportement de la colle	22
I-3-4-1 Détermination expérimentale de la loi de comportement	22
I-3-4-2 Remarque	23
I-3-4-2-1 Dimension du joint de colle	23
I-3-4-2-2 Pression de collage	23
I-3-4-2-3 Interaction chimique entre la colle et le substrat	23
I-3-4-3 Loi de comportement élastique	23
I-3-4-4 Loi de comportement élastoplastique	24
I-3-4-5 Loi de comportement viscoélastique	25
I-3-5 Le comportement à rupture de la colle	26
I-4 Les assemblages Bois-Colle	27
I-4-1 Introduction au collage du bois	27

	Page
I-4-2	Différents assemblages collés 27
I-4-2-1	Aboutage 29
I-4-2-2	Aboutage à entures multiples 30
I-4-3	L'adhésion 31
I-4-4	Paramètres agissant sur la résistance d'un assemblage collé 31
I-4-5	Paramètres influençant la résistance du collage 32
I-4-5-1	Introduction 32
I-4-5-2	Influence de l'humidité 32
I-4-5-3	Influence du couple bois-colle 33
I-4-5-4	Influence de l'élasticité de la colle et de l'épaisseur du joint 34
I-4-5-5	Influence de la pression de serrage et de l'épaisseur du joint 35
I-4-5-6	Influence de l'état de surface 35
I-4-5-6-1	Influence d'origine chimique de l'état de surface 36
I-4-5-6-2	Influence d'origine mécanique de l'état de surface 36
I-4-6	Conclusion 37
I-5	Endommagement 38
I-5-1	Généralités 38
I-5-2	Vocabulaire 38
I-5-2-1	Définition du dommage 38
I-5-2-2	Définition de l'endommagement 39
I-5-2-3	Convention 39
I-5-2-4	Processus de la rupture 39
I-5-2-5	Remarque 40
I-5-3	Le dommage dans les composites 41
I-5-3-1	La détérioration localisée 41
I-5-3-1-1	Le fendage 41
I-5-3-1-2	Le délaminage 41
I-5-3-2	La détérioration répartie 42
I-5-4	Composite à base de bois 42
I-5-4-1	Le dommage mécanique 42
I-5-4-2	L'altération d'ordre physico-chimique (l'endommagement) 44
I-5-4-2-1	Altération du bois 44
I-5-4-2-2	Altération des liaisons interfaciales 44
I-5-4-2-3	Altération du polymère 45
I-5-5	Méthodes d'évaluation 45
I-5-5-1	Méthodes quantifiant les dégâts 46
I-5-5-1-1	Mesure des longueurs de fissures 46
I-5-5-1-2	Mesure de rayons de cavités 46
I-5-5-1-3	Le contrôle ultrasonique 46
I-5-5-2	Méthodes mesurant l'évolution d'une propriété 47
I-5-5-2-1	Évolution de l'amplitude de déformation plastique 47
I-5-5-2-2	Évolution du module de YOUNG 48
I-5-5-2-3	Évolution de la résistance électrique du matériau 48
I-5-5-2-4	Évolution de la densité 49
I-5-5-3	Remarque 49

	Page	
I-5-6	Loi de comportement du dommage ou de l'endommagement.....	49
I-5-6-1	Loi linéaire de Miner et Palmgren	49
I-5-6-2	Loi non linéaire	50
I-5-6-2-1	Loi de Chaboche	50
I-5-6-2-2	Loi de Raguét	51
I-5-6-2-3	Loi de Corten-Dolan	52
I-5-6-2-4	Loi de Henry et Gatts	52
I-5-6-2-5	Loi de Bui-Quoc.....	53
I-5-6-3	Loi non linéaire en "forme de S"	54
I-5-7	Couplage élasticité et dommage	54
I-5-7-1	Théorie de Kachanov et Rabotnov	54
I-5-7-2	Théorie de Lemaitre et Chaboche	56
I-5-8	Couplage niveau de contrainte et dommage.....	56
I-5-8-1	Modèle de Barrett et Foschi	56
I-5-8-2	Modèle de Barrett et Foschi associé au modèle Kelvin-Voigt.....	57
I-5-9	Conclusion de l'étude bibliographique	59
 CHAPITRE II : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE		60
II-1	Introduction à l'étude expérimentale	60
II-1-1	Déroulement de l'étude expérimentale	60
II-1-2	Présentation statistique des résultats	60
II-2	Le bois	61
II-2-1	Caractéristiques de l'épicéa	61
II-2-2	Approvisionnement	61
II-2-3	Humidité	62
II-2-3-1	Domaine d'application.....	62
II-2-3-2	Définition	62
II-2-3-3	Remarque	63
II-2-3-4	Résultats	63
II-2-3-4-1	Gradient d'humidité d'une planche	63
II-2-3-4-2	Cycle de séchage	65
II-2-3-4-3	Humidité du lot de planches.....	65
II-2-4	Masse volumique et densité	66
II-2-4-1	Généralités	66
II-2-4-2	Domaine d'application.....	66
II-2-4-3	Masse volumique du bois à l'humidité H	66
II-2-4-4	Formule de passage	66
II-2-4-5	Remarque	67
II-2-4-6	Résultat sur la masse volumique à l'humidité H	67
II-2-5	Module d'élasticité longitudinal E	68
II-2-5-1	Schéma de principe de l'essai de flexion 3 points	68
II-2-5-2	Calcul du module de YOUNG	68
II-2-5-3	Résultats	69
II-2-6	Conclusion	69

	Page
II-3 La colle	71
II-3-1 Généralité	71
II-3-2 ENOCOL RLF 185	71
II-3-3 Remarque.....	71
II-3-4 Caractéristiques mécaniques de l'ENOCOL RLF 185 en traction	72
II-3-5 Caractéristiques mécaniques de l'ENOCOL RLF 185 en flexion	72
II-3-6 Conclusion.....	73
II-4 Étude de l'angle d'aboutage d'un assemblage bois-bois collé.....	74
II-4-1 Caractéristiques géométriques des éprouvettes	74
II-4-2 Montage de collage	75
II-4-2-1 Montage de collage vertical pour les angles d'aboutage \leq à 30°	75
II-4-2-2 Montage de collage horizontal pour les angles d'aboutage \geq à 45°	76
II-4-3 Pression de collage	77
II-4-3-1 Calcul de la charge à appliquer pour un angle d'aboutage \leq à 30°	77
II-4-3-2 Calcul de la charge à appliquer pour un angle d'aboutage \geq à 45°	78
II-4-3-3 Détermination de la charge F' à appliquer en fonction de l'angle α	79
II-4-4 Essais	80
II-4-4-1 Machine de traction	81
II-4-4-2 Montage de traction	81
II-4-4-3 Capteurs	81
II-4-4-4 Principe de l'essai de traction	81
II-4-5 Résultats	82
II-4-5-1 Résultats détaillés de l'ensemble des essais	82
II-4-5-2 Tableau récapitulatif des essais de rupture	82
II-4-5-3 Étude du déplacement δ en fonction de la charge de rupture P	82
II-4-5-4 Étude du faciès de rupture.....	84
II-4-5-5 Évolution de la contrainte de rupture.....	85
II-4-5-5-1 Définition de la contrainte normale et de la cission	85
II-4-5-5-2 Détermination de la contrainte normale σ_α et de la cission τ_α	86
II-4-5-5-3 Contrainte normale et cission en fonction de l'angle d'aboutage α	87
II-4-5-5-4 Conclusion	87
II-4-6 Conclusion générale sur l'étude de l'angle d'aboutage	87
II-5 Étude de l'endommagement du joint de colle.....	89
II-5-1 Caractéristiques des éprouvettes	89
II-5-1-1 Caractéristiques techniques des éprouvettes	89
II-5-1-2 Caractéristiques géométriques des éprouvettes.....	89
II-5-2 Montage de collage horizontal pour l'angle d'aboutage de 60°	91
II-5-3 Pression de collage	91
II-5-3-1 Calcul de la charge à appliquer pour un angle d'aboutage de 60°	91
II-5-3-2 Calcul de la charge à appliquer pour assembler les renforts	91
II-5-4 Montage de traction.....	92

	Page
II-5-5	Principe des essais 93
II-5-5-1	Définition du cahier des charges 93
II-5-5-1-1	Palier, vitesse et nombre de cycles 93
II-5-5-1-2	Capteur et prise de mesure 94
II-5-5-2	Mise en place du montage 95
II-5-5-2-1	Photographies de mise en place du montage 95
II-5-5-2-2	Écran de contrôle de la machine pilotée par l'ordinateur 96
II-5-6	Caractéristiques des éprouvettes utilisées 97
II-5-7	Étude spécifique d'une éprouvette : l'éprouvette n°29 99
II-5-8	Détermination de la loi d'endommagement 102
II-5-8-1	Étude du paramètre "a" 104
II-5-8-2	Étude du paramètre "b" 104
II-5-8-3	Étude du paramètre "c" 105
II-5-8-4	Synthèse sur la détermination de la loi d'endommagement 106
II-5-9	Conclusion sur le modèle d'endommagement proposé 106
II-6	Conclusion générale de l'étude expérimentale 107
 CHAPITRE III : SIMULATION NUMÉRIQUE 108	
III-1	Introduction 108
III-2	La station de travail 109
III-2-1	Le concept d'objet nommé 109
III-2-2	Le concept d'opérateur 109
III-2-3	Le langage Gibiane 109
III-2-4	Le concept de procédure 109
III-3	Modélisation de l'éprouvette 110
III-3-1	Caractéristiques géométriques de l'éprouvette 110
III-3-2	Conditions aux limites et forces appliquées 111
III-3-3	Région de la zone de calcul 112
III-3-4	Caractéristiques des matériaux 112
III-3-4-1	Loi des mélanges 112
III-3-4-2	Maillage 113
III-3-4-3	Matériau n°1 : Le bois (Surface 4 et 5) 114
III-3-4-4	Matériau n°2 : La colle (Surface 1) 114
III-3-4-5	Matériau n°3 : L'élément bois+colle (Surface 2 et 3) 115
III-4	Détermination de la zone de déformation de l'assemblage 115
III-4-1	Zone d'application du dommage D 115
III-4-2	Résultats sur la zone d'application du dommage 116
III-4-3	Conclusion sur la zone d'application du dommage 117

	Page
III-5 Influence des différents paramètres a, b, c du modèle	118
III-5-1 Influence du paramètre "a" du modèle d'endommagement.....	118
III-5-2 Influence du paramètre "b" du modèle d'endommagement.....	119
III-5-3 Influence du paramètre "c" du modèle d'endommagement.....	120
III-6 Simulation numérique de l'endommagement pour la traction monotone.....	121
III-6-1 Comparaison entre la modèle et l'expérimentation	121
III-6-2 Conclusion sur la simulation numérique de la traction monotone	122
III-7 Conclusion générale sur la simulation numérique	122
CONCLUSION	124
ANNEXES	126
RÉFÉRENCES	159

INTRODUCTION

INTRODUCTION

L'ensemble de ce travail a pour objectif d'étudier le comportement mécanique du joint de colle dans un assemblage biseauté collé bois-bois et ainsi d'améliorer les liaisons dans les structures en bois lamellé-collé.

Le collage est un procédé qui a révolutionné la construction automobile, aéronautique ou du bâtiment mais la connaissance des problèmes de sa mise en oeuvre sont nombreux et complexes. L'environnement dans lequel évoluent les assemblages collés devient alors primordial, aussi est-il nécessaire de connaître comment se comporte le joint de colle dans le temps et suivant les sollicitations.

Nous étudierons un assemblage biseauté et collé sur lequel nous effectuerons des essais de traction. Les courbes charge-déformation, comme le montre la figure ci-dessous, comportent deux parties distinctes. L'une est parfaitement linéaire et correspond au domaine élastique, l'autre est non linéaire et correspond au domaine plastique.

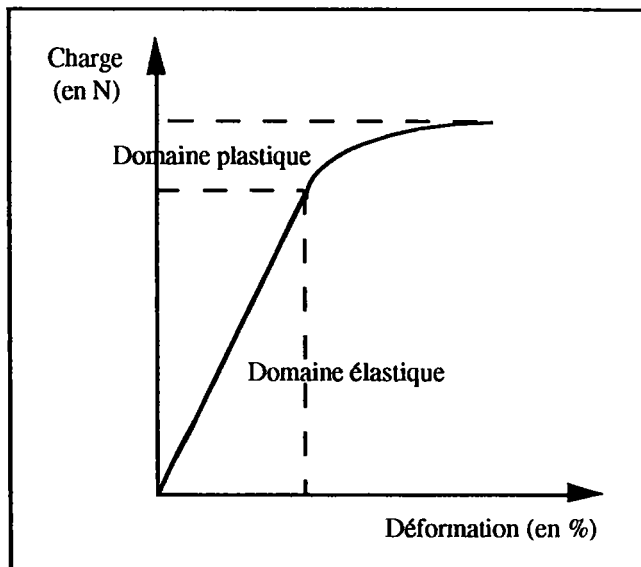


Figure : Courbe Charge-Déformation d'un essai de traction.

L'hypothèse que l'on souhaite vérifier est que : l'endommagement est le facteur responsable de l'affaiblissement de la résistance de l'assemblage. En d'autres termes, nous montrerons que la non linéarité de la courbe est due à l'apparition de l'endommagement.

Pour ce faire, nous essayerons de déterminer un modèle d'endommagement à partir d'essais cycliques.

L'ensemble de ce travail se décompose en trois parties différentes mais complémentaires.

Le premier chapitre présente l'étude bibliographique. Nous commencerons par présenter les assemblages du bois en général au travers de ses composants, non assemblés puis assemblés, en mettant en avant les notions d'endommagement.

Le deuxième chapitre nous expose le protocole expérimental adopté et décrit les différentes étapes des expériences menées depuis la fabrication des éprouvettes jusqu'à l'enregistrement des données.

Le troisième chapitre s'attache à la description de l'outil informatique utilisé pour exploiter les données et les étapes de leur traitement ultérieur aboutissant à la simulation numérique de l'endommagement.

Une conclusion générale effectue la synthèse des remarques et des résultats apparus au cours de ce travail et propose quelques réflexions sur la poursuite d'une telle étude.

CHAPITRE I

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I-1 Généralités

Étant données les différences marquées que présentent entre eux les deux matériaux constitutifs de nos éprouvettes (le bois et la colle), notre étude bibliographique présentera d'abord les connaissances acquises sur chaque composant pris séparément, puis se poursuivra par l'exposé des données concernant l'association bois-colle.

De fait, l'observation de la littérature existante actuellement sur ces deux matériaux reflète une grande hétérogénéité. Les ouvrages sur le bois s'avèrent fort nombreux. Mais, ceux abordant le comportement mécanique des colles phénol-formol-résorcinol sont assez rares. La combinaison des deux matériaux obéit à la même diversité : le lamellé-collé est un produit abondamment étudié alors que l'étude du joint de colle seul l'est beaucoup moins.

Par conséquent, les paragraphes qui suivent seront inévitablement le reflet de ces inégalités.

I-2 Le bois

La xylogologie est la science de la constitution du bois.

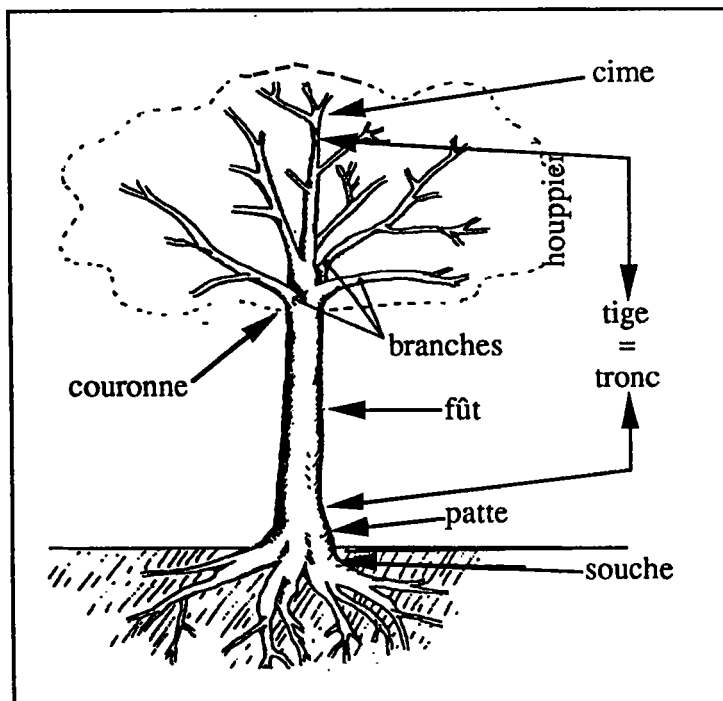


Figure I-1 ; Dessin d'un arbre.

I-2-1 Origine du bois

Le bois est un ensemble de cellules organisées de façon à répondre à certaines fonctions de la plante (arbre).

Les arbres sont des plantes pérennes c'est-à-dire des plantes qui durent longtemps. Cependant pour durer, les arbres doivent répondre à plusieurs fonctions. Pour notre étude, nous utiliserons exclusivement de l'épicéa.

I-2-2 Fonctions du bois [1]

I-2-2-1 Fonction de conduction

Pour subvenir à ces besoins nutritionnels, l'arbre doit pouvoir acheminer de la sève; que ce soit de la sève brute ascendante qui va des racines de l'arbre jusqu'à la cime ou de la sève élaborée issue de la photosynthèse qui va de la cime vers les parties basses de l'arbre.

I-2-2-2 Fonction mécanique

Elle fait intervenir la notion de résistance mécanique de l'arbre.

Pour vivre, celui-ci doit résister à l'environnement (vent, neige) et à son propre poids. Comme le roseau, l'arbre doit pouvoir plier mais ne pas rompre.

I-2-2-3 Fonction physiologique

L'arbre doit gérer son "corps".

Pour cela, il doit stocker, restituer, élaborer et transformer les substances qui lui sont nécessaires.

I-2-3 Structure du bois

Les différentes essences sont réparties en deux grands groupes :

- les feuillus (ou angiospermes),
- les résineux (ou gymnospermes).

I-2-4 Structure microscopique du bois

La structure microscopique du bois présente des différences pour un résineux et un feuillu (voir les figures I-2a et I-2b).

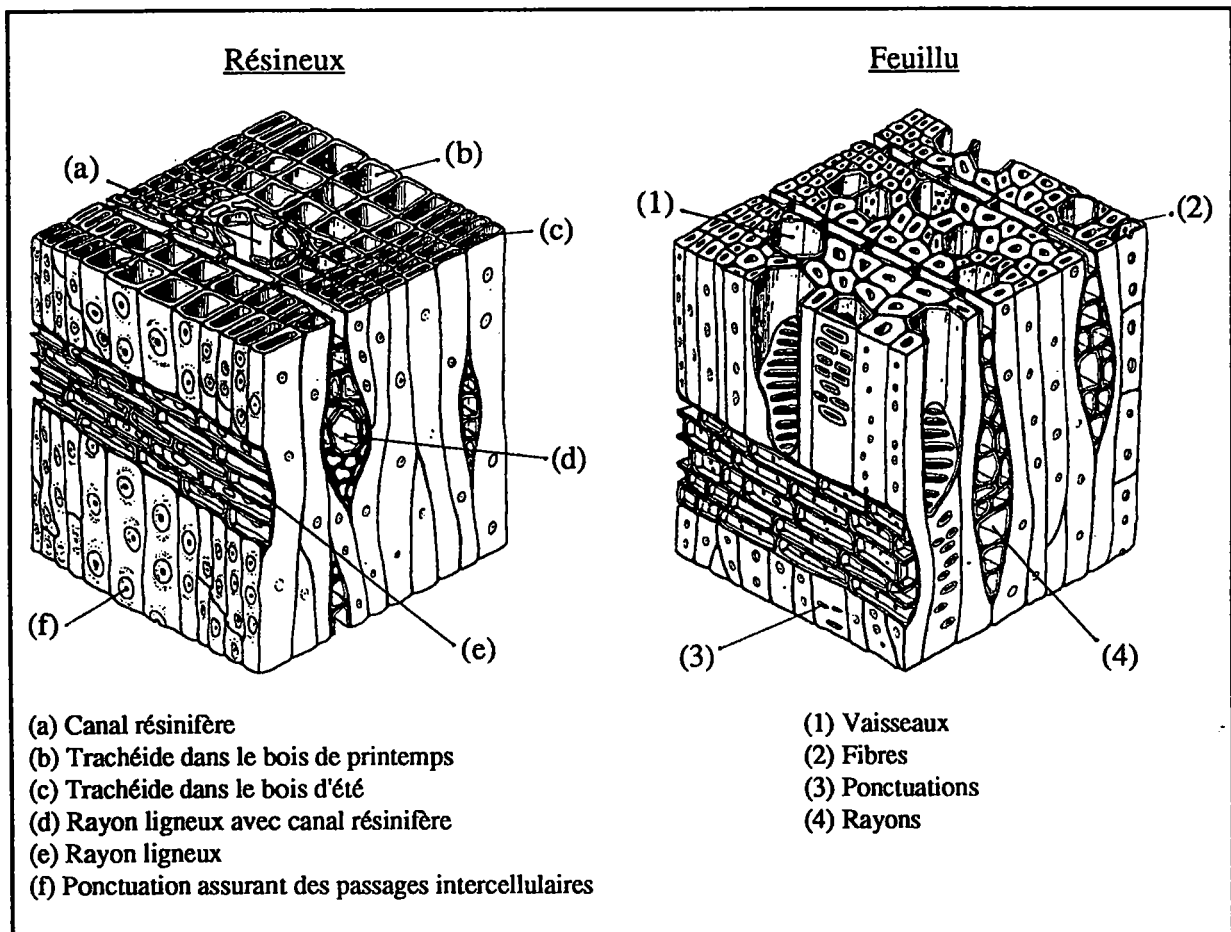


Figure I-2a et I-2b : Structure microscopique d'un résineux (I-2a) et d'un feuillu (I-2b) [2].

Le bois est un matériau anisotrope du fait de sa microstructure cellulaire. Les trachéides longitudinaux, cellules allongées (de 0,2 à 7 mm) de faible diamètre et creuses, parallèle à l'axe central du tronc, forment l'ossature, assurent la résistance mécanique, composent la part la plus importante de la densité du bois et en dessinent le fil. Chez les feuillus, ces cellules sont appelées "fibres", chez les résineux, elles sont appelées "trachéides".

La croissance dans la direction radiale s'effectue en deux étapes au cours d'une année dans les zones tempérées avec l'alternance des saisons. Ceci

implique le changement progressif de morphologie des sections des cellules qui conduit à la distinction des cernes de croissance d'une année à l'autre.

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

I-2-5 Comportement mécanique du bois

L'organisation des éléments moléculaires de base du bois est très complexe. Mécaniquement, cela se traduit par une anisotropie des propriétés.

I-2-5-1 Élasticité linéaire des matériaux anisotropes [3]

Un matériau anisotrope est un matériau dont les propriétés mécaniques dépendent de la direction suivant laquelle ses propriétés sont évaluées.

La loi de comportement élastique d'un matériau anisotrope est donnée pour un référentiel orthogonal à 3 directions (1, 2, 3) par les relations suivantes :

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \cdot \sigma_{kl} \quad \text{avec } i,j,k,l \in \{1,2,3\} \quad (\text{I-1})$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \quad \text{avec } i,j,k,l \in \{1,2,3\} \quad (\text{I-2})$$

σ_{kl} représente les composantes du tenseur de contrainte du 2^{ème} ordre ($9=3^2$)

ε_{ij} représente les composantes du tenseur de déformation du 2^{ème} ordre

C_{ijkl} représente les composantes du tenseur de rigidité du 4^{ème} ordre ($81=3^4$)

S_{ijkl} représente les composantes du tenseur de complaisance du 4^{ème} ordre

La matrice 9×9 est la matrice du tenseur des complaisances élastiques qui possède 81 composantes qui ne sont pas linéairement indépendantes.

I-2-5-2 Élasticité linéaire des matériaux orthotropes

L'orthotropie [4] est un cas particulier de l'anisotropie, à savoir qu'elle comporte trois plans de symétrie (ou d'orthotropie) qui sont perpendiculaires les uns par rapport aux autres (voir la figure I-3).

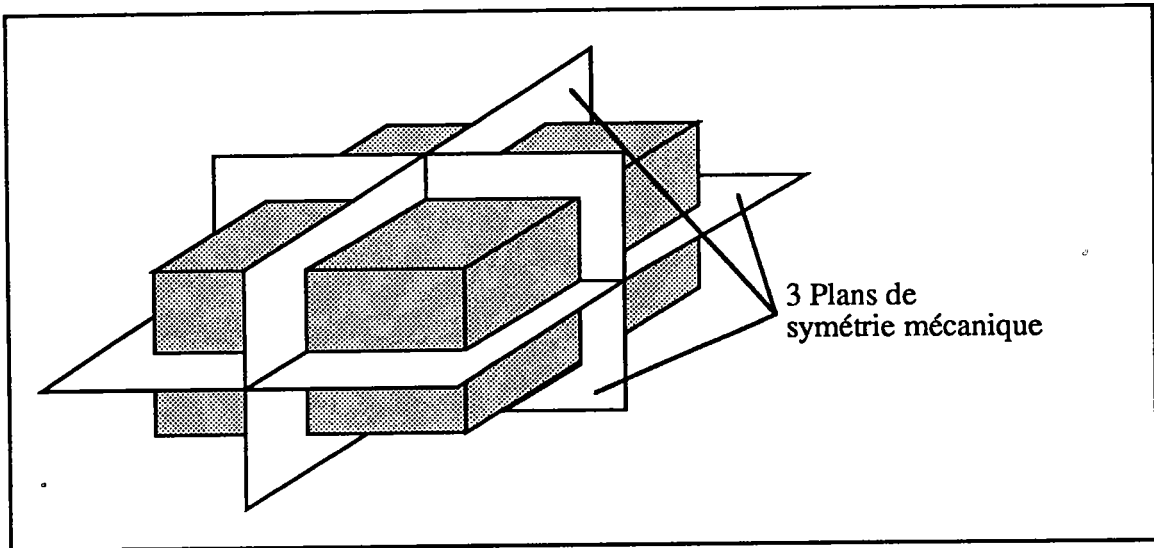


Figure I-3 : Les trois de plans de symétrie ou d'orthotropie.

Par définition, un milieu orthotrope présente en tout point deux symétries du comportement mécanique, chacune par rapport à un plan, les deux plans étant orthogonaux.

Voici la matrice simplifiée en utilisant la notation des indices contractés :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \tag{I-3}$$

L'avantage d'introduire ces trois plans d'orthotropie est que l'on simplifie les matrices de rigidité et de complaisance. Le nombre de constantes élastiques indépendantes est réduit à 9.

Outre le fait que les matrices de rigidité et de complaisance soient simplifiées, elles ont également l'avantage d'être toutes les deux symétriques puisque :

$$C_{12} = C_{21} \quad C_{23} = C_{32} \quad C_{13} = C_{31} \quad (I-4)$$

$$S_{12} = S_{21} \quad S_{23} = S_{32} \quad S_{13} = S_{31} \quad (I-5)$$

I-2-5-3 Orthotropie du bois

Si les dimensions d'une planche sont petites par rapport à la section de la grume, on peut considérer le bois approximativement comme un matériau orthotrope car on retrouve les trois plans d'orthotropie.

Avec le référentiel (R, T, L), voici la matrice du tenseur de complaisance pour le bois.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_L \\ \gamma_{TL} \\ \gamma_{RL} \\ \gamma_{RT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & \frac{1}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RL}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_R \\ \sigma_T \\ \sigma_L \\ \tau_{TL} \\ \tau_{RL} \\ \tau_{RT} \end{bmatrix} \quad (I-6)$$

Dans la loi de Hooke généralisée, les champs de déformations et de contraintes sont liés par des relations caractérisant le comportement élastique d'un milieu continu [5].

On peut aussi utiliser une autre dénomination pour définir les caractéristiques de rigidité [C] ou de complaisance (souplesse) [S]. Tous les coefficients sont exprimés à partir des constantes techniques que sont :

- le module de Young,
- le module de Coulomb (ou module de torsion),
- le coefficient de Poisson.

I-2-6 Constantes rhéologiques du bois

Le tableau I-1 donne les constantes rhéologiques d'un bois d'épicéa à H% = 12,8% et $\rho = 0,36$. Afin de mieux situer les constantes rhéologiques de l'épicéa, d'autres essences sont également citées [2].

Nom Officiel	H (%)	ρ (g/cm ³)	E_R (N/mm ²)	E_T (N/mm ²)	E_L (N/mm ²)	G_{RT} (N/mm ²)	G_{TL} (N/mm ²)	G_{RL} (N/mm ²)	-1/S ₁₂ (N/mm ²)	-1/S ₂₃ (N/mm ²)	-1/S ₃₁ (N/mm ²)
Western Red Cedar	11,5	0,28	543	365	6680	35	577	584	100	22600	17700
Épicéa de Sitka	12,8	0,36	649	348	10700	41	438	533	1160	26900	31900
Yellow Pine	13,4	0,47	1250	871	11100	142	898	903	2950	38000	33800
Pin d'Orégon	12,0	0,47	947	932	16700	114	800	747	2580	40000	31600
Western Hemlock	12,8	0,48	1720	1090	10600	160	790	940	5780	24300	19300
Bouleau	8,8	0,62	1130	630	16700	190	930	1200	1560	38500	34500
Hêtre	9,4	0,63	2040	867	14100	500	980	1850	2810	30400	38600
Peuplier	13,7	0,40	1190	493	6830	200	900	1000	1350	15200	29200
Chêne	13,7	0,63	2220	1320	9400	610	1100	1320	3440	24200	25300

Tableau I-1 : Constantes rhéologiques de plusieurs essences de bois.

Remarque :

Les coefficients de Poisson sont exprimés en termes des inverses des composantes non diagonales de la matrice des complaisances.

$$\frac{1}{S_{12}} = \frac{E_T}{\nu_{TR}} = \frac{E_R}{\nu_{RT}} ; \frac{1}{S_{23}} = \frac{E_L}{\nu_{LT}} = \frac{E_T}{\nu_{TL}} ; \frac{1}{S_{31}} = \frac{E_R}{\nu_{RL}} = \frac{E_L}{\nu_{LR}} \quad (I-7)$$

De plus, on observe généralement les relations suivantes :

$$\left(E_L = \frac{1}{S_{33}} \right) \gg \left(E_R = \frac{1}{S_{11}} \right) > \left(E_T = \frac{1}{S_{22}} \right) \quad (I-8)$$

$$\left(G_{LR} = \frac{1}{S_{55}} \right) > \left(G_{TL} = \frac{1}{S_{44}} \right) \gg \left(G_{RT} = \frac{1}{S_{66}} \right) \quad (I-9)$$

$$\nu_{RT} > \nu_{LT} > \nu_{LR} \approx \nu_{TR} \gg \nu_{RL} > \nu_{TL} \quad (I-10)$$

I-3 Les colles

I-3-1 Généralités sur les colles à bois

Les adhésifs sont des produits souvent invisibles, relevant du savoir-faire des fabricants et des utilisateurs qui développent la plupart du temps des recherches communes sur ce produit. On parle ainsi très souvent d'un ensemble de pièces sans mentionner la colle qui permet son existence, sa fonctionnalité et sa durabilité.

Aussi est-il courant de mettre au point un adhésif sur mesure pour une application donnée. Le fabricant de colle vend alors simultanément un produit et une préconisation d'assemblages.

Une colle comprend un polymère de base, des éléments "tackifiants" (qui améliorent l'adhérence), des agents stabilisants et des plastifiants. Elle comprend aussi des charges qui peuvent modifier les propriétés ou diminuer le prix. Les colles industrielles occupent tous les secteurs. L'un des plus importants est celui de l'assemblage, du collage de cartons à la pose d'étiquettes jusqu'au bois. Ce sont des colles dites structurales c'est-à-dire à fortes propriétés mécaniques.

Les adhésifs classiques structuraux sont employés pour l'assemblage de composites et des métaux, les adhésifs peu ou non structuraux sont employés lorsque la sécurité le permet.

Le collage peut aussi remplacer les méthodes mécaniques d'assemblages, avec en prime une meilleure répartition des contraintes et un avantage sur l'allègement de poids (automobile, aéronautique).

De nos jours, en matière de recyclage, les colles ne doivent pas gêner la récupération des produits assemblés.

I-3-2 Les colles industrielles

Pour se repérer dans le monde des adhésifs, une classification des produits est indispensable. Elle s'appuie principalement sur des distinctions d'ordre moléculaire, sur la mise en jeu ou l'absence de solvants organiques ou aqueux et sur le mode de durcissement et le temps de prise.

I-3-2-1 Structure macromoléculaire de la colle

Les adhésifs possèdent une structure macromoléculaire qui joue un rôle majeur au niveau de leur comportement mécanique, thermique et chimique.

Suivant la structure macromoléculaire, on distingue trois types de colles [6] : - les résines thermodurcissables :

- phénoliques
 - polyester
 - les résines thermoplastiques :
 - acryliques,
 - vinyliques
 - les élastomères :
 - polyméthanes
 - silicones
- époxydiques,
 - polyimides,
 - cellulosiques
 - polyamides,
 - polychloroprènes,
 - nitriles

Les résines thermodurcissables acquièrent leur structure après le durcissement. Chimiquement, ceci résulte d'une réticulation qui n'est pas détruite sous l'effet de la chaleur et des agents chimiques (voir la figure I-4a).

Par contre, les résines thermoplastiques et les élastomères présentent des chaînes moléculaires qui ne sont pas ramifiées ou le sont seulement en partie (voir la figure I-4b et I-4c).

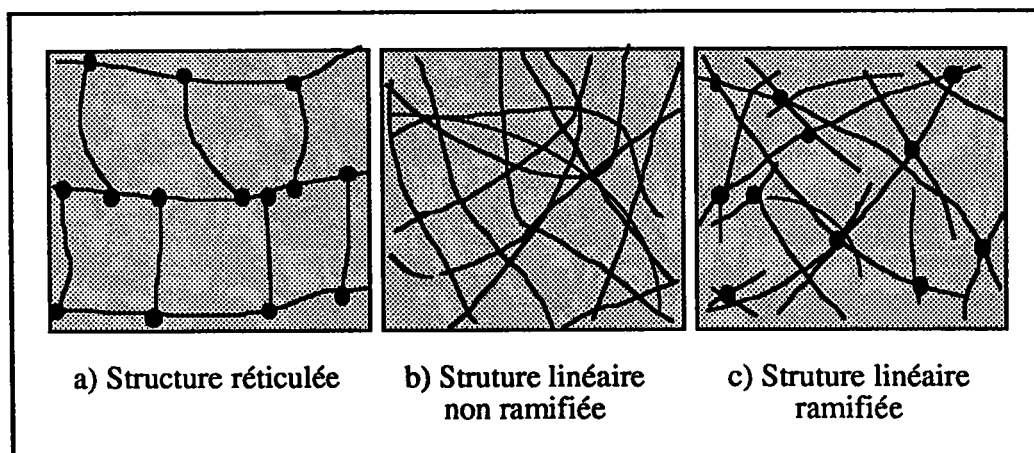


Figure I-4 : Structure moléculaire de la colle.

I-3-2-2 Adhésifs utilisés dans l'industrie du bois

Le tableau I-2 donne quelques adhésifs qui sont ou ont été utilisés selon le type d'industrie du bois [7].

Industries du bois	Types de colles								
	Animales (Os, caséine, peau)	Végétales (Amidon, soja)	Caoutchouc sauf Néoprène	Urée et Mélamine-formol	Phénoliques et résorcine	Vinyliques	Acryliques	Néoprène polychloroprène	Hot melts
Ameublement	*			*	*	*		*	*
Panneaux agglomérés			*	*					
Lattes et contreplaqués	*	*	*	*	*				
Portes isoplanes				*					
Charpentes lamellées-collées	*		*	*	*				
Huisseries			*	*	*				

Tableau I-2 : Adhésifs utilisés dans l'industrie du bois.

I-3-3 Les colles à base phénolique

I-3-3-1 Généralités

Nous exposerons, ici, les caractéristiques des colles à base phénolique. Ces adhésifs sont des thermodurcissables qui sont destinés principalement au collage du bois et des céramiques. Nous utiliserons la résorcine dans notre étude pour réaliser les collages.

La fabrication de structures (en bois lamellé-collé par exemple) et les matériaux constituants doivent être d'une qualité telle que l'intégrité de la liaison du joint de colle doit conserver la durabilité et la résistance requise pour la durée de vie envisagée de l'ouvrage.

Les colles à base phénolique se présentent sous la forme d'un liquide visqueux auquel on ajoute un durcisseur (liquide ou poudre). La polymérisation est favorisée par une température élevée.

Pour le collage du bois, les produits industriels sont additionnés de formol et parfois de résorcine en proportions variables. Les propriétés mécaniques sont par conséquent variables.

I-3-3-2 La colle résorcine

La résorcine [8] est un diphénol qui comporte donc deux groupes hydroxyles (OH) comme le montre la figure I-5. La polymérisation est provoquée par un durcisseur à base de formol.

La qualité majeure de cette résine est son excellente tenue au vieillissement. L'utilisation de cette colle présente une contrainte importante qui est d'avoir une température de polymérisation se situant au delà de 15°C.

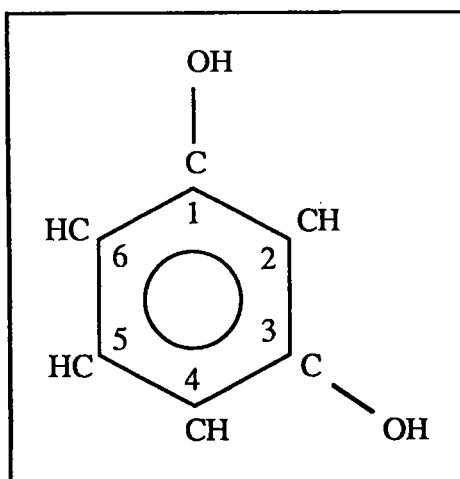


Figure I-5 : Structure chimique de la résorcine.

I-3-3-3 Caractéristiques mécaniques

Les adhésifs phénoliques, une fois polymérisés, sont assimilés à des solides isotropes. Suivant les auteurs du tableau I-3 de la page suivante, la variation du module d'élasticité et de la résistance ultime en traction est due aux nuances de proportions entre phénol, formaldéhyde et résorcine.

Référence Bibliographique	Module d'élasticité en traction	Résistance ultime en traction
Holister - Thomas [9]	2 000 à 4 000 MPa	27 à 48 MPa
Cetim [10]	4 000 à 30 000 MPa	20 à 70 MPa
Haller [11]	2 200 MPa	26 MPa
Moulin [12]	2 712 MPa	17 MPa
Birginie [8]	1 710 MPa	12 à 22 MPa

Tableau I-3 : Caractéristiques mécaniques des colles à base phénolique.

Nous n'avons que peu de données sur le module d'élasticité ainsi que sur la résistance ultime mesurés en flexion sur une colle de type phénolique. En effet, il est difficile de réaliser un essai de flexion sur une éprouvette de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur (qui est la dimension réelle d'un joint de colle).

I-3-4 Lois de comportement de la colle

Les adhésifs présentent diverses lois de comportement dues à leurs structures moléculaires différentes.

Celles-ci peuvent être purement élastique (linéaire ou non-linéaire), élastoplastique ou viscoélastique.

I-3-4-1 Détermination expérimentale de la loi de comportement

Certains auteurs [13, 14] ont étudié la loi de comportement de la colle pure en se servant des éprouvettes de traction ou de compression fabriquées par moulage.

Cela permettrait de déterminer les paramètres rhéologiques tels que :

- le module de Young,
- le coefficient de Poisson,
- les contraintes et déformations ultimes.

Les résultats obtenus servaient, le plus souvent, de données pour un calcul numérique ou analytique permettant ainsi d'évaluer les contraintes dans le joint de colle.

I-3-4-2 Remarque

Cependant, cette manière de procéder pose plusieurs problèmes de différentes natures qui sont :

- la dimension du joint de colle,
- la pression de collage,
- l'interaction chimique entre la colle et le substrat.

I-3-4-2-1 Dimension du joint de colle

L'éprouvette moulée présente un volume bien plus élevé que le joint de colle. Cet effet d'échelle peut être à l'origine d'un certain endommagement de l'éprouvette moulée.

En effet, lors de la réticulation de l'éprouvette, des contraintes résiduelles peuvent apparaître ce qui conduit à la création de microfissures [11].

I-3-4-2-2 Pression de collage

Quelques assemblages collés sont réalisés sous pression tandis que la plupart des éprouvettes moulées sont fabriquées à la pression atmosphérique.

Ce paramètre influence probablement la cinétique de durcissement et, par conséquent, modifie le taux de polymérisation.

I-3-4-2-3 Interaction chimique entre la colle et le substrat

Cette méthode ne tient pas compte de l'interaction chimique entre la colle et le substrat. Une étude de Hahn et Wender [15] sur des assemblages métalliques a montré que cette interaction peut entraîner une anisotropie du joint de colle.

I-3-4-3 Loi de comportement élastique

Les colles urée formol et résorcine présentent un comportement parfaitement linéaire jusqu'à la rupture [16] comme le montre la figure I-6 de la page suivante.

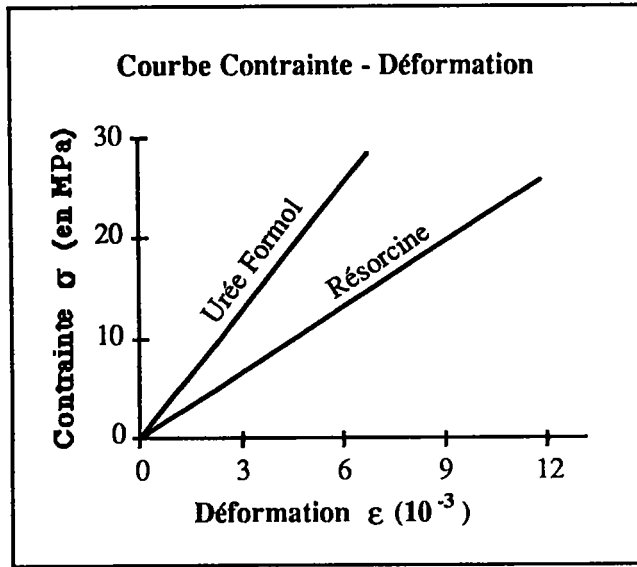


Figure I-6 : Loi de comportement élastique.

I-3-4-4 Loi de comportement élastoplastique

Les adhésifs qui présentent une loi de comportement élastoplastique ont une courbe contrainte-déformation bien spécifique (voir la figure I-7).

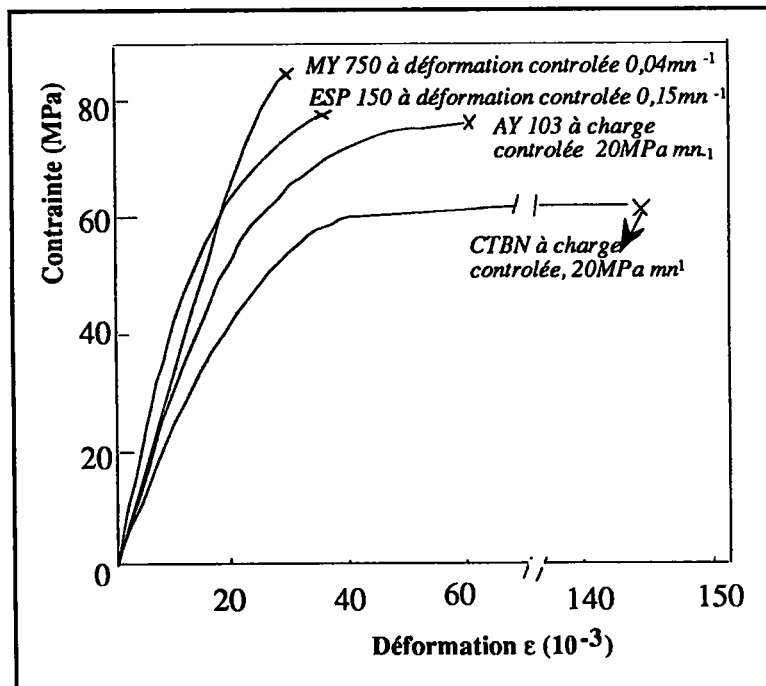


Figure I-7 : Loi de comportement élasto-plastique.

Celle-ci comporte une partie linéaire (zone élastique) et une partie non linéaire (zone plastique) comme le montrent les lois de comportement de colles époxydiques trouvées par Adams et Harris [13].

I-3-4-5 Loi de comportement viscoélastique

Duchanois [17] a étudié le comportement viscoélastique de la colle urée-formol au moyen d'un viscoélasticimètre METRAVIB. Cet appareil est basé sur le principe de la superposition temps et température en utilisant des éprouvettes de colles cylindriques ($\varnothing 6 \text{ mm} * 15 \text{ mm}$).

Si on applique une déformation sinusoïdale $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t)$ à un matériau viscoélastique, à une fréquence f et à faible amplitude, la contrainte et la déformation associée ne sont pas parfaitement en phase comme dans le cas d'un solide élastique, ni en déphasage de 90° comme dans le cas d'un solide visqueux, mais en déphasage d'un angle δ compris en 0° et 90° .

L'angle de perte δ est donc une caractéristique du matériau.

Contrainte : σ

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) = (\sigma_0 \cos \delta + i \sigma_0 \sin \delta) e^{i \omega t} \quad (\text{I-11})$$

Duchanois a remarqué que la composante de la contrainte ($\sigma_0 \cos \delta$) est en phase avec la déformation donc elle est relative à l'énergie élastique emmagasinée par le système. La deuxième composante $\sigma_0 \sin \delta$ est déphasée de 90° par rapport à la déformation donc elle représente la perte d'énergie associée au comportement visqueux.

Module dynamique : M^*

$$M^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} * e^{i \delta} = M' + i M'' \quad (\text{I-12})$$

avec M' = Module de conservation d'énergie

M'' = Module de perte ou de dissipation d'énergie

Facteur de perte : $\text{tg } \delta$

$$\text{tg } \delta = \frac{M''}{M'} = \frac{|M| \cos \delta}{|M| \sin \delta} \quad (\text{I-13})$$

Duchanois a montré que le comportement viscoélastique de la colle peut être négligé après un temps de stabilisation de 15 jours (voir la figure I-8).

Lorsque le module de conservation E' tend vers une valeur limite, le facteur de perte $\text{tg } \delta$ tend vers zéro. Cela signifie que l'adhésif utilisé dans les collages pourra être assimilé à un matériau purement élastique si les collages sont utilisés au-delà de 15 jours de fabrication. Le comportement viscoélastique se montre particulièrement à température et humidité élevées.

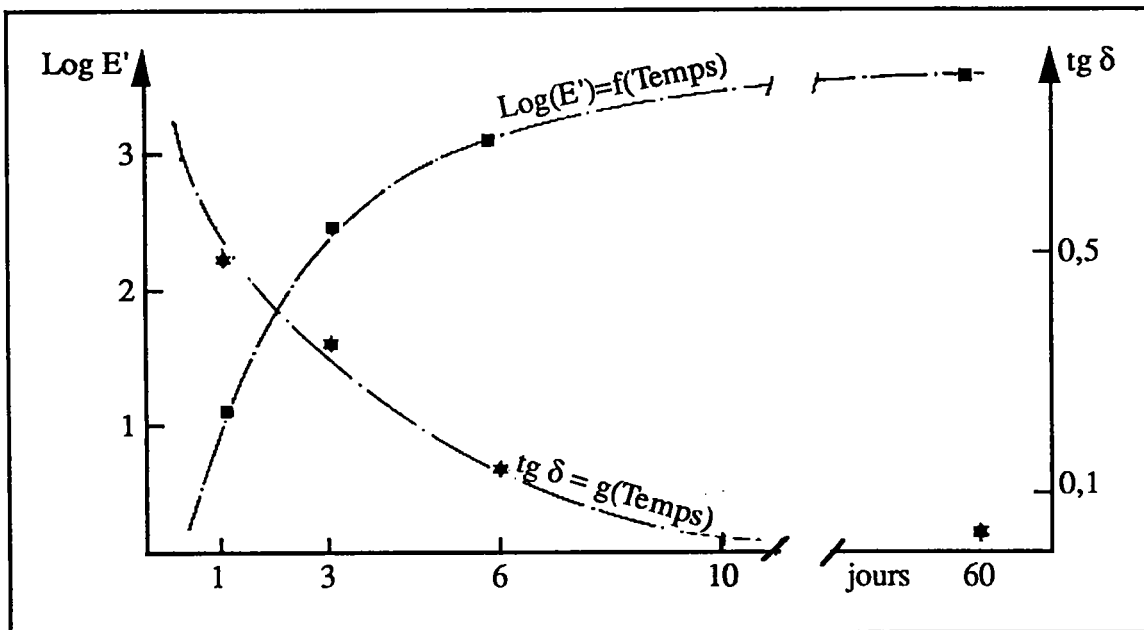


Figure I-8 : Évolution des caractéristiques viscoélastiques de la colle urée-formol (Cirbolite 1150) en fonction de la durée de polymérisation à 20°C.

I-3-5 Le comportement à rupture de la colle

Une pièce mécanique ou un assemblage est soumis à des sollicitations mécaniques, chimiques, thermiques qui peuvent conduire à son endommagement partiel ou total. La connaissance des caractéristiques rhéologiques de l'adhésif est nécessaire pour étudier le comportement à rupture de la colle qui tient un rôle primordial lorsque la défaillance de la structure se produit dans le joint.

I-4 Les assemblages Bois-Colle

I-4-1 Introduction au collage du bois

Le collage du bois connaît depuis ces dernières années un essor industriel important et couvre maintenant un vaste domaine d'applications (entre autres 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 agglomérés,
- les contre-plaqués,
- les panneaux "sandwich" d'isolation,

que des éléments de constructions (comme les 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)

I-4-2 Différents assemblages collés

Il existe de nombreux types d'assemblages collés. Mais suivant la conception utilisée, la résistance de l'assemblage n'est pas la même (voir la figure I-9 de la page suivante).

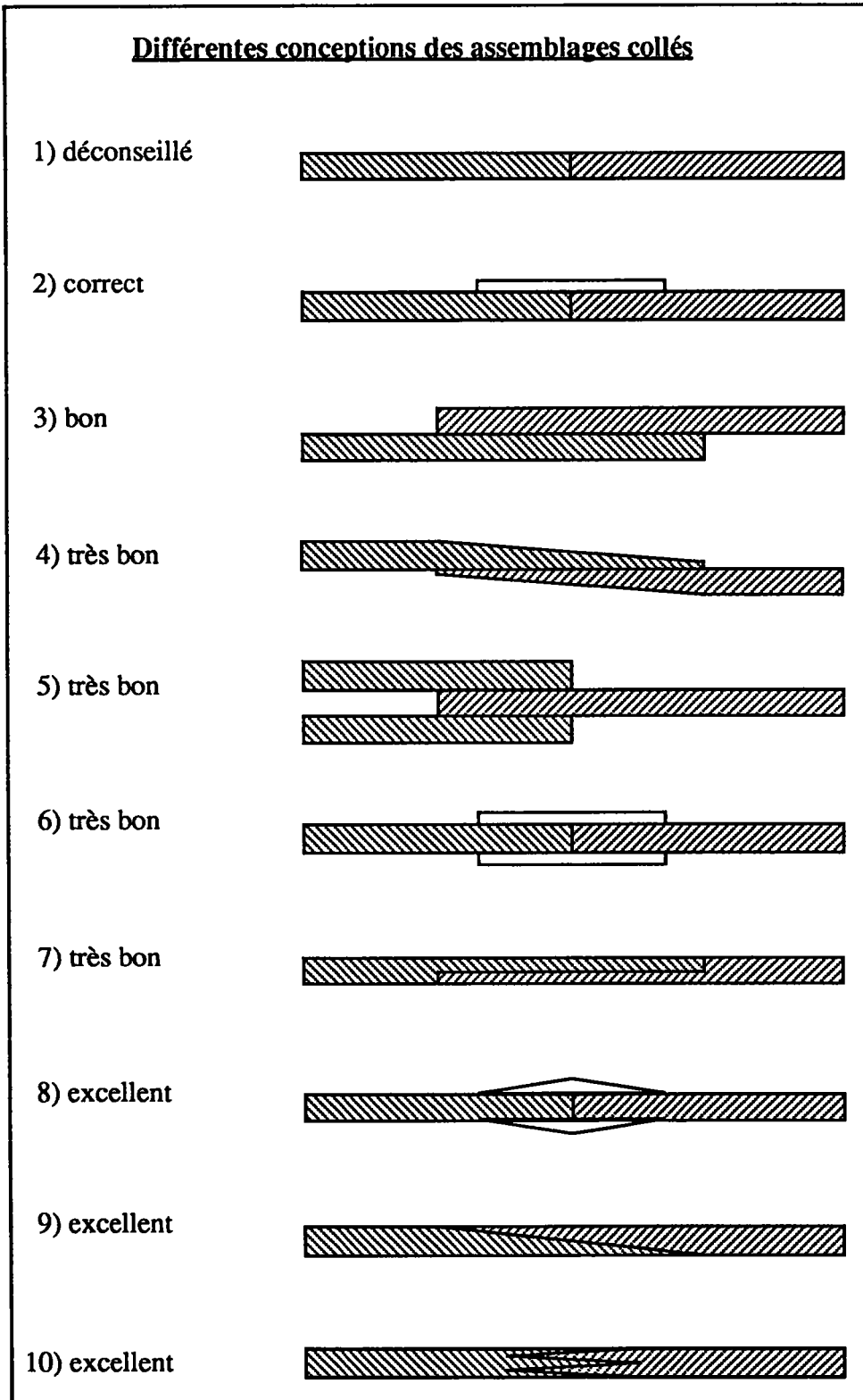


Figure I-9 : Les différentes conceptions des assemblages collés [18].

I-4-2-1 Aboutage

Les premiers assemblages à entures ont débuté par les joints avec le profil en scarf (voir la figure I-10) 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.

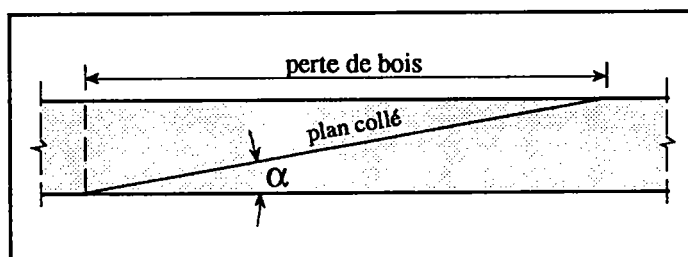


Figure I-10 : Le profil en scarf [19].

Puis l'évolution a conduit à utiliser les joints avec le profil en coin (voir la figure I-11) et le trait de Jupiter (voir la figure I-12).

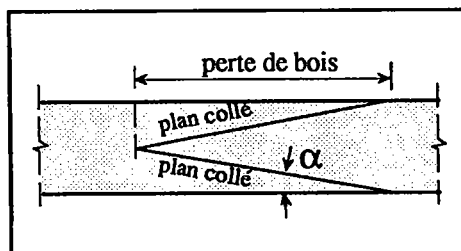


Figure I-11 : Le profil en coin [19].

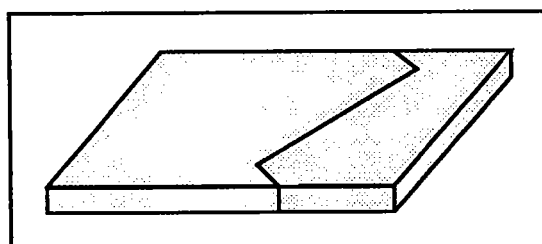


Figure I-12 : Le trait de Jupiter.

Ces nouvelles géométries 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, cependant l'usinage restait délicat.

I-4-2-2 Aboutage à entures multiples

Par la suite, on a constaté que plus on multiplie le nombre d'entures, plus on diminue la perte de bois et plus on améliore la caractéristique auto-serrante de l'assemblage (voir la figure I-13).

Selbo [20] 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 [21, 22].

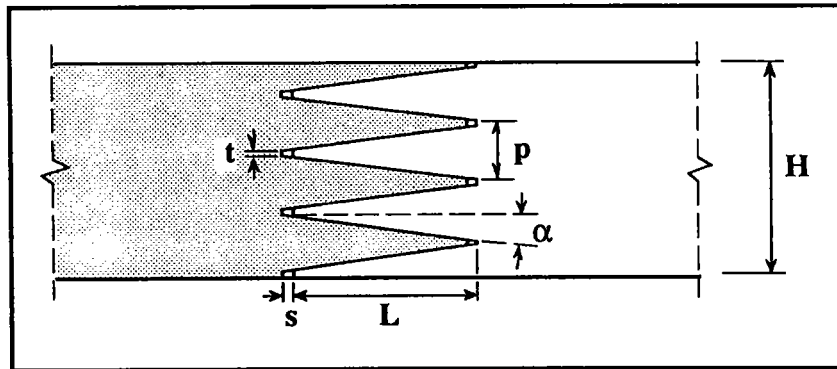


Figure I-13 : Caractéristiques géométriques des entures [19].

L : longueur des entures (en mm)

H : largeur totale de l'assemblage (en mm)

$R=(t/p)$: degré d'affaiblissement (%)

t : épaisseur d'extrémité d'enture (en mm)

p : pas des entures (en mm)

s : jeu en fond d'enture (en mm)

$j=(s/L)$: jeu relatif de l'enture (%)

α : pente du plan incliné (%)

$$\alpha = \frac{p/2 - t}{L} \text{ (en \%)} \quad \text{(I-14)}$$

I-4-3 L'adhésion

L'adhésion repose sur la formation des liaisons chimiques entre la colle et le substrat et, sur l'existence des liaisons de type VAN DER WAALS qui jouent un rôle majeur en matière de résistance adhésive.

Ces liaisons résultent de l'action des forces électrostatiques et inductives. Comme l'effet de ces forces décroît rapidement avec la distance, les molécules de la colle et du substrat doivent être mises en contact étroit. Par conséquent, une mauvaise mouillabilité et la présence d'impuretés empêchent ce contact.

Selon Bikermann [23], la rupture adhésive n'a pas lieu à l'interface même mais dans les faibles couches voisines. Pour cette raison, la rupture ne peut plus être expliquée par les forces de liaison déterminant la résistance adhésive. Bikermann estime que la rupture est amorcée entre autres par les bulles d'air dues à une mauvaise mouillabilité ainsi qu'à la formation de zones présentant un faible taux de polymérisation.

I-4-4 Paramètres agissant sur la résistance d'un assemblage collé

Fischer et Schmid [24] ont regroupé les facteurs intrinsèques influençant la résistance d'un assemblage collé (voir le tableau I-4).

Adhésion	Cohésion
Substrat - Nature du matériau - Rugosité - Impuretés - Nature chimique	Substrat - Résistance du matériau - Résistance de la surface
Colle - Groupes chimiques actifs - Forces de VAN DER WAALS - Solubilité des impuretés - Mécanisme de durcissement - Viscosité	Colle - Résistance de la colle - Taux de polymérisation - Anisotropie - Contraintes résiduelles - Relaxation
Couche interfaciale - Impuretés	
Interactions à la surface - Mouillabilité - Réaction de la colle avec la surface	

Tableau I-4 : Facteurs influençant la résistance d'un assemblage collé.

I-4-5 Paramètres influençant la résistance du collage

I-4-5-1 Introduction

Nous allons évoquer quelques paramètres jouant un rôle très important dans la résistance des joints collés (épaisseur du joint de colle, couple bois-colle, taux d'humidité).

Il est apparu que la ténacité des assemblages collés dépasse, dans certains cas, la ténacité du bois massif. Ce fait intéressant, mais surtout étonnant, est confirmé par plusieurs auteurs [11, 17].

I-4-5-2 Influence de l'humidité

Une évaluation réalisée par Koutsky [25] montre que la ténacité des assemblages collés diminue lorsque le taux d'humidité augmente (voir la figure I-14). Ce comportement est similaire à celui du bois massif.

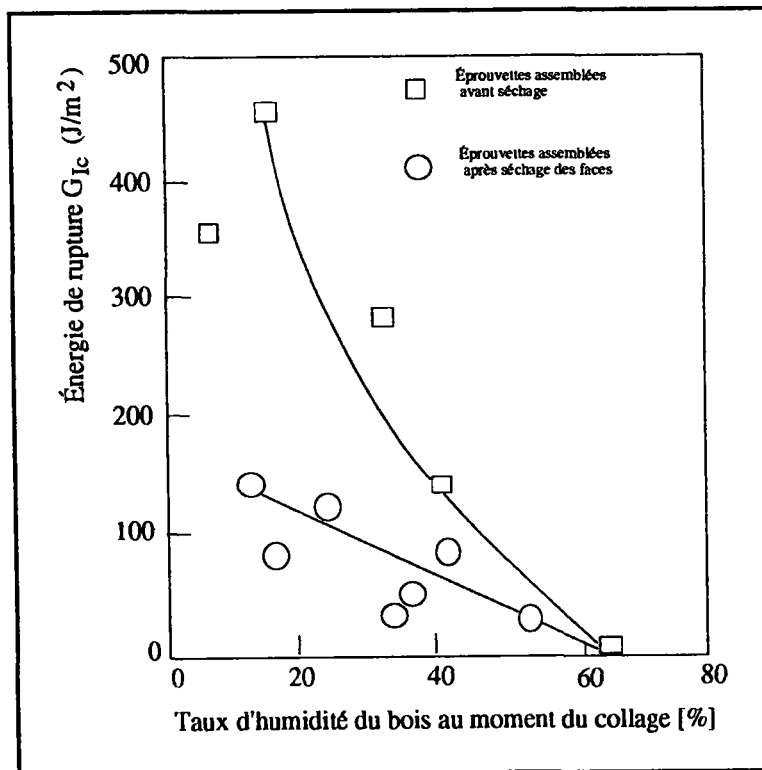


Figure I-14 : Influence du taux d'humidité sur la ténacité des joints de colle de résorcine phénolique.

I-4-5-3 Influence du couple bois-colle

Pour un type de colle et une épaisseur du joint de colle donnés, Takatani, Hamada et Sasaki [26] ont montré que la ténacité des assemblages collés dépend des propriétés mécaniques voire chimiques des substrats utilisés.

Ces auteurs ont également mis en évidence l'influence de l'essence (hêtre ou sapin) sur la ténacité d'un assemblage collé (voir la figure I-15). D'autres auteurs [17, 27] ont également travaillé sur des ruptures en mode I de quelques assemblages collés en bois.

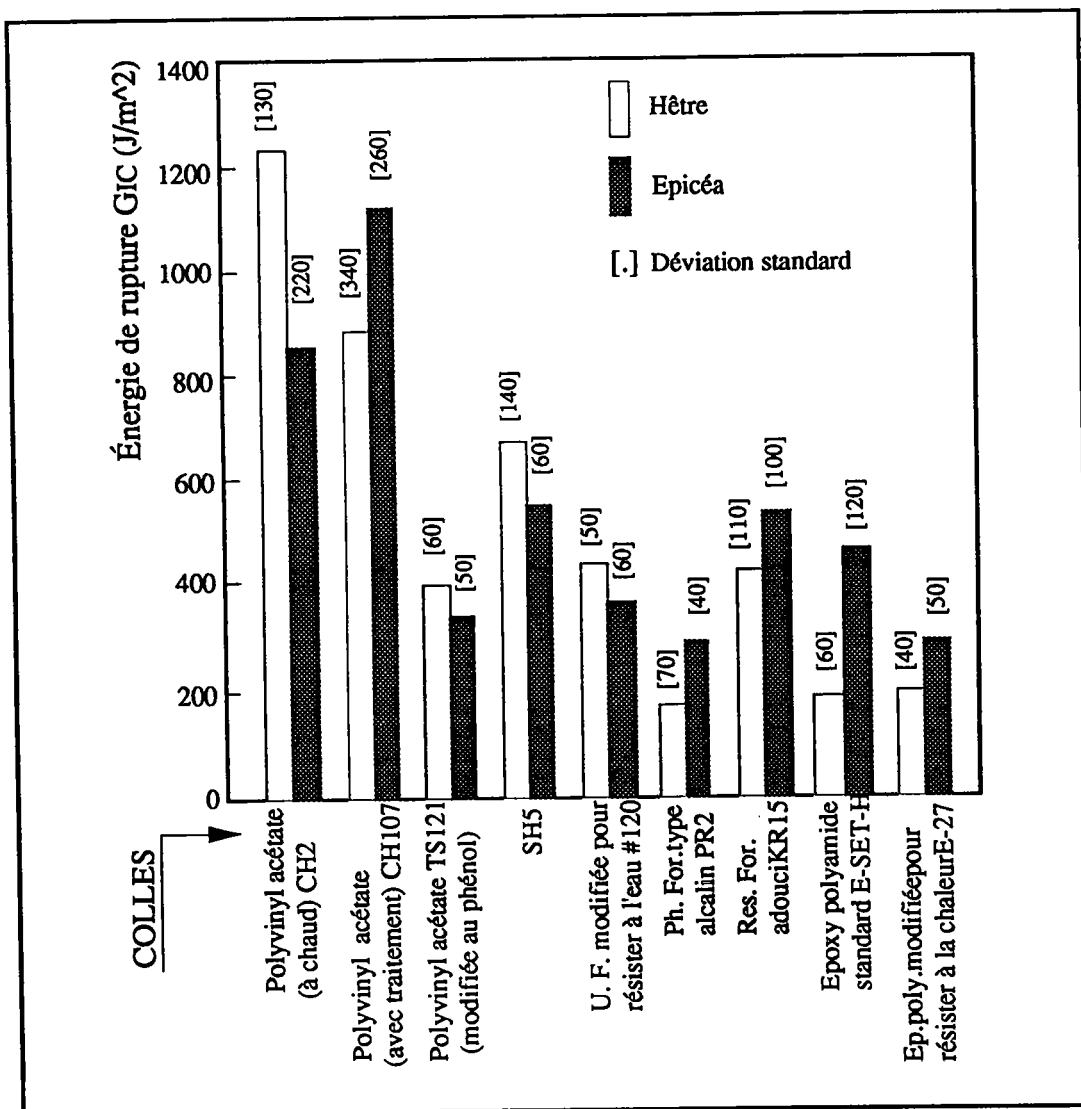


Figure I-15 : Énergie de rupture d'assemblages collés de Hêtre et Épicéa en fonction de la colle.

I-4-5-4 Influence de l'élasticité de la colle et de l'épaisseur du joint

L'influence du module de YOUNG de la colle sur le comportement à rupture a été mis en évidence par Takatani, Hamada et Sasaki [28]. Pour ce faire; la rigidité d'une résine époxy a été modifiée en y ajoutant 0%, 20%, 40% ou 60% de charge assouplissante (polysulfide). Les propriétés mécaniques des colles sont données dans le tableau I-5.

Adhésif	ν	E_{Traction} (en MPa)	$E_{\text{Compression}}$ (en MPa)	σ_{Rupture} (en MPa)	$\epsilon_{\text{Rupture}}$ (en %)	Énergie de rupture	Taux de déformation
Époxy 00	0,45	2100	3190	3,98	10,1	30,8	0,5
Époxy 20	0,46	1200	1780	2,31	21,5	44,0	0,5
Époxy 40	0,48	600	780	1,46	20,1	25,0	0,5
Époxy 60	0,49	870	150	0,49	21,4	6,7	0,09

Tableau I-5 : Propriétés des colles avec un pourcentage d'assouplissant.

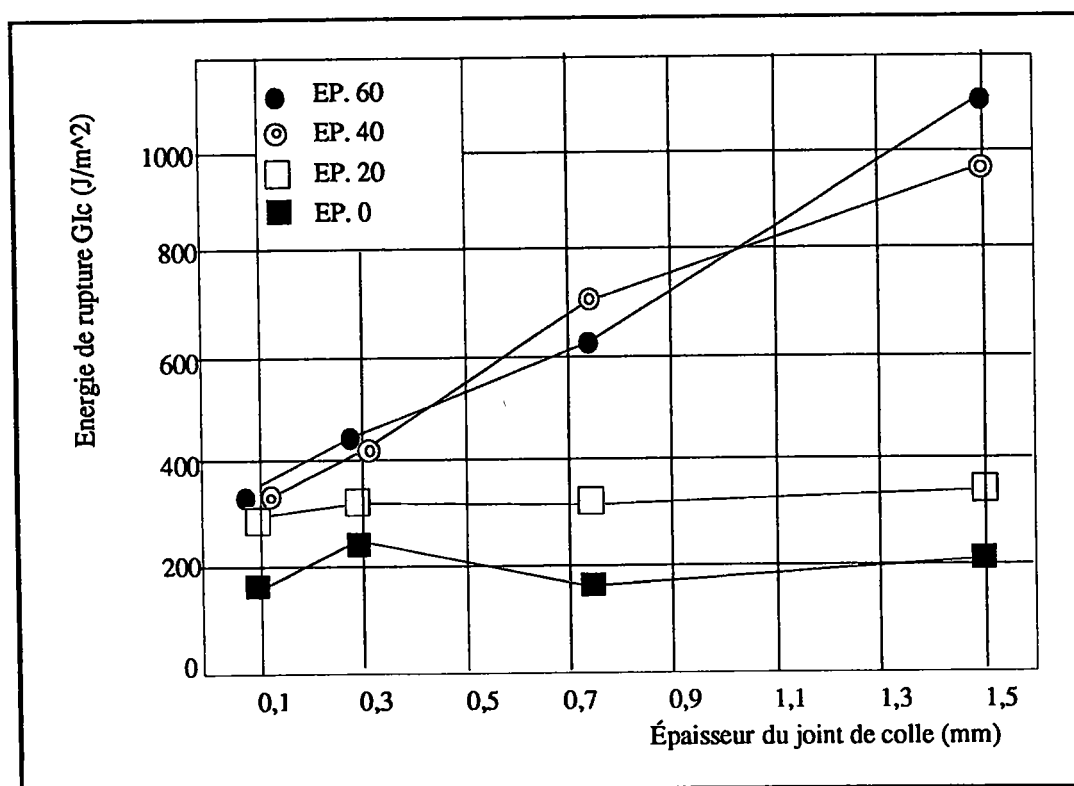


Figure I-16 : Évolution du taux de restitution d'énergie G_{Ic} en fonction de l'épaisseur du joint de colle et du pourcentage d'assouplissant (polysulfide).

L'épaisseur du joint de colle était comprise dans une large plage de 0,1 à 1,5 mm. La figure I-16 de la page précédente montre de façon évidente le gain de la ténacité. En effet, celui-ci est particulièrement grand pour les adhésifs ayant le module de YOUNG le plus faible ainsi que pour les joints de colle épais.

D'une façon générale, la ténacité d'un assemblage collé est déterminée par deux effets antagonistes : l'augmentation de l'élasticité de la colle (effet positif) et la diminution de la résistance cohésive de l'adhésif (effet négatif).

Takatani, Hamada et Sasaki recommandent comme règle empirique, l'utilisation d'un adhésif souple avec un bois rigide et inversement.

I-4-5-5 Influence de la pression de serrage et de l'épaisseur du joint

La mise sous presse de l'assemblage ne signifie pas nécessairement qu'une pression est physiquement indispensable à l'établissement des liaisons. Les colles contacts constituent un exemple de collage sans pression. Bien souvent on impose un serrage excédant le niveau requis dans un souci de sécurité. Cependant seul le contact doit être assuré entre deux lamelles encollées lors de la polymérisation. Par ailleurs, la pression exercée sur le polymère en phase liquide détermine, avec la viscosité initiale, l'épaisseur du joint polymérisé.

Rice [29] a montré que la durabilité du collage diminue pour les joints minces. Par contre, un joint épais présente aussi l'avantage de tolérer des états de surface imparfaits. Myers [30] a essayé dans ses travaux d'évaluer l'influence de plusieurs paramètres tels que la pression de serrage, la température de polymérisation et l'acidité initiale du mélange. Ces résultats révèlent l'existence d'une certaine interaction entre les différents paramètres.

I-4-5-6 Influence de l'état de surface

Selon la norme NF E 05-015 établie pour les pièces de métal usinées, on peut distinguer dans la coupe d'un profil d'état de surface des écarts allant du premier au quatrième ordre [31] :

- écart de forme (1^{er} ordre),
- ondulation (2^e ordre),
- rugosité (3^e et 4^e ordre).

Les influences de l'état de surface peuvent être de deux types :

- d'origine chimique,
- d'origine mécanique.

I-4-5-6-1 Influence d'origine chimique de l'état de surface

En pratique, le bois ne requiert pas de préparation chimique particulière avant collage. Il est un fait cependant que certains agents chimiques (acides) favorisent la création de liaisons du collage par activation de la surface de bois. Toutefois, un traitement excessif peut s'avérer destructeur; c'est la raison pour laquelle les préparations chimiques sont toujours délicates à mettre en oeuvre et généralement proscrites des modalités de collage [32].

Les produits de préservation peuvent avoir des effets positifs ou négatifs, cependant leur compatibilité avec le bois et la colle est à vérifier [33].

L'inactivation chimique du bois par carbonisation de la surface (four à 250°C) se traduit par une diminution sensible de la ténacité [25].

I-4-5-6-2 Influence d'origine mécanique de l'état de surface

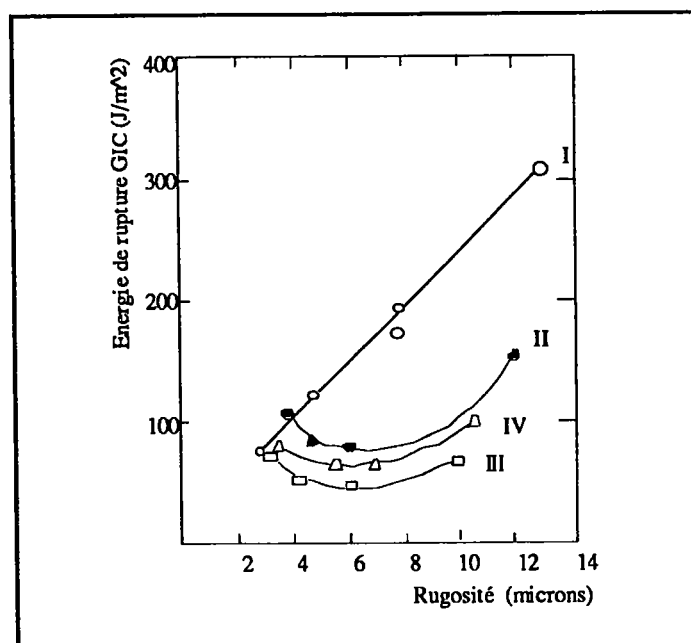


Figure I-17 : Influence mécanique sur la ténacité G_{Ic} [25].

(I) La valeur la plus élevée est obtenue par un ponçage à la main

(II à IV) Énergies de rupture de surfaces ponçées à la machine

(II) ponçage dans le sens perpendiculaire de la propagation de la fissure

(III) ponçage parallèle au sens de la propagation de la fissure

(IV) idem que (III) mais avec une machine usée

Koutsky [25] a établi une relation entre la ténacité d'un assemblage en bois collé et la rugosité des faces à coller. Les surfaces réalisées à la machine (ponceuse) conduisent à des ténacités plus faibles que celles obtenues par un ponçage à la main. Ceci provient sans doute de l'écrasement de la structure cellulaire du bois lors de l'usage de la machine (voir la figure I-17 de la page précédente).

Frühwald [14] a analysé la résistance au cisaillement d'éprouvettes collées en sapin prélevées dans des poutres lamellées-collées. Il a constaté que la ténacité diminue lorsque les poutres ont été rabotées avec des lames usées. En effet, l'écrasement de la structure cellulaire du bois entraîne une adhérence insuffisante de la colle.

Elbez [34] a montré l'importance de la texture locale du support sur les angles de mouillage et la porosité superficielle (voir le tableau I-6). Le type d'usinage de surface adopté (par exemple : le ponçage a tendance à arracher la texture du bois tandis que le rabot coupe les fibres) ainsi que la coupe du bois (en fonction de l'angle du fil et de l'orientation des cernes) influent sur la porosité des substrats et par conséquent sur leur aspect au plan physique. Il est donc important d'accorder une certaine importance au choix des bois en fonction de leur nature physiologique (duramen, aubier, bois de printemps ou d'été).

Nature du support utilisé	Pente du fil	Mouillabilité $\cos \alpha$
Zone aubieuse	0°	0,17
Zone duraminisée	0°	0,55
Zone aubieuse	20°	0,18

Tableau I-6 : Influence du choix du bois dans le pin maritime.

I-4-6 Conclusion

La plupart des ouvrages ont montré que de nombreux auteurs s'étaient intéressés de façon très précise au problème que représente la liaison entre deux matériaux comme le bois et la colle par exemple. Les précautions pour le collage du bois sont importantes et la littérature est riche d'expériences en ce sens.

Cependant, très peu de personnes se sont réellement intéressées au joint de colle. De plus, caractériser l'endommagement d'une si petite partie reste très difficile. La dernière partie bibliographique qui va suivre va nous permettre de vérifier cette réalité.

I-5 Endommagement

I-5-1 Généralités

Les matériaux composites, qu'ils soient à base de bois ou non, sont souvent présentés comme nouveaux et foncièrement innovants. La définition générale d'un matériau composite est qu'il s'agit d'un matériau formé d'éléments de plusieurs matières et de compositions différentes, et possédant de ce fait des caractéristiques spéciales [35].

On obtient de cette façon une multitude de matériaux dont les uns sont souples mais résistants, les autres rigides mais légers (comme le Kevlar par exemple). Enfin ces matériaux permettent l'élaboration de structures optimisées relativement aux fonctions à remplir, ils sont dits "sur mesure".

L'application de ces matériaux avancés n'a pas encore atteint son apogée, leur croissance semble assurée mais lente. Ils nécessitent le développement d'une méthodologie rigoureuse, analytique et expérimentale, afin notamment d'assurer la fiabilité de ces structures.

Ainsi depuis quelques années, un grand nombre d'études et de recherches ont été effectuées, mais le problème de la fiabilité de ces structures en composites est loin d'être résolu. L'obstacle principal est lié aux mécanismes complexes et à l'apparition aléatoire de l'endommagement [36].

Le processus de l'endommagement dans les matériaux composites est différent et plus complexe que pour les métaux par exemple. Ceci est dû essentiellement au fait qu'ils sont hétérogènes.

I-5-2 Vocabulaire

Comparativement à la langue anglaise, la langue française est plus riche en vocabulaire. Ainsi, si les français utilisent plusieurs mots "dommage" et "endommagement" et peuvent donc introduire des notions différentes, les anglo-saxons ne possèdent qu'un seul mot "damage".

I-5-2-1 Définition du dommage

Le terme de dommage est associé étymologiquement à la notion de dégât comme les trous ou le délaminage par exemple. Ces dégâts peuvent être de

nature microscopique (défauts ponctuels, linéaires ou plans) ou macroscopiques comme les fissures dans le cas de chargement mécanique. Ainsi le dommage d'un matériau est défini par les modifications irréversibles de sa structure interne.

I-5-2-2 Définition de l'endommagement

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

I-5-2-3 Convention

Par convention, le dommage ou l'endommagement est noté "D".

De plus, la convention généralement utilisée donc la plus courante est la suivante :

D=0 pour le matériau vierge,

D=1 pour le matériau à la rupture.

I-5-2-4 Processus de la rupture

Le processus de rupture d'une éprouvette en traction (voir la figure I-18 de la page suivante) se décompose en 4 phases bien distinctes :

Phase n°1 :

Le matériau est sain et aucune contrainte ne lui est appliquée donc $\sigma = 0$ et $D = 0$.

Phase n°2 :

On applique au matériau une contrainte σ qui reste inférieure à σ_s qui correspond à la contrainte du seuil de plasticité (seuil d'endommagement).

Cela signifie que si on supprime cette contrainte σ , le matériau reprend sa forme initiale donc $D = 0$.

Phase n°3 :

On applique maintenant au matériau une contrainte σ supérieure à σ_s . Si on supprime cette contrainte σ , le matériau ne peut plus reprendre sa forme initiale, il a subi une dégradation donc $D \neq 0$.

Phase n°4 :

On applique une contrainte σ équivalente à la contrainte de rupture critique σ_c : c'est la rupture définitive du matériau donc $D = 1$.

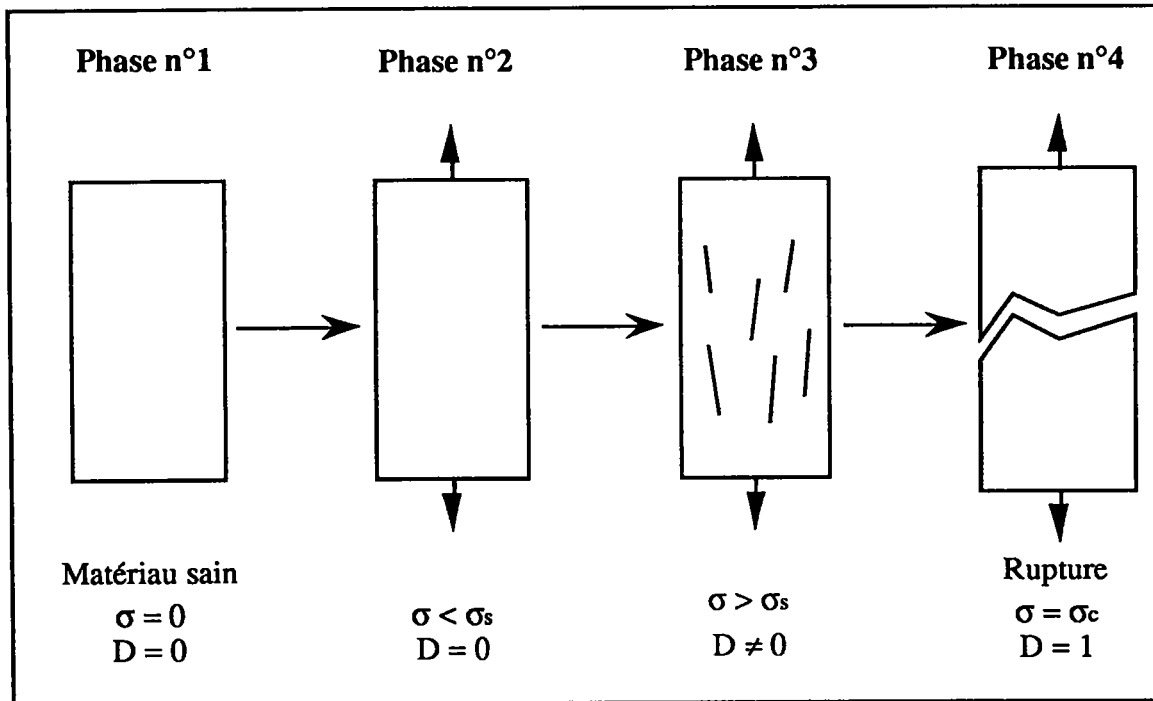


Figure I-18 : Processus de la rupture.

Le matériau subi un dommage et/ou un endommagement à partir de la phase n°3 jusqu'à la phase n°4.

I-5-2-5 Remarque

Les mécanismes d'endommagement du matériau composite rendent difficile la description de la détérioration générale, d'autant plus qu'ils jouent des rôles qui sont plus ou moins importants dans les différents composites. Les modes d'endommagement du matériau sont étroitement liés à leur mise en forme ou à leurs modes de sollicitations qui jouent un rôle fondamental [37].

Afin de déterminer avec exactitude le comportement mécanique des matériaux, il est indispensable d'évaluer quantitativement le déclenchement et la progression de l'endommagement. Les mécanismes de dégradation sont souvent très divers et difficilement dissociables, par conséquent la méthodologie d'essai devra être rigoureuse [38].

I-5-3 Le dommage dans les composites

La contribution à la dégradation des propriétés mécaniques d'un matériau composite, en général, peut se présenter sous deux formes :

- la détérioration localisée,
- la détérioration répartie.

I-5-3-1 La détérioration localisée

Afin de connaître avec précision le comportement mécanique des matériaux endommagés, il est nécessaire d'évaluer quantitativement la progression du dommage.

Ces deux modes de dommages localisés sont :

- le fendage d'une éprouvette entaillée (ou fissuration localisée),
- le délaminage.

I-5-3-1-1 Le fendage

Le dommage par fendage apparaît à partir du début d'un domaine appelé "comportement endommagé" et s'accumule progressivement jusqu'à la rupture finale.

I-5-3-1-2 Le délaminage

Lors d'une sollicitation du matériau composite stratifié, des contraintes interlaminaires apparaissent dans les régions frontières, ce qui implique le développement de zones de délaminage. Ces contraintes interlaminaires peuvent entraîner une rupture brutale ou progressive suivant un plan entre deux plis d'un stratifié [39].

Le délaminage et son influence sur les propriétés mécaniques des matériaux composites occupe une place importante dans les études de nombreux auteurs [40, 41].

I-5-3-2 La détérioration répartie

La fissuration transverse d'un pli est une détérioration non localisée. Elle est l'une des principales dégradations du matériau. Elle est prise en compte comme critère de conception car le type de fibres et leur arrangement influe sur les propriétés de résistance à la fissuration.

Le stratifié est composé d'un empilement de couches unidirectionnelles de différentes directions. De façon générale, ce sont les plis hors axe qui se fissurent transversalement les premiers sous une sollicitation en tension [42].

I-5-4 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).

I-5-4-1 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 [43] :

- 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 transversal 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 (C.T.B.A.) [44] suggère d'intervenir dans la disposition des lamelles au sein de la structure selon la figure I-19.

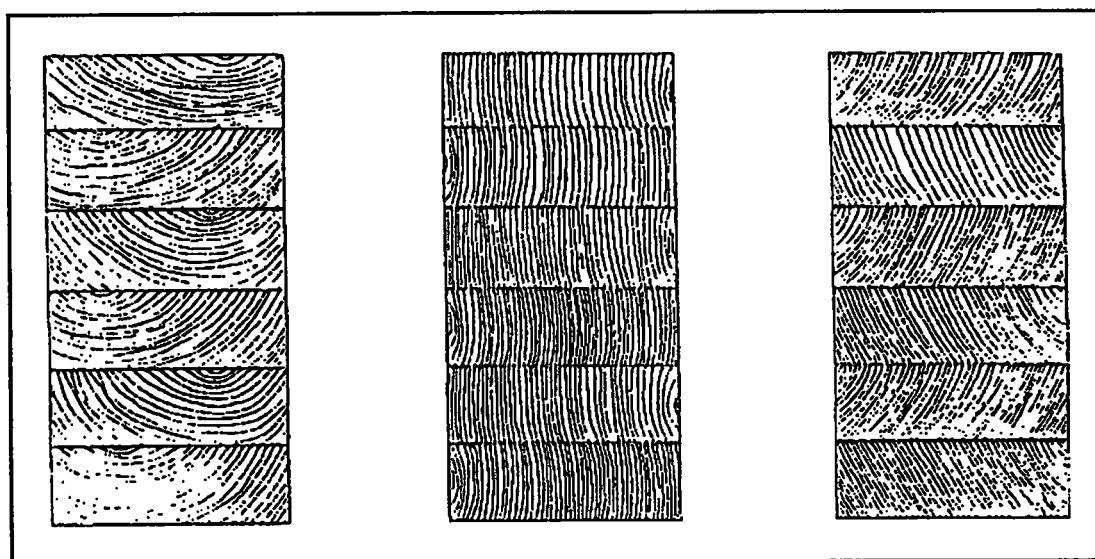


Figure I-19 : Agencement idéal des lamelles de bois dans la section des poutres lamellées-collées.

Bien qu'intuitive, cette précaution de mise en oeuvre assure une meilleure tenue en service. D'autres comme Selbo [45] ont entrepris dans les années 1950, une analyse en règle du comportement à long terme des structures lamellées-collées sur des édifices élaborés quelques années auparavant. Ces travaux, apparaissant sous la forme d'un contrôle technique, présentaient un intérêt capital à un moment où on mettait au point des résines nouvelles pour les collages structuraux en extérieur.

Le résultat de ce bilan technique révèle avant tout l'importance du traitement initial du bois dans le fait qu'il retarde la pénétration de l'eau et limite en conséquence les fissurations et la délamination. Globalement, on peut observer que la résistance résiduelle des collages qui ont subi un endommagement mécanique se réduit d'un tiers avec une certaine variabilité due au traitement.

Laufenberg [46] a envisagé une modélisation des contraintes dans la section d'une poutre lamellée-collée en vue d'apporter une explication à la création prématurée des fissurations au voisinage du joint de colle et des bords de

coupe. Cette analyse, bien que simplifiée, a toutefois le mérite de donner un aperçu de la complexité des champs de contraintes à l'origine de l'endommagement observé.

I-5-4-2 Les altérations d'ordre physico-chimique

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

- le substrat (le bois),
- l'interface,
- le polymère.

I-5-4-2-1 Altération du bois

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

Elles n'apparaissent cependant qu'à des taux d'humidité supérieurs à 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 (de résineux notamment), cela malgré une absorption massive, excédant largement le taux à l'état de bois vert.

I-5-4-2-2 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 [47]. 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 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.

I-5-4-2-3 Altération du polymère

Troughton [48] 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 (adhésives).

D'autres auteurs [47, 49] ont montré la sensibilité des colles aux effets d'activation thermique dans l'eau qui se manifeste par un affaiblissement plus ou moins réversible des qualités mécaniques du polymère en masse.

I-5-5 Méthodes d'évaluation

Les différentes méthodes utilisées pour évaluer un dommage ou un endommagement (terme désignant généralement la résultante de toutes les altérations subies par le matériau) suscitent bien des controverses, et diffèrent donc suivant les auteurs. La définition des dégâts est à considérer.

Plusieurs méthodes sont actuellement utilisées pour suivre l'évolution et mieux comprendre l'endommagement des matériaux composites mais peu sont encore utilisées pour les matériaux composites à base de bois.

Les méthodes sont classées en 2 catégories, d'une part celles qui s'intéressent à la quantification des dégâts et d'autre part celles qui examinent l'évolution d'une propriété du matériau consécutive à l'introduction de ces dégâts.

Aussi pour relier l'influence de l'un ou plusieurs d'entre eux notés Y à l'altération d'une propriété notée X, on définit une fonction d'endommagement D_X^Y qui relie Y à X soit de façon directe, soit par l'intermédiaire d'une autre fonction indicatrice en terme de dégâts \tilde{Y} ou de propriété \tilde{X} suivant la relation ci-après :

$$D_X^Y = f(\tilde{y}, \tilde{x}) \quad (I-15)$$

I-5-5-1 Méthodes quantifiant les dégâts

Pour expliciter cette notion abstraite, nous citerons quelques exemples de fonction d'endommagement de propriétés mécaniques prises à partir de dégâts se produisant lors de sollicitations mécaniques dans des matériaux métalliques.

I-5-5-1-1 Mesure des longueurs de fissures

Pineau et Levaillant [50] mesurent l'endommagement à partir des longueurs de fissures, ils considèrent la fonction d'endommagement dans les matériaux métalliques comme étant le rapport entre la longueur endommagée de joints de grains et la longueur moyenne des joints de grains.

Par conséquent, la fonction d'endommagement peut se définir ainsi :

$$D_X^Y = D_{\text{durée de vie}}^{\text{microfissure}} = f(\tilde{y}, \beta) = \frac{\text{Longueur de fissures cumulées}}{\text{Longueur moyenne au joint de grain}} \quad (\text{I-16})$$

I-5-5-1-2 Mesure de rayons de cavités

Mc Clintock [51] mesure l'endommagement à partir des rayons de cavités. Selon lui, la fonction d'endommagement dépend du rapport de l'évolution du rayon de cavité R et de son rayon initial R_0 , cavité qui se forme autour des inclusions lors de la déformation plastique ϵ_p .

Dans ce cas, la fonction d'endommagement peut se définir ainsi :

$$D_X^Y = D_{\text{déformation plastique}}^{\text{cavités}} = f(\tilde{y}, \epsilon_p) = \text{Ln}\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad (\text{I-17})$$

I-5-5-1-3 Le contrôle ultrasonique

La technique des acousto-ultrasoniques [52], apparue dans le milieu des années 1970, consiste à concilier les principes généraux des méthodes de contrôle par ultrasons et par émission acoustique. À la grande différence des essais classiques en émission acoustique, les ondes étudiées ne sont pas émises par le matériau mis sous contrainte, mais générées par un pulseur. Ces ondes interagissent avec l'ensemble du matériau testé et rendent compte de son état sur toute la zone traversée.

Principe

Lorsqu'un matériau composite reçoit un choc, la surface agit comme une paroi élastique et reprend rapidement sa forme initiale. Si la matrice ou les fibres sont endommagées, on peut voir par transparence une zone opacifiée montrant le défaut. Mais lorsque le matériau est peint ou que le composite n'est pas translucide, cette méthode ne fonctionne plus.

D'où la nécessité d'une technique de contrôle plus sophistiquée: les acousto-ultrasoniques.

Instrumentation

Les capteurs en émission comme en réception sont à contact sec et à roue. Ils sont montés dans un manipulateur qui comporte un potentiomètre de position. L'émission utilisée est de type impulsion négative à forte amplitude et à faible largeur.

Conclusion

Cette technique nouvelle de contrôle non destructif des matériaux composites s'applique à de nombreux domaines de contrôle (métallurgique, mécanique, assemblage).

Symbiose de deux techniques (ultrasons et émission acoustique), cette méthode sophistiquée utilise une instrumentation simple d'emploi adaptée à la mise au point de laboratoire comme au contrôle industriel.

I-5-5-2 Méthodes mesurant l'évolution d'une propriété

La fonction d'endommagement peut aussi être définie à partir de l'altération d'une propriété.

I-5-5-2-1 Évolution de l'amplitude de déformation plastique

Chaboche [53] étudie l'évolution de l'amplitude de la déformation plastique $\Delta\varepsilon_p$ au cours du cyclage mécanique et il considère que les dégâts apparus correspondent à l'évolution des microfissures.

$$D_X^Y = D_{\text{déformation plastique}}^{\text{microfissures}} \Delta \epsilon_p = f(\text{microfissure}, \Delta \epsilon_p) = 1 - \left(\frac{\Delta \epsilon_{p0}}{\Delta \epsilon_{pi}} \right)^{1/m_c} \quad (\text{I-18})$$

$\Delta \epsilon_{p0}$ représente l'amplitude de déformation au cycle stabilisé

$\Delta \epsilon_{pi}$ représente l'amplitude de déformation au $n^{\text{ième}}$ cycle stabilisé

m_c représente une constante du matériau utilisé

I-5-5-2-2 Évolution du module de YOUNG

Dufailly [54] définit la fonction d'endommagement à partir du module de YOUNG, il considère l'évolution de l'élasticité du matériau au cours de cyclage charge-décharge par la mesure du module de YOUNG.

$$D_X^Y = D_{\text{évolution du module d'élasticité}}^{\text{évolution de texture}} = f(\tilde{y}, E) = \frac{E - E'}{E} \quad (\text{I-19})$$

E représente le module d'élasticité lors du premier chargement

E' représente le module d'élasticité après chaque décharge

Sous l'effet des sollicitations cycliques, la structure du matériau évolue en fonction du nombre de cycles. Cette évolution s'accompagne de changements structuraux du matériau. Pour le cas du bois, il s'agit de l'arrachement des fibres puis directement de la rupture du matériau ou tout simplement dans le cas d'assemblages collés d'une rupture adhésive.

I-5-5-2-3 Évolution de la résistance électrique du matériau

Raguet [55] mesure la variation de résistance d'un corps liée aux défauts dans le matériau. Ces défauts peuvent être ponctuels, linéaires ou plans. Cette méthode est principalement utilisée pour le suivi de la propagation de fissure.

$$D_X^Y = D_{\text{rupture}}^{\text{défauts}} = \frac{R_N - R_0}{R_{N_r} - R_0} \quad (\text{I-20})$$

R_0 représente la résistance du matériau vierge
 R_N représente la résistance du matériau au cycle N
 R_{NR} représente la résistance du matériau à rupture

I-5-5-2-4 Évolution de la densité

Jalinier [56] mesure la variation de la densité. La méthode consiste à peser alternativement un échantillon de référence et l'échantillon à analyser, dans l'air puis dans un liquide. La fonction d'endommagement sera constituée par l'évolution de densité produite par les cavités qui naissent dans le matériau au cours du cyclage mécanique.

$$D_X^Y = D_{\varepsilon_p}^{\text{cavités}} = \frac{d_i - d_0}{d_0} \quad (\text{I-21})$$

d_0 représente la densité volumique au cycle initial
 d_i représente la densité volumique au cycle i

I-5-5-3 Remarque

Une fonction d'endommagement ne sera correctement définie que si la nature des dégâts pris en compte et la propriété indicatrice sont précisées [57].

I-5-6 Loi de comportement du dommage ou de l'endommagement

Une manière classique de traduire l'évolution de la fonction d'endommagement est d'introduire, comme propriété indicatrice, l'évolution de la loi de comportement.

Celle-ci peut être de 2 sortes : - linéaire,
 - non linéaire.

I-5-6-1 Loi linéaire de Miner et Palmgren

Miner et Palmgren [58] avaient supposé que le dommage noté D est une fonction linéaire (voir la figure I-20 de la page suivante) de la fraction de vie β selon la relation suivante I-22 de la page suivante :

$$d(D_X^Y) = -C_1 \cdot dN \quad \text{et} \quad \beta = \frac{N_i}{N_R} = (D_X^Y)_i \quad (\text{I-22})$$

avec : C_1 est une constante
 $d(D_X^Y) = 0$ pour $N = 0$
 $d(D_X^Y) = 1$ pour $N = N_R$

Pour un niveau de sollicitation donné :

N_i représente le nombre de cycles effectués

N_R représente le nombre de cycles à rupture

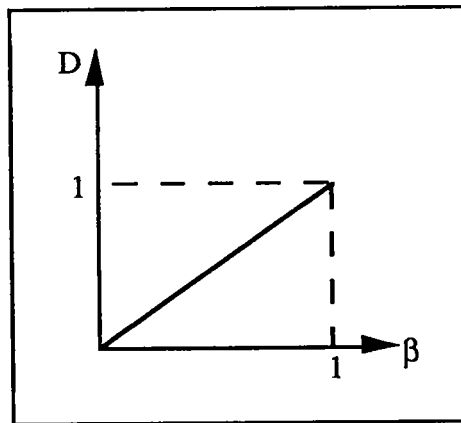


Figure I-20 : Évolution de la loi linéaire de Miner et Palmgren.

I-5-6-2 Lois non linéaire

I-5-6-2-1 Loi de Chaboche

Chaboche [53] propose une loi d'endommagement non linéaire (voir la figure I-21 de la page suivante) basée sur la mesure de l'amplitude de la déformation plastique au cours du cyclage mécanique selon la relation I-23 :

$$D_X^Y = 1 - \left(\frac{\Delta \epsilon_{p0}}{\Delta \epsilon_{pi}} \right)^{1/m_c} \quad (\text{I-23})$$

$\Delta\epsilon_{p0}$ représente l'amplitude de déformation au cycle stabilisé
 $\Delta\epsilon_{pi}$ représente l'amplitude de déformation au $n^{\text{ième}}$ cycle stabilisé
 m_c représente une constante du matériau utilisé

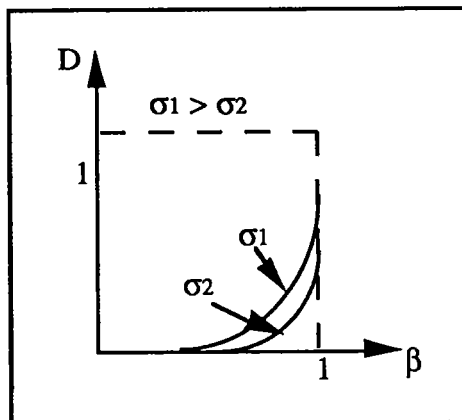


Figure I-21 : Évolution de la loi non linéaire de Chaboche.

I-5-6-2-2 Loi de Raguet

Raguet [55] traduit la fonction d'endommagement non linéaire (voir la figure I-22) selon la relation I-24 :

$$D = \frac{X_i - X_0}{X_R - X_0} \quad (I-24)$$

avec : X_0 et X_i représente la propriété au cycle initial et au cycle n^{o}
 X_R représente la propriété à rupture

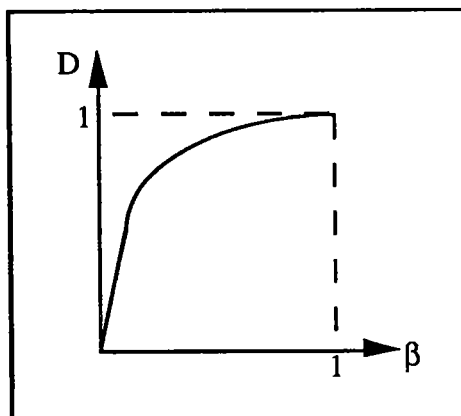


Figure I-22 : Évolution de la loi non linéaire de Raguet.

I-5-6-2-3 Loi de Corten-Dolan

Corten-Dolan [59] propose une fonction d'endommagement non linéaire (voir la figure I-23) selon la relation I-25 :

$$D_X^Y = C_2 \cdot N^a \quad \text{avec } C_2 \text{ et } a = \text{constantes} \quad (\text{I-25})$$

$$\text{Pour un niveau de contrainte } \sigma_1 : (D_X^Y)_1 = C_{21} \cdot N^a$$

$$\text{Pour un niveau de contrainte } \sigma_2 : (D_X^Y)_2 = C_{22} \cdot N^a$$

$$\text{Le rapport des niveaux de contrainte nous donne : } \frac{C_{21}}{C_{22}} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$$

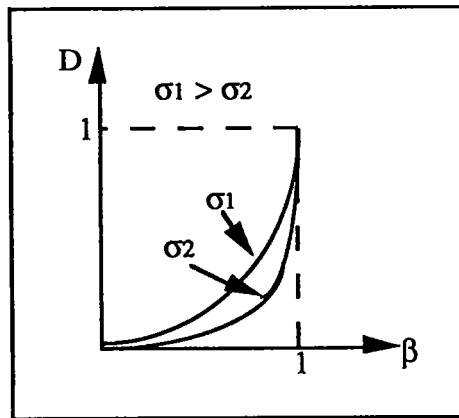


Figure I-23 : Évolution de la loi non linéaire de Corten-Dolan.

I-5-6-2-4 Loi de Henry et Gatts

Henry et Gatts [60] proposent une loi d'évolution du dommage non linéaire (voir la figure I-24 de la page suivante) selon la formule I-26 :

$$D_X^Y = \frac{\beta}{1 + \frac{1}{\gamma} \cdot (1-\beta)} \quad \text{avec } \gamma = \frac{\sigma - \sigma_d}{\sigma_d} \quad (\text{I-26})$$

- avec :
- σ : la contrainte appliquée
 - σ_d : la contrainte en limite d'endurance
 - β : la fraction de vie

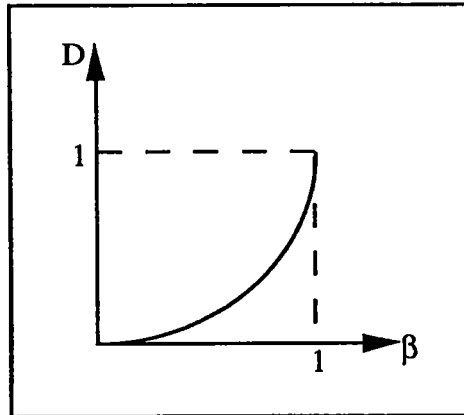


Figure I-24 : Évolution de la loi non linéaire de Henry et Gatts.

I-5-6-2-5 Loi de Bui-Quoc

Bui-Quoc [61] propose une loi d'évolution du dommage non linéaire (voir la figure I-25) selon la formule I-27 :

$$D_X^Y = \frac{\beta}{\beta + (1-\beta) \left[\frac{\gamma - (\gamma/\gamma_u)^8}{\gamma - 1} \right]} \quad \text{avec } \gamma_u = \frac{R_m}{\sigma_d}; \gamma = \frac{\sigma}{\sigma_d} \quad (\text{I-27})$$

avec : σ : la contrainte appliquée
 σ_d : la contrainte en limite d'endurance
 R'_m : Résistance ultime cyclique

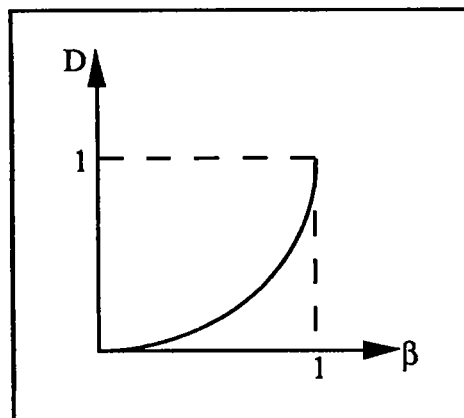


Figure I-25 : Évolution de la loi non linéaire de Bui-Quoc.

I-5-6-3 Loi non linéaire en "forme de S"

Pluinage et Raguet [62] proposent une loi d'évolution du dommage non linéaire en "forme de S" (voir la figure I-26) selon la formule I-28 :

$$D_F = \frac{F_0 - F_N}{F_0 - F_R} \quad (\text{I-28})$$

avec :

F_0 représente la valeur de la charge pour le matériau vierge

F_R représente la valeur de la charge quand la fissure apparaît

F_N représente la valeur de la charge après N cycles de déformations

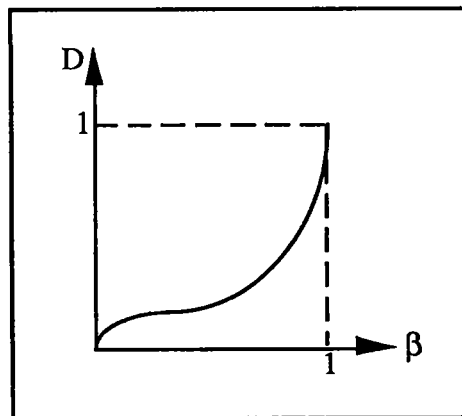


Figure I-26 : Évolution de la loi non linéaire en "forme de S" de Pluinage et Raguet.

I-5-7 Couplage élasticité et dommage

L'endommagement dans les matériaux composites apparaît dès les premiers cycles, et se manifeste progressivement tout au long du cyclage, par une évolution des caractéristiques mécaniques.

L'endommagement est lié à la réduction de la surface résistant à la sollicitation. Lors de l'étude expérimentale, nous utiliserons ce type de couplage car il se prête bien à la simulation numérique.

I-5-7-1 Théorie de Kachanov et Rabotnov

L'approche géométrique de Kachanov [63] est basée sur le concept de la contrainte effective. L'utilisation de la notion de contrainte effective repose sur

l'hypothèse suivante : les relations de comportement élastique, plastique, ou viscoélastique du matériau endommagé s'écrivent sous la même forme que celle d'un matériau vierge en remplaçant les contraintes nominales σ_n par les contraintes effectives $\tilde{\sigma}$.

Ces dernières, introduites initialement par Rabotnov [64] sont les contraintes qui, appliquées à un élément de volume non endommagé, provoqueraient une déformation égale à celle produite par la contrainte apparente σ appliquée à l'élément de volume endommagé.

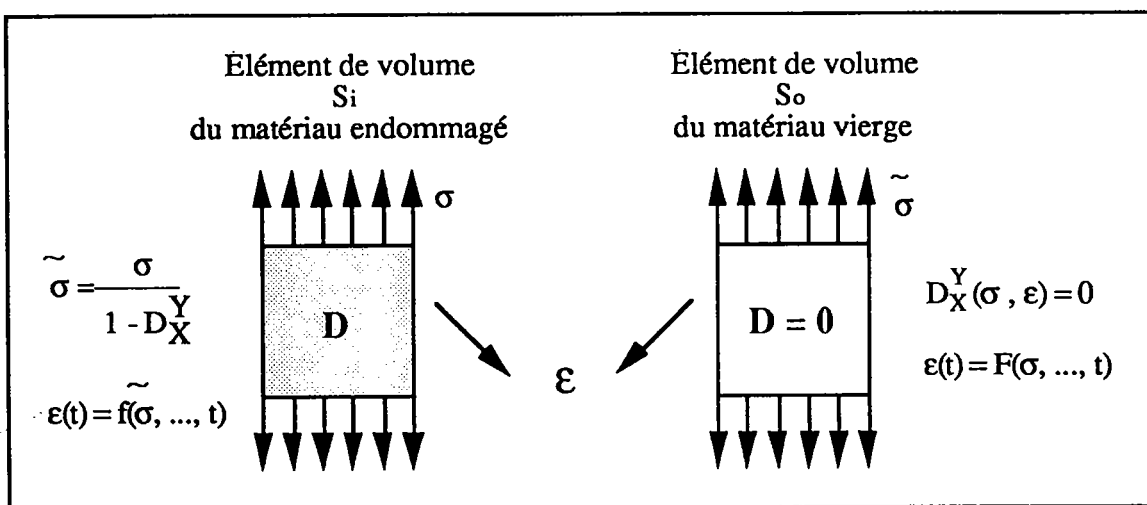


Figure I-27 : Théorie de Kachanov.

L'évolution du dommage est donnée par la relation I-29 :

$$D_X^Y(\sigma, \epsilon) = f(\tilde{\sigma}, \dot{\sigma}, D) \quad (I-29)$$

La contrainte effective σ_e

$$\sigma_e = \frac{\sigma}{1 - D} \quad (I-30)$$

σ_e est supérieure à σ pour un matériau endommagé

$D = 0$ correspond à l'état non endommagé ou matériau vierge

$D = 1$ correspond à l'état d'endommagement maximal ou rupture

I-5-7-2 Théorie de Lemaitre et Chaboche

Lemaitre et Chaboche [65] proposent ensuite de remplacer la contrainte appliquée σ , dans les lois de comportement du matériau non endommagé, par la contrainte effective σ_e

La déformation élastique en traction d'un matériau avec endommagement s'écrit :

$$\varepsilon^e = \frac{\sigma_e}{E} = \frac{\sigma}{(1-D)E} = \frac{\sigma}{E_e} \quad \text{d'où} \quad D = 1 - \frac{E_e}{E} = \frac{E - E_e}{E} \quad (\text{I-31})$$

E_e représente le module d'élasticité pour un état endommagé

La mesure de l'endommagement peut ainsi être obtenue par comparaison du module d'élasticité E_e avec le module de Young initial E .

La variable destinée à mesurer l'état d'endommagement du matériau au cours de l'essai, est donc la variation relative du module d'élasticité suivant la direction de sollicitation.

De ce fait, la raideur des éprouvettes est mesurée à intervalles déterminés tout au long des essais. La mesure des modules est toujours réalisée.

I-5-8 Couplage niveau de contrainte et dommage

I-5-8-1 Modèle de Barrett et Foschi [66, 67]

Les auteurs proposent un modèle d'endommagement développé à partir d'essais de flexion sur des éprouvettes soumises à des chargements cycliques ou aléatoires.

Ce modèle permet d'obtenir les évolutions du dommage en fonction du facteur N/N_R (N : nombre de cycles appliqués ; N_R : nombre de cycles à rupture) dépendantes d'un niveau de contrainte qui n'accumule pas d'endommagement.

L'expression du modèle de Barrett et Foschi est la suivante :

$$\frac{dD}{dt} = a \cdot \left(\frac{\sigma(t) - \sigma_0}{\sigma_s} \right)^b + \lambda \cdot D(t) \quad \text{si } \sigma(t) > \sigma_0 \quad (\text{I-32})$$

$$\frac{dD}{dt} = 0 \quad \text{si } \sigma(t) \leq \sigma_0 \quad (\text{I-33})$$

avec : a, b, λ sont des paramètres constants,
 σ_s représente la force statique du joint,
 σ_0 représente le seuil de contrainte.

$$D(t) = \exp(\lambda \cdot t) \cdot \int_{0, [\sigma(\tau) > \sigma_0]}^t a \cdot \left(\frac{\sigma(\tau) - \sigma_0}{\sigma_s} \right)^b \cdot \exp(-\lambda \cdot \tau) d\tau \quad (\text{I-34})$$

La théorie de l'analyse limite est appliquée pour déterminer la force statique du joint σ_s . Le niveau de contrainte est définie comme le ratio entre le maximum de $\sigma(t)$ et σ_s .

I-5-8-2 Modèle de Barrett et Foschi associé au modèle Kelvin-Voigt

Le modèle de Barrett et Foschi ne permet pas de prendre en compte la viscosité du bois sous chargement cyclique. Aussi le modèle de Kelvin-Voigt a été associé au modèle de Barrett et Foschi [68].

Le modèle de Kelvin-Voigt est composé d'un ressort et d'un amortisseur monté en parallèle.

Un solide parfaitement élastique obéit à la loi de Hooke tel que :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{pour le ressort} \quad (\text{I-35})$$

Un liquide visqueux obéit à la loi de Newton tel que :

$$\varepsilon' = \frac{\sigma}{\eta} \quad \text{pour l'amortisseur} \quad (\text{I-36})$$

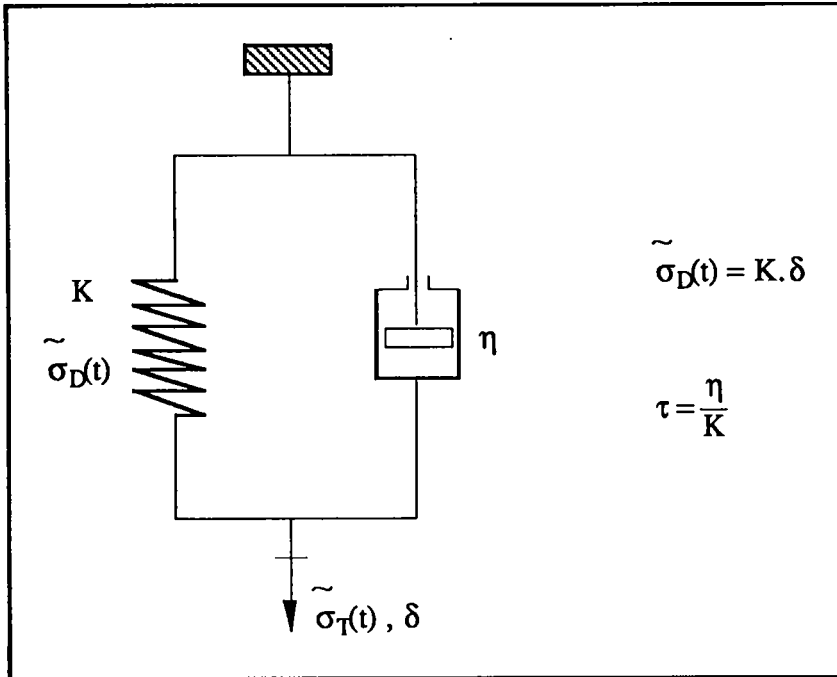


Figure I-28 : Modèle de Kelvin-Voigt.

Seule la partie élastique du modèle rhéologique est supposé être affectée par le dommage.

Dans le modèle d'endommagement, $\sigma(t)$ est remplacée par la contrainte $\tilde{\sigma}_D(t)$ comme le montre la figure I-28.

En choisissant, $\sigma_0 = 0$, l'expression du modèle de Barrett et Foschi devient la suivante :

$$\frac{dD}{dt} = a \cdot \left(\frac{\tilde{\sigma}_D(t)}{\sigma_s} \right)^b + \lambda \cdot D(t) \quad (I-37)$$

$\tilde{\sigma}_D(t)$ est fonction du taux $\tau = \frac{\eta}{K}$

Comme $\sigma_0 = 0$, le nombre de paramètres du modèle n'est pas augmenté.

I-5-9 Conclusion de l'étude bibliographique

Les assemblages collés en bois sont composés de deux éléments :

- Le bois peut être considéré comme un matériau linéaire élastique et orthotrope. Ces constantes rhéologiques sont connues et ont fait l'objet de nombreuses études.
- La colle est également relativement bien décrite. Les lois de comportement de la colle pure ont été présentées. Les critères de rupture obtenus à partir de la colle pure sont transmis au joint de colle de l'assemblage.

Le système collé nécessite l'introduction de la notion d'adhésion. Cette liaison est essentielle pour la résistance de l'assemblage. Très souvent, l'étude de l'assemblage collé est faite par rapport à sa ténacité, sa résistance. Celle-ci dépend à la fois du type de colle, de l'état de surface du substrat, du taux d'humidité du substrat, des traitements qu'il a reçus.

Le joint de colle réalise la liaison entre les deux matériaux à assembler (dans notre étude, il s'agit du même matériau : le bois), son importance est primordiale puisque le joint conditionne la propriété de l'assemblage. Lorsque la rupture se produit, c'est qu'il y a eu une phase d'endommagement qui l'a précédée. En définissant le mieux possible, cette étape du processus de la rupture, on peut ainsi définir avec plus de précision le coefficient de sécurité de l'assemblage par exemple.

Mais l'endommagement du joint de colle n'a que très peu été abordé dans la littérature. Cependant l'endommagement d'une structure collée ne signifie pas que l'on aura la rupture. Quelques expériences ont été réalisées dans ce sens mais il y a encore trop peu de résultats sur cet élément très mince qui conditionne la durabilité d'un assemblage.

Les lois d'endommagement proposent bien souvent des expressions complexes avec beaucoup de paramètres. Certaines lois ont été rappelées. Pour notre part, nous allons tenter de définir une loi d'endommagement simple avec un nombre minimum de paramètres.

CHAPITRE II

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

II-1 Introduction à l'étude expérimentale

II-1-1 Déroutement de l'étude expérimentale

Dans ce chapitre, nous mettrons en évidence le comportement du joint de colle d'un assemblage abouté en biseau lorsqu'il est soumis à un essai de traction. Nous avons choisi ce type d'assemblage biseauté car il est considéré comme excellent (voir l'assemblage n°9 de la figure I-9 du paragraphe I-4-2 de la page 28) et il offre aussi la possibilité de tester différents angles d'aboutage.

Cependant, avant d'entreprendre de tels essais, il nous faut connaître les caractéristiques des différents composants de l'assemblage tels que le bois et la colle. C'est pourquoi ce chapitre est décomposé en plusieurs parties.

Tout d'abord, nous réaliserons des essais sur le bois afin de déterminer ses paramètres principaux comme le taux d'humidité qui est un élément primordial lors de la phase de collage, la masse volumique et le module d'élasticité. L'ensemble des résultats se trouve dans la partie II-2.

Dans la partie II-3, nous étudierons la colle qui est l'élément le plus important puisqu'il permet la liaison entre les deux parties à abouter.

L'étude de l'assemblage biseauté se trouve dans les parties II-4 et II-5. Dans la partie II-4, nous étudierons l'influence de l'angle d'aboutage sur la résistance de l'assemblage lors d'essais de traction monotone et dans la partie II-5, nous étudierons avec précision le comportement du joint de colle dans un assemblage en biseau à 60° sollicité en traction cyclique.

Pour terminer, nous établirons nos conclusions dans la partie II-6.

II-1-2 Présentation statistique des résultats

Les données seront présentées statistiquement en utilisant :

$$\text{- la moyenne } \bar{X} = \frac{\sum X}{N} = \frac{\text{Somme des observations}}{\text{Nombre d'observations}} \quad (\text{II-1})$$

$$\text{- l'écart-type } \sigma = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{N}} \quad (\text{II-2})$$

$$\text{- le coefficient de variation } CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} \quad (\text{II-3})$$

II-2 Le bois

II-2-1 Caractéristiques de l'épicéa

L'essence que nous utiliserons pour la réalisation des éprouvettes est l'épicéa. Cette essence est très utilisée dans la construction en lamellé-collé. L'épicéa ou "Picéa Abies" est caractérisé par une masse volumique homogène dans toute la hauteur de l'arbre (entre 0,40 et 0,50 g/cm³ à un taux d'humidité de 15%). Ce bois sèche facilement et rapidement, sans tendance particulière à se fendre et à se déformer, de plus il se travaille bien.

Comme autres caractéristiques, on peut noter que son aptitude est bonne au clouage, vissage et collage. Qui plus est, il est assez résistant aux acides et aux bases. Ce bois est apte à toutes sortes d'usages suivant la grosseur et la qualité des grumes, ce qui offre un éventail d'utilisations très nombreuses allant des poteaux aux parquets jusque naturellement au bois de charpente.

L'excellente qualité de l'épicéa se vérifie aussi au moment du phénomène de gonflement et de retrait car cette essence ne présente que 10% de variation volumique lors d'une variation du taux d'humidité entre 0% et 30%.

Ceci est une caractéristique très importante pour le lamellé-collé car lors de sa fabrication, on doit respecter un temps très court entre l'usinage et la mise en pression de serrage, cela en vue d'éviter la déformation de la géométrie des lames qui pourrait entraîner un affaiblissement des aboutages.

II-2-2 Approvisionnement

L'épicéa nous a été fourni par la Société WEISROCK située à Saulcy-sur-Meurthe dans les Vosges. Cette entreprise est spécialisée dans la fabrication des charpentes lamellées-collées. Notre lot d'épicéa était constitué par des planches de dimensions : 3 m de longueur, 75 mm de largeur et 25 mm d'épaisseur.

Les planches ont été stockées dans l'atelier de telle manière qu'elles puissent sécher rapidement (voir la figure II-1 de la page suivante). Les éprouvettes que nous prélèverons de ces planches ne devront présenter aucun défaut tels que noeuds, fentes, piqûres ou altérations (coloration, pourriture, bleuissement).

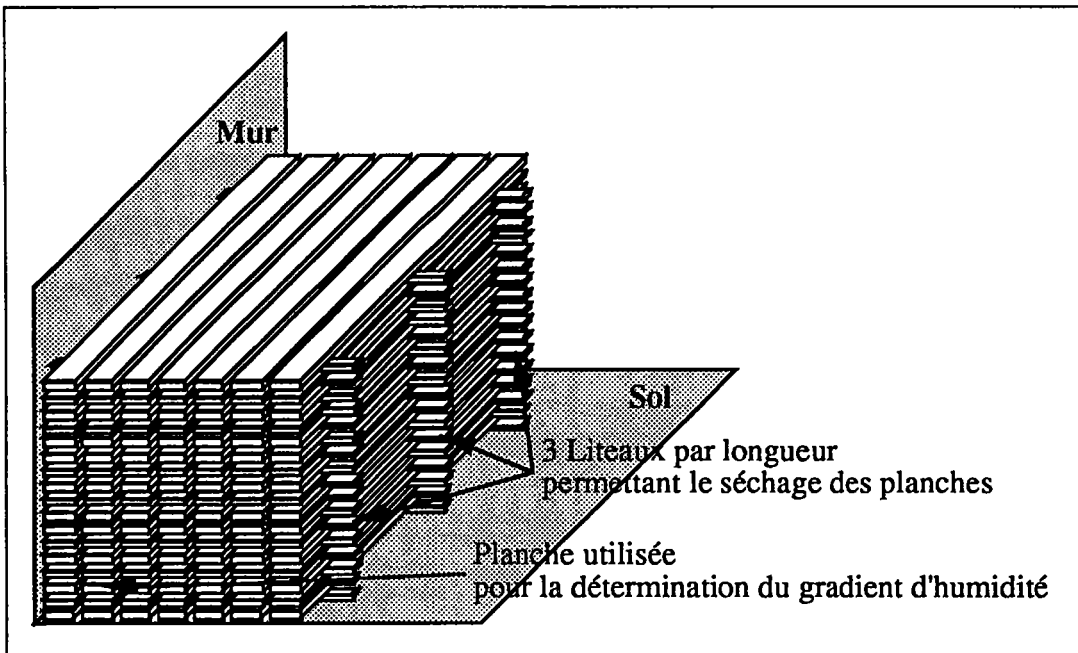


Figure II-1 : Disposition des planches pour le stockage.

II-2-3 Humidité

II-2-3-1 Domaine d'application

Les conditions générales pour la détermination de l'humidité du bois en vue notamment d'essais physiques et mécaniques sont décrites dans la norme NF B 51-004.

II-2-3-2 Définition

On appelle degré d'humidité H ou humidité d'un bois, la masse d'eau qu'il renferme en pour cent de sa masse anhydre

$$H = \frac{m_H - m_0}{m_0} * 100 \quad (\text{II-4})$$

où m_H est la masse, en grammes, de l'éprouvette avant dessiccation.
 m_0 est la masse, en grammes, de l'éprouvette anhydre.

Les différentes humidités et leurs qualifications respectives se trouvent dans le tableau II-1.

<i>Humidité</i>	<i>Qualification</i>
Au delà du point de saturation	Vert
Du point de saturation à 23%	Mi-sec
De 22 à 18%	Commercialement sec
De 17 à 13%	Sec à l'air
Au-dessous de 13%	Desséché
À 0%	Anhydre

Tableau II-1 : Les différentes humidités.

II-2-3-3 Remarque

La notion d'humidité n'est valable au point de vue absolu que pour un échantillon de faibles dimensions (de l'ordre de 1 à 2 cm) parvenu à un état d'équilibre homogène est stable, par exposition de longue durée dans un milieu d'état hygrométrique donné.

Dès qu'il s'agit d'une pièce d'assez fortes dimensions, d'un madrier par exemple, l'humidité diffère suivant la partie de la pièce que l'on considère, surface ou coeur, bout ou milieu. On ne peut donc parler à propos de pièces de bois que d'humidité moyenne.

II-2-3-4 Résultats

II-2-3-4-1 Gradient d'humidité d'une planche

Cette étude va nous permettre de savoir s'il y a une grande dispersion du taux d'humidité au sein d'une même planche. Ainsi, lors du débit pour la fabrication des éprouvettes, nous saurons s'il faudra tenir compte ou non de l'emplacement de l'éprouvette dans la planche.

Pour ce faire, nous prélevons un échantillon parallélépipédique de section 75 mm * 25 mm et de longueur 25 mm, sur une même planche de 3 m, tous les 500 mm (voir la figure II-2).

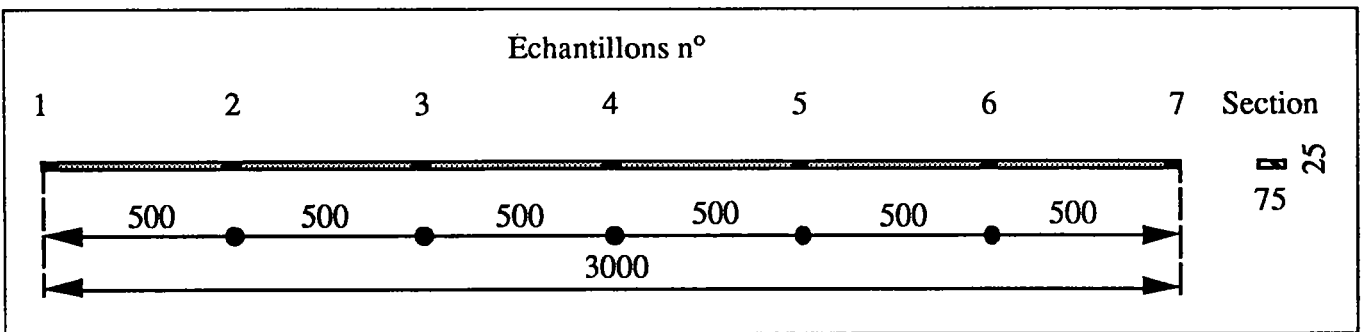


Figure II-2 : Prélèvement des échantillons pour la détermination du gradient d'humidité.

La planche choisie se trouvait en bas du tas de planches stockées c'est-à-dire du côté du mur et presque à même le sol (voir la figure II-1 de la page 62) car c'est à cet endroit qu'il risque d'y avoir le plus d'humidité.

Les humidités relevées se trouvent dans le tableau II-2.

Numéro de l'échantillon	Masse humide à 0 heure	Masse de l'échantillon après séchage (en g)					Humidité H% (en %)
		4 heures	8 heures	12 heures	16 heures	20 heures	
1	20,32	18,91	18,48	18,33	18,23	18,17	11,8
2	20,26	18,85	18,43	18,30	18,19	18,12	11,8
3	20,46	18,95	18,59	18,44	18,34	18,28	11,9
4	20,51	18,99	18,60	18,47	18,38	18,33	11,9
5	20,38	18,81	18,52	18,38	18,29	18,23	11,8
6	20,27	18,78	18,46	18,31	18,20	18,12	11,9
7	20,43	18,02	18,59	18,45	18,34	18,27	11,8
Moyenne	20,38	18,76	18,52	18,38	18,28	18,22	11,8
Test $\leq 0,5\%$		7,94%	1,25%	0,76%	0,55%	0,35%	

Tableau II-2 : Humidité des échantillons d'une même planche.

Bien qu'il y ait une très légère variation du taux d'humidité suivant la place de l'échantillon dans la planche comme le montre le tableau II-2, on peut considérer qu'il n'y a pas de différence majeure d'humidité que l'on prenne une éprouvette en bout ou au centre de la planche.

Les raisons principales sont les suivantes :

- les planches ne sont pas épaisses (25 mm),
- les planches sont stockées à l'abri depuis plusieurs semaines.

II-2-3-4-2 Cycle de séchage

La perte en eau d'un échantillon n'est pas régulière comme nous pouvons le constater sur la figure II-3.

Ainsi, la masse de l'échantillon décroît très rapidement durant les premières heures de séchage (de 0 à 8 heures), ensuite la perte en eau est régulière mais faible car à ce moment-là, il ne reste que très peu d'eau dans le bois.

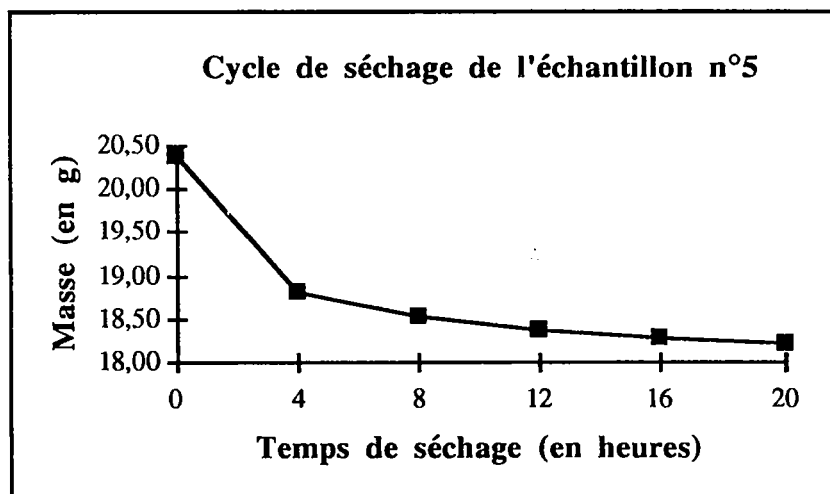


Figure II-3 : Cycle de séchage d'un échantillon.

II-2-3-4-3 Humidité du lot de planches

L'humidité du lot d'éprouvettes (ici 25 planches) est égale à la moyenne arithmétique arrondie à 0,1% des résultats obtenus sur chaque éprouvette. Les résultats récapitulatifs se trouvent dans le tableau II-3 et les résultats détaillés dans l'annexe 1, dans notre cas : $H\% = 11,7\%$.

	Masse Humide à 0 Heure (en g)	Masse Anhydre à 24 Heures (en g)	Humidité H% (en %)
Minimum	20,02	17,93	10,6
Maximum	20,94	18,71	12,6
Étendue	0,92	0,78	2,1
Moyenne	20,46	18,32	11,7
Écart-Type	0,27	0,26	0,6
C. V.	1,33%	1,40%	5,21%

Tableau II-3 : Tableau récapitulatif pour la détermination du taux d'humidité.

II-2-4 Masse volumique et densité

II-2-4-1 Généralités

L'usage veut que l'on appelle "densité" la grandeur qui est en réalité la "masse volumique", mesurée en unités de masse par unité de volume; la densité étant, théoriquement, sans unité.

Cette remarque est importante pour bien interpréter la littérature.

La densité est le rapport de la masse volumique d'un corps sur la masse volumique de l'eau qui est de 1000 kg/m³ soit 1 g/cm³.

$$\text{densité} = \frac{\text{masse volumique d'un corps}}{\text{masse volumique de l'eau}} \quad (\text{II-5})$$

II-2-4-2 Domaine d'application

Les conditions générales pour la détermination de la masse volumique du bois en vue notamment d'essais physiques et mécaniques sont décrites dans la norme NF B 51-005.

II-2-4-3 Masse volumique du bois à l'humidité H

On calculera la masse volumique du bois m_{vH} à l'humidité H au moment de l'essai pour chaque éprouvette à l'aide de la formule suivante :

$$m_{vH} = \frac{m_H}{V_H} \quad (\text{II-6})$$

où m_H est la masse, en grammes, de l'éprouvette à l'humidité H,
 V_H est le volume, en cm³, de l'éprouvette à l'humidité H.

II-2-4-4 Formule de passage

Le passage de la masse volumique du bois à l'état anhydre à la masse volumique du bois à l'humidité H peut se faire à l'aide de la formule II-7 :

$$m_{vH} = \frac{m_H}{V_H} = \frac{m_0(1 + H)}{V_0(1 + R_v.H)} = m_{v0} \cdot \frac{(1 + H)}{(1 + R_v.H)} \quad (II-7)$$

où R_v est le coefficient de retrait volumique du bois,
 H est la teneur en eau du bois.

II-2-4-5 Remarque

En général, la masse volumique pour l'épicéa est de 0,4 à 0,5 g/cm³ pour un taux d'humidité de 15% ce qui signifie qu'il y a 400 à 500 kg de bois sec pour 1 m³ de bois.

Par comparaison, on peut noter que la masse volumique de l'acier est de 7,8 g/cm³ et de 2,4 g/cm³ pour le béton.

De plus, la masse volumique ne peut être définie que pour un taux d'humidité constant (dans notre cas à 11,7 %). Qui plus est, dans une même espèce et dans un même arbre, la masse volumique varie.

II-2-4-6 Résultats sur la masse volumique à l'humidité H

Cette étude va nous permettre de connaître le degré de dispersion de la masse volumique au sein du lot de planches. Pour ce faire, nous utilisons les échantillons prélevés pour la mesure du taux d'humidité.

Il s'agissait d'échantillons parallélépipèdes de section 75 mm * 25 mm et de longueur 25 mm. Les résultats récapitulatifs se trouvent dans le tableau II-4 et les résultats détaillés dans l'annexe 2.

	Longueur L (en mm)	Largeur b (en mm)	Épaisseur e (en mm)	Volume V (en cm ³)	Masse Humide à 0 heure (en g)	Densité à H% ρ (en g/cm ³)
Minimum	24,7	74,5	24,5	45,88	20,02	0,420
Maximum	25,2	75,5	25,4	47,69	20,94	0,450
Étendue	0,5	1,0	0,9	1,81	0,92	0,030
Moyenne	25,0	74,9	24,9	46,73	20,46	0,440
Ecart-Type	0,16	0,27	0,24	0,52	0,27	0,008
C.V.	0,62%	0,37%	0,97%	1,10%	1,33%	1,818%

Tableau II-4 : Tableau récapitulatif pour la détermination de la masse volumique.

II-2-5 Module d'élasticité longitudinal E

On détermine le module d'élasticité longitudinal ou module de YOUNG, noté E, à l'aide de l'essai de flexion 3 points. Cet essai de flexion statique 3 points sera un essai non destructif.

Par conséquent, la flèche provoquée par l'apposition d'un poids P devra être mesurée entièrement dans la zone élastique (voir la figure II-4). Nous n'avons pas utilisé l'essai de flexion statique 4 points préconisé par la norme NF B 51-008 avec des éprouvettes sans défauts car nous mesurerons le module E à partir de la planche entière avec défauts.

II-2-5-1 Schéma de principe de l'essai de flexion 3 points

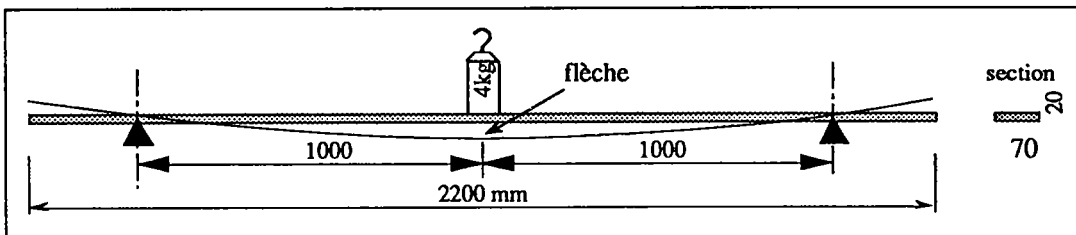


Figure II-4 ; Schéma de principe de l'essai de flexion 3 points.

II-2-5-2 Calcul du module de YOUNG

Nous utiliserons les équations issues de la résistance des matériaux, valables uniquement dans le domaine élastique pour déterminer le module E longitudinal.

Compte tenu de la faible charge et de l'élancement de la poutre, on néglige l'effet de cisaillement.

La distance entre appuis L est de 2000 mm (2 * 1000 mm).

La masse de 4 kg utilisée représente un poids P de 39,24 N.

Pour le moment quadratique I (en mm⁴):

$$I = \frac{b.h^3}{12} = \frac{70 * 20^3}{12} = 46666 \text{ mm}^4 \quad (\text{II-8})$$

Pour la flèche f (en mm) :

$$f = \frac{P.L^3}{48 E.I} \quad (II-9)$$

Pour le module longitudinal E (en N/mm^2 ou MPa):

$$E = \frac{P.L^3}{48 f.I} \quad (II-10)$$

II-2-5-3 Résultats

Les résultats récapitulatifs se trouvent dans le tableau II-5 et les résultats détaillés dans l'annexe 3.

	Largeur b (en mm)	Épaisseur h (en mm)	Moment Quadratique $I=(b*h^3)/12$ (en mm ⁴)	Flèche f (en mm)	Module de Young E longitudinal (en N/mm^2)	
					Calculé	Arrondi
Minimum	74,50	24,50	91 913,28	4,08	9 502,90	9 500,00
Maximum	75,50	25,40	102 146,03	6,89	16 829,27	16 800,00
Étendue	1,00	0,90	10 232,75	2,81	7 326,37	7 300,00
Moyenne	74,94	24,92	96 628,18	5,30	13 058,99	13 060,00
Écart-Type	0,27	0,24	2 800,96	0,79	2 034,86	2 036,54
C.V.	0,36%	0,97%	2,90%	14,82%	15,58%	15,59%

Tableau II-5 : Tableau récapitulatif pour la détermination du module E longitudinal.

II-2-6 Conclusion

En faisant un parallèle entre les résultats issus des essais qui ont été menés et ceux trouvés dans la littérature, on peut dire que sauf quelques exceptions, on remarque l'existence d'une très bonne cohérence entre ces valeurs.

Il faut évidemment tenir compte de la variabilité naturelle qui peut avoir lieu chez une même essence.

Les résultats concernant un bois sec ayant un taux d'humidité compris entre 12 et 15% et avec une masse volumique comprise entre 0,40 et 0,45 g/cm^3 sont résumés dans le tableau II-6 de la page suivante.

Épicéa	Taux d'humidité H (en %)	Masse volumique M_{VH} (en g/cm ³)	Module d'élasticité E (en MPa)
Nos essais	11,7	0,44	13060
C.T.B.A. [69]	15	0,45	12640
GÖTZ [70]	12	0,43	11000
BODIG [4]	12	0,41	9150
KOLLMANN [71]	12	0,41	13730
SZÜCS [19]	12	0,44	13442

Tableau II-6 : Présentation comparative des résultats.

Nous pouvons également comparer les résultats obtenus avec la formule II-11 [72]:

$$E_L = 13100 + 41700 * (\rho - 0,45) \quad (\text{II-11})$$

Pour notre étude, nous obtenons expérimentalement un module longitudinal de 13060 MPa et avec la relation II-11, le résultat est de 12683 MPa donc nous pouvons en déduire que le modèle proposé est très satisfaisant.

Nous pouvons ajouter qu'il n'y a pas de différences significatives du taux d'humidité que l'on prenne l'éprouvette au centre ou au bout de la planche. Nous pourrions donc débiter nos éprouvettes sans défauts dans toute la planche sans distinction.

II-3 La colle

II-3-1 Généralité

La colle employée pour l'ensembles des collages que nous avons eu à réaliser est l'ENOCOL RLF 185 de la Société CECA (Paris).

Cette colle est utilisée dans l'industrie, en particulier pour la fabrication du lamellé-collé.

II-3-2 ENOCOL RLF 185

C'est un adhésif résorcine-phénol-formol pour collages "extérieurs". L'ENOCOL RLF 185, liquide d'aspect visqueux, combiné avec un durcisseur en poudre DP 155 est un adhésif synthétique à applications multiples, dont l'utilisation est conseillée pour tous les collages devant présenter des performances mécaniques élevées, une parfaite tenue aux intempéries, à l'immersion prolongée dans l'eau froide, à la chaleur, ainsi qu'à de nombreux agents chimiques tels que les solvants, les acides et les bases faibles.

Sa densité à l'état liquide est de 1,14.

Cet adhésif doit être utilisé avec une humidité du bois comprise entre 10% et 16% et avec une température ambiante de 18 à 25°C.

La colle peut polymériser à froid pendant 8 h à 20°C sous une pression de collage de 7 à 14 bars suivant un grammage recommandé en fonction de l'état de surface qui peut être de 300 à 800 g/m². Mais elle peut aussi polymériser à chaud (presse à haute fréquence) jusqu'à 1 mn 30 à 100°C. Une stabilisation de 24 heures est conseillée avant le desserrage.

La formule du mélange collant est la suivante :

ENOCOL RLF 185 : 100 parties pondérales

Durcisseur DP 155 : 20 parties pondérales

II-3-3 Remarque

L'ENOCOL RLF 185 est une colle qui a fait l'objet d'une étude complète par Moulin [12].

Les résultats présentés ci-après sont issus de ce travail.

II-3-4 Caractéristiques mécaniques de l'ENOCOL RLF 185 en traction

Dimensions de la section utile avant retrait :

Épaisseur : 6,0 mm
 Largeur : 8,0 mm
 Longueur : 40,0 mm
 Volume avant retrait V_0 : 1920 mm³

Dimensions de la section utile après retrait :

Épaisseur : 5,0 mm
 Largeur : 7,1 mm
 Longueur : 34,4 mm
 Volume après retrait V : 1221 mm³

	Essai de Traction
Nombre d'éprouvettes testées	7
Retrait volumique = $100 * (V - V_0)/V_0$	37 %
Module moyen d'élasticité E	2712 MPa
Contrainte à la limite élastique σ_e	14 MPa
Contrainte à la rupture expérimentale σ_r	17 MPa
Rapport des contraintes σ_e/σ_r	0,82

Tableau II-7 : Résultats des essais de traction de la résorcine pure.

II-3-5 Caractéristiques mécaniques de l'ENOCOL RLF 185 en flexion

Dimensions de la section utile avant retrait :

Épaisseur : 6,0 mm
 Largeur : 16,0 mm
 Longueur : 100,0 mm
 Volume avant retrait V_0 : 9600 mm³

Dimensions de la section utile après retrait :

Épaisseur : 5,3 mm
 Largeur : 14,0 mm
 Longueur : 87,7 mm
 Volume après retrait V : 6582 mm³

	Essai de Flexion
Nombre d'éprouvettes testées	6
Retrait volumique = $100 * (V - V_0)/V_0$	31 %
Module moyen d'élasticité E	2982 MPa
Contrainte à la limite élastique σ_e	16 MPa
Contrainte à la rupture expérimentale σ_r	20 MPa
Rapport des contraintes σ_e/σ_r	0,80

Tableau II-8 : Résultats des essais de flexion 3 points de la résorcine pure.

II-3-6 Conclusion

Les adhésifs phénoliques, une fois polymérisés, sont assimilés à des solides isotropes. Le module d'élasticité est donc identique quel que soit la direction de mesure. La colle est un matériau fragile.

On peut dire que les caractéristiques mécaniques trouvées en flexion sont légèrement plus élevées que dans le cas des essais de traction. On peut estimer que cette différence provient de la section utile qui n'est pas la même.

Il est très difficile de réaliser un essai mécanique sur une éprouvette de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur (qui est la dimension réelle d'un joint de colle).

Par conséquent, il reste la possibilité de tester en traction ou en flexion un échantillon d'une épaisseur beaucoup plus importante (en l'occurrence dans le cas présent : 6 mm) en admettant l'hypothèse de la validité des résultats, y compris aux très faibles dimensions.

On peut noter également que la probabilité d'avoir des défauts est beaucoup plus importante sur une éprouvette de 6 mm d'épaisseur que sur un joint de colle de quelques dixièmes de millimètres.

II-4 Étude de l'angle d'aboutage d'un assemblage bois-bois collé

La première étude d'un assemblage bois-bois collé portera sur l'influence de l'angle d'aboutage α sur la résistance d'un assemblage en biseau.

Pour ce faire, nous allons fabriquer plusieurs éprouvettes dont nous ferons varier l'angle d'aboutage α .

II-4-1 Caractéristiques géométriques des éprouvettes

Les éprouvettes (voir la figure II-5) ont été réalisées sur le combiné bois que possède le Laboratoire de Fiabilité Mécanique.

On ébauche le parallélépipède à partir duquel 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 α , avant d'être recollée avec les montages de collage (voir la figure II-6 de la page 75 pour le montage de collage vertical pour les angles d'aboutage de 0° , 15° , 30° et la figure II-7 de la page 76 pour le montage de collage vertical pour les angles d'aboutage de 45° , 60° , 75°).

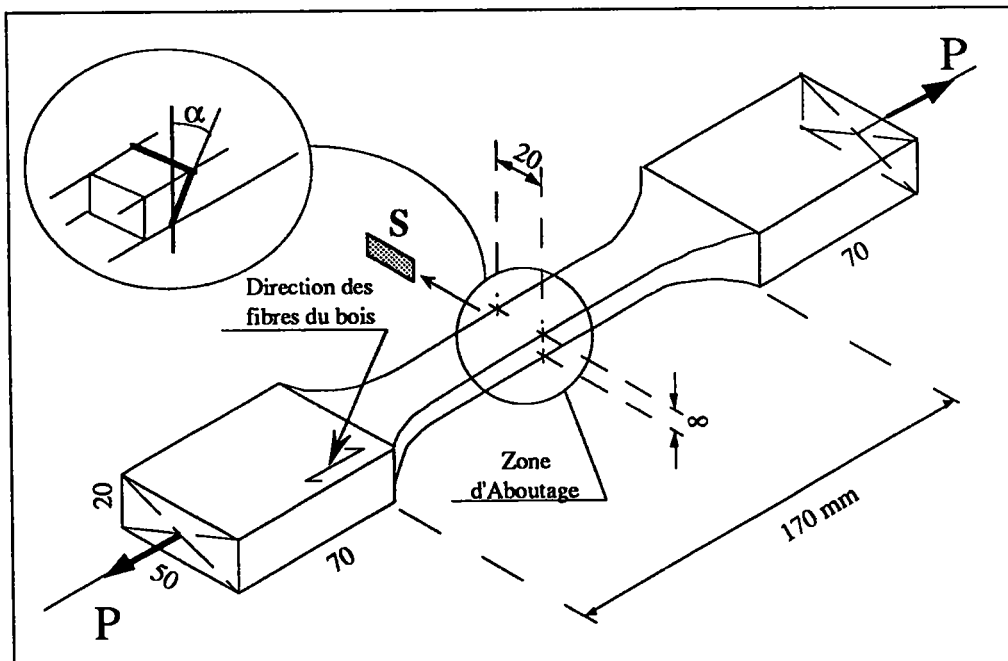


Figure II-5 : Caractéristiques géométriques des éprouvettes.

II-4-2 Montage de collage

II-4-2-1 Montage de collage vertical pour les angles d'aboutage $\leq 30^\circ$

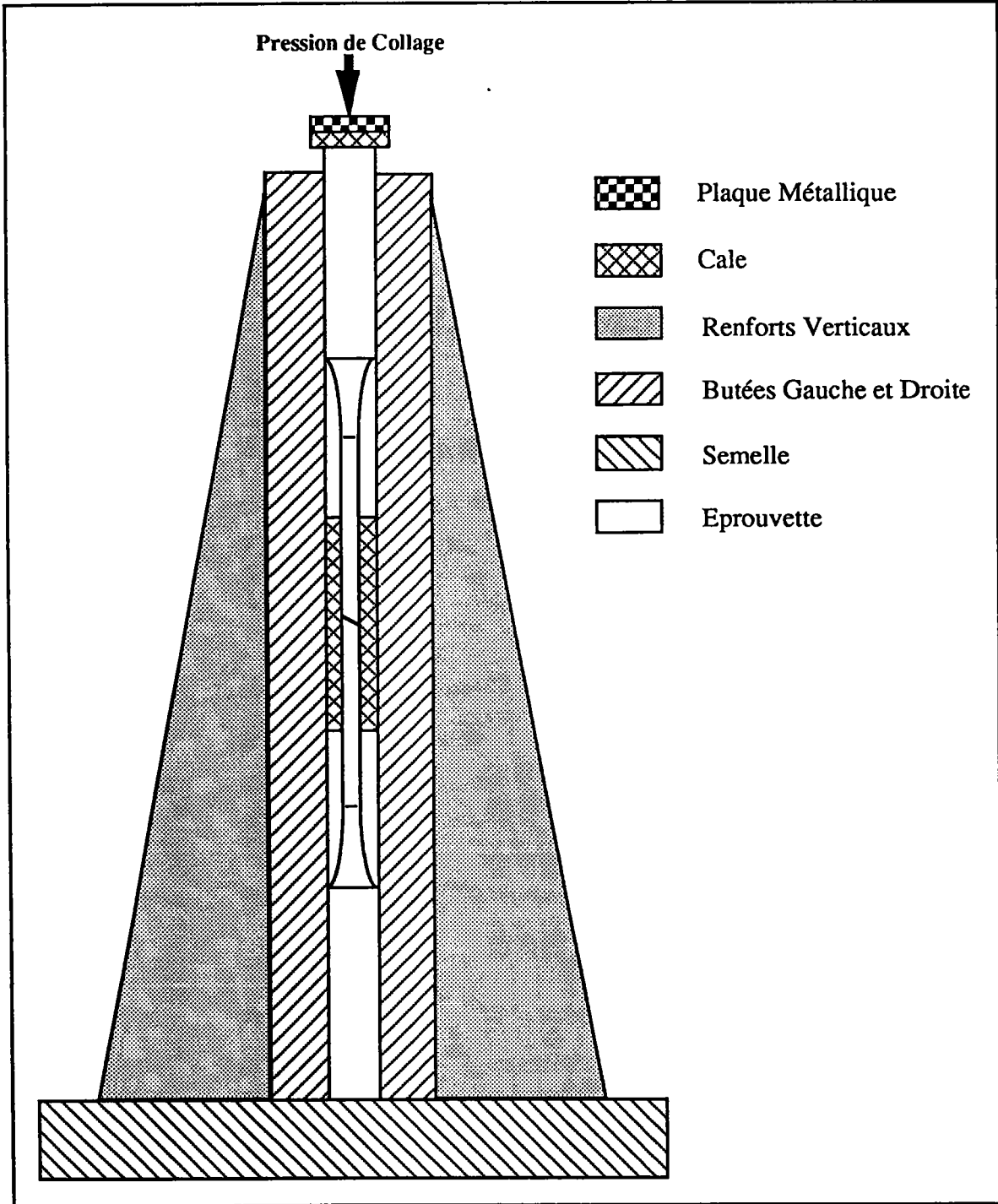


Figure II-6 : Montage de collage vertical pour les angles d'aboutage de 0° , 15° et 30° .

II-4-2-2 Montage de collage horizontal pour les angles d'aboutage \geq à 45°

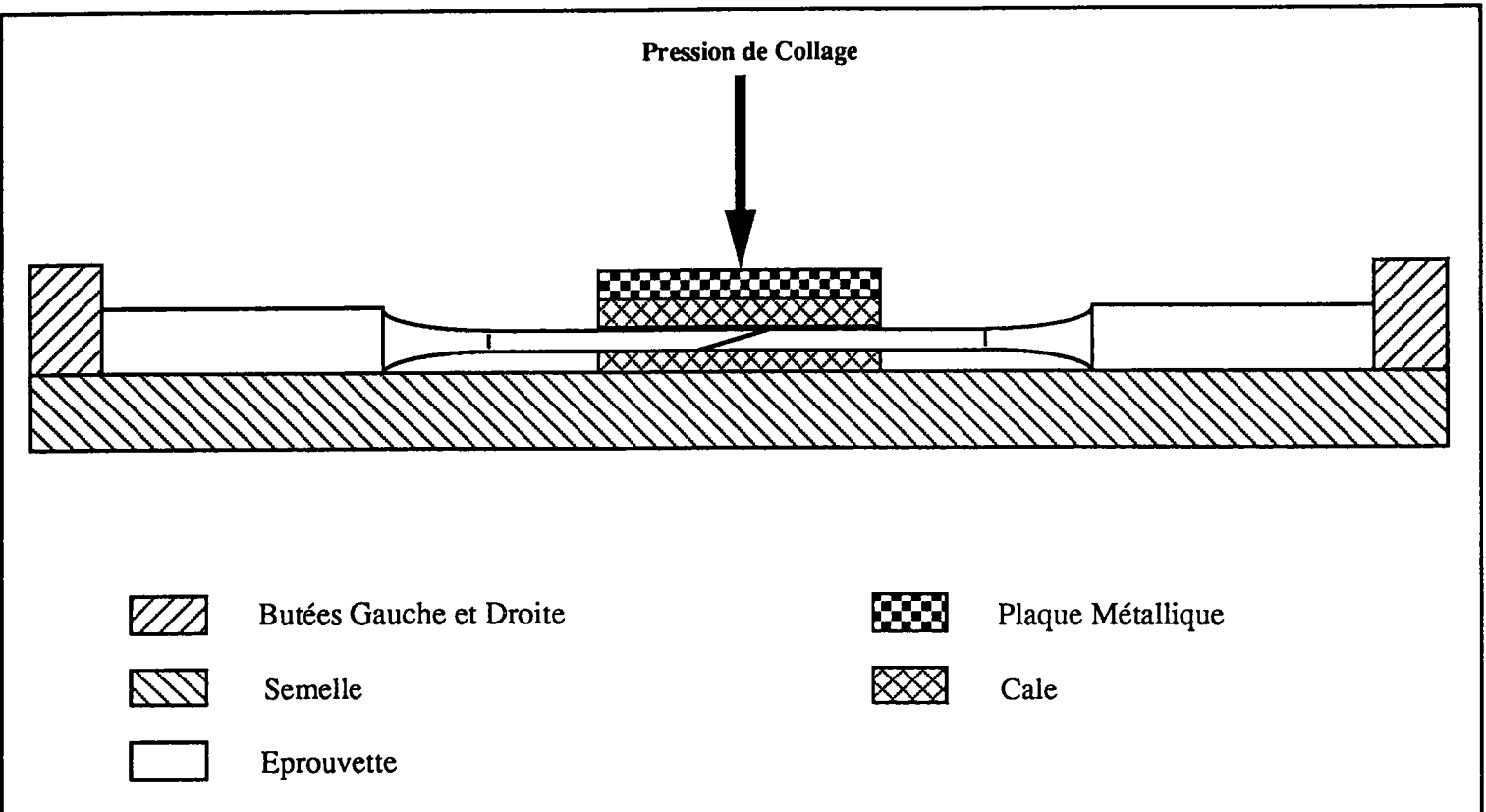


Figure II-7 : Montage de collage horizontal pour les angles d'aboutage de 45° , 60° et 75° .

II-4-3 Pression de collage

Pour chaque angle d'aboutage, la surface de collage S_c est différente.

Aussi, pour obtenir une pression de collage constante de 12 bars (c'est-à-dire $1,2 \text{ N/mm}^2$) sur la surface collée pour l'ensemble des éprouvettes, la charge F' que l'on devra appliquer sera différente selon l'angle d'aboutage α .

La charge F' sera appliquée dans l'axe de l'éprouvette pour les angles d'aboutage α de 0° , 15° et 30° avec le montage de collage vertical (voir la figure II-6 de la page 75) et la charge F' sera appliquée perpendiculairement à l'axe de l'éprouvette pour les angles d'aboutage α de 45° , 60° et 75° avec le montage de collage horizontal (voir la figure II-7 de la page 76) .

La section utile des éprouvettes (voir la figure II-5 de la page 74) est de 20 mm pour la largeur (l) et de 8 mm pour l'épaisseur (e).

$$\sigma = \frac{F}{S_c} \quad (\text{II-12})$$

avec : σ : la pression de collage
 S_c : la surface de collage
 F : la charge normale à la surface de collage

II-4-3-1 Calcul de la charge à appliquer pour un angle d'aboutage \leq à 30°

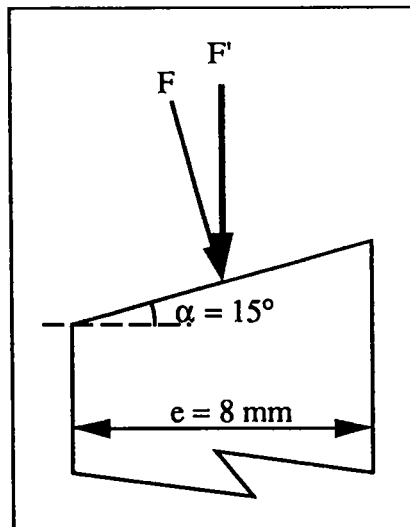


Figure II-8 : Exemple avec un angle d'aboutage α de 15° (montage vertical).

Calcul de la Surface de Collage Sc :

$$S_c = \frac{\text{épaisseur}}{\cos(\alpha)} * \text{largeur} \quad (\text{II-13})$$

$$S_c = \frac{8}{\cos(15^\circ)} * 20 = 165,64 \text{ mm}^2$$

Calcul de la Charge Normale F :

$$F = \sigma * S_c \quad (\text{II-14})$$

$$F = 1,2 * 165,64 = 198,77 \text{ N} = 19,88 \text{ daN}$$

Calcul de la Charge Verticale F' :

$$F' = \frac{F}{\cos(\alpha)} \quad (\text{II-15})$$

$$F' = \frac{198,77}{\cos(15^\circ)} = 205,78 \text{ N} = 20,58 \text{ daN}$$

II-4-3-2 Calcul de la charge à appliquer pour un angle d'aboutage \geq à 45°

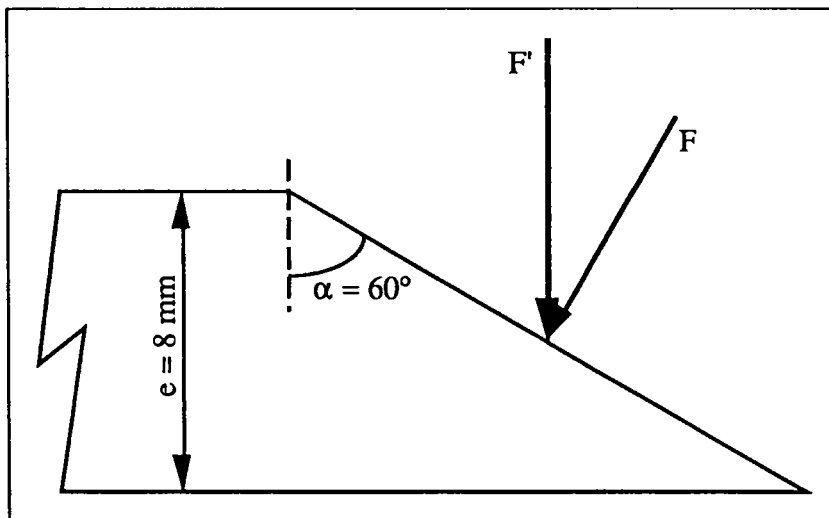


Figure II-9 : Exemple avec un angle d'aboutage α de 60° (montage horizontal).

Calcul de la Surface de Collage Sc :

$$Sc = \frac{\text{épaisseur}}{\cos(\alpha)} * \text{largeur} \quad (\text{II-13})$$

$$Sc = \frac{8}{\cos(60^\circ)} * 20 = 320,00 \text{ mm}^2$$

Calcul de la Charge Normale F :

$$F = \sigma * Sc \quad (\text{II-14})$$

$$F = 1,2 * 320,00 = 384,00 \text{ N} = 38,40 \text{ daN}$$

Calcul de la Charge Verticale F' :

$$F' = \frac{F}{\cos(\alpha)} \quad (\text{II-15})$$

$$F' = \frac{384,00}{\cos(60^\circ)} = 768,00 \text{ N} = 76,80 \text{ daN}$$

II-4-3 Détermination de la charge F' à appliquer en fonction de l'angle α

Le tableau II-9 donne la valeur de la charge verticale F' à appliquer à l'éprouvette en fonction de l'angle d'aboutage α pour obtenir une pression de collage de 1,2 N/mm².

Angle α (en °)	Largeur b (en mm)	Épaisseur e (en mm)	Surface de Collage Sc (en mm ²)	Charge Normale F (en daN)	Charge Verticale F' (en daN)
0	20,00	8,00	160,00	19,20	19,20
15	20,00	8,00	165,64	19,88	20,58
30	20,00	8,00	184,75	22,17	25,60
45	20,00	8,00	226,27	27,15	38,40
60	20,00	8,00	320,00	38,40	76,80
75	20,00	8,00	618,19	74,18	286,62
Massif	20,00	8,00	-	-	-

Tableau II-9 : Calcul de la charge verticale F' en fonction de l'angle d'aboutage α .

Plus l'angle d'aboutage α est important, plus la surface de collage S_c est grande donc plus la charge F' qu'il faudra appliquer à une éprouvette pour obtenir la pression de collage désirée (dans notre cas 12 bars) sera importante comme le montre la figure II-10.

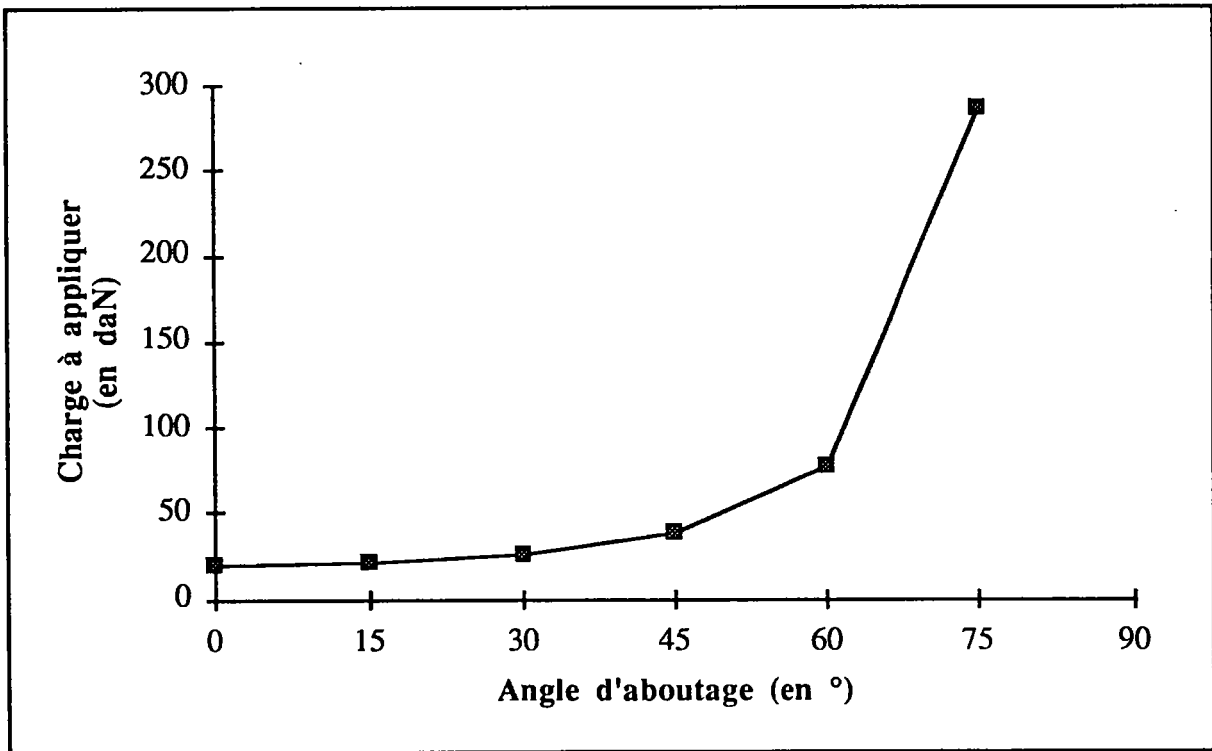


Figure II-10 : Évolution de la charge à appliquer F' en fonction de l'angle d'aboutage α pour obtenir une pression de collage de 12 bars.

II-4-4 Essais

Pour chaque angle d'aboutage α , une série de 20 éprouvettes sans défauts a été usinée. En fait, il faut en réaliser au minimum 25 car il faut compter les mauvais collages ainsi que les ruptures éventuelles d'éprouvettes pendant le stockage.

Le temps d'un essai est d'environ 3 à 5 minutes.

II-4-4-1 Machine de traction

Pour réaliser ces essais de traction, nous utiliserons une machine de traction Instron 4302 dont voici les caractéristiques générales :

- Cellule de charge : 10 kN,
- Course de la traverse : 1 000 mm,
- Vitesse minimale de déplacement de la traverse : 0,5 mm/mn.

La machine sera pilotée par un ordinateur MacIntosh à travers une interface IEEE.

II-4-4-2 Montage de traction

Sur la machine de traction, nous utiliserons des mors à mâchoires pour fixer les éprouvettes par serrage.

Pendant l'essai de traction, la mâchoire inférieure (liée au bâti de la machine) est fixe et la mâchoire supérieure (liée à la traverse) se déplace verticalement vers le haut à la vitesse régulière de 0,5 mm/mn, ce qui a pour effet d'appliquer la charge progressivement.

On réalise donc un essai à déplacement contrôlé.

II-4-4-3 Capteurs

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

Pour obtenir ces 2 valeurs, nous utilisons le capteur de la cellule de charge qui nous donne la valeur de la charge qui a été appliquée et le capteur de positionnement de la traverse supérieure qui lui nous donnera la valeur du déplacement. Ces 2 valeurs nous sont transmises sur 2 écrans digitaux.

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

On réalise l'essai de traction à la vitesse régulière de 0,5 mm/mn (vitesse minimale de la machine), et dès qu'il y a rupture de l'assemblage, on enregistre les valeurs atteintes par le déplacement et la charge qui sont conservées en mémoire dans la machine.

II-4-5 Résultats

II-4-5-1 Résultats détaillés de l'ensemble des essais

Tous les résultats détaillés se trouvent dans l'annexe 4 et pour chaque angle d'aboutage, ils se présentent de la façon suivante :

- un tableau contenant l'ensemble des essais réalisés,
- un tableau de synthèse pour chaque type d'essais,
- un tableau contenant l'ensemble des calculs réalisés,
- un tableau de synthèse pour chaque type de calculs.

II-4-5-2 Tableau récapitulatif des essais de rupture

Angle d'Aboutage α (en °)	Largeur Section b (en mm)	Épaisseur Section e (en mm)	Section Initiale Si (en mm ²)	Surface de Collage Sc (en mm ²)	Valeur moyenne		
					Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en MPa)	Déplacement à Rupture δ (en mm)
0	20,00	8,00	160,00	160,00	879,90	5,50	0,11
15	20,00	8,00	160,00	165,64	1 267,30	7,91	0,23
30	20,00	8,00	160,00	184,75	1 540,80	9,61	0,29
45	20,00	8,00	160,00	226,27	2 047,40	12,77	0,37
60	20,00	8,00	160,00	320,00	3 086,80	19,28	0,58
75	20,00	8,00	160,00	618,19	6 884,45	43,01	1,20
Massif	20,00	8,00	160,00	-	10 986,58	68,65	1,95

Tableau II-10 : Tableau récapitulatif des essais de rupture.

II-4-5-3 Étude du déplacement δ en fonction de la charge de rupture P

Comme le montre la figure II-11 de la page suivante, le déplacement δ relevé expérimentalement à la rupture est mesuré dans la direction 2 qui est la direction axiale de l'éprouvette. Il représente le déplacement de la traverse.

Nous calculerons également le déplacement théorique δ_n dans la direction 1 qui est la direction normale à la surface de collage Sc (donc au plan du joint de colle).

$$\delta_n = \delta \cdot \cos(\alpha) \quad (\text{II-16})$$

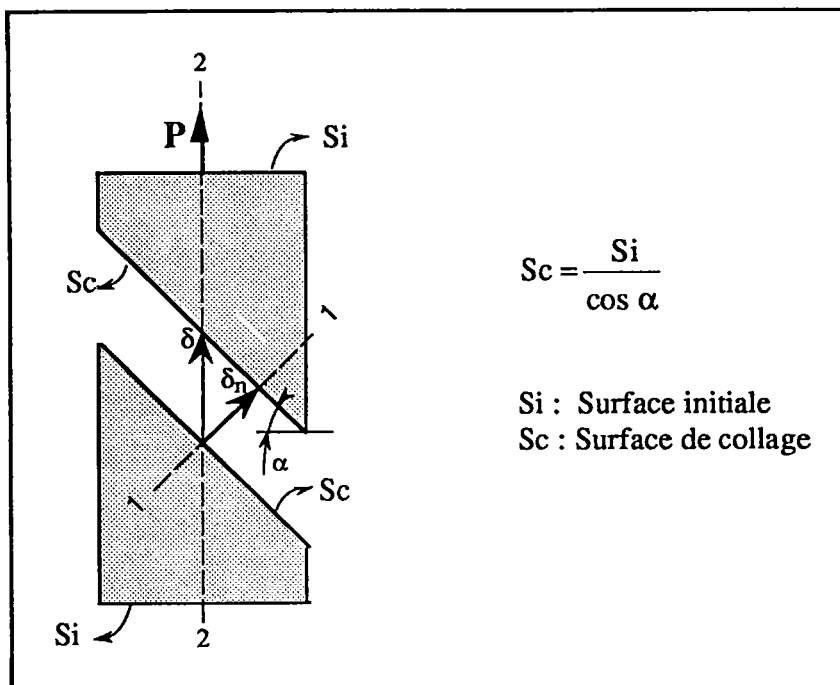


Figure II-11 : Schéma des déplacements.

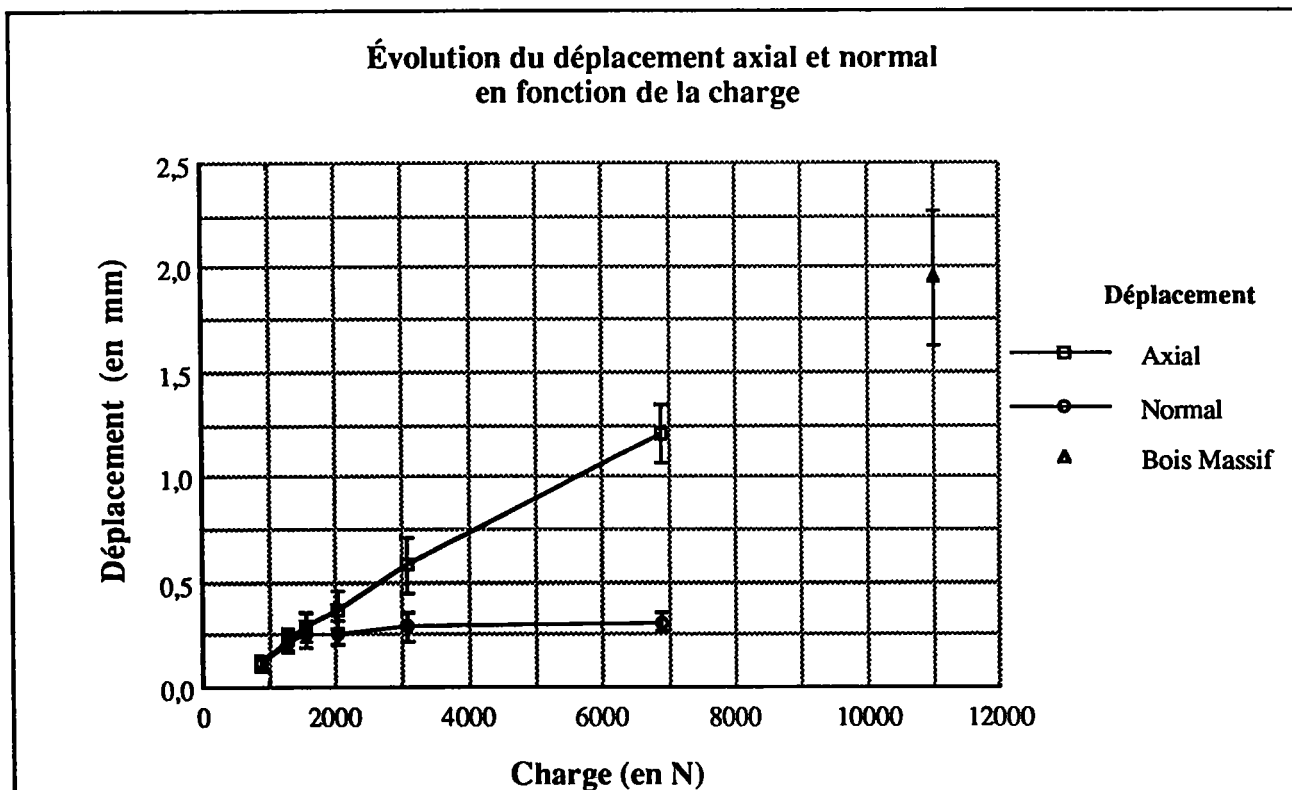


Figure II-12 : Évolution du déplacement à rupture axial δ et normal δ_n en fonction de la charge P .

Angle d'Aboutage α (en °)	Charge de Rupture P (en N)	Déplacement Axial δ (en mm)	Écart-type Déplacement Axial (en mm)	Déplacement Normal δ_n (en mm)	Écart-type Déplacement Normal (en mm)
0	879,90	0,11	0,04	0,11	0,04
15	1 267,30	0,23	0,05	0,22	0,05
30	1 540,80	0,29	0,07	0,25	0,06
45	2 047,40	0,37	0,09	0,26	0,06
60	3 086,80	0,58	0,13	0,29	0,07
75	6 884,45	1,20	0,14	0,31	0,04
Massif	10 986,58	1,95	0,32	-	-

Tableau II-11 : Tableau des déplacements en fonction de l'angle d'aboutage α .

La figure II-12 de la page précédente montre de façon claire qu'il y a une relation entre la charge de rupture P et le déplacement axial δ .

Nous pouvons en déduire que la charge P (donc la contrainte σ) est proportionnelle au déplacement δ .

Le déplacement δ_n normal à la surface de collage reste relativement constant quelle que soit la charge P (voir le tableau II-11). En effet, la rupture peut être considérée comme totale dès que le déplacement normal δ_n atteint une valeur moyenne de 0,26 mm. Nous n'avons pas tenu compte de la série avec un angle d'aboutage à 0° car bien que les essais se soient déroulés sans problème apparent, l'aboutage en bout est peu fiable en général.

II-4-5-4 Étude du faciès de rupture

L'étude de la contrainte à rupture que nous développerons juste après s'accompagne d'une observation qualitative du faciès de rupture.

Nous considérerons que la rupture se produit dans le bois si 80 à 100% de la surface de collage se situe dans le bois, par contre la rupture se produit dans le joint de colle si seulement 0 à 20% de la surface de collage se situe dans le bois. Les autres cas seront considérés comme des ruptures mixtes.

Lors des essais, toutes les ruptures ont eu lieu au niveau du joint.

L'étude du faciès de la rupture donne les résultats du tableau II-12 de la page suivante.

Angle d'aboutage	Type de rupture	Remarque
$\alpha = 0^\circ$	Adhésive	Rupture totalement adhésive
$\alpha = 15^\circ$	Adhésive	Rupture totalement adhésive
$\alpha = 30^\circ$	Adhésive	Rupture avec des petits éclats de bois
$\alpha = 45^\circ$	Adhésive	Rupture avec des petits morceaux de bois
$\alpha = 60^\circ$	Adhésive/Mixte	Rupture avec des paquets de fibres de bois
$\alpha = 75^\circ$	Mixte	Rupture avec des paquets de fibres de bois
Bois Massif	Bois	Rupture dans la section réduite de l'éprouvette

Tableau II-12 : Étude du faciès de rupture en fonction de l'angle d'aboutage α .

II-4-5-5 Évolution de la contrainte de rupture σ_r

On constate que la contrainte de rupture σ_r augmente quand l'angle d'aboutage α augmente (voir le tableau II-10 de la page 82). Cependant nous étudierons l'évolution de la contrainte de rupture σ_r en étudiant plus particulièrement la contrainte de cisaillement critique (cission) σ_α et la contrainte normale critique τ_α au niveau du joint de colle.

II-4-5-5-1 Définition de la contrainte normale et de la cission

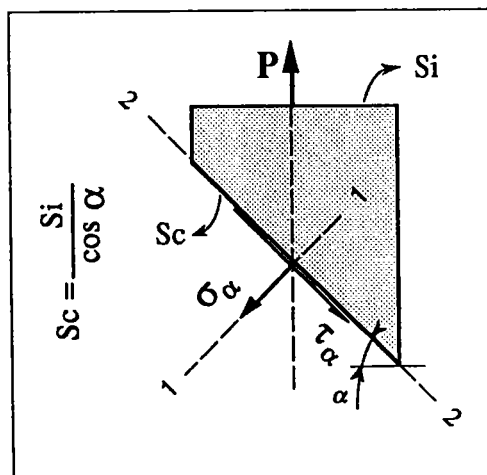


Figure II-13 : Définition de la contrainte normale σ_α et de la cission τ_α au niveau du joint de colle.

Dans la direction 1 : Contrainte Normale

$$P_{\alpha} = P \cdot \cos \alpha$$

$$\sigma_{\alpha} = \frac{P_{\alpha}}{S_c} = \frac{P \cdot \cos \alpha}{\frac{S_i}{\cos \alpha}} = \frac{P}{S_i} \cdot \cos^2 \alpha$$

$$\sigma_{\alpha} = \sigma \cdot \cos^2 \alpha \quad (\text{II-17})$$

Dans la direction 2 : Cission

$$P_{\alpha'} = P \cdot \sin \alpha$$

$$\tau_{\alpha} = \frac{P_{\alpha'}}{S_c} = \frac{P \cdot \sin \alpha}{\frac{S_i}{\cos \alpha}} = \frac{P}{S_i} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

$$\tau_{\alpha} = \sigma \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \quad (\text{II-18})$$

II-4-5-5-2 Détermination de la contrainte normale σ_{α} et de la cission τ_{α}

Angle d'Aboutage α (en °)	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte Normale σ_{α} (en MPa)	Écart-type Contrainte Normale (en MPa)	Cission τ_{α} (en MPa)	Écart-type Cission (en MPa)
0	879,90	5,50	0,70	0,00	0,00
15	1 267,30	7,38	1,16	1,98	0,31
30	1 540,80	7,20	1,18	4,16	0,68
45	2 047,40	6,38	1,00	6,38	1,00
60	3 086,80	4,82	0,65	8,35	1,13
75	6 884,45	2,88	0,31	10,75	1,15
Massif	10 986,58	-	-	-	-

Tableau II-13 : Détermination de la contrainte normale σ_{α} et de la cission τ_{α} en fonction de l'angle α .

II-4-5-5-3 Contrainte normale et cisssion en fonction de l'angle d'aboutage α

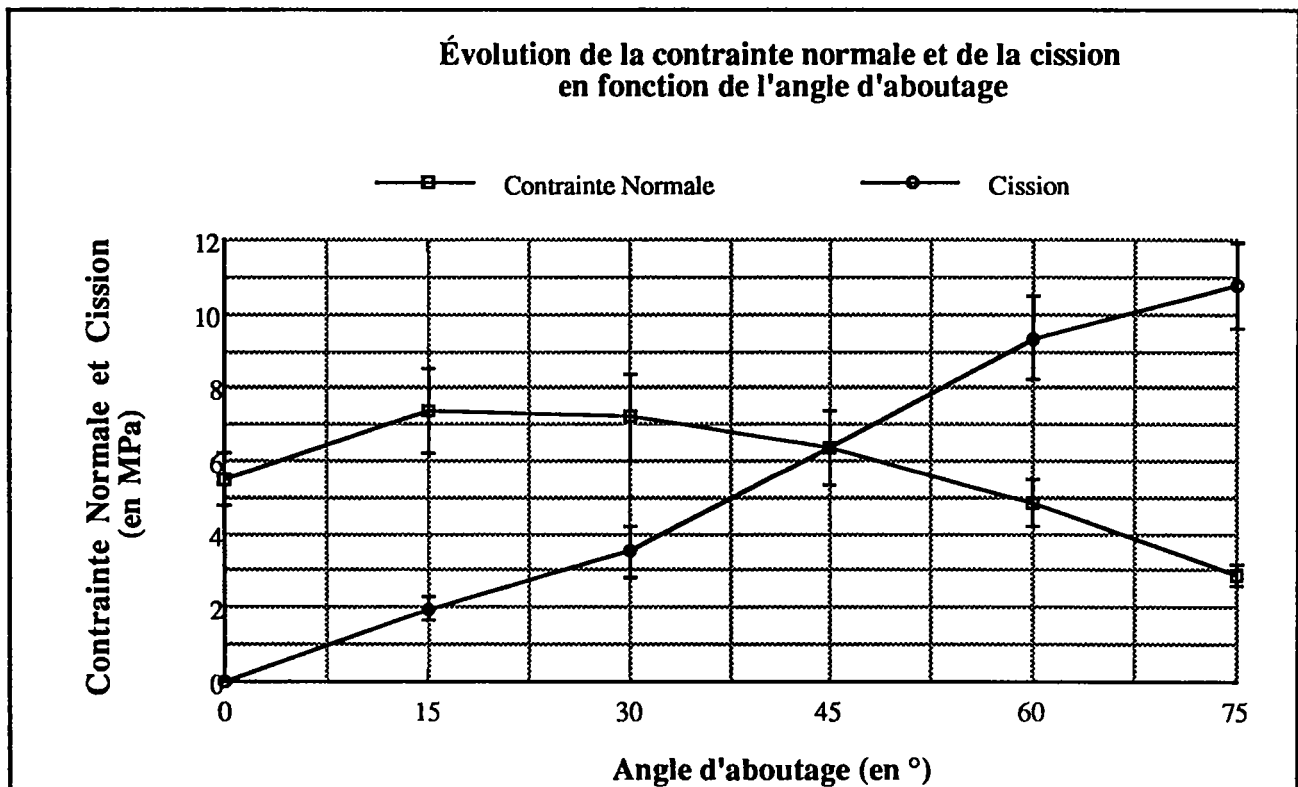


Figure II-14 : Évolution de la contrainte normale σ_α et de la cission τ_α en fonction de l'angle α .

II-4-5-5-4 Conclusion

D'un angle d'aboutage α de 0° jusqu'à 45° , nous sommes en présence d'une rupture en traction. C'est la contrainte normale σ_α (comprise entre 5,50 et 7,38 MPa) d'une valeur moyenne de 6,50 MPa qui gouverne ce mode de rupture.

Au delà de cet angle α de 45° , il y a une rupture qui associe à la fois la traction et le cisaillement.

II-4-6 Conclusion générale sur l'étude de l'angle d'aboutage

De cette étude, nous retiendrons les faits suivants :

Conclusion n°1 :

La charge de rupture P et la surface de collage S_c augmentent quand l'angle d'aboutage α augmente (avec une section utile constante de 160 mm^2 dans notre cas).

Conclusion n°2 :

Il y a une relation quasi linéaire entre la charge de rupture P_c et le déplacement δ . La charge de rupture P (donc la contrainte de rupture σ) est proportionnelle au déplacement δ mesuré dans l'axe de l'éprouvette.

On peut également ajouter que la rupture est totale lorsque le déplacement δ_n normal à la surface de collage S_c est d'environ $0,26 \text{ mm}$ et ceci quelque soit l'angle d'aboutage α .

Conclusion n°3 :

Le faciès de rupture change en fonction de l'angle d'aboutage α . Ainsi, avec un angle d'aboutage α de 0° jusqu'à 45° , la rupture est adhésive. À 60° , les ruptures sont adhésives ou mixtes. Cette différence est certainement due à la qualité du collage et/ou à la préparation des éprouvettes. À 75° , les ruptures sont systématiquement mixtes.

Conclusion n°4 :

D'un angle d'aboutage α de 0° jusqu'à 45° , nous sommes en présence d'une rupture en traction. La contrainte normale σ_α d'une valeur moyenne de $6,50 \text{ MPa}$ gouverne ce mode de rupture. Au delà de cet angle α de 45° , la rupture associe à la fois la traction et le cisaillement.

Conclusion n°5 :

On s'aperçoit qu'il y a une concordance entre le type de rupture (adhésive/mixte) et le mode de rupture (traction/cisaillement). Ainsi de 0° à 45° , la rupture est adhésive avec un mode de rupture en traction, ensuite pour un angle d'aboutage α de 60 ou 75° , la rupture est principalement mixte (des fibres de bois sont arrachées) et la rupture associe à la fois la traction et le cisaillement.

Remarque :

Avec un angle de 75° , on obtient une résistance à la rupture égale au $2/3$ environ de celle obtenue sur une éprouvette en bois massif.

II-5 Étude de l'endommagement du joint de colle

Cette partie du travail va consister à étudier l'endommagement du joint de colle dans un assemblage bois-bois collé en biseau à 60° sollicité en traction cyclique.

II-5-1 Caractéristiques des éprouvettes

II-5-1-1 Caractéristiques techniques des éprouvettes

Nous avons décidé de prendre un angle d'aboutage $\alpha = 60^\circ$ suite à l'étude de la résistance d'un assemblage bois-bois collé en biseau (partie II-4 de l'étude expérimentale) et ceci pour deux raisons :

- la première est que les ruptures des éprouvettes ayant un angle de 60° étaient soit des ruptures adhésives (c'est-à-dire dans le joint de colle), soit des ruptures mixtes (c'est-à-dire à la fois dans le joint de colle et dans le bois); la question que l'on se pose est : "Est-ce la colle et/ou le bois et/ou une autre zone qui sont la cause de la rupture de l'assemblage ?",

- la seconde est qu'avec cet angle d'aboutage à 60°, nous avons une surface de collage assez importante pour nous permettre d'utiliser le montage de collage horizontal beaucoup plus pratique que le montage de collage vertical.

II-5-1-2 Caractéristiques géométriques des éprouvettes

Les éprouvettes sont toujours réalisées sur le combiné bois. La modification géométrique la plus importante est que nous avons réduit la section où se situe l'aboutage. Nous sommes passés d'une section de 8 * 20 mm à une section de 4 * 20 mm soit une réduction de section de moitié pour nous permettre d'utiliser l'extensomètre Instron (voir le paragraphe II-5-5-1-2 de la page 94).

La réalisation de l'éprouvette a aussi été modifiée pour diminuer les risques d'accidents lors de la fabrication des éprouvettes mais aussi les risques d'erreurs lors de la prise des résultats. Les éprouvettes de l'étude précédente étaient réalisées à partir d'un parallélépipède de dimensions 310 * 50 * 20 mm. 2 opérations avec la toupie étaient nécessaires pour obtenir une section centrale de 8 * 20 mm, l'opération n°1 consistait à diminuer la largeur pour arriver à 20 mm, l'opération n°2 consistait à diminuer l'épaisseur pour obtenir la cote de 8 mm.

Les nouvelles éprouvettes (voir la figure II-15) seront réalisées dans un parallélépipède de 350 mm * 50 mm et d'une épaisseur de 4 mm. Il n'y aura plus qu'une seule opération avec la toupie pour obtenir la cote de 20 mm sur la largeur. Sur les extrémités sont collés 2 renforts de contre-plaqué de 8 mm d'épaisseur nécessaires pour notre nouveau montage de traction. Le fait de supprimer une opération de réduction de section à la toupie diminue les risques d'accidents, mais ce n'est pas la raison principale. Lors de l'essai de traction, nous n'auront aucune déformation (glissement au niveau des mâchoires).

Avec cette modification, nous gagnons une phase d'usinage avec la toupie mais en contrepartie nous devons réaliser un collage supplémentaire pour assembler les 4 morceaux de contre-plaqué à l'éprouvette en bois ainsi que les 2 perçages. L'inconvénient est indéniable puisque nous perdons dans cette phase de fabrication beaucoup de temps, puisqu'en général, nous collons 2 * 4 éprouvettes par jour alors que la phase d'usinage se faisait dans la journée.

Cette modification n'entraîne pas de modification du montage de collage, par contre nous avons dû réaliser un montage de traction. Pour cette étude, nous effectuerons 2 séries de 20 éprouvettes.

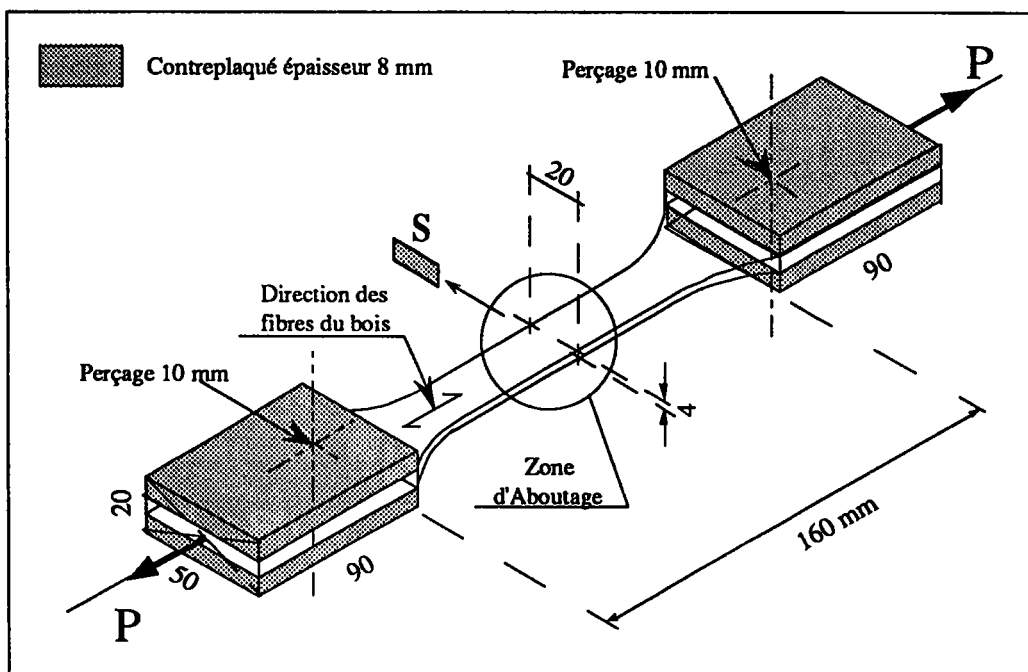


Figure II-15 : Caractéristiques géométriques des éprouvettes.

II-5-2 Montage de collage horizontal pour l'angle d'aboutage de 60°

Nous utiliserons le même montage de collage horizontal que précédemment (voir la figure II-7 de la page 76). La seule différence est que les cales sont plus épaisses (8 mm d'épaisseur au lieu de 6 mm) et que l'éprouvette est donc un peu différente.

II-5-3 Pression de collage

Nous souhaitons, comme pour l'étude précédente, avoir une pression de collage constante de 12 bars (c'est-à-dire 1,2 N/mm²) sur la surface collée pour l'ensemble des éprouvettes. La section utile des éprouvettes est de 20 mm pour la largeur (l) et de 4 mm pour l'épaisseur (e).

II-5-3-1 Calcul de la charge à appliquer pour un angle d'aboutage de 60°

Calcul de la Surface de Collage Sc :

$$Sc = \frac{\text{épaisseur}}{\cos(\alpha)} * \text{largeur} = \frac{4}{\cos(60^\circ)} * 20 = 160,00 \text{ mm}^2$$

Calcul de la Charge Normale F :

$$F = \sigma * Sc = 1,2 * 160,00 = 192,00 \text{ N} = 19,20 \text{ daN}$$

Calcul de la Charge Verticale F' :

$$F' = \frac{F}{\cos(\alpha)} = \frac{192,00}{\cos(60^\circ)} = 384,00 \text{ N} = 38,40 \text{ daN}$$

II-5-3-2 Calcul de la charge à appliquer pour assembler les renforts

Les dimensions des renforts en contre-plaqués sont : 70 mm de longueur, 50 mm de largeur et 8 mm d'épaisseur.

Calcul de la Charge Normale F et Verticale F' (F = F'):

$$F = \sigma * Sc = 1,2 * (70 * 50) = 4 200,00 \text{ N} = 420,00 \text{ daN}$$

Calcul pour le collage d'une éprouvette :

$$F = 420,00 * 2 = 840,00 \text{ daN}$$

Il y a donc 4 renforts par éprouvette mais il y a toujours 2 renforts l'un en dessous de l'autre donc pour le calcul, il ne faut tenir compte que de 2 renforts.

Les collages pour les renforts sont réalisés directement avec une presse sans montage particulier. La charge appliquée est directement imposée à la machine.

II-5-4 Montage de traction

Pour fixer les éprouvettes sur la machine de traction Instron, nous avons dû concevoir un montage rendant la manipulation facile. Les mors (figure II-16) sont fixés sur la machine à l'aide d'une pige de diamètre 12 mm et l'éprouvette est fixée sur les mors avec des piges de diamètre 10 mm.

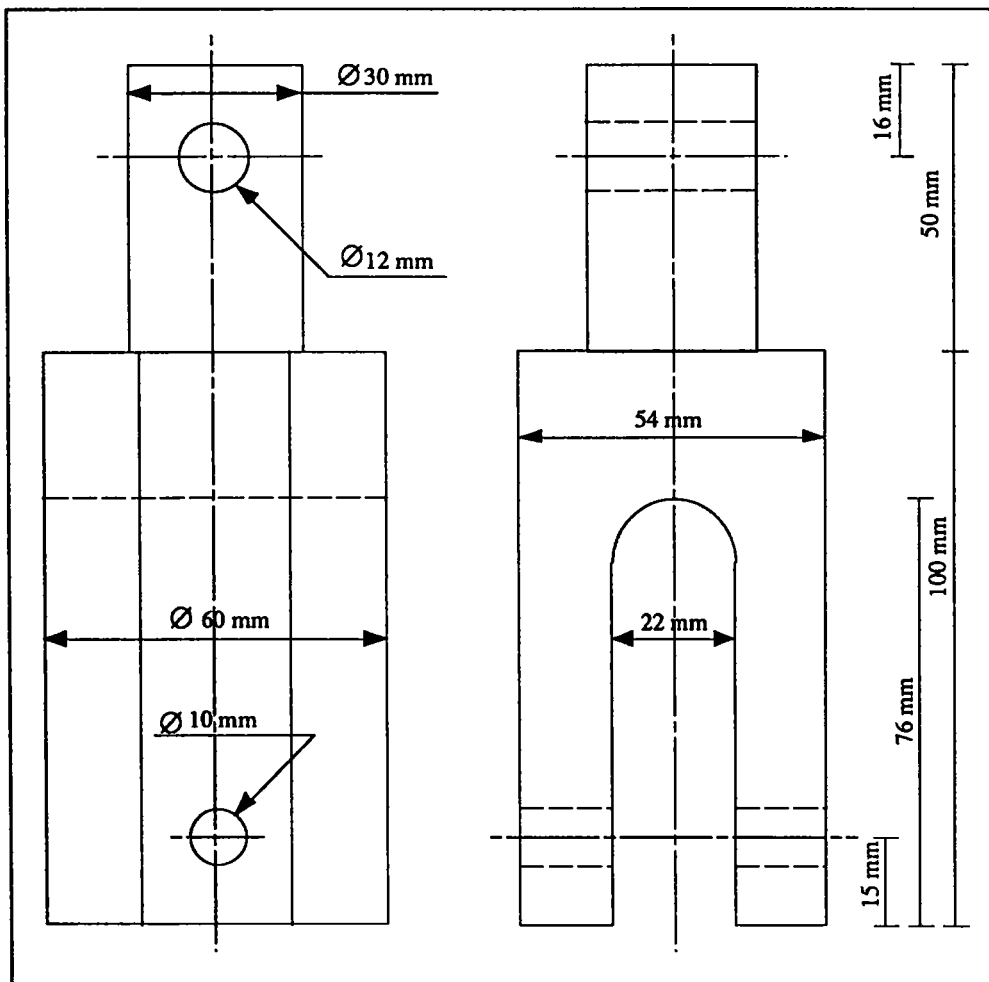


Figure II-16 : Dessin de définition d'un mors.

II-5-5 Principe des essais

Le principe des essais est le suivant : on applique un cycle de charge et décharge entre des paliers fixés et suivant un nombre constant de cycles .

Si l'éprouvette ne casse pas, on poursuit l'augmentation de la charge moyenne des paliers jusqu'à la rupture.

II-5-5-1 Définition du cahier des charges

II-5-5-1-1 Palier, vitesse et nombre de cycles

Les essais doivent être rigoureusement identiques. Aussi est-il nécessaire de définir au préalable un cahier des charges spécifiques pour les différents paliers de charge et de décharge (voir le tableau II-14) ainsi que le nombre de cycles par palier.

Nombre de Palier	Amplitude du Palier de Charge (en N)	Valeur Moyenne (en N)
1	100 à 300	200
2	300 à 500	400
3	500 à 700	600
4	700 à 900	800
5	900 à 1100	1000
6	1000 à 1200	1100
7	1100 à 1300	1200
8	1200 à 1400	1300
9	1300 à 1500	1400
10	1400 à 1600	1500
11	1500 à 1700	1600
12	1600 à 1800	1700
13	1700 à 1900	1800
14	1800 à 2000	1900
15 à

Tableau II-14 : Définition précise des paliers de charge et décharge.

L'ensemble des essais sera réalisé avec une cellule de charge de capacité 10 kN.

La vitesse de la traverse est de 0,5 mm/mn ce qui est la vitesse la plus faible de la machine de traction.

Il y aura 20 cycles de charge-décharge par palier. Si l'éprouvette n'est pas cassée après le vingtième cycle, on passe alors au palier supérieur.

II-5-5-1-2 Capteur et prise de mesure

Par rapport à l'étude sur l'angle d'aboutage, la prise de mesure de la charge sera toujours obtenue par le capteur de charge de la machine Instron elle-même; par contre la mesure du déplacement sera obtenue à l'aide d'un extensomètre Instron 2630-100 Série Clip-On (voir la figure II-17).

Caractéristiques de l'extensomètre :

- sa base de mesure est de 25 mm,
- sa plage de déplacement va de + 12,5 mm à - 2,5 mm.

Cet extensomètre est totalement compatible avec la machine de traction Instron que nous utilisons ce qui facilitera grandement sa gestion.

La machine de traction Instron 4302 sera pilotée par un ordinateur qui gèrera l'ensemble des données par l'intermédiaire d'un programme réalisé sous Labview au laboratoire.

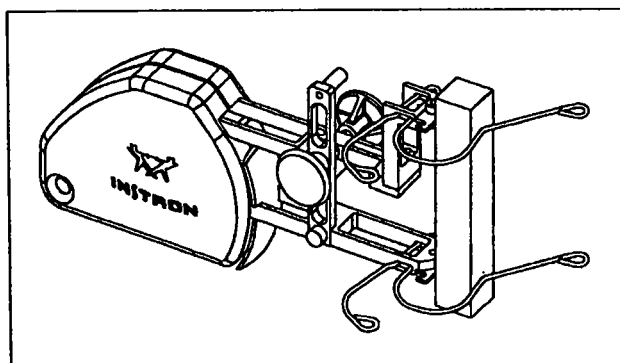


Figure II-17 : Extensomètre Instron.

II-5-5-2 Mise en place du montage

II-5-5-2-1 Photographies de mise en place du montage

La mise en place du montage est très simple et les prises de mesure sont informatisées, ce qui facilite les essais (voir la figure II-18).

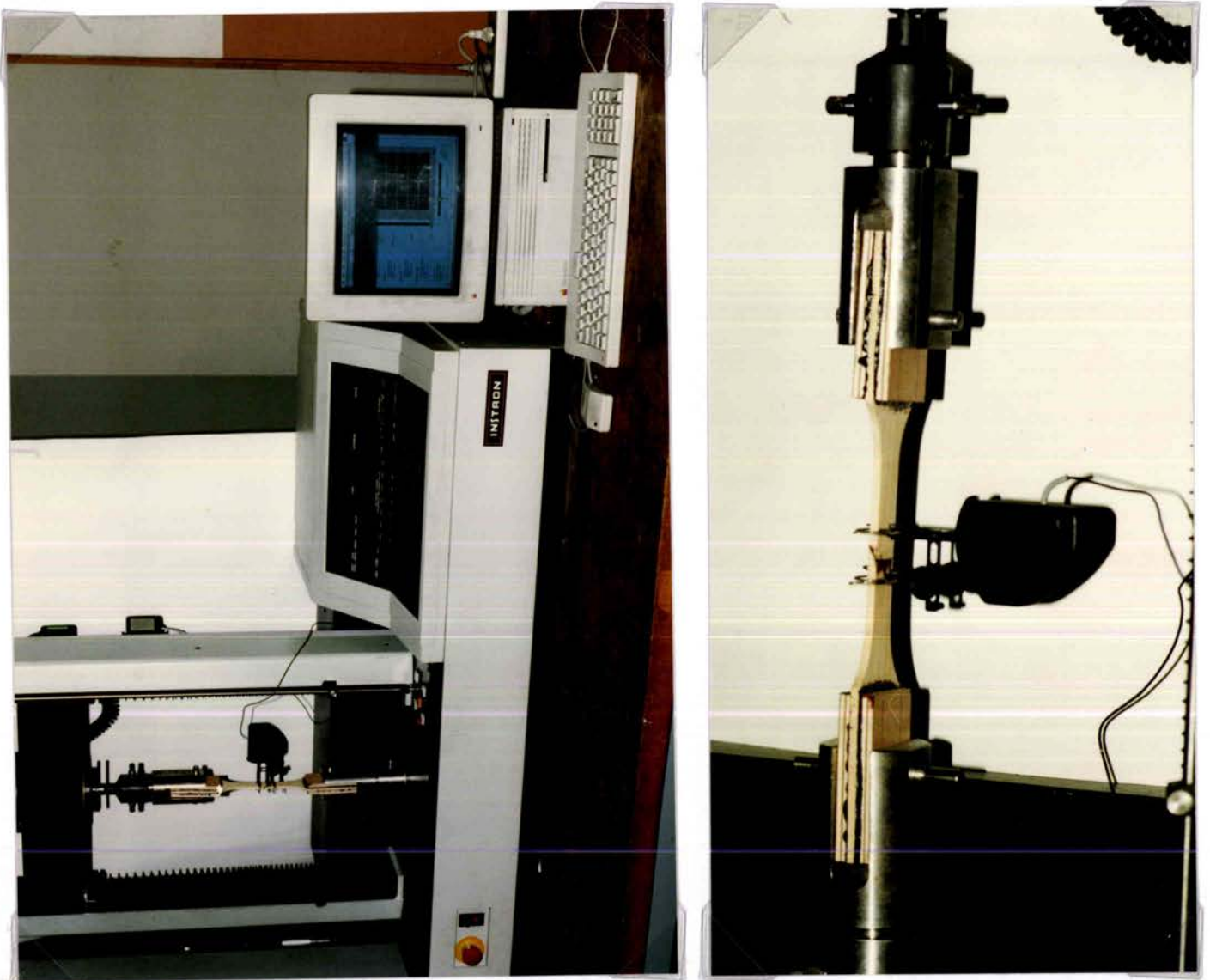


Figure II-18 : Photographies représentant le montage installé sur la machine de traction.

II-5-5-2-2 Écran de contrôle de la machine pilotée par l'ordinateur

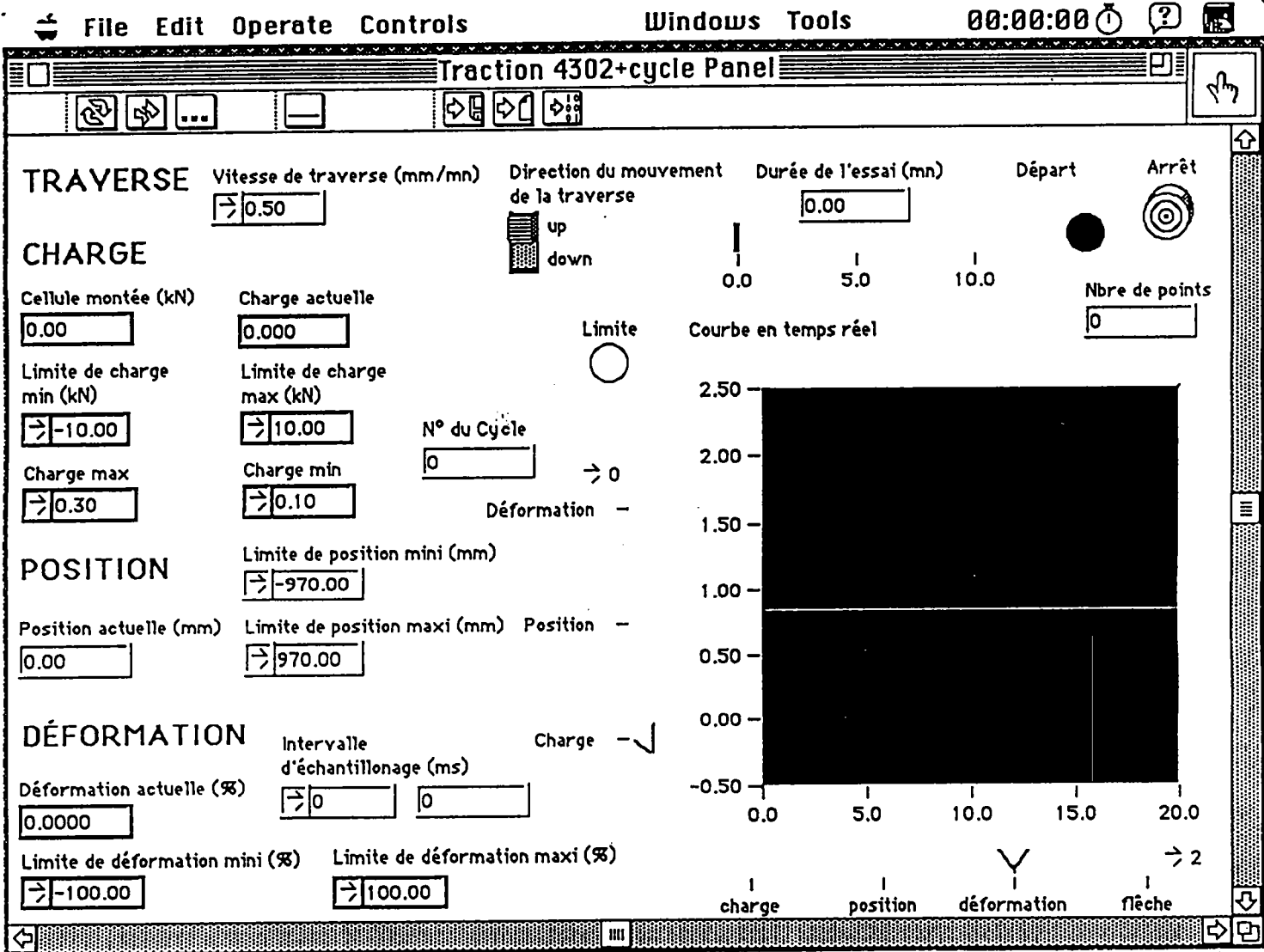


Figure II-19 : Écran de contrôle de l'ordinateur.

II-5-6 Caractéristiques des éprouvettes utilisées

Les résultats concernant l'ensemble des caractéristiques des éprouvettes utilisées pour les essais cycliques ainsi que quelques informations sur les essais se trouvent dans les tableaux II-15 et II-16.

Les résultats détaillés se trouvent dans l'annexe 5.

Biseau à 60° Ep-n°	Largeur Section b (en mm)	Épaisseur Section e (en mm)	Section Initiale Si (en mm ²)	Surface de Collage Sc (en mm ²)	Nombre de Paliers de l'Essai	Durée de l'Essai T (en mn)	Nombre de Points du Fichier
Minimum	19,8	4,9	97,51	112,59	4	36	4 146
Maximum	20,1	5,1	102,51	118,37	24	216	22 262
Étendue	0,3	0,2	5,00	5,77	20	180	18 116
Moyenne	19,9	5,0	99,65	115,07	15	131	13 996
Écart-Type	0,1	0,1	1,39	1,61	5	46	4 794
C.V.	0,40%	1,30%	1,40%	1,40%	34,67%	34,67%	34,26%

Tableau II-15 : Synthèse des caractéristiques des éprouvettes n°1 à 20 utilisées.

Biseau à 60° Ep-n°	Largeur Section b (en mm)	Épaisseur Section e (en mm)	Section Initiale Si (en mm ²)	Surface de Collage Sc (en mm ²)	Nombre de Paliers de l'Essai	Durée de l'Essai T (en mn)	Nombre de Points du Fichier
Minimum	19,8	4,9	97,02	112,03	6	54	7 632
Maximum	20,1	5,1	102,51	118,37	25	225	22 885
Étendue	0,3	0,2	5,49	6,34	19	171	15 253
Moyenne	19,9	5,0	99,03	114,35	15	133	13 610
Écart-Type	0,1	0,1	1,55	1,79	4	35	3 467
C.V.	0,50%	1,44%	1,57%	1,57%	26,63%	26,63%	25,47%

Tableau II-16 : Synthèse des caractéristiques des éprouvettes n°21 à 40 utilisées.

Remarque :

En moyenne, sur les 40 éprouvettes, il faut 15 paliers pour qu'il y ait rupture. La durée d'un essai est de 2 heures et 15 minutes. Chaque fichier de points pour un seul essai en contient 13 610.

Les résultats récapitulatifs concernant les essais cycliques réalisés se trouvent dans les tableaux II-17- et II-18.

Les résultats détaillés se trouvent dans l'annexe 5.

Biseau à 60° Ep-n°	Nombre de Paliers de l'Essai	Amplitude du Palier de Rupture (en kN)	Valeur Moyenne (en kN)	Nombre de Cycles sur le Palier de Rupture	Charge de Rupture (en kN)	Déformation à la Rupture (en %)	Type de Rupture M , A
Minimum	4	0,7 à 0,9	0,8	0	0,934	0,2113	-
Maximum	24	2,8 à 3,0	2,9	19	2,811	0,4439	-
Étendue	20	0,7 à 3,0	2,1	19	1,877	0,2326	-
Moyenne	15	1,8 à 2,0	1,9	9	1,974	0,3031	Adhésive
Écart-Type	5,06	-	0,52	6,23	0,48	0,07	-
C.V.	34,67%	-	27,24%	72,08%	24,55%	23,19%	-

Tableau II-17 : Synthèse des essais de traction cyclique pour les éprouvettes n°1 à 20.

Biseau à 60° Ep-n°	Nombre de Paliers de l'Essai	Amplitude du Palier de Rupture (en kN)	Valeur Moyenne (en kN)	Nombre de Cycles sur le Palier de Rupture	Charge de Rupture (en kN)	Déformation à la Rupture (en %)	Type de Rupture M , A
Minimum	6	1,0 à 1,2	1,1	0	1,152	0,2215	-
Maximum	25	2,9 à 3,1	3,0	20	3,001	0,4523	-
Étendue	19	1,0 à 3,1	1,9	20	1,849	0,2308	-
Moyenne	15	1,8 à 2,0	1,9	11	2,025	0,3192	Adhésive
Écart-Type	3,94	-	0,39	6,15	0,39	0,06	-
C.V.	26,63%	-	20,75%	54,63%	19,44%	18,03%	-

Tableau II-18 : Synthèse des essais de traction cyclique pour les éprouvettes n°21 à 40.

Remarque :

Sur les 40 éprouvettes, la charge moyenne de rupture est de 2,0 kN et la déformation est de 0,31%. On peut relever que certaines éprouvettes ont eu une rupture mixte.

II-5-7 Étude spécifique d'une éprouvette : l'éprouvette n°29

Pour mieux expliquer notre étude, nous allons examiner très précisément un essai qui correspond à une éprouvette : l'éprouvette n°29 (voir la figure II-20).

Le temps écoulé entre le début d'un l'essai et l'obtention du résultat final est de 5 heures minimum.

Après avoir monté l'éprouvette dans le montage, nous effectuons l'essai de traction cyclique suivant le cahier des charges.

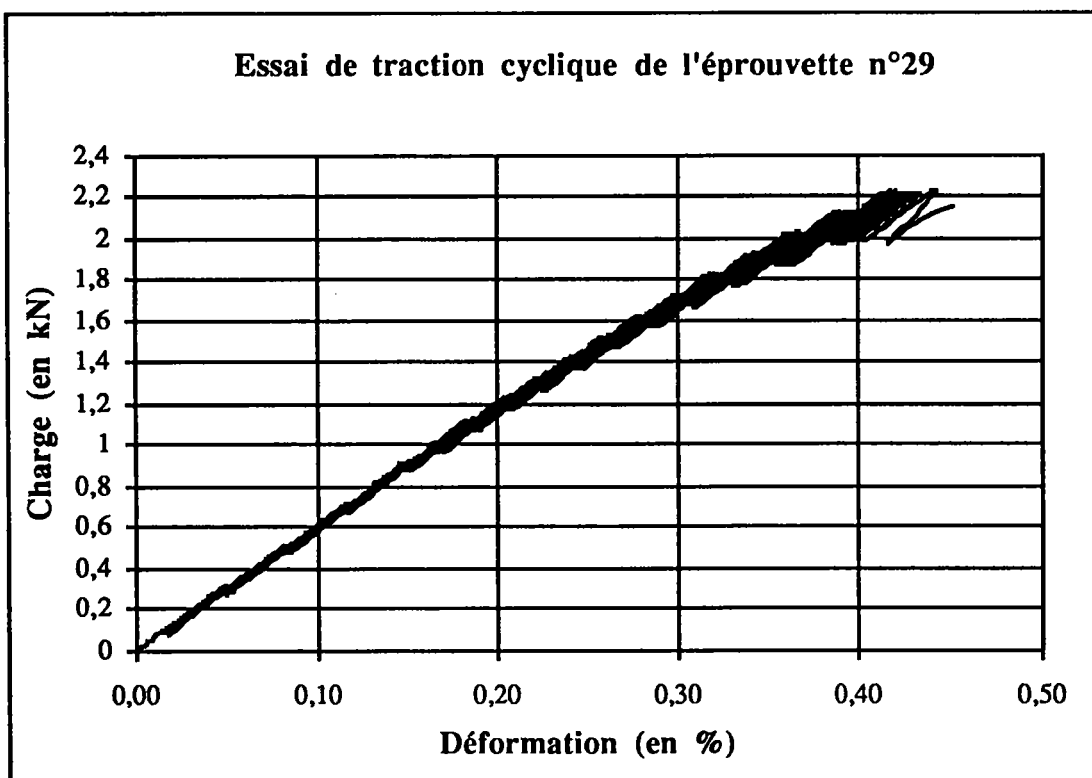


Figure II-20 : Courbe globale Charge=f(Déformation) de l'éprouvette n°29.

À la fin de chaque cycle, l'ordinateur enregistre un fichier de points. Le fichier "ep-29 1" représente donc l'enregistrement de la charge en fonction de la déformation pour le premier palier de charge.

Finalement, l'éprouvette n°29 a cassé au palier n°16 c'est-à-dire pour un cycle de charge à 2,2 kN et une décharge à 2,0 kN. Par conséquent, nous avons 16 fichiers (ep-29 1, ep-29 2, ep-29 3, ..., ep-29 16) pour la seule éprouvette n°29.

À cause de la taille limitée de la mémoire de l'ordinateur, chaque palier correspond à un fichier. Tous ces fichiers sont par la suite regroupés par une macro pour n'en former plus qu'un seul.

À l'arrivée, nous obtenons un fichier global appelé "ep-29" et qui regroupe tous les fichiers "ep-29 1" à "ep-29 16" mis bout à bout. Ce fichier "ep-29" contient exactement 14461 points et nous pouvons représenter graphiquement la courbe charge=f(déformation) de l'éprouvette n°29 (voir la figure II-20 de la page précédente).

Il nous faut ensuite repérer les points caractéristiques. Il s'agit des points qui encadrent la valeur moyenne lors de la phase de charge. Ainsi pour le premier palier, la valeur moyenne est 0,2 kN donc nous sélectionnons à chaque cycle les deux points qui encadrent ce point en les repérant par un X .

Puis, on crée un fichier qui ne contiendra que les points repérés par des X. Cette opération d'extraction est réalisée par une macro. À l'arrivée, nous obtenons un fichier qui contient 640 points (2*20*16) et qui s'appelle "ep-29 X".

Le dommage D de l'assemblage est mesuré en suivant l'évolution de la déformation ϵ en fonction du palier de charge-décharge et de l'amplitude de déformation. La déformation est donc le paramètre physique que nous observerons pour décrire l'endommagement.

Le palier est défini par la valeur moyenne de la charge.

On classe alors toutes les valeurs dans un tableau par palier (voir l'annexe 6) et suivant le nombre de cycles.

Le dommage D est défini comme l'amplitude de déformation au palier n°i sur l'amplitude de déformation au palier de rupture.

$$\text{Dommage : } D_{\text{palier n}^\circ\text{i}} = \frac{(\epsilon_{\text{max}} - \epsilon_{\text{min}})_{\text{palier n}^\circ\text{i}}}{(\epsilon_{\text{max}} - \epsilon_{\text{min}})_{\text{palier rupture}}} \quad (\text{II-19})$$

$$\text{Charge : } N_{\text{palier n}^\circ\text{i}} = \frac{\text{Charge } N_{\text{palier n}^\circ\text{i}}}{\text{Charge } N_{\text{palier rupture}}} \quad (\text{II-20})$$

Pour $D = 1$, il y a rupture sous la charge normalisée $N = 1$

Pour l'éprouvette n°29, tous les paliers de charge-décharge étaient de 20 cycles sauf 10 cycles pour le palier de rupture (voir le tableau de l'annexe 6). Nous effectuons une interpolation sur le nombre de cycles pour tenir compte de ce paramètre (voir le tableau II-19).

Charge (en kN)	Déformation mini (en %)	Déformation maxi (en %)	Δ Déformation (en %)	Nombre de Cycles	Δ Déformation Normalisée	Domage D Normalisé	Charge Normalisée
0,2	0,0316	0,0350	0,0034	20	0,0017	0,0428	0,0952
0,4	0,0641	0,0685	0,0044	20	0,0022	0,0554	0,1905
0,6	0,0968	0,1021	0,0053	20	0,0027	0,0668	0,2857
0,8	0,1307	0,1357	0,0050	20	0,0025	0,0630	0,3810
1,0	0,1637	0,1699	0,0062	20	0,0031	0,0781	0,4762
1,1	0,1840	0,1885	0,0045	20	0,0023	0,0567	0,5238
1,2	0,2030	0,2079	0,0049	20	0,0024	0,0617	0,5714
1,3	0,2217	0,2270	0,0053	20	0,0027	0,0668	0,6190
1,4	0,2412	0,2460	0,0048	20	0,0024	0,0605	0,6667
1,5	0,2603	0,2659	0,0056	20	0,0028	0,0705	0,7143
1,6	0,2797	0,2860	0,0063	20	0,0031	0,0793	0,7619
1,7	0,3002	0,3074	0,0072	20	0,0036	0,0907	0,8095
1,8	0,3208	0,3289	0,0081	20	0,0041	0,1020	0,8571
1,9	0,3436	0,3539	0,0103	20	0,0051	0,1297	0,9048
2,0	0,3684	0,3814	0,0130	20	0,0065	0,1637	0,9524
2,1	0,3972	0,4369	0,0397	10	0,0397	1,0000	1,0000

Tableau II-19 : Calculs normalisés du domage et de la charge pour l'éprouvette n°29.

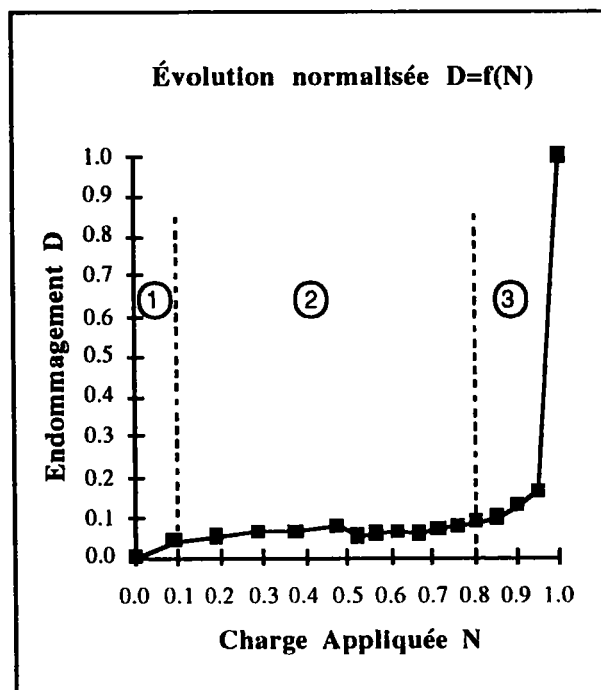


Figure II-21 : Courbe normalisée Domage=f(Charge) de l'éprouvette n°29.

Comme le montre la figure II-21 de la page précédente, la courbe comporte 3 parties distinctes :

- zone 1 :
zone de faible étendue de 0 à 10% de la charge de rupture correspondant à la prise en compte de la première charge par l'assemblage,
- zone 2 :
zone assez étendue allant de 10% à environ 80% de la charge de rupture où l'endommagement reste quasi constant,
- zone 3 :
zone finale peu étendue où l'endommagement progresse très rapidement. Cette zone commence à environ 80% de la charge de rupture.

II-5-8 Détermination de la loi d'endommagement

À présent, nous allons déterminer la loi d'endommagement. Toutes les courbes des essais ont la même allure en "forme de S".

L'équation normalisée du dommage D en fonction de la charge N pour ce type de courbe est de la forme suivante [73] :

$$D(N) = a * \frac{N^b}{1 - N^c} \quad (\text{II-21})$$

Pour déterminer les coefficients a, b, c de notre modèle, nous utilisons la méthode bi-logarithmique [73]. Il s'agit de minimiser la valeur S (voir la relation II-22) qui représente la somme des écarts au carré entre les valeurs logarithmiques de l'endommagement relevé expérimentalement et les valeurs logarithmiques de l'endommagement calculé avec le modèle.

$$S = \sum_{i=1}^n (\text{Log } D_{i_{\text{exp}}} - \text{Log } D_{i_{\text{mod}}})^2 \quad (\text{II-22})$$

Nous résolvons ce système en utilisant le solveur d'Excel 5.0. On pose la condition suivante : S doit être minimisé donc aussi proche de 0 que possible et le logiciel détermine automatiquement les paramètres a, b, c.

Les résultats récapitulatifs concernant la détermination des paramètres a, b, c se trouvent dans les tableaux II-20 pour les éprouvettes n°1 à 20 et dans le tableau II-21 pour les éprouvettes n°21 à 40.

Les résultats détaillés se trouvent dans l'annexe 7.

Éprouvette n°1 à 20	Coefficient a	Coefficient b	Coefficient c
Minimum	0,07	0,04	4,96
Maximum	0,18	0,10	11,38
Étendue	0,11	0,06	6,42
Moyenne	0,13	0,07	8,50
Écart-Type	0,03	0,02	2,20
C.V.	26,24%	28,73%	25,91%

Tableau II-20 : Détermination des coefficients a, b, c pour les éprouvettes n°1 à 20.

Éprouvette n°21 à 40	Coefficient a	Coefficient b	Coefficient c
Minimum	0,06	0,04	4,20
Maximum	0,26	0,11	13,33
Étendue	0,20	0,07	9,13
Moyenne	0,15	0,08	9,31
Écart-Type	0,06	0,02	2,43
C.V.	39,56%	30,12%	26,06%

Tableau II-21 : Détermination des coefficients a, b, c pour les éprouvettes n°21 à 40.

Il y a une légère différence entre les 2 séries que l'on peut imputer à la variabilité des collages.

Sur l'ensemble des 40 essais, on obtient les résultats moyens suivants :

$$a = 0,14$$

$$b = 0,07$$

$$c = 8,91$$

II-5-8-1 Étude du paramètre "a"

Nous partons de l'équation $D(N) = a * \frac{N^{0,07}}{1 - N^{8,91}}$ et nous faisons varier le coefficient "a" de 0,06 à 0,22 avec un pas de 0,04.

On s'aperçoit que plus le coefficient "a" augmente, plus le palier horizontal se décale vers le haut (voir la figure II-22).

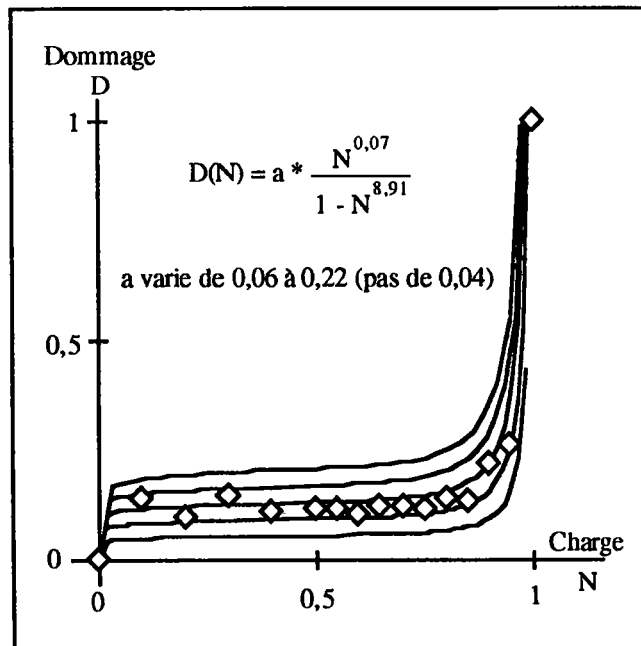


Figure II-22 : Étude du paramètre "a".

La valeur "a" traduit la valeur du palier de la courbe. Il pourrait caractériser la quantité de défauts pris en compte à la mise en charge.

II-5-8-2 Étude du paramètre "b"

Nous partons de l'équation $D(N) = 0,14 * \frac{N^b}{1 - N^{8,91}}$ et nous faisons varier le coefficient "b" de 0 à 0,2 avec un pas de 0,05.

On s'aperçoit que plus le coefficient "b" augmente, plus la pente initiale du début de la courbe est importante (voir la figure II-23 de la page suivante).

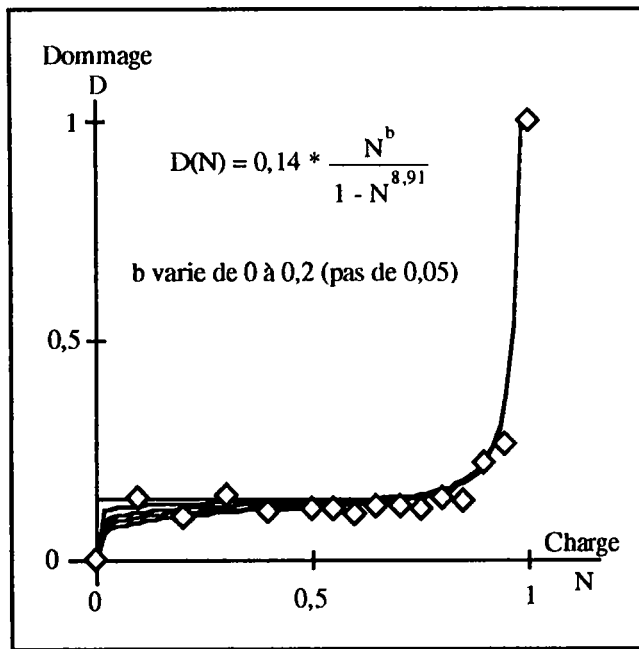


Figure II-23 : Étude du paramètre "b".

L'exposant "b" traduit la pente initiale du palier de la courbe. Il pourrait être relié aux types de défauts pris en compte par la première charge.

II-5-8-3 Étude du paramètre "c"

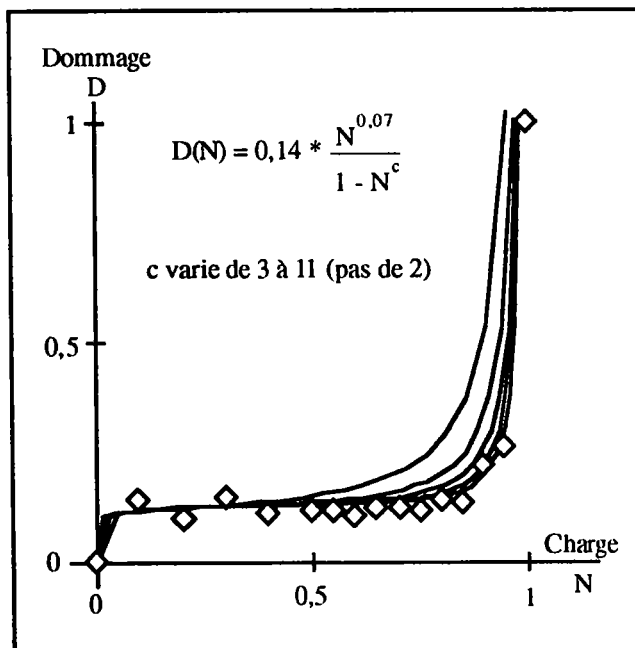


Figure II-24 : Étude du paramètre "c".

Nous partons de l'équation $D(N) = 0,14 * \frac{N^{0,07}}{1 - N^c}$ et nous faisons varier le coefficient "c" de 3 à 11 avec un pas de 2.

On s'aperçoit que plus le coefficient "c" augmente, plus la courbe se décale vers la droite (voir la figure II-24 de la page précédente).

L'exposant "c" traduit la vitesse de détérioration du joint de colle. Il est relié à la ductilité de l'assemblage.

II-5-8-4 Synthèse sur la détermination de la loi d'endommagement

La loi d'évolution normalisée (à 3 paramètres) du dommage D en fonction de la charge N est de la forme $D(N) = a * \frac{N^b}{1 - N^c}$

La valeur a traduit la valeur moyenne du palier.

L'exposant b traduit la pente initiale du palier.

L'exposant c traduit la vitesse de détérioration du joint de colle.

On propose un modèle basé sur l'endommagement du bois et/ou de la colle et/ou de la zone bois+colle en fonction de la charge. En effet, nous ignorons la zone où se produit l'endommagement, mais par contre nous connaissons maintenant l'équation de sa loi d'évolution.

$$D(N) = 0,14 * \frac{N^{0,07}}{1 - N^{8,91}} \quad (\text{II-23})$$

avec les coefficients suivants : a = 0,14 et b = 0,07 et c = 8,91

II-5-9 Conclusion sur le modèle d'endommagement proposé

Toutes les courbes de dommage obtenues après dépouillement des essais ont approximativement la même forme en "S". L'équation caractéristique que nous proposons s'adapte correctement aux résultats expérimentaux.

En effet, il apparaît que l'assemblage ne s'endommage de façon significative que lorsque la charge que l'on applique est égale à environ 80% de la charge de rupture.

La fonction $D(N) = 0,14 * \frac{N^{0,07}}{1 - N^{8,91}}$ nous permet de définir

l'endommagement maximal supporté par l'assemblage. Cependant, bien que la majorité des ruptures des essais cycliques soient adhésives, on ne sait pas exactement si la zone d'endommagement est le joint de colle lui-même ou une autre partie de l'assemblage.

C'est pourquoi, la prochaine étape de notre travail sera de modéliser l'assemblage afin de savoir où se situe exactement la zone endommagée et d'appliquer la loi d'évolution pour vérifier si ce que nous avons proposé est valable.

II-6 Conclusion générale de l'étude expérimentale

Cette étude expérimentale a été réalisée en vue d'obtenir des résultats significatifs. Préalablement aux deux études principales; à savoir l'étude de l'angle d'aboutage sur la résistance de l'assemblage et l'étude de l'endommagement du joint de colle; nous avons étudié les caractéristiques des deux matériaux utilisés (le bois et la colle). Nous avons ainsi vérifié que les deux matériaux utilisés correspondaient bien à l'usage que nous voulions en faire.

Le taux d'humidité pour le bois était de 11,7% ce qui était primordial pour l'opération de collage. Pour ce qui est de la colle, l'observation principale est qu'il s'agit d'un matériau fragile isotrope à l'état massif. Nous faisons l'hypothèse qu'à l'état de film mince (joint de colle), c'est la même chose.

La première étude nous a permis de déterminer le processus de rupture d'un assemblage bois-bois collé en biseau et ceci pour différents angles d'aboutage. Cela était nécessaire pour préparer la deuxième partie de cette étude expérimentale. Ainsi, nous avons déterminé l'angle d'aboutage optimum ($\alpha = 60^\circ$) ainsi que la forme générale de l'éprouvette. Tous ces éléments rassemblés, les essais ont pu débuter.

Ce travail nous permet maintenant de proposer une loi de comportement $D(N) = 0,14 * \frac{N^{0,07}}{1 - N^{8,91}}$ de l'endommagement du joint de colle que l'on va introduire dans un calcul afin d'en vérifier la pertinence par rapport aux résultats expérimentaux.

CHAPITRE III

SIMULATION NUMÉRIQUE

III-1 Introduction

Cette étape est importante car la simulation numérique validera ou non la loi d'endommagement que nous avons déterminée dans l'étude expérimentale.

Lors des essais de traction monotone, nous nous sommes aperçus que les courbes charge-déplacement possédaient une partie linéaire (domaine élastique) suivie d'une partie non linéaire (domaine plastique). Nous vérifierons par la simulation numérique l'hypothèse que l'endommagement est responsable de cette non linéarité.

La méthodologie que nous appliquerons est la suivante.

La partie III-2 de ce chapitre permettra de connaître le type de matériel utilisé pour la simulation numérique. La station de calcul SUN et le logiciel de calcul par éléments finis CASTEM 2000 sont les outils informatiques employés.

Dans la partie III-3, nous développerons la modélisation de l'éprouvette comme ses caractéristiques géométriques, les conditions aux limites, les forces appliquées, les caractéristiques des différents matériaux qui composent notre assemblage.

La première étude débute à la partie III-4. Elle a pour objectif de rechercher la zone d'application du dommage. Le but est de connaître quelle est la zone de l'assemblage où se produit l'endommagement.

Dans la partie III-5, nous étudierons l'influence des différents coefficients a , b , c du modèle d'endommagement mis en évidence dans le chapitre précédent. Cette simulation numérique nous permettra de mieux comprendre le rôle joué par chacun d'eux et leur influence sur la courbe charge-déformation.

Dans la partie III-6, nous réaliserons la modélisation d'un essai de traction monotone et nous comparerons la courbe obtenue par la simulation numérique à la courbe expérimentale. Pour terminer, dans la dernière partie III-7, nous établirons nos conclusions.

Une remarque très importante est que la simulation numérique portera uniquement sur la partie utile de l'éprouvette; à savoir la section réduite. En effet, nous admettons que les efforts transmis par les mors sont intégralement appliqués à cette section rétrécie.

III-2 La station de travail

Pour réaliser la modélisation, nous utiliserons une station de travail SUN sur laquelle est installée un logiciel de calcul par éléments finis qui s'appelle CASTEM 2000. C'est un programme de nouvelle génération où l'utilisateur dispose de plusieurs notions lui permettant de construire lui-même l'application qu'il désire dans un langage qui lui est familier.

CASTEM 2000 est un outil de calcul de structure complet qui va du mailleur GIBI à l'exploitation des résultats en passant par tous les types de calculs envisageables (problèmes mono, bi et tri dimensionnels, linéaires, non linéaires, dynamiques, ...).

III-2-1 Le concept d'objet nommé

L'utilisateur résout son problème en créant des objets qu'il nomme. Ces objets sont typés et rangés dans une base de données.

III-2-2 Le concept d'opérateur

Les outils utilisés pour créer ces objets sont appelés opérateurs. Ces opérateurs créent un ou plusieurs objets typés à partir d'objets existants fournis par l'utilisateur à l'aide du langage Gibiane.

III-2-3 Le langage Gibiane

Le langage Gibiane permet d'enchaîner les opérateurs en leur faisant lire et écrire dans la base de données. Le langage permet aussi d'effectuer des boucles et des tests logiques. L'utilisateur peut ainsi bâtir une application paramétrée et même programmer des algorithmes.

III-2-4 Le concept de procédure

La procédure permet d'archiver des algorithmes pour les utiliser ultérieurement ou pour permettre à d'autres d'utiliser son travail.

La procédure s'utilise comme un opérateur; la procédure est écrite en Gibiane et peut donc être réalisée par l'utilisateur

III-3 Modélisation de l'éprouvette

III-3-1 Caractéristiques géométriques de l'éprouvette

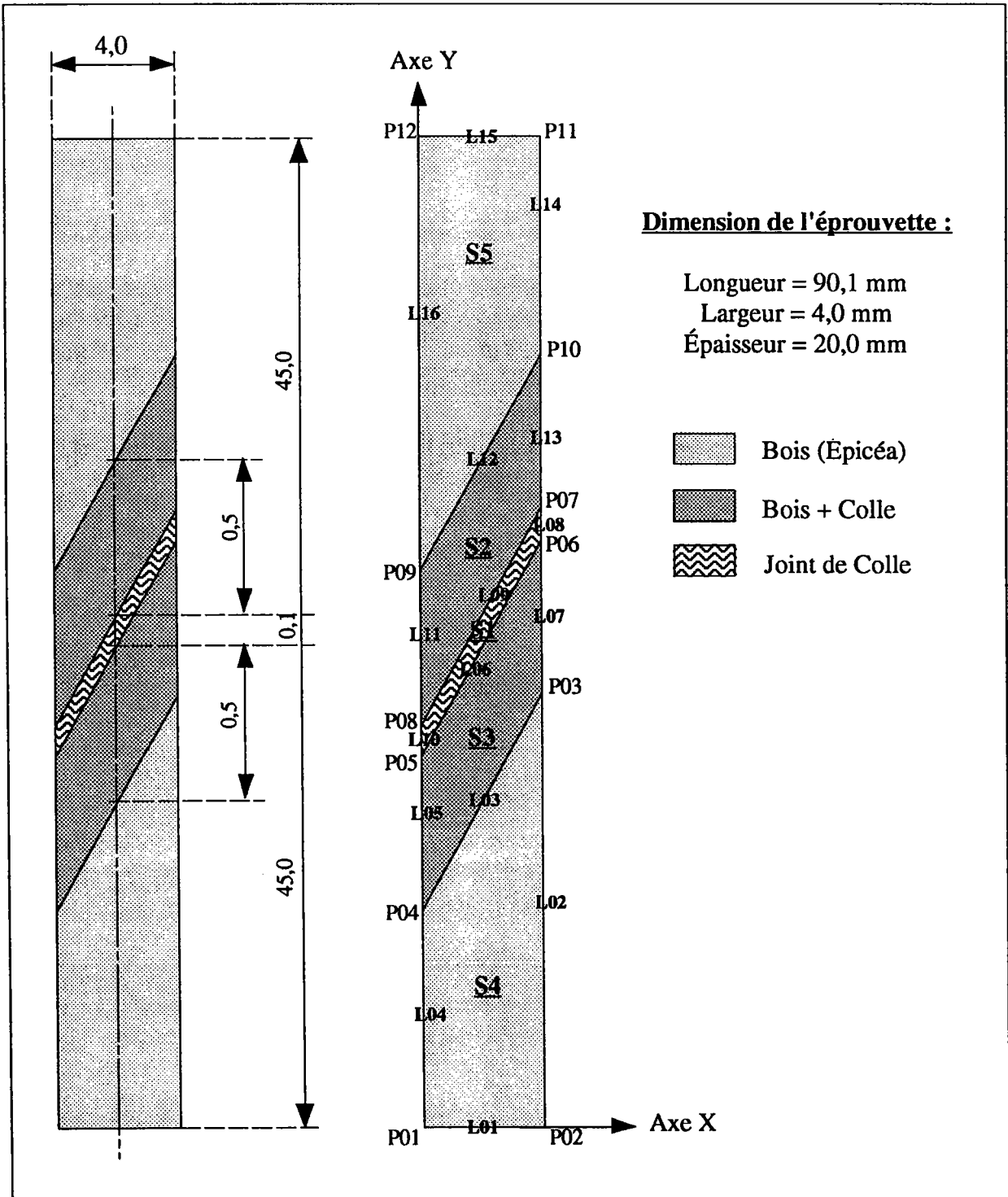


Figure III-1 : Caractéristiques géométriques de la partie modélisée de l'éprouvette.

III-3-2 Conditions aux limites et forces appliquées

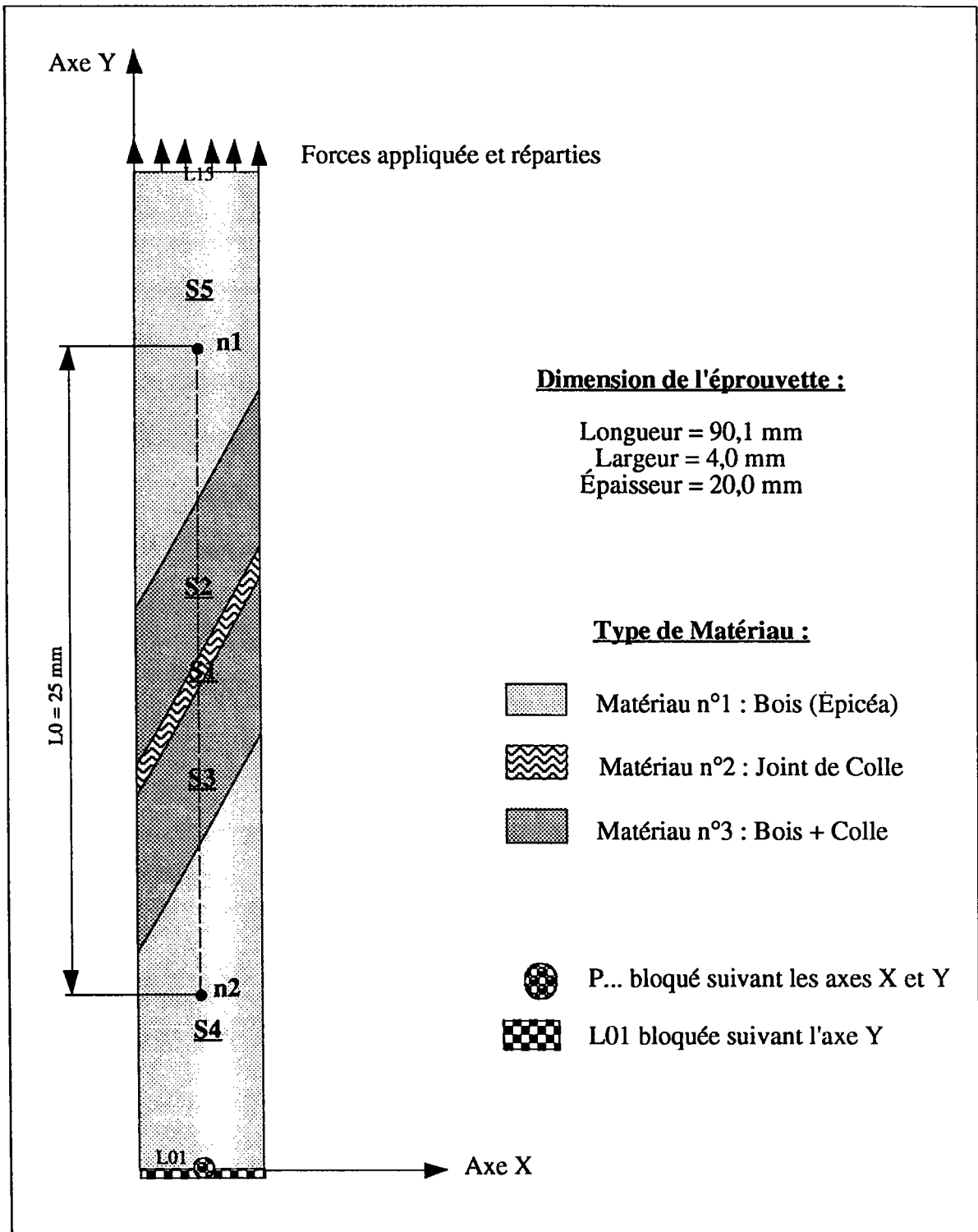


Figure III-2 : Positionnement des conditions aux limites et des forces appliquées.

III-3-3 Région de la zone de calcul

L'extensomètre à lames utilisé pour les essais de traction cyclique a une base de mesure L_0 de 25 mm.

Aussi, nous étudierons le déplacement y'_1 et y'_2 de 2 points significatifs n_1 et n_2 situés de part et d'autre du joint de colle de telle manière que l'écartement entre ces 2 points soit également de 25 mm.

La déformation ε (en %) est donnée par la relation suivante :

$$\varepsilon = \frac{y'_2 - y'_1}{y_2 - y_1} * 100 \quad (\text{III-1})$$

III-3-4 Caractéristiques des matériaux

Le logiciel a besoin que l'on définisse l'ensemble des constituants de notre éprouvette.

Pour notre étude, nous avons 3 matériaux différents :

- Matériau n°1 : Le bois,
- Matériau n°2 : La colle,
- Matériau n°3 : L'élément bois+colle.

III-3-4-1 Loi des mélanges

Nous utiliserons la loi classique des mélanges habituelle pour les matériaux composites. Les modules du bois et de la colle sont déterminés expérimentalement.

Les modules de la zone bois-colle sont obtenus par le calcul.

Nous réaliserons un calcul élastique avec notre propre fonction de dommage puisqu'elle n'existe pas dans le programme CASTEM.

III-3-4-2 Maillage

Le maillage de l'éprouvette (voir la figure III-3) sera toujours le même lors de la simulation numérique.

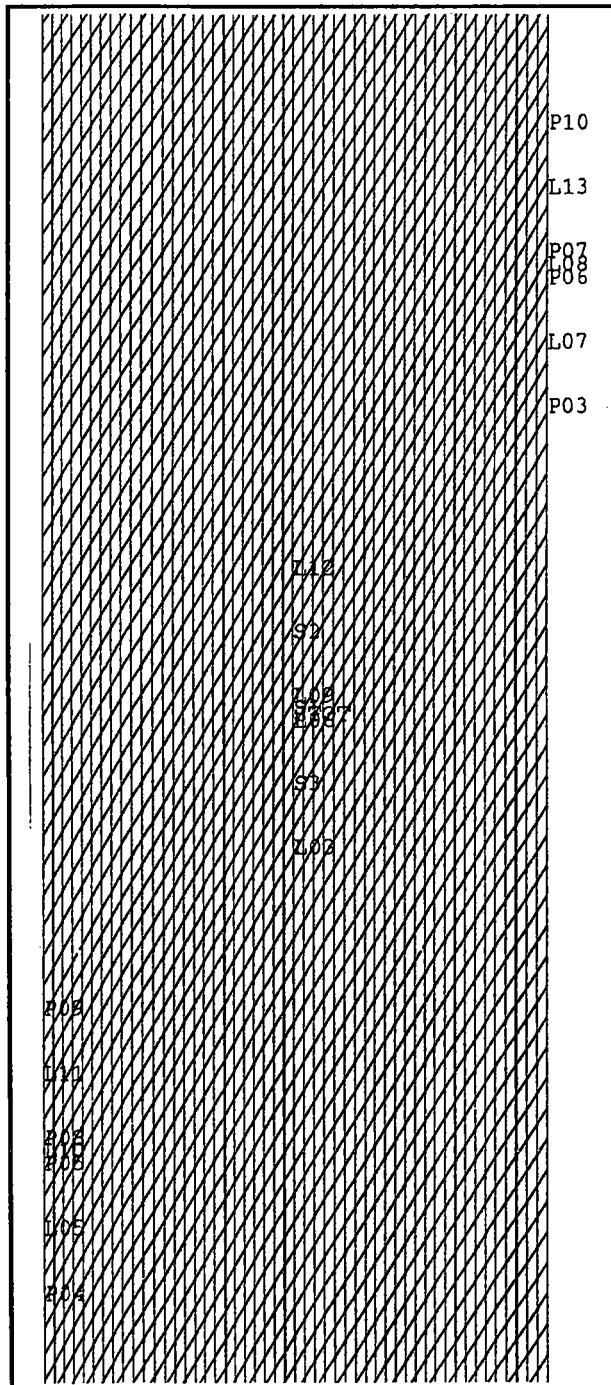


Figure III-3 : Maillage de l'éprouvette.

III-3-4-3 Matériau n°1 : Le bois (Surface 4 et 5)

Lors des essais expérimentaux, le module d'élasticité de Young E_L trouvé était de 13060 MPa. Dans la bibliographie [2, 4], les caractéristiques complètes du bois avec une valeur E quasi-identique ont été relevées. Ce sont ces valeurs qui serviront dans la simulation numérique.

Milieu Orthotrope

Modules Élastiques E (en MPa)

$$E_x = 800 = E_T \quad E_y = 13100 = E_L \quad E_z = 1000 = E_R$$

Coefficients de Poisson ν (sans dimension)

$$\nu_{xy} = 0,02 = \nu_{TL} \quad \nu_{xz} = 0,4 = \nu_{TR} \quad \nu_{yz} = 0,4 = \nu_{LR}$$

Modules de Cisaillement G (en MPa)

$$G_{xy} = 800 = G_{TL} \quad G_{xz} = 100 = G_{TR} \quad G_{yz} = 800 = G_{LR}$$

III-3-4-4 Matériau n°2 : La colle (Surface 1)

Les caractéristiques de la colle résorcine ont été relevées dans la bibliographie [11, 12].

Milieu Isotrope

Modules Élastiques E (en MPa)

$$E_x = E_y = E_z = 2700 = E_T = E_L = E_R$$

Coefficients de Poisson ν (sans dimension)

$$\nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yz} = 0,3 = \nu_{TL} = \nu_{TR} = \nu_{LR}$$

Modules de Cisaillement G (en MPa)

$$G_{xy} = G_{xz} = G_{yz} = 1000 = G_{TL} = G_{TR} = G_{LR}$$

III-3-4-5 Matériau n°3 : L'élément bois+colle (Surface 2 et 3)

Nous appliquons la loi des mélanges pour déterminer les caractéristiques de cet élément bois-colle à partir des données du bois et de la colle (voir la page précédente).

On suppose un mélange 50/50 en volume entre le bois et la colle [71].

Milieu Orthotrope

Modules Élastiques E (en MPa)

$$E_x = (800 + 2700) / 2 = 1750 = E_T$$

$$E_y = (13100 + 2700) / 2 = 7900 = E_L$$

$$E_z = (1000 + 2700) / 2 = 1850 = E_R$$

Coefficients de Poisson ν (sans dimension)

$$\nu_{xy} = (0,02 + 0,3) / 2 = 0,16 = \nu_{TL}$$

$$\nu_{xz} = (0,4 + 0,3) / 2 = 0,35 = \nu_{TR}$$

$$\nu_{yz} = (0,4 + 0,3) / 2 = 0,35 = \nu_{LR}$$

Modules de Cisaillement G (en MPa)

$$G_{xy} = (800 + 1000) / 2 = 900 = G_{TL}$$

$$G_{xz} = (100 + 1000) / 2 = 550 = G_{TR}$$

$$G_{yz} = (800 + 1000) / 2 = 900 = G_{LR}$$

III-4 Détermination de la zone de déformation de l'assemblage

Cette étude a pour but de déterminer la zone où se produisent les variations de déformations les plus significatives et par conséquent de localiser la zone où l'endommagement se produit.

III-4-1 Zone d'application du dommage D

Nous allons appliquer une charge constante de 2000 Newtons qui représente la charge de rupture moyenne lors de la phase expérimentale des essais de traction cyclique. Nous ferons varier le pourcentage du dommage D de 0% à 100% avec un pas de 5% sur la structure modélisée.

La définition des matériaux sera, à chaque pas, modifiée suivant la formule ci-dessous :

$$E = E * (1 - D) \quad \text{(III-2)}$$

Nous extrayons les déplacements y'_1 et y'_2 respectivement des points particuliers n1 et n2 et nous ferons cette étude en modifiant la zone d'application du dommage D.

Nous appliquerons le dommage D sur les trois matériaux séparément :

- sur la zone 1 seule : la zone de la colle seule,
- sur la zone 2+3 seule : la zone bois+colle seule,
- sur la zone 4+5 seule : la zone du bois seule.

Puis, nous l'appliquerons en associant les différents matériaux :

- sur les zones 1 et 2+3 : la zone de la colle + bois+colle,
- sur les zones 1 et 2+3 et 4+5 : toute l'éprouvette.

III-4-2 Résultats sur la zone d'application du dommage

L'ensemble des résultats de la simulation numérique se trouve dans l'annexe 8. Avec un dommage D de 99%, nous obtenons les déformations ci-dessous qui sont classées dans l'ordre croissant :

Les matériaux pris séparément :

- $\epsilon = 0,397 \%$ sur la zone 1 seule : la colle seule,
- $\epsilon = 1,227 \%$ sur la zone 2+3 seule : l'élément bois+colle seul,
- $\epsilon = 17,975 \%$ sur la zone 4+5 seule : le bois seul,

Les matériaux associés :

- $\epsilon = 1,437 \%$ sur les zones 1 et 2+3 : la colle et bois+colle,
- $\epsilon = 19,753 \%$ sur les zones 1 et 2+3 et 4+5 : l'éprouvette entière.

La représentation graphique (voir la figure III-4 de la page suivante) montre l'évolution de la déformation ϵ suivant la zone d'application du dommage D pour une charge maximale constante de 2000 N.

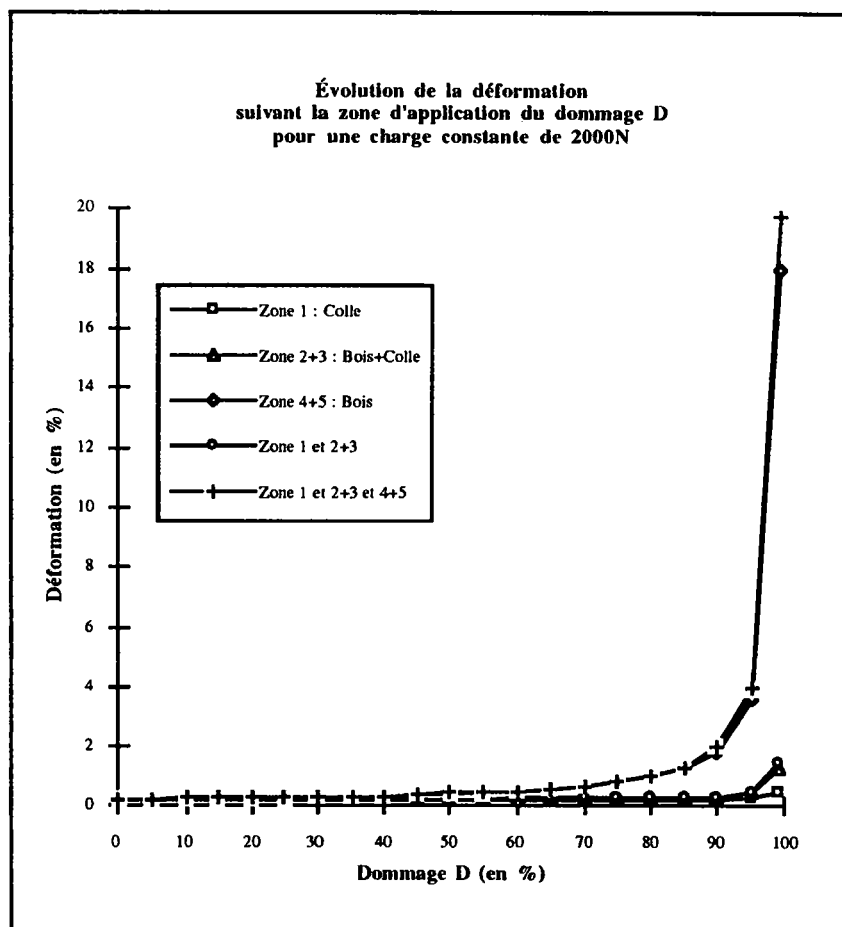


Figure III-4 : Courbe représentant l'évolution de la déformation ϵ en fonction du dommage D et de la zone d'application de ce dommage.

III-4-3 Conclusion sur la zone d'application du dommage

Les essais expérimentaux en traction cyclique nous ont permis de déterminer la déformation à rupture pour une charge moyenne de 2000 Newtons. Nous avons obtenu une déformation moyenne de 0,31% (voir II-5-6).

C'est donc le calcul avec l'endommagement sur la zone de la colle seule qui se rapproche le plus des résultats expérimentaux. On en déduit que c'est dans cette zone que l'endommagement a la plus grande probabilité de se produire.

Lors des essais expérimentaux en traction monotone, nous avons observé des ruptures mixtes c'est-à-dire que la rupture avait lieu à la fois dans le joint de colle et dans le bois. Mais lors des essais expérimentaux en traction cyclique, les ruptures étaient adhésives. On peut également noter que l'usinage en

biseau fragilise les pointes du biseau. Aussi lors de la rupture en traction monotone, le bois était arraché.

De cette étude sur la zone d'application du dommage, on retiendra que l'endommagement se produit principalement dans la zone 1 : colle seule.

III-5 Influence des différents paramètres a, b, c du modèle

De l'étude de traction cyclique (voir II-5-8-4), nous avons établi une fonction moyenne d'endommagement de la forme : $D(N) = 0,14 * \frac{N^{0,07}}{1 - N^{8,91}}$

À présent, nous allons étudier l'influence de ces trois paramètres sur la courbe charge-déformation. L'ensemble des calculs de la simulation numérique pour cette étude se trouve dans l'annexe 9.

Le principe est le suivant : on applique à l'éprouvette modélisée le modèle d'endommagement D(N) en faisant varier la charge de 0 N à 2200 N qui représente la charge de rupture lors des essais de traction monotone avec des éprouvettes biseautées à 60° dont la section utile est de 4 * 20 mm.

En effet, nous avons réalisé des essais de traction monotone (voir la partie II-4) à partir d'éprouvettes biseautées à 60° dont la section utile était de 8 * 20 mm. Or, les éprouvettes des essais cycliques avaient une section utile de 4 * 20 mm. Nous avons donc réalisé de nouveaux essais de traction monotone avec cette nouvelle section et nous avons obtenu un palier moyen de rupture de 2200 N et une déformation moyenne à rupture de 0,48%.

On notera également que la représentation graphique des courbes charge-déformation pour l'étude de ces trois paramètres sera donnée pour une charge comprise entre 1600 et 2200 N car aucune différence significative n'a été enregistrée pour une charge comprise entre 0 et 1600 N.

III-5-1 Influence du paramètre "a" du modèle d'endommagement

Nous faisons varier le paramètre "a" de 0,06 à 0,22 avec un pas de 0,04 sans modifier les autres paramètres du modèle (b=0,07 et c=8,91).

Plus le coefficient "a" augmente et plus la déformation à rupture augmente et la charge de rupture quant à elle diminue sensiblement (voir la figure III-5 de la page suivante). Ceci confirme la signification physique du paramètre "a" proposée à la page 104.

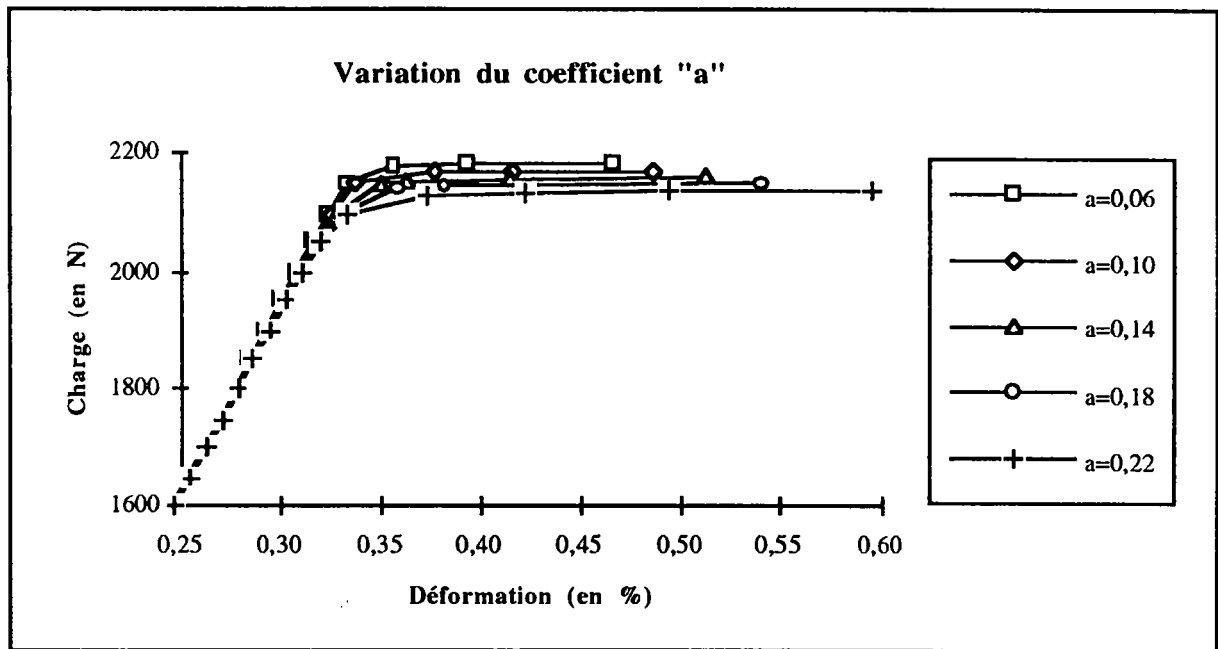


Figure III-5 : Influence du paramètre "a" sur l'évolution de la courbe charge-déformation.

III-5-2 Influence du paramètre "b" du modèle d'endommagement

Nous faisons varier le paramètre "b" de 0,0 à 0,2 avec un pas de 0,05 sans modifier les autres paramètres du modèle (a=0,14 et c=8,91).

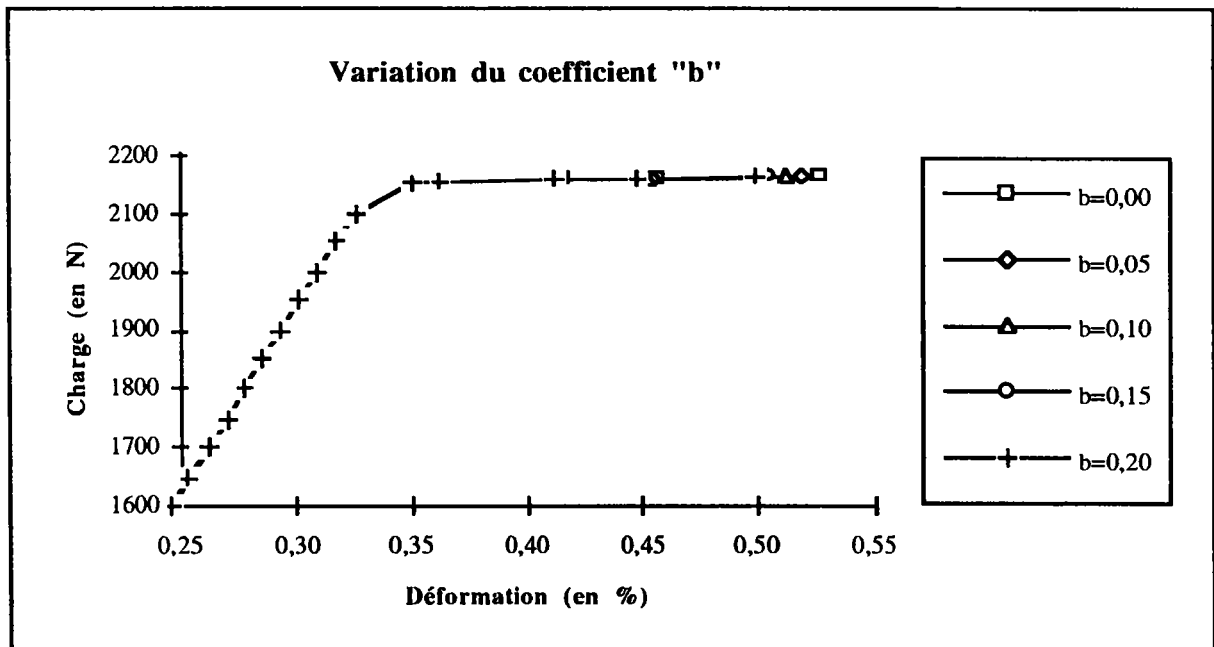


Figure III-6 : Influence du paramètre "b" sur l'évolution de la courbe charge-déformation.

Plus le coefficient "b" augmente et plus la déformation à rupture diminue sensiblement sans modifier pour autant la charge de rupture (voir la figure III-6 de la page précédente).

Le paramètre "b" a un rôle mineur dans ce modèle. Ce calcul ne confirme, ni n'infirme la signification physique proposée à la page 105.

III-5-3 Influence du paramètre "c" du modèle d'endommagement

Nous faisons varier le paramètre "c" de 3 à 11 avec un pas de 2 sans modifier les autres paramètres du modèle ($a=0,14$ et $b=0,07$).

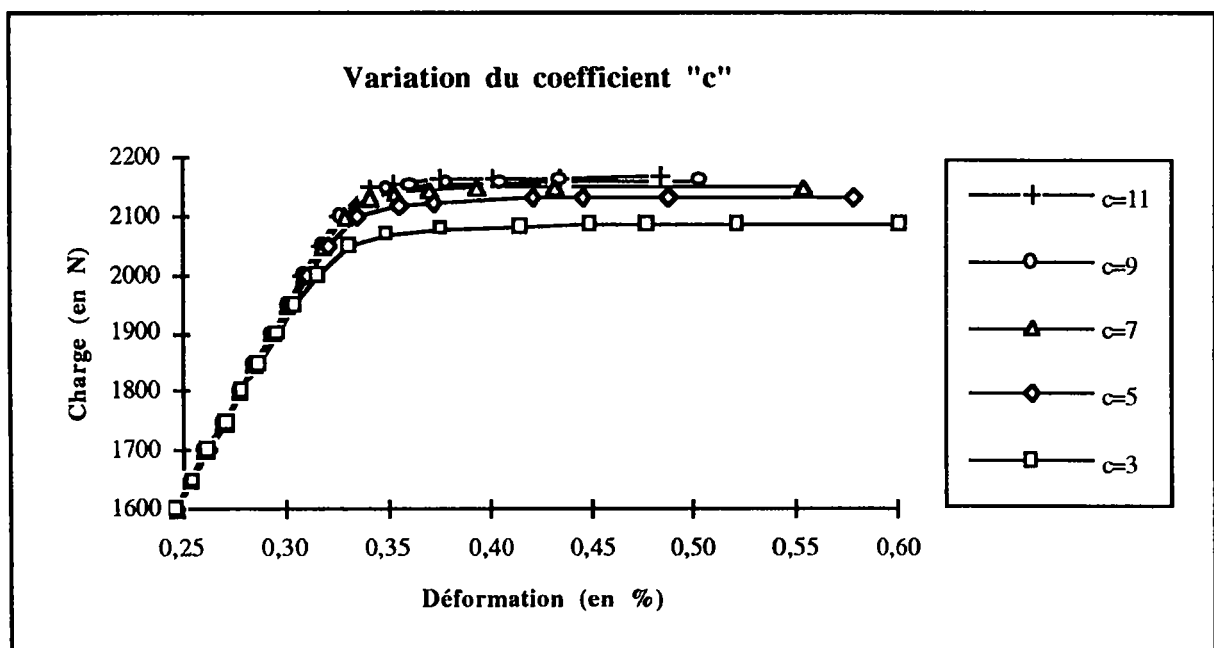


Figure III-7 : Influence du paramètre "c" sur l'évolution de la courbe charge-déformation.

Plus le coefficient "c" augmente et plus la déformation à rupture diminue et la charge de rupture quant à elle augmente (voir la figure III-7).

À partir d'une valeur $c=9$, on peut considérer que les différences sont insignifiantes. Ceci confirme la signification physique du paramètre "c" proposée à la page 106.

III-6 Simulation de l'endommagement pour la traction monotone

De l'étude de traction cyclique, nous avons établi une fonction moyenne d'endommagement : $D(N) = 0,14 * \frac{N^{0,07}}{1 - N^{8,91}}$

Nous allons appliquer cette loi d'endommagement dans le calcul par éléments finis au joint de colle.

III-6-1 Comparaison entre le modèle et l'expérimentation

L'ensemble des résultats des déformations obtenues par la simulation numérique est donné dans le tableau n°1 de l'annexe 9 pour les coefficients suivants : a=0,14 et b=0,07 et c=8,91.

La figure III-8 montre la comparaison entre le modèle d'endommagement et les essais de traction monotone.

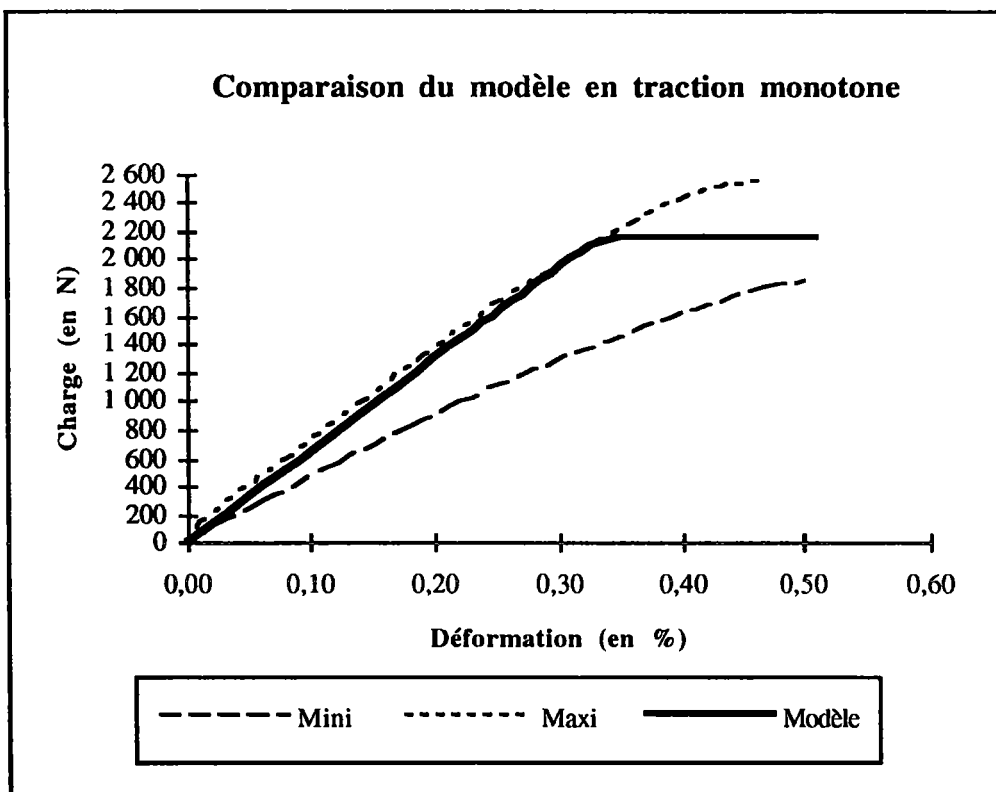


Figure III-8 : Comparaison entre le modèle et l'essai de traction monotone.

III-6-2 Conclusion sur la simulation numérique de la traction monotone

Le modèle proposé pour la traction monotone nous permet de visualiser le début de l'endommagement qui intervient juste après la partie élastique vers 2000 N (voir la figure III-8 de la page précédente).

Cependant, la position de ce modèle par rapport aux courbes mini et maxi est supérieure à la moyenne et proche de la courbe maxi.

Il est probable que le fait d'avoir utilisé un test cyclique pour prévoir un essai monotone est à l'origine de ce fait. On pourra tout de même remarquer que les résultats obtenus sont intéressants pour déterminer le début de l'endommagement d'un assemblage.

En effet, le bois est un matériau naturel et qui n'est pas homogène.

Une précision toutefois : le fait d'avoir fabriqué des éprouvettes sans défauts nous a permis de réduire considérablement les dispersions. Par contre, il y a sûrement des défauts de collage ou, au moins, une variabilité qui a sa source dans la façon de réaliser le collage.

III-7 Conclusion générale sur la simulation numérique

Nous pouvons conclure que le joint de colle est une zone très sensible dans un assemblage. Il convient de réaliser avec beaucoup de précaution l'opération de collage car on peut-être sûr que s'il y a un défaut à cet endroit, la rupture sera inévitable et rapide.

La modélisation a permis de définir avec précision par le calcul numérique par éléments finis que la zone d'endommagement était la zone de la colle. Auparavant, nous n'en étions pas certains car nombreux étaient les essais présentant une rupture mixte. Aussi nous avons été tentés de conclure que la rupture avait bien lieu dans la zone "bois+colle" également. Maintenant, nous sommes en mesure de dire que la rupture mixte est due essentiellement au fait que la pointe en biseau avec un angle aussi important que 60° est trop fragilisé. Par conséquent, au moment de la rupture brutale de l'assemblage, une partie du bois est inévitablement arrachée.

La comparaison des essais cycliques avec les essais monotones montre que les ruptures sont mixtes et adhésives pour les essais monotones, par contre elles sont adhésives pour les essais cycliques.

Cela met en évidence l'importance de cette zone pour la résistance des collages, la zone "bois+colle" concernée étant d'autant plus grande que la profondeur de pénétration de la colle dans le bois est plus grande.

La fonction $D(N) = 0,14 * \frac{N^{0,07}}{1 - N^{8,91}}$ nous permet de définir de façon significative l'endommagement supporté par l'assemblage. Dans notre étude, il apparaît à 80% de la charge de rupture. Cela offre donc la possibilité de définir un facteur de sécurité qui doit être égal à : $f_s = \frac{P_{\text{rupture}}}{P_{\text{max}}} = \frac{1}{0,8} = 1,25$ à condition de choisir comme charge admissible la limite de proportionnalité.

La courbure de la zone plastique du modèle proposé est beaucoup plus prononcée que la courbe relevée lors des essais mais elle montre assez bien la zone où l'endommagement débute.

CONCLUSION

CONCLUSION

L'endommagement du joint de colle est un point très particulier qui n'a été que très peu étudié. D'une certaine façon, on préfère étudier la résistance de l'assemblage dans son ensemble plutôt qu'un de ses éléments surtout lorsqu'il s'agit d'un élément d'une aussi faible épaisseur. Cette étude a essayé de définir une loi d'endommagement pour le joint de colle.

Après avoir vérifié que les constituants (bois et colle) qu'on utilise étaient conformes à leurs utilisations, et correspondaient bien aux valeurs relevées dans la bibliographie, nous nous sommes d'abord attachés à étudier l'évolution de l'assemblage biseauté en faisant varier l'angle d'aboutage. Ceci nous a permis de mettre en évidence plusieurs points importants.

La charge de rupture N augmente avec l'angle d'aboutage α ; par contre le déplacement normal δ_n entre les 2 surfaces de collage reste constant quelque soit l'angle d'aboutage.

Le faciès de rupture évolue en fonction de l'angle. De 0° à 45° , nous avons des ruptures adhésives et de 60° à 75° , ce sont des ruptures mixtes principalement. Il y a une certaine similitude avec les résultats concernant le mode de rupture.

De 0° à 45° , nous sommes en présence d'une rupture en traction où la contrainte normale σ_α gouverne ce mode de rupture. Au delà de 45° , il s'agit d'une rupture associant principalement le cisaillement et un peu la traction.

La rupture étant provoquée trop rapidement sur des essais de traction monotone bien qu'avec une vitesse minimale d'application de la charge, nous avons décidé de décrire l'endommagement à partir d'essais cycliques (charge-décharge). Le moyen de mesure des déformations du joint de colle (l'extensomètre couplé à l'ordinateur) des éprouvettes sollicitées, donnent accès après dépouillement à une loi d'endommagement. Le nombre conséquent d'éprouvettes permet un traitement statistique des résultats et permet également de donner une certaine confiance dans les résultats.

L'allure générale de la courbe du dommage D en fonction de la charge N est une "forme de S" qui comporte 3 parties distinctes :

- zone 1 : zone de faible étendue de 0 à 10% de la charge de rupture correspondant à la prise en compte de la première charge par l'assemblage,

Conclusion

- zone 2 : zone assez étendue allant de 10% à environ 80% de la charge de rupture où l'endommagement reste quasi constant,
- zone 3 : zone finale peu étendue où l'endommagement progresse très rapidement. Cette zone commence à environ 80% de la charge de rupture.

L'équation de l'endommagement D en fonction de la charge N est une fonction à 3 paramètres de la forme $D(N) = a * \frac{N^b}{1 - N^c}$ où la valeur a ($a=0,14$) traduit la valeur moyenne du palier, l'exposant b ($b=0,07$) traduit la pente initiale du palier et l'exposant c ($c=8,91$) traduit la vitesse de détérioration du joint de colle.

L'introduction de la loi d'endommagement $D(N) = 0,14 * \frac{N^{0,07}}{1 - N^{8,91}}$ dans la simulation numérique nous a permis de préciser la zone d'application du dommage. La zone principalement endommagée est le joint de colle. Notre simulation est acceptable car elle représente bien l'endommagement qui débute à 80% de la charge de rupture.

La différence de courbure entre la simulation numérique et les essais provient de la variabilité du bois mais aussi de l'hypothèse qui a été faite de la nature de la bois+colle, à savoir : un mélange 50/50 en volume entre le bois et la colle. Il faudrait étudier le rôle exact de cette zone dans l'assemblage biseauté ainsi que la proportion de ces constituants.

Cette différence peut également s'expliquer par le fait que la loi du joint de colle en traction monotone a été obtenue à partir d'essais cycliques sur des éprouvettes spécifiques et suivant un protocole d'essai précis. L'influence de la procédure et surtout des paliers de charge-décharge mérite d'être vérifiée.

Cette loi d'endommagement nous permet de déterminer le début de l'endommagement (80% de la charge de rupture) et de définir un facteur de sécurité $f_s = \frac{P_{rupture}}{P_{max}} = \frac{1}{0,8} = 1,25$ pour ce type d'assemblage.

La colle est à l'origine de la rupture de l'assemblage dans le cadre de notre étude, il serait nécessaire d'améliorer plus encore ses caractéristiques techniques soit en modifiant sa composition ou soit en lui ajoutant d'autres poudres par exemple. De cette manière, on arrivera à obtenir un produit à la fiabilité optimisée.

ANNEXES

PLAN DES ANNEXES

<u>Annexe n°1</u> :.....	127
Détermination du taux d'humidité.	
<u>Annexe n°2</u> :.....	128
Détermination de la masse volumique.	
<u>Annexe n°3</u> :.....	129
Détermination du module de Young.	
<u>Annexe n°4</u> :.....	130
Essais réalisés sur l'angle d'aboutage.	
<u>Annexe n°5</u> :.....	144
Essais de traction cyclique.	
<u>Annexe n°6</u> :.....	148
Déformations relevées pour l'éprouvette n°29.	
<u>Annexe n°7</u> :.....	149
Détermination des coefficients a, b, c.	
<u>Annexe n°8</u> :.....	149
Détermination de la zone d'application de l'endommagement.	
<u>Annexe n°9</u> :.....	152
Influence des paramètres a, b, c du modèle d'endommagement.	
<u>Annexe n°10</u> :.....	155
Listes des figures.	
<u>Annexe n°11</u> :.....	158
Listes des tableaux.	

Essais sur la détermination du taux d'humidité.

Echantillon n°	Masse Humide à 0 Heure (en g)	Masse Anhydre à 24 Heures (en g)	Humidité
			H% (en %)
1	20,32	18,21	11,6
2	20,53	18,38	11,7
3	20,02	18,02	11,1
4	20,16	17,94	12,4
5	20,84	18,63	11,9
6	20,76	18,57	11,8
7	20,59	18,54	11,1
8	20,42	18,17	12,4
9	20,61	18,49	11,5
10	20,94	18,59	12,6
11	20,03	18,07	10,8
12	20,20	18,01	12,2
13	20,48	18,23	12,3
14	20,72	18,40	12,6
15	20,85	18,71	11,4
16	20,80	18,68	11,3
17	20,36	18,38	10,8
18	20,64	18,67	10,6
19	20,57	18,41	11,7
20	20,52	18,52	10,8
21	20,20	17,99	12,3
22	20,12	17,93	12,2
23	20,26	18,21	11,3
24	20,33	18,19	11,8
25	20,18	18,03	11,9

Tableau 1 : Résultats complets pour la détermination du taux d'humidité.

	Masse Humide à 0 Heure (en g)	Masse Anhydre à 24 Heures (en g)	Humidité H% (en %)
Minimum	20,02	17,93	10,6
Maximum	20,94	18,71	12,6
Étendue	0,92	0,78	2,1
Moyenne	20,46	18,32	11,7
Écart-Type	0,27	0,26	0,6
C.V.	1,33%	1,40%	5,21%

Tableau 2 : Tableau récapitulatif pour la détermination du taux d'humidité.

Essais sur la détermination de la masse volumique.

Échantillon de la Planche n°	Longueur L (en mm)	Largeur b (en mm)	Épaisseur e (en mm)	Volume V (en cm ³)	Masse Humide à 0 heure (en g)	Densité à H%
						ρ (en g/cm ³)
1	25,2	74,8	25,1	47,31	20,32	0,430
2	25,1	75,2	25,2	47,57	20,53	0,430
3	25,2	74,5	24,8	46,56	20,02	0,430
4	24,7	75,0	25,2	46,68	20,16	0,430
5	24,8	75,1	25,0	46,56	20,84	0,450
6	25,2	75,4	24,7	46,93	20,76	0,440
7	25,0	74,6	24,6	45,88	20,59	0,450
8	25,1	75,3	24,6	46,49	20,42	0,440
9	24,9	74,8	24,8	46,19	20,61	0,445
10	25,0	74,9	24,8	46,44	20,94	0,450
11	24,9	74,9	24,7	46,07	20,03	0,435
12	25,2	74,9	24,7	46,62	20,20	0,435
13	25,1	74,7	25,0	46,87	20,48	0,435
14	24,9	74,7	25,3	47,06	20,72	0,440
15	25,2	75,1	25,2	47,69	20,85	0,435
16	24,8	74,6	24,9	46,07	20,80	0,450
17	25,1	74,9	25,2	47,38	20,36	0,430
18	25,0	75,1	24,7	46,37	20,64	0,445
19	24,9	74,5	24,9	46,19	20,57	0,445
20	25,1	74,9	25,0	47,00	20,52	0,435
21	25,2	75,0	24,5	46,31	20,20	0,435
22	25,1	74,8	25,4	47,69	20,12	0,420
23	24,9	75,3	24,8	46,50	20,26	0,435
24	24,8	75,5	25,0	46,81	20,33	0,435
25	25,2	75,2	24,8	47,00	20,18	0,430

Tableau 1 : Résultats complets pour la détermination de la masse volumique.

	Longueur L (en mm)	Largeur b (en mm)	Épaisseur e (en mm)	Volume V (en cm ³)	Masse Humide à 0 heure (en g)	Densité à H%
						ρ (en g/cm ³)
Minimum	24,7	74,5	24,5	45,88	20,02	0,420
Maximum	25,2	75,5	25,4	47,69	20,94	0,450
Étendue	0,5	1,0	0,9	1,81	0,92	0,030
Moyenne	25,0	74,9	24,9	46,73	20,46	0,440
Ecart-Type	0,16	0,27	0,24	0,52	0,27	0,008
C.V.	0,62%	0,37%	0,97%	1,10%	1,33%	1,818%

Tableau 2 : Tableau récapitulatif pour la détermination de la masse volumique.

Essais sur la détermination du Module de Young E.

Planche n°	Largeur b (en mm)	Épaisseur h (en mm)	Moment Quadratique $I=(b \cdot h^3)/12$ (en mm ⁴)	Flèche f (en mm)	Module de Young E longitudinal (en N/mm ²)	
					Calculé	Arrondi
1	74,7	25,3	100 809,37	6,61	9 814,66	9 800
2	75,3	24,8	95 712,52	6,11	11 183,24	11 200
3	74,7	25,0	97 265,63	4,54	14 810,25	14 800
4	75,0	25,2	100 018,80	5,32	12 290,92	12 300
5	74,8	25,1	98 569,26	5,92	11 207,65	11 200
7	74,8	25,4	102 146,03	4,08	15 692,64	15 700
8	74,9	24,8	95 204,09	4,59	14 966,13	15 000
8	75,0	24,5	91 913,28	5,10	13 951,77	14 000
9	75,2	24,8	95 585,42	5,56	12 305,84	12 300
10	75,0	24,7	94 182,64	4,79	14 496,77	14 500
11	74,5	24,9	95 845,80	4,43	15 402,85	15 400
12	74,9	24,7	94 057,07	5,54	12 550,95	12 600
13	74,8	24,8	95 076,98	5,51	12 483,91	12 500
14	74,6	24,6	92 547,12	4,81	14 691,62	14 700
15	75,2	25,2	100 285,52	6,67	9 777,18	9 800
16	75,1	25,0	97 786,46	5,80	11 531,11	11 500
17	75,5	25,0	98 307,29	4,85	13 716,72	13 700
18	74,9	24,7	94 057,07	4,87	14 277,67	14 300
19	74,5	24,8	94 695,66	5,32	12 981,83	13 000
20	75,1	25,2	100 152,16	6,14	10 635,28	10 600
21	75,3	24,6	93 415,52	4,16	16 829,27	16 800
22	74,9	25,2	99 885,44	6,89	9 502,90	9 500
23	75,4	24,7	94 684,95	5,38	12 838,51	12 800
24	74,6	24,9	95 974,45	4,31	15 810,47	15 800
25	74,9	25,0	97 526,04	5,27	12 724,67	12 700

Tableau 1 : Résultats complets pour la détermination du module E longitudinal.

	Largeur b (en mm)	Épaisseur h (en mm)	Moment Quadratique $I=(b \cdot h^3)/12$ (en mm ⁴)	Flèche f (en mm)	Module de Young E longitudinal (en N/mm ²)	
					Calculé	Arrondi
Minimum	74,50	24,50	91 913,28	4,08	9 502,90	9 500,00
Maximum	75,50	25,40	102 146,03	6,89	16 829,27	16 800,00
Étendue	1,00	0,90	10 232,75	2,81	7 326,37	7 300,00
Moyenne	74,94	24,92	96 628,18	5,30	13 058,99	13 060,00
Ecart-Type	0,27	0,24	2 800,96	0,79	2 034,86	2 036,54
C.V.	0,36%	0,97%	2,90%	14,82%	15,58%	15,59%

Tableau 2 : Tableau récapitulatif pour la détermination du module E longitudinal.

Résultats des essais de rupture sur l'angle d'aboutage à 0°.

0° Éprouvette n°	Largeur Section b (en mm)	Épaisseur Section e (en mm)	Surface de Collage Sc (en mm ²)	Section Initiale Si (en mm ²)	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en N/mm ²)	Déplacement à Rupture δ (en mm)
1	20,1	8,0	160,80	160,80	883	5,49	0,11
2	20,0	8,0	160,00	160,00	828	5,18	0,09
3	20,0	8,0	160,00	160,00	783	4,89	0,07
4	20,1	8,0	160,80	160,80	914	5,68	0,12
5	20,0	7,9	158,00	158,00	944	5,97	0,13
6	19,9	8,1	161,19	161,19	1001	6,21	0,15
7	19,9	8,0	159,20	159,20	993	6,24	0,15
8	20,0	8,0	160,00	160,00	926	5,79	0,12
9	20,0	8,1	162,00	162,00	666	4,11	0,03
10	20,1	8,0	160,80	160,80	712	4,43	0,05
11	20,0	8,0	160,00	160,00	795	4,97	0,08
12	20,0	8,0	160,00	160,00	958	5,99	0,13
13	20,0	8,0	160,00	160,00	812	5,08	0,08
14	19,9	8,0	159,20	159,20	965	6,06	0,14
15	20,0	8,0	160,00	160,00	897	5,61	0,11
16	19,9	7,9	157,21	157,21	900	5,72	0,11
17	20,0	8,0	160,00	160,00	1055	6,59	0,17
18	20,1	8,0	160,80	160,80	1012	6,29	0,15
19	20,0	8,0	160,00	160,00	865	5,41	0,10
20	20,0	8,1	162,00	162,00	689	4,25	0,04

Tableau 1 : Récapitulatif des essais de rupture sur l'angle d'aboutage de 0°.

Angle 0°	Largeur Section b (en mm)	Épaisseur Section e (en mm)	Surface de Collage Sc (en mm ²)	Section Initiale Si (en mm ²)	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en N/mm ²)	Déplacement à Rupture δ (en mm)
Minimum	19,9	7,9	157,21	157,21	666,00	4,11	0,03
Maximum	20,1	8,1	162,00	162,00	1 055,00	6,59	0,17
Étendue	0,2	0,2	4,79	4,79	389,00	2,48	0,14
Moyenne	20,0	8,0	160,10	160,10	879,90	5,50	0,11
Écart-Type	0,06	0,05	1,14	1,14	110,39	0,70	0,04
C.V.	0,32%	0,64%	0,71%	0,71%	12,55%	12,80%	36,59%

Tableau 2 : Synthèse des essais de rupture sur l'angle d'aboutage de 0°.

Résultats des essais de rupture sur l'angle d'aboutage à 0° (suite).

0° Éprouvette n°	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en MPa)	Déplacement Axial δ (en mm)	Déplacement Normal δ_n (en mm)	Contrainte Normale σ_α (en MPa)	Cission τ_α (en MPa)
1	883	5,49	0,11	0,11	5,49	0,00
2	828	5,18	0,09	0,09	5,18	0,00
3	783	4,89	0,07	0,07	4,89	0,00
4	914	5,68	0,12	0,12	5,68	0,00
5	944	5,97	0,13	0,13	5,97	0,00
6	1 001	6,21	0,15	0,15	6,21	0,00
7	993	6,24	0,15	0,15	6,24	0,00
8	926	5,79	0,12	0,12	5,79	0,00
9	666	4,11	0,03	0,03	4,11	0,00
10	712	4,43	0,05	0,05	4,43	0,00
11	795	4,97	0,08	0,08	4,97	0,00
12	958	5,99	0,13	0,13	5,99	0,00
13	812	5,08	0,08	0,08	5,08	0,00
14	965	6,06	0,14	0,14	6,06	0,00
15	897	5,61	0,11	0,11	5,61	0,00
16	900	5,72	0,11	0,11	5,72	0,00
17	1 055	6,59	0,17	0,17	6,59	0,00
18	1 012	6,29	0,15	0,15	6,29	0,00
19	865	5,41	0,10	0,10	5,41	0,00
20	689	4,25	0,04	0,04	4,25	0,00

Tableau 3 : Récapitulatif des calculs sur l'angle d'aboutage de 0°.

Angle 0°	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en MPa)	Déplacement Axial δ (en mm)	Déplacement Normal δ_n (en mm)	Contrainte Normale σ_α (en MPa)	Cission τ_α (en MPa)
Minimum	666,00	4,11	0,03	0,03	4,11	0,00
Maximum	1 055,00	6,59	0,17	0,17	6,59	0,00
Étendue	389,00	2,48	0,14	0,14	2,48	0,00
Moyenne	879,90	5,50	0,11	0,11	5,50	0,00
Écart-Type	110,39	0,70	0,04	0,04	0,70	0,00
C.V.	12,55%	12,80%	36,59%	36,59%	12,80%	-

Tableau 4 : Synthèse des calculs sur l'angle d'aboutage de 0°.

Résultats des essais de rupture sur l'angle d'aboutage à 15°.

15° Éprouvette n°	Largeur Section b (en mm)	Épaisseur Section e (en mm)	Surface de Collage Sc (en mm ²)	Section Initiale Si (en mm ²)	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en N/mm ²)	Déplacement à Rupture δ (en mm)
1	20,0	8,1	167,71	162,00	1440	8,89	0,27
2	20,1	7,9	164,39	158,79	1265	7,97	0,23
3	20,0	8,0	165,64	160,00	1126	7,04	0,19
4	20,0	7,9	163,57	158,00	998	6,32	0,16
5	20,0	8,0	165,64	160,00	1073	6,71	0,18
6	20,0	8,0	165,64	160,00	978	6,11	0,16
7	20,0	8,1	167,71	162,00	1505	9,29	0,28
8	20,2	8,0	167,30	161,60	1285	7,95	0,23
9	20,0	8,1	167,71	162,00	1575	9,72	0,30
10	20,0	7,9	163,57	158,00	1087	6,88	0,19
11	20,0	8,0	165,64	160,00	1510	9,44	0,28
12	19,9	8,1	166,88	161,19	1052	6,53	0,18
13	20,0	8,0	165,64	160,00	1457	9,11	0,27
14	19,9	8,0	164,82	159,20	1246	7,83	0,22
15	20,0	8,1	167,71	162,00	989	6,10	0,16
16	19,9	8,0	164,82	159,20	1518	9,54	0,29
17	20,1	8,0	166,47	160,80	1149	7,15	0,20
18	20,0	7,9	163,57	158,00	1267	8,02	0,23
19	20,0	8,0	165,64	160,00	1484	9,28	0,28
20	19,9	8,1	166,88	161,19	1342	8,33	0,25

Tableau 5 : Récapitulatif des essais de rupture sur l'angle d'aboutage de 15°.

Angle 15°	Largeur Section b (en mm)	Épaisseur Section e (en mm)	Surface de Collage Sc (en mm ²)	Section Initiale Si (en mm ²)	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en N/mm ²)	Déplacement à Rupture δ (en mm)
Minimum	19,9	7,9	163,57	158,00	978,00	6,10	0,16
Maximum	20,2	8,1	167,71	162,00	1 575,00	9,72	0,30
Étendue	0,3	0,2	4,14	4,00	597,00	3,62	0,14
Moyenne	20,0	8,0	165,85	160,20	1 267,30	7,91	0,23
Écart-Type	0,07	0,07	1,42	1,38	202,13	1,24	0,05
C.V.	0,36%	0,90%	0,86%	0,86%	15,95%	15,73%	21,00%

Tableau 6 : Synthèse des essais de rupture sur l'angle d'aboutage de 15°.

Résultats des essais de rupture sur l'angle d'aboutage à 15° (suite).

15° Éprouvette n°	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en MPa)	Déplacement Axial δ (en mm)	Déplacement Normal δ_n (en mm)	Contrainte Normale σ_α (en MPa)	Cission τ_α (en MPa)
1	1 440	8,89	0,27	0,26	8,29	2,22
2	1 265	7,97	0,23	0,22	7,43	1,99
3	1 126	7,04	0,19	0,18	6,57	1,76
4	998	6,32	0,16	0,15	5,89	1,58
5	1 073	6,71	0,18	0,17	6,26	1,68
6	978	6,11	0,16	0,15	5,70	1,53
7	1 505	9,29	0,28	0,27	8,67	2,32
8	1 285	7,95	0,23	0,22	7,42	1,99
9	1 575	9,72	0,30	0,29	9,07	2,43
10	1 087	6,88	0,19	0,18	6,42	1,72
11	1 510	9,44	0,28	0,27	8,81	2,36
12	1 052	6,53	0,18	0,17	6,09	1,63
13	1 457	9,11	0,27	0,26	8,50	2,28
14	1 246	7,83	0,22	0,21	7,30	1,96
15	989	6,10	0,16	0,15	5,70	1,53
16	1 518	9,54	0,29	0,28	8,90	2,38
17	1 149	7,15	0,20	0,19	6,67	1,79
18	1 267	8,02	0,23	0,22	7,48	2,00
19	1 484	9,28	0,28	0,27	8,65	2,32
20	1 342	8,33	0,25	0,24	7,77	2,08

Tableau 7 : Récapitulatif des calculs sur l'angle d'aboutage de 15°.

Angle 15°	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en MPa)	Déplacement Axial δ (en mm)	Déplacement Normal δ_n (en mm)	Contrainte Normale σ_α (en MPa)	Cission τ_α (en MPa)
Minimum	978,00	6,10	0,16	0,15	5,70	1,53
Maximum	1 575,00	9,72	0,30	0,29	9,07	2,43
Étendue	597,00	3,62	0,14	0,14	3,37	0,90
Moyenne	1 267,30	7,91	0,23	0,22	7,38	1,98
Écart-Type	202,13	1,24	0,05	0,05	1,16	0,31
C.V.	15,95%	15,73%	21,00%	21,00%	15,73%	15,73%

Tableau 8 : Synthèse des calculs sur l'angle d'aboutage de 15°.

Résultats des essais de rupture sur l'angle d'aboutage à 30°.

30° Éprouvette n°	Largeur Section b (en mm)	Épaisseur Section e (en mm)	Surface de Collage Sc (en mm ²)	Section Initiale Si (en mm ²)	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en N/mm ²)	Déplacement à Rupture δ (en mm)
1	20,0	8,0	184,75	160,00	1369	8,56	0,24
2	20,0	8,1	187,06	162,00	1679	10,36	0,33
3	20,0	8,0	184,75	160,00	1700	10,63	0,33
4	20,2	8,1	188,93	163,62	1182	7,22	0,19
5	20,0	8,0	184,75	160,00	1321	8,26	0,23
6	20,0	8,1	187,06	162,00	1908	11,78	0,39
7	19,9	8,0	183,83	159,20	1314	8,25	0,23
8	20,0	8,0	184,75	160,00	1729	10,81	0,34
9	20,1	8,0	185,68	160,80	1303	8,10	0,22
10	20,0	7,9	182,44	158,00	1770	11,20	0,35
11	20,1	8,0	185,68	160,80	1944	12,09	0,40
12	20,0	8,0	184,75	160,00	1843	11,52	0,37
13	20,0	8,0	184,75	160,00	1282	8,01	0,22
14	20,0	8,0	184,75	160,00	1563	9,77	0,30
15	20,0	8,0	184,75	160,00	1448	9,05	0,26
16	20,1	8,1	188,00	162,81	1693	10,40	0,33
17	20,0	8,0	184,75	160,00	1189	7,43	0,19
18	20,1	8,0	185,68	160,80	1800	11,19	0,36
19	20,0	8,0	184,75	160,00	1235	7,72	0,20
20	20,0	7,9	182,44	158,00	1544	9,77	0,29

Tableau 9 : Récapitulatif des essais de rupture sur l'angle d'aboutage de 30°.

Angle 30°	Largeur Section b (en mm)	Épaisseur Section e (en mm)	Surface de Collage Sc (en mm ²)	Section Initiale Si (en mm ²)	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en N/mm ²)	Déplacement à Rupture δ (en mm)
Minimum	19,9	7,9	182,44	158,00	1 182,00	7,22	0,19
Maximum	20,2	8,1	188,93	163,62	1 944,00	12,09	0,40
Étendue	0,3	0,2	6,49	5,62	762,00	4,87	0,21
Moyenne	20,0	8,0	185,22	160,40	1 540,80	9,61	0,29
Écart-Type	0,06	0,06	1,60	1,38	253,34	1,58	0,07
C.V.	0,32%	0,69%	0,86%	0,86%	16,44%	16,40%	24,23%

Tableau 10 : Synthèse des essais de rupture sur l'angle d'aboutage de 30°.

Résultats des essais de rupture sur l'angle d'aboutage à 30° (suite).

30° Éprouvette n°	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en MPa)	Déplacement Axial δ (en mm)	Déplacement Normal δ_n (en mm)	Contrainte Normale σ_α (en MPa)	Cission τ_α (en MPa)
1	1 369	8,56	0,24	0,21	6,42	3,70
2	1 679	10,36	0,33	0,29	7,77	4,49
3	1 700	10,63	0,33	0,29	7,97	4,60
4	1 182	7,22	0,19	0,16	5,42	3,13
5	1 321	8,26	0,23	0,20	6,19	3,58
6	1 908	11,78	0,39	0,34	8,83	5,10
7	1 314	8,25	0,23	0,20	6,19	3,57
8	1 729	10,81	0,34	0,29	8,10	4,68
9	1 303	8,10	0,22	0,19	6,08	3,51
10	1 770	11,20	0,35	0,30	8,40	4,85
11	1 944	12,09	0,40	0,35	9,07	5,23
12	1 843	11,52	0,37	0,32	8,64	4,99
13	1 282	8,01	0,22	0,19	6,01	3,47
14	1 563	9,77	0,30	0,26	7,33	4,23
15	1 448	9,05	0,26	0,23	6,79	3,92
16	1 693	10,40	0,33	0,29	7,80	4,50
17	1 189	7,43	0,19	0,16	5,57	3,22
18	1 800	11,19	0,36	0,31	8,40	4,85
19	1 235	7,72	0,20	0,17	5,79	3,34
20	1 544	9,77	0,29	0,25	7,33	4,23

Tableau 11 : Récapitulatif des calculs sur l'angle d'aboutage de 30°.

Angle 30°	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en MPa)	Déplacement Axial δ (en mm)	Déplacement Normal δ_n (en mm)	Contrainte Normale σ_α (en MPa)	Cission τ_α (en MPa)
Minimum	1 182,00	7,22	0,19	0,16	5,42	3,13
Maximum	1 944,00	12,09	0,40	0,35	9,07	5,23
Étendue	762,00	4,87	0,21	0,18	3,65	2,11
Moyenne	1 540,80	9,61	0,29	0,25	7,20	4,16
Écart-Type	253,34	1,58	0,07	0,06	1,18	0,68
C.V.	16,44%	16,40%	24,23%	24,23%	16,40%	16,40%

Tableau 12 : Synthèse des calculs sur l'angle d'aboutage de 30°.

Résultats des essais de rupture sur l'angle d'aboutage à 45°.

45° Éprouvette n°	Largeur Section b (en mm)	Épaisseur Section e (en mm)	Surface de Collage Sc (en mm ²)	Section Initiale Si (en mm ²)	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en N/mm ²)	Déplacement à Rupture δ (en mm)
1	20,1	8,0	227,41	160,80	2271	14,12	0,43
2	20,0	8,0	226,27	160,00	1683	10,52	0,27
3	20,0	8,0	226,27	160,00	1759	10,99	0,29
4	20,0	8,0	226,27	160,00	1973	12,33	0,35
5	20,0	8,1	229,10	162,00	2342	14,46	0,45
6	20,2	8,0	228,54	161,60	2615	16,18	0,53
7	20,0	7,9	223,45	158,00	1769	11,20	0,29
8	20,0	8,0	226,27	160,00	1968	12,30	0,35
9	19,9	8,0	225,14	159,20	1616	10,15	0,25
10	20,0	8,0	226,27	160,00	2233	13,96	0,42
11	20,0	8,0	226,27	160,00	1653	10,33	0,26
12	20,0	8,0	226,27	160,00	1829	11,43	0,31
13	20,0	8,0	226,27	160,00	2413	15,08	0,47
14	19,9	8,1	227,96	161,19	2107	13,07	0,39
15	20,0	8,0	226,27	160,00	2457	15,36	0,49
16	20,0	8,0	226,27	160,00	1736	10,85	0,28
17	20,0	8,0	226,27	160,00	2083	13,02	0,38
18	20,2	8,0	228,54	161,60	2280	14,11	0,44
19	20,0	8,1	229,10	162,00	1644	10,15	0,26
20	20,0	8,0	226,27	160,00	2517	15,73	0,50

Tableau 13 : Récapitulatif des essais de rupture sur l'angle d'aboutage de 45°.

Angle 45°	Largeur Section b (en mm)	Épaisseur Section e (en mm)	Surface de Collage Sc (en mm ²)	Section Initiale Si (en mm ²)	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en N/mm ²)	Déplacement à Rupture δ (en mm)
Minimum	19,9	7,9	223,45	158,00	1 616,00	10,15	0,25
Maximum	20,2	8,1	229,10	162,00	2 615,00	16,18	0,53
Étendue	0,3	0,2	5,66	4,00	999,00	6,03	0,28
Moyenne	20,0	8,0	226,73	160,32	2 047,40	12,77	0,37
Écart-Type	0,07	0,04	1,37	0,97	326,76	2,01	0,09
C.V.	0,37%	0,56%	0,60%	0,60%	15,96%	15,74%	24,67%

Tableau 14 : Synthèse des essais de rupture sur l'angle d'aboutage de 45°.

Résultats des essais de rupture sur l'angle d'aboutage à 45° (suite).

45° Éprouvette n°	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en MPa)	Déplacement Axial δ (en mm)	Déplacement Normal δ_n (en mm)	Contrainte Normale σ_α (en MPa)	Cission τ_α (en MPa)
1	2 271	14,12	0,43	0,30	7,06	7,06
2	1 683	10,52	0,27	0,19	5,26	5,26
3	1 759	10,99	0,29	0,21	5,50	5,50
4	1 973	12,33	0,35	0,25	6,17	6,17
5	2 342	14,46	0,45	0,32	7,23	7,23
6	2 615	16,18	0,53	0,37	8,09	8,09
7	1 769	11,20	0,29	0,21	5,60	5,60
8	1 968	12,30	0,35	0,25	6,15	6,15
9	1 616	10,15	0,25	0,18	5,08	5,08
10	2 233	13,96	0,42	0,30	6,98	6,98
11	1 653	10,33	0,26	0,18	5,17	5,17
12	1 829	11,43	0,31	0,22	5,72	5,72
13	2 413	15,08	0,47	0,33	7,54	7,54
14	2 107	13,07	0,39	0,28	6,54	6,54
15	2 457	15,36	0,49	0,35	7,68	7,68
16	1 736	10,85	0,28	0,20	5,43	5,43
17	2 083	13,02	0,38	0,27	6,51	6,51
18	2 280	14,11	0,44	0,31	7,05	7,05
19	1 644	10,15	0,26	0,18	5,07	5,07
20	2 517	15,73	0,50	0,35	7,87	7,87

Tableau 15 : Récapitulatif des calculs sur l'angle d'aboutage de 45°.

Angle 45°	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en MPa)	Déplacement Axial δ (en mm)	Déplacement Normal δ_n (en mm)	Contrainte Normale σ_α (en MPa)	Cission τ_α (en MPa)
Minimum	1 616,00	10,15	0,25	0,18	5,07	5,07
Maximum	2 615,00	16,18	0,53	0,37	8,09	8,09
Étendue	999,00	6,03	0,28	0,20	3,02	3,02
Moyenne	2 047,40	12,77	0,37	0,26	6,38	6,38
Écart-Type	326,76	2,01	0,09	0,06	1,00	1,00
C.V.	15,96%	15,74%	24,67%	24,67%	15,74%	15,74%

Tableau 16 : Synthèse des calculs sur l'angle d'aboutage de 45°.

Résultats des essais de rupture sur l'angle d'aboutage à 60°.

60° Éprouvette n°	Largeur Section b (en mm)	Épaisseur Section e (en mm)	Surface de Collage Sc (en mm ²)	Section Initiale Si (en mm ²)	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en N/mm ²)	Déplacement à Rupture δ (en mm)
1	20,0	8,0	320,00	160,00	3124	19,53	0,60
2	20,1	7,9	317,58	158,79	3583	22,56	0,74
3	20,0	8,0	320,00	160,00	2591	16,19	0,43
4	20,2	8,0	323,20	161,60	2710	16,77	0,46
5	20,0	8,0	320,00	160,00	2693	16,83	0,46
6	20,1	8,0	321,60	160,80	3492	21,72	0,71
7	20,0	8,0	320,00	160,00	2541	15,88	0,41
8	20,0	8,0	320,00	160,00	3619	22,62	0,75
9	20,0	8,1	324,00	162,00	2734	16,88	0,47
10	20,0	8,0	320,00	160,00	2855	17,84	0,51
11	19,9	8,0	318,40	159,20	3238	20,34	0,63
12	20,0	8,0	320,00	160,00	3368	21,05	0,67
13	20,0	8,0	320,00	160,00	3013	18,83	0,56
14	20,0	8,0	320,00	160,00	3647	22,79	0,76
15	20,0	8,1	324,00	162,00	2561	15,81	0,42
16	19,9	8,0	318,40	159,20	3155	19,82	0,61
17	20,0	8,0	320,00	160,00	3766	23,54	0,80
18	20,1	8,0	321,60	160,80	2837	17,64	0,50
19	20,0	7,9	316,00	158,00	2731	17,28	0,47
20	20,0	8,0	320,00	160,00	3478	21,74	0,71

Tableau 17 : Récapitulatif des essais de rupture sur l'angle d'aboutage de 60°.

Angle 60°	Largeur Section b (en mm)	Épaisseur Section e (en mm)	Surface de Collage Sc (en mm ²)	Section Initiale Si (en mm ²)	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en N/mm ²)	Déplacement à Rupture δ (en mm)
Minimum	19,9	7,9	316,00	158,00	2 541,00	15,81	0,41
Maximum	20,2	8,1	324,00	162,00	3 766,00	23,54	0,80
Étendue	0,3	0,2	8,00	4,00	1 225,00	7,73	0,39
Moyenne	20,0	8,0	320,24	160,12	3 086,80	19,28	0,58
Écart-Type	0,07	0,05	1,96	0,98	411,65	2,61	0,13
C. V.	0,34%	0,57%	0,61%	0,61%	13,34%	13,52%	22,33%

Tableau 18 : Synthèse des essais de rupture sur l'angle d'aboutage de 60°.

Résultats des essais de rupture sur l'angle d'aboutage à 60° (suite).

60° Éprouvette n°	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en MPa)	Déplacement Axial δ (en mm)	Déplacement Normal δ_n (en mm)	Contrainte Normale σ_α (en MPa)	Cission τ_α (en MPa)
1	3 124	19,53	0,60	0,30	4,88	8,45
2	3 583	22,56	0,74	0,37	5,64	9,77
3	2 591	16,19	0,43	0,22	4,05	7,01
4	2 710	16,77	0,46	0,23	4,19	7,26
5	2 693	16,83	0,46	0,23	4,21	7,29
6	3 492	21,72	0,71	0,36	5,43	9,40
7	2 541	15,88	0,41	0,21	3,97	6,88
8	3 619	22,62	0,75	0,38	5,65	9,79
9	2 734	16,88	0,47	0,24	4,22	7,31
10	2 855	17,84	0,51	0,26	4,46	7,73
11	3 238	20,34	0,63	0,32	5,08	8,81
12	3 368	21,05	0,67	0,34	5,26	9,11
13	3 013	18,83	0,56	0,28	4,71	8,15
14	3 647	22,79	0,76	0,38	5,70	9,87
15	2 561	15,81	0,42	0,21	3,95	6,85
16	3 155	19,82	0,61	0,31	4,95	8,58
17	3 766	23,54	0,80	0,40	5,88	10,19
18	2 837	17,64	0,50	0,25	4,41	7,64
19	2 731	17,28	0,47	0,24	4,32	7,48
20	3 478	21,74	0,71	0,36	5,43	9,41

Tableau 19 : Récapitulatif des calculs sur l'angle d'aboutage de 60°.

Angle 60°	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en MPa)	Déplacement Axial δ (en mm)	Déplacement Normal δ_n (en mm)	Contrainte Normale σ_α (en MPa)	Cission τ_α (en MPa)
Minimum	2 541,00	15,81	0,41	0,21	3,95	6,85
Maximum	3 766,00	23,54	0,80	0,40	5,88	10,19
Étendue	1 225,00	7,73	0,39	0,20	1,93	3,35
Moyenne	3 086,80	19,28	0,58	0,29	4,82	8,35
Écart-Type	411,65	2,61	0,13	0,07	0,65	1,13
C.V.	13,34%	13,52%	22,33%	22,33%	13,52%	13,52%

Tableau 20 : Synthèse des calculs sur l'angle d'aboutage de 60°.

Résultats des essais de rupture sur l'angle d'aboutage à 75°.

75° Éprouvette n°	Largeur Section b (en mm)	Épaisseur Section e (en mm)	Surface de Collage Sc (en mm ²)	Section Initiale Si (en mm ²)	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en N/mm ²)	Déplacement à Rupture δ (en mm)
1	20,0	8,0	618,19	160,00	5693	35,58	0,97
2	20,0	8,0	618,19	160,00	6805	42,53	1,18
3	20,0	8,1	625,92	162,00	6288	38,81	1,08
4	19,9	8,0	615,10	159,20	7679	48,23	1,35
5	20,0	8,0	618,19	160,00	6605	41,28	1,14
6	20,0	7,9	610,47	158,00	6795	43,01	1,18
7	19,9	8,0	615,10	159,20	7384	46,38	1,29
8	20,0	8,0	618,19	160,00	5975	37,34	1,02
9	20,1	8,0	621,28	160,80	6769	42,10	1,18
10	20,0	8,0	618,19	160,00	7910	49,44	1,39
11	20,0	8,1	625,92	162,00	5730	35,37	0,98
12	19,9	8,0	615,10	159,20	7530	47,30	1,32
13	20,2	8,0	624,37	161,60	7642	47,29	1,34
14	20,0	8,0	618,19	160,00	7147	44,67	1,25
15	20,0	8,0	618,19	160,00	7084	44,28	1,24
16	20,0	8,0	618,19	160,00	6645	41,53	1,15
17	20,1	8,1	629,05	162,81	6332	38,89	1,09
18	20,0	8,0	618,19	160,00	6123	38,27	1,05
19	20,0	8,0	618,19	160,00	7945	49,66	1,40
20	20,0	7,9	610,47	158,00	7608	48,15	1,34

Tableau 21 : Récapitulatif des essais de rupture sur l'angle d'aboutage de 75°.

Angle 75°	Largeur Section b (en mm)	Épaisseur Section e (en mm)	Surface de Collage Sc (en mm ²)	Section Initiale Si (en mm ²)	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en N/mm ²)	Déplacement à Rupture δ (en mm)
Minimum	19,9	7,9	610,47	158,00	5 693,00	35,37	0,97
Maximum	20,2	8,1	629,05	162,81	7 945,00	49,66	1,40
Étendue	0,3	0,2	18,58	4,81	2 252,00	14,29	0,43
Moyenne	20,0	8,0	618,74	160,14	6 884,45	43,01	1,20
Écart-Type	0,07	0,05	4,74	1,23	713,17	4,59	0,14
C.V.	0,34%	0,64%	0,77%	0,77%	10,36%	10,68%	11,41%

Tableau 22 : Synthèse des essais de rupture sur l'angle d'aboutage de 75°.

Résultats des essais de rupture sur l'angle d'aboutage à 75° (suite).

75° Éprouvette n°	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en MPa)	Déplacement Axial δ (en mm)	Déplacement Normal δ_n (en mm)	Contrainte Normale σ_α (en MPa)	Cission τ_α (en MPa)
1	5 693	35,58	0,97	0,25	2,38	8,90
2	6 805	42,53	1,18	0,31	2,85	10,63
3	6 288	38,81	1,08	0,28	2,60	9,70
4	7 679	48,23	1,35	0,35	3,23	12,06
5	6 605	41,28	1,14	0,30	2,77	10,32
6	6 795	43,01	1,18	0,31	2,88	10,75
7	7 384	46,38	1,29	0,33	3,11	11,60
8	5 975	37,34	1,02	0,26	2,50	9,34
9	6 769	42,10	1,18	0,31	2,82	10,52
10	7 910	49,44	1,39	0,36	3,31	12,36
11	5 730	35,37	0,98	0,25	2,37	8,84
12	7 530	47,30	1,32	0,34	3,17	11,82
13	7 642	47,29	1,34	0,35	3,17	11,82
14	7 147	44,67	1,25	0,32	2,99	11,17
15	7 084	44,28	1,24	0,32	2,97	11,07
16	6 645	41,53	1,15	0,30	2,78	10,38
17	6 332	38,89	1,09	0,28	2,61	9,72
18	6 123	38,27	1,05	0,27	2,56	9,57
19	7 945	49,66	1,40	0,36	3,33	12,41
20	7 608	48,15	1,34	0,35	3,23	12,04

Tableau 23 : Récapitulatif des calculs sur l'angle d'aboutage de 75°.

Angle 75°	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en MPa)	Déplacement Axial δ (en mm)	Déplacement Normal δ_n (en mm)	Contrainte Normale σ_α (en MPa)	Cission τ_α (en MPa)
Minimum	5 693,00	35,37	0,97	0,25	2,37	8,84
Maximum	7 945,00	49,66	1,40	0,36	3,33	12,41
Étendue	2 252,00	14,29	0,43	0,11	0,96	3,57
Moyenne	6 884,45	43,01	1,20	0,31	2,88	10,75
Écart-Type	713,17	4,59	0,14	0,04	0,31	1,15
C. V.	10,36%	10,68%	11,41%	11,41%	10,68%	10,68%

Tableau 24 : Synthèse des calculs sur l'angle d'aboutage de 75°.

Résultats des essais de rupture sur le bois massif.

Massif Éprouvette n°	Largeur Section b (en mm)	Épaisseur Section e (en mm)	Surface de Collage Sc (en mm ²)	Section Initiale Si (en mm ²)	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en N/mm ²)	Déplacement à Rupture δ (en mm)
1	20,0	8,0	-	160,00	8 769	54,81	1,52
2	20,0	8,1	-	162,00	12 473	76,99	2,31
3	20,2	8,0	-	161,60	11 490	71,10	2,19
4	20,0	8,0	-	160,00	9 412	58,82	1,61
5	20,0	8,0	-	160,00	10 845	67,78	1,73
6	20,0	8,0	-	160,00	11 453	71,58	2,09
7	20,2	8,1	-	163,62	10 930	66,80	1,94
8	20,0	8,0	-	160,00	12 997	81,23	2,38
9	20,0	7,9	-	158,00	10 970	69,43	1,84
10	20,0	8,0	-	160,00	11 923	74,52	2,24
11	19,9	8,0	-	159,20	12 625	79,30	2,33
12	20,0	8,0	-	160,00	11 319	70,74	2,13
13	20,0	8,0	-	160,00	10 852	67,82	1,93
14	20,0	7,9	-	158,00	9 214	58,31	1,57
15	20,0	7,9	-	158,00	10 905	69,02	1,74
16	20,1	8,0	-	160,80	13 604	84,60	2,45
17	20,0	8,0	-	160,00	9 611	60,07	1,60
18	20,0	8,0	-	160,00	11 442	71,51	2,19
19	20,0	8,0	-	160,00	7 998	49,99	1,44
20	19,9	8,0	-	159,20	10 902	68,48	1,74

Tableau 25 : Récapitulatif des essais de rupture sur le bois massif.

Bois Massif	Largeur Section b (en mm)	Épaisseur Section e (en mm)	Surface de Collage Sc (en mm ²)	Section Initiale Si (en mm ²)	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en N/mm ²)	Déplacement à Rupture δ (en mm)
Minimum	19,9	7,9	-	158,00	7 998,10	49,99	1,44
Maximum	20,2	8,1	-	163,62	13 603,70	84,60	2,45
Étendue	0,3	0,2	-	5,62	5 605,60	34,61	1,01
Moyenne	20,0	8,0	-	160,02	10 986,58	68,65	1,95
Écart-Type	0,07	0,05	-	1,33	1 430,27	8,83	0,32
C.V.	0,37%	0,64%	-	0,83%	13,02%	12,86%	16,40%

Tableau 26 : Synthèse des essais de rupture sur le bois massif.

Résultats des essais de rupture sur le bois massif (suite).

Massif Éprouvette n°	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en MPa)	Déplacement Axial δ (en mm)	Déplacement Normal δ_n (en mm)	Contrainte Normale σ_α (en MPa)	Cission τ_α (en MPa)
1	8 769	54,81	1,52	-	-	-
2	12 473	76,99	2,31	-	-	-
3	11 490	71,10	2,19	-	-	-
4	9 412	58,82	1,61	-	-	-
5	10 845	67,78	1,73	-	-	-
6	11 453	71,58	2,09	-	-	-
7	10 930	66,80	1,94	-	-	-
8	12 997	81,23	2,38	-	-	-
9	10 970	69,43	1,84	-	-	-
10	11 923	74,52	2,24	-	-	-
11	12 625	79,30	2,33	-	-	-
12	11 319	70,74	2,13	-	-	-
13	10 852	67,82	1,93	-	-	-
14	9 214	58,31	1,57	-	-	-
15	10 905	69,02	1,74	-	-	-
16	13 604	84,60	2,45	-	-	-
17	9 611	60,07	1,60	-	-	-
18	11 442	71,51	2,19	-	-	-
19	7 998	49,99	1,44	-	-	-
20	10 902	68,48	1,74	-	-	-

Tableau 27 : Récapitulatif des calculs sur le bois massif.

Bois Massif	Charge de Rupture P (en N)	Contrainte de Rupture σ (en MPa)	Déplacement Axial δ (en mm)	Déplacement Normal δ_n (en mm)	Contrainte Normale σ_α (en MPa)	Cission τ_α (en MPa)
Minimum	7 998,10	49,99	1,44	-	-	-
Maximum	13 603,70	84,60	2,45	-	-	-
Étendue	5 605,60	34,61	1,01	-	-	-
Moyenne	10 986,58	68,65	1,95	-	-	-
Écart-Type	1 430,27	8,83	0,32	-	-	-
C.V.	13,02%	12,86%	16,40%	-	-	-

Tableau 28 : Synthèse des calculs sur le bois massif.

Caractéristiques des éprouvettes utilisées pour les essais de traction cyclique.

Biseau à 60° Ep-n°	Largeur Section b (en mm)	Épaisseur Section e (en mm)	Section Initiale Si (en mm ²)	Surface de Collage Sc (en mm ²)	Nombre de Paliers de l'Essai	Durée de l'Essai T (en mn)	Nombre de Points du Fichier
1	19,9	5,0	99,50	114,89	16	144	14 784
2	19,9	5,0	99,50	114,89	4	36	4 146
3	19,9	5,1	101,49	117,19	11	99	11 296
4	20,0	4,9	98,00	113,16	14	126	12 730
5	19,9	5,0	99,50	114,89	21	189	19 055
6	19,9	5,0	99,50	114,89	13	117	12 134
7	20,1	5,0	100,50	116,05	18	162	17 667
8	19,9	5,0	99,50	114,89	20	180	18 619
9	20,0	5,1	102,00	117,78	7	63	6 392
10	20,0	5,0	100,00	115,47	21	189	21 218
11	19,9	4,9	97,51	112,59	11	99	10 246
12	19,8	5,0	99,00	114,32	10	90	10 321
13	20,0	4,9	98,00	113,16	15	135	14 364
14	19,9	5,0	99,50	114,89	13	117	12 436
15	19,9	5,0	99,50	114,89	18	162	18 874
16	20,1	5,1	102,51	118,37	14	126	14 524
17	19,8	5,0	99,00	114,32	9	81	8 503
18	19,9	5,1	101,49	117,19	24	216	22 262
19	19,9	5,0	99,50	114,89	16	144	14 523
20	19,9	4,9	97,51	112,59	17	153	15 816

Tableau 1 : Récapitulatif des caractéristiques des éprouvettes n°1 à 20 utilisées.

Biseau à 60° Ep-n°	Largeur Section b (en mm)	Épaisseur Section e (en mm)	Section Initiale Si (en mm ²)	Surface de Collage Sc (en mm ²)	Nombre de Paliers de l'Essai	Durée de l'Essai T (en mn)	Nombre de Points du Fichier
Minimum	19,8	4,9	97,51	112,59	4	36	4 146
Maximum	20,1	5,1	102,51	118,37	24	216	22 262
Étendue	0,3	0,2	5,00	5,77	20	180	18 116
Moyenne	19,9	5,0	99,65	115,07	15	131	13 996
Écart-Type	0,1	0,1	1,39	1,61	5	46	4 794
C.V.	0,40%	1,30%	1,40%	1,40%	34,67%	34,67%	34,26%

Tableau 2 : Synthèse des caractéristiques des éprouvettes n°1 à 20 utilisées.

Caractéristiques des éprouvettes utilisées pour les essais de traction cyclique (suite).

Biseau à 60° Ep-n°	Largeur Section b (en mm)	Épaisseur Section e (en mm)	Section Initiale Si (en mm ²)	Surface de Collage Sc (en mm ²)	Nombre de Paliers de l'Essai	Durée de l'Essai T (en mn)	Nombre de Points du Fichier
21	19,9	5,0	99,50	114,89	16	144	14 448
22	20,0	5,0	100,00	115,47	13	117	12 020
23	20,0	5,0	100,00	115,47	12	108	10 737
24	19,8	4,9	97,02	112,03	16	144	14 978
25	19,9	4,9	97,51	112,59	14	126	12 666
26	20,1	5,1	102,51	118,37	10	90	8 427
27	19,8	4,9	97,02	112,03	15	135	13 295
28	19,9	5,0	99,50	114,89	16	144	14 110
29	19,9	4,9	97,51	112,59	16	144	14 461
30	20,0	4,9	98,00	113,16	12	108	10 750
31	20,1	5,0	100,50	116,05	17	153	16 337
32	19,8	5,0	99,00	114,32	6	54	7 632
33	19,9	5,0	99,50	114,89	15	135	13 975
34	19,8	5,0	99,00	114,32	17	153	15 581
35	20,0	4,9	98,00	113,16	20	180	18 859
36	19,8	4,9	97,02	112,03	25	225	22 885
37	19,9	5,0	99,50	114,89	17	153	14 549
38	19,8	5,1	100,98	116,60	10	90	9 577
39	19,8	5,1	100,98	116,60	14	126	13 639
40	19,9	4,9	97,51	112,59	15	135	13 271

Tableau 3 : Récapitulatif des caractéristiques des éprouvettes n°21 à 40 utilisées.

Biseau à 60° Ep-n°	Largeur Section b (en mm)	Épaisseur Section e (en mm)	Section Initiale Si (en mm ²)	Surface de Collage Sc (en mm ²)	Nombre de Paliers de l'Essai	Durée de l'Essai T (en mn)	Nombre de Points du Fichier
Minimum	19,8	4,9	97,02	112,03	6	54	7 632
Maximum	20,1	5,1	102,51	118,37	25	225	22 885
Étendue	0,3	0,2	5,49	6,34	19	171	15 253
Moyenne	19,9	5,0	99,03	114,35	15	133	13 610
Écart-Type	0,1	0,1	1,55	1,79	4	35	3 467
C.V.	0,50%	1,44%	1,57%	1,57%	26,63%	26,63%	25,47%

Tableau 4 : Synthèse des caractéristiques des éprouvettes n°21 à 40 utilisées.

Résultats sur les essais de traction cyclique.

Biseau à 60° Ep-n°	Nombre de Paliers de l'Essai	Amplitude du Palier de Rupture (en kN)	Valeur Moyenne (en kN)	Nombre de Cycles sur le Palier de Rupture	Charge de Rupture (en kN)	Déformation à la Rupture (en %)	Type de Rupture M , A
1	16	2,0 à 2,2	2,1	12	2,067	0,2562	Adhésive
2	4	0,7 à 0,9	0,8	2	0,934	0,2394	Adhésive
3	11	1,5 à 1,7	1,6	7	1,675	0,2172	Adhésive
4	14	1,8 à 2,0	1,9	6	1,930	0,4302	Mixte
5	21	2,5 à 2,7	2,6	19	2,604	0,2974	Adhésive
6	13	1,7 à 1,9	1,8	1	1,925	0,3157	Adhésive
7	18	2,2 à 2,4	2,3	7	2,437	0,2233	Adhésive
8	20	2,4 à 2,6	2,5	15	2,504	0,2957	Adhésive
9	7	1,1 à 1,3	1,2	9	1,252	0,2113	Adhésive
10	21	2,5 à 2,7	2,6	16	2,606	0,3182	Adhésive
11	11	1,5 à 1,7	1,6	19	1,695	0,2847	Adhésive
12	10	1,4 à 1,6	1,5	0	1,508	0,2756	Adhésive
13	15	1,9 à 2,1	2,0	12	1,925	0,4157	Mixte
14	13	1,7 à 1,9	1,8	11	1,763	0,3896	Adhésive
15	18	2,2 à 2,4	2,3	4	2,276	0,2188	Mixte
16	14	1,8 à 2,0	1,9	8	2,009	0,3096	Adhésive
17	9	1,3 à 1,5	1,4	3	1,425	0,3238	Adhésive
18	24	2,8 à 3,0	2,9	5	2,811	0,4439	Adhésive
19	16	2,0 à 2,2	2,1	0	2,136	0,2918	Adhésive
20	17	2,1 à 2,3	2,2	17	1,992	0,3037	Mixte

Tableau 5 : Récapitulatif des résultats sur les essais des éprouvettes n°1 à 20 utilisées.

Biseau à 60° Ep-n°	Nombre de Paliers de l'Essai	Amplitude du Palier de Rupture (en kN)	Valeur Moyenne (en kN)	Nombre de Cycles sur le Palier de Rupture	Charge de Rupture (en kN)	Déformation à la Rupture (en %)	Type de Rupture M , A
Minimum	4	0,7 à 0,9	0,8	0	0,934	0,2113	-
Maximum	24	2,8 à 3,0	2,9	19	2,811	0,4439	-
Étendue	20	0,7 à 3,0	2,1	19	1,877	0,2326	-
Moyenne	15	1,8 à 2,0	1,9	9	1,974	0,3031	Adhésive
Écart-Type	5,06	-	0,52	6,23	0,48	0,07	-
C.V.	34,67%	-	27,24%	72,08%	24,55%	23,19%	-

Tableau 6 : Synthèse des résultats sur les essais des éprouvettes n°1 à 20 utilisées.

Résultats sur les essais de traction cyclique (suite).

Biseau à 60° Ep-n°	Nombre de Paliers de l'Essai	Amplitude du Palier de Rupture (en kN)	Valeur Moyenne (en kN)	Nombre de Cycles sur le Palier de Rupture	Charge de Rupture (en kN)	Déformation à la Rupture (en %)	Type de Rupture M, A
21	16	2,0 à 2,2	2,1	16	2,067	0,2562	Adhésive
22	13	1,7 à 1,9	1,8	12	1,741	0,3307	Adhésive
23	12	1,6 à 1,8	1,7	20	1,689	0,2613	Adhésive
24	16	2,0 à 2,2	2,1	13	2,068	0,3340	Mixte
25	14	1,8 à 2,0	1,9	7	1,851	0,3013	Adhésive
26	10	1,4 à 1,6	1,5	13	1,626	0,2215	Adhésive
27	15	1,9 à 2,1	2,0	12	2,083	0,3208	Adhésive
28	16	2,0 à 2,2	2,1	13	2,180	0,2631	Adhésive
29	16	2,0 à 2,2	2,1	10	2,154	0,4523	Adhésive
30	12	1,6 à 1,8	1,7	12	1,820	0,3302	Adhésive
31	17	2,1 à 2,3	2,2	17	2,130	0,3085	Adhésive
32	6	1,0 à 1,2	1,1	19	1,152	0,2544	Adhésive
33	15	1,9 à 2,1	2,0	18	2,111	0,3396	Mixte
34	17	2,1 à 2,3	2,2	16	2,318	0,2738	Adhésive
35	20	2,4 à 2,6	2,5	0	2,615	0,4040	Mixte
36	25	2,9 à 3,1	3,0	1	3,001	0,4121	Adhésive
37	17	2,1 à 2,3	2,2	0	2,321	0,3154	Adhésive
38	10	1,4 à 1,6	1,5	11	1,595	0,3221	Adhésive
39	14	1,8 à 2,0	1,9	12	1,870	0,3211	Adhésive
40	15	1,9 à 2,1	2,0	3	2,115	0,3611	Adhésive

Tableau 7 : Récapitulatif des résultats sur les essais des éprouvettes n°21 à 40 utilisées.

Biseau à 60° Ep-n°	Nombre de Paliers de l'Essai	Amplitude du Palier de Rupture (en kN)	Valeur Moyenne (en kN)	Nombre de Cycles sur le Palier de Rupture	Charge de Rupture (en kN)	Déformation à la Rupture (en %)	Type de Rupture M, A
Minimum	6	1,0 à 1,2	1,1	0	1,152	0,2215	-
Maximum	25	2,9 à 3,1	3,0	20	3,001	0,4523	-
Étendue	19	1,0 à 3,1	1,9	20	1,849	0,2308	-
Moyenne	15	1,8 à 2,0	1,9	11	2,025	0,3192	Adhésive
Écart-Type	3,94	-	0,39	6,15	0,39	0,06	-
C.V.	26,63%	-	20,75%	54,63%	19,44%	18,03%	-

Tableau 8 : Synthèse des résultats sur les essais des éprouvettes n°21 à 40 utilisées.

Déformations relevées pour l'éprouvette n°29.

N° Cycle	P= 0,2 kN	P= 0,4 kN	P= 0,6 kN	P= 0,8 kN	P= 1,0 kN	P= 1,1 kN	P= 1,2 kN	P= 1,3 kN
0	0,0316	0,0641	0,0968	0,1307	0,1637	0,1840	0,2030	0,2217
1	0,0322	0,0647	0,0980	0,1309	0,1649	0,1849	0,2030	0,2231
2	0,0329	0,0648	0,0984	0,1324	0,1663	0,1852	0,2036	0,2230
3	0,0329	0,0655	0,0990	0,1323	0,1664	0,1856	0,2039	0,2234
4	0,0322	0,0655	0,0994	0,1329	0,1669	0,1855	0,2041	0,2236
5	0,0336	0,0658	0,0999	0,1332	0,1663	0,1868	0,2043	0,2237
6	0,0329	0,0658	0,0996	0,1332	0,1673	0,1861	0,2051	0,2243
7	0,0328	0,0660	0,1001	0,1336	0,1673	0,1865	0,2047	0,2239
8	0,0335	0,0658	0,1006	0,1335	0,1675	0,1866	0,2050	0,2240
9	0,0346	0,0670	0,1004	0,1340	0,1678	0,1866	0,2054	0,2244
10	0,0346	0,0668	0,1006	0,1341	0,1687	0,1870	0,2057	0,2242
11	0,0333	0,0669	0,1008	0,1342	0,1683	0,1872	0,2058	0,2257
12	0,0338	0,0668	0,1008	0,1337	0,1691	0,1873	0,2061	0,2257
13	0,0337	0,0678	0,1010	0,1336	0,1693	0,1878	0,2060	0,2257
14	0,0337	0,0669	0,1007	0,1347	0,1688	0,1880	0,2065	0,2251
15	0,0336	0,0680	0,1010	0,1341	0,1695	0,1881	0,2064	0,2251
16	0,0339	0,0670	0,1010	0,1348	0,1698	0,1882	0,2073	0,2254
17	0,0349	0,0685	0,1006	0,1341	0,1693	0,1885	0,2079	0,2266
18	0,0350	0,0674	0,1010	0,1356	0,1699	0,1884	0,2069	0,2257
19	0,0348	0,0681	0,1021	0,1351	0,1696	0,1883	0,2065	0,2269
20	0,0348	0,0678	0,1012	0,1357	0,1697	0,1885	0,2075	0,2270

N° Cycle	P= 1,4 kN	P= 1,5 kN	P= 1,6 kN	P= 1,7 kN	P= 1,8 kN	P= 1,9 kN	P= 2,0 kN	P= 2,1 kN
0	0,2412	0,2603	0,2797	0,3002	0,3208	0,3436	0,3684	0,3972
1	0,2413	0,2607	0,2801	0,3012	0,3221	0,3436	0,3697	0,3984
2	0,2417	0,2614	0,2815	0,3015	0,3231	0,3450	0,3703	0,4004
3	0,2421	0,2609	0,2813	0,3016	0,3233	0,3454	0,3701	0,4029
4	0,2421	0,2616	0,2815	0,3021	0,3238	0,3465	0,3716	0,4053
5	0,2425	0,2624	0,2819	0,3034	0,3246	0,3471	0,3725	0,4073
6	0,2426	0,2623	0,2822	0,3039	0,3246	0,3471	0,3735	0,4098
7	0,2427	0,2622	0,2827	0,3031	0,3255	0,3478	0,3735	0,4128
8	0,2430	0,2634	0,2826	0,3047	0,3255	0,3482	0,3742	0,4158
9	0,2433	0,2635	0,2829	0,3040	0,3262	0,3498	0,3756	0,4209
10	0,2434	0,2638	0,2839	0,3046	0,3261	0,3502	0,3750	0,4369
11	0,2444	0,2636	0,2838	0,3042	0,3264	0,3504	0,3765	-
12	0,2444	0,2640	0,2838	0,3045	0,3266	0,3511	0,3769	-
13	0,2444	0,2647	0,2841	0,3060	0,3267	0,3511	0,3779	-
14	0,2442	0,2635	0,2857	0,3053	0,3275	0,3516	0,3791	-
15	0,2445	0,2649	0,2846	0,3059	0,3278	0,3516	0,3787	-
16	0,2458	0,2645	0,2857	0,3060	0,3280	0,3519	0,3795	-
17	0,2457	0,2654	0,2854	0,3056	0,3289	0,3522	0,3807	-
18	0,2458	0,2654	0,2857	0,3068	0,3284	0,3536	0,3810	-
19	0,2451	0,2651	0,2851	0,3071	0,3287	0,3538	0,3812	-
20	0,2460	0,2659	0,2860	0,3074	0,3287	0,3539	0,3814	-

Tableau 1 : Ensemble des déformations relevées pour l'éprouvette n°29.

Détermination des coefficients a, b, c du modèle d'endommagement.

Éprouvette n°1 à 20	Coefficient a	Coefficient b	Coefficient c	Éprouvette n°21 à 40	Coefficient a	Coefficient b	Coefficient c
1	0,17	0,09	8,44	21	0,16	0,09	11,57
2	0,09	0,04	6,49	22	0,15	0,05	10,22
3	0,14	0,05	9,42	23	0,08	0,08	11,76
4	0,16	0,08	9,48	24	0,24	0,11	11,10
5	0,18	0,07	5,00	25	0,26	0,08	5,99
6	0,17	0,10	9,20	26	0,24	0,05	13,33
7	0,10	0,09	10,34	27	0,12	0,04	9,03
8	0,14	0,07	10,63	28	0,11	0,11	4,20
9	0,10	0,06	7,73	29	0,06	0,04	6,47
10	0,14	0,06	4,96	30	0,10	0,07	9,16
11	0,17	0,09	5,19	31	0,08	0,11	7,96
12	0,10	0,05	11,06	32	0,10	0,10	10,16
13	0,15	0,09	5,32	33	0,19	0,10	11,04
14	0,12	0,09	10,59	34	0,09	0,07	9,72
15	0,07	0,05	8,61	35	0,21	0,06	4,85
16	0,16	0,05	10,75	36	0,20	0,11	11,95
17	0,09	0,06	10,22	37	0,16	0,05	9,07
18	0,12	0,05	6,47	38	0,12	0,07	8,29
19	0,09	0,08	8,74	39	0,14	0,09	10,39
20	0,17	0,05	11,38	40	0,18	0,07	9,92

Tableau 1 : Résultats complets pour la détermination des coefficients a, b, c.

Éprouvette n°1 à 20	Coefficient a	Coefficient b	Coefficient c	Éprouvette n°21 à 40	Coefficient a	Coefficient b	Coefficient c
Minimum	0,07	0,04	4,96	Minimum	0,06	0,04	4,20
Maximum	0,18	0,10	11,38	Maximum	0,26	0,11	13,33
Étendue	0,11	0,06	6,42	Étendue	0,20	0,07	9,13
Moyenne	0,13	0,07	8,50	Moyenne	0,15	0,08	9,31
Écart-Type	0,03	0,02	2,20	Écart-Type	0,06	0,02	2,43
C.V.	26,24%	28,73%	25,91%	C.V.	39,56%	30,12%	26,06%

Tableau 2 : Tableaux récapitulatifs pour la détermination des coefficients a, b, c.

Détermination de la zone où se produit l'endommagement.

Domage D (en %)	Zone 1 = Zone Colle Seule			Zone 2+3 = Zone Bois+Colle Seule		
	Déplacement de n1 y'1	Déplacement de n2 y'2	Déformation ϵ	Déplacement de n1 y'1	Déplacement de n2 y'2	Déformation ϵ
0	0,06209	0,11149	0,198 %	0,06209	0,11149	0,198 %
5	0,06209	0,11152	0,198 %	0,06209	0,11164	0,198 %
10	0,06209	0,11155	0,198 %	0,06209	0,11181	0,199 %
15	0,06209	0,11159	0,198 %	0,06209	0,11200	0,200 %
20	0,06209	0,11162	0,198 %	0,06209	0,11221	0,200 %
25	0,06209	0,11167	0,198 %	0,06209	0,11244	0,201 %
30	0,06209	0,11172	0,198 %	0,06209	0,11271	0,202 %
35	0,06209	0,11177	0,199 %	0,06209	0,11301	0,204 %
40	0,06209	0,11184	0,199 %	0,06209	0,11336	0,205 %
45	0,06209	0,11192	0,199 %	0,06209	0,11378	0,207 %
50	0,06209	0,11201	0,200 %	0,06209	0,11427	0,209 %
55	0,06209	0,11212	0,200 %	0,06209	0,11487	0,211 %
60	0,06209	0,11227	0,201 %	0,06209	0,11562	0,214 %
65	0,06209	0,11245	0,201 %	0,06209	0,11657	0,218 %
70	0,06209	0,11269	0,202 %	0,06209	0,11783	0,223 %
75	0,06209	0,11303	0,204 %	0,06209	0,11959	0,230 %
80	0,06209	0,11353	0,206 %	0,06209	0,12222	0,240 %
85	0,06209	0,11437	0,209 %	0,06209	0,12659	0,258 %
90	0,06209	0,11606	0,216 %	0,06209	0,13529	0,293 %
95	0,06209	0,12110	0,236 %	0,06209	0,16132	0,397 %
99	0,06209	0,16143	0,397 %	0,06209	0,36888	1,227 %

Domage D (en %)	Zone 4+5 = Zone Bois Seule		
	Déplacement de n1 y'1	Déplacement de n2 y'2	Déformation ϵ
0	0,06209	0,11149	0,198 %
5	0,06535	0,11718	0,207 %
10	0,06898	0,12349	0,218 %
15	0,07304	0,13055	0,230 %
20	0,07761	0,13849	0,243 %
25	0,08278	0,14748	0,259 %
30	0,08869	0,15776	0,276 %
35	0,09551	0,16961	0,296 %
40	0,10347	0,18343	0,320 %
45	0,11288	0,19976	0,347 %
50	0,12417	0,21935	0,381 %
55	0,13796	0,24328	0,421 %
60	0,15521	0,27317	0,472 %
65	0,17738	0,31158	0,537 %
70	0,20694	0,36277	0,623 %
75	0,24832	0,43438	0,744 %
80	0,31040	0,54171	0,925 %
85	0,41385	0,72045	1,226 %
90	0,62077	1,07760	1,827 %
95	1,24150	2,14800	3,624 %
99	6,20720	10,70300	17,975 %

Tableau 1 : Application du domage sur les 3 matériaux pris séparément (avec P=2000N).

Détermination de la zone où se produit l'endommagement (suite).

Domage D (en %)	Zone 1 et 2+3			Zone 1 et 2+3 et 4+5		
	Déplacement de n1 y'1	Déplacement de n2 y'2	Déformation ϵ	Déplacement de n1 y'1	Déplacement de n2 y'2	Déformation ϵ
0	0,06209	0,11149	0,198 %	0,06209	0,11149	0,198 %
5	0,06209	0,11167	0,198 %	0,06535	0,11736	0,208 %
10	0,06209	0,11187	0,199 %	0,06898	0,12388	0,219 %
15	0,06209	0,11209	0,200 %	0,07304	0,13117	0,232 %
20	0,06209	0,11234	0,201 %	0,07761	0,13936	0,247 %
25	0,06209	0,11262	0,202 %	0,08278	0,14866	0,263 %
30	0,06209	0,11293	0,203 %	0,08869	0,15927	0,282 %
35	0,06209	0,11330	0,205 %	0,09552	0,17153	0,304 %
40	0,06209	0,11372	0,206 %	0,10348	0,18582	0,329 %
45	0,06209	0,11421	0,208 %	0,11288	0,20271	0,359 %
50	0,06209	0,11480	0,211 %	0,12417	0,22298	0,395 %
55	0,06209	0,11552	0,214 %	0,13797	0,24776	0,439 %
60	0,06209	0,11641	0,217 %	0,15522	0,27873	0,494 %
65	0,06209	0,11755	0,222 %	0,17739	0,31855	0,564 %
70	0,06209	0,11906	0,228 %	0,20695	0,37164	0,658 %
75	0,06209	0,12117	0,236 %	0,24835	0,44597	0,790 %
80	0,06209	0,12432	0,249 %	0,31043	0,55746	0,988 %
85	0,06209	0,12956	0,270 %	0,41391	0,74328	1,317 %
90	0,06209	0,14001	0,312 %	0,62086	1,11490	1,975 %
95	0,06209	0,17131	0,437 %	1,24170	2,22980	3,951 %
99	0,06209	0,42139	1,437 %	6,20860	11,14900	19,753 %

Tableau 2 : Application du dommage en associant les matériaux (avec P=2000N).

Influence des paramètres a, b, c du modèle d'endommagement.

a=0,06 ; b=0,07 ; c=8,91		a=0,10 ; b=0,07 ; c=8,91		a=0,14 ; b=0,07 ; c=8,91		a=0,18 ; b=0,07 ; c=8,91		a=0,22 ; b=0,07 ; c=8,91	
Charge (en N)	Déformation (en %)	Charge (en N)	Déformation (en %)	Charge (en N)	Déformation (en %)	Charge (en N)	Déformation (en %)	Charge (en N)	Déformation (en %)
0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
200	0,03	200	0,03	200	0,03	200	0,03	200	0,03
400	0,06	400	0,06	400	0,06	400	0,06	400	0,06
600	0,09	600	0,09	600	0,09	600	0,09	600	0,09
800	0,12	800	0,12	800	0,12	800	0,12	800	0,12
1000	0,15	1000	0,15	1000	0,15	1000	0,15	1000	0,15
1100	0,17	1100	0,17	1100	0,17	1100	0,17	1100	0,17
1200	0,18	1200	0,18	1200	0,18	1200	0,18	1200	0,19
1300	0,20	1300	0,20	1300	0,20	1300	0,20	1300	0,20
1400	0,22	1400	0,22	1400	0,22	1400	0,22	1400	0,22
1500	0,23	1500	0,23	1500	0,23	1500	0,23	1500	0,23
1550	0,24	1550	0,24	1550	0,24	1550	0,24	1550	0,24
1600	0,25	1600	0,25	1600	0,25	1600	0,25	1600	0,25
1650	0,25	1650	0,25	1650	0,25	1650	0,25	1650	0,25
1700	0,26	1700	0,26	1700	0,26	1700	0,26	1700	0,26
1750	0,27	1750	0,27	1750	0,27	1750	0,27	1750	0,27
1800	0,28	1800	0,28	1800	0,28	1800	0,28	1800	0,28
1850	0,28	1850	0,28	1850	0,29	1850	0,29	1850	0,29
1900	0,29	1900	0,29	1900	0,29	1900	0,29	1900	0,29
1950	0,30	1950	0,30	1950	0,30	1950	0,30	1950	0,30
2000	0,31	2000	0,31	2000	0,31	2000	0,31	2000	0,31
2050	0,32	2050	0,32	2050	0,32	2050	0,32	2050	0,32
2100	0,32	2100	0,33	2100	0,33	2100	0,33	2100	0,33
2150	0,33	2150	0,34	2150	0,35	2140	0,36	2130	0,37
2180	0,36	2170	0,38	2155	0,36	2145	0,38	2135	0,42
2183	0,39	2172	0,42	2160	0,41	2148	0,42	2137	0,49
2184	0,47	2173	0,49	2162	0,51	2150	0,54	2138	0,59

Tableau I : Influence du paramètre "a".

Influence des paramètres a, b, c du modèle d'endommagement.

a=0,14 ; b=0,00 ; c=8,91		a=0,14 ; b=0,05 ; c=8,91		a=0,14 ; b=0,10 ; c=8,91		a=0,14 ; b=0,15 ; c=8,91		a=0,14 ; b=0,20 ; c=8,91	
Charge (en N)	Déformation (en %)	Charge (en N)	Déformation (en %)	Charge (en N)	Déformation (en %)	Charge (en N)	Déformation (en %)	Charge (en N)	Déformation (en %)
0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
200	0,03	200	0,03	200	0,03	200	0,03	200	0,03
400	0,06	400	0,06	400	0,06	400	0,06	400	0,06
600	0,09	600	0,09	600	0,09	600	0,09	600	0,09
800	0,12	800	0,12	800	0,12	800	0,12	800	0,12
1000	0,15	1000	0,15	1000	0,15	1000	0,15	1000	0,15
1100	0,17	1100	0,17	1100	0,17	1100	0,17	1100	0,17
1200	0,18	1200	0,18	1200	0,18	1200	0,18	1200	0,18
1300	0,20	1300	0,20	1300	0,20	1300	0,20	1300	0,20
1400	0,22	1400	0,22	1400	0,22	1400	0,22	1400	0,22
1500	0,23	1500	0,23	1500	0,23	1500	0,23	1500	0,23
1550	0,24	1550	0,24	1550	0,24	1550	0,24	1550	0,24
1600	0,25	1600	0,25	1600	0,25	1600	0,25	1600	0,25
1650	0,25	1650	0,25	1650	0,25	1650	0,25	1650	0,25
1700	0,26	1700	0,26	1700	0,26	1700	0,26	1700	0,26
1750	0,27	1750	0,27	1750	0,27	1750	0,27	1750	0,27
1800	0,28	1800	0,28	1800	0,28	1800	0,28	1800	0,28
1850	0,29	1850	0,29	1850	0,29	1850	0,29	1850	0,29
1900	0,29	1900	0,29	1900	0,29	1900	0,29	1900	0,29
1950	0,30	1950	0,30	1950	0,30	1950	0,30	1950	0,30
2000	0,31	2000	0,31	2000	0,31	2000	0,31	2000	0,31
2050	0,32	2050	0,32	2050	0,32	2050	0,32	2050	0,32
2100	0,33	2100	0,33	2100	0,33	2100	0,33	2100	0,33
2150	0,35	2150	0,35	2150	0,35	2150	0,35	2150	0,35
2155	0,36	2155	0,36	2155	0,36	2155	0,36	2155	0,36
2160	0,42	2160	0,41	2160	0,41	2160	0,41	2160	0,41
2161	0,46	2161	0,45	2161	0,45	2161	0,45	2161	0,45
2162	0,53	2162	0,52	2162	0,51	2162	0,51	2162	0,50

Tableau 2 : Influence du paramètre "b".

Influence des paramètres a, b, c du modèle d'endommagement.

a=0,14 ; b=0,07 ; c=3,00		a=0,14 ; b=0,07 ; c=5,00		a=0,14 ; b=0,07 ; c=7,00		a=0,14 ; b=0,07 ; c=9,00		a=0,14 ; b=0,07 ; c=11,00	
Charge (en N)	Déformation (en %)	Charge (en N)	Déformation (en %)	Charge (en N)	Déformation (en %)	Charge (en N)	Déformation (en %)	Charge (en N)	Déformation (en %)
0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
200	0,03	200	0,03	200	0,03	200	0,03	200	0,03
400	0,06	400	0,06	400	0,06	400	0,06	400	0,06
600	0,09	600	0,09	600	0,09	600	0,09	600	0,09
800	0,12	800	0,12	800	0,12	800	0,12	800	0,12
1000	0,15	1000	0,15	1000	0,15	1000	0,15	1000	0,15
1100	0,17	1100	0,17	1100	0,17	1100	0,17	1100	0,17
1200	0,18	1200	0,18	1200	0,18	1200	0,18	1200	0,18
1300	0,20	1300	0,20	1300	0,20	1300	0,20	1300	0,20
1400	0,22	1400	0,22	1400	0,22	1400	0,22	1400	0,22
1500	0,23	1500	0,23	1500	0,23	1500	0,23	1500	0,23
1550	0,24	1550	0,24	1550	0,24	1550	0,24	1550	0,24
1600	0,25	1600	0,25	1600	0,25	1600	0,25	1600	0,25
1650	0,25	1650	0,25	1650	0,25	1650	0,25	1650	0,25
1700	0,26	1700	0,26	1700	0,26	1700	0,26	1700	0,26
1750	0,27	1750	0,27	1750	0,27	1750	0,27	1750	0,27
1800	0,28	1800	0,28	1800	0,28	1800	0,28	1800	0,28
1850	0,29	1850	0,29	1850	0,29	1850	0,29	1850	0,29
1900	0,30	1900	0,29	1900	0,29	1900	0,29	1900	0,29
1950	0,30	1950	0,30	1950	0,30	1950	0,30	1950	0,30
2000	0,31	2000	0,31	2000	0,31	2000	0,31	2000	0,31
2050	0,33	2050	0,32	2050	0,32	2050	0,32	2050	0,32
2070	0,35	2100	0,34	2100	0,33	2100	0,33	2100	0,33
2080	0,38	2120	0,36	2130	0,34	2150	0,35	2150	0,34
2085	0,41	2125	0,37	2140	0,35	2155	0,36	2160	0,35
2087	0,45	2130	0,42	2145	0,37	2158	0,38	2165	0,37
2088	0,48	2131	0,45	2148	0,39	2160	0,41	2167	0,40
2089	0,52	2132	0,49	2150	0,43	2161	0,43	2168	0,43
2090	0,60	2133	0,58	2151	0,55	2162	0,50	2169	0,48

Tableau 3 : Influence du paramètre "c".

LISTE DES FIGURES

	Page
Liste des Figures du Chapitre I : Étude Bibliographique	
<u>Figure I-1</u> : Dessin d'un arbre.	11
<u>Figure I-2a et I-2b</u> : Structure microscopique d'un résineux (I-2a) et d'un feuillu (I-2b).	13
<u>Figure I-3</u> : Les trois de plans de symétrie ou d'orthotropie.	15
<u>Figure I-4</u> : Structure moléculaire de la colle.	19
<u>Figure I-5</u> : Structure chimique de la résorcine.	21
<u>Figure I-6</u> : Loi de comportement élastique.	24
<u>Figure I-7</u> : Loi de comportement élasto-plastique.	24
<u>Figure I-8</u> : Évolution des caractéristiques viscoélastiques de la colle urée-formol en fonction de la durée de polymérisation à 20°C	26
<u>Figure I-9</u> : Les différentes conceptions des assemblages collés.	28
<u>Figure I-10</u> : Le profil en scarf.	29
<u>Figure I-11</u> : Le profil en coin.	29
<u>Figure I-12</u> : Le trait de Jupiter.	29
<u>Figure I-13</u> : Caractéristiques géométriques des entures.	30
<u>Figure I-14</u> : Influence du taux d'humidité sur la ténacité des joints de colle de résorcine.	32
<u>Figure I-15</u> : Énergie de rupture d'assemblages collés de Hêtre et Épicéa en fonction de la colle phénolique.	33
<u>Figure I-16</u> : Évolution du taux de restitution d'énergie G_{IC} en fonction de l'épaisseur du joint de colle et du pourcentage d'assouplissant (polysulfide).	34
<u>Figure I-17</u> : Influence mécanique sur la ténacité G_{IC} .	36
<u>Figure I-18</u> : Processus de la rupture.	40
<u>Figure I-19</u> : Agencement idéal des lamelles de bois dans le lamellé-collé.	43
<u>Figure I-20</u> : Évolution de la loi linéaire de Miner et Palmgren.	50
<u>Figure I-21</u> : Évolution de la loi non linéaire de Chaboche.	51
<u>Figure I-22</u> : Évolution de la loi non linéaire de Raguét.	51
<u>Figure I-23</u> : Évolution de la loi non linéaire de Corten-Dolan.	52
<u>Figure I-24</u> : Évolution de la loi non linéaire de Henry et Gatts.	53
<u>Figure I-25</u> : Évolution de la loi non linéaire de Bui-Quoc.	53
<u>Figure I-26</u> : Évolution de la loi non linéaire en "forme de S".	54
<u>Figure I-27</u> : Théorie de Kachanov.	55
<u>Figure I-28</u> : Modèle de Kelvin-Voigt.	58

LISTE DES FIGURES

	Page
Liste des Figures du Chapitre II : Étude Expérimentale	
Figure II-1 : Disposition des planches pour le stockage.	62
Figure II-2 : Prélèvement des échantillons pour la détermination du gradient d'humidité.	64
Figure II-3 : Cycle de séchage d'un échantillon.	65
Figure II-4 : Schéma de principe de l'essai de flexion 3 points.	68
Figure II-5 : Caractéristiques géométriques des éprouvettes.	74
Figure II-6 : Montage de collage vertical pour les angles d'aboutage de 0° , 15° et 30°.	75
Figure II-7 : Montage de collage horizontal pour les angles d'aboutage de 45° , 60° et 75°.	76
Figure II-8 : Exemple avec un angle d'aboutage α de 15° (montage vertical).	77
Figure II-9 : Exemple avec un angle d'aboutage α de 60° (montage horizontal).	78
Figure II-10 : Évolution de la charge à appliquer F' en fonction de l'angle d'aboutage α pour obtenir une pression de collage de 12 bars (1,2 N/mm ²).	80
Figure II-11 : Schéma des déplacements.	83
Figure II-12 : Évolution du déplacement à rupture axial et normal en fonction de la charge.	83
Figure II-13 : Définition de la contrainte normale et de la cisssion au niveau du joint de colle.	85
Figure II-14 : Évolution de la contrainte normale et de la cisssion en fonction de l'angle.	87
Figure II-15 : Caractéristiques géométriques des éprouvettes.	90
Figure II-16 : Dessin de définition d'un mors.	92
Figure II-17 : Extensomètre Instron.	94
Figure II-18 : Photographies représentant le montage installé sur la machine de traction.	95
Figure II-19 : Écran de contrôle de l'ordinateur.	96
Figure II-20 : Courbe globale Charge=f(Déformation) de l'éprouvette n°29.	99
Figure II-21 : Courbe normalisée Dommage=f(Charge) de l'éprouvette n°29.	101
Figure II-22 : Étude du paramètre "a".	104
Figure II-23 : Étude du paramètre "b".	105
Figure II-24 : Étude du paramètre "c".	105

LISTE DES FIGURES

	Page
Liste des Figures du Chapitre III : Simulation Numérique	
<u>Figure III-1</u> : Caractéristiques géométriques de la partie modélisée de l'éprouvette.	110
<u>Figure III-2</u> : Positionnement des conditions aux limites et des forces appliquées.	111
<u>Figure III-3</u> : Maillage de l'éprouvette.	113
<u>Figure III-4</u> : Courbe représentant l'évolution de la déformation en fonction du dommage	117
<u>Figure III-5</u> : Influence du paramètre "a" sur l'évolution de la courbe charge-déformation.	119
<u>Figure III-6</u> : Influence du paramètre "b" sur l'évolution de la courbe charge-déformation.	119
<u>Figure III-7</u> : Influence du paramètre "c" sur l'évolution de la courbe charge-déformation.	120
<u>Figure III-8</u> : Comparaison entre le modèle et l'essai de traction monotone.	121

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Liste des Tableaux du Chapitre I : Étude Bibliographique	
<u>Tableau I-1</u> : Constantes rhéologiques de plusieurs essences de bois.	17
<u>Tableau I-2</u> : Adhésifs utilisés dans l'industrie du bois.	20
<u>Tableau I-3</u> : Caractéristiques mécaniques des colles à base phénolique.	22
<u>Tableau I-4</u> : Facteurs influençant la résistance d'un assemblage collé.	31
<u>Tableau I-5</u> : Propriétés des colles avec un pourcentage d'assouplissant.	34
<u>Tableau I-6</u> : Influence du choix du bois dans le pin maritime.	37
Liste des Tableaux du Chapitre II : Étude Expérimentale	
<u>Tableau II-1</u> : Les différentes humidités.	63
<u>Tableau II-2</u> : Humidité des échantillons d'une même planche.	64
<u>Tableau II-3</u> : Tableau récapitulatif pour la détermination du taux d'humidité.	65
<u>Tableau II-4</u> : Tableau récapitulatif pour la détermination de la masse volumique.	67
<u>Tableau II-5</u> : Tableau récapitulatif pour la détermination du module E longitudinal.	69
<u>Tableau II-6</u> : Présentation comparative des résultats.	70
<u>Tableau II-7</u> : Résultats des essais de traction de la résorcine pure.	72
<u>Tableau II-8</u> : Résultats des essais de flexion 3 points de la résorcine pure.	73
<u>Tableau II-9</u> : Calcul de la charge verticale F' en fonction de l'angle d'aboutage α .	79
<u>Tableau II-10</u> : Tableau récapitulatif des essais de rupture.	82
<u>Tableau II-11</u> : Tableau des déplacements en fonction de l'angle d'aboutage α .	84
<u>Tableau II-12</u> : Étude du faciès de rupture en fonction de l'angle d'aboutage α .	85
<u>Tableau II-13</u> : Détermination de la contrainte normale et de la cisssion en fonction de l'angle.	86
<u>Tableau II-14</u> : Définition précise des paliers de charge et décharge.	93
<u>Tableau II-15</u> : Synthèse des caractéristiques des éprouvettes n°1 à 20 utilisées.	97
<u>Tableau II-16</u> : Synthèse des caractéristiques des éprouvettes n°21 à 40 utilisées.	97
<u>Tableau II-17</u> : Synthèse des essais de traction cyclique pour les éprouvettes n°1 à 20.	98
<u>Tableau II-18</u> : Synthèse des essais de traction cyclique pour les éprouvettes n°21 à 40.	98
<u>Tableau II-19</u> : Calculs normalisés du dommage et de la charge pour l'éprouvette n°29.	101
<u>Tableau II-20</u> : Détermination des coefficients a, b, c pour les éprouvettes n°1 à 20.	103
<u>Tableau II-21</u> : Détermination des coefficients a, b, c pour les éprouvettes n°21 à 40.	103

RÉFÉRENCES

RÉFÉRENCES

- [1] René KELLER
Structures - Composition - Formation du bois
Cours de D.E.A. "Sciences du Bois" - E.N.G.R.E.F., pp 15, 1994.
- [2] Daniel GUITARD
Mécanique du matériau bois et composites.
Cépadues-Editions, Toulouse, 1987.
- [3] Guy PLUVINAGE
La rupture du bois et de ses composites
Cépadues-Editions, ISBN 2.85428.292.2, 1992.
- [4] Jozsef BODIG, Benjamin A. JAYNE
Mechanics of Wood and Wood Composites
Van Nostrand Reinhold Company Inc. New York. ISBN 0-442-00822-8, 1982.
- [5] S. G. LEKHNITSKII
Théorie of elasticity of an anisotropic elastic body
Holden day Inc, San Francisco, 1963.
- [6] H. MONTERNOT , D. BÉNAZET , H. ANCENAY
Guide de collage
CETIM , France, 1968.
- [7] Resorzin- und Melaninharzleim-Verzeichnis
Forschungs- und Materialprüfungsanstalt
Baden-Württemberg -Otto-Graf-Institut Stuttgart, RFA.
- [8] Jean-Marc BIRGINIE
Étude du comportement de l'interface des collages sur bois (pin maritime) en fonction
de l'environnement.
Thèse de Doctorat en Mécanique, Université de Bordeaux I, 1988.
- [9] G.S. HOLISTER , C. THOMAS
Fiber reinforced materials, Elsevier Publishing, London, 1966.
- [10] CETIM
Guide du collage, Edition Artistique, Paris, 1978.
- [11] Peer HALLER
Mesure de la ténacité du bois collé. Modélisation de la ténacité par l'intermédiaire de la
méthode des éléments finis et la mécanique de la rupture.
Thèse de Doctorat en Mécanique et Energétique.
Institut National Polytechnique de Lorraine, 1987.
- [12] Jean-Michel MOULIN
Étude 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.

Références bibliographiques

- [13] J. A. HARRIS , R. D. ADAMS
Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods
International journal of adhesion and adhesives, vol. 4, n°2, Avril 1984.
- [14] A. FRÜHWALD
Influence of planing parameters on glue line strength of laminated beams
Federal research center for forestry and forest products, Hambourg.
- [15] O. HAHN , B. WENDER
Beanspruchungsanalyse von geometrisch und werkstoffmechanisch "unsymmetrischen"
metallklebeverbindungen mit des finiten element methode
Schweißen und schneiden, Vol. 37, Heft 2, 1985.
- [16] Rabah MANAË
Étude sur la ténacité des joints de colle résorcine-phénol-formol
Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 1995.
- [17] Gilles DUCHANOIS
Mesure de la ténacité et étude du comportement mécanique des joints bois-colle.
Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 1984.
- [18] Hélène GUYOT
Industries et techniques, n°746, Les adhésifs industriels, pp 167 - 172, Février 1994.
- [19] Carlos Alberto SZÜCS
Étude d'un assemblage par pièce de coin en lamellé-collé renforcé par fibres de verre
Thèse de doctorat de l'Université de Metz, 1991.
- [20] M.L. SELBO
Effect of joint geometry on tensile strength of finger joints
Forest products journal, pp 390-400, Septembre 1963.
- [21] DEUTSCHE NORMEN DIN 68 140
Wood finger jointing, DIN., Berlin, Allemagne, 1971.
- [22] NORME EUROPÉENNE NF EN 385
Aboutages à entures multiples dans la construction en bois, Juin 1995.
- [23] BIKERMANN
Les colles et adhésifs et leurs emplois industriels
Guy le Prat, Paris, 1974.
- [24] M. FISCHER , R. SCHMID
Die Eigenschaften des Klebstoffs und die Festigkeit des Verklebung
Adhäsion, Heft 2, RFA, 1979.
- [25] J. A. KOUTSKY
Recent results on fracture toughness of bonded wood
Department of chemical engineering, University of Wisconsin, Madison.
- [26] M. TAKATANI , R. HAMADA , H. SASAKI
Testing method for cleavage fracture, toughness of glue lines in bonded wood II
Mokuzai Gakkaishi, Vol. n°30, n°2, pp 130-138, 1984.

Références bibliographiques

- [27] N. SUZUKY , Y. OKOHIRA
Toughness of glue-line in relation to parallel shear force
Bulletin of the faculty of agriculture, Mie University, Japon, pp 59-71, 1978.
- [28] M. TANATANI , R. HAMADA , H. SASAKI
Cleavage fracture of wood-epoxy bond system
Faculty of agriculture, Kinky university, Higashiosaka, Japon.
- [29] J.T. RICE
The effect of urea-formaldéhyde resin viscosity on plywood wood bond durability
Forest products journal, pp 107-112, Mars 1965.
- [30] G.E. MYERS
Use of acid scavengers to improve durability of acid catalized adhesive wood bond
Forest products journal, vol n°33, n°4, pp 49-57, Avril 1983.
- [31] C. BERGER
Étude de divers problèmes posés par le calcul automatique des critères d'état de surface.
Mécanique, Matériaux, Électricité, n°286, pp 3-18, 1973.
- [32] S.S. KELLEY , R.A. YOUNG , R.M. RAMMON , R.H. GILLEPSPIE
Bond formation by wood surface reactions
Part III : Parameters affecting the bond strength of solid wood panels
Forest products journal, vol n°33, n°2, pp. 21-28, Février 1983.
- [33] Christian SALES
Étude de l'aptitude à l'utilisation en lamellé-collé des bois de *Brachystegia*
Mildrabraedii et *Laurentii*
Centre technique forestier tropical, Nogent, France, 1981.
- [34] Gérard ELBEZ
Bois massif reconstitué.
Centre Technique du Bois, Étude R 352, Août 1981.
- [35] Dictionnaire "Larousse"
Définition du mot composite.
- [36] C. BATHIAS
"Endommagement des matériaux composites : mécanisme et mise en évidence"
Matériaux et Techniques, pp 7-16, Avril - Mai 1988.
- [37] A. LAKSIMI , M. CHERFAOUI
"Endommagement et rupture par délaminage dans un composite Verre-Epoxy sous sollicitations monotones et cycliques"
Matériaux et Techniques, pp 23-30, Juin 1988.
- [38] D. LANG
"Initiation et propagation des endommagements dans les composites stratifiés Carbone-Epoxy"
Matériaux et Techniques, pp 17-22, Avril - Mai 1988.

Références bibliographiques

- [39] R.B. PIPES , N.J. PAGANO
"Interlaminar stresses in composite laminates under axiale extension"
Journal of Composite Materials, Vol. 4, pp 538-548, 1970.
- [40] N.J. PAGANO , L.M. LACKMAN
"Prevention of delamination of composite laminates"
A.J.A.A. Journal, Vol. 13, n°3, pp 399-401.
- [41] R.Y. KIM , S.R. SONI
"Experimental and analytical studies on the onset of delamination in laminated composites"
Journal of Composite Materials, Vol. 18, pp 70-80, Janvier 1984.
- [42] R.D. JAMISON , K. SCHULTE , K.L. REIFSNIDER , W.W. STINCHCOMB
"Characterization and analysis of damage mechanisms in tension - tension fatigue of Graphite laminates"
Effects of defects in composite materials, ASTM STP 836, pp 21-55, 1984.
- [43] J.P. JEANDEAU
Collage structural : la fin de l'empirisme
CETIM Information, n°100, Avril 1987.
- [44] Colles et adhésifs
Stage adhésion, ADERA, Bordeaux, 1985.
- [45] M.L. SELBO , A.C. KNAUSS , H.E. WORTH
Glulam timbers show good performance
Forest products journal, pp 466-472, Novembre 1965.
- [46] T. LAUFENBERG
Exposure effects upôn performance of laminated veneer lumber and gluman materials
Forest products journal, Vol. 32, n°5, pp 42-48, Mai 1982.
- [47] E. ARAGAO
Étude de l'endommagement par eau de composites par des essais de choc en flexion
Thèse de Docteur Ingénieur, Université de Bordeaux I, 16 Juillet 1986.
- [48] G.E. THOUGHTON
Accelerated aging of glue-wood bonds
Wood Science, Vol. 1, n°3, Juin 1969.
- [49] A. CARDON , F. BOULPAEP
Détermination de l'influence de l'humidité et de la température sur le comportement mécanique d'adhésifs Epoxy par des méthodes dynamiques
Cahiers du groupe français de rhéologie, Tome IV, n°3, pp 147-154, 1982.
- [50] A. PINEAU , C. LEVAILLANT
Austenitic steels by using intergranular damage as a correlating parameter
Low-cycle fatigue and life predictions, A.S.T.M. S.T.P. 770
Eds. American Society for testing and materiels, page 169-193, 1982.

Références bibliographiques

- [51] F.A. Mc CLINTOCK
Mechanical behaviour of materials
(Addison-Wesky Publisching Compagny In), 1966.
- [52] LENAIN J.C. , AYME P.
Les acousto-ultrasons une nouvelle méthode pour le contrôle non destructif des matériaux composites
Composites, Paris, volume 29, N°3, page 36-40, 1989.
- [53] J.L. CHABOCHE
Life time predictions and cumulative damage under high-température conditions
Low-cycle fatigue and life predictions, A.S.T.M. S.T.P. 770, page 81-104, 1982.
- [54] J. DUFALLY
Modélisation mécanique et identification de l'endommagement plastique des métaux
Thèse de docteur de 3^{ème} cycle, Université Marie-Curie, 1980.
- [55] M. RAGUET
Endommagement en fatigue oligocyclique à haute température, application aux essais à deux niveaux de déformations dans le cas d'un acier.
Thèse de docteur-ingénieur, Université de Metz, 1981.
- [56] J.M. JALINIER
Mise en forme et endommagement
Thèse de docteur es sciences, 1981.
- [57] Zitouni AZARI
Prise en compte de l'endommagement mécanique et chimique dans le cas de surcharge mécaniques et thermiques en fatigue oligocyclique à chaud
Thèse de docteur es sciences physiques, Université de Metz, 1985.
- [58] PALMGREN - MINER
Cumulatif damage in fatigue
Journal of applied mechanics, vol. 67, pp. 159-164, 1945.
- [59] CORTEN DOLAN
Cours de DESU - Université de Metz - 1992
Ruine des structures par Mr PLUVINAGE.
- [60] R. R.GATTS
Application of a cumulative damage concept to fatigue
Trans. A.S.M.E. J.F. - of bas. eng. vol. 93 pp. 529-540, 1961.
- [61] THANG BUI-QUOC
Unifed theory of cumulative damage in metal fatigue
W.R.C. Bulletin n°62, 1971.
- [62] PLUVINAGE G., RAGUET M.
Physical and mechanical measurements of damage in low-cycle fatigue
Application for two-level tests
Fatigue mechanisms : advances in quantitative measurement of physical damage.
ASTM 811, pp. 139-150, Mai 1982.

Références bibliographiques

- [63] L.M. KACHANOV
Time of the rupture process under creep conditions
Izt. Akad. Navk. S.S.R. Oddt. Tekh Navk, n°8, page 26-31, 1968.
- [64] Yu. N. RABOTNOV
Creep rupture
Proc. XII Int. Cong. Applied Mechanics, 1968.
- [65] LEMAITRE J. , CHABOCHE J.L.
Mécanique des matériaux solides
Dunod, 1985.
- [66] BARRET J.D. , FOSCHI R.O.
Duration of load probability of failure in wood. Part I, Modelling creep rupture.
Canadian journal engineering, Vol. 5, pp. 505-514, 1978.
- [67] BARRET J.D. , FOSCHI R.O.
Duration of load probability of failure in wood. Part II, Constant, ramp and cyclic loadings.
Canadian journal engineering, Vol. 5, pp. 515-532, 1978.
- [68] CHAPLAIN M. , FOURNELY E., VERGNE A.
Life duration of wood bolted joints. Part II, Modelling damage approach.
WG3 - Timbers connections, pp.297-301, 1994.
- [69] Centre Technique du Bois et de l'Ameublement (C.T.B.A.)
Les résineux et le peuplier français en structures. Paris (France), 1985.
- [70] GÖTZ Karl-Heinz, HOOR Dieter, MÖHLER Karl, NATTERER Julius
Construire en bois, choisir, concevoir et réaliser
Presses polytechnique romandes, Lausanne (Suisse), 1987.
- [71] KOLLMANN Franz F.P. , CÔTÉ Wilfried A. Jr
Principles of wood science and technology, Vol. I, Solid wood
Springer-Verlag New York Inc., 1968.
- [72] JODIN Philippe
Le bois : matériau d'ingénierie
AR.BO.LOR., pp. 114, 1994.
- [73] В. А. Маньковский (V. A. Mankovskiy)
НЕЛИНЕЙНАЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ВЯЗКОУПРГИХ ФУНКЦИЙ
NELINEYNAI PARAMETRIZACII VIZKOUPRGIH FUNKCIY
(Fonction paramétrique non linéaire de fluage)
механика композитных материалов n°4, pp. 579-584, 1982.
(Mécanique des matériaux composites) n°4, pp. 579-584, 1982.