



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>

lexbis

S/MZ
89/11

BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE - METZ	
N° inv.	19890215
Cote	S/Mz 89/11
Loc	

THESE

présentée à la

**FACULTE DES SCIENCES DE
L'UNIVERSITE DE METZ**

par

J. M. MOULIN

en vue de l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE METZ



**Etude d'un nouveau composite à base de bois
renforcé par fibre de verre : le L.C.R.
(Lamellé-Collé Renforcé)**

soutenue le 27 septembre 1989, devant la Commission d'Examen :

Mr. G. PLUVINAGE	:	UNIVERSITE DE METZ	Président
Mr. C. G'SELL	:	ECOLE DES MINES (NANCY)	Rapporteur
Mr. P. JODIN	:	UNIVERSITE DE METZ	Rapporteur
Mr. B. DE GRANDRY	:	A.F.M.E. (PARIS)	
Mr. P. TRIBOULOT	:	E.S.S.T.I.B. (EPINAL)	
Mr. J. P. FAVRE	:	O.N.E.R.A. (CHATILLON s/s BAGNEUX)	
Mr. P. HALLER	:	E.P.F. (LAUSANNE)	

Я МОИКОЕ

Je remercie Mr.Pluinage pour avoir bien voulu m'accueillir au sein du Laboratoire de Fiabilité Mécanique de l'Université de Metz.

J'exprime ma profonde gratitude à l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie pour le concours financier qu'elle a su m'accorder.

Que les membres du jury, qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail, soient ici remerciés.

Ma reconnaissance va, enfin, aux membres du laboratoire qui ont su m'aider ou me conseiller tout au long de cette étude.

SOMMAIRE

	page
- LISTE DES SYMBOLES	4
- INTRODUCTION	10
- CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	12
1 - 1 Introduction	13
1 - 2 La fibre de verre	13
1.2.1 généralités	13
1.2.2 caractéristiques mécaniques	14
1 - 3 Les colles phénoliques	16
1.3.1 généralités	16
1.3.2 caractéristiques mécaniques	16
1 - 4 Le peuplier	17
1.4.1 généralités	17
1.4.2 caractéristiques mécaniques	19
1.4.3 influence de la densité	20
1 - 5 Le joint renforcé	22
1.5.1 généralités	22
1.5.2 caractéristiques mécaniques	22
1 - 6 Le lamellé-collé de peuplier	23
1.6.1 généralités	23
1.6.2 caractéristiques mécaniques	24
1 - 7 Le lamellé-collé renforcé	24
1.7.1 généralités	24
1.7.2 caractéristiques mécaniques	25
1.7.3 analyse théorique	27
1.7.4 analyse économique	29
1 - 8 Conclusion	30

	page
- CHAPITRE 2 : COMPORTEMENT EN TRACTION DES MATERIAUX CONSTITUTIFS DU LAMELLE-COLLE RENFORCE	31
2 - 1 La fibre de verre	32
2.1.1 description	32
2.1.2 montage expérimental	33
2.1.3 résultats	34
2.1.4 discussion	39
2 - 2 La résorcine	39
2.2.1 description	39
2.2.2 fabrication des éprouvettes	39
2.2.3 conservation des éprouvettes	41
2.2.4 montage expérimental	41
2.2.5 résultats	42
2.2.6 discussion	45
2 - 3 Le joint renforcé	45
2.3.1 détermination du taux de fibre	45
2.3.2 montage expérimental	48
2.3.3 résultats	48
2.3.4 discussion	51
2.3.5 modélisation	52
2 - 4 Le peuplier	53
2.4.1 description	53
2.4.2 montage expérimental	54
2.4.3 résultats	54
2.4.4 discussion	55
- CHAPITRE 3 : COMPORTEMENT EN FLEXION DES MATERIAUX CONSTITUTIFS DU LAMELLE-COLLE RENFORCE	56
3 - 1 La fibre de verre	57
3 - 2 La résorcine	57
3.2.1 montage expérimental	57
3.2.2 résultats	59
3.2.3 discussion	61

	page
3 - 3 Le joint renforcé	62
3.3.1 résultats	62
3.3.2 discussion	65
3.3.3 modélisation	65
3 - 4 Le peuplier	65
3.4.1 montage expérimental	65
3.4.2 résultats	66
3.4.3 étude de la densité	68
3.4.4 discussion	69
3.4.5 modélisation	69
- LISTE DES SYMBOLES	73
- CHAPITRE 4 : ETUDE DU L.C.R.	79
4 - 1 Comportement en traction	80
4.1.1 protocole expérimental	80
4.1.2 résultats	81
4.1.3 modélisation	84
4.1.4 conclusions	86
4 - 2 Comportement en flexion	87
4.2.1 protocole expérimental	87
4.2.2 résultats	91
4.2.3 modélisation	95
4.2.4 conclusions	98
4.2.5 autre approche	98
4 - 3 Résultats complémentaires	99
4.3.1 influence de l'humidité	100
4.3.2 étude au scanner	103
- CONCLUSION	109
- ANNEXE	112
- REFERENCES	113

LISTE DES SYMBOLES

généralités

- $\mathcal{L}$: direction ou axe longitudinal (ou sens chaîne pour le tissu de verre)
- $\mathcal{R}$: direction ou axe radial
- $\mathcal{T}$: direction ou axe tangentiel (ou sens trame pour le tissu de verre)
- b : largeur d'une éprouvette ou d'un pli
- e : épaisseur d'une éprouvette ou d'un pli
- h : hauteur d'une poutre
- L : longueur d'une éprouvette (ou longueur entre appuis pour la flexion)
- V_0 : volume d'une éprouvette à l'instant $t = 0$ (ou référence à 4% d'humidité)
- V : volume d'une éprouvette à l'instant t
- ΔV : variation de volume des éprouvettes cyclées en humidité
- ΔP : variation de poids des éprouvettes cyclées en humidité
- P_t : poids de l'éprouvette à l'instant t
- P_0 : poids de référence pris à 4 % d'humidité
- d : densité
- G : module de cisaillement dans le plan ($\mathcal{R}, \mathcal{T}$)
- P : charge ponctuelle appliquée au système
- u : retrait volumique

fibre de verre

- ϕ : diamètre d'une fibre de verre
- g : nombre de grosses mèches du tissu de verre
- p : nombre de petites mèches du tissu de verre
- λ : longueur d'une fibre de verre

Liste des symboles

- u_f : fraction volumique de fibre
- V_f : volume de fibre

colle

- u_c : fraction volumique de colle (matrice)
- V_c : volume de colle
- M_c : masse de colle

essai de traction

- l_0 : longueur initiale avant essai de traction
- Δl : allongement de l'éprouvette (traction)
- A : section droite
- A_i : section droite de la $i^{\text{ème}}$ couche
- A_T : section droite totale
- A_c : section droite d'une couche de colle
- A_b : section droite d'une lamelle de bois
- A_f : section droite d'une couche de fibres
- A_j : section droite d'un joint renforcé
- A_{lcr} : section droite du composite

essai de flexion

- M : moment fléchissant agissant sur une section droite
- f : flèche au point milieu, essai de flexion
- y : distance de l'axe neutre à une fibre d'une poutre en flexion
- c : distance de l'axe neutre à la fibre externe d'une poutre en flexion

Liste des symboles

- I : moment d'inertie d'une section droite par rapport à l'axe neutre
- I_i : moment d'inertie d'une section droite de la $i^{\text{ème}}$ couche
- I_T : moment d'inertie d'une section droite de l'ensemble d'une poutre
- I_c : moment d'inertie d'une section droite d'une couche de colle
- I_b : moment d'inertie d'une section droite d'une lamelle de bois
- I_f : moment d'inertie d'une section droite d'une couche de fibres
- I_j : moment d'inertie d'une section droite d'un joint renforcé
- I_{lcr} : moment d'inertie d'une section droite du composite

étude statistique

- $f(x)$: fonction densité de probabilité
- $F(X)$: fonction densité de probabilité cumulée
- $\bar{x}$: moyenne expérimentale
- $\bar{x}^G$: moyenne obtenue par la statistique de Gauss
- $\bar{x}^W$: moyenne obtenue par la statistique de Weibull
- Δ : écart type expérimental
- Δ^G : écart type de Gauss
- Δ^W : écart type de Weibull
- m : premier paramètre de Weibull (forme)
- ω : deuxième paramètre de Weibull (échelle)
- x_0 : troisième paramètre de Weibull (seuil)
- n_c : nombre d'échantillons dont la propriété $x \leq X$
- N : nombre total d'échantillons (ou nombre total de fibres de verre)
- $\Gamma(x)$: fonction mathématique " gamma "

propriétés mécaniques

- E : module d'élasticité
- E_i : module d'élasticité de la $i^{\text{ème}}$ couche
- E_L : module d'élasticité longitudinal
- E_T : module d'élasticité global (flexion pure + cisaillement)
- E_c : module d'élasticité de la colle
- E_b : module d'élasticité longitudinal du bois
- E_f : module d'élasticité de la fibre de verre
- E_j : module d'élasticité du joint renforcé
- E_{lcr} : module d'élasticité longitudinal du composite
- σ : contrainte
- σ^e : contrainte à la limite élastique
- σ_c^e : contrainte à la limite élastique de la colle
- σ_b^e : contrainte à la limite élastique du bois
- σ_f^e : contrainte à la limite élastique de la fibre de verre
- σ_j^e : contrainte à la limite élastique du joint renforcé
- σ_{lcr}^e : contrainte à la limite élastique du composite
- σ^r : contrainte à rupture
- σ_i^r : contrainte à rupture de la $i^{\text{ème}}$ couche
- σ_c^r : contrainte à rupture de la colle
- σ_b^r : contrainte à rupture du bois
- σ_f^r : contrainte à rupture de la fibre de verre

- σ_j^r : contrainte à rupture du joint renforcé
- σ_{lcr}^r : contrainte à rupture du composite
- R : rapport de la contrainte à la limite élastique sur la contrainte à rupture
- ϵ : déformation
- ϵ^e : déformation à la limite élastique
- ϵ_c^e : déformation à la limite élastique de la colle
- ϵ_b^e : déformation à la limite élastique du bois
- ϵ_f^e : déformation à la limite élastique de la fibre de verre
- ϵ_j^e : déformation à la limite élastique du joint renforcé
- ϵ_{lcr}^e : déformation à la limite élastique du composite
- ϵ^r : déformation à rupture
- ϵ_c^r : déformation à rupture de la colle
- ϵ_b^r : déformation à rupture du bois
- ϵ_f^r : déformation à rupture de la fibre de verre
- ϵ_j^r : déformation à rupture du joint renforcé
- ϵ_{lcr}^r : déformation à rupture du composite
- Renf.: renforcement obtenu sur la grandeur considérée, par rapport à la référence sans fibre de verre

INTRODUCTION

Les années de reconstruction qui suivirent la fin de la Seconde Guerre Mondiale virent l'implantation massive, afin de reconstituer le paysage, d'essences à croissance rapide. Parmi elles, le peuplier fut largement employé.

Aujourd'hui se pose le problème de l'utilisation de cette matière première, désormais abondante sur le territoire. A cause de ses faibles caractéristiques mécaniques et physiques, l'usage industriel du peuplier se limite actuellement à des applications spécifiques telles que l'emballage alimentaire ou les allumettes.

Il était donc intéressant d'élargir les possibilités en étudiant la faisabilité d'un matériau destiné aux structures telles que charpentes ou ossatures de grandes dimensions.

L'idée fut de renforcer les qualités mécaniques intrinsèques du bois à l'aide d'un matériau à hautes performances. Par exemple, en introduisant des bandes de tissu de fibre de verre directement dans les joints d'un lamellé-collé.

La conséquence est la création d'un composite à base de bois. Celui-ci peut être considéré comme un matériau en couches orientées, de natures très diverses (bois, colle, fibre de verre). La qualité des différentes interfaces est l'un des points fondamentaux.

Le présent travail débute par la synthèse de la littérature publiée depuis une vingtaine d'années sur des composites similaires, en bois reconstitué, renforcés par fibres. Les deux chapitres suivants seront consacrés à la caractérisation mécanique statique des trois éléments constitutifs : le peuplier, la colle résorcine et un tissu de verre unidirectionnel. La dernière partie donne les résultats expérimentaux (essais de flexion et de traction), ainsi que les modèles théoriques correspondants, obtenus sur le Lamellé-Collé de peuplier Renforcé par fibre de verre que nous avons appelé le L.C.R.

CHAPITRE 1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1 - 1 INTRODUCTION

Etant données les différences marquées que présentent entre eux les trois éléments constitutifs du L.C.R. (Lamellé-Collé Renforcé), notre étude bibliographique présentera d'abord les connaissances acquises sur chaque composant pris séparément (§ 2, 3 et 4), puis se poursuivra par l'exposé des données concernant les associations fibre-colle et bois-colle (§ 5 et 6) et enfin se terminera par l'étude de l'ensemble fibre-colle-bois (§ 7).

De fait, l'observation de la littérature existante actuellement sur ces trois matériaux reflète une grande hétérogénéité. Les ouvrages sur la fibre de verre s'avèrent fort nombreux. Mais, ceux abordant le comportement mécanique des colles phénol-formol-résorcinol sont très rares. Les combinaisons possibles obéissent à la même diversité : le lamellé-collé est un produit abondamment étudié, alors que l'ensemble colle-fibre ou joint renforcé est quasiment inconnu.

Par conséquent, les paragraphes qui suivent seront inévitablement le reflet de ces inégalités. D'une manière générale, nous ne nous servirons des valeurs bibliographiques qu'à titre de comparaison avec nos résultats expérimentaux, lesquels seront les seuls à servir dans l'analyse théorique. Ceci s'explique par la grande variabilité des propriétés du bois, ainsi que par le large éventail des tissus de fibre disponibles. Il était donc préférable de mesurer expérimentalement les caractéristiques des matériaux spécifiques que nous utilisons.

1 - 2 LA FIBRE DE VERRE

1.2.1 Généralités

Le verre est un mélange solide non cristallisé obtenu par fusion de silice (SiO_2), de chaux (CaO) et d'une base forte (KOH , NaOH ...). Une fibre de verre se présente sous la forme d'un long fil de 10 à 20 μm de diamètre et pouvant atteindre plusieurs mètres de long. Ces fibres peuvent être tissées de différentes manières afin d'obtenir des tissus (fig.1) :

- Tissu unidirectionnel : toutes les fibres sont parallèles les unes aux autres dans le sens longitudinal (sens chaîne), simplement maintenues ensemble par un fil transversal (sens trame).

- Tissu bidirectionnel : la moitié des fibres sont disposées dans le sens longitudinal, l'autre moitié dans le sens transversal.

- Tissu à 45° : c'est un tissu bidirectionnel incliné d'un angle de 45° par rapport au sens chaîne.

- Mat de fibres : celles-ci sont orientées indifféremment dans toutes les directions du plan.

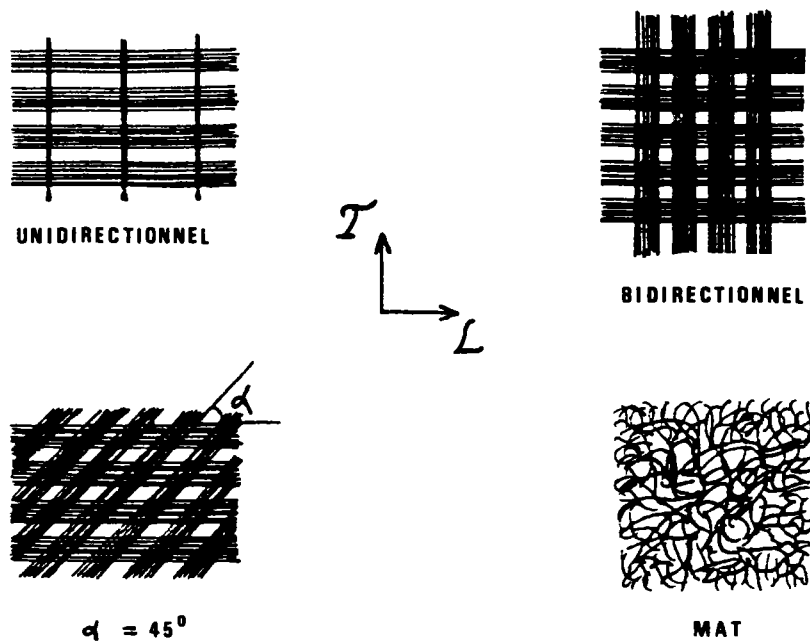


Figure 1 : Principaux modes de tissage de la fibre de verre.

Suivant les proportions chimiques et le traitement subi après solidification (recuit, traitement de surface...), on distingue couramment les tissus de verre de type E, D, R, C... Les données bibliographiques, citées au paragraphe 1.2.2, ne concernent que la fibre de type E. Ce sont les fibres les plus utilisées, elles ne possèdent pas de caractéristiques spéciales telles que résistance aux acides ou propriétés diélectriques, et sont les moins onéreuses. Les essais mécaniques sont effectués à pression, humidité et température ambiantes.

1.2.2 Caractéristiques mécaniques

Le verre massif est un matériau isotrope. Le module d'Young est donc le même dans les trois directions de l'espace. Cependant, une certaine anisotropie peut apparaître du fait de la forme allongée d'une fibre qui privilégie le sens longitudinal (= longueur de la fibre). Les valeurs bibliographiques, présentées dans le tableau 1, se rapportent à des tissus unidirectionnels utilisés pour le renforcement de joints sollicités en traction dans le sens longitudinal.

Précisons enfin que la future matrice destinée à recevoir les fibres est une résine phénolique. En général, les fibres de type E incluses dans des matrices thermoplastiques ou thermodurcissables ont un module d'élasticité dans la direction L de l'ordre de 70 000 MPa et une contrainte à rupture d'environ 3 000 MPa.

Réf.	Module d'élasticité longitudinal (MPa)	Contrainte à rupture (MPa)
Laufenberg [1]	41 846	1 002
Holister [2]	28 812	1 441
Brochier [3]	30 000	1 000

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques du tissu de fibre de verre de type E.

La variabilité relativement importante des valeurs reportées ci-dessus est imputable aux différences de fabrication et de traitement. Les deux types d'essais qui vont nous intéresser tout au long de ce travail sont la traction et la flexion. Les résultats du tableau 1 proviennent d'essais de traction.

A notre connaissance, aucune valeur expérimentale du module d'élasticité en flexion n'a pu être obtenue à ce jour. De manière directe ou indirecte, cela paraît très délicat à réaliser sur le plan pratique. Citons cependant l'existence d'un travail [4] dans lequel P.K.Järvelä se propose de mesurer la contrainte à rupture en flexion de manière indirecte. Une fibre est conditionnée sous forme de boucle (fig.2). Le diamètre de la boucle à la rupture est relié à la contrainte à rupture. Cependant, l'auteur ne donne pas une expression analytique précise et présente uniquement le diamètre de la boucle, mesuré expérimentalement, en fonction du diamètre de la fibre.

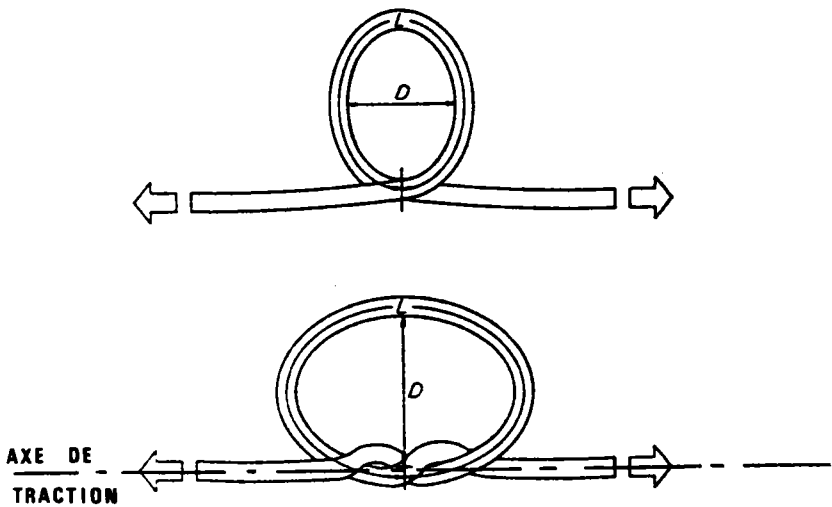


Figure 2 : Méthode de la boucle pour la détermination indirecte de la contrainte à rupture.

1 - 3 LES COLLES PHENOLIQUES

1.3.1 Généralités

Nous exposons ici les caractéristiques des colles à base phénolique . Ces adhésifs font partie de la famille des thermodurcissables. Les colles phénoliques sont destinées principalement au collage du bois et des céramiques. Elles se présentent sous 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 restent cependant voisines.

1.3.2 Caractéristiques mécaniques

Les adhésifs phénoliques, une fois polymérisés, sont assimilés à des solides isotropes. Le module d'élasticité est identique quelque soit la direction de mesure.

Le tableau 2 résume les données bibliographiques que nous possédons. Elles correspondent à des essais de traction. La relative dispersion des résultats des deux premières références est principalement dûe aux nuances de proportions entre phénol, formaldéhyde et résorcine.

Réf.	Module d'élasticité (MPa)	Contrainte à rupture (MPa)
Holister [2]	2 000 à 4 000	27 à 48
Cetim [5]	4 000 à 30 000	20 à 70
Haller [6]	2 200	26

Tableau 2 : Caractéristiques mécaniques
des colles à base phénolique.

Nous n'avons aucune donnée en ce qui concerne le module d'élasticité mesuré en flexion ainsi que la contrainte à rupture sur une colle de type phénolique. Il semble difficile de réaliser un essai de flexion sur une éprouvette de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur (dimension réelle d'un joint). Il reste la possibilité de tester un échantillon de 3 à 5 mm d'épaisseur en admettant l'hypothèse de la validité des résultats y compris aux très faibles dimensions. Même avec cette approximation, les données bibliographiques sont inexistantes.

1 - 4 LE PEUPLIER

1.4.1 Généralités

A la différence des matériaux précédents, tous deux artificiels, le bois est issu d'un être vivant appartenant au règne végétal. Il est donc naturel. Du fait de sa structure microscopique, c'est un matériau anisotrope (fig.3). L'organisation cellulaire d'un feuillu se divise schématiquement en trois familles :

- de grandes cellules allongées de faible diamètre, parallèles à l'axe longitudinal : les fibres. Ce sont ces cellules qui forment l'ossature et donnent la densité ainsi que la résistance mécanique.
- des chaînes de cellules allongées de gros diamètre toujours parallèles à l'axe longitudinal : les vaisseaux. Ceux-ci servent à la circulation de la sève brute.
- des suites de cellules plus petites dirigées dans le sens radial : les rayons ligneux.

Il faut ajouter l'existence de nombreux autres éléments structuraux. Principalement les ponctuations qui permettent le passage des substances intracellulaires d'une cellule à l'autre.

Au niveau macroscopique nous retrouvons l'anisotropie décrite ci-dessus. Les trois directions (longitudinale, radiale et tangentielle) repérées sur une bille sont données figure 4.

Les trois principaux composants chimiques intervenant dans le bois sont : la cellulose (polysaccharide), les hémicelluloses (polysaccharides non-cellulosiques) et la lignine. Le tableau 3 donne la composition globale du bois de peuplier, celui-ci appartenant au genre *Populus*.

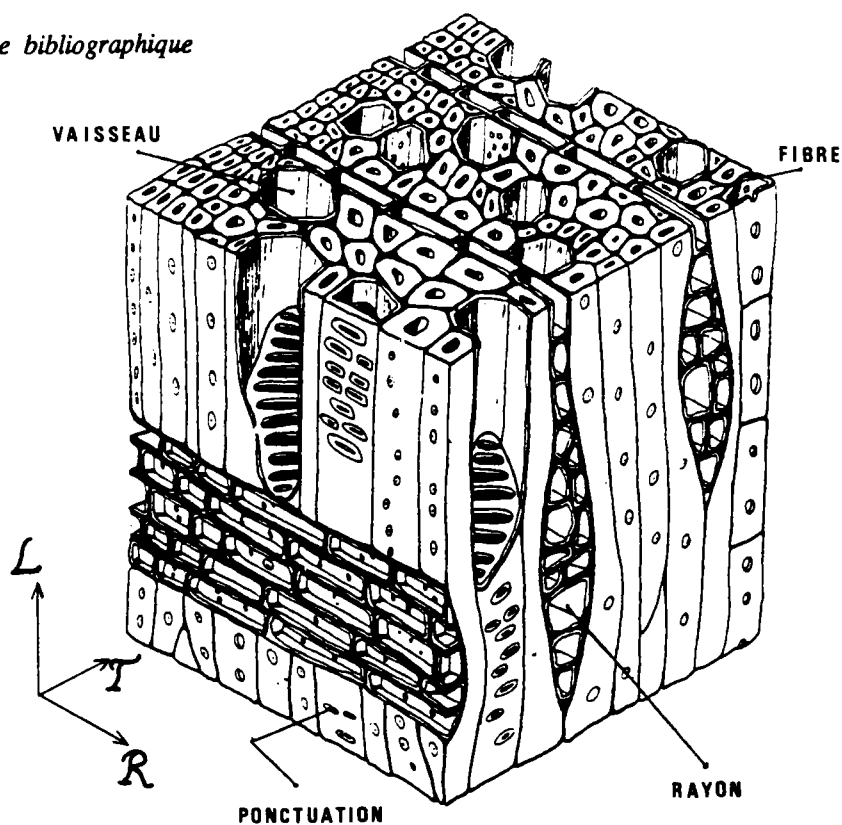


Figure 3 : Structure microscopique d'un bois feuillu.

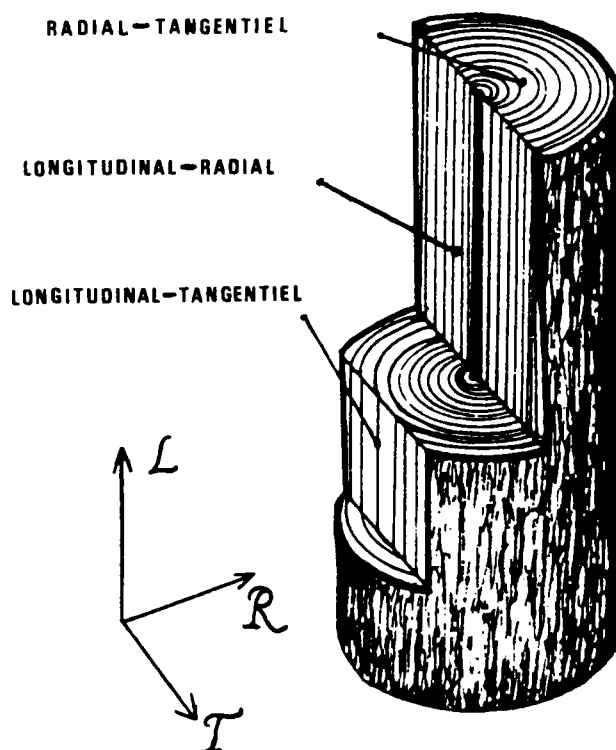


Figure 4 : Repère orthogonal et plans de coupe d'un tronçon de grume.

Réf.	Cellulose	Hémicelluloses	Lignine	Autres
Kollmann [7]	48 %	27 %	21 %	4 %
Haluk [8]	51 %	22 %	23 %	4 %

Tableau 3 : Composition chimique
du peuplier (Populus).

1.4.2 Caractéristiques mécaniques

Du point de vue du mécanicien, le bois est donc un matériau orthotrope. Cela implique que le module d'Young varie suivant la direction de mesure. En accord avec la figure 4, nous définirons trois modules afin de décrire le matériau : tangentiel, radial et longitudinal. Le seul dont nous discuterons ici est le module dans le sens longitudinal, c'est-à-dire principalement parallèle aux fibres.

Le tableau 4 donne les valeurs bibliographiques que nous possédons et ne tient pas compte des variations entre espèces. L'humidité du bois est de 12 % ou 15 %, la densité environ 0,4.

Réf.	Module longitudinal (MPa)	Contrainte à rupture (MPa)
Bodig [10]	8 383	41
Martin [8]	7 800	-
C.T.B.A. [11]	8 000	-
Wood Handbook [21]	-	48

Tableau 4 : Caractéristiques mécaniques
du peuplier.

Seule la référence [21] se rapporte à un essai de traction longitudinale, les trois autres provenant de tests de flexion. Ajoutons que le C.T.B.A. [11] donne la contrainte admissible du peuplier, en flexion : 8 MPa et en traction : 5 MPa.

1.4.3 Influence de la densité

Deux facteurs influencent largement le comportement mécanique du bois. L'humidité, dont nous ne parlerons pas ici car tous les essais sont effectués à un taux d'humidité du bois constant, compris entre 10 et 12 %.

Par contre, la densité fera l'objet d'un paragraphe de la partie expérimentale et sera reliée au module d'élasticité. Précisons qu'il n'est pas question ici de discuter des variations de densité entre bois initial et bois final, ni entre bois normal et bois de réaction. Nous considérons une densité "globale" ou macrodensité prise sur un volume relativement important.

Même en se référant à une macrodensité, la variabilité des propriétés du bois est telle que, par exemple dans le cas du lamellé-collé, les valeurs enregistrées sur chaque lamelle peuvent présenter un écart de 20 % par rapport à une valeur moyenne. La figure 5 donne l'influence de la densité sur le module d'élasticité longitudinal d'un balsa (*Ochroma lagopus*). Comme on peut le voir, la relation trouvée par J.O.Draffin et C.W.Mühlenbruch [12] est linéaire.

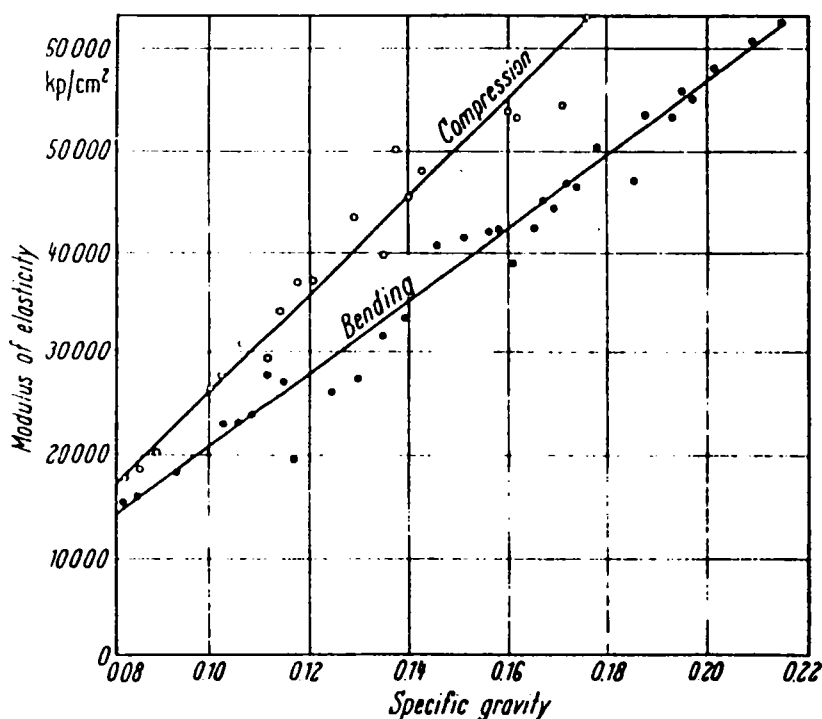


Figure 5 : Relation linéaire entre module d'Young et densité pour le balsa (essai de flexion et de compression).

F.F.P.Kollmann [7] trouve lui aussi une relation linéaire sur du chêne et du sapin. J.Bodig [10] a proposé une relation générale pour décrire cette corrélation :

$$E_L = a \cdot d^b \quad (1.1)$$

a et b sont des constantes, fonction du type d'essai et de la propriété mécanique étudiée. E_L est le module longitudinal et d, la densité. En général E_L et d moyens sont tabulés et il est possible, à l'aide d'une équation comparative, de prévoir le module de l'éprouvette que l'on teste en mesurant sa densité. Pour l'essai considéré, nous avons :

$$E_{L_{moy}} = a \cdot d_{moy}^b \quad (1.2)$$

donc :

$$E_L = E_{L_{moy}} \cdot \left[\frac{d}{d_{moy}} \right]^b \quad (1.3)$$

d_{moy} est par exemple la densité moyenne du peuplier : 0,4 et $E_{L_{moy}}$ le module longitudinal moyen : 8383 MPa. Pour la flexion statique $b = 1$ (voir [10]).

Reprenant la même idée de base, D.Guitard [9] propose une relation indépendante du type d'essai, celle-ci diffère suivant la propriété mécanique étudiée : module longitudinal, module radial, module de cisaillement etc... Enfin il regroupe les essences en deux catégories : feuillus ou résineux. Pour la densité il pose :

$$\begin{aligned} d_{\text{feuillus}} &= 0,65 \\ d_{\text{résineux}} &= 0,45 \end{aligned}$$

et pour le module longitudinal :

$$\begin{aligned} E_{L_{\text{feuillus}}} &= 14\,400 \text{ MPa} \\ E_{L_{\text{résineux}}} &= 13\,100 \text{ MPa} \end{aligned}$$

finalement il trouve la relation quasi-linéaire pour les feuillus :

$$E_L = 14\,400 \cdot \left[\frac{d}{0,65} \right]^{1,03} \quad (1.4)$$

à comparer avec (1.3) pour le peuplier :

$$E_L = 8383 \cdot \left[\frac{d}{0,40} \right]^{1,00} \quad (1.5)$$

Signalons enfin la relation proposée par les services du Ministère de l'Agriculture des Etats-Unis [21] :

$$E_L = 15\,984 \cdot d^{0,65} \quad (1.6)$$

à comparer avec l'équation (1.1) pour un essai de flexion statique sur un feuillu :

$$E_L = 19\,208 \cdot d^{1,00} \quad (1.7)$$

Bien entendu les équations (1.4 à 1.7) ne sont valables qu'avec le Système d'Unités Internationales et les modules sont ici en MPa.

1 - 5 LE JOINT RENFORCE

Nous nous intéressons maintenant aux travaux déjà effectués sur les combinaisons possibles des trois éléments de base.

1.5.1 Généralités

Un joint renforcé est constitué d'un tissu unidirectionnel de fibre de verre que l'on introduit dans une matrice thermodurcissable en colle phénolique. L'épaisseur réelle d'un tel joint varie entre 0,5 et 1,5 mm suivant le nombre de couches de fibres.

Il s'agit d'un composite anisotrope, le sens chaîne du tissu est parallèle à la longueur de l'éprouvette (= l'axe de traction). On s'intéressera donc au module longitudinal. Le matériau, vu par un observateur extérieur, est considéré comme homogène.

1.5.2 Caractéristiques mécaniques

Les résultats, rassemblés dans le tableau 5, ont été obtenus pour la plupart en préimprégnant un tissu avec la colle et en testant celui-ci en traction. Les auteurs ne mentionnent aucune valeur pour un essai de flexion. A noter que T.L.Laufenberg [1] reprend les mêmes valeurs que celles du tableau 1. Pour lui, la présence de colle sur le tissu de verre n'a donc aucune influence. Ceci explique ses résultats élevés, par rapport aux autres références. Il ne précise cependant pas les conditions exactes de polymérisation de son adhésif.

Réf.	Nature de la matrice	Pourcentage de fibre en volume (%)	Module longitudinal (MPa)	Contrainte à rupture (MPa)
Spaun [13]	Phénol-résorcine	55	30 184	446
Laufenberg [1]	Phénol-formol	40	41 846	1 002
Rowlands [14]	Formol-résorcine	-	30 184	412

Tableau 5 : Caractéristiques mécaniques du joint renforcé.

1 - 6 LE LAMELLE-COLLE DE PEUPLIER

1.6.1 Généralités

Un lamellé-collé est un assemblage de lamelles de bois que l'on colle l'une au-dessus de l'autre, souvent avec un adhésif phénolique, afin de reconstituer une poutre massive. Cette technique permet d'obtenir des éléments de grande longueur (par aboutage des lamelles) et donc, d'un point de vue architectural, de grandes portées. Ceci est évidemment impossible avec du bois massif, limité par la taille de l'arbre.

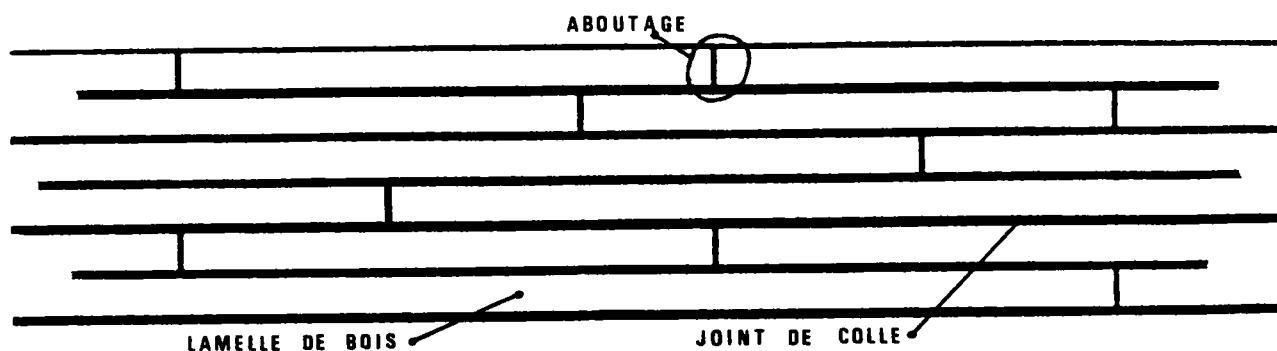


Figure 6 : Schéma d'une poutre lamellée-collée.

Les ouvrages sur les lamellés-collés sont relativement abondants. Cependant, les différents auteurs ont concentré leurs efforts sur quelques essences privilégiées, déjà utilisées dans la construction. Citons en exemple le sapin, le Douglas, le chêne, l'épicéa, le pin, l'érable...

Les genres habituellement réservés à des emplois annexes à cause de leurs qualités mécaniques médiocres, ont été aussi délaissés pour une utilisation en lamellé-collé. Le peuplier fait partie de cette dernière catégorie. C'est d'ailleurs l'une des raisons pour lesquelles il était intéressant de renforcer celui-ci, de manière à inciter à son utilisation dans des emplois plus nobles (charpentes, structures...).

1.6.2 Caractéristiques mécaniques

La constatation ci-dessus explique la rareté des résultats acquis sur du lamellé-collé spécifiquement de peuplier. Nous ne possédons qu'une valeur de module d'élasticité en flexion donnée par le C.T.B.A. : 8 500 MPa. A noter, comme c'est le cas pour la quasi-totalité des essences, que le module du lamellé-collé est plus fort que celui du bois massif correspondant.

Nous n'avons pas d'estimation de la contrainte à rupture, par contre la même source donne la contrainte admissible de flexion : 8,8 MPa et de traction : 5,5 MPa.

1 - 7 LE LAMELLE-COLLE RENFORCE

1.7.1 Généralités

L'idée de renforcer du bois reconstitué avec un matériau à haut module d'élasticité n'est pas nouvelle. En 1961, R.Mark [15] étudie des poutres composites bois-aluminium de sections rectangulaires; les plaques d'aluminium sont placées à l'extérieur. G.Lantos [16], en 1964, renforce du lamellé-collé sollicité en flexion avec des barreaux d'acier disposés à l'intérieur de la poutre dans la zone de traction.

F.F.Wangaard [17] (1964), E.J.Biblis [18] (1965) collent des lamelles composites époxy-fibre de verre sur les faces d'un bois massif. F.H.Theakston [19] (1965) place du tissu de fibre de verre dans les joints les plus éloignés de la fibre neutre d'une poutre. C.Boehme [20] (1974) introduit des mats de verre dans des panneaux de particules.

Toutes ces études datant d'une vingtaine d'années ont été délaissées :

- pour des raisons scientifiques en ce qui concerne les métaux, le renfort étant insuffisant avec des problèmes de collage.
- pour des raisons économiques avec la fibre de verre, celle-ci s'avérant trop chère à l'époque.

Une analyse économique dont nous parlerons au paragraphe 1.7.4, faite aux U.S.A. en 1984, tend à prouver qu'aujourd'hui la situation n'est plus la même.

Tous les résultats et les discussions du paragraphe 1.7.2, consacré à la littérature existante sur le bois renforcé, ne se rapporteront jamais à du peuplier. Le lamellé-collé de peuplier renforcé par de la fibre de verre n'existait pas encore. C'est précisément la raison de l'existence de notre travail : prouver sa faisabilité technique, son utilité et semble-t-il sa viabilité économique.

1.7.2 Caractéristiques mécaniques

Le composite est considéré comme un matériau multicouches orthotrope. Les grandeurs retenues sont le module dans le sens longitudinal (= longueur de la poutre) et la contrainte à rupture. La description des éprouvettes de chaque auteur est donnée tableau 6 (page suivante). Les résultats obtenus sont comptabilisés dans le tableau 7.

Auteurs	Pourcentage de renfort obtenu sur le module longitudinal en flexion (1)	Pourcentage de renfort obtenu sur le module longitudinal en traction (1)	Pourcentage de renfort obtenu sur la contrainte à rupture en traction (1)
Wangaard [17]	Tilleul : 50 % Hickory : -2 %	-	-
Biblis [18]	Douglas : 20 % Hickory : 6 %	-	-
Spaun [13]	Tsuga : 23 %	-	22 %
Rowlands [14]	Douglas : 6 %	28 %	85 %

(1) par rapport à la même éprouvette sans fibre

Tableau 7 : Résultats du renforcement de matériaux à base de bois par de la fibre de verre.

Le tableau 7 ne prend en compte que les spécimens renforcés avec deux couches de fibre de verre par joint, environ 1 mm d'épaisseur. Mais il faut signaler que le renfort varie avec le nombre de couches ; c'est-à-dire avec le rapport entre volume de bois et volume de fibre.

Le module d'élasticité du bois de départ influe largement sur le résultat : renforcer de l'hickory dont le module est déjà fort ($E_{\text{hickory}} = 20\,500 \text{ MPa}$) ne sert à rien. Par contre, sur un module plutôt faible ($E_{\text{tilleul}} = 8\,800 \text{ MPa}$), on obtient de bons résultats.

Enfin, les valeurs avancées pour la contrainte à rupture sont à regarder avec circonspection. En effet, le problème réside dans la définition de la contrainte à rupture, laquelle n'est pas précisée par les auteurs (point maximum de la courbe contrainte-déformation quelque soit son allure avant, ou bien première singularité de cette même courbe signifiant que l'éprouvette est "cassée", ou autre...).

Auteurs	Essences	Polymère constituant le joint (5)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Description
Wangaard [17]	Tilleul (2) Hickory (1)	époxy	400	25	2 surfaces composites fdv + époxy de 1mm d'épaisseur sont collées sur les faces d'une lamelle de bois de 23 mm d'épaisseur
Biblis [18]	Douglas (3) Hickory (1)	époxy	400	25	même éprouvette que Wangaard avec des surfaces composites de 1,5 mm et une lamelle de bois de 22 mm d'épaisseur
Spaun [13]	Tsuga (4)	phénol- résorcine	1 800	60	une lamelle centrale de 28 mm d'épaisseur est munie d'un placage de 3 mm sur les deux faces. Les joints sont renforcés, épaisseur 1 mm. (6)
Rowlands [14]	Douglas (3)	formol- résorcine	635	22	un lamellé-collé 5 plis de 5 mm chacun est renforcé dans les joints les plus éloignés de l'axe neutre (épaisseur 1 mm) (6)

(1) *Carya* sp.

(2) *Tilia americana* L.

(3) *Pseudotsuga menziesii*

(4) *Tsuga heterophylla*

(5) Tous les renforts sont obtenus avec de la fibre de verre incluse dans ces polymères.

(6) Certains plis contiennent une enture.

Tableau 6 : Caractéristiques des éprouvettes de flexion renforcées par fibre de verre.

1.7.3 Analyse théorique

La méthode analytique couramment employée pour prévoir les modules longitudinaux des composites renforcés émet l'hypothèse qu'il n'y a pas d'effet de couplage au niveau des interfaces bois-matériau de renfort, et la participation exacte de la colle à l'homogénéité de l'ensemble est ignorée.

Pourtant, il arrive que les différents auteurs fassent mention de problèmes de délamination. La qualité du joint de colle est donc importante. Il est même parfois nécessaire d'attaquer chimiquement la surface de la fibre de verre avant de l'introduire dans le joint de colle. Tous ces problèmes sont écartés dans une analyse théorique simple qui s'applique à des composites aux interfaces parfaites. Dans ce cas, la somme des rigidités de chaque matériau est égale à la rigidité de l'ensemble (voir [10]) :

$$E_T \cdot I_T = \sum_i E_i \cdot I_i \quad (1.8)$$

I_T est le moment d'inertie de l'ensemble et I_i celui de la $i^{\text{ème}}$ couche. On mesure donc expérimentalement les différents modules E_i de chaque couche pour en déduire le module résultant E_T . Cette équation, largement utilisée pour les composites multicouches orthotropes dans le domaine élastique, est celle que F.F.Wangaard [17], E.J.Biblis [18] et F.D.Spaun [13] adoptent.

Pour la flexion trois points, les modules sont obtenus par l'intermédiaire de la mesure de la flèche au centre de la poutre. L'équation, donnée par la résistance des matériaux, est alors (voir [22]) :

$$E_L = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot f \cdot I} \quad (1.9)$$

E_L : module d'élasticité longitudinal
 P : charge ponctuelle appliquée à $L/2$
 L : longueur entre appuis
 f : flèche au point milieu

La prévision théorique peut être améliorée par la prise en compte du cisaillement, si la géométrie de la poutre l'impose. C'est-à-dire, si le rapport L/h (h : hauteur de la poutre) est inférieur à 16. Dans ce cas, le module global se scinde en un module de flexion pure E_L plus un module de cisaillement G . La flèche totale enregistrée est la somme de la flèche due à la flexion pure et de celle due au cisaillement, donc :

$$\frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E_T \cdot L_T} = f = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E_L \cdot L_T} + \frac{P \cdot L}{4 \cdot G \cdot A} \quad (1.10)$$

E.J.Biblis mesure G expérimentalement en testant des éprouvettes de rapports L / h différents. De (1.10) il vient :

$$\frac{1}{E_T} = \frac{1}{E_L} + \frac{1,2}{r^2 \cdot G} \quad \text{avec} \quad r = \frac{L}{h} \quad (1.11)$$

En traçant la droite $1 / E_T = f (1 / r^2)$, la pente donne G et l'ordonnée à l'origine E_L . Enfin l'équation (1.8) peut s'adapter à un essai de traction :

$$E_T \cdot A_T = \sum_i E_i \cdot A_i \quad (1.12)$$

A_i : section droite de la i^{ème} couche.
 A_T : section droite du composite.

Le tableau 8 présente les résultats obtenus avec ce modèle d'addition des rigidités.

Auteurs	Module expérimental du composite en flexion (MPa)	Module théorique du composite en flexion (MPa)	Ecart (%)
Wangaard [17]	Tilleul : 13 219 Hickory : 19 524	12 163 21 328	- 8,0 + 9,2
Biblis [18]	Douglas : 19 908 Hickory : 22 707	20 333 22 611	+ 2,1 - 0,4
Spaun [13]	Tsuga : 16 944	16 395	- 3,2

Tableau 8 : Prévisions théoriques des modules d'élasticité des composites.

Comme on peut le constater, l'équation (1.8) donne des résultats satisfaisants. Par contre, pour l'évaluation théorique de la contrainte à rupture du composite, aucune approche n'a été développée de façon significative.

1.7.4 Analyse économique

Une étude de faisabilité industrielle a été menée par T.L.Laufenberg [1]. Celle-ci concerne la fabrication de poutres sandwiches, entièrement en Douglas, constituées d'une lamelle centrale de 4 cm d'épaisseur et d'un placage de 3 mm. Le renfort est réalisé avec de la fibre de verre (2 couches) incluse dans un adhésif phénol-formaldéhyde et placée sous le placage.

La combinaison fibre de verre-phénol-formaldéhyde constitue, selon l'auteur, le meilleur rapport qualité-prix : $0,76 \text{ F} / \text{m}^3 / \text{MPa}$. L'ensemble est collé par presse chauffante.

Nous pensons qu'il est hors de question, dans le cadre de ce travail, d'entrer dans le détail de l'analyse et d'aligner des chiffres valables en 1981 sur la côte ouest des Etats-Unis. Ceux-ci ne seraient pas représentatifs de ce qui pourrait se faire en France en 1989. Par contre, la description schématique de la méthode et les conclusions peuvent s'avérer intéressantes.

En premier lieu, T.L.Laufenberg définit un coût total pour le terrain d'implantation de l'usine, les bâtiments et l'équipement. Suit un schéma d'amortissement dégressif pendant les cinq premières années puis linéaire à partir de la sixième.

Le capital d'exploitation est égal à 10 % du coût annuel de la fabrication. Les taxes, impôts et T.V.A. s'élèvent à 51 %. L'inflation est arrêtée à 8 % par an. Les frais commerciaux sont de 7 %. Le coût de la représentation et de la publicité est de sept cent mille francs la première année puis décline linéairement. Sont également pris en compte les frais administratifs, de recherche, de maintenance etc...

En conclusion, la fabrication d'un tel composite, à base de bois renforcé par fibre de verre, peut être rentable. Deux conditions doivent alors être satisfaites. La matière première ne doit pas être le bois brut directement acheté à une scierie, sa transformation en lamelles coûtant trop cher. Il faut donc s'approvisionner en lamelles prêtes à l'emploi, de dimensions standardisées, provenant d'une entreprise intermédiaire. Deuxièmement, il est préférable de prendre du bois de mauvaise qualité, la valeur ajoutée du produit fini étant d'autant plus forte.

En respectant ces remarques, la rentabilité interne du produit, ce que les pays anglo-saxons appellent " Internal Rates of Return (IRR) ", devient identique à celle d'un composite non renforcé. $\text{IRR} = 113,6 \%$ pour un matériau traditionnel sans fibre, $\text{IRR} = 113,0 \%$ pour le même produit avec fibre.

1 - 8 CONCLUSION

Comme nous pouvons le constater, notre bibliographie présente un aspect hétérogène dû à l'absence d'informations et de travaux sur le comportement mécanique de nos matériaux d'une part, et à la grande variété aussi bien des fibres, des adhésifs que des bois d'autre part. Malgré la relative dispersion des résultats, les études menées sur des composites, à base de bois renforcé par fibre de verre, présentent des aspects positifs :

- la faisabilité est démontrée bien qu'il y ait parfois des problèmes de délamination.
- le renfort obtenu est effectif, aussi bien sur le module d'élasticité que sur la contrainte à rupture.
- la viabilité économique semble possible.
- la modélisation est satisfaisante dans le domaine élastique.

Au vu de ces conclusions, un certain nombre de résultats originaux peuvent être apportés. Ceci sera le but des trois chapitres qui vont suivre.

Premièrement, il était important de connaître exactement et de façon systématique les caractéristiques mécaniques de la fibre, de la colle et du peuplier spécifiques que nous avions au départ. Aussi avons-nous entrepris une étude complète du comportement en traction et en flexion d'un adhésif phénol-formol-résorcine et d'un joint renforcé par fibre de verre, ceci en fonction du temps de stabilisation de la colle sur une durée de 6 mois.

Nous avons également regardé le comportement en traction de la fibre seule. Enfin, le peuplier a été caractérisé en traction et en flexion sans aller jusqu'à rupture de manière à utiliser pour la fabrication de notre composite ces lamelles parfaitement connues.

Le composite étudié est un lamellé-collé de peuplier (à notre connaissance cette essence n'a jamais été utilisée dans ce contexte). Le nombre important des essais nous a permis une étude (en flexion et en traction) en fonction des dimensions des poutres (5,7 et 9 plis) et en fonction de l'épaisseur du joint renforcé (1 ou 2 couches de fibre de verre).

Pour terminer, outre la modélisation dans le domaine élastique, une approche quantitative du comportement à la rupture est avancée.

CHAPITRE 2
COMPORTEMENT EN TRACTION
DES MATERIAUX CONSTITUTIFS
DU LAMELLE-COLLE RENFORCE

2 - 1 LA FIBRE DE VERRE

2.1.1 Description

Nous avons utilisé pour nos essais un tissu unidirectionnel UC 420-791 de la société Sotiver (Lyon). Celui-ci se présente sous la forme d'un ensemble de petites et de grosses mèches intercalées et parallèles les unes aux autres (fig.7). Le tissu est simplement maintenu en place par quelques fils transversaux. Il s'agit d'un verre de type E. Le traitement de surface nous est inconnu.

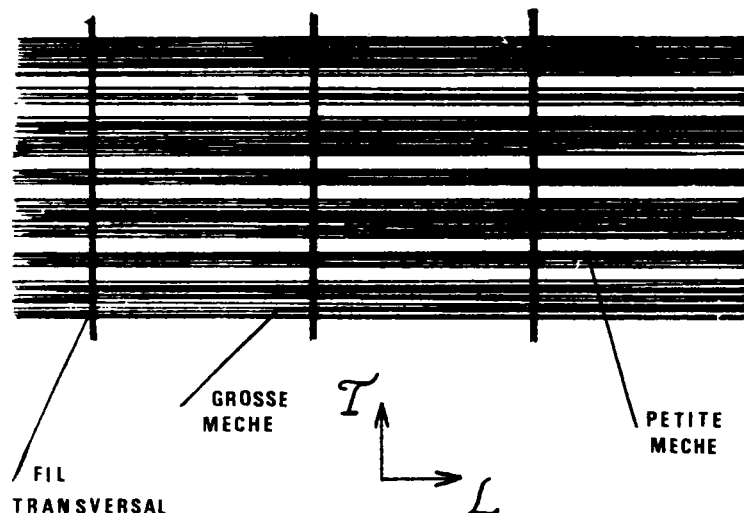


Figure 7 : Représentation schématique du tissu de fibre de verre.

L'épaisseur moyenne du tissu est de 0,55 mm, sa masse surfacique 420 g / m². On dénombre 3,4 mèches par centimètre en largeur et 1,6 fils transversaux par centimètre en longueur. Nous pouvons en déduire la densité du tissu UC 420-791 : 0,76.

Il n'est évidemment pas question de considérer le tissu comme un matériau homogène. Aussi, lors du calcul de la surface sollicitée dans un essai de traction, il faudra multiplier la section droite d'une fibre par le nombre de fibres présentes dans la surface en question.

La mesure du diamètre d'une fibre a été réalisée sur microscope optique à fort grossissement muni d'un viseur micrométrique. La moyenne sur 20 mesures donne un diamètre $\phi = 16 \mu\text{m}$.

Pour le décompte du nombre de fibres, la situation est un peu plus complexe. Le dénombrement direct, manuel, est irréalisable. Cependant une petite mèche est constituée de deux fils unitaires. Nous avons donc isolé un fil unitaire et totalisé sur 10 mesures une moyenne de 70 fibres. Une petite mèche comportera donc 140 fibres.

Nous avons ensuite pesé le poids de 1 m d'une petite mèche : 70 mg. Si nous convertissons en tex cela donne 70 teks. Le tex est une unité de mesure employée par les industriels fabriquant des tissus de fibres, 1 tex = 1 g par kilomètre de fibre. La même opération pour une grosse mèche donne 1 100 teks. Une simple règle de trois nous permet de trouver 2 200 fibres pour une grosse mèche.

2.1.2 Montage expérimental

Nous avons réalisé l'essai de traction sur une machine Instron 4 302 pilotée par ordinateur. Celui-ci acquiert une donnée par seconde et trace la courbe charge-déplacement en temps réel. La vitesse de chargement est de 1 mm / mn.

Les éprouvettes sont de simples rectangles de tissu de 25 cm de long sur 2 cm de large. La seule difficulté réside dans la façon d'amarrer celles-ci dans les mors. Afin d'éviter le glissement des têtes dans les mâchoires, il faut enduire le tissu avec un matériau adhésif. Nous avons choisi pour ce faire la colle résorcine elle-même. C'est l'adhésif qui servira à fabriquer le composite. Ce procédé a donné entière satisfaction. Cela constitue d'ailleurs une preuve indirecte de la qualité de l'interface fibre-colle.

Etant donnée la rigidité extrêmement faible d'un tel matériau, il est impossible de fixer un capteur de déplacement de type mécanique ou une jauge d'extensométrie. La seule solution aurait été un capteur sans contact, par exemple optique. Solution fort coûteuse. C'est la raison pour laquelle nous avons pris le déplacement de la traverse comme mesure de l'allongement. Cette approximation se justifie dans la mesure où les charges maximales enregistrées sont relativement basses par rapport à la capacité de la machine et également parce que la fibre présente une courbe de comportement parfaitement linéaire jusqu'à la rupture (matériau fragile).

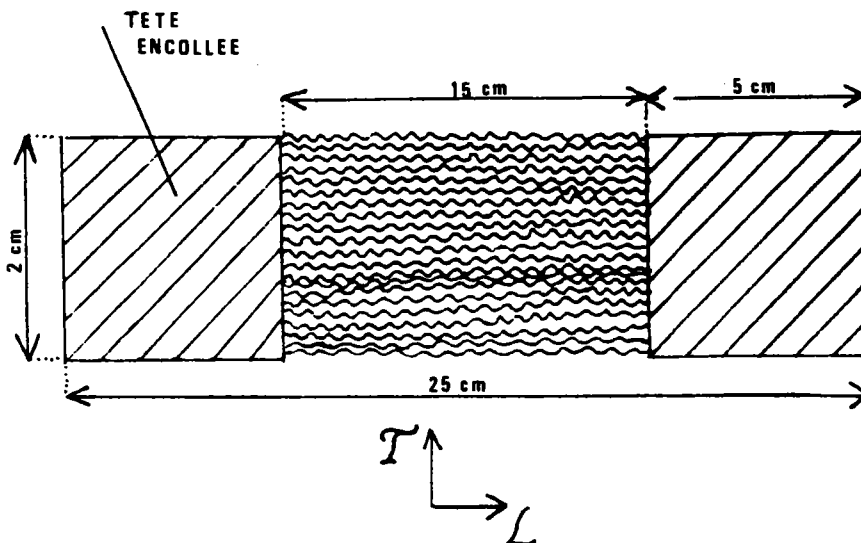


Figure 8 : Epreuve de traction en fibre de verre.

2.1.3 Résultats

32 éprouvettes ont été testées. Ce nombre nous autorise une présentation des résultats sous forme statistique. La figure 9 donne un exemple d'histogramme expérimental sur lequel nous avons ajusté deux calculs statistiques couramment employés pour des grandeurs mécaniques : Gauss et Weibull.

Rappelons très brièvement les équations qui régissent ces deux lois. La fonction densité de probabilité de Gauss est donnée par :

$$f(x) = \frac{1}{\Delta^G \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x - \bar{x}^G}{\Delta^G} \right]^2} \quad (2.1)$$

où x est la variable, Δ^G et $\bar{x}^G$ l'écart type et la moyenne, définis dans la liste des symboles page 4. L'aire sous la courbe est normée à 1, probabilité maximale. La fonction densité de probabilité cumulée, c'est-à-dire la probabilité que x soit inférieur ou égal à une valeur X fixée, est :

$$\Pr(x \leq X) = F(X) = \frac{1}{\Delta^G \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^X e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{t - \bar{x}^G}{\Delta^G} \right]^2} \cdot dt \quad (2.2)$$

Les valeurs de $F(X)$, quand X varie de façon discrète, sont tabulées dans la référence [23]. Ceci permet de tracer une droite sur laquelle s'alignent les points expérimentaux si ceux-ci obéissent à la statistique considérée. En pratique, il s'agit donc d'évaluer les probabilités cumulées expérimentales à l'aide de l'équation :

$$\Pr(x \leq X) = \frac{n_c + \frac{1}{2}}{N + 1} \quad (2.3)$$

où n_c est le nombre d'échantillons dont la propriété x est inférieure ou égale à X , et N le nombre total d'échantillons (voir [24]). Puis, on calcule la droite des moindres carrés passant par ces points. L'ordonnée à l'origine et la pente de cette droite donnent la moyenne $\bar{x}^G$ et l'écart type Δ^G .

En ce qui concerne la statistique de Weibull, la fonction densité de probabilité est :

$$f(x) = \frac{m \cdot x^{m-1}}{\omega^m} \cdot e^{-\left[\frac{x}{\omega}\right]^m} \quad (2.4)$$

m est un paramètre de forme et ω un paramètre d'échelle. L'équation (2.4) est la formulation de la statistique de Weibull à deux paramètres. Il existe une formule à trois paramètres dont nous ne nous servirons pas ici. Celle-ci fait intervenir une valeur x_0 en-dessous de laquelle $\Pr(x < x_0) = 0$ (valeur seuil). La fonction densité de probabilité cumulée à deux paramètres s'écrit :

$$\Pr(x \leq X) = F(X) = 1 - e^{-\left[\frac{X}{\omega}\right]^m} \quad (2.5)$$

A nouveau, à l'aide de l'équation (2.3) et en prenant deux fois le logarithme népérien des deux membres de l'équation (2.5), les points expérimentaux s'alignent sur une droite qui nous permet de déterminer m et ω . La moyenne de Weibull est définie par :

$$\bar{x}^w = \omega \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (2.6)$$

l'intégrale $\Gamma(x)$, fonction mathématique "gamma", est répertoriée (voir [23]) :

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \cdot e^{-t} \cdot dt \quad (2.7)$$

l'écart type est donné par :

$$\Delta^w = \sqrt{\omega^2 \cdot \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right]} \quad (2.8)$$

Les fonctions densité de probabilité de Gauss et de Weibull sont donc tracées sur l'histogramme expérimental des modules d'élasticité figure 9. Bien que l'évaluation de la moyenne chez Weibull soit un peu moins bonne, nous donnons la préférence à cette statistique qui a l'avantage de rendre mieux compte de la dissymétrie et de la dispersion des résultats expérimentaux.

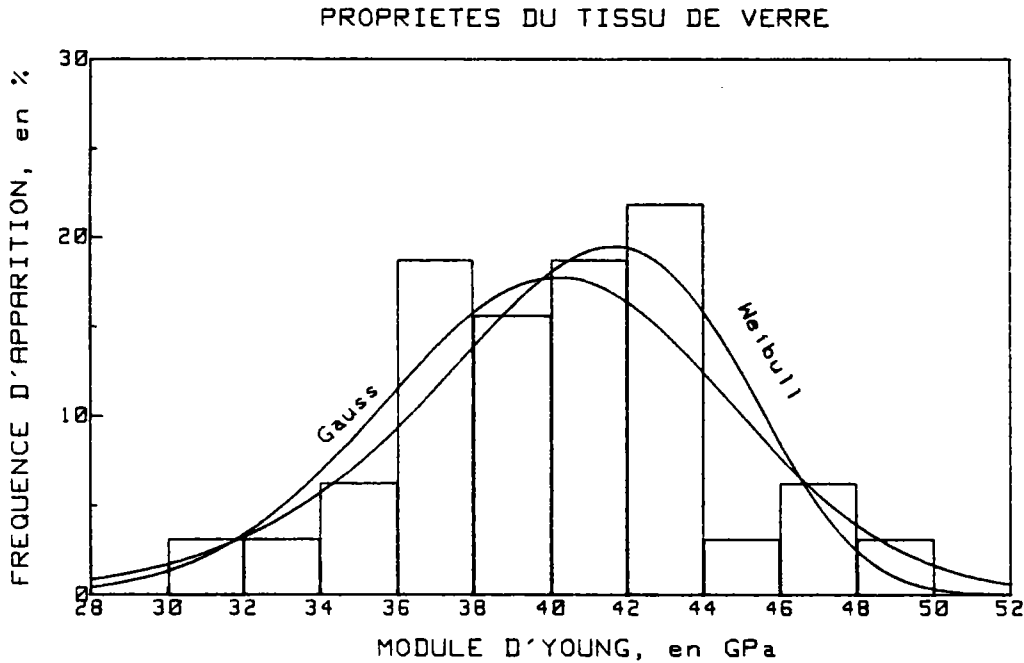


Figure 9 : Histogramme et statistiques sur le module d'élasticité longitudinal du tissu de verre.

		Résultats expérimentaux	Loi de Gauss	Loi de Weibull
module d'Young	moyenne (MPa)	40 199	40 185	40 120
	écart type (MPa)	4 027	4 491	4 371
contrainte à rupture	moyenne (MPa)	920	909	918
	écart type (MPa)	129	168	134

Tableau 9 : Résultats des essais de traction sur la fibre de verre.

Le tableau 9 résume les valeurs que nous avons trouvées. Les modules d'Young sont calculés par une droite des moindres carrés sur la totalité de l'essai. A noter les valeurs du paramètre m de Weibull : 11,09 pour le module d'élasticité et 7,91 pour la contrainte à rupture. La figure 10 donne un exemple de courbe contrainte-déformation pour la fibre de verre. Cette courbe est construite à l'aide des équations traditionnelles :

pour la déformation :

$$\varepsilon = \frac{\delta l}{l_0} \quad (2.9)$$

pour la contrainte :

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.10)$$

Nous tenons compte d'une éventuelle réduction de section lorsqu'une mèche du tissu cède. Le calcul est le suivant :

$$A_f = \frac{\pi}{4} \cdot \phi^2 \cdot [2\,200 \cdot g + 140 \cdot p] \quad (2.11)$$

g = nombre de grosses mèches présentes dans l'éprouvette à l'instant t

p = nombre de petites mèches présentes dans l'éprouvette à l'instant t

ϕ = diamètre d'une fibre

A_f = section droite à l'instant t

Enfin, les résultats sur la contrainte à rupture sont détaillés figure 11. La règle générale adoptée tout au long de cette étude est de définir la contrainte à rupture comme la première singularité significative de la courbe contrainte-déformation. Exceptionnellement, pour la fibre de verre, celle-ci est définie comme le point maximum de la courbe. Ceci est dû à la linéarité presque parfaite et sans défaut de la courbe jusqu'à rupture. Il s'ensuit également que la contrainte à la limite élastique est supposée identique à la contrainte à rupture (comportement parfaitement fragile). Ici encore, la statistique de Weibull semble plus appropriée.

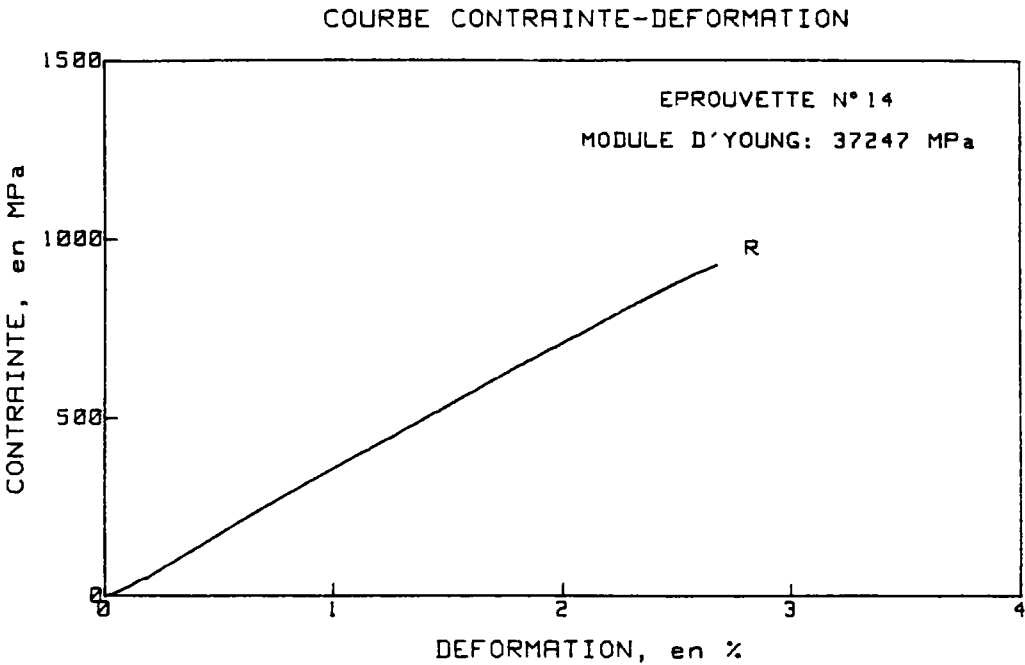


Figure 10 : Courbe contrainte-déformation d'une éprouvette de fibre de verre en traction.

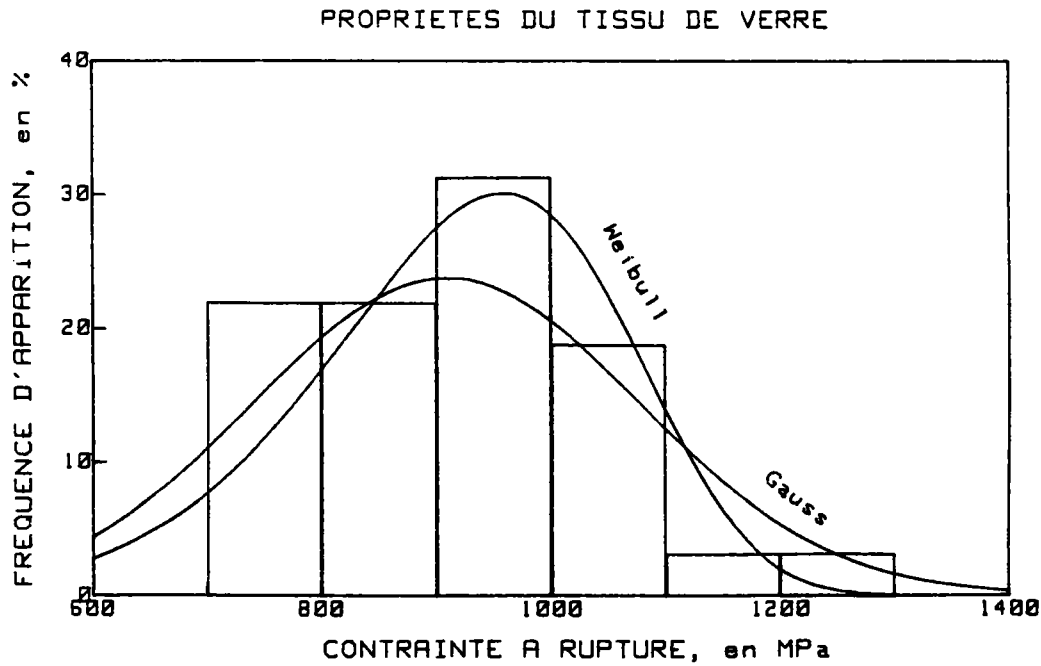


Figure 11 : Histogramme et statistiques sur la contrainte à rupture du tissu de verre.

2.1.4 Discussion

Comme on peut le voir sur le tableau 9, nos résultats sont en accord avec ceux de la littérature, présentés dans le tableau 1. Lors de la modélisation de notre composite nous prendrons donc $E_f = 40\ 200\text{ MPa}$ et $\sigma_f^r = \sigma_f^e = 920\text{ MPa}$. Notons enfin la relativement grande dispersion des résultats pour un tel matériau. Nous attribuons ceci au fait que lors de l'encollage des têtes des éprouvettes, les mèches du tissu ne sont pas rigoureusement parallèles les unes aux autres. Ce qui revient à dire qu'après polymérisation de la colle, certaines parties du tissu sont inévitablement plus contraintes que d'autres. Ces précontraintes, distribuées de façon inhomogène sur la largeur de l'éprouvette, sont vraisemblablement à l'origine de la dispersion des résultats.

2 - 2 LA RESORCINE

2.2.1 Description

L'adhésif employé pour l'ensemble des collages que nous avons eu à réaliser est l'Enocol RLF 185 de la société Ceca (Paris). C'est un mélange triple résorcine-phénol-formol. D'aspect liquide visqueux, il se combine avec un durcisseur en poudre DP 155. Sa densité à l'état liquide est 1,14. Le grammage varie suivant l'état des surfaces de 300 à 800 g / m².

La colle peut polymériser à froid pendant 8 h à 20° C sous une pression de 7 à 14 bars. Elle peut aussi s'utiliser pour des collages à chaud (presse haute fréquence) jusqu'à 1 mn 30 à 100° C. Une stabilisation de 24 h est conseillée avant desserrage. C'est un produit destiné au collage du bois pour des applications en extérieur.

2.2.2 Fabrication des éprouvettes

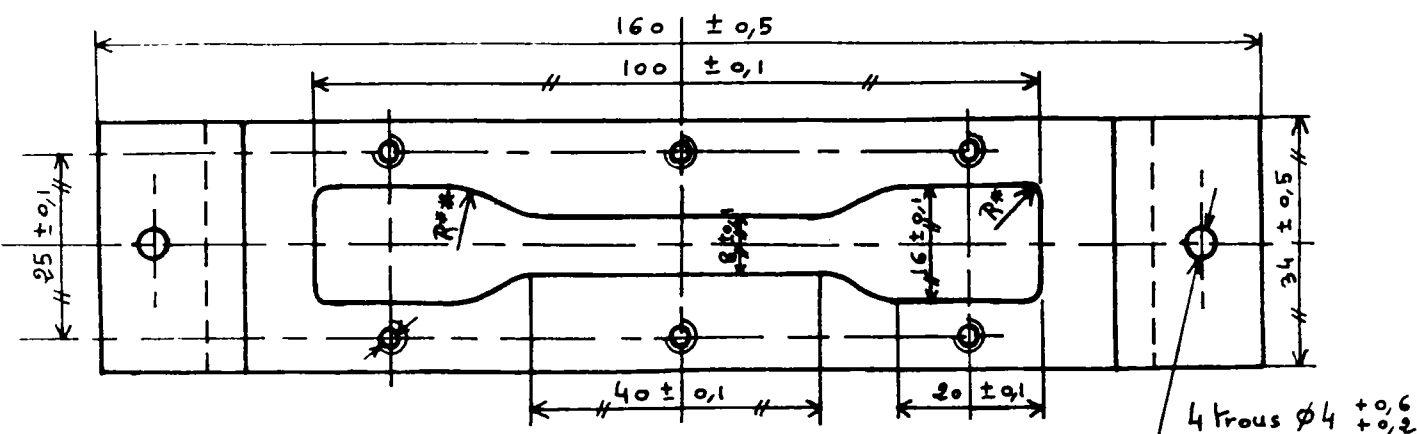


Figure 12 : Moule de traction servant à la fabrication des éprouvettes en colle massive.

Les éprouvettes de traction en résorcine massive ont été fabriquées à l'aide d'un moule dont les dimensions sont indiquées sur la figure 12. L'aluminium nous a semblé un bon matériau pour la construction de celui-ci. En effet, l'aluminium résiste bien à la corrosion par les vapeurs de formol lors de la polymérisation, il constitue un substrat sur lequel la colle adhère très mal (le démoulage est ainsi facilité) et de plus il est léger.

Une difficulté s'est rapidement présentée lors des essais préliminaires : les poches gazeuses (air) formées pendant le mélange des deux composants (colle et durcisseur) avaient tendance à se regrouper à la surface du moule et à former de cette manière une couche poreuse qu'il fallait éliminer. D'autre part la même expérience menée avec des fibres isolées, prélevées sur le tissu, voyait celles-ci se déposer en paquets au fond du moule. Il était donc impossible d'obtenir une éprouvette homogène.

Nous avons pallié à ces inconvénients en plaçant le moule sur un petit dispositif rotatif (figure 13). Le montage, actionné par un moteur, tourne à raison de 5 tours / mn. Cette faible rotation suffit à annuler l'effet de la pesanteur sans toutefois créer de force centrifuge prédominante. L'éprouvette reste ainsi pendant 8 h dans un état "figé", celui de l'instant initial de mise en route du moteur, jusqu'à complet durcissement.

La plus grosse partie des bulles d'air, présentes au départ, est d'abord éliminée en laissant reposer le mélange quelques minutes. Le reste est réparti de façon homogène sous forme de microbulles grâce au système décrit ci-dessus. Dans le cas d'une éprouvette renforcée, les fibres sont elles aussi dispersées dans tout le volume de manière homogène.

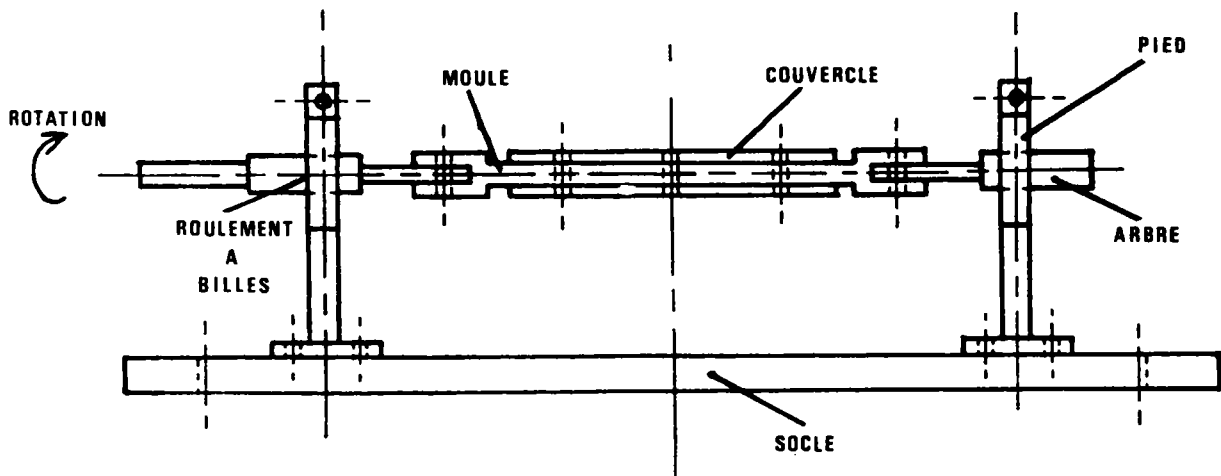


Figure 13 : Montage rotatif permettant d'obtenir des éprouvettes homogènes.

2.2.3 Conservation des éprouvettes

Une fois fabriquées et démoulées, les éprouvettes se sont avérées inutilisables en l'espace de quelques heures. Ceci à cause des fortes contraintes résiduelles et du retrait volumique, déformant totalement l'échantillon et le fissurant.

Nous avons donc mis au point un moule de conservation (fig.14). Celui-ci est conçu de manière à brider les éprouvettes latéralement et suivant l'épaisseur. La direction longitudinale (= axe de traction) est laissée libre. De plus, la force appliquée s'adapte aux changements de dimensions au cours du temps grâce à un système de serrage par ressort. Cette disposition permet de conserver en parfait état les éprouvettes pendant plus de 6 mois.

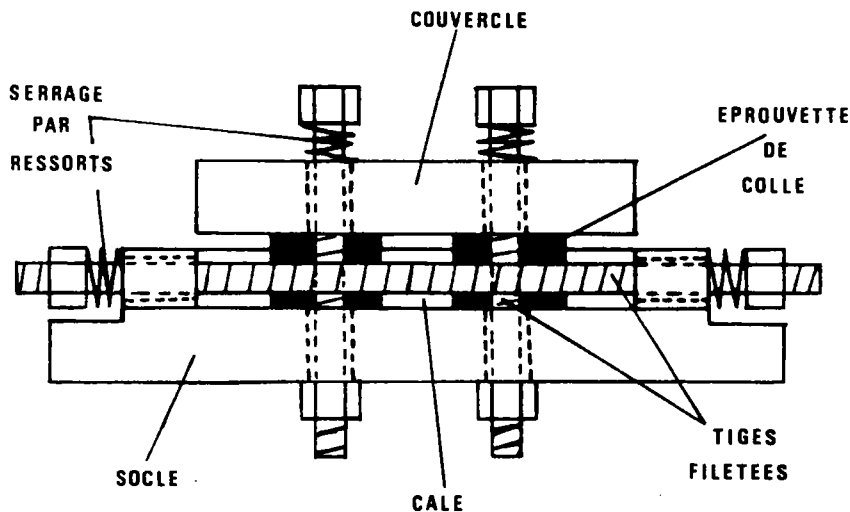


Figure 14 : Moule de conservation des éprouvettes en colle massive.

2.2.4 Montage expérimental

Les éprouvettes sont sorties de leur moule de conservation 3 à 5 minutes avant l'essai. Elles sont mesurées puis positionnées dans les mors sans avoir le temps de s'altérer. La machine et le matériel informatique sont les mêmes qu'au § 2.1.2.

Le déplacement est mesuré par un extensomètre Instron type 2620-601. L'ouverture est de 12,5 mm et l'étendue de mesure ± 5 mm. Les équations permettant de tracer la courbe de comportement sont les mêmes qu'au § 2.1.3. Seul le calcul de la section droite de la partie utile change : $A = b \cdot e$ (2.12).

Au moment de l'essai, les dimensions des éprouvettes varient suivant le temps de stockage dans le moule de conservation. . Approximativement, la partie utile est de l'ordre de 5,0 mm x 7,1 mm x 34,4 mm.

2.2.5 Résultats

7 éprouvettes ont été testées. La figure 15 donne un exemple de courbe contrainte-déformation obtenue avec les équations (2.9) et (2.10).

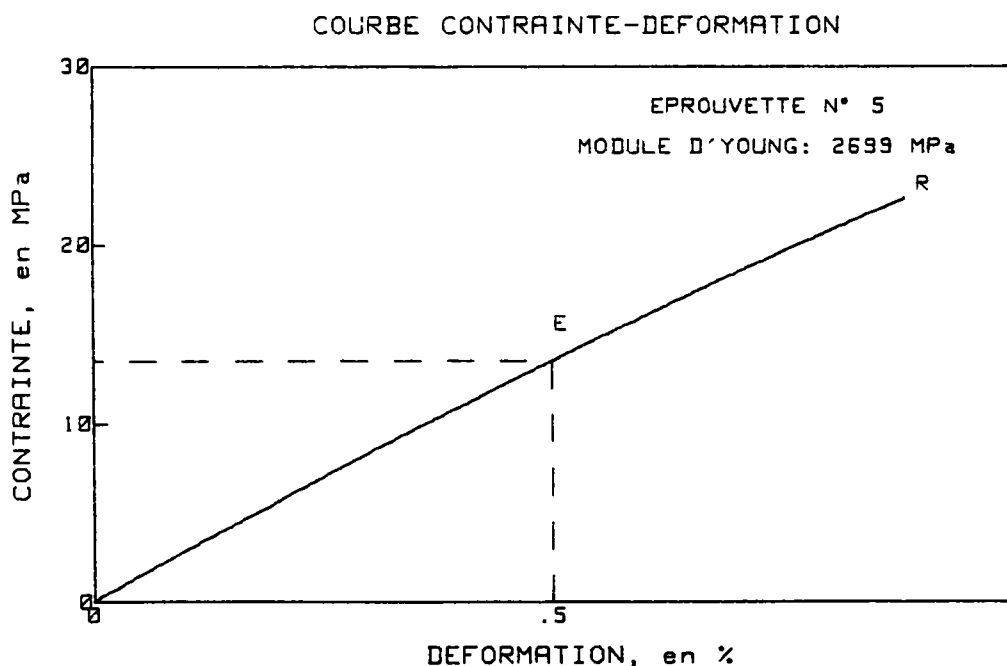


Figure 15 : Comportement de la résorcine pure, massive, en traction.

Le module d'Young est calculé par une droite des moindres carrés jusque la limite élastique. Celle-ci est définie comme étant le point de la courbe de comportement à partir duquel le coefficient de corrélation de la droite chute de 0,001. Ce point donne également la contrainte à la limite élastique : σ^e (point repéré E sur la figure 15). La figure 16 donne l'évolution du module d'élasticité en fonction du temps de stabilisation de l'éprouvette dans le moule de conservation.

La figure 17 montre la variation de la contrainte à la limite élastique, définie ci-dessus, en fonction du temps. Nous considérons, comme l'indiquent les pointillés, que la stabilisation est obtenue au bout de 3 mois de stockage.

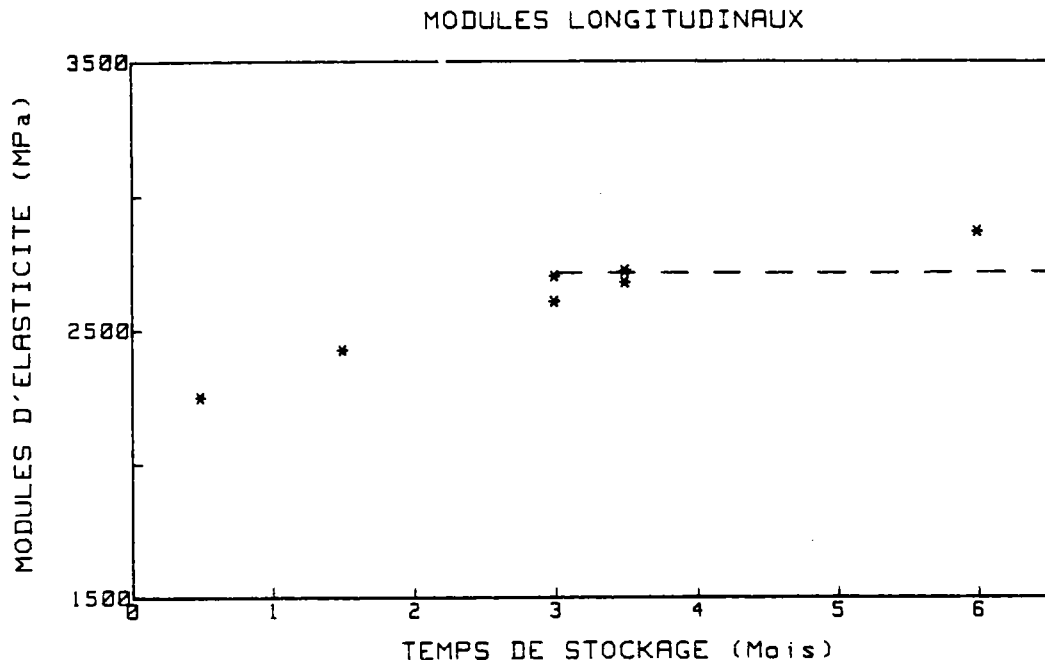


Figure 16 : Evolution du module d'Young de la résorcine en fonction du temps de stockage.

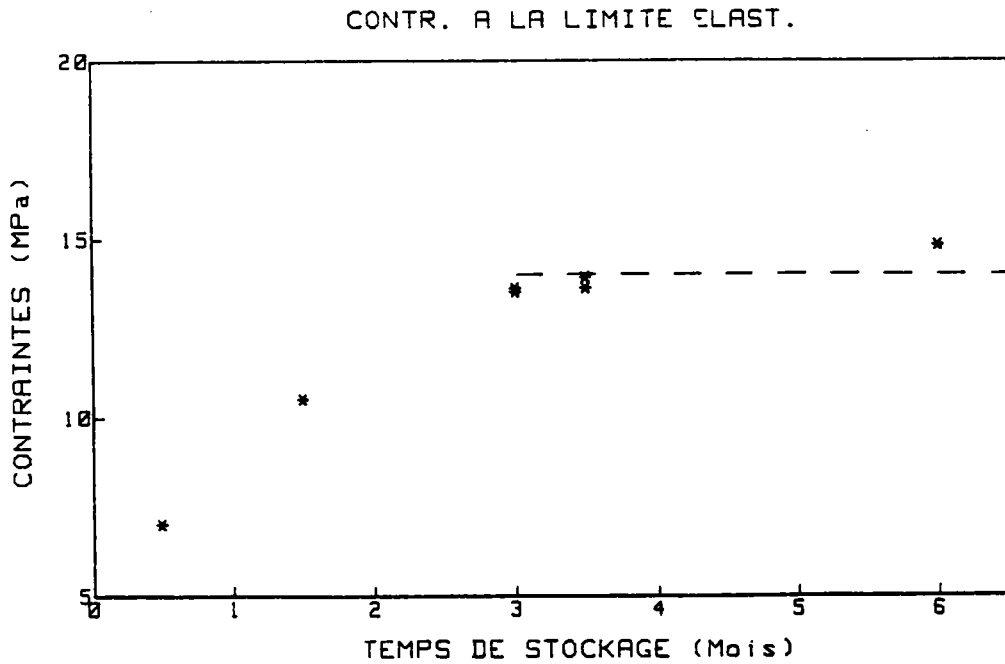


Figure 17 : Evolution de la contrainte à la limite élastique de la résorcine en fonction du temps de stockage.

Nous prenons comme contrainte à rupture, la première singularité significative de la courbe contrainte-déformation (point R sur la figure 15). Expérimentalement, cette grandeur mécanique ne présente que des valeurs aléatoires en fonction du temps. Il semble que ce paramètre soit très sensible à la présence de microbulles, localement présentes ou non à l'endroit de la rupture. Son évolution en fonction du temps est alors totalement cachée par ce phénomène. Nous pouvons cependant donner la moyenne des 7 essais : 17 ± 5 MPa.

Enfin, nous avons mesuré le retrait volumique de la partie utile des éprouvettes, toujours en fonction du temps. Celui-ci est obtenu par la formule :

$$u = \frac{V - V_0}{V_0} \cdot 100 \quad (2.13)$$

V = volume au temps t , juste avant l'essai
 V_0 = volume à la sortie du moule de fabrication
 u = retrait volumique en %

V_0 correspond aux dimensions du moule de la figure 12. C'est-à-dire 6 mm x 8 mm x 40 mm. Donc $V_0 = 1,92 \text{ cm}^3$. Les résultats sont résumés figure 18.

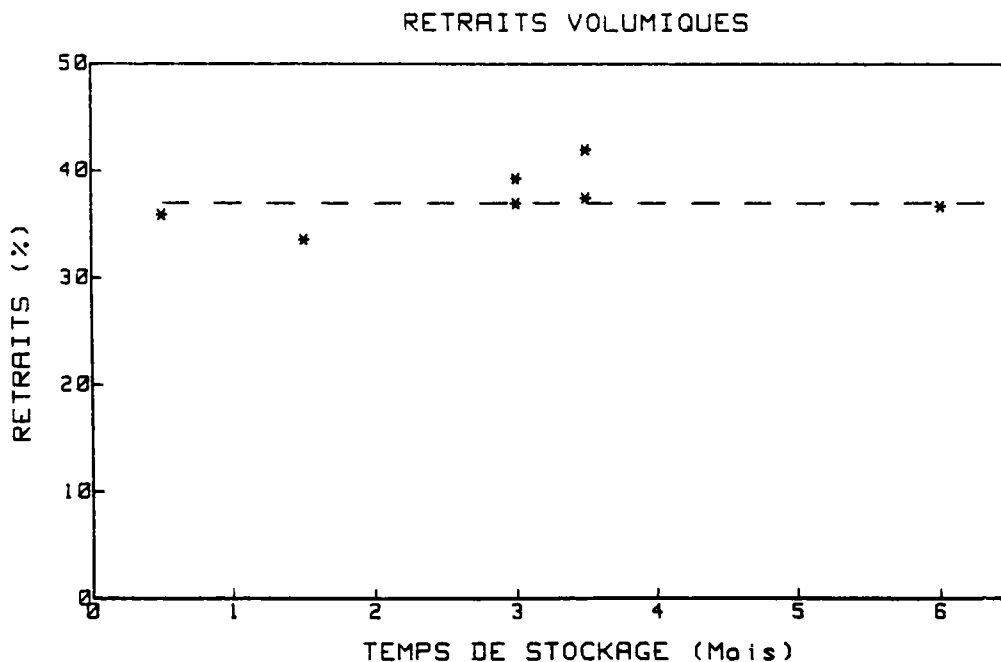


Figure 18 : Retraits volumiques des éprouvettes de traction en fonction du temps de stockage.

2.2.6 Discussion

La figure 18 indique que la stabilisation du retrait volumique s'obtient après 15 jours. Nous définirons donc le retrait volumique de la résorcine comme la moyenne des résultats obtenus à partir de cette date. Celui-ci est visualisé sur le graphique par la droite horizontale en pointillé. On trouve $37 \pm 4 \%$.

Le module d'élasticité (fig.16) est stabilisé après 3 mois. De la même manière que pour le retrait volumique, nous prendrons le module d'Young de la résorcine en traction égal à la moyenne des valeurs obtenues à partir de $t = 3$ mois. Ceci nous donne $E_c = 2712 \pm 130$ MPa, chiffre en parfait accord avec ceux du tableau numéro 2 de la bibliographie.

La contrainte à la limite élastique (fig.17), également stabilisée après trois mois de stockage, est de 14 ± 1 MPa. Cette valeur, comparée à la contrainte à rupture expérimentale et à l'observation de la courbe de la figure 15, montre que la colle peut être assimilée à un matériau fragile, avec une petite partie non-linéaire de la courbe de comportement peu avant la rupture.

2 - 3 LE JOINT RENFORCE

2.3.1 Détermination du taux de fibre

Afin de fixer le pourcentage optimum de fibre de verre dans le joint de colle, nous avons effectué des séries d'essais de cisaillement sur des éprouvettes constituées de deux morceaux de peuplier assemblés avec des joints contenant divers taux de fibre (fig.19).

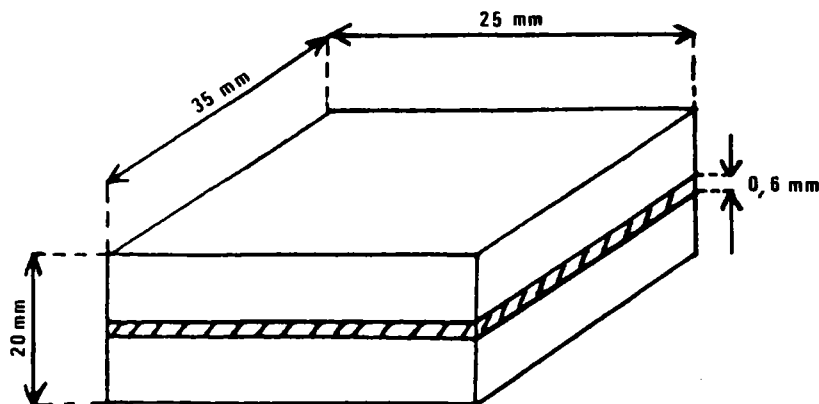


Figure 19 : Eprouvette de cisaillement en peuplier avec joint renforcé.

Le schéma expérimental se décompose en :

- 13 échantillons sans fibre (référence)
- 12 échantillons contenant environ 40 % de fibre dans le joint
- 7 échantillons contenant environ 45 % de fibre dans le joint
- 13 échantillons contenant environ 50 % de fibre dans le joint
- 12 échantillons avec 40 % de fibre, traitée au préalable avec un agent chimique d'accrochage (le N - [3 - (Trimethoxysilyl) propyl] - ethylenediamine)

La détermination de la fraction volumique de fibre n'est qu'approximative. Ceci ne présente pas d'inconvénient, le but étant ici de définir un éventuel optimum. L'évaluation s'effectue comme suit. Le volume de fibre est constant, c'est celui d'un morceau de tissu de 25 mm x 35 mm. Soit :

$$V_f = N \cdot \lambda \cdot \pi \cdot \frac{\phi^2}{4} \quad (2.14)$$

N = nombre de fibres contenues dans 25 mm de tissu (en longueur)

λ = longueur d'une fibre (35 mm)

ϕ = diamètre moyen d'une fibre (cf. § 2.1.1)

On trouve $V_f = 0,14 \text{ cm}^3$. Par contre, nous faisons varier la quantité de colle destinée au collage. Chaque quantité est pesée et le volume de colle est donné par :

$$V_c = \frac{M_c}{d} \quad (2.15)$$

d est la densité de la colle (cf. § 2.2.1), M_c sa masse. La fraction volumique de fibre dans le joint est alors :

$$u_f = \frac{V_f}{V_c + V_f} \quad (2.16)$$

Remarquons que dans l'évaluation de M_c nous tenons compte d'un facteur de perte de 20 %. C'est la quantité de colle approximative qui s'échappe hors du joint lors de la fabrication des éprouvettes. Bien sûr, ce chiffre n'est pas absolu. C'est une simple estimation issue de l'observation et de l'expérience de l'expérimentateur. Toutefois, il a l'avantage de tenir compte dans une certaine mesure de la réalité de la technique du collage. De plus, nous introduisons dans l'évaluation de V_c un retrait volumique moyen de 30 %. Ce chiffre est en accord avec les valeurs expérimentales trouvées aux paragraphes 2.3.4 et 3.2.3 .

L'évaluation de la contrainte à rupture en cisaillement des joints renforcés s'accompagne d'une observation qualitative du faciès de rupture. On considérera que la rupture s'est produite dans le bois si 80 à 100 % de la surface cisailée se situe dans le bois. Ceci correspond à l'indice b sur la figure 20. La rupture se produit dans le joint si 0 à 20 % seulement de la surface cisailée se situe dans le bois. Les cas intermédiaires, 20 à 80 % de la surface dans le bois, seront considérés comme rupture mixte (indice m sur la figure 20).

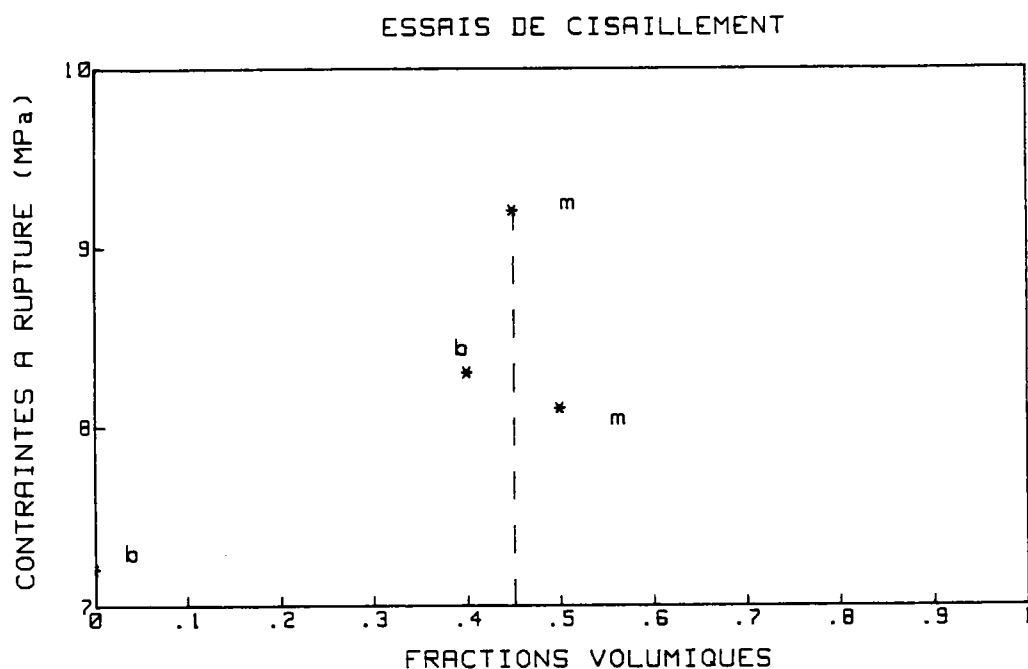


Figure 20 : Contrainte à rupture en cisaillement des joints de colle renforcés en fonction de la fraction volumique de fibre.

On peut observer l'existence d'un maximum aux alentours de 0,45. Ceci constitue un compromis "idéal" entre une quantité de colle suffisante pour mouiller correctement le volume total et un nombre de fibres donnant lieu à un renforcement appréciable. La contrainte à rupture passe de $7,2 \pm 0,5$ MPa pour un joint sans fibre à $9,2 \pm 0,5$ MPa, soit une augmentation de 27,7 %.

Mentionnons pour terminer les résultats obtenus en traitant le tissu de verre avec un agent chimique à base de silane : le N-[3-(Triméthoxysilyl)Propyl] - éthylenediamine. Ceci dans l'espoir d'attaquer la surface du verre de façon à créer des sites d'accrochages pour améliorer l'interface fibre-colle. L'effet est inverse de celui attendu, la contrainte à rupture chute à $3,2 \pm 0,5$ MPa soit - 55,5 %.

Cependant, la fraction volumique ainsi calculée faisant intervenir des éléments trop imprécis, en particulier le facteur de perte estimé à 20 %, nous avons vérifié ces chiffres par des micrographies prises sur des sections droites d'éprouvettes massives fabriquées avec la fraction volumique optimale de la figure 20. La moyenne de trois comptages effectués sur ces photographies est de 39 %. En supposant que cette moyenne est valable quelque soit la section droite considérée, nous prendrons, dans la suite de ce travail, une fraction volumique réelle de 40 % de fibre de verre.

2.3.2 Montage expérimental

Nous avons fabriqué 6 éprouvettes de traction contenant 40 % de fibre en volume. Celles-ci sont obtenues à partir du même moule, décrit au § 2.2.2. Elles ont donc le même volume initial $V_0 = 1,92 \text{ cm}^3$. Elles sont conservées à l'aide des mêmes montages que ceux détaillés § 2.2.3.

La façon d'enregistrer les courbes charge-déplacement est rigoureusement identique. Les dimensions de la partie utile avant l'essai sont de l'ordre de 5,2 mm x 7,1 mm x 39,2 mm. Les courbes contrainte-déformation sont calculées au moyen de (2.9) et (2.10).

2.3.3 Résultats

Les figures 21 à 25 résument les différents aspects quantifiés au cours des essais de traction.

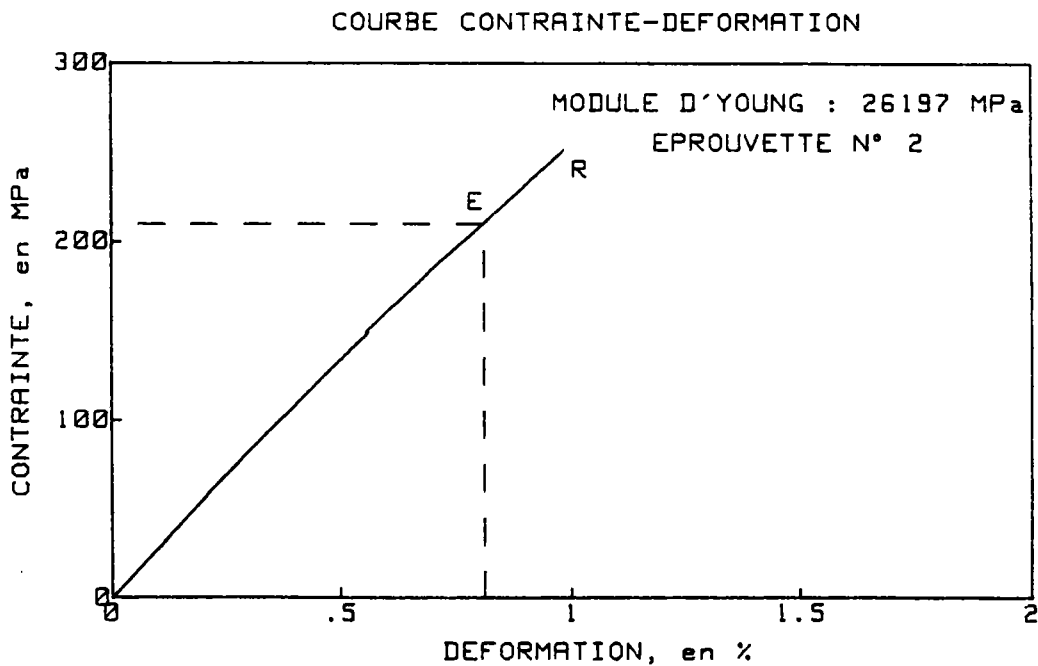


Figure 21 : Exemple de courbe de comportement d'un joint renforcé en traction.

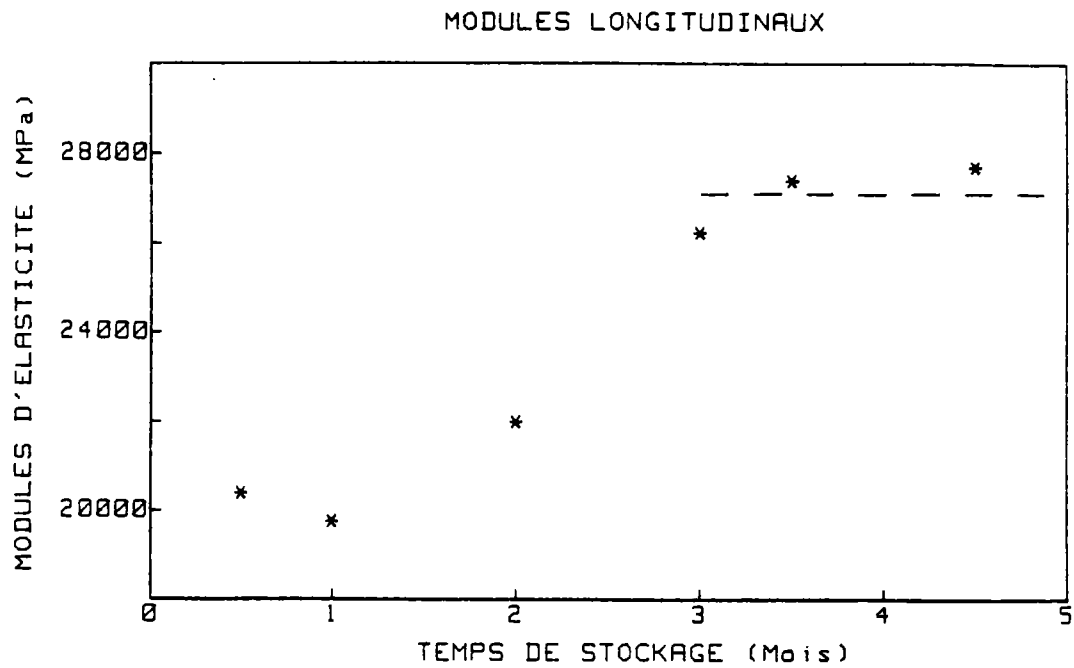


Figure 22 : Evolution du module d'Young d'un joint renforcé en fonction du temps de stockage.

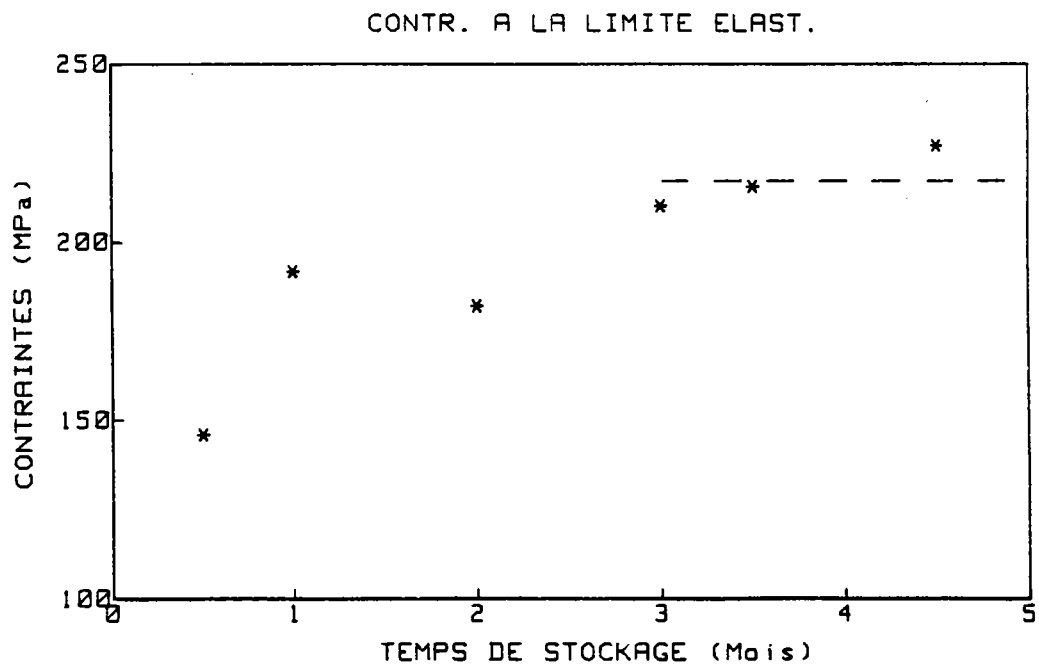


Figure 23 : Evolution de la contrainte à la limite élastique d'un joint renforcé en fonction du temps de stockage.

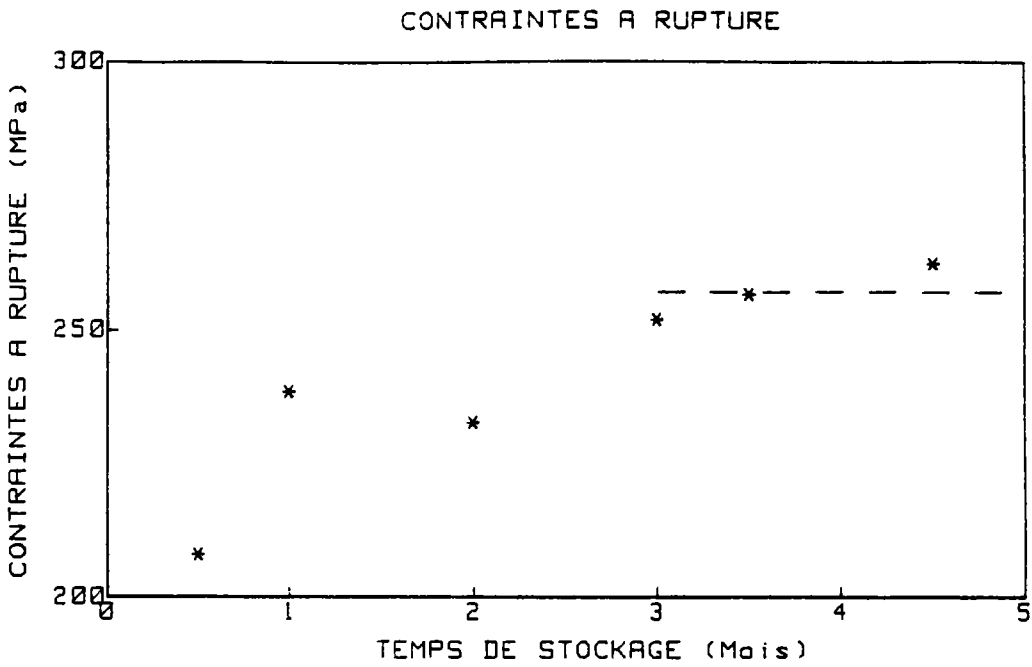


Figure 24 : Evolution de la contrainte à rupture d'un joint renforcé en fonction du temps de stockage.

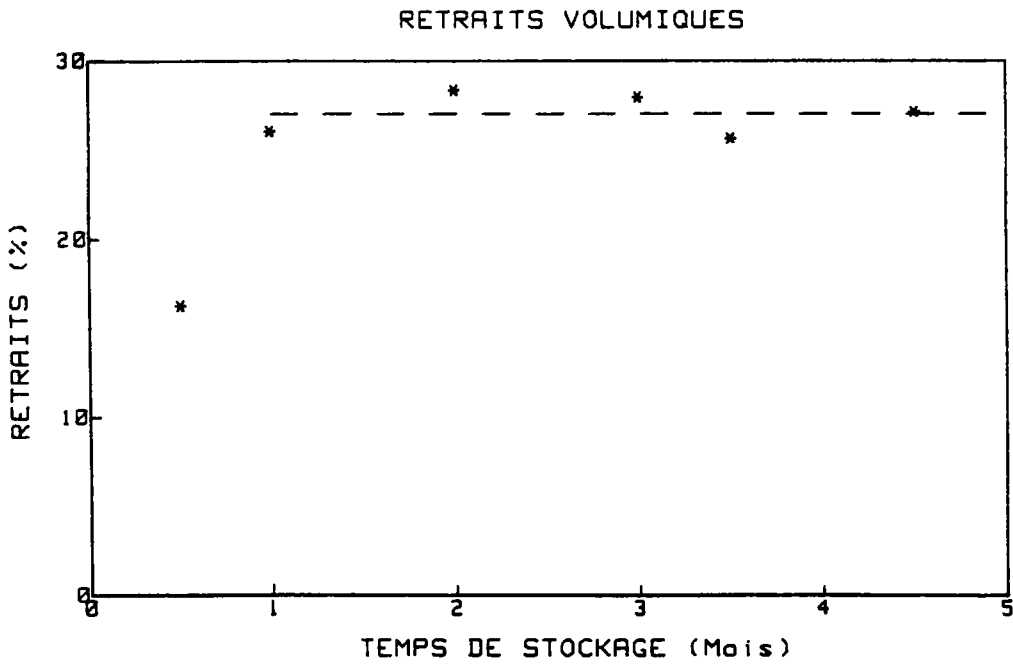


Figure 25 : Retraits volumiques des éprouvettes de traction en colle + fibre en fonction du temps de stockage.

2.3.4 Discussion

Le retrait volumique (fig.25) est stabilisé après 1 mois de vieillissement. La moyenne des résultats expérimentaux obtenus à partir de cette date donne le retrait volumique du joint renforcé : $27 \pm 1 \%$. Celui-ci est nettement inférieur au retrait de la colle pure. La présence de fibre de verre semble donc d'une part retarder la stabilisation (1 mois au lieu de 15 jours) d'autre part annihiler une partie du retrait volumique (environ un quart).

Ces résultats peuvent s'expliquer par l'hétérogénéité locale prononcée qui est susceptible de retarder et d'empêcher partiellement la formation du réseau tridimensionnel du polymère. C'est-à-dire que le réseau en cours de réticulation va se heurter à la présence de barrières constituées par les fibres de verre. Même si les éprouvettes sortent du moule de fabrication avec le même volume initial V_0 , la différenciation se produit lors du stockage, les contraintes résiduelles étant très dissemblables. La comparaison des figures 18 et 25 montre que la différence entre les deux évolutions tend à s'amenuiser avec le temps jusque $t = 1$ mois (retard). Ensuite l'écart reste constant (suppression d'un quart du retrait).

Le module d'élasticité (fig.22) ne varie plus à partir de $t = 3$ mois. La valeur retenue à compter de cette date est 27070 ± 1000 MPa. C'est-à-dire dix fois plus élevée que le module de la colle pure. Ceci n'est pas un résultat surprenant car la fibre constitue un renfort très important par rapport aux faibles caractéristiques mécaniques de la colle. Par contre, l'allure de la courbe est plus inattendue. Le module longitudinal se maintient à une valeur relativement faible et constante pendant les deux premiers mois. La moyenne des trois points expérimentaux donne 20690 ± 1000 MPa. Entre le deuxième et le troisième mois on enregistre une augmentation soudaine, le module s'élève de 30,8 % pour atteindre en 1 mois sa valeur finale.

Nous sommes à nouveau en présence d'un phénomène de retard. Nous pensons que le module d'Young est fonction de l'homogénéité de l'ensemble et, si l'hypothèse d'une réticulation contrecarrée par la fibre est justifiée, alors les valeurs des deux premiers mois correspondent à un matériau non encore totalement formé. L'amélioration de la qualité des interfaces se fait progressivement et on atteint seulement le module final au bout de 3 mois.

La contrainte à la limite élastique (fig.23) présente par contre une évolution conventionnelle. Elle augmente de façon continue pour se stabiliser au temps $t = 3$ mois. La valeur moyenne expérimentale est égale à 217 ± 8 MPa. Chiffre environ quinze fois supérieur à la contrainte à la limite élastique de la colle pure. Remarquons que les deux grandeurs mécaniques, module d'élasticité et contrainte à la limite élastique, atteignent leurs valeurs finales à la même période.

Enfin et contrairement au cas de la colle pure, la contrainte à rupture du joint renforcé (fig.24) évolue de manière similaire à la contrainte à la limite élastique. Stabilisée également après 3 mois la contrainte à rupture s'élève à 257 ± 10 MPa. Il est remarquable de constater que le rapport contrainte à la limite élastique sur contrainte à rupture est identique pour la colle et pour le joint renforcé, en effet :

$$\frac{\sigma_c^e}{\sigma_c^r} = \frac{14}{17} = 0,82 \quad \text{pour la colle pure}$$

et

$$\frac{\sigma_j^e}{\sigma_j^r} = \frac{217}{257} = 0,84 \quad \text{pour le joint renforcé}$$

Cela signifie que l'introduction de fibre de verre ne fragilise pas l'ensemble et que, relativement à l'échelle des contraintes, la proportion non-linéaire de la courbe reste la même.

2.3.5 Modélisation

Afin de prévoir le module d'élasticité du joint renforcé, nous avons appliqué une loi des mélanges largement utilisée pour les composites renforcés par fibre et faisant intervenir les fractions volumiques des différents éléments présents. Celle-ci s'écrit :

$$E_j = E_f \cdot u_f + E_c \cdot u_c \quad (2.17)$$

$$\text{avec} \quad u_f + u_c = 1 \quad (2.18)$$

u_c : fraction volumique de colle

u_f : fraction volumique de fibre

d'où :

$$E_j = E_f \cdot u_f + E_c \cdot (1 - u_f) \quad (2.19)$$

Compte-tenu du type de composite que nous étudions ici, il est nécessaire de prendre dans l'équation (2.19) un module E_f égal au module du verre massif se présentant sous la forme d'une fibre et non celui du tissu déterminé au § 2.1.4. Pour ce faire, nous prenons une valeur bibliographique donnée par M.Manera [34] : $E_f = 73\,000$ MPa. La fraction volumique a été déterminée au § 2.3.1 : 40 %. Le module de la colle pure E_c est de 2 712 MPa (§ 2.2.6). Dans ces conditions, E_j théorique s'élève à 30 827 MPa. Cela signifie, par rapport au module expérimental de 27 070 MPa, une erreur de 13,9 %. Nous pensons que la difficulté de mise en oeuvre de la matrice en résine résorcine (présence de microbulles) peut parfaitement expliquer l'écart entre l'expérience et le modèle théorique. La figure 26 résume les résultats obtenus.

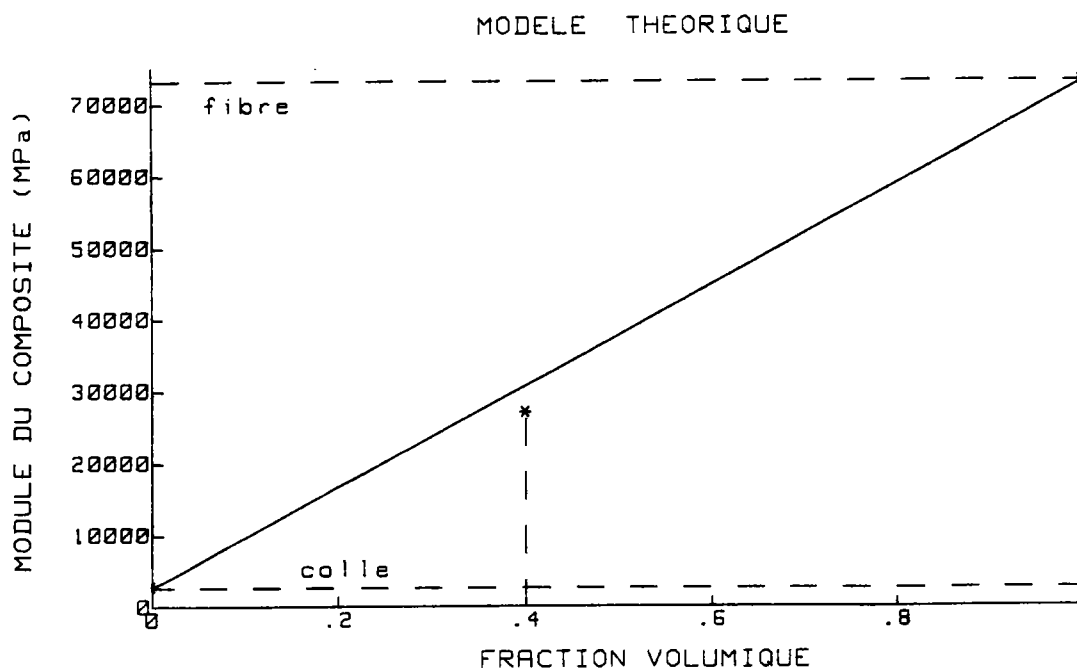


Figure 26 : Diagramme comparatif entre E_j théorique en fonction de u_f et les résultats expérimentaux.

2 - 4 LE PEUPLIER

2.4.1 Description

Le lot de bois, brut de sciage, qui nous a été livré provient de Haute-Marne (Perthes). Celui-ci a d'abord été stocké pendant plus de 6 mois pour atteindre progressivement une humidité de l'ordre de 10 à 12 %. La totalité des expériences que nous serons amenés à effectuer sur le peuplier se feront à ce taux d'humidité.

Le demi-mètre cube de départ a été débité en 300 lamelles exemptes de défauts, noeuds, fissures, fentes... La répartition fut de 252 plis pour la flexion (cf. § 3.4.1), 14 pour la traction, 3 pour une vérification au scanner de la qualité du joint de colle (cf. § 4.3.2), 1 pour l'étude biologique et 30 de réserve.

Le peuplier est un feuillu aimant les sols profonds, humides, à pH neutre et éventuellement un peu sableux. Son bois est de couleur blanc mat à jaune clair, il est tendre et homogène à pores diffus. Les rayons ligneux sont homogènes et comptent une cellule en largeur. A noter le diamètre relativement important des trachéides qui ne descend pas en dessous de 30 μm . Sa densité est généralement comprise entre 0,3 et 0,5 (cf. [25], [26] et [27]).

Certaines lamelles présentaient des petites tâches noirâtres groupées, ressemblant à des tâches d'encre. Nous avons pensé qu'il s'agissait de bois atteint de bleuissement (*Arcreobasidium pullulans*). Aussi avons-nous envoyé des échantillons pour analyse biologique.

Effectivement, ces morceaux étaient bien attaqués par le microorganisme. Cependant la maladie en était à son début. De plus, celle-ci n'avait aucune chance d'évoluer à 12 % d'humidité. Enfin l'attaque n'était que superficielle (moins d'un millimètre en épaisseur). Nous avons donc considéré ceci comme négligeable vis-à-vis des propriétés mécaniques. (*)

2.4.2 Montage expérimental

Les 14 lamelles réservées à la traction ont été sciées et rabotées de manière à obtenir 69 éprouvettes. Ce sont de simples parallélépipèdes rectangles d'environ 5 mm d'épaisseur, 50 mm de largeur et 200 mm de longueur. Ces éprouvettes sont sollicitées à faible déformation, jusqu'à 0,05 %, de façon à ne pas les endommager. Celles-ci sont ensuite triées et réparties pour former les éprouvettes de traction en L.C.R. (Lamellé-Collé Renforcé).

La machine de traction, le matériel informatique ainsi que l'extensomètre à jauges sont les mêmes que précédemment. L'ouverture ou allongement initial est ici de 50 mm. Les courbes de comportement sont obtenues avec (2.9) et (2.10). Ce type d'essai va nous permettre de connaître le module d'élasticité longitudinal (dans le sens des fibres du bois) de toutes les lamelles qui serviront pour la fabrication du lamellé-collé. Ceci représente un avantage, plutôt que de prendre uniquement un module moyen plus ou moins représentatif du peuplier spécifique utilisé. Par contre, le désavantage de la méthode est que nous ne connaissons pas la contrainte à rupture.

2.4.3 Résultats

La figure 27 donne les résultats expérimentaux, toujours accompagnés des statistiques de Gauss et Weibull (cf. § 2.1.3). Le tableau 10 résume les valeurs trouvées.

Modules longitudinaux	Résultats expérimentaux	Loi de Gauss	Loi de Weibull
moyenne	8 611	8 817	8 612
écart type	3 693	4 006	3 594

Tableau 10 : Résultats des essais de traction
sur le peuplier.

(*) Nous remercions ici Mr.G.Kilbertus, Laboratoire de Microbiologie de Nancy I, pour avoir effectué cette analyse.

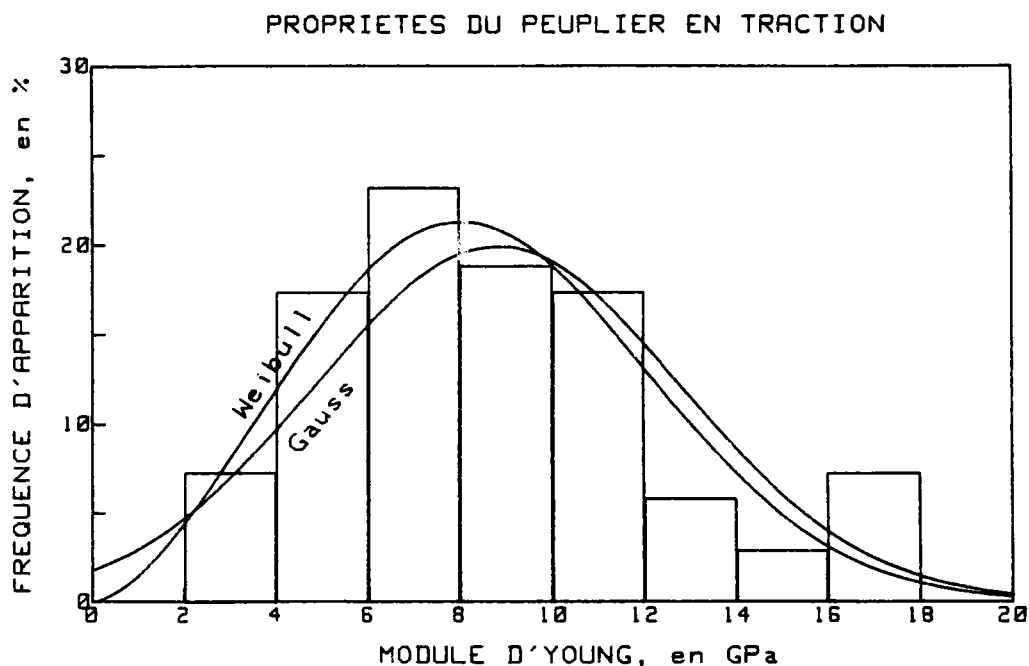


Figure 27 : Modules d'élasticité longitudinaux des éprouvettes de traction en peuplier.

2.4.4 Discussion

La figure 27 montre que la statistique de Weibull est mieux adaptée pour décrire les résultats obtenus sur le module d'élasticité longitudinal. Notons toutefois la dispersion importante avec un paramètre de Weibull $m = 2,57$. La valeur moyenne quoique légèrement élevée, correspond aux valeurs bibliographiques du § 1.4.2. La distribution a tendance à privilégier quelque peu les hauts modules (dissymétrie), mais le choix des 14 lamelles de départ s'est effectué au hasard.

CHAPITRE 3
COMPORTEMENT EN FLEXION
DES MATERIAUX CONSTITUTIFS
DU LAMELLE-COLLE RENFORCE

3 - 1 LA FIBRE DE VERRE

Comme nous l'avons déjà mentionné au § 1.2.2, il semble très difficile de mesurer expérimentalement le module d'élasticité longitudinal d'un tissu de fibre de verre en flexion.

Nous prendrons donc pour la modélisation du L.C.R. en flexion, la même valeur pour le module de la fibre de verre que celle obtenue en traction. Ceci est une approximation qui théoriquement est justifiée puisqu'il s'agit toujours de la même grandeur physique, E_f longitudinal, normalement indépendante de la façon dont on la mesure (flexion ou traction).

3 - 2 LA RESORCINE

3.2.1 Montage expérimental

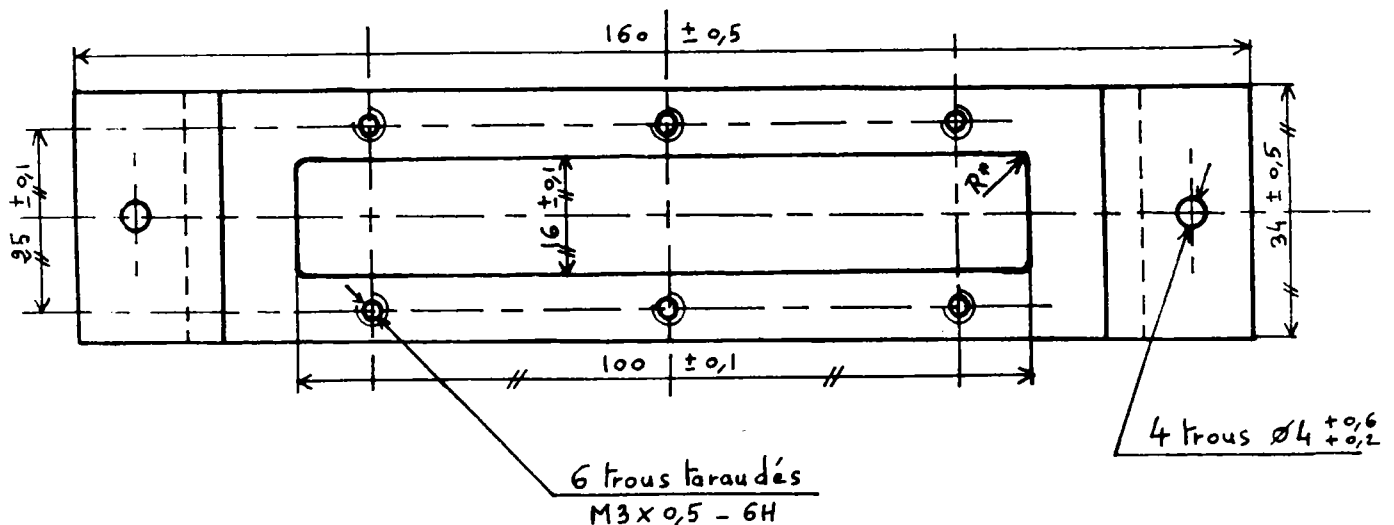


Figure 28 : Moule servant à la fabrication des éprouvettes de flexion.

La fabrication et la conservation des échantillons de flexion suivent exactement le même processus qu'aux § 2.2.2 et 2.2.3. Les dimensions des éprouvettes lors de l'essai sont approximativement de 5,3 mm x 14,0 mm x 88,7 mm . La machine d'essai et le matériel informatique sont les mêmes que pour les essais de traction. Par contre, le capteur de déplacement est ici résistif, type MP 5230 de la société S.F.I.M., de 100 mm d'étendue de mesure. Celui-ci mesure la flèche que prend l'éprouvette sollicitée en flexion trois points (fig. 29).

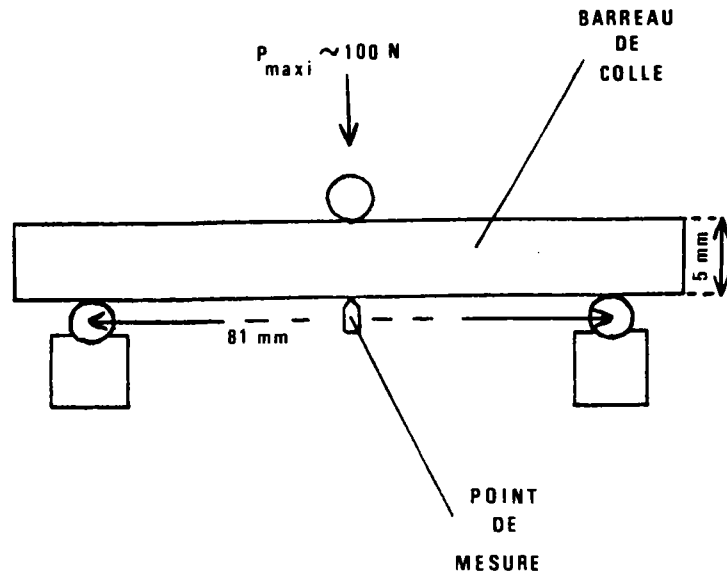


Figure 29 : Montage de flexion trois points pour les éprouvettes en résorcine massive.

Nous employons pour tracer les courbes contrainte-déformation les équations traditionnelles issues de l'étude de la résistance des matériaux, valables uniquement dans le domaine élastique (cf. [22] et [29]). Ceci constitue une approximation acceptable au vu de la faible non-linéarité de la courbe de la figure 30.

$$f = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (3.1)$$

et

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} \quad (3.2)$$

f = flèche enregistrée sur la fibre externe

M = moment de flexion agissant sur la section droite

c = distance de l'axe neutre à la fibre externe

donc pour une section rectangulaire :

$$\sigma = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (3.3)$$

et comme dans le domaine élastique $\sigma = E \cdot \varepsilon$:

$$\varepsilon = \frac{6 \cdot f \cdot h}{L^2} \quad (3.4)$$

Nous supposons dans tout ce qui précède que les forces sont concentrées en un point.

3.2.2 Résultats

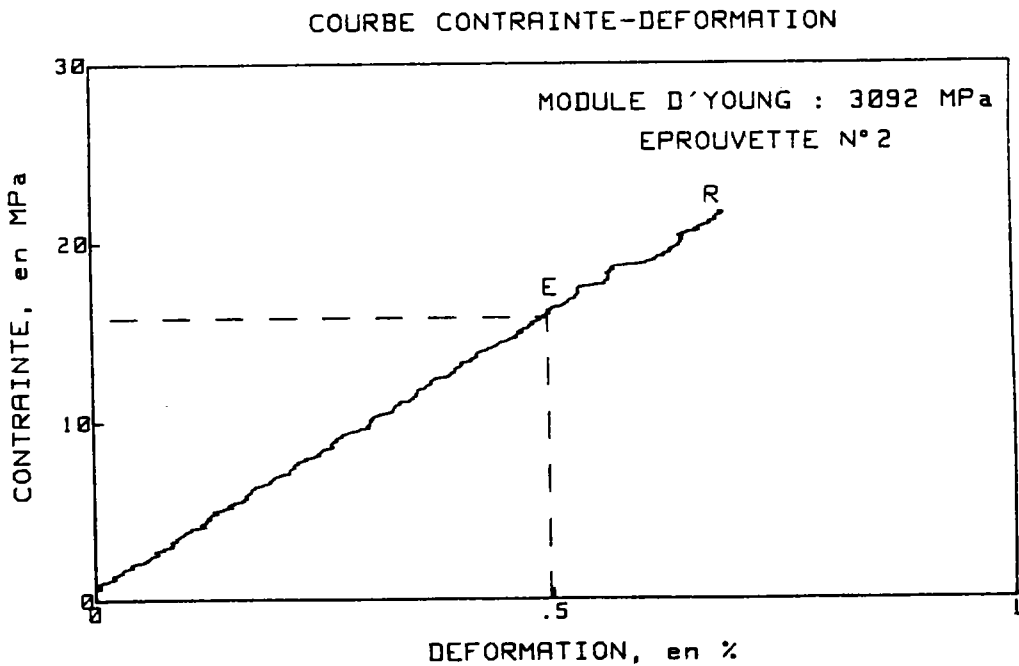


Figure 30 : Exemple de comportement de la résorcine massive en flexion (éq. 3.3 et 3.4).

6 éprouvettes ont été testées. La figure 31 résume l'évolution du module d'élasticité toujours calculé par la méthode des moindres carrés.

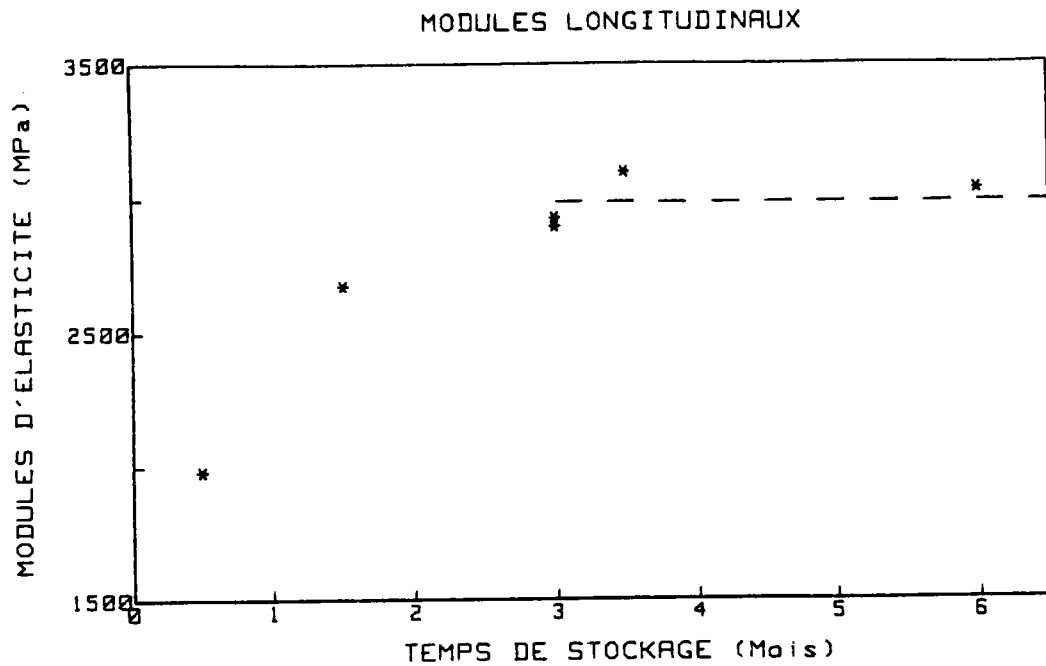


Figure 31 : Evolution du module d'Young de la résorcine massive testée en flexion.

La contrainte à la limite élastique est donnée figure 32. Sa définition est la même qu'au chapitre 2. La contrainte à rupture ne présente aucune évolution ordonnée dans le temps, la cause est probablement la même que celle invoquée au § 2.2.5 . Sa valeur moyenne sur 6 essais est de 20 ± 5 MPa .

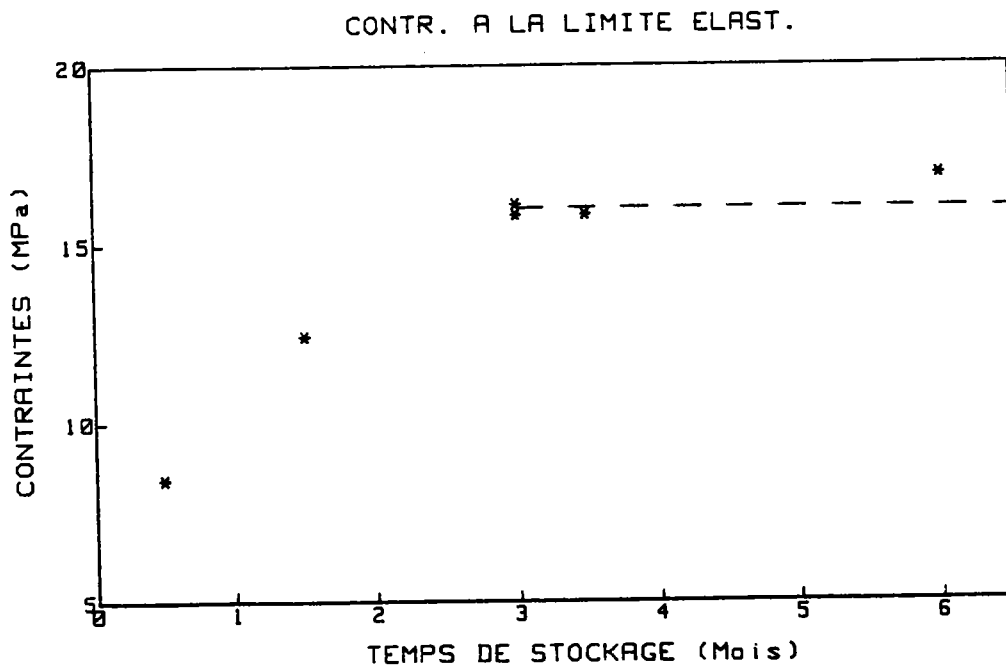


Figure 32 : Evolution de la contrainte à la limite élastique de la résorcine massive.

Pour terminer l'énoncé des résultats, la figure 33 présente l'évolution du retrait volumique. Celui-ci est calculé avec la formule (2.13). Dans le cas de la flexion $V_0 = 9,60 \text{ cm}^3$ (fig. 28).

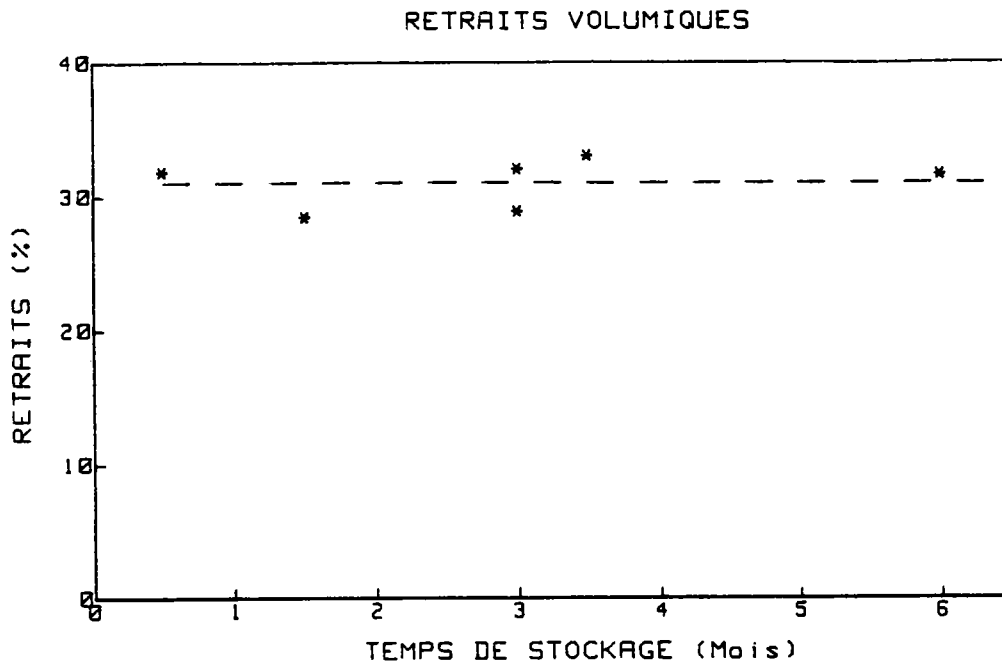


Figure 33 : Retraits volumiques des éprouvettes de flexion en fonction du temps de stockage.

3.2.3 Discussion

Le retrait volumique (fig.33) est stabilisé après quinze jours comme dans le cas des essais de traction. Par contre, sa valeur est plus faible : $31 \pm 3 \%$ (trait en pointillé sur la figure). Le volume mis en jeu est pourtant plus important.

Le module d'Young (fig.31) évolue exactement de la même manière qu'en traction ; stabilisation réalisée après trois mois de stockage à la valeur $2982 \pm 100 \text{ MPa}$. Seule la courbure est un peu plus prononcée dans le cas de la flexion.

La contrainte à la limite élastique (fig.32) présente elle aussi une évolution similaire à celle enregistrée au chapitre 2. Stabilisation effectuée après trois mois à $16 \pm 1 \text{ MPa}$. La contrainte à rupture étant de 20 MPa , le rapport des deux contraintes donne $0,80$. C'est-à-dire qu'il apparaît quasiment identique à celui trouvé pour la traction ($0,82$).

En règle générale, les caractéristiques mécaniques trouvées en flexion sont légèrement plus élevées que dans le cas des essais de traction.

3 - 3 LE JOINT RENFORCE

3.3.1 Résultats

Le protocole expérimental est en tout point identique à celui des paragraphes 2.3.1 et 2.3.2 pour la fabrication et la conservation des éprouvettes, et à celui du § 3.2.1 pour l'essai de flexion. Les figures 34 à 38 résument les différents aspects des résultats obtenus sur les expériences de flexion trois points.

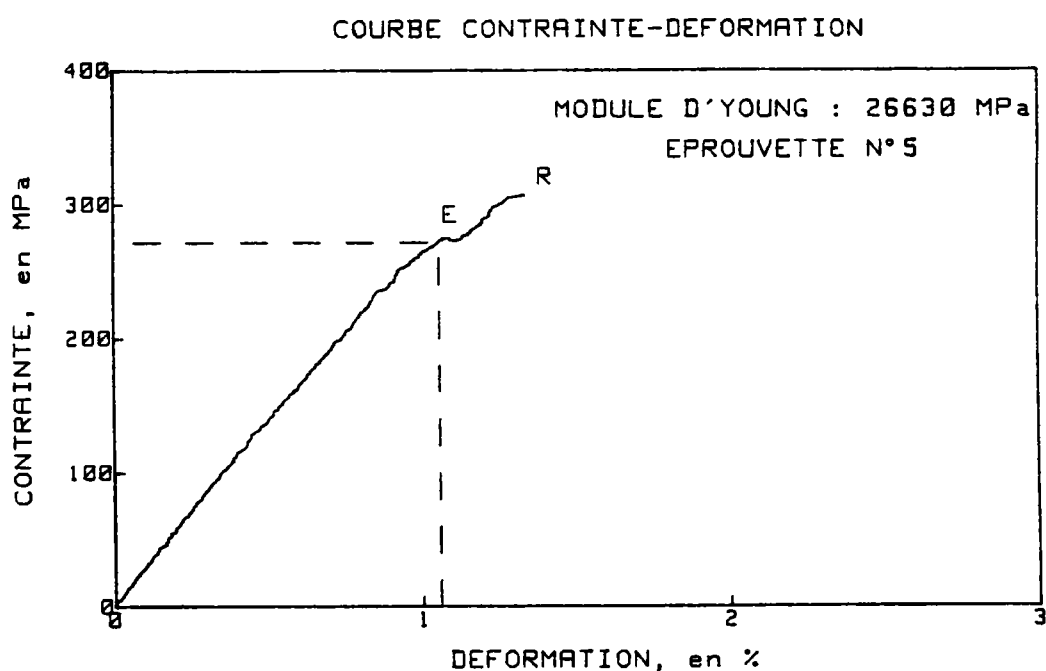


Figure 34 : Exemple de comportement d'un joint renforcé en flexion.

Les points repérés E et R sur la figure 34 indiquent toujours, respectivement, la limite élastique et la rupture. Signalons que cette dernière ne se produit pas de façon brutale comme pour l'ensemble des essais réalisés jusqu'ici sur la résorcine. Après le point R, la perte de charge s'effectue progressivement et lentement. Il semble que les fibres cèdent individuellement, les unes après les autres, au fur et à mesure qu'elles atteignent leur contrainte à rupture en traction. Cette partie de la courbe n'est pas visible sur la figure 34.

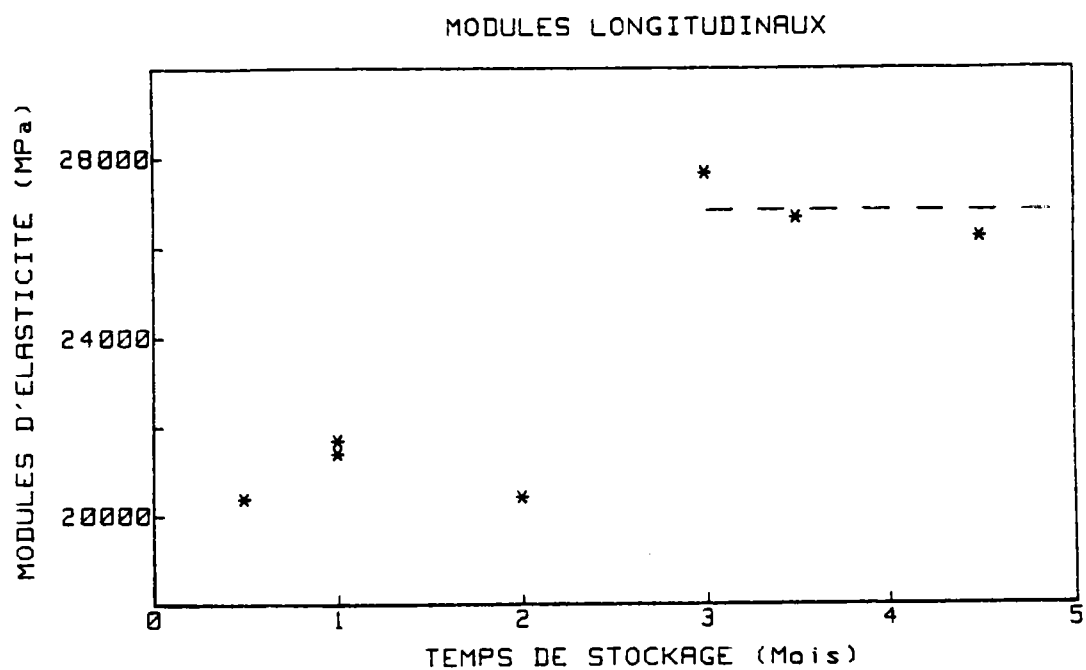


Figure 35 : Evolution du module d'élasticité longitudinal.

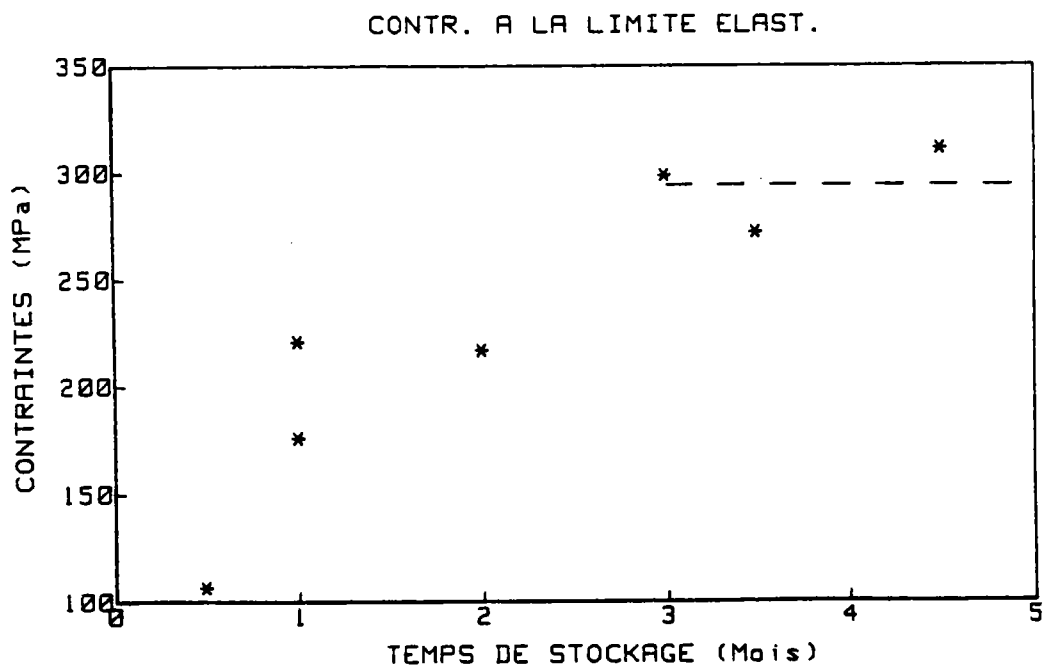


Figure 36 : Evolution de la contrainte à la limite élastique.

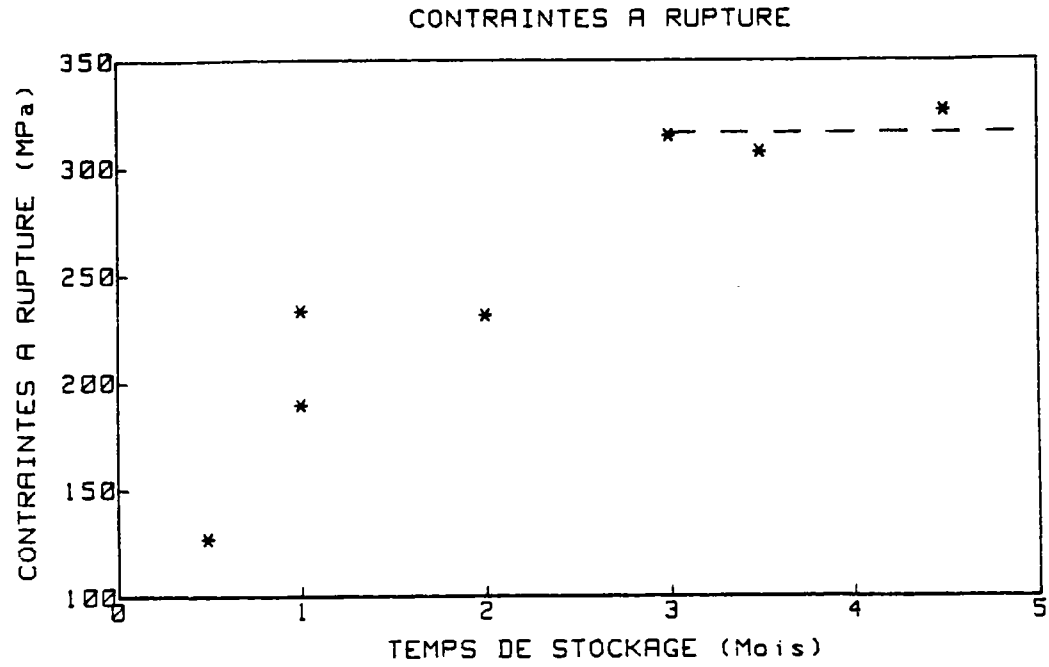


Figure 37 : Evolution de la contrainte à rupture.

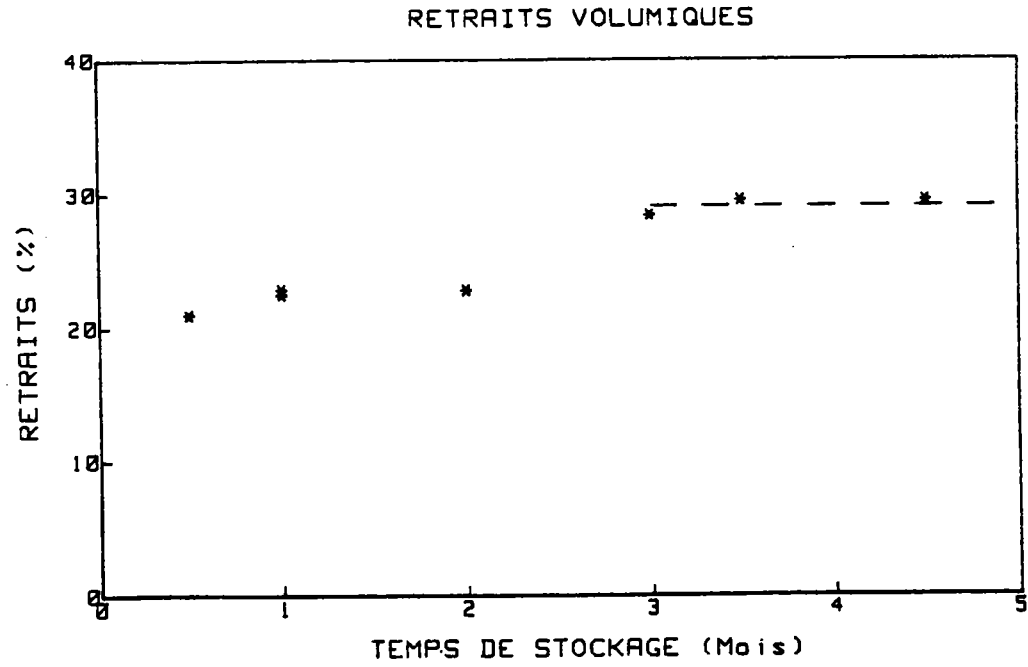


Figure 38 : Retraits volumiques des éprouvettes de flexion en colle+fibre.

3.3.2 Discussion

L'évolution du retrait volumique (fig.38) présente une singularité : celui-ci reste stable de 0 à 2 mois ($22 \pm 1 \%$) puis augmente subitement entre le deuxième et le troisième mois pour atteindre finalement $29 \pm 1 \%$. Ceci n'est pas sans évoquer une certaine analogie avec le comportement du module d'Young, se référer au § 2.3.4 et ci-dessous. Cependant, comme nous n'avons pas enregistré ce phénomène sur les éprouvettes de traction, nous ne tirerons aucune conclusion.

La figure 35 montre que le module d'élasticité obtenu par un essai de flexion évolue de la même façon que celui mesuré en traction (fig.22). Nous avons toujours un saut entre le deuxième et le troisième mois de conservation. La valeur finale stabilisée est 26831 ± 800 MPa, tout à fait comparable aux 27070 ± 1000 MPa établis au paragraphe 2.3.4.

La contrainte à la limite élastique en flexion du joint renforcé (fig.36) augmente, en fonction du temps, dans des proportions plus grandes que celles enregistrées en traction (fig.23). La valeur stabilisée ($t = 3$ mois) est d'ailleurs aussi plus élevée : 294 ± 10 MPa. Enfin, l'évolution de la contrainte à rupture suscite les mêmes remarques, l'amplitude de l'accroissement est plus importante et la valeur stabilisée est fixée à 316 ± 10 MPa. Ces valeurs plus fortes des contraintes σ_j^e et σ_j^r produisent un rapport égal à 0,93. Ceci constitue l'exception en comparaison des autres quotients de même type : 0,80 et 0,82 pour la colle massive et 0,84 pour le joint renforcé dans le cas de la traction.

3.3.3 Modélisation

Nous avons appliqué le même modèle théorique que celui développé au paragraphe 2.3.5 . Rappelons les valeurs expérimentales obtenues :

- 2982 MPa pour le module de la colle massive
- 73000 MPa pour le module de la fibre
- 26831 MPa pour le module du composite
- La fraction volumique de fibre est toujours égale à 0,4

Le module théorique est égal à 30989 MPa. Soit 15,5 % au-dessus de la valeur expérimentale. Ces résultats sont en accord avec ceux enregistrés dans le cas de la traction (§ 2.3.5).

3 - 4 LE PEUPLIER

3.4.1 Montage expérimental

Les essais de flexion destinés à évaluer le module d'Young du peuplier ont été chronologiquement les premiers réalisés. L'équipement mis à notre disposition étant plus sommaire, nous n'avons pas enregistré la courbe charge-déplacement en continu.

Nous mesurons, à l'aide d'un comparateur, la flèche prise par une lamelle de section 20 mm x 50 mm sous une charge unique de 20 N. Afin de réduire les erreurs, nous appliquons la charge trois fois et prenons la moyenne des trois mesures. Le poids utilisé est très faible de manière à ne pas endommager la lamelle qui servira ensuite à la fabrication des poutres composites.

L'équation (3.1) permet de déterminer le module d'élasticité longitudinal. La figure 39 fournit une vue d'ensemble du montage de flexion trois points.

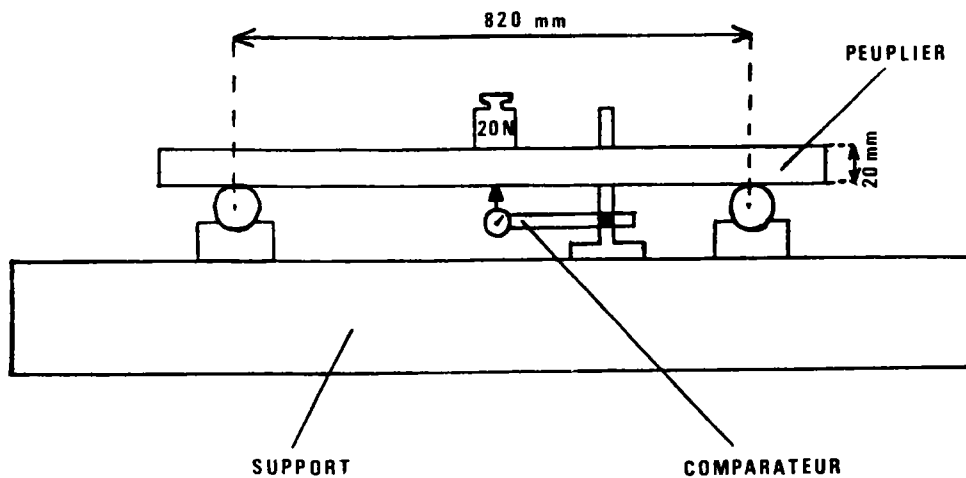


Figure 39 : Dispositif de flexion trois points pour la mesure du module d'Young du peuplier.

3.4.2 Résultats

Au total 276 lamelles ont été testées. Cela nous autorise une présentation statistique des valeurs enregistrées. La figure 40 résume l'ensemble des résultats expérimentaux, approchés par les deux lois déjà employées au § 2.1.3 (Gauss et Weibull).

Comme on peut le constater nous sommes en présence d'une double distribution. Pour la statistique de Weibull, comme pour celle de Gauss, les distributions totales théoriques sont obtenues en additionnant les deux pics pris séparément :

$$f_{\text{totale}}(x) = f_1(x) + f_2(x) \quad (3.5)$$

La séparation arbitraire de ces deux distributions est estimée à 9000 MPa. Certes, cette double distribution expérimentale laisse présager la présence de deux lots de bois très différents. Ceux-ci nous ayant été livrés mélangés. Cependant, cette hypothèse demandait confirmation, aussi avons-nous entrepris une étude parallèle de la densité de ces 276 lamelles.

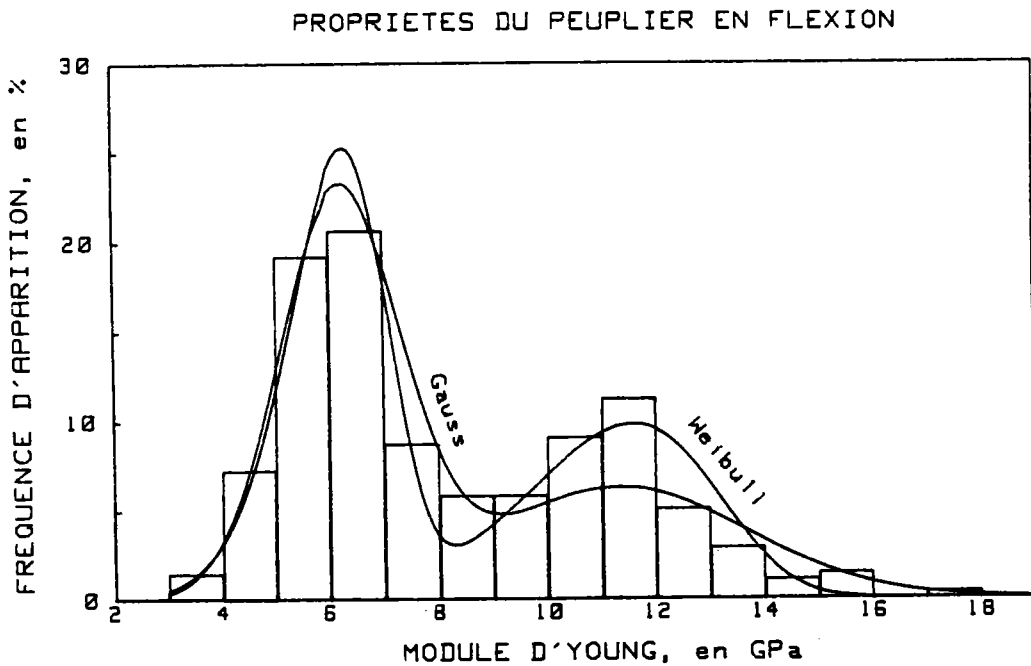


Figure 40 : Histogramme et statistiques obtenus sur le module d'élasticité longitudinal du peuplier.

On pourra trouver dans le tableau 11, les moyennes et écarts types correspondants à notre échantillonnage.

		Weibull			Gauss			Expérience		
		1er pic	2nd pic	Total	1er pic	2nd pic	Total	1er pic	2nd pic	Total
Module d'Young	Moyenne	6002	11065	8174	6199	11323	8467	6007	11071	8172
	Ecart type	953	1815	2643	1107	2355	3070	944	1819	2867

Toutes les données sont en MPa.

Tableau 11 : Module d'élasticité longitudinal moyen du bois de peuplier.

3.4.3 Etude de la densité

La figure 41 synthétise les résultats concernant la densité du peuplier. L'observation de cette courbe indique une correspondance très nette entre module d'Young et densité . On retrouve à nouveau une double distribution. Précisons que l'humidité du bois est 12 % comme pour l'ensemble des tests effectués sur notre essence.

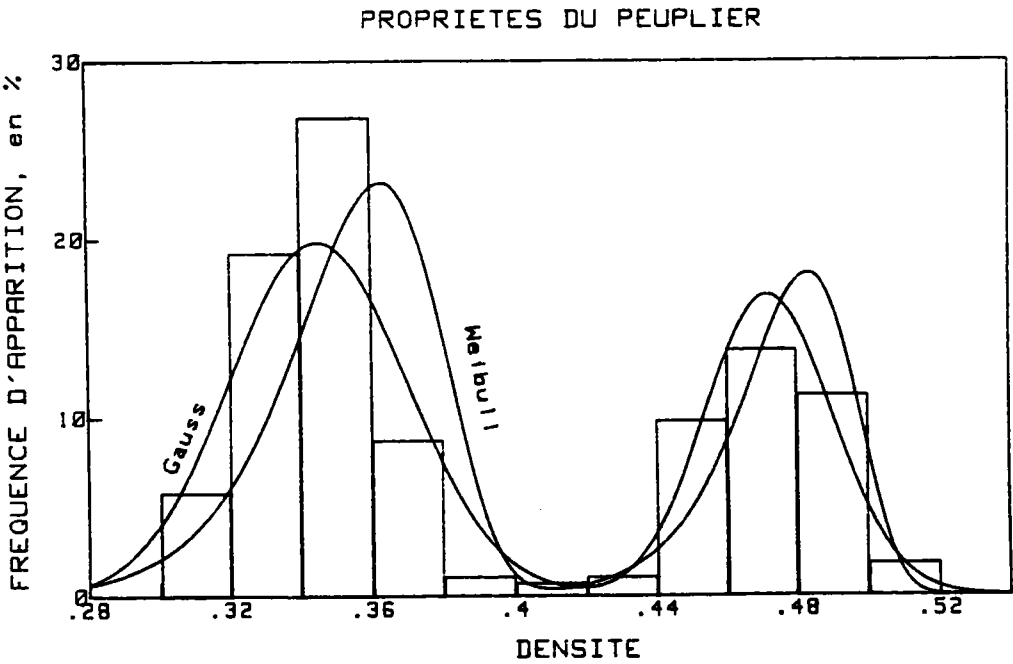


Figure 41 : Densité du peuplier.

		Weibull		Total	Gauss		Total	Expérience		Total
		1 ^{er} pic	2 nd pic		1 ^{er} pic	2 nd pic		1 ^{er} pic	2 nd pic	
Densité	Moyenne	0,353	0,476	0,398	0,345	0,472	0,389	0,340	0,466	0,388
	Ecart type	0,026	0,016	0,058	0,025	0,018	0,059	0,018	0,018	0,064

Tableau 12 : Densité moyenne du peuplier.

3.4.4 Discussion

La courbe de fréquence d'apparition de Weibull semble à nouveau mieux convenir pour prévoir les modules d'élasticité (grandeur mécanique). Par contre, pour un paramètre physique tel que la densité, la théorie de Gauss apparaît plus adaptée. Les pics sont moins décentrés par rapport aux pics expérimentaux.

L'étude parallèle du module d'Young et de la densité alliée à l'observation qualitative visuelle permet une première approche de l'estimation des deux variétés. Évidemment, cette évaluation pourrait s'accompagner d'un regard plus approfondi sur la structure cellulaire à l'aide de coupes tangentielles et radiales (microtome) vues au microscope. Cependant, sans aller jusqu'à une étude botanique et biologique complète, et en tenant compte de la provenance géographique de notre bois, nous estimons qu'il y a une forte probabilité pour que nous soyons en présence de (cf. [25] à [28]) :

- Populus x euramericana, clône italien I 214, pour le 1^{er} pic
- Populus x euramericana, clône français Robusta, pour le 2nd pic

3.4.5 Modélisation

Pour terminer l'étude du peuplier soumis à une sollicitation en flexion, nous donnons ici une tentative de correspondance analytique entre module d'élasticité longitudinal et densité. Nous avons appliqué à notre échantillonnage particulier les différentes équations disponibles fournies par la bibliographie (voir § 1.4.3). Ces courbes (éq. 1.4 à 1.6), superposées au nuage de points expérimentaux, sont représentées figure 42.

Finalement, la totalité de ces modèles reflète un comportement linéaire ou quasi-linéaire. L'observation de la figure 42 montre que ces courbes ne donnent pas une modélisation satisfaisante de la distribution considérée.

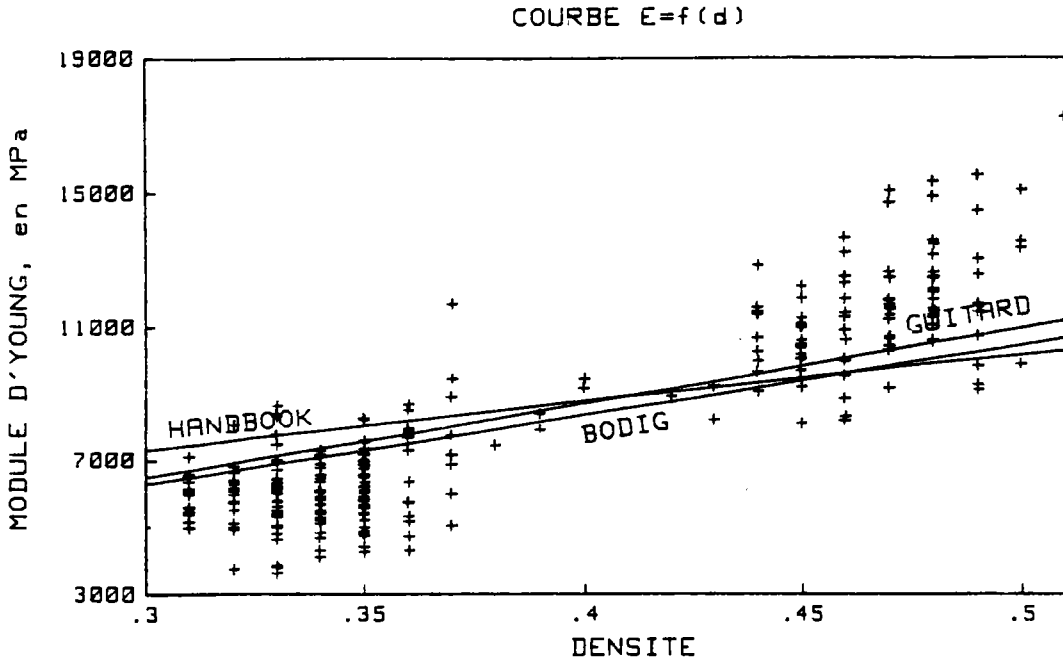


Figure 42 : Points expérimentaux et modèles existants pour la courbe E_b fonction de la densité.

Nous avons calculé une autre fonction permettant de mieux approcher les résultats expérimentaux. Nous partons de la relation générale proposée par J. Bodig, soit l'équation (1.1). Nous prenons le logarithme népérien de cette expression (voir la référence [10]) :

$$\text{Log } E_L = \text{Log } a + b \cdot \text{Log } d \quad (3.6)$$

Et nous calculons les valeurs des constantes a et b par la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite des moindres carrés tracée figure 43. On trouve : $a = 46706 \text{ MPa}$ et $b = 1,87$. La valeur de l'exposant b indique un comportement fort éloigné de la linéarité et se rapprochant d'une courbe parabolique. On obtient donc :

$$E_L = 46706 \cdot d^{1.87} \quad (3.7)$$

La figure 44 donne le tracé de cette fonction, en superposition des points expérimentaux.

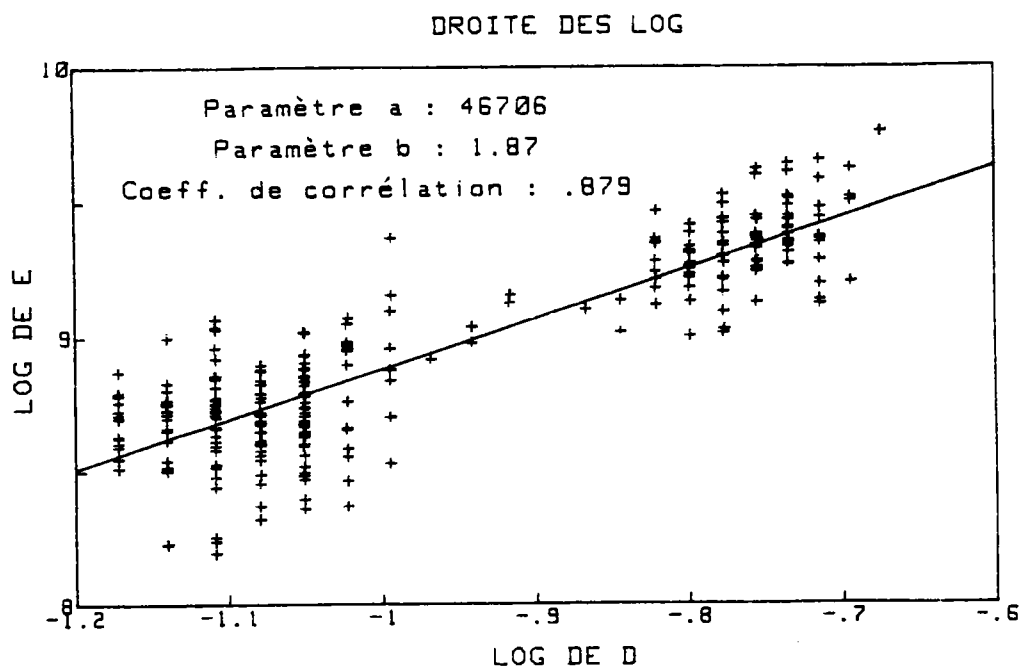


Figure 43 : Droite des moindres carrés.

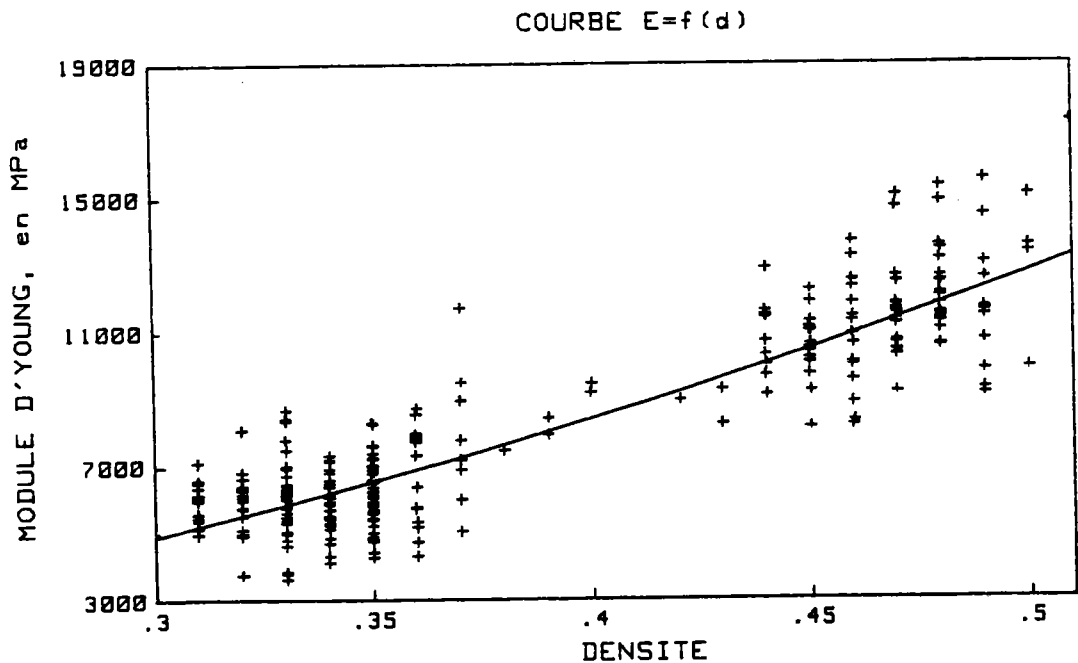


Figure 44 : Points expérimentaux et modèle proposé.

Notons que l'équation (3.7) peut se mettre sous une forme plus générale. Reprenons les valeurs moyennes données par J.Bodig : 8383 MPa pour le module longitudinal moyen et 0,4 pour la densité. L'équation (3.7) peut alors s'écrire :

$$E_L = 8383 \cdot \left[\frac{d}{0,40} \right]^{1,87} \quad (3.8)$$

En effet, la constante multiplicative est quasiment la même :

$$8383 \cdot \left[\frac{1}{0,40} \right]^{1,87} = 46510 \quad (3.9)$$

Cela signifie que seul l'exposant b change par rapport à l'équation (1.5) de J.Bodig. La modélisation de la distribution de départ apparaît plus adaptée. Deux remarques nous paraissent importantes concernant les équations (3.7 ou 3.8) :

- Tout d'abord, il n'est pas exceptionnel de trouver une relation avec un tel exposant pour la correspondance entre propriétés mécaniques du matériau bois et densité. J.Bodig par exemple, propose $b = 2,25$ pour la contrainte à la limite élastique dans un essai de compression perpendiculaire au fil du bois. Le même auteur indique $b = 2,25$ pour relier la dureté et la densité et $b = 2,00$ pour le travail total enregistré dans un essai de flexion statique. D.Guitard [9] donne la valeur $b = 1,74$ pour le module d'Young dans la direction tangentielle et pour le module de cisaillement dans le plan $\mathcal{RT}$ (radial-tangentiel). Cependant, une valeur aussi élevée n'est jamais avancée pour le module longitudinal.

- Deuxièmement, la plupart des résultats expérimentaux que nous avons répertoriés dans la littérature sont obtenus sur une seule espèce botanique précise, par exemple la distribution sur *Ochroma lagopus* de la figure 5. Ou dans certains cas, il s'agit d'échantillonnages regroupant plusieurs genres ou familles comme les ensembles "feuillus" ou "résineux" chez D.Guitard. Ici, nous avons une distribution interne à une espèce (*Populus x euramericana*) mais faisant intervenir deux variétés. La situation est donc différente et peu fournir un élément susceptible d'éclairer le comportement non linéaire enregistré ; sans pour autant l'expliquer.

LISTE DES SYMBOLES

généralités

- $\mathcal{L}$: direction ou axe longitudinal (ou sens chaîne pour le tissu de verre)
- $\mathcal{R}$: direction ou axe radial
- $\mathcal{T}$: direction ou axe tangentiel (ou sens trame pour le tissu de verre)
- b : largeur d'une éprouvette ou d'un pli
- e : épaisseur d'une éprouvette ou d'un pli
- h : hauteur d'une poutre
- L : longueur d'une éprouvette (ou longueur entre appuis pour la flexion)
- V_0 : volume d'une éprouvette à l'instant $t = 0$ (ou référence à 4% d'humidité)
- V : volume d'une éprouvette à l'instant t
- ΔV : variation de volume des éprouvettes cyclées en humidité
- ΔP : variation de poids des éprouvettes cyclées en humidité
- P_t : poids de l'éprouvette à l'instant t
- P_0 : poids de référence pris à 4 % d'humidité
- d : densité
- G : module de cisaillement dans le plan ($\mathcal{R}, \mathcal{T}$)
- P : charge ponctuelle appliquée au système
- u : retrait volumique

fibres de verre

- ϕ : diamètre d'une fibre de verre
- g : nombre de grosses mèches du tissu de verre
- p : nombre de petites mèches du tissu de verre
- λ : longueur d'une fibre de verre

- u_f : fraction volumique de fibre
- V_f : volume de fibre

colle

- u_c : fraction volumique de colle (matrice)
- V_c : volume de colle
- M_c : masse de colle

essai de traction

- l_0 : longueur initiale avant essai de traction
- Δl : allongement de l'éprouvette (traction)
- A : section droite
- A_i : section droite de la $i^{\text{ème}}$ couche
- A_T : section droite totale
- A_c : section droite d'une couche de colle
- A_b : section droite d'une lamelle de bois
- A_f : section droite d'une couche de fibres
- A_j : section droite d'un joint renforcé
- A_{lcr} : section droite du composite

essai de flexion

- M : moment fléchissant agissant sur une section droite
- f : flèche au point milieu, essai de flexion
- y : distance de l'axe neutre à une fibre d'une poutre en flexion
- c : distance de l'axe neutre à la fibre externe d'une poutre en flexion

Liste des symboles

- I : moment d'inertie d'une section droite par rapport à l'axe neutre
- I_i : moment d'inertie d'une section droite de la $i^{\text{ème}}$ couche
- I_T : moment d'inertie d'une section droite de l'ensemble d'une poutre
- I_c : moment d'inertie d'une section droite d'une couche de colle
- I_b : moment d'inertie d'une section droite d'une lamelle de bois
- I_f : moment d'inertie d'une section droite d'une couche de fibres
- I_j : moment d'inertie d'une section droite d'un joint renforcé
- I_{lcr} : moment d'inertie d'une section droite du composite

étude statistique

- $f(x)$: fonction densité de probabilité
- $F(X)$: fonction densité de probabilité cumulée
- $\bar{x}$: moyenne expérimentale
- $\bar{x}^G$: moyenne obtenue par la statistique de Gauss
- $\bar{x}^W$: moyenne obtenue par la statistique de Weibull
- Δ : écart type expérimental
- Δ^G : écart type de Gauss
- Δ^W : écart type de Weibull
- m : premier paramètre de Weibull (forme)
- ω : deuxième paramètre de Weibull (échelle)
- x_0 : troisième paramètre de Weibull (seuil)
- n_c : nombre d'échantillons dont la propriété $x \leq X$
- N : nombre total d'échantillons (ou nombre total de fibres de verre)
- $\Gamma(x)$: fonction mathématique " gamma "

propriétés mécaniques

- E : module d'élasticité
- E_i : module d'élasticité de la $i^{\text{ème}}$ couche
- E_L : module d'élasticité longitudinal
- E_T : module d'élasticité global (flexion pure + cisaillement)
- E_c : module d'élasticité de la colle
- E_b : module d'élasticité longitudinal du bois
- E_f : module d'élasticité de la fibre de verre
- E_j : module d'élasticité du joint renforcé
- E_{lcr} : module d'élasticité longitudinal du composite
- σ : contrainte
- σ^e : contrainte à la limite élastique
- σ_c^e : contrainte à la limite élastique de la colle
- σ_b^e : contrainte à la limite élastique du bois
- σ_f^e : contrainte à la limite élastique de la fibre de verre
- σ_j^e : contrainte à la limite élastique du joint renforcé
- σ_{lcr}^e : contrainte à la limite élastique du composite
- σ^r : contrainte à rupture
- σ_i^r : contrainte à rupture de la $i^{\text{ème}}$ couche
- σ_c^r : contrainte à rupture de la colle
- σ_b^r : contrainte à rupture du bois
- σ_f^r : contrainte à rupture de la fibre de verre

- σ_j^r : contrainte à rupture du joint renforcé
- σ_{lcr}^r : contrainte à rupture du composite
- R : rapport de la contrainte à la limite élastique sur la contrainte à rupture
- ε : déformation
- ε^e : déformation à la limite élastique
- ε_c^e : déformation à la limite élastique de la colle
- ε_b^e : déformation à la limite élastique du bois
- ε_f^e : déformation à la limite élastique de la fibre de verre
- ε_j^e : déformation à la limite élastique du joint renforcé
- ε_{lcr}^e : déformation à la limite élastique du composite
- ε^r : déformation à rupture
- ε_c^r : déformation à rupture de la colle
- ε_b^r : déformation à rupture du bois
- ε_f^r : déformation à rupture de la fibre de verre
- ε_j^r : déformation à rupture du joint renforcé
- ε_{lcr}^r : déformation à rupture du composite
- Renf.: renforcement obtenu sur la grandeur considérée, par rapport à la référence sans fibre de verre

CHAPITRE 4
ETUDE DU L.C.R.

Nous abordons maintenant avec ce quatrième chapitre, le comportement mécanique du composite à trois éléments que constitue le lamellé-collé de peuplier renforcé par fibre de verre (L . C . R .).

Nous allons étudier sa réponse sous sollicitations statiques en traction puis en flexion. Nous ferons appel lors des différentes approches théoriques à l'ensemble des résultats obtenus dans les chapitres 2 et 3. Nous terminerons par des analyses complémentaires qui ont pour but de montrer la qualité des interfaces présentes dans le composite.

4 - 1 COMPORTEMENT EN TRACTION

4.1.1 Protocole expérimental

Les 69 lamelles testées en traction et faisant l'objet du § 2.4.3 ont été triées à l'aide d'un programme informatique. Elles sont regroupées en 12 ensembles de cinq lamelles correspondants au 12 éprouvettes de L.C.R. destinées à un essai de traction. Chaque ensemble a un module d'Young moyen le plus proche possible de la moyenne expérimentale trouvée au § 2.4.3 : 8611 MPa. Nous avons opté pour cette méthode de manière à réduire au maximum les effets de la variabilité naturelle du bois. Les douze éprouvettes sont ainsi comparables entre elles. L'effet du renforcement dû à la fibre de verre peut donc être mis en évidence, indépendamment des fluctuations du matériau bois. Les dimensions des éprouvettes sont données figure 45. La répartition est la suivante :

- 4 éprouvettes de référence sans fibre
- 4 éprouvettes renforcées avec 1 couche de fibre
- 4 éprouvettes renforcées avec 2 couches de fibre

Les joints de colle, renforcés ou non, atteignant leurs caractéristiques optimales après trois mois de stabilisation (voir § 2.2.6 et 2.3.4), les éprouvettes de L.C.R. sont donc conservées pendant ce laps de temps avant d'être testées.

L'essai s'effectue sur une machine Instron 4302 pilotée par ordinateur. La courbe charge-déplacement est tracée en temps réel à raison d'un point par seconde. La vitesse de chargement est de 1 mm / mn. La courbe contrainte-déformation est obtenue à l'aide des équations (2.9) et (2.10).

Les modules d'élasticité sont calculés par une droite des moindres carrés jusqu'à la limite élastique. La contrainte à la limite élastique est définie comme au § 2.2.5 par une variation de 0,001 du coefficient de corrélation. La contrainte à rupture est, conformément au § 2.1.3, la première singularité significative de la courbe de comportement.

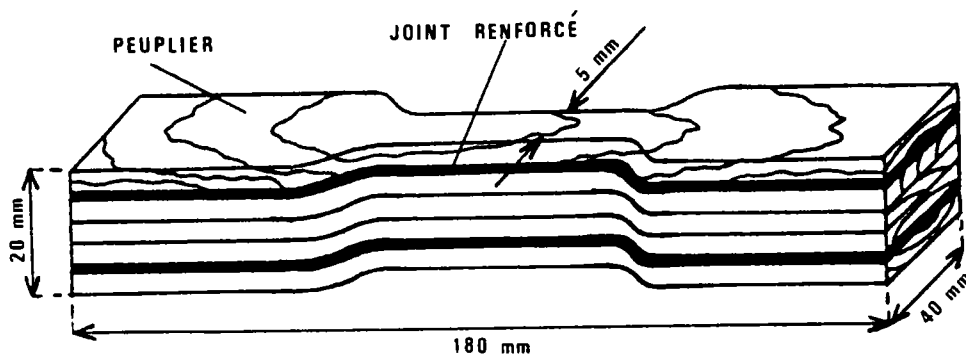


Figure 45 : Epreuve de L.C.R. destinée à un essai de traction.

4.1.2 Résultats

La figure 46 donne un exemple de courbe de comportement expérimentale d'une éprouvette de référence sans fibre, accompagnée de celle d'une éprouvette renforcée avec 2 couches de tissu.

Nous donnons dans le tableau 13 l'ensemble des résultats expérimentaux que nous avons pu obtenir. Ces valeurs sont toutes des moyennes issues de 4 essais (ou 3 le cas échéant à cause de problèmes techniques). La liste des symboles est rappelée avant le début du chapitre 4 page 73. Les pourcentages entre parenthèses indiquent la dispersion expérimentale enregistrée dans chaque cas.

Il ressort de ce tableau que le module d'élasticité longitudinal d'un lamellé-collé de peuplier renforcé par un tissu de fibre de verre est notablement plus élevé que le module du même lamellé-collé sans fibre.

La contrainte à la limite élastique reste sensiblement la même quelque soit le renfort. Par contre, la déformation à cette même limite tend à diminuer. Enfin, la contrainte à rupture augmente elle aussi de façon significative. La déformation correspondante subit une légère augmentation, cependant, compte-tenu de la dispersion des résultats nous la considérerons comme non spécifique de la présence de fibre.

Désignation	E_{lcr} (MPa)	Renf. E_{lcr} (%)	σ_{lcr}^e (MPa)	Renf. σ_{lcr}^e (%)	σ_{lcr}^r (MPa)	Renf. σ_{lcr}^r (%)	ϵ_{lcr}^e (%)	Renf. ϵ_{lcr}^e (%)	ϵ_{lcr}^r (%)	Renf. ϵ_{lcr}^r (%)
Eprouvettes de référence sans fibre	9298 (12)	-	32 (6)	-	44 (14)	-	0,35 (9)	-	0,57 (25)	-
Eprouvettes renforcées 1 couche de tissu	10696 (11)	+15	34 (9)	+6	58 (14)	+32	0,33 (12)	-6	0,62 (15)	+9
Eprouvettes renforcées 2 couches de tissu	12246 (5)	+32	33 (8)	+3	64 (4)	+45	0,26 (8)	-26	0,66 (9)	+16

Renf. = renforcement obtenu sur la grandeur considérée
Les dispersions, entre parenthèses, sont en %

Tableau 13 : Ensemble des résultats expérimentaux
provenant des essais de traction.

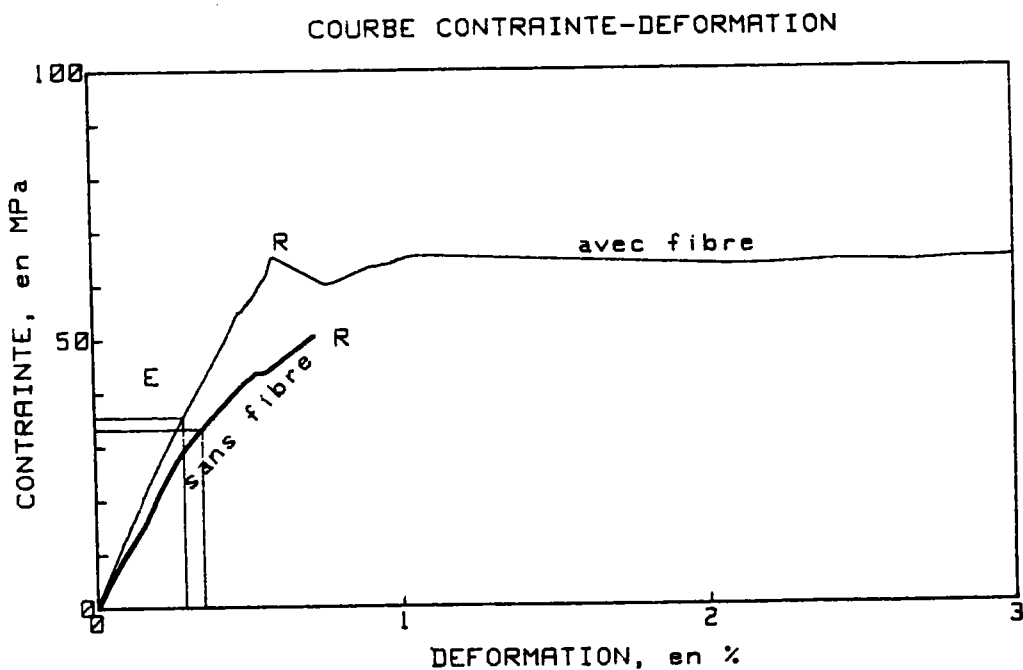


Figure 46 : Courbes contrainte-déformation d'un L.C.R. 2 couches
et d'un lamellé-collé traditionnel.

Une visualisation synthétique de ces résultats est donnée figure 47 où nous avons tracé des courbes de comportement d'éprouvettes avec et sans fibre. Ces courbes sont reconstituées à partir des valeurs du tableau 13 de la façon suivante : nous reportons les coordonnées du point E limite élastique (ϵ_{lcr}^e , σ_{lcr}^e) ; celles du point R la rupture (ϵ_{lcr}^r , σ_{lcr}^r) ; ainsi que quelques points intermédiaires pris de dix en dix mégapascals. Ces courbes "moyennes" n'ont pour but que la visualisation graphique afin de mieux comprendre l'évolution des différents paramètres. elles ne correspondent pas à un essai réel mais à la moyenne de 4 essais. La figure 47 permet de voir qualitativement les effets de l'introduction de la fibre de verre :

- accroissement du module d'élasticité longitudinal
- diminution de la longueur de la partie linéaire
- augmentation de la contrainte à rupture
- accroissement de la longueur de la partie non-linéaire

De manière générale, le composite est donc rigidifié par la fibre de verre, c'est-à-dire qu'à contrainte constante la déformation diminue.

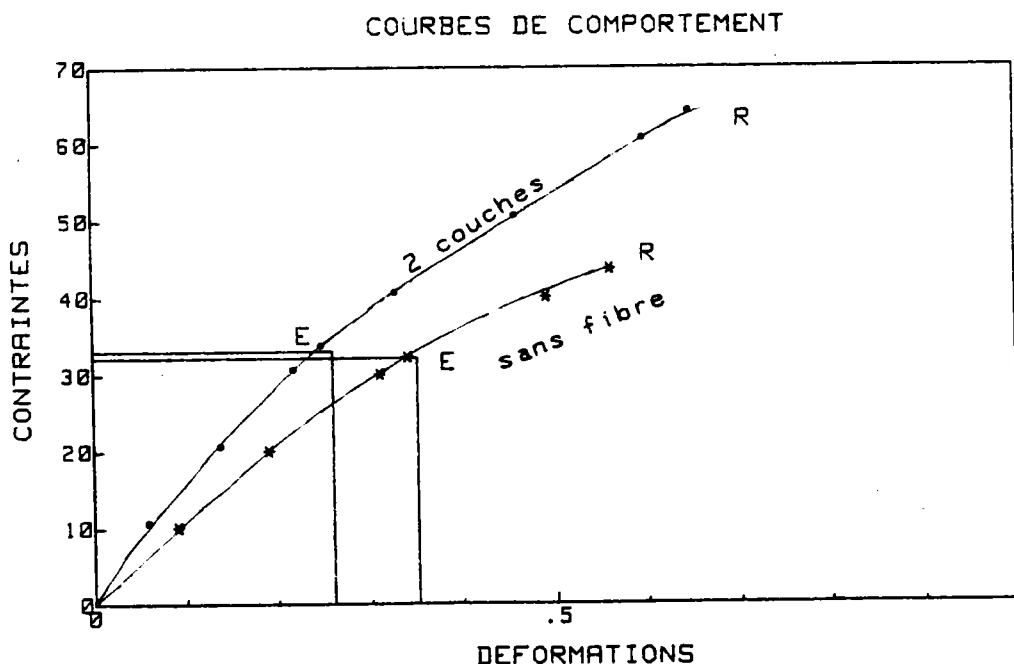


Figure 47 : Comparaison graphique des courbes obtenues avec les valeurs moyennes du tableau 13.

L'observation de la figure 46 nous permet de faire une dernière remarque sur les résultats expérimentaux : après le point R (c'est-à-dire après la rupture telle que nous l'avons définie) le L.C.R. continue de supporter 90 % de la charge maximale enregistrée. Cet état reste stable et la déformation peut dépasser 3 % comme sur l'exemple de la figure. La rupture finale ne se produit que plus tard. Dans le cas de la traction, ce phénomène n'est apparu que sur environ 30 % des éprouvettes. Nous n'en parlerons donc pas plus en détail maintenant. Par contre, ce phénomène devient systématique dans le cas de la flexion trois points, aussi reviendrons-nous sur celui-ci ultérieurement.

4.1.3 Modélisation

Considérant des interfaces parfaits, sans effet de couplage, nous avons appliqué le modèle d'addition des produits $E_i \cdot A_i$, valable dans le domaine élastique linéaire et applicable aux composites en couches orthotropes (cf. § 1.7.3). L'équation (1.12) se scinde en trois parties :

$$E_{kr} \cdot A_{kr} = \sum_i E_b^i \cdot A_b + \sum_j E_c^j \cdot A_c + \sum_k E_f^k \cdot A_f \quad (4.1)$$

La liste des symboles est donnée page 73. La figure 48 montre la répartition des différentes couches dans la section droite du composite.

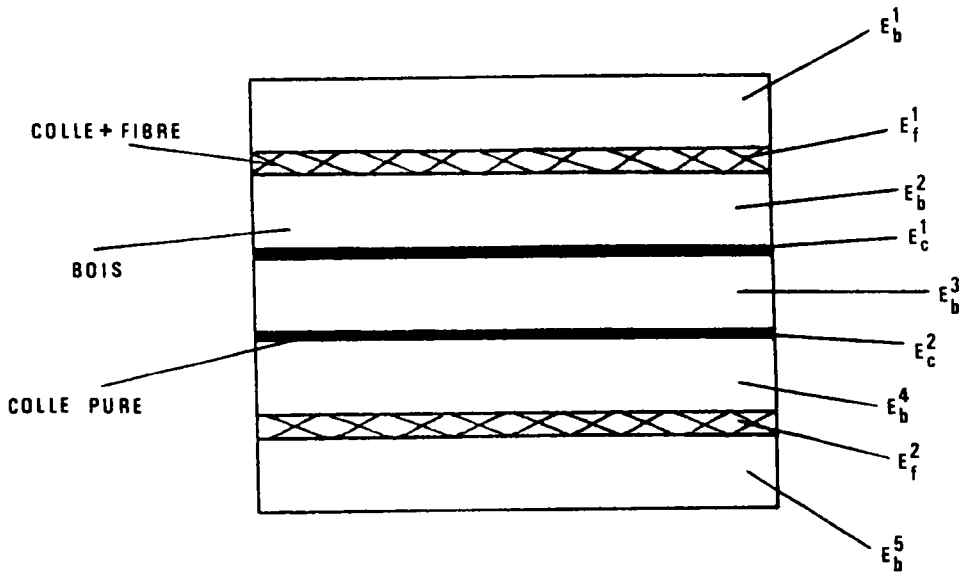


Figure 48 : Composite multicouches, schéma de la section droite.

Les cinq modules E_b^i des lamelles de bois ont été obtenus expérimentalement au § 2.4.3. Nous prenons le module de la fibre de verre identique pour toutes les couches : $E_f^1 = E_f^2 = E_f = 40199$ MPa, déterminé au § 2.1.3. De même pour la colle : $E_c^1 = E_c^2 = E_c = 2712$ MPa (voir § 2.2.6).

La largeur b n'intervient pas dans le calcul puisque l'on peut simplifier les deux membres de (4.1) par b . Il reste les épaisseurs respectives de chaque couche : 4 mm pour une lamelle de bois ; 0,2 mm pour un joint de colle ; 0,6 mm pour le joint renforcé une couche de fibre ; 1 mm pour deux couches. Ces valeurs sont arbitraires mais représentatives de ce que nous avons pu observer sur nos éprouvettes. L'équation (4.1) devient donc :

$$E_{lcr} = \frac{1}{A_{lcr}} \cdot \left[A_b \cdot (E_b^1 + E_b^2 + E_b^3 + E_b^4 + E_b^5) + 4 \cdot A_c \cdot E_c \right] \quad (4.2)$$

s'il n'y a pas de joint renforcé, ou :

$$E_{lcr} = \frac{1}{A_{lcr}} \cdot \left[A_b \cdot (E_b^1 + E_b^2 + E_b^3 + E_b^4 + E_b^5) + 2 \cdot A_c \cdot E_c + 2 \cdot A_f \cdot E_f \right] \quad (4.3)$$

en présence de fibre.

Le tableau 14 expose les résultats obtenus avec ce modèle, en comparaison avec les valeurs expérimentales.

Désignation	E_{lcr} expérimental (MPa)	E_{lcr} théorique (MPa)	Différence (%)
Eprouvettes de référence sans fibre	9298	8585	+ 8
Eprouvettes renforcées 1 couche de tissu	10696	10466	+ 2
Eprouvettes renforcées 2 couches de tissu	12246	11523	+ 6

Tableau 14 : Comparaison théorie - expérience appliquée au module d'élasticité longitudinal du composite.

Cette modélisation nous paraît donner une bonne approche de la réalité. Les différences proviennent de la dispersion des points expérimentaux combinée aux effets de couplage non pris en compte.

Nous avons également appliqué un modèle similaire pour la prévision théorique de la contrainte à rupture du composite. Cela signifie que le produit σ_{lcr}^r multipliée par A_{lcr} est donné par :

$$\sigma_{lcr}^r \cdot A_{lcr} = \sum_i \sigma_b^{r,i} \cdot A_b + \sum_j \sigma_c^{r,j} \cdot A_c + \sum_k \sigma_f^{r,k} \cdot A_f \quad (4.4)$$

De façon identique à ce qui précède, la contrainte à rupture en traction de la colle pure est la même pour toutes les couches et nous prendrons $\sigma_c^r = 17$ MPa (§ 2.2.6). De même pour la fibre : $\sigma_f^r = 920$ MPa (§ 2.1.4). Enfin, pour le peuplier nous sommes obligés de faire appel à une valeur bibliographique puisque nous ne pouvons pas solliciter nos lamelles jusqu'à rupture. Nous prendrons la seule valeur que nous possédons, concernant un essai de traction dans le sens longitudinal. La référence [21] du tableau 4 du § 1.4.2 (Wood Handbook) donne $\sigma_b^r = 48$ MPa. Munie de ces paramètres, l'équation (4.4) se transforme en :

$$\sigma_{lcr}^r = \frac{1}{A_{lcr}} \cdot \left[5 \cdot \sigma_b^r \cdot A_b + 4 \cdot \sigma_c^r \cdot A_c \right] \quad (4.5)$$

pour la référence sans fibre, et :

$$\sigma_{lcr}^r = \frac{1}{A_{lcr}} \cdot \left[5 \cdot \sigma_b^r \cdot A_b + 2 \cdot \sigma_c^r \cdot A_c + 2 \cdot \sigma_f^r \cdot A_f \right] \quad (4.6)$$

en présence de fibre.

Les résultats sont résumés dans le tableau 15. Ici encore, la modélisation est en accord avec les résultats expérimentaux.

4.1.4 Conclusions

Les essais de traction, effectués sur des éprouvettes de lamellé-collé de peuplier (5 plis) renforcées par du tissu de fibre de verre (1 ou 2 couches), montrent que grâce à cette technique, on augmente le module d'élasticité longitudinal (15% et 32%). La contrainte à la limite élastique reste inchangée. On rigidifie le matériau, c'est-à-dire qu'à contrainte constante la déformation diminue. On augmente la contrainte à rupture (32 % et 45 %). La somme des produits $E_i \cdot A_i$ est une modélisation satisfaisante pour la prévision théorique du module résultant E_{lcr} . La somme des produits $\sigma_i^r \cdot A_i$ est une modélisation satisfaisante pour la prévision théorique de la contrainte à rupture du composite σ_{lcr}^r .

Désignation	σ_{lcr}^r expérimentale (MPa)	σ_{lcr}^r théorique (MPa)	Différence (%)
Eprouvettes de référence sans fibre	44	47	- 6
Eprouvettes renforcées 1 couche de tissu	58	59	- 2
Eprouvettes renforcées 2 couches de tissu	64	66	- 3

Tableau 15 : Comparaison théorie - expérience appliquée à la contrainte à rupture en traction du composite.

4 - 2 COMPORTEMENT EN FLEXION

4.2.1 Protocole expérimental

Les 252 lamelles caractérisées par un test de flexion au § 3.4.1 ont été triées par microordinateur. La répartition est la suivante :

- 12 groupes de 5 plis
 - 4 éprouvettes sans fibre
 - 4 éprouvettes avec 1 couche de tissu
 - 4 éprouvettes avec 2 couches de tissu
- 12 groupes de 7 plis
 - 4 éprouvettes sans fibre
 - 4 éprouvettes avec 1 couche de tissu
 - 4 éprouvettes avec 2 couches de tissu
- 12 groupes de 9 plis
 - 4 éprouvettes sans fibre
 - 4 éprouvettes avec 1 couche de tissu
 - 4 éprouvettes avec 2 couches de tissu

Les éprouvettes sont comparables entre elles à l'intérieur d'un ensemble de douze groupes. Par contre, les modules d'Young moyens sont différents pour les trois ensembles de douze groupes. Il était impossible de faire autrement compte-tenu de la double distribution de départ (cf. figure 40). La figure 49 donne les dimensions d'une éprouvette de L.C.R. 5 plis destinée à un essai de flexion.

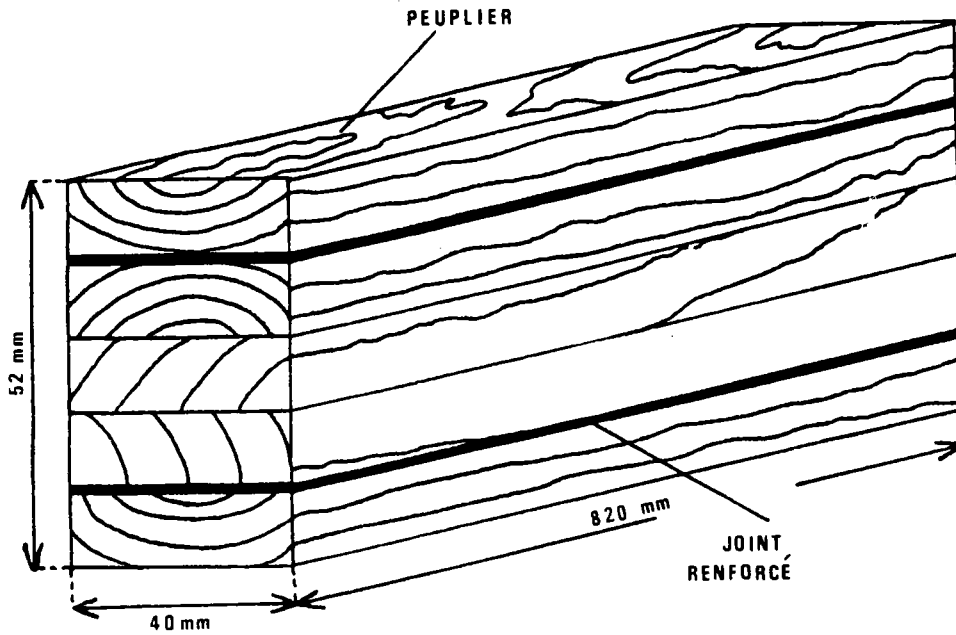


Figure 49 : Eprouvette de L.C.R. 5 plis.

Le premier montage que nous avons utilisé est un dispositif de flexion trois points. Le rapport de la longueur entre appuis divisée par la hauteur de la poutre est de l'ordre de 15,5. Nous admettons que l'influence du cisaillement est négligeable pour un essai réalisé dans ces conditions. Cependant, cette influence ne pouvait plus être négligée dans le cas des éprouvettes de 7 et 9 plis. C'est la raison pour laquelle nous avons opté pour un essai de flexion quatre points pour ces poutres (le cisaillement est nul dans la partie centrale de la poutre pour ce type d'essai). Les deux montages de cette étude sont illustrés sur les figures 50 et 51.

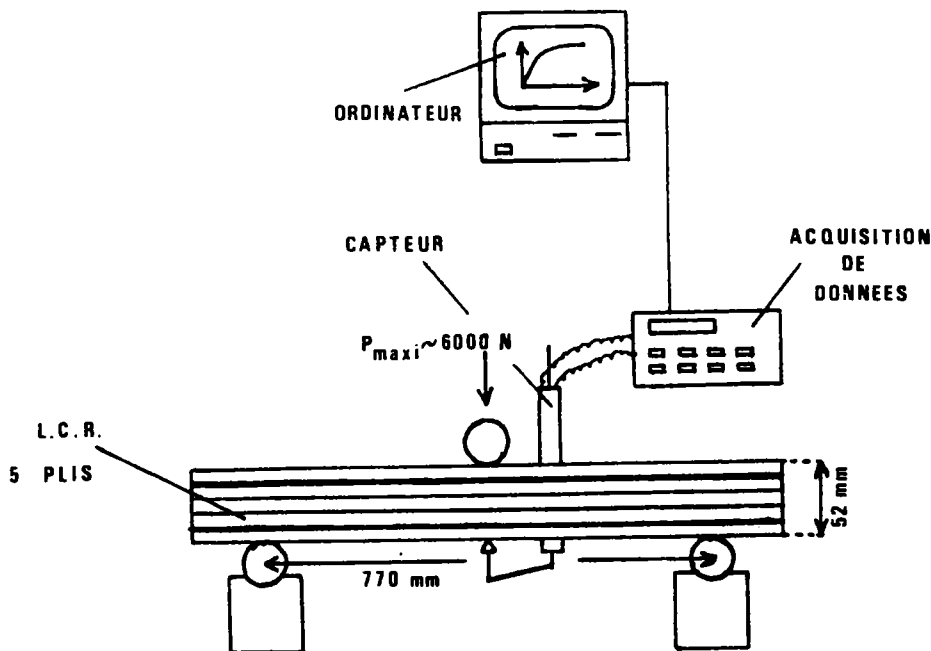


Figure 50 : Montage de flexion 3 points.

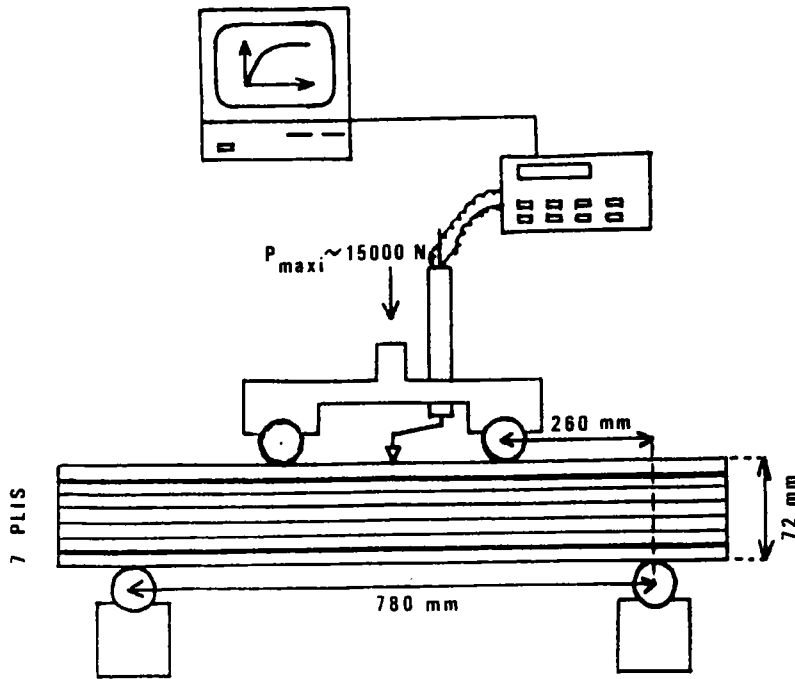


Figure 51 : Montage de flexion 4 points.

Les essais sont réalisés sur une machine Instron 1115. Une acquisition de données informatique permet la prise d'un point toutes les 2 ou 3 secondes. La vitesse de chargement est de 2 mm / mn . La courbe charge-déplacement est tracée en temps réel sur l'écran de l'ordinateur. Le déplacement (ou flèche) est mesuré au centre de la poutre, sous le pli inférieur dans le cas de la flexion trois points, sur le pli supérieur dans le cas de la flexion quatre points.

Compte-tenu de la longueur des appuis par rapport à la longueur totale, nous considérons que nous sommes dans le cas de sollicitations appliquées par des forces concentrées en un point. Cette approximation se justifie dans la mesure où un calcul exact (avec des forces réparties) produit une erreur moyenne de 1%.

Enfin, nous utilisons pour tracer la courbe contrainte-déformation les équations de la résistance des matériaux valables dans le domaine linéaire élastique où la loi de Hooke s'applique. Cette approximation constitue une sous-estimation réelle de la "vraie" contrainte à rupture. Cependant, bien que des modèles aient été proposés pour tenir compte d'une correction non-linéaire, nous gardons cette approche couramment utilisée pour les calculs d'ingénierie. Les équations sont les suivantes (voir [22], [30] et [31]) :

$$\text{pour la contrainte :} \quad \sigma = \frac{M \cdot y}{I} \quad (4.7)$$

σ : contrainte normale à une section droite, agissant sur une fibre longitudinale
 M : moment fléchissant agissant sur la section droite
 y : distance entre la fibre et l'axe neutre
 I : moment d'inertie de la section droite par rapport à l'axe neutre

on sait qu'au milieu de la poutre :

$$M = \frac{P \cdot L}{4} \quad \text{pour la flexion 3 points} \quad (4.8 a)$$

$$M = \frac{P \cdot L}{6} \quad \text{pour la flexion 4 points} \quad (4.8 b)$$

la prise de mesure s'effectue sur la fibre externe donc $y = h/2$.
le moment d'inertie d'une plaque rectangulaire par rapport à un axe passant par son centre est $I = (b \cdot h^3) / 12$. On obtient donc :

$$\sigma = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad \text{pour la flexion 3 points} \quad (4.9 a)$$

$$\sigma = \frac{P \cdot L}{b \cdot h^2} \quad \text{pour la flexion 4 points} \quad (4.9 b)$$

le calcul de la déformée prise par la poutre chargée permet de trouver la flèche au point milieu :

$$f = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad \text{pour la flexion 3 points} \quad (4.10 a)$$

$$f = \frac{23 \cdot P \cdot L^3}{1296 \cdot E \cdot I} \quad \text{pour la flexion 4 points} \quad (4.10 b)$$

nous sommes dans le domaine linéaire donc $\sigma = E \cdot \epsilon$ (4.11).

En remplaçant σ et E par leurs expressions respectives, (4.9) et (4.10), on trouve:

$$\epsilon = \frac{6 \cdot f \cdot h}{L^2} \quad \text{pour la flexion 3 points} \quad (4.12 a)$$

$$\epsilon = \frac{108 \cdot f \cdot h}{23 \cdot L^2} \quad \text{pour la flexion 4 points} \quad (4.12b)$$

les courbes expérimentales sont tracées avec les équations (4.9a) et (4.12a) pour la flexion 3 points ; (4.9b) et (4.12b) pour la flexion 4 points.

4.2.2 Résultats

La fig. 52 donne un exemple de courbes de comportement expérimentales il s'agit d'une éprouvette sans fibre accompagnée d'un autre spécimen renforcé avec deux couches de tissu.

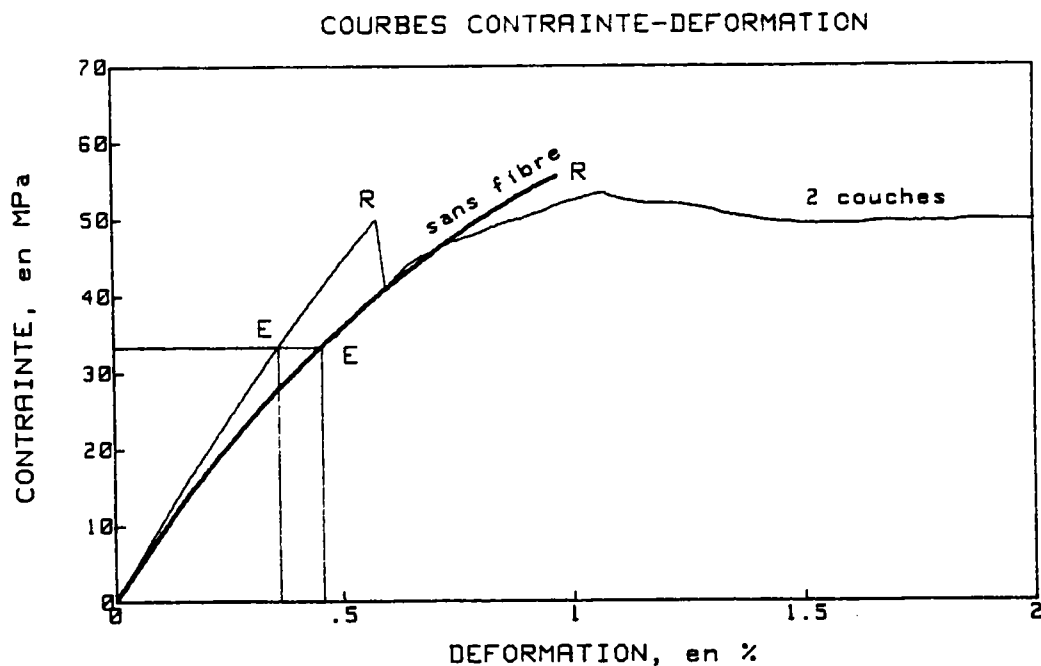


Figure 52 : Courbes contrainte-déformation d'un L.C.R. 2 couches et d'un lamellé-collé traditionnel obtenues sur un essai de flexion.

Les tableaux 16, 17 et 18 résument l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus respectivement sur les essais de flexion 5, 7 et 9 plis. Ils contiennent les moyennes de 3 ou 4 essais. La liste des symboles est donnée au début du chapitre 4 page 73. Les pourcentages entre parenthèses indiquent la dispersion expérimentale.

Désignation	E_{lcr} (MPa)	Renf. E_{lcr} (%)	σ_{lcr}^e (MPa)	Renf. σ_{lcr}^e (%)	σ_{lcr}^r (MPa)	Renf. σ_{lcr}^r (%)	ϵ_{lcr}^e (%)	Renf. ϵ_{lcr}^e (%)	ϵ_{lcr}^r (%)	Renf. ϵ_{lcr}^r (%)
Eprouvettes de référence sans fibre	7453 (3)	-	39 (15)	-	61 (8)	-	0,52 (17)	-	1,09 (10)	-
Eprouvettes renforcées 1 couche de tissu	8223 (5)	+10	29 (23)	-26	59 (17)	-3	0,35 (26)	-33	0,93 (25)	-15
Eprouvettes renforcées 2 couches de tissu	8960 (4)	+20	30 (22)	-23	60 (23)	-2	0,34 (18)	-35	0,87 (52)	-20

Renf. = renforcement obtenu sur la grandeur considérée
Les dispersions, entre parenthèses, sont en %

Tableau 16 : Résultats expérimentaux des essais de flexion
trois points sur les poutres de 5 plis.

Désignation	Eprouvettes de référence sans fibre	Eprouvettes renforcées 1 couche de tissu	Eprouvettes renforcées 2 couches de tissu
E_{lcr} (MPa)	6384 (9)	6275 (4)	6310 (1)
Renf. E_{lcr} (%)	-	-2	-1

Renf. = renforcement obtenu sur la grandeur considérée
Les dispersions, entre parenthèses, sont en %

Tableau 18 : Résultats expérimentaux des essais de flexion
quatre points sur les poutres de 9 plis.

Désignation	E_{lcr} (MPa)	Renf. E_{lcr} (%)	σ_{lcr}^e (MPa)	Renf. σ_{lcr}^e (%)	σ_{lcr}^r (MPa)	Renf. σ_{lcr}^r (%)	ϵ_{lcr}^e (%)	Renf. ϵ_{lcr}^e (%)	ϵ_{lcr}^r (%)	Renf. ϵ_{lcr}^r (%)
Eprouvettes de référence sans fibre	6274 (6)	-	28 (11)	-	44 (16)	-	0,43 (7)	-	0,89 (23)	-
Eprouvettes renforcées 1 couche de tissu	6687 (3)	+7	22 (24)	-21	49 (7)	+11	0,33 (24)	-23	1,04 (32)	+17
Eprouvettes renforcées 2 couches de tissu	7035 (1)	+12	24 (7)	-14	54 (14)	+23	0,34 (6)	-21	1,39 (34)	+56

Renf. = renforcement obtenu sur la grandeur considérée
Les dispersions, entre parenthèses, sont en %

Tableau 17 : Résultats expérimentaux des essais de flexion quatre points sur les poutres de 7 plis.

Notons qu'en ce qui concerne les essais sur les poutres de 9 plis, il nous a été impossible d'atteindre la rupture. Ceci est dû au montage, inadapté pour des poutres de cette taille. La décision d'éliminer les effets de cisaillement en prenant un montage quatre points fut prise assez tardivement. La transformation complète du montage n'était plus possible et celui-ci s'est révélé trop faible vis-à-vis des éprouvettes les plus grosses. Le tableau 18 montre que ceci est sans conséquence sur notre étude puisque dans le cas des poutres de 9 plis, il n'y a plus d'effet de renforcement enregistré.

Pour les autres poutres, nous avons mis en évidence l'augmentation du module d'élasticité longitudinal d'un lamellé-collé renforcé par rapport à celui d'un spécimen non renforcé. La contrainte à la limite élastique, contrairement au cas de la traction, diminue de façon significative; la déformation correspondante également. La contrainte à rupture, comme pour les essais de traction, tend à augmenter ou à rester stable (poutres de 5 plis). L'analyse de la déformation à rupture ne permet pas de déceler une tendance nette, les dispersions sont trop importantes.

De manière identique à ce qui a été fait au § 4.1.2, nous présentons sur les figures 53 et 54 une visualisation graphique des résultats. Les courbes sont reconstituées à partir des valeurs moyennes des tableaux 16 et 17 et de quelques points intermédiaires. Elles ne correspondent pas à des essais individuels mais permettent de comprendre l'évolution du comportement statique en fonction de la quantité de fibre.

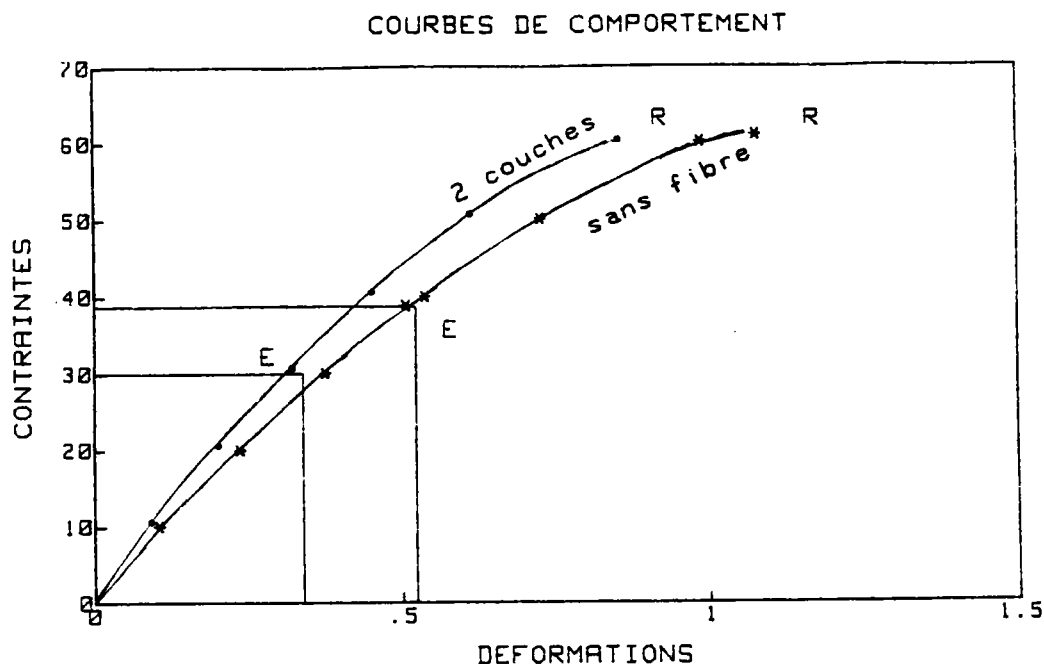


Figure 53 : Comparaison graphique des courbes obtenues avec les valeurs moyennes du tableau 16.

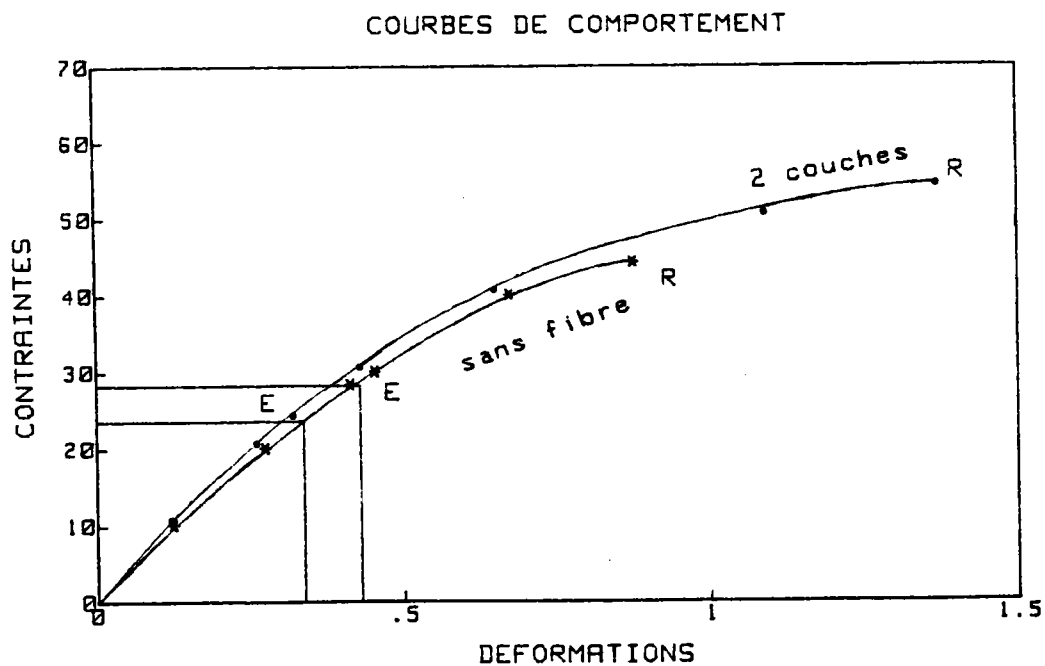


Figure 54 : Comparaison graphique des courbes obtenues avec les valeurs moyennes du tableau 17.

On voit que l'introduction de fibre de verre :

- accroît le module d'élasticité
- diminue la longueur de la partie linéaire de la courbe
- accroît ou laisse invariante la contrainte à rupture
- accroît ou laisse invariante la longueur de la partie non-linéaire

Enfin, nous terminons l'exposé des résultats expérimentaux en remarquant dans le cas de la flexion trois points, un phénomène systématique (voir fig. 52). Alors qu'au point R (rupture telle que nous l'avons définie) le lamellé-collé traditionnel cède brusquement, le L.C.R. continue de supporter 70 % à 90 % de sa charge maximale. Ceci pendant un long intervalle de temps et jusqu'à des déformations supérieures à 3 %. Ce phénomène a déjà été mentionné au § 4.1.2 en traction, mais il ne se produisait que dans environ 30 % des cas. Ici, comme on peut le voir sur le schéma de la figure 55, il y a systématiquement rupture de la lamelle de bois située à l'extrémité la plus sollicitée en traction. Puis la fissure s'arrête au niveau du tissu de verre. Le système reprend alors la charge et se stabilise (tissu de verre fortement tendu). La rupture finale n'intervient que plus tard.

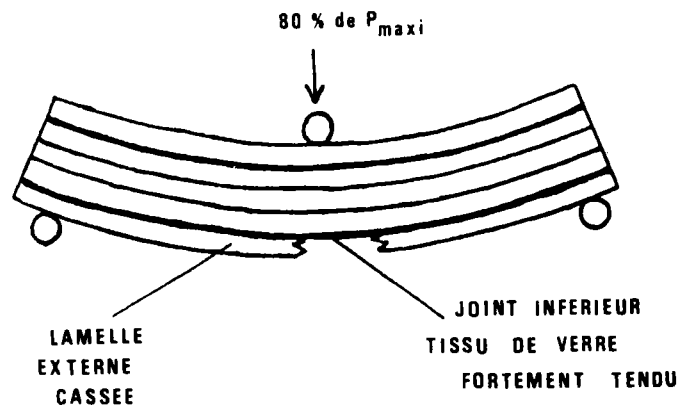


Figure 55 : Configuration dans laquelle l'éprouvette continue de supporter 80 % de sa charge maximale.

4.2.3 Modélisation

Reprenant les mêmes idées de base que celles du § 4.1.3, nous appliquons un modèle similaire :

$$E_{lcr} \cdot I_{lcr} = \sum_i E_b^i \cdot I_b + \sum_j E_c^j \cdot I_c + \sum_k E_f^k \cdot I_f \quad (4.13)$$

La liste des symboles est donnée page 73. Le schéma de la section droite du composite est le même que celui de la figure 48. Les épaisseurs des joints sans fibre et avec 1 et 2 couches sont toujours de 0,2 mm ; 0,6 mm et 1 mm respectivement. L'épaisseur moyenne d'une lamelle de bois est 10,2 mm. Les moments d'inertie sont calculés par le théorème de Huyghens :

$$I_i = I_o + A_i \cdot d_i^2 \quad \text{avec} \quad I_o = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (4.14)$$

d_i : distance entre l'axe de symétrie de A_i et l'axe neutre de la poutre

Les différents modules d'élasticité des lamelles de peuplier, mesurés en flexion sont donnés au § 3.4.2, le module en flexion de la colle pure est $E_c = 2982$ MPa (cf. § 3.2.3). Enfin, le module de la fibre n'étant pas mesuré expérimentalement nous prenons à défaut celui obtenu en traction : $E_f = 40199$ MPa. Le tableau 19 résume les résultats obtenus avec ce modèle dans le cas des poutres de 5 plis.

Comme pour les essais de traction, ce modèle donne entière satisfaction quant à la prévision du module du composite. Les mêmes calculs adaptés aux poutres de 7 plis conduisent à des différences par rapport à la réalité expérimentale de plus de 10 %. Aussi avons-nous affiné le modèle, en remplaçant le module de la fibre de verre par celui du joint renforcé colle+fibre trouvé au § 3.3.2. C'est-à-dire $E_j = 26831$ MPa. Les résultats sont donnés dans le tableau 20.

Enfin, pour les poutres de 9 plis le modèle prévoit encore un renforcement de 6 % pour le composite 1 couche et 9 % pour 2 couches. L'expérience par contre (cf. tableau 18) donne un module quasiment inchangé. La différence est trop faible pour être mise en évidence expérimentalement.

Désignation	E_{lcr} expérimental (MPa)	E_{lcr} théorique (MPa)	Différence (%)
Eprouvettes de référence sans fibre	7453	7233	+ 3
Eprouvettes renforcées 1 couche de tissu	8223	8018	+ 3
Eprouvettes renforcées 2 couches de tissu	8960	8727	+ 3

Tableau 19 : Comparaison théorie-expérience appliquée au module d'élasticité longitudinal du composite (5 plis).

Désignation	E_{lcr} expérimental (MPa)	E_{lcr} théorique (MPa)	Différence (%)
Eprouvettes de référence sans fibre	6274	6343	- 1
Eprouvettes renforcées 1 couche de tissu	6687	6869	- 3
Eprouvettes renforcées 2 couches de tissu	7035	7247	- 3

Tableau 20 : Comparaison théorie-expérience appliquée au module d'élasticité longitudinal du composite (7 plis).

Pour l'évolution théorique de la contrainte à rupture du composite nous reprenons l'équation (4.4) et la modifions en utilisant les moments d'inertie :

$$\sigma_{lr}^r \cdot I_{lcr} = \sum_i \sigma_b^{r,i} \cdot I_b + \sum_j \sigma_c^{r,j} \cdot I_c + \sum_k \sigma_f^{r,k} \cdot I_f \quad (4.15)$$

Nous prenons la contrainte à rupture en flexion de la colle pure trouvée au § 3.2.3 : $\sigma_c^r = 20$ MPa. Comme pour le module d'Young, nous ne connaissons pas la contrainte à rupture en flexion de la fibre. Nous réitérons l'approximation faite plus haut et utilisons la contrainte à rupture en traction : $\sigma_f^r = 920$ MPa. Enfin, la référence [10] du tableau 4 donne la seule valeur bibliographique que nous possédions se rapportant à un essai de flexion sur du peuplier : $\sigma_b^r = 41$ MPa. Pour les poutres de sept plis, les résultats sont les suivants :

Désignation	σ_{lcr}^r expérimentale (MPa)	σ_{lcr}^r théorique (MPa)	Différence (%)
Eprouvettes de référence sans fibre	44	41	+ 9
Eprouvettes renforcées 1 couche de tissu	49	48	+ 2
Eprouvettes renforcées 2 couches de tissu	54	52	+ 3

Tableau 21 : Comparaison théorie-expérience appliquée à la contrainte à rupture en flexion du composite.

Nous ne pouvons pas appliquer ce modèle aux poutres de 5 plis puisque l'expérience donne une contrainte à rupture constante (voir tableau 16). Il est bien évident que le modèle, de par sa structure, prévoit une augmentation régulière de celle-ci.

4.2.4 Conclusions

Les essais de flexion, effectués sur des éprouvettes de lamellé-collé de peuplier (5, 7 et 9 plis) renforcées par un tissu de fibre de verre, montrent que grâce à cette technique, on augmente le module d'élasticité longitudinal de 10 % et 20 % pour les poutres de 5 plis; 7 % et 12 % pour celles de 7 plis. La contrainte à la limite élastique tend à diminuer assez sensiblement (20 à 25 %). On rigidifie le matériau, c'est-à-dire qu'à contrainte constante la déformation diminue. On augmente ou laisse invariante la contrainte à rupture (10 % et 22 % pour 7 plis ; constante pour 5 plis). La somme des produits $E_i \cdot I_i$ est une modélisation satisfaisante pour la prévision théorique du module résultant E_{lcr} . La somme des produits $\sigma_i^r \cdot I_i$ donne satisfaction dans le cas des poutres de 7 plis, cependant n'explique pas les résultats obtenus avec 5 plis.

4.2.5 Autre approche

Un autre aspect du comportement du L.C.R. a attiré notre attention. Si nous calculons le rapport $R = \sigma_{lcr}^e / \sigma_{lcr}^r$ dans le cas du lamellé-collé sans fibre nous obtenons :

$$\begin{aligned} R &= 0,727 && \text{pour la traction (5 plis)} \\ R &= 0,639 && \text{pour la flexion (5 plis)} \\ R &= 0,636 && \text{pour la flexion (7 plis)} \end{aligned}$$

ce qui donne un R moyen de 0,667. C'est-à-dire exactement la fraction deux tiers. Ce rapport est souvent cité pour le bois massif. Il est par exemple donné comme un résultat issu de l'expérience pour le calcul du coefficient de flambement dans la norme brésilienne sur les calculs de structures en bois [32]. Le même processus, pour les éprouvettes renforcées 1 couche de fibre, donne :

$$\begin{aligned} R &= 0,586 && \text{pour la traction (5 plis)} \\ R &= 0,491 && \text{pour la flexion (5 plis)} \\ R &= 0,449 && \text{pour la flexion (7 plis)} \end{aligned}$$

la moyenne est alors 0,508. C'est-à-dire quasiment le rapport un demi. Enfin, avec 2 couches de fibre nous avons :

$$\begin{aligned} R &= 0,515 && \text{pour la traction (5 plis)} \\ R &= 0,500 && \text{pour la flexion (5 plis)} \\ R &= 0,445 && \text{pour la flexion (7 plis)} \end{aligned}$$

la moyenne est égale à 0,487. On peut également l'assimiler au même rapport 1 / 2 . En conclusion, nous pouvons considérer les égalités suivantes comme vérifiées expérimentalement :

$$\sigma^e = \frac{2}{3} \cdot \sigma^f \quad \text{pour le lamellé-collé traditionnel} \quad (4.16)$$

$$\sigma^e = \frac{1}{2} \cdot \sigma^f \quad \text{pour le L.C.R.} \quad (4.17)$$

4 - 3 RESULTATS COMPLEMENTAIRES

Nous exposons dans ce paragraphe quelques observations qualitatives. Elles ne constituent pas une étude complète sur des paramètres physiques ou mécaniques caractérisant le L.C.R.. Elles ont pour but de donner des informations supplémentaires sur la qualité des interfaces présentes dans le composite. Ceci n'est pas négligeable dans la mesure où la totalité des modèles utilisés supposent des interfaces parfaites.

4.3.1 Influence de l'humidité

Nous avons prélevé, sur les poutres de 5 plis destinées aux essais de flexion, 6 éprouvettes de 100 cm^3 ($50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$). Parmi celles-ci, deux ne contiennent pas de fibres, deux autres renferment une couche de tissu et les deux dernières deux couches.

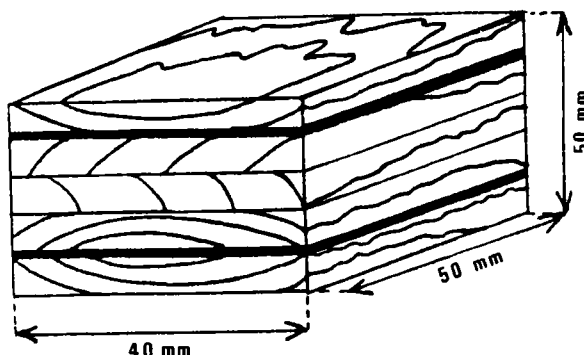


Figure 56 : Eprouvette de L.C.R. utilisée pour le cyclage en humidité.

Nous avons placé ces éprouvettes dans une enceinte à la température constante de 21°C . Puis, nous avons fait varier le taux d'humidité de l'air de la manière suivante : six cycles de 14 jours ; chaque cycle est composé de 7 jours à 5 % d'humidité de l'air suivis de 7 jours à 100 % .

L'observation visuelle montre qu'après 4 cycles les échantillons sans fibre se fissurent dans le plan RT . Sauf une exception, toutes les fissures apparaissent dans le bois et non dans le joint de colle. Les fissures sur les éprouvettes renforcées interviennent quelques jours après, toujours dans le bois et non dans le joint renforcé. Elles sont moins nombreuses que dans les éprouvettes sans fibre. Ce n'est qu'à la fin du sixième cycle que de très petites fissures apparaissent dans les joints renforcés. Elles suivent d'ailleurs exactement la forme des mèches composant le tissu de verre.(*)

Au cours de ces cycles, nous avons mesuré les dimensions et le poids des éprouvettes. Nous donnons dans les figures 57 à 59 les résultats acquis lors du cycle n° 2. Donc, avant que les éprouvettes ne fissurent. La variation de poids des éprouvettes (fig. 58) est calculée à l'aide de l'équation (4.18).

(*) Nous remercions ici Mr. T.Cagnon sans qui cette étude en enceinte climatique n'existerait pas.

$$\Delta P = \frac{P - P_0}{P_0} \cdot 100 \quad (4.18)$$

P_0 étant le poids de référence pris à 4 % d'humidité de l'air.

La variation de volume (fig. 64) est calculée par :

$$\Delta V = \frac{V - V_0}{V_0} \cdot 100 \quad (4.19)$$

V_0 étant le volume de référence pris à 4 % d'humidité de l'air.

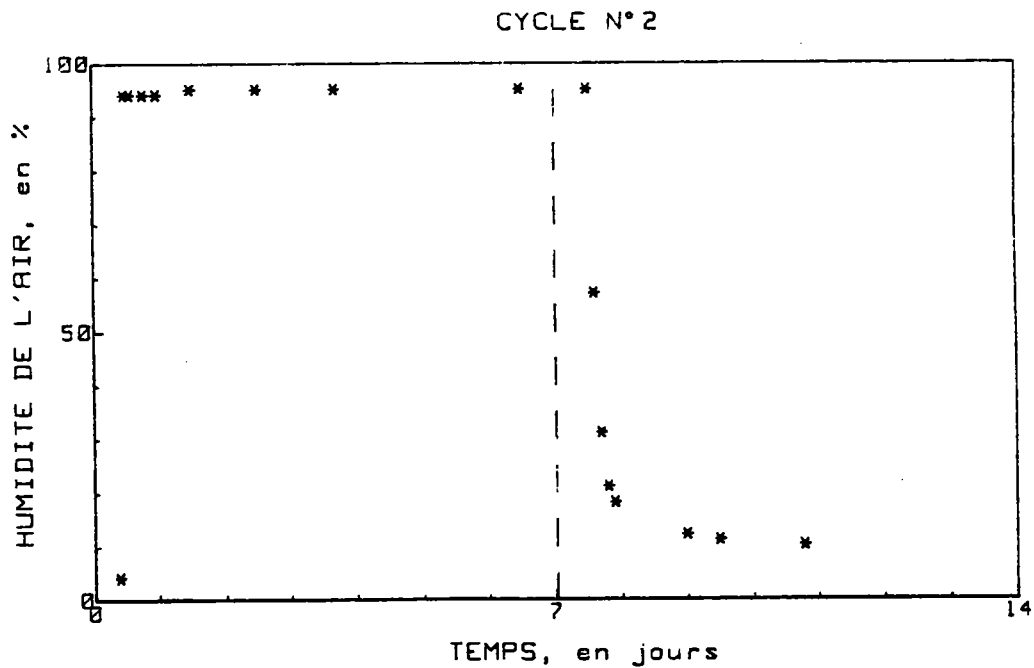


Figure 57 : Humidité de l'air en fonction du temps.

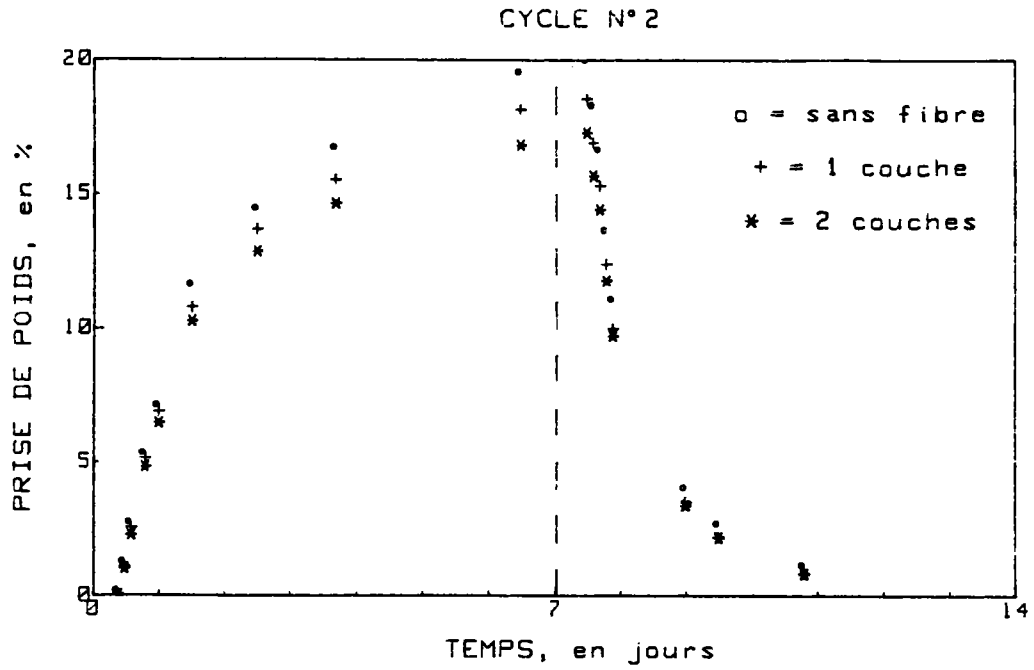


Figure 58 : Variation du poids relatif des trois types d'éprouvettes en fonction du temps.

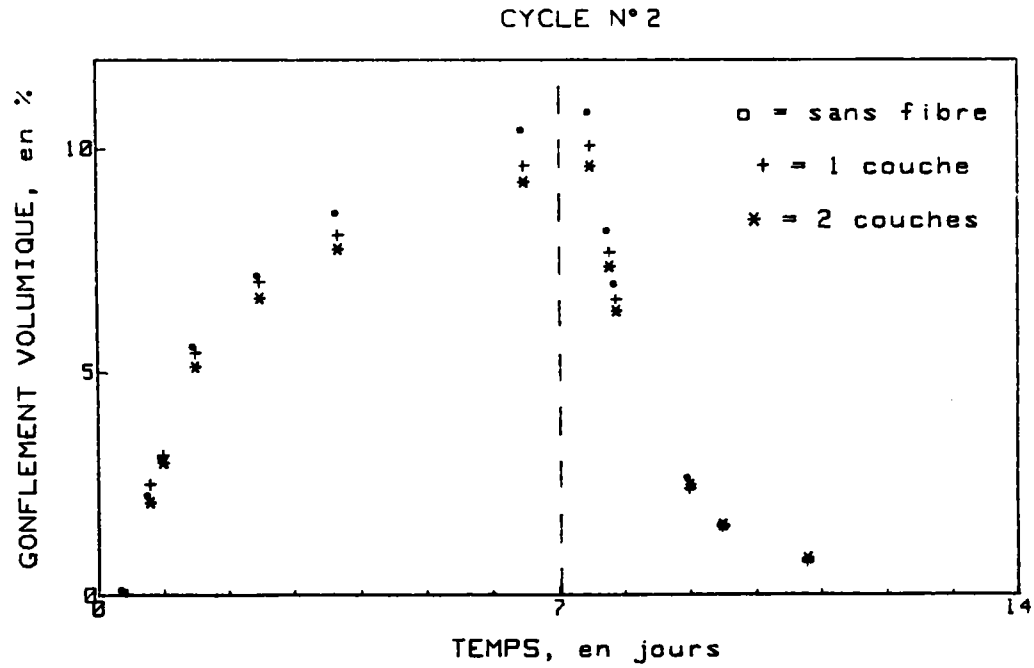


Figure 59 : Variation du volume relatif des trois types d'éprouvettes en fonction du temps.

On voit que la prise de poids se fait moins rapidement pour les éprouvettes renforcées. C'est-à-dire que la diffusion de l'eau dans le bois est plus lente. Celle-ci est donc gênée par la présence de la fibre. Après 21 jours, la valeur maximale de ΔP est 1,3 % moins grande pour une couche de fibre et 2,6 % pour deux couches. A noter la relation du simple au double entre 1 et 2 couches, qui, bien que nous n'ayons pas de justification explicite, n'est vraisemblablement pas le fruit du hasard. Cette relation se conserve au cours du troisième et quatrième cycle jusque l'apparition des fissures.

Le même phénomène se produit avec les variations dimensionnelles. Le gonflement est gêné par les fibres (fig.59). La valeur maximale de ΔV est 0,6 % moins grande pour une couche et 1,1 % pour deux couches. En conclusion de ce bref aperçu du comportement du L.C.R. vis-à-vis de l'humidité, nous dirons que :

- La diffusion de l'eau dans un lamellé-collé renforcé est plus lente et moins importante que dans le cas du même matériau non renforcé.
- Le retrait volumique est également plus lent et moins important.
- Les fissures apparaissent plus vite et en plus grand nombre en l'absence de fibres.
- Dans tous les cas, ce sont les lamelles de bois qui sont fissurées et non les joints de colle (renforcés ou non).
- Après 6 cycles, il y a apparition de défauts dans les joints renforcés. Ces craquelures suivent précisément la forme des mèches du tissu.

4.3.2 Etude au scanner

Le scanner est un appareil qui permet une analyse fine en trois dimensions à l'aide de rayons X non destructifs. Muni d'un complexe informatique qui permet la visualisation des variations densitométriques, sa résolution linéaire est de 0,5 mm. Ce matériel, dans le cas d'une application à l'étude des joints de colle, est susceptible de détecter les défauts de polymérisation, les interfaces de mauvaise qualité, les bulles d'air etc...

L'étude présentée dans ce paragraphe a été menée en collaboration avec le Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique de Marseille (C.N.R.S.) et l'Institut des Technologies et Matériaux Avancés de Compiègne. Le scanner utilisé est celui, à vocation d'abord médicale, de la clinique Clairval de Marseille. L'échelle de mesure des densités est en unités médicales. Donc, il s'agit d'une mesure relative que nous ne relierons pas à des valeurs données dans le Système International d'Unités. L'important est de pouvoir comparer les différentes mesures entre elles par rapport à l'échelle considérée. Afin de fixer les idées, l'appareil est réglé comme suit :

- 1000 H pour la densité de l'air
- 0 H pour l'eau
- + 1000 H pour un os dense

Le symbole H désigne l'unité médicale Hounsfield. Les densités vont, dans l'ordre croissant, du noir le plus sombre (- 1000 H) au blanc le plus pur situé à + 1000 H. Les différentes orientations de l'éprouvette sont données sur la figure de la page 110. Nous pouvons avoir des clichés, soit en coupes axiales de 3 mm d'épaisseur, soit en reconstitutions frontales de 0,5 mm, soit en reconstitutions sagittales de 0,5 mm.

L'analyse peut se faire, soit à l'aide de profils densitométriques (position des pics) le long d'une droite repérée, soit sous forme d'histogrammes reconstitués sur une surface donnée, précisée à chaque fois. Dans ce cas on calcule la moyenne et l'écart type de la distribution. Nous avons envoyé pour analyse des éprouvettes de trois plis de peuplier. Les diapositives (photographies de l'écran de l'ordinateur) correspondent à un morceau d'éprouvette de 40 mm de large sur 30 mm de haut sur 30 mm de long. Les lamelles sont repérées 1, 2 et 3. Le joint entre les plis n° 1 et 2 est renforcé avec une couche de tissu de fibre de verre, le joint entre les plis n° 2 et 3 est en colle pure.

Plûtôt qu'un résumé global, qui deviendrait rapidement ardu et fastidieux, nous préférons donner un commentaire cliché par cliché. On pourra trouver les photocopies des diapositives pages 111 et 112.

Diapositive n° 1 : Profil de densité sur 40 mm de long obtenu sur une coupe axiale de 3 mm d'épaisseur située à 54 mm du bord de l'éprouvette. La droite est sur le joint de colle renforcé. Le collage est satisfaisant, pas de "trou" de densité indiquant un défaut. Le niveau moyen est d'environ - 100 H.

Diapositive n° 2 : 3 coupes sagittales de 0,5 mm d'épaisseur, espacées de 4 mm chacune. Longueur : 30 mm. On voit nettement les différences de densité des trois lamelles de bois :

n° 1 : - 555 H

n° 2 : - 675 H

n° 3 : - 715 H

Le joint renforcé (à gauche) est plus large que celui en colle seule. Un profil de densité le long d'une droite horizontale, sur la coupe du milieu, donne deux pics caractéristiques des deux joints : l'un à - 96 H (avec fibre), l'autre à - 570 H, avec des zones de pénétration tout-à-fait équivalentes (± 2 mm).

Diapositive n° 3 : 3 coupes frontales de 0,5 mm d'épaisseur, séparées de 2,5 mm chacune. La coupe supérieure se situe dans la lamelle n° 2. L'aire est séparée en deux parties de densités très différentes. Ceci correspond au passage sur un cerne (bois de printemps moins dense à gauche) . La coupe du milieu est dans le joint de colle pure. La coupe inférieure dans la lamelle n° 3. Les histogrammes pris sur ces trois rectangles donnent :

pli n° 2 : - 651 H $\pm$ 29 H

colle pure : - 531 H $\pm$ 33 H

pli n° 3 : - 717 H $\pm$ 29 H

(*) Nous remercions vivement Mr. A.Cagnasso, physicien à l'I.T.M.A. de Compiègne pour sa précieuse collaboration.

Diapositive n° 4 : Même observation cette fois sur des coupes espacées de 2 mm, centrées sur le joint avec fibre d'une deuxième éprouvette.

pli n° 1 : - 502 H $\pm$ 24 H

joint renforcé : - 81 H $\pm$ 62 H

pli n° 2 : - 637 H $\pm$ 40 H

Présence d'un cerne sur la coupe inférieure. La fibre, très dense par rapport au bois, donne un rectangle parfaitement blanc. Les dispersions indiquent que le joint renforcé est moins homogène mais toutefois dans des proportions normales, compte-tenu de sa structure.

Diapositive n° 5 : 2 histogrammes comparatifs issus de coupes frontales prises respectivement à 0,5 mm et 1 mm de profondeur sous la zone où nous avons repéré une dégradation biologique flagrante à l'oeil nu. On voit nettement le déplacement du pic. A 0,5 mm le bois est dégradé et la densité chute à - 600 H. A 1 mm de profondeur le pic se déplace vers la droite et la densité redevient quasi-normale : - 460 H. Ceci corrobore l'analyse biologique du § 2.4.1. A savoir que la dégradation due au phénomène de bleuissement du peuplier était superficielle, n'allant pas au-delà de 1 mm de profondeur.

Les éprouvettes témoins que nous avons analysées par tomodensitométrie (scanner X) indiquent donc une bonne homogénéité du joint renforcé. Les interfaces sont sans défauts notables, avec la colle seule comme avec le joint renforcé. La dégradation biologique est uniquement superficielle.

Nous terminerons en remarquant qu'il est difficile dans le cas de nos éprouvettes de donner les densités absolues de la colle et du joint renforcé. La précision de mesure est trop faible (0,5 mm) vis-à-vis des épaisseurs des joints (0,2 mm sans fibre et 0,6 mm avec fibre). Cependant, ceci n'est pas gênant dans une étude comparative comme celle menée ci-dessus.

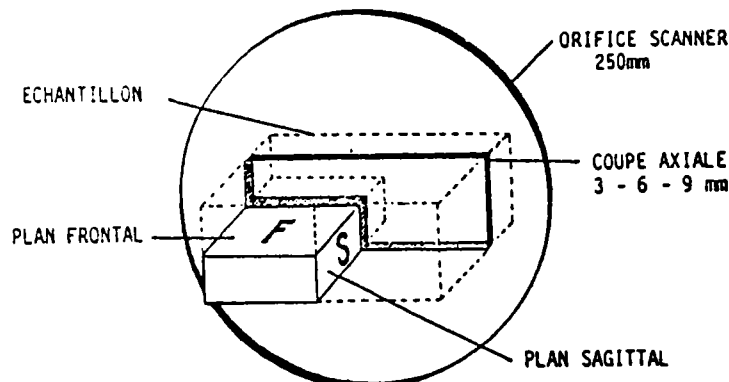
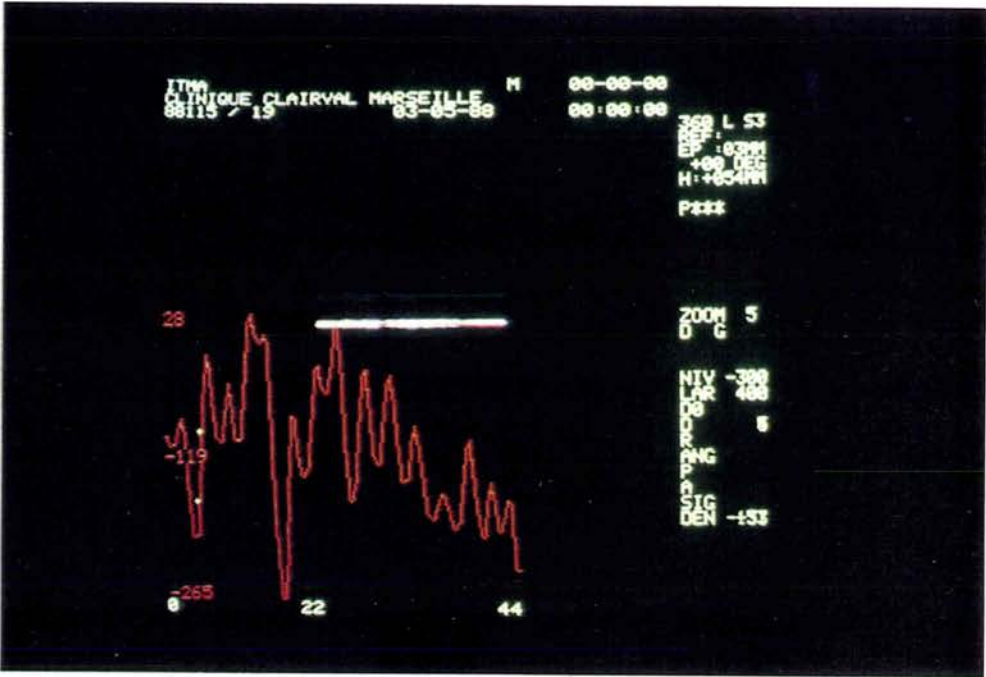
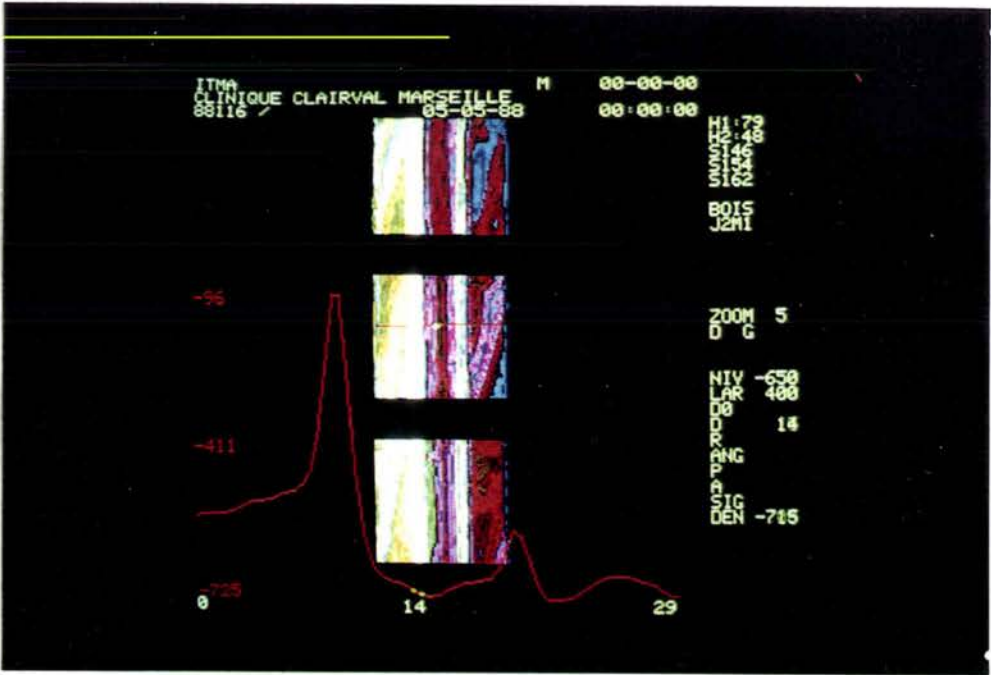


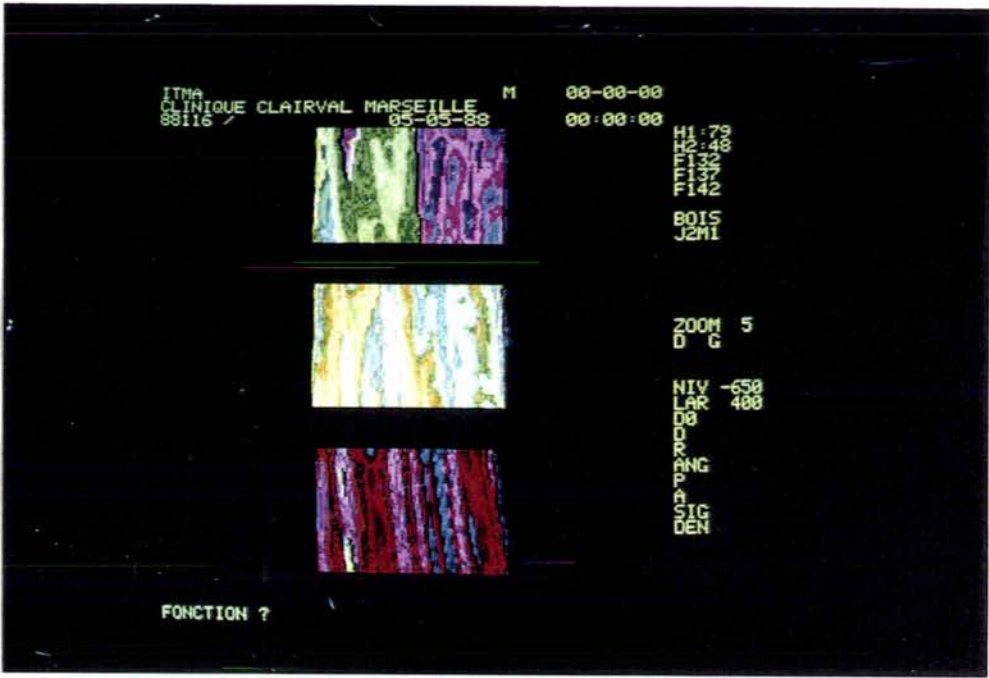
Figure 60 : Plans de coupe analysés par le scanner.



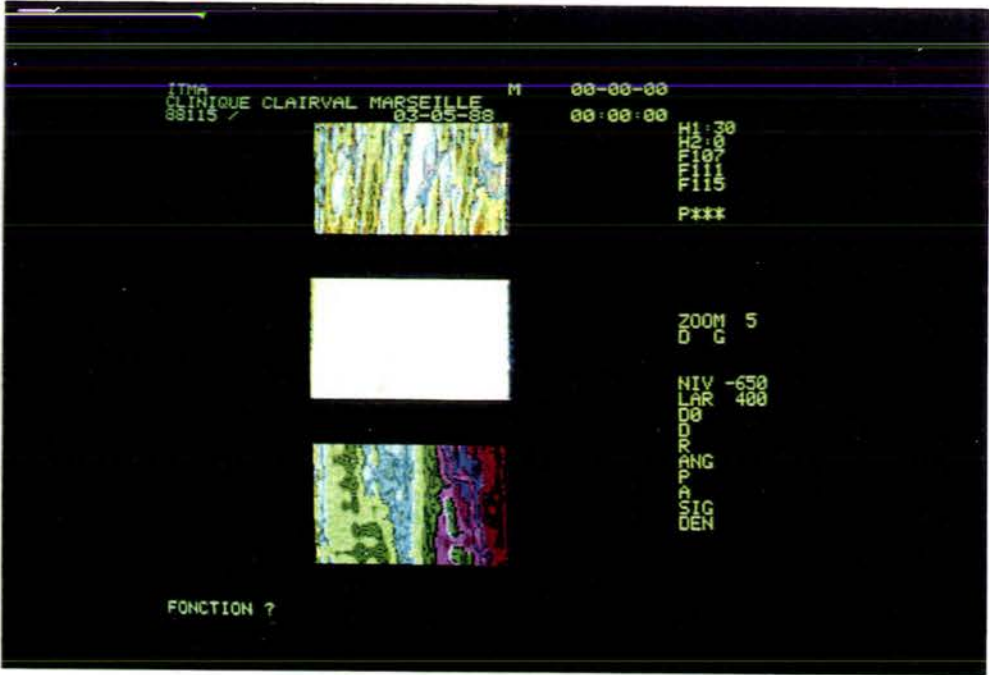
Diapositive n° 1



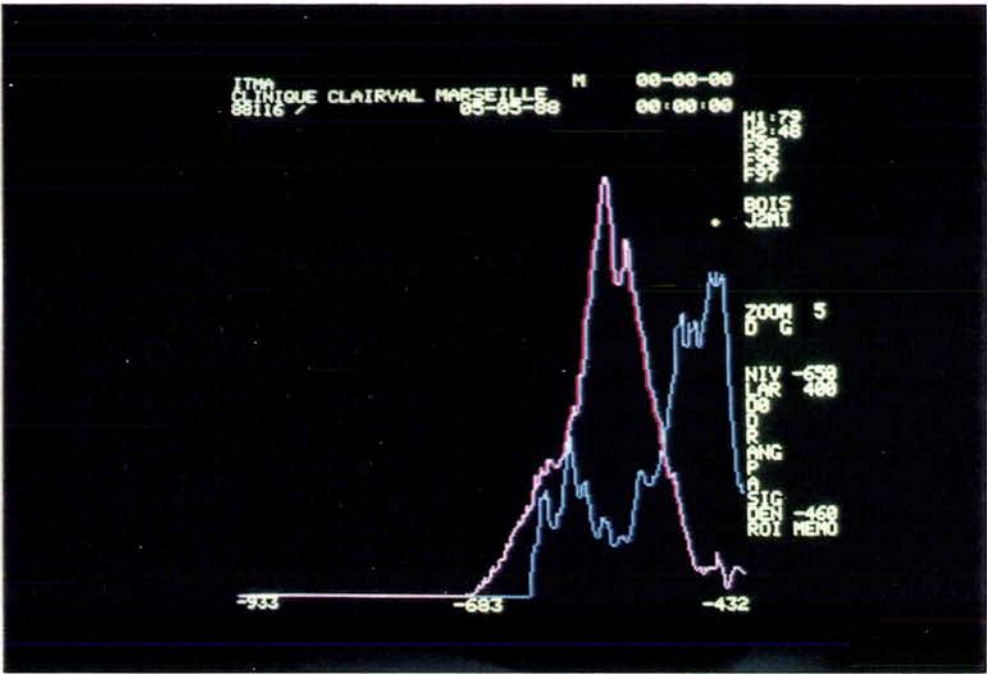
Diapositive n° 2



Diapositive n° 3



Diapositive n° 4



Diapositive n° 5

CONCLUSION

La faisabilité technique d'un lamellé-collé de peuplier renforcé par fibre de verre (L.C.R.) était notre premier objectif. Celui-ci a été atteint. Nous avons pu fabriquer des poutres d'un mètre de longueur. Ces échantillons ne présentent aucune trace de délamination. Ils sont durables et facilement réalisables sur le plan pratique. La technique de fabrication est la même que celle d'un lamellé-collé traditionnel. La couche de fibre de verre (rectangle de tissu d'un demi-millimètre d'épaisseur) s'insère simplement entre deux lamelles de bois.

L'interface bois-colle n'a pas posé de problème majeur, la résorcine est d'ailleurs un adhésif phénolique couramment employé par les industries du bois. L'étude de la deuxième interface mise en jeu (colle-fibre) a montré que la qualité d'un joint renforcé par fibre est tout-à-fait satisfaisante. La fibre n'est pas traitée chimiquement et est utilisée telle quelle, ayant seulement subi l'ensimage du fournisseur industriel. La tenue du joint lors des essais mécaniques, ainsi que pendant les cycles en atmosphère humide, de même que l'analyse spectrométrique (scanner), montrent que les joints renforcés ne présentent aucun défaut suffisamment important pour perturber les résultats. La rupture, quelque soit l'essai, se fait toujours dans le bois.

Les essais mécaniques que nous avons effectués sur notre composite montrent que l'introduction de fibre de verre produit une augmentation systématique du module d'élasticité (par rapport au module du lamellé-collé équivalent sans fibre). Cette augmentation varie de 7 % à 32 % suivant le type d'essai et le nombre de couches de tissu de verre.

La contrainte à la limite élastique tend à diminuer (cas de la flexion) ou reste inchangée (cas de la traction). La déformation à la limite élastique diminue de façon systématique, de 6 % à 35 % suivant l'éprouvette envisagée. Dans tous les cas, on rigidifie le matériau, c'est-à-dire qu'à contrainte constante la déformation diminue.

Exception faite du cas de la flexion sur un lamellé-collé de cinq plis, où celle-ci reste constante; la contrainte à rupture s'accroît de 10 % à 45 % suivant le type d'essai et le nombre de couches de fibre. Aucune évolution reproductible n'a pu être enregistrée sur la déformation à rupture.

Après la rupture, telle que nous l'avons définie, le L.C.R. continue à supporter 70 % à 90 % de sa charge maximale pendant un laps de temps relativement long. La déformation peut alors dépasser 3 %. Ce phénomène est général en ce qui concerne la flexion trois points, il survient dans un tiers à deux tiers des cas pour les autres types de sollicitations statiques.

En considérant un matériau orthotrope multicouche, possédant des interfaces parfaites, les résultats expérimentaux peuvent être modélisés de manière satisfaisante. Pour une sollicitation en traction, la somme des modules d'Young ou des contraintes à rupture de chaque couche, pondérée par les sections droites respectives, donne une bonne approximation du comportement de l'ensemble.

Pour la flexion, la somme des modules d'élasticité ou des contraintes à rupture de chaque couche, pondérée par les moments d'inertie respectifs, apporte également une bonne prévision théorique.

Un travail plus approfondi sur l'ensemble colle-fibre a permis de concevoir et de fabriquer des éprouvettes massives, d'une part en colle pure (= matrice thermodurcissable), d'autre part en résorcine renforcée avec 40 % de fibre de verre en volume. Les résultats montrent que dans les deux cas, les caractéristiques mécaniques optimales sont obtenues après trois mois de stabilisation. Le modèle linéaire classique, utilisé pour décrire le comportement des composites à matrice polymère, renforcés par fibre de verre, est adapté à ce type d'éprouvette.

La majorité des modèles théoriques, que nous avons utilisés dans le cadre de notre travail, fait appel aux caractéristiques mécaniques de chaque élément constitutif, pris séparément. Aussi, avons-nous réalisé des séries d'essais, d'abord sur la fibre de verre, puis sur la résorcine et enfin sur le peuplier. Les résultats expérimentaux sont analysés à l'aide de deux statistiques (Gauss et Weibull). Exception faite de la mesure de la densité du bois, la statistique de Weibull est, en général, mieux adaptée.

Les résultats de l'étude du comportement du L.C.R. sous sollicitations statiques prouvent que ce produit peut se révéler intéressant pour des applications en structure. De plus, une étude économique succincte, faite aux U.S.A. en 1981 sur un produit similaire, semble démontrer la rentabilité du procédé. Le renforcement par fibre entraîne une réduction des dimensions des poutres. Ou inversement, à sections identiques, la charge supportée peut être plus importante. La capacité du composite à conserver environ 80 % de sa charge maximale après rupture est un facteur de sécurité non négligeable. L'application en extérieur n'est pas à exclure au vu des premiers résultats encourageants, obtenus au cours du cyclage en atmosphère humide.

Il serait donc important de continuer les recherches sur ce composite. En particulier, nous pensons que les priorités devraient être : l'étude de la tenue dans le temps sous charge statique (fluage), et l'étude des effets d'échelle, à l'aide de poutres de grandes dimensions. Enfin, l'influence de l'humidité et la tenue au feu sont également à prendre en considération.

ANNEXE

Nous donnons ici un tableau récapitulatif, contenant le nombre d'éprouvettes fabriquées et testées pour chaque type d'essai. Ceci, dans le but d'avoir une vision synthétique des essais réalisés pour l'étude du L.C.R.

Matériaux	Type d'essai	Nombre d'éprouvettes
Fibre de verre	Traction	32
Résorcine	Traction	7
Joint renforcé	Traction	6
Peuplier	Traction	69
Résorcine	Flexion	6
Joint renforcé	Flexion	7
Peuplier	Flexion	276
Echantillons collés	Cisaillement	57
L.C.R.	Traction	12
L.C.R.	Flexion	36
L.C.R.	Cycles en humidité	6
L.C.R.	Analyse scanner	2

		Total : 516

Tableau 22 : Résumé des essais réalisés pour la caractérisation du L.C.R.

REFERENCES

- [1] T.L.LAUFENBERG, R.E.ROWLANDS, G.P.KRUEGER " The economic feasibility of synthetic fiber reinforced parallel-laminated veneer " Forest. Prod. J., num.4, tome 34, pp.15-22 (1984)
- [2] G.S.HOLISTER, C.THOMAS " Fiber reinforced materials " Elsevier Publishing, London (1966)
- [3] BROCHIER " Notice technique des tissus de fibre de verre de la société Brochier " non publié (1986)
- [4] P.K.JARVELA " Bending strength and static fatigue of glass fibre in different atmospheres by fibre loop test " J. Mat. Sci., num.19, pp.2481-2487 (1984)
- [5] CETIM " Guide du collage " Ed. Artistique, Paris (1978)
- [6] P.HALLER " Mesure de la ténacité du bois collé, modélisation de la ténacité par l'intermédiaire de la méthode des éléments finis et de la mécanique de la rupture " Thèse INPL, Nancy (1987)
- [7] F.F.P.KOLLMANN " Principles of wood science and technology " tomes 1 et 2, Springer-Verlag, New-York (1968)
- [8] ARBOLOR " Le matériau bois " Ecole d'Hiver sur le Bois, Albe (1983)
- [9] D.GUITARD " Mécanique du matériau bois et composites " Cépadues Ed., Toulouse (1987)
- [10] J.BODIG, B.A.JAYNE " Mechanics of wood and wood composites " Van Nostrand Reinhold Company, New-York (1982)
- [11] CTBA " Le peuplier en structure " document technique, Paris (1985)
- [12] J.O.DRAFFIN, C.W.MUHLENBRUCH A.S.T.M. Rep.96 (1937)
- [13] F.D.SPAUN " Reinforcement of wood with fiberglass " Forest.Prod.J., num.4, tome 31, pp.26-33 (1981)

- [14] R.E.ROWLANDS, R.P.VAN DEWEGHE " Fiber-reinforced wood composites " Wood and Fibre Science, num 1, tome 18, pp.39-57 (1986)
- [15] R.MARK " Wood-aluminum beams within and beyond the elastic range " Forest. Prod. J., num.10, tome 11, pp.477-484 (1961)
- [16] G.LANTOS " Test results on mild steel reinforced glulam timber beams " Civil Eng. and Public Works Review, num.54, pp.1261-1264 (1964)
- [17] F.F.WANGAARD " Elastic deflection of wood-fiberglass composite beams " Forest. Prod. J., num.6, tome 14, pp.256-260 (1964)
- [18] E.J.BIBLIS " Analysis of wood-fiberglass beams within and beyond the elastic region " Forest. Prod. J., num.2, tome 15, pp.81-88 (1965)
- [19] F.H.THEAKSTON " A feasibility study for strengthening timber beams with fiberglass " Canadian Agric. Eng., pp.17-19 (1965)
- [20] C.BOEHME, V.SCHULZ " Behavior of GFK (glass-fiber reinforced plastic) - wood sandwiches " Holz Roh. werkst., num.32, pp.250-256 (1974)
- [21] WOOD HANDBOOK : Wood as an engineering material. Agriculture Handbook 72, Washington D.C., U.S. Department of Agriculture (1987)
- [22] W.A.NASH " Résistance des matériaux " tomes 1 et 2, série Schaum, Mc Graw-Hill, Paris (1974)
- [23] HANDBOOK of MATHEMATICAL FUNCTIONS, Abramowitz and Stegun, Dover Publications, New-York (1964)
- [24] A.de S.JAYATILAKA " Fracture of engineering brittle materials " Applied Science Publishers LTD, London (1979)
- [25] J.VENET " Etude macroscopique des bois (indigènes ou introduits) cultivés en France " ENGREF, Cours d'Anatomie, Nancy (1986)

- [26] J.CHARDENON, G.SOULERES articles parus dans " Forêt entreprise " n°38 Sept. 1986
- [27] J.CHARDENON " Le peuplier aujourd'hui et demain " Institut pour le Développement Forestier, Paris (1982)
- [28] R.KELLER " Structure, composition, formation du bois " ENGREF, Cours de Structure Cellulaire, Nancy (1985)
- [29] V.FEODOSSIEV " Résistance des matériaux " Editions MIR, Moscou (1973)
- [30] A.C.UGURAL, S.K.FENSTER " Advanced strength and applied elasticity " American Elsevier Publishing Company, New-York (1975)
- [31] F.P.BEER, E.R.JOHNSON " Mechanics of materials " Mc Graw-Hill Book Company, New-York (1981)
- [32] NORME BRESILIENNE sur les calculs des structures en bois NBR 7190, ABNT, São Paulo (1951)
- [33] J.M.MOULIN , Congrès ADHECOM 89, du 20 au 23 Mars 1989 à Bordeaux, La Nef-imprimeur, Bordeaux (1989)
- [34] M.MANERA, J.J.MASSOT, G.MOREL " Manuel de calcul des composites verre-résine " Ed. Pluralis, Paris (1988)
- [35] S.I.B. 87 , Congrès du 22 au 24 Avril 1987 à Nancy, tomes 1 et 2, Ed. ARBOLOR, Nancy (1987)
- [36] J.J. MEYNIS de PAULIN " Les colles et adhésifs " tomes 1, 2 et 3, Ed. Guy le Prat, Paris (1979)
- [37] M.KERGUIGNAS, G.CAIGNAERT " Résistance des matériaux " Dunod Université, Paris (1977)

- [38] W.M.BULLETT " Reinforcement of wood materials : a review " Wood and Fiber Science, num.3, tome 16, pp.391-397 (1984)

- [39] W.A.KOREL, K.HOEFELMANN, E.PLUEDDEMAN " Neuartige organofunktionelle Silane als Haftvermittler für verstärkte Kunststoffe " Kunststoffe, num. 65, tome 11, pp.760-763 (1975)

- [40] J.M.MOULIN, P.JODIN " L.C.R. : un nouveau composite " Le Bois National, num.46, pp.34-35 (1988)

LISTE DES FIGURES

	Page
<u>Figure n° 1</u> : Principaux modes de tissage de la fibre de verre.	14
<u>Figure n° 2</u> : Méthode de la boucle pour la détermination indirecte de la contrainte à rupture.	15
<u>Figure n° 3</u> : Structure microscopique d'un bois feuillu.	18
<u>Figure n° 4</u> : Repère orthogonal et plans de coupe d'un tronçon de grume.	18
<u>Figure n° 5</u> : Relation linéaire entre module d'Young et densité pour le balsa (essai de flexion et de compression).	20
<u>Figure n° 6</u> : Schéma d'une poutre lamellée-collée.	23
<u>Figure n° 7</u> : Représentation schématique du tissu de fibre de verre.	32
<u>Figure n° 8</u> : Epreuve de traction en fibre de verre.	33
<u>Figure n° 9</u> : Histogramme et statistiques sur le module d'élasticité longitudinal du tissu de verre.	36
<u>Figure n° 10</u> : Courbe contrainte-déformation d'une éprouvette de fibre de verre en traction.	38
<u>Figure n° 11</u> : Histogramme et statistiques sur la contrainte à rupture du tissu de verre.	38
<u>Figure n° 12</u> : Moule de traction servant à la fabrication des éprouvettes en colle massive.	39
<u>Figure n° 13</u> : Montage rotatif permettant d'obtenir des éprouvettes homogènes.	40
<u>Figure n° 14</u> : Moule de conservation des éprouvettes en colle massive.	41
<u>Figure n° 15</u> : Comportement de la résorcine pure massive en traction.	42
<u>Figure n° 16</u> : Evolution du module d'Young de la résorcine en fonction du temps de stockage.	43
<u>Figure n° 17</u> : Evolution de la contrainte à la limite élastique de la résorcine en fonction du temps de stockage.	43

	Page
Figure n° 18 : Retraits volumiques des éprouvettes de traction en fonction du temps de stockage.	44
Figure n° 19 : Eprouvette de cisaillement en peuplier avec joint renforcé.	45
Figure n° 20 : Contrainte à rupture en cisaillement des joints de colle renforcés en fonction de la fraction volumique de fibre.	47
Figure n° 21 : Exemple de courbe de comportement d'un joint renforcé en traction.	48
Figure n° 22 : Evolution du module d'Young d'un joint renforcé en fonction du temps de stockage.	49
Figure n° 23 : Evolution de la contrainte à la limite élastique d'un joint renforcé en fonction du temps de stockage.	49
Figure n° 24 : Evolution de la contrainte à rupture d'un joint renforcé en fonction du temps de stockage.	50
Figure n° 25 : Retraits volumiques des éprouvettes de traction en colle + fibre en fonction du temps de stockage.	50
Figure n° 26 : Diagramme comparatif entre E_j théorique en fonction de u_f et les résultats expérimentaux.	53
Figure n° 27 : Modules d'élasticité longitudinaux des éprouvettes de traction en peuplier.	55
Figure n° 28 : Moule servant à la fabrication des éprouvettes de flexion.	57
Figure n° 29 : Montage de flexion trois points pour les éprouvettes en résorcine massive.	58
Figure n° 30 : Exemple de comportement de la résorcine massive en flexion (éq. 3.3 et 3.4).	59
Figure n° 31 : Evolution du module d'Young de la résorcine massive testée en flexion.	60
Figure n° 32 : Evolution de la contrainte à la limite élastique de la résorcine massive.	60

	Page
<u>Figure n° 33</u> : Retraits volumiques des éprouvettes de flexion en fonction du temps de stockage.	61
<u>Figure n° 34</u> : Exemple de comportement d'un joint renforcé en flexion.	62
<u>Figure n° 35</u> : Evolution du module d'élasticité longitudinal.	63
<u>Figure n° 36</u> : Evolution de la contrainte à la limite élastique.	63
<u>Figure n° 37</u> : Evolution de la contrainte à rupture.	64
<u>Figure n° 38</u> : Retraits volumiques des éprouvettes de flexion en colle + fibre.	64
<u>Figure n° 39</u> : Dispositif de flexion trois points pour la mesure du module d'Young du peuplier.	66
<u>Figure n° 40</u> : Histogramme et statistiques obtenus sur le module d'élasticité longitudinal du peuplier.	67
<u>Figure n° 41</u> : Densité du peuplier.	68
<u>Figure n° 42</u> : Points expérimentaux et modèles existants pour la courbe E_b fonction de la densité.	70
<u>Figure n° 43</u> : Droite des moindres carrés.	71
<u>Figure n° 44</u> : Points expérimentaux et modèle proposé.	71
<u>Figure n° 45</u> : Eprouvette de L.C.R. destinée à un essai de traction.	81
<u>Figure n° 46</u> : Courbes contrainte-déformation d'un L.C.R. 2 couches et d'un lamellé-collé traditionnel.	82
<u>Figure n° 47</u> : Comparaison graphique des courbes obtenues avec les valeurs moyennes du tableau 13.	83
<u>Figure n° 48</u> : Composite multicouche, schéma de la section droite.	84
<u>Figure n° 49</u> : Eprouvette de L.C.R. 5 plis.	88
<u>Figure n° 50</u> : Montage de flexion 3 points.	88

	Page
<u>Figure n° 51</u> : Montage de flexion 4 points.	89
<u>Figure n° 52</u> : Courbes contrainte-déformation d'un L.C.R. 2 couches et d'un lamellé-collé traditionnel obtenues sur un essai de flexion.	91
<u>Figure n° 53</u> : Comparaison graphique des courbes obtenues avec les valeurs moyennes du tableau 16.	94
<u>Figure n° 54</u> : Comparaison graphique des courbes obtenues avec les valeurs moyennes du tableau 17.	94
<u>Figure n° 55</u> : Configuration dans laquelle l'éprouvette continue de supporter 80 % de sa charge maximale.	95
<u>Figure n° 56</u> : Eprouvette de L.C.R. utilisée pour le cyclage en humidité.	100
<u>Figure n° 57</u> : Humidité de l'air en fonction du temps.	101
<u>Figure n° 58</u> : Variation du poids relatif des trois types d'éprouvettes en fonction du temps.	102
<u>Figure n° 59</u> : Variation du volume relatif des trois types d'éprouvettes en fonction du temps.	102
<u>Figure n° 60</u> : Plans de coupe analysés par le scanner.	105

LISTE DES TABLEAUX

	Page
<u>Tableau n° 1</u> : Caractéristiques mécaniques de la fibre de verre de type E.	15
<u>Tableau n° 2</u> : Caractéristiques mécaniques des colles à base phénolique.	16
<u>Tableau n° 3</u> : Composition chimique du peuplier (Populus).	19
<u>Tableau n° 4</u> : Caractéristiques mécaniques du peuplier.	19
<u>Tableau n° 5</u> : Caractéristiques mécaniques du joint renforcé.	23
<u>Tableau n° 6</u> : Caractéristiques des éprouvettes de flexion renforcées par fibre de verre.	26
<u>Tableau n° 7</u> : Résultats du renforcement de matériaux à base de bois par de la fibre de verre.	25
<u>Tableau n° 8</u> : Prévisions théoriques des modules d'élasticité des composites.	28
<u>Tableau n° 9</u> : Résultats des essais de traction sur la fibre de verre.	36
<u>Tableau n° 10</u> : Résultats des essais de traction sur le peuplier.	54
<u>Tableau n° 11</u> : Module d'élasticité longitudinal moyen du bois de peuplier.	68
<u>Tableau n° 12</u> : Densité moyenne du peuplier.	69
<u>Tableau n° 13</u> : Ensemble des résultats expérimentaux provenant des essais de traction.	82
<u>Tableau n° 14</u> : Comparaison théorie-expérience appliquée au module d'élasticité longitudinal du composite.	85
<u>Tableau n° 15</u> : Comparaison théorie-expérience appliquée à la contrainte à rupture en traction du composite.	87

	Page
<u>Tableau n° 16</u> : Résultats expérimentaux des essais de flexion trois points sur les poutres de 5 plis.	92
<u>Tableau n° 17</u> : Résultats expérimentaux des essais de flexion quatre points sur les poutres de 7 plis.	93
<u>Tableau n° 18</u> : Résultats expérimentaux des essais de flexion quatre points sur les poutres de 9 plis.	92
<u>Tableau n° 19</u> : Comparaison théorie-expérience appliquée au module d'élasticité longitudinal du composite (5 plis).	96
<u>Tableau n° 20</u> : Comparaison théorie-expérience appliquée au module d'élasticité longitudinal du composite (7 plis).	97
<u>Tableau n° 21</u> : Comparaison théorie-expérience appliquée à la contrainte à rupture en flexion du composite.	98
<u>Tableau n° 22</u> : Résumé des essais réalisés pour la caractérisation du L.C.R.	112