

N° Ordre...../FSI/UMBB/2019

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université M'hamed BOUGARA – Boumerdes  
Faculté Des Sciences De L'ingénieur  
Département de Génie des procédés



UNIVERSITE  
DE BOUMERDES

### THESE DE DOCTORAT

En vue de l'obtention du diplôme de  
Doctorat en Sciences et Génie des Matériaux

**Option : Matériaux des structures**

Présentée par :

**BELKACEMI CHERIFA épouse MEKKI**

Thème :

**Etude et caractérisation des matériaux composites à  
matrice en résine polyester, renfort et âme naturels.**

Devant le Jury composé de:

<b>BENMOUNAH Abdelbaki</b>	Professeur	U.M.B Boumerdes	<b>Président</b>
<b>HAMOUDA Khaled</b>	Professeur	U.S.T.H.B	Examineur
<b>SAYAH Tahar</b>	Professeur	U.S.T.H.B	Examineur
<b>BADIDI BOUDA Ali</b>	Directeur de Recherche	C.R.T.I	Examineur
<b>DILMI Hamid</b>	MCA	U.M.B.Boumerdès	Examineur
<b>BEZZAZI Boudjema</b>	Professeur	U.M.B.Boumerdès	Directeur de thèse

Année Universitaire : 2018 / 2019

## Remerciements

*Ce mémoire n'aurait pas vu le jour sans la collaboration et le soutien de nombreuses personnes. Je tiens toutes à les remercier du fond du cœur.*

*Ce travail a été réalisé au sein de l'Unité de Recherche Matériaux, Procédés et Environnement (URMPE) et au laboratoire de génie mécanique de l'UMBB et au niveau des laboratoires des matériaux composites et de la maintenance de la compagnie Air Algérie.*

*Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur le Professeur Bezzazi Boudjema de l'Université de Boumerdes, responsable d'équipe de recherche mécanique pour avoir bien voulu m'encadrer dans ce travail de doctorat. Je le remercie également pour avoir accepté de diriger mes recherches, de ses précieux conseils et de son soutien dont il a fait preuve tout au long de ce travail.*

*Je remercie vivement Monsieur le Professeur BENMOUNAH Abdelbaki Directeur de l'Unité de Recherche Matériaux, Procédés et Environnement (URMPE). Pour le grand honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury et pour m'avoir accueilli durant ces années de thèse au sein de l'unité de recherche de l'université de Boumerdes (UMBB). Qu'il soit assuré de toute ma reconnaissance.*

*En second lieu, je souhaiterais adresser mes sincères remerciements aux membres du jury et surtout Monsieur le professeur SAYAH et Monsieur le professeur HAMOUDA de l'université USTHB, Monsieur BADIDI BOUDA Directeur de Recherche de Centre de Recherche en Technologies Industrielles de Chéraga (C.R.T.I) et Monsieur DILMI maître de conférence de l'université de Boumerdes (UMBB) d'avoir accepté de lire, examiner, rapporter, annoter, bref, de se pencher attentivement sur les pages de ce mémoire. Leurs observations et regards critiques ont été encourageants et ont contribué à la publication de ce mémoire.*

*Je remercie le Vice-Recteur (UMBB): PR SAIDI Mohamed et Mr GHARBI chef de département maintenance (AIR ALGERIE) pour leur aide ainsi que tous les membres des laboratoires des matériaux composites et de la maintenance de la compagnie «Air*

*Algérie». Et le laboratoire URMPE qui a contribué aussi, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail. Je tiens à remercier particulièrement Monsieur Said, Mohamed et Monsieur Rabah de laboratoire de génie mécanique de FSI de l'UMBB pour leurs serviabilités. Je n'oublie pas, surtout, mes collègues de travail au sein de l'école nationale de conservation et de restauration des biens culturels ENCRBC.*

*Je remercie le service commercial de l'entreprise de liège EPE TALEZA de Collo, Skikda et de la société de jute BEJE - BEJAIA EMBALLAGE pour l'accueil et l'aide.*

*Je remercie Ma mère, Grâce à elle, il y a eu encore plus de soleil dans la vie.*

*Un remerciement particulier pour mon marie, pour son aide et son soutien, et sa patience qui m'ont permis d'acheverce travail ; Grâce à lui, j'ai pu mon passer tout les moments difficiles, durant mon travail ... merci.*

*Je remercie Mes merveilleux enfants qui m'avoir toujours fait sourire malgrédes hauts et des bas. À eux je voudrais offrir mes réussites.*

*Pour finir, je remercie mes sœurs, pour leur soutien depuis de nombreuses années.*

*C'est pour moi une page pleine d'expériences qui se tourne, alors tournons-la ensemble et encore un grand MERCI à toutes et tous.*

*Enfin, que tous ceux que nous n'avons pas nommés, trouvent ici l'expression de notre gratitude.*

---

## **Dédicaces**

**À La mémoire de mes chères, père, frère et sœurs.**

**À Ma cher mère, qui a toujours cru en moi et m'a soutenu  
et aidé pour arriver jusqu'ici.**

**À Mon mari.**

**À mes enfants (Abdeldjalil, Mohamed Imad, Roukia  
Yousra et Sibat arrahmen).**

**À Mes sœurs, Nawal, Samida, Ghalia, Fadila<sup>2</sup>.**

**À Mes amies et surtout Ablq.**

**À Mes nièces et mes neveux.**

**À Mes beaux : pères, frères et sœurs.**

**Belkacemi Cherifa**

---

**Liste des annotations**

$\alpha$  : Coefficient d'expansion thermique ( $10^{-6}/K$ ) ;  
PS : polystyrène ;  
PE : polyéthylène ;  
PVC : polychlorure de vinyle ;  
PLA : polylactone ;  
TPS : polysaccharose naturel ;  
MEB : microscope électronique à balayage ;  
 $\lambda$  : flèche maximale en flexion trois points ;  
L : distance entre appuis (mm),  
b : largeur de l'éprouvette ;  
h : épaisseur de l'éprouvette ;  
T.G.A. : Analyse thermogravimétrique ;  
 $\Delta m$  : variation de masse ;  
Conductivité thermique (W/m.K) ;  
Chaleur spécifique (MJ/m<sup>3</sup>.K) ;  
 $\sigma_{max}$  : contrainte max de rupture ;  
G : module de cisaillement (GPa) ;  
N : Module de cisaillement en flexion du sandwich (N) ;  
D : Module de rigidité en flexion du sandwich (N x mm<sup>2</sup>) ;  
Ga : Module de cisaillement de l'âme du sandwich (N/mm<sup>2</sup>) ;  
P1 : Effort maxi (N) en flexion 3 pts;  
P2 : Effort maxi (N) en flexion 4 pts.  
d1 : distance entre appuis (mm) flexion 3 pts;  
d2 : distance entre appuis (mm) flexion 4 pts;  
es : épaisseurs des semelles (mm);  
w1 : flèche flexion 3 points;  
w2 : flèche flexion 4 points  
ea : épaisseur de l'âme (mm);  
h : hauteur totale (mm);  
b : largeur (mm) ;

---

$W_p$  : pouvoir d'absorption (kg/m<sup>2</sup>);

$m_0$  : masse initiale (kg);

$m_{24}$  : masse après 24h (kg);

$A_p$  : (aire) longueur x largeur (m<sup>2</sup>).

## Liste des figures

Figure.1.1 : Proportion des fibres végétales usuelles dans la production mondiale [1].....	2
Figure1. 2 : courbe contrainte/allongement relevée lors d'un essai de traction sur une résine thermodurcissable.....	9
Figure 2.1: Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine.....	18
Figure 2.2 : Présentation de différentes fibres végétales.....	19
Figure 2.4: Jute vert et jute rouie.....	22
Figure 2.5 : vue microscopique (MEB) d'une fibre de jute.....	22
Figure 2.6 : Micrographies de la fibre de jute obtenu par l'analyse SEM. [16].....	23
Figure 2.7 -Vue en coupe transversale d'une microstructure de la fibre de jute. [63].....	23
Figure 2.8 : Stratifié jute/pp : (a) non traité, (b) traité à l'alcaline [49].....	26
Figure : 2.9 : (a) Tronc après la levée du liège, (b) Chêne-liège.....	29
Figure 2.10 ...: Aire de répartition du chêne liège.....	30
Figure 2.11 : plaques en liège étaient employées pour isoler les bâtiments.....	31
Figure 2.12 : l'utilisation du liège dans la construction de toits en Afrique du Nord.....	31
Figure 2.13 : Utilisation du liège pour la construction des ruches.....	32
Figure 2.14 : Carte de répartition de chêne liège dans le monde [50].....	32
Figure 2.15 : Composition tissulaire du chêne liège. [120].....	35
Figure 2. 16 : composition chimique du liège [73].....	36
Figure 2.17 : Surface de chêne-liège dans le Monde (ha).....	39
Figure 2.18 : Production mondiale du liège [145] Dehane, B et al. 2012/.....	39
Figure 2.19 : Aire de répartition du chêne liège en Algérie DGF, 2003 - [147].....	40
Figure 2.20 : Production nationale annuelle de liège entre 1965-2010 [148].....	41
Figure 2.21 : La récolte du liège naturel.....	41
Figure.3.1 : Essai de traction sur des fibres de jute traitées.....	49
Fig.3.2 : essai de traction de la fibre de jute.....	51
Fig. 3.3 a) Courbes de traction sens chaîne.....	51
Figure 3.4. : Eprouvettes de traction de renfort en jute tissé.....	52
Figure 3.5 – Machine universelle de traction ZWICK 250/SN5A.....	53
Figure 3.6 : Position de l'éprouvette entre les deux mâchoires.....	53
Figure 3.7 : (a) jute filé, tressé, (b) mailles serrées, (c) grosses mailles.....	54
Fig. 3.8 : Essais de traction du jute utilisé non ensimé grosse maille à 0° (a).....	55
Figure 3.9 Essais de traction du jute utilisé ensimé grosse maille à 0° (a).....	56
Figure 3.10 Essais de traction du jute utilisé non ensimé grosse maille à 90° (a).....	57
Figure 3.11 Essais de traction du jute utilisé ensimé grosse maille à 90° (b).....	58

Figure 3.12 Essais de traction du jute neuf non ensimé grosse maille à 0° (b).....	59
Figure 3.13 Essais de traction du jute neuf ensimé grosse maille à 0° (b).....	60
Figure 3.14 : Essais de traction du jute neuf non ensimé grosse maille à 90° (b).....	61
Figure 3.15 Essais de traction du jute neuf ensimé grosse maille à 0° (c).....	62
Figure 3.16 Essais de traction du jute utilisée non ensimé maille Fine à 0° (c).....	63
Figure 3.17 Essais de traction du jute utilisée ensimé maille Fine à 0° (c).....	64
Figure 3.18 Essais de traction du jute utilisée non ensimé maille Fine à 90° (c).....	65
Figure 3.19 Essais de traction du jute utilisée ensimé maille Fine à 90° (c).....	66
Figure 3.20 Essais de traction du jute neuf non ensimé maille Fine à 0° (c).....	67
Figure 3.21 Essais de traction du jute neuf ensimé maille Fine à 0° (c).....	68
Figure 3.22 : Essais de traction du jute neuf non ensimé maille Fine à 90° (c).....	69
Figure 3.23. Essais de traction du jute neuf ensimé maille Fine à 90° (c).....	70
Figure 3.24: Evolution de la force en fonction du déplacement pour la fibre.....	72
Figure 3.25. : (a) résine EPOCAST 50-A1, (b) durcisseur (HARDENER 9816).....	74
Figure. 3.26. L'appareil DSC.....	76
Figure. 3.27 : Courbe ATD ; ATG de la résine polyester.....	76
Figure : 3.28 : Éprouvettes en forme d'haltère de la résine.....	77
Figure : 3.29 Epreuve en résine.....	77
Figure : 3.30 : Traction de la Résine Polyester.....	78
Figure : 3.31: éprouvette de résine lors de l'essai de traction.....	78
Figure : 3.32 : Résultat obtenus aux essais de traction de la résine époxy.....	79
Figure 3.34 : le comportement en flexion de la résine polyester.....	80
Figure 3.35 : Balance hydrostatique.....	82
Figure 3.36 : mesure de densité du liège.....	83
Figure 3.37. : Géométrie des éprouvettes de traction de liège.....	84
Figure 3.38 : Échantillons de lièges agglomérés instrumentés pour essais de traction.....	84
Figure 3.39 : Courbe de traction de liège aggloméré blanc d'épaisseur 30mm.....	85
Figure 3.40 : Courbe de traction de liège aggloméré blanc d'épaisseur 20mm.....	85
Figure 3.41 : Courbe de traction de liège aggloméré blanc d'épaisseur 10mm.....	86
Figure 4.1. Stratifié à base de plis	87
Figure 4.2. Pli bidirectionnel.....	
Figure 4.3. (a) Tissu de jute, (b) plaque préparée pour le pressage.....	88
Figure 4.4. : Éprouvettes en composite stratifié.....	88
Figure 4.5. Elaboration sous vide, d'une plaque stratifiée.....	89
Figure 4.6 : Aptitude à la déformation d'un matériau composite.....	91
Figure 4.7 : exemple de découpage de plaquettes de composite.....	91
Figure 4.9 : Machine universelle de flexion.....	92

<i>Figure 4.10 : Essai de flexion sur un stratifié à renfort végétal (jute).....</i>	<i>92</i>
<i>Figure 5.1 : image SEM de la structure cellulaire en liège naturel (après ébullition):.....</i>	<i>106</i>
<i>Figure 5.2 : Choix des matériaux graphique comparant la conductivité thermique.....</i>	<i>117</i>
<i>avec résistance à la compression [58].....</i>	<i>117</i>
<i>Figure 5.3. Présentation d'un sandwich.....</i>	<i>120</i>
<i>Figure 5.4. L'effet de l'épaisseur de l'âme sur la rigidité en flexion.....</i>	<i>121</i>
<i>d'une structure sandwich.....</i>	<i>121</i>
<i>Figure 5.5. Différentes natures d'âmes.....</i>	<i>123</i>
<i>Figure 5.6. Flambement généralisé des peaux du sandwich [74].....</i>	<i>123</i>
<i>Figure 5.7. Rupture des peaux en traction ou en compression [10].....</i>	<i>124</i>
<i>Figure. 5.8. Modes locaux de rupture par indentation [74].....</i>	<i>124</i>
<i>Figure. 5.9. Rupture de l'âme par cisaillement [74].....</i>	<i>124</i>
<i>Figure 5.10. Flambement généralisé de l'âme du sandwich [74].....</i>	<i>125</i>
<i>Figure 5.11. Flambement localisé « wrinkling » [74].....</i>	<i>125</i>
<i>Figure 5.12. Type de dégradation de l'adhésif.....</i>	<i>126</i>
<i>La Figure 5.13. (a) et (b). Presse Hydraulique ; (c). Plaque préparée pour le pressage ;.....</i>	<i>127</i>
<i>(d) moule supérieur ;(e) plaque pressée.....</i>	<i>127</i>
<i>Figure 5.14 : Dépôt de la résine sur le liège et sur le tissu de jute.....</i>	<i>128</i>
<i>Figure 5.15 : Pose et fixation du film de mise sous vide.....</i>	<i>128</i>
<i>Figure 5.16 : Début du processus de pompage.....</i>	<i>129</i>
<i>Figure 5.17 placement du pistolet chauffant.....</i>	<i>129</i>
<i>Figure 5.18 : Echantillons de sandwichs découpés suivant.....</i>	<i>130</i>
<i>la norme AFNOR NF T 54-606.....</i>	<i>130</i>
<i>Figure 5.19 : Éprouvettes à différent épaisseurs de l'essai de traction selon.....</i>	<i>132</i>
<i>la norme (NF T 54-603).....</i>	<i>132</i>
<i>Figure 5.20 : Essais de flexion : (a) Epreuve des sandwichs (b) flexion trois points, c) flexion 4.....</i>	<i>134</i>
<i>points.....</i>	<i>134</i>
<i>Figure 5.21 : Plaque de liège fixée sur deux supports métalliques indéformables.....</i>	<i>136</i>
<i>Figure 5.22 : Montage d'essai de cisaillement.....</i>	<i>136</i>
<i>sur machine de traction.....</i>	<i>136</i>
<i>Figure 5.23 : décollement de la peau de sandwich à base de résine polyester.....</i>	<i>137</i>
<i>Figure 5.24 : Séparation entre la peau et l'âme du sandwich ; (a) L'augmentation de la pression.....</i>	<i>138</i>
<i>d'essai ; (b) l'augmentation de la température d'essai ; (c) L'augmentation de la température et la.....</i>	<i>138</i>
<i>pression d'essai.....</i>	<i>138</i>
<i>Figure..5.25 : Liège aggloméré avec et sans film de résine époxy.....</i>	<i>138</i>
<i>Figure 5.26 : Essais de flexion trois points (a) : schéma de l'essai, (b) : fin d'essai, (c) éprouvettes.....</i>	<i>139</i>
<i>après essai.....</i>	<i>139</i>
<i>Figure 5.27 : Flexion 3 points sandwich liège 10 et 20mm.....</i>	<i>139</i>

<i>Figure 5.28 : Flexion 3 points sandwich liège 30mm.....</i>	<i>140</i>
<i>Figure 5.29 : Essais de flexion quatre points (a) : schéma de l'essai.....</i>	<i>140</i>
<i>(b) : au milieu de l'essai (c) : fin de l'essai.....</i>	<i>140</i>
<i>Figure 5.30 : Flexion 4 points sandwich liège 10 et 20 mm.....</i>	<i>140</i>
<i>Figure 5.31 : Flexion 4 points sandwich liège 30mm.....</i>	<i>141</i>
<i>Figure 5.32 : Essais de flexion quatre points : (a) avant rupture, (b) après rupture.....</i>	<i>142</i>
<i>4.3 Influence de l'épaisseur sur les caractéristiques de cisaillement du sandwich.....</i>	<i>142</i>
<i>Figure 5.33 : Essais de cisaillement (a) : début de décollement de la peau en jute/polyester du sandwich, (b) : fin d'essai avec décollement total des peaux.....</i>	<i>143</i>
<i>Figure 5.34 : Essais de cisaillement (a) : début de décollement de la peau en jute/époxy du sandwich, (b) : fin d'essai avec déchirure total de l'âme du liège.....</i>	<i>144</i>
<i>Figure 5.36 : variation du module de cisaillement et de la contrainte maximale et de cisaillement en fonction de l'épaisseur de l'âme.....</i>	<i>145</i>
<i>Figure 5.36 : variation du module de cisaillement et de la contrainte maximale et de cisaillement en fonction de l'épaisseur de l'âme.....</i>	<i>145</i>
<i>Figure 5.37 : Éprouvette placé pour l'essai de traction selon la norme (NF T 54-603).....</i>	<i>147</i>
<i>Figure 5.38 : décollement de la peau de panneau sandwich.....</i>	<i>147</i>
<i>Figure 5.39 : Courbes force-déplacement des panneaux sandwichs SNJE10, SNJE20 et SNJE30 sous contrainte de traction appliquée dans la direction perpendiculaire [138].....</i>	<i>148</i>
<i>Figure 5.40 : Essais de compression : (a) compression perpendiculaire des sandwichs (b) compression avec flambement (c) compression pure.....</i>	<i>150</i>
<i>Figure 5.41 : Courbe contrainte-déformation des panneaux sandwichs (a):S10 et (b):S20 et S30 lors de la compression dans la direction perpendiculaire.....</i>	<i>151</i>
<i>Figure 5.42 : Image d'éprouvette d'un panneau sandwich S30 avant (a) et après (b) la compression dans la direction perpendiculaire.....</i>	<i>151</i>
<i>Figure 5.43 : Courbe force allongement des panneaux sandwichs (a):S10 , (b):S20 et S30) lors de l'essai de compression avec flambement des sandwichs.....</i>	<i>152</i>
<i>Figure 5.44 : panneau sandwich soumis à une compression avec flambage :.....</i>	<i>153</i>
<i>Figure 5.45 : casseur d'une éprouvette lors de l'essai de Compression perpendiculaire :.....</i>	<i>154</i>
<i>Figure 5.46 : Comportement à la compression avec flambage dans la direction longitudinale, pour les panneaux sandwichs S10, S20 et S30.....</i>	<i>155</i>
<i>Figure 5.47 : Courbe contrainte-déformation des panneaux sandwichs S10, S20 et S30 sous l'essai de compression longitudinale pure.....</i>	<i>155</i>
<i>Figure 5.48 : décollement des peaux de l'âme.....</i>	<i>156</i>
<i>Figure 5.49 : décollement de la peau de panneau sandwich.....</i>	<i>157</i>
<i>Figure:5.50. un mode de défaillance de panneau sandwich soumis en compression pure.....</i>	<i>159</i>
<i>Figure 5.51 : Courbes force-déplacement des panneaux sandwichs (a): SNJE10, (b): SNJE20 et (c): SNJE30 sous l'action de l'essai de compression pure.....</i>	<i>160</i>

## Liste des tableaux

Tableau 1.2 : Propriétés des résines thermodurcissables [33].	6
Tableau.1.3 : Propriétés de la résine d'imprégnation «UP» non renforcée [35].	6
Tableau 1. 4_ Résistance chimique des résines polyester.	8
Tableau.1. 5 _ Propriétés mécaniques des principales résines de stratification [35-38].	9
Tableau 1.6 : Avantages et inconvénients des deux résines utilisées :	11
Tableau 1.7 : Propriétés mécaniques des principales résines de stratification [35-40-41]. [37,38].	12
Tableau 2.1 : Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts de matériaux composites.	16
Tableau 2.2 : Propriétés mécaniques moyennes en traction de différentes fibres naturelles comparées aux fibres de renfort habituellement utilisées dans l'industrie des matériaux composites [47].	18
Tableau 2.3 : Composition et propriétés de différentes fibres végétales [53].	20
Tableau 3-1 : Propriétés physiques de jute.	48
Tableau 3- 2: Contrainte de la fibre de jute après traitement alcalin.	49
Tableau 3.3 : Propriétés physiques de jute.	50
Tableau 3-4 : dimensions des éprouvettes en (mm).	52
Tableau 3-4 : dimensions des éprouvettes en (mm).	52
Tableau 3.5 : Dimensions des éprouvettes en (mm).	52
Tableau 3.6 : Jute tissé à grosse maille	54
Tableau 3.7 : Jute utilisé non ensimé grosse maille à 0° (a).	55
Tableau 3.8 : Jute utilisé ensimé grosse maille à 0° (a).	56
Tableau 3.9 : Jute utilisé non ensimé grosse maille à 90° (a).	57
Tableau 3.10 : jute utilisé ensimé grosse maille à 90°	58
Tableau 3.11 : Jute neuf non ensimé grosse maille à 0°.	59
Tableau 3.12 : jute neuf ensimé grosse maille à 0°.	60
Tableau 3.13 : jute neuf non ensimé grosse maille à 90°.	61
Tableau 3.14 : jute neuf ensimé grosse maille à 0°.	62
Tableau 3.15 : Jute tissé maille fine.	62
Tableau 3.16 : jute utilisée non ensimé maille Fine à 0° (c).	63
Tableau 3.17 : jute utilisée ensimé maille Fine à 0° (c).	64
Tableau 3.18 : jute utilisée non ensimé maille Fine à 90° (c).	65
Tableau 3.19: jute utilisée ensimé maille Fine à 90° (c)	66
Tableau 3.20: jute neuf non ensimé maille Fine à 0° (c).	67
Tableau 3.21: jute neuf ensimé maille Fine à 0° (c).	68
Tableau 3.22 : jute neuf non ensimé maille Fine à 90° (c).	69

Tableau 3.23: jute neuf ensimé maille Fine à 90° (c).....	70
Tableau 3.24 : Valeurs moyennes de la force maximale, module d'élasticité et de la déformation. ....	70
Tableau 3.25 : Dimensions des éprouvettes en (mm).....	71
Tableau 3.26. : Valeurs moyennes de la force maximale, module d'élasticité et de la déformation. ....	72
Tableau 3.29 : propriétés mécanique de la résine polyester et époxy : .....	73
Tableau 3.28 : caractéristiques de la résine Epoxy:.....	74
Tableau 3.30 : Caractéristiques des EPOCAST 50-A1/946.....	75
Figure : 3.30 : Traction de la Résine Polyester.....	78
Tableau 3.31 : Les propriétés mécanique de la résine Epocast 50-A1.....	80
Figure 3.34 : le comportement en flexion de la résine polyester.....	80
Tableau 3.32 : la masse de liège après séchage. ....	81
Tableau 3.33. : Dimensions des éprouvettes en (mm).....	84
Tableau 4.1 : Caractéristiques des Epocast 50-A1/946.....	89
Tableau 4.2 : variantes des stratifiés élaborés.....	93
Tableau 4.3 : Résultats d'essai de flexion 3 points de stratifié ST1.....	94
Tableau 4.4 : Résultats d'essai de flexion 3 points de stratifié ST2.....	95
Tableau 4.5 : Résultats d'essai de flexion 3 points de stratifié ST3.....	96
Tableau 4.6 : Résultats d'essai de flexion 3 points de stratifié ST4.....	97
Tableau 4.7 : Résultats d'essai de flexion 3 points de stratifié ST5.....	98
Tableau 4.8 : Résultats d'essai de flexion 3 points de stratifié ST6.....	99
Tableau 4.9 : Résultats d'essai de flexion 3 points de stratifié ST7.....	100
Tableau 5.10 : Résultats d'essai de flexion 3 points de stratifié ST8.....	101
Tableau 4.11.Valeurs moyenne des contraintes à la rupture et des modules d'élasticité calculés en flexion 3 points. ....	101
Tableau 4.12.Valeurs de la contrainte à la rupture et le module d'élasticité.....	103
Tableau 5.1 : Dimensions normalisées des différents échantillons de sandwichs.....	130
Tableau 5.2: caractéristiques mécaniques calculées selon la norme NF T 54-606.....	141
Tableau 5.3 : la contrainte maximale et du module de cisaillement des sandwichs à différents épaisseurs d'âme du liège. ....	145
Tableau 5.4. la Contrainte maximale ( $\sigma_m$ ) et la force maximale ( $F_m$ ) et le déplacement correspondant des panneaux sandwichs SNJE10, SNJE20 et.....	149
Tableau 5.5 : Propriétés principales des panneaux sandwichs SN20 et SN40 en compression.....	151
Tableau 5.6 : dimensions des échantillons après essai et repos.....	158

## Sommaire

1. Introduction :	1
1.1 Le contexte économique	2
1.2 Présentation des matériaux	2
1.2.1 Les fibres	2
1.2.2 Les polymères dans les composites	5
1.2.3- Matrice.	6
1-3-Généralités	7
1 Résines de stratification	7
2 Propriétés	8
2.1 Propriétés chimiques et physiques	8
2.2. - Propriétés mécaniques	9
2.3. Caractéristiques des résines polyester	10
2.4 Caractéristiques des résines Epoxy	10
2.5. Conclusion de chapitre :	12
3- Caractérisation de la fibre de jute :	47
3-1 Introduction :	47
3.2. Etude du comportement mécanique du renfort	47
3.3 Traitement des fibres de jute :	48
3.4 Etude du comportement mécanique du renfort	50
3.4-1. Essais de traction du fil de jute :	50
3.4-2- Caractérisation du tissu de jute	51
3.4-2.1 Essais de traction	51
3.4.2.1 Essais de traction sur différents types de jute	51
3.5 Résultats des essais de traction :	54
3.6.1 Fabrication des éprouvettes de jute :	71
3.6.2. Dispositif d'essai	71
3.7. Interprétation.	72
3-8 -Propriétés mécaniques de résines utilisées :	73
3-8-1-- Caractéristiques des résines polyester	73
3-8- 2- Caractéristiques des résines Epoxy	74
3.9. Analyse thermique (ATD, ATG)	75
3-9-.1. Essais de traction :	77
3.10 Caractérisation mécanique de la résine polyester par l'essai de flexion :	80

3.11: Séchage du liège : .....	81
3.12 Mesure de la densité du liège .....	81
3.13 Densité de liège : (La densité de liège et inférieure à celle de l'eau). .....	82
3.13 Etude du comportement mécanique du liège aggloméré blanc : .....	83
3.13.1. Essais de traction sur les deux variétés de liège .....	83
3.13.2. Fabrication des éprouvettes .....	83
3.14 Résultats et discussions .....	86
4. Introduction .....	86
4.1 Stratifiés .....	86
4.2. Procédé d'élaboration des stratifiés : .....	87
4.3 Caractérisation des stratifiés élaborés : .....	90
4.3.1 Essais de flexion 3 points sur les stratifiés élaborés.....	90
4.3.2 Résultats des essais de flexion 3 points .....	93
4.5. Analyse des résultats du point de vue comportement .....	102
4.6. Etude comparative .....	102
5 .1. Introduction .....	105
5 .2- Composites sandwichs à base de liège.....	105
5 .3- Présentation du liège aggloméré blanc .....	119
5 .3- 1 Liège aggloméré blanc moyenne densité .....	119
5 .4- Présentation d'une structure sandwich .....	120
5 .5- Les constituants d'un matériau sandwich : .....	120
5 .6-. Modes de dégradations des sandwichs .....	124
5 .6 a - Dégradation de l'adhésif :.....	127
5 .7 - Elaboration de plaques sandwichs à âme en liège et peaux en jute/polyester et jute/époxy : .....	127
5 .8 - Caractérisation mécanique .....	132
5 .8.1. Essai de la compression perpendiculaire .....	132
5 .8.2. Essai de compression longitudinale sans ou avec flambage .....	134
5 .8.3. Détermination des caractéristiques en flexion du sandwich .....	137
5 .8.4. Essai de cisaillement .....	138
5 .8.5. Calcul du module de cisaillement du liège : .....	138
5.8.6 Calcul de la contrainte maximale cisaillement :.....	138
5 .9. Résultats et discussion .....	139
5 .9.1 Sandwichs à âmes en liège et semelles en jute et résine polyester :.....	139
5.9.2- Influence de l'épaisseur du sandwich sur la force de rupture en flexion:.....	140
5.9.3 - Analyse du mode de rupture en flexion trois et quatre points :.....	144

5.9.4 Influence de l'épaisseur sur les caractéristiques de cisaillement du sandwich : .....	144
5.10 Essai de la compression perpendiculaire : .....	147
5.11 -Essai de traction .....	150
5.12 - Essai de compression longitudinale sans ou avec flambage : .....	153
5.13 - Conclusion du chapitre .....	154
Conclusion générale.....	155

**Résumé :**

L'expérience montre que l'utilisation de matériaux traditionnels homogènes reste limitée à un domaine d'application restreint tributaire des caractéristiques intrinsèques de ces matériaux. De nouvelles perspectives sont apparues avec l'apport des matériaux composites dans tous les domaines. Les matériaux composites doivent répondre aux exigences des contraintes mécaniques imposées, à travers le choix judicieux de renforts et de matrice.

Notre travail qui consiste à étudier des sandwichs, élaborés au niveau de l'unité de recherche (URMPE), constitués de deux semelles en fibres végétal (jute) et d'une âme en liège. Ce choix est justifié par la nécessité de développer des matériaux et des technologies qui prennent en compte les impacts sur l'environnement. Le choix de ces matériaux peut influencer fortement les propriétés mécaniques du matériau élaboré, de plus, les matériaux d'origine végétale utilisés dans cette étude présentent l'avantage d'être biodégradable du point de vue environnement.

Avant l'élaboration des stratifiées nous avons caractérisé le jute par l'essai de traction après nous avons élaboré ces stratifiées par compression à l'aide d'une presse hydraulique équipée de plaques chauffantes à température variable, ces plaques sont découpées en stratifiés selon les normes.

Pour étudier le comportement des différents sandwichs ainsi élaborés, nous avons procédé à une investigation expérimentale très riche qui permet de mieux appréhender le comportement. A cet effet, Ce travail présente une étude expérimentale qui consiste à déterminer les caractéristiques mécaniques par flexion trois et quatre points, suivant la norme AFNOR NF T 54 – 606 (1987), d'un matériau sandwich afin de déterminer la rigidité en flexion et en cisaillement ainsi que le module de cisaillement de l'âme. Le matériau sandwich est élaboré à base des matériaux naturels dont l'âme est en liège aggloméré blanc de la région de Jijel située à l'est de l'Algérie et les peaux sont en jute tissé avec de la résine polyester et époxy .

Dans cette étude nous avons utilisé le liège aggloméré blanc avec des granulés de moyenne densité. Nous avons utilisé des plaques de liège d'épaisseurs de 10, 20 et 30 mm. Les essais de flexion ont été réalisés sur des éprouvettes qui sont découpées selon les normes à partir des plaques sandwich de 1000x500 mm. Le matériau sandwich élaboré présente de bonnes caractéristiques en flexion 3 et 4 points tel que les contraintes, les déformations, la rigidité en flexion et au cisaillement ainsi que le mode de rupture. On a remarqué aussi que l'épaisseur de l'âme de 10mm présente de meilleurs résultats par rapport à celui de 20 et 30mm.

Les résultats de cette étude, nous permettent de valoriser une variété de liège aggloméré blanc produit en Algérie ainsi que le jute, dans l'élaboration des panneaux sandwichs de faible densité massique, dans le but de l'utiliser dans le domaine des

---

isolations (domaine de la construction).

**Mots clés :** Fatigue, composite, stratifiés, jute, résine polyester, sandwich, comportement mécanique.

### ملخص:

تبين التجربة أن استخدام المواد التقليدية المتجانسة لا يزال محصوراً في مجال محدود للتطبيق يعتمد على الخصائص الجوهرية لهذه المواد. برزت وجهات نظر جديدة بمساهمة المواد المركبة في جميع المجالات. يجب أن تلبى المواد المركبة متطلبات القيود الميكانيكية المفروضة، من خلال الاختيار الحكيم من التعزيزات والمصفوفة.

دراسة المواد المركبة (السندويشات) ، التي تم انجازها على مستوى وحدة البحث (URMPE) ، والتي تتكون من اثنين من النعال من الألياف النباتية (الجوت) ونواة الفلين. يبرر هذا الاختيار من خلال الحاجة إلى تطوير المواد والتقنيات التي تأخذ بعين الاعتبار المحافظة على البيئة. يمكن أن يؤثر اختيار هذه المواد بشدة على الخواص الميكانيكية للمادة المطورة ، وعلاوة على ذلك ، فإن المواد ذات المنشأ النباتي المستخدمة في هذه الدراسة تتميز بأنها قابلة للتحلل البيولوجي من وجهة نظر الحفاظ على البيئة. قبل دراسة القشرة المتكونة من الجوت والغراء قمنا باختبار الشد لخيوط الجوت بعدها تم انجاز قشور الجوت و الغراء باستخدام طريقة الضغط الهيدروليكي بصفائح ذات حرارة متغيرة .

من أجل دراسة سلوك المواد المركبة (السندويش) المنجزة أجرينا تحقيقاً تجريبياً ثرياً للغاية يجعل من الممكن فهم السلوك بشكل أفضل. لهذا الغرض، ويعتبر هذا العمل دراسة تجريبية لتحديد الخصائص الميكانيكية عن طريق الانحناء ثلاث وأربع نقاط بمقاييس عالمية، وكذلك لتحديد صلابة الانحناء و شدة الضغط و القص و معامل و تحديد معامل القص للنواة . تتكون مادة الساندويش المنجزة من مواد طبيعية فالقشرة من قماش الجوت الذي احضر من مدينة بجاية والنواة من الفلين الأبيض المكنل من منطقة القل بسكيكدة ، هذا الأخير ذو كثافة متوسطة و بأسماك مختلفة (10,20,30)ملم

**كلمات البحث :** المواد المركبة الرقائق, ألجوت, الخصائص الميكانيكية, المادة اللاصقة البوليمر و

الابوكسي

### **Abstract;**

Experience shows that the use of homogeneous traditional materials remains limited to a restricted field of application dependent on the intrinsic characteristics of these materials. New perspectives have emerged with the contribution of composite materials in all fields. Composite materials must meet the requirements of imposed mechanical constraints, through the judicious choice of reinforcements and matrix. Our work is to study sandwiches, developed at the level of the research unit (URMPE), consisting of two soles in vegetable fiber (jute) and a cork core. This choice is justified by the need to develop materials and technologies that take into account the impacts on the environment. The choice of these materials can strongly influence the mechanical properties of the material developed, moreover, the materials of plant origin used in this study have the advantage of being biodegradable from the environment point of view. Before the elaboration of the laminates we characterized the jute by tensile test after we developed these laminates by compression using a hydraulic press equipped with

heating plates with variable temperature, these plates are cut out of laminates according to the standards.

To study the behavior of the different sandwiches thus elaborated, we carried out a very rich experimental investigation which makes it possible to better apprehend the behavior.

To this end, this work presents an experimental study which consists in determining the mechanical characteristics by three and four point bending, according to the AFNOR standard NF T 54 - 606 (1987), of a sandwich material in order to determine the stiffness in bending and in shear as well as the shear modulus of the soul. The sandwich material is made from natural materials with a white agglomerated cork core from the Jijel region in eastern Algeria and the skins are made of jute woven with polyester and epoxy resin.

In this study we used white agglomerated cork with medium density pellets. We used cork plates with thicknesses of 10, 20 and 30 mm. The bending tests were carried out on specimens that were cut to standard from 1000x500 mm sandwich plates.

**Key words:** Fatigue, composite, laminates, jute, polyester resin, sandwich, mechanical behavior.

---

## **Introduction générale**

D'un point de vue historique, l'utilisation des végétaux a toujours existé, comme par exemple dans la construction ou bien dans le textile. Cet intérêt pour les matériaux agro-sourcés a doublé d'intensité ces dernières décennies dans l'industrie du composite grâce au protocole de Kyoto, qui a instauré les notions de développement durable et de protection de l'environnement. C'est pour cela que les fibres végétales ont commencé à faire leur apparition en remplacement des fibres de verre afin de fabriquer des matériaux composites plus respectueux de l'environnement. Les matériaux composites et plus particulièrement les structures sandwichs à base de des fibres végétales ont de très bons potentiels de substitution des matériaux traditionnels actuellement utilisés dans la conception de ces structures sandwichs.

La technique de conception du panneau sandwich est une technique connue et utilisée depuis longtemps dans de nombreuses industries. Elle consiste à positionner une âme, souvent légère, entre deux peaux résistantes, en général plus denses. Les fonctions de chaque composant sont alors dissociées pour être optimisées. Les panneaux sandwichs peuvent être structurels, des isolants thermiques et/ou acoustiques . Le principe du panneau sandwich structurel consiste à relier efficacement et durablement des peaux résistantes, pour reprendre les sollicitations de traction et de compression développées dans un chargement de flexion, par une âme légère sollicitée en cisaillement.

Cette technique permet d'optimiser les fonctions de chaque composant du panneau sandwich.

Le but recherché est d'apporter de la rigidité en même temps que la légèreté. Aujourd'hui, ils sont surtout utilisés dans le domaine de l'aéronautique où la légèreté du panneau est souhaitée. Par rapport aux matériaux monolithiques traditionnels, ils sont plus rigides et apportent simultanément, selon les âmes mises en œuvre, de nouvelles propriétés telles que l'isolation thermique et acoustique, la résistance aux chocs et à la fatigue, sans coût supplémentaire ni ajout de matière.

Plus légers, leur transport et leur pose en sont ainsi simplifiés. En outre, tout en préservant l'aspect esthétique des matériaux traditionnels, les nouveaux panneaux sandwichs requièrent moins de matière. Autre atout, en termes de développement

---

durable, grâce à leur légèreté, ils présentent un bilan énergétique avantageux à la fabrication et lors de leur mise en œuvre.

A ce titre, les nouvelles exigences environnementales, mais également économiques, contribuent de plus en plus au développement de cette technique. L'utilisation des matériaux de récupération rend désormais cette technique compétitive, ces panneaux sandwichs structuraux ont désormais l'avantage d'être à la fois économiques et écologiques.

D'autres industries de grands volumes ont désormais recours aux panneaux sandwichs comme l'industrie éolienne, naval, les transports routiers ou ferroviaires mais également le bâtiment.

Dans notre travail, nous nous sommes consacré à l'analyse de nouvelles structures sandwichs à base des fibres végétales (jute) comme renfort des stratifiées et le liège aggloméré comme âme des panneaux sandwich et la qualification de leur intégrité vis-à-vis de la ruine, en partant d'une approche d'actualité, basée sur une logique d'éco-conception et de mise en valeur des ressources naturelles. La recherche réalisée est en grande partie dédiée à l'analyse du comportement mécanique sous un chargement statique (traction, flexion) des des stratifiées et de (traction, flexion trois et quatre points ,compression et cisaillement ) des sandwichs composite constitué de deux peaux en fibres végétales (tissu de jute) imprégnées de résine époxyde et polyester et d'une âme en liège aggloméré blanc (différents épaisseurs) .

D'un point de vue historique, l'utilisation des végétaux a toujours existé, comme par exemple dans la construction ou bien dans le textile. Cet intérêt pour les matériaux agro-sourcés a doublé d'intensité ces dernières décennies dans l'industrie du composite grâce au protocole de Kyoto, qui a instauré les notions de développement durable et de protection de l'environnement. C'est pour cela que les fibres végétales ont commencé à faire leur apparition en remplacement des fibres de verre afin de fabriquer des matériaux composites plus respectueux de l'environnement.

Le marché des fibres végétales est en pleine expansion au niveau mondial. Ainsi chaque année, le volume récolté de ces matériaux verts augmente. Dans certains pays, cette production est un héritage comme en Inde, où des fibres naturelles sont produites pour, par exemple, la fabrication de conduites. Les premières applications concernent bien évidemment le textile, mais l'industrie automobile occupe une place non

---

négligeable depuis les années 90.

Les fibres végétales se démarquent des fibres de verre par leurs propriétés mécaniques spécifiques élevées grâce à une faible densité, qui induira lors d'applications structurales un gain de masse se traduisant par une économie d'énergie. De plus, les fibres végétales ont aussi l'avantage d'être bio-sourcées et certaines sont disponibles annuellement. Cependant, leur principal et non négligeable inconvénient est leur hydrophilie. La morphologie de la fibre de lin a largement été étudiée ces dernières années. La caractérisation de la fibre de jute et l'étude de son comportement mécanique est également très important puisqu'elle permet de mieux appréhender son utilisation en tant que renfort dans un composite.

Comme l'utilisation des fibres végétales est de plus en plus importante dans l'industrie du composite, notamment pour des applications structurales, il est nécessaire de mieux connaître le comportement de la fibre de jute (utiliser pour notre travail) pour bien connaître le comportement des stratifiés et des sandwichs à base de ces fibres au point de vue mécanique.

Le présent travail se décompose en trois parties. Tout d'abord, le premier chapitre présente les grandes classes des fibres végétales, ainsi que les enjeux économiques et environnementaux liés à leur utilisation dans l'industrie du composite sandwich. A partir d'une étude bibliographique, ce chapitre présente également la morphologie de la fibre végétale à différents niveaux d'échelle.

Le deuxième chapitre est consacré à la caractérisation de fibres de jute. ce travail commence par des essais de traction sur des fibres unitaires et de tissus de jute et des essais de traction et de flexion des résines utilisé suivi par l'élaboration des stratifiés et l'étude de leurs comportement mécaniques.

Le troisième et dernier chapitre présente tout d'abord l'élaboration des sandwichs et l'étude de leur comportement mécanique. Le manuscrit se termine par une conclusion, qui rappelle l'objectif de cette thèse, ainsi que les principaux résultats expérimentaux. Enfin, quelques perspectives sont proposées et permettent d'envisager des développements futurs à partir de ce travail.

---

## *Chapitre 1 :*

*Présentation et rôles des  
constituants de base.*

## **1. Introduction :**

Les matériaux eux-mêmes nous affectent peu, c'est la façon dont nous les utilisons qui influence notre vie, en effet, le développement et les changements rapides des produits, des pratiques technologiques et industrielles sont accompagnés par de nouvelles générations de matériaux. Parmi ces matériaux, les composites ne cessent d'évoluer vers des produits qui sont, soit le moins coûteux possible, soit le plus performant ou bien les deux à la fois. De plus, dans un souci de protection de l'environnement et de santé publique, les composites tendent à intégrer un caractère écologique.

L'innovation ne se conjugue qu'au présent ou au futur. Les industriels se posent ainsi la question : quels matériaux composites pour aujourd'hui et pour demain ?

Ce chapitre s'intéressera tout d'abord au contexte économique de l'étude, suivi d'une présentation sur les principales fibres végétales usuelles et leurs proportions dans la production mondiale figure 1 et l'importance du choix de renfort et de la matrice pour les composites.

### **1.1 Le contexte économique**

Suite à la prise de conscience écologique de ces dernières années, l'utilisation des fibres végétales dans l'industrie s'est intensifiée pour remplacer les fibres de verre dans les matériaux composites. Les fibres naturelles ont l'avantage de présenter des propriétés mécaniques spécifiques compétitives face au verre, d'avoir une densité faible ainsi que d'être disponibles annuellement. Par ailleurs, elles sont biosourcées et sont une ressource renouvelable. Cependant l'inconvénient majeur de ces fibres naturelles est leur hydrophilie, qui contraste avec l'hydrophobie des polymères utilisés dans les composites.

Afin de pallier cette hydrophilie, diverses méthodes peuvent être mises en œuvre, par exemple le recours à un agent de couplage (anhydride maléique réagissant avec la cellulose, iso cyanates...), des traitements thermiques (réification R), ou des traitements physico-chimiques.

Le marché des fibres végétales permet de valoriser les ressources des pays notamment ceux en voie de développement. La figure 1.1 présente le pourcentage de chaque type de fibres récoltées sur les 5 millions de tonnes produites par an au niveau mondial en 2007. [1]

L'industrie consommant le plus de fibres végétales comme renfort de polymère est l'industrie automobile, principalement les équipementiers. Au cours de leurs stratégies, on trouve le développement durable et la protection de l'environnement.

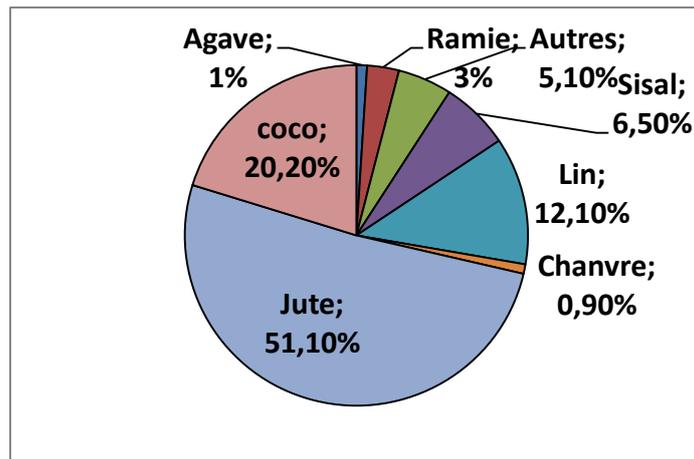


Figure.1.1 : Proportion des fibres végétales usuelles dans la production mondiale [1].

L'utilisation de matériaux ouverts leur permet de produire des véhicules plus écologiques avec une baisse de la masse du matériau, qui a une conséquence sur la consommation de carburant. Les principales parties d'un véhicule qui sont fabriquées à partir de fibres végétales sont : la plage arrière, les panneaux de porte, les tableaux de bord, les caches de roue de secours mais aussi des pièces plus techniques comme des détecteurs sous le réservoir à carburant, ou des écrans sous le moteur. En plus de l'industrie automobile consommatrice de fibres végétales, d'autres secteurs industriels sont concernés : le textile, le bâtiment, l'agriculture [2, 3].

Les deux paragraphes suivants présentent les principaux renforts naturels et matrices utilisés dans les composites industriels.

## 1.2 Présentation des matériaux

Les matériaux d'étude sont des matériaux composites à base d'une résine thermodurcissable, (Polyester, époxy) et de renfort en fibre tissée de jute. et d'une âme en liège aggloméré

### 1.2.1 Les fibres

Les fibres naturelles peuvent se classer en 3 groupes [4]:

- les fibres végétales (coton, lin, chanvre, jute)
- les fibres animales (alpaga, soie)
- les fibres minérales (amiante)

Dans l'industrie du composite, les fibres végétales sont les plus utilisées parmi les fibres naturelles pour remplacer les fibres de verre. Il en existe de très grandes variétés généralement compétitives d'un point de vue mécanique avec le verre (voir tableau 1.1). De plus, les fibres naturelles ont l'avantage d'être plus écologiques et économiques.

La fibre d'abaca, appelée aussi chanvre de Manille, est extraite de l'abaca, qui est une espèce de bananier. Ces fibres sont très longues et peuvent mesurer jusqu'à 3 mètres. Elles ont une

bonne résistance à la rupture et peuvent être associées à différents polymères comme le Poly Acide Lactique (PLA) ou le polypropylène, ce qui confère au composite de bonnes propriétés mécaniques [5\_7].

La fibre de coco est issue de la partie extérieure de la noix de coco. Elle est généralement utilisée en corderie. L'avantage de cette fibre est la présence d'une fine couche de composés aliphatiques qui assure ainsi une bonne liaison fibre/matrice suivant la matrice utilisée.

En effet, grâce à cette couche aliphatique, la fibre est utilisée avec du polyéthylène sans aucun traitement de surface ni modification chimique du renfort [8] car cette couche grasse a pour avantage d'améliorer l'interface fibre-matrice. Mais cette couche aliphatique doit être enlevée par un traitement alcalin pour fabriquer un composite polyester/fibre de coco [9]. En effet, la force nécessaire pour décoller le polyester de la fibre est 90% plus grande pour une fibre traitée par rapport à une fibre non traitée. De plus, les fibres non traitées, collées entre elles par cette couche aliphatique, seront moins bien dispersées dans le polyester contrairement aux fibres ayant subi un traitement alcalin. La résistance à la flexion et le module de flexion d'un composite contenant 30% de fibres de noix de coco traitées sont 40% plus importants que pour un composite polyester/fibre de coco contenant la même fraction volumique de fibres non traitées.

La fibre de lin est extraite de la plante du même nom. La tige peut atteindre 1 mètre de haut. Le procédé d'extraction de la fibre suit les différentes étapes suivantes :

- le rouissage qui permet d'éliminer l'écorce,
- le teillage qui consiste à extraire les morceaux de bois du xylème contenus à l'intérieur des tiges et à éliminer les fibres courtes,
- le peignage qui dénoue et aligne les faisceaux d'une longueur d'une dizaine de centimètre tout en enlevant les fibres courtes restantes, divisant ainsi les faisceaux en fibres techniques. Le lin est très présent dans les composites car il est compétitif par rapport au verre d'un point de vue mécanique. Le module spécifique d'élasticité du lin est de 37,8 GPa et celui du verre E de 28,7 GPa (tableau 1.1). Il est possible d'utiliser la fibre de lin en tant que renfort dans différentes matrices, comme le polypropylène [10- 11], ou bien avec un biopolymère le Poly Acide Lactique (PLA) [12].

Le chanvre, ou Cannabis sativa, est une plante à longues tiges pouvant mesurer jusqu'à 4 mètres de haut. Mais sa culture n'est pas encore très répandue au niveau mondial à cause de la confusion avec le Cannabis sativa indica ou marijuana, interdite dans plusieurs pays. Le procédé d'obtention de cette fibre suit le même schéma que celui du lin. Plusieurs études ont été menées sur les composites renforcés par du chanvre [13-14]. La présence de 40% de fibres

de chanvre dans un composite à matrice polypropylène/anhydride maléique permet d'atteindre des propriétés mécaniques de l'ordre de 80% de celle du composite polypropylène/fibre de verre [15]. D'autres études portant sur la recyclabilité des composites montrent que, même après plusieurs recyclages, les propriétés mécaniques du composite chanvre/polypropylène sont bien conservées [16-17].

Les fibres de sisal sont extraites des feuilles du sisal, appelé *Agave sisalana*, dont la longueur peut atteindre 1 mètre. Elles sont impropres à l'industrie de l'habillement car elles sont trop raides. Mais elles sont de plus en plus utilisées dans les composites, augmentant ainsi le module d'élasticité du composite mais diminuant sa résistance à la traction [18-19]. Par exemple, le sisal est utilisé en tant que renfort dans les panneaux de toiture ondulés, car la fibre apporte une bonne résistance mécanique et une bonne tenue au feu. Le jute est une plante herbacée de la famille des Malvacées pouvant mesurer 6 m de haut. De cette plante, également appelée chanvre de Calcutta, sont extraites des fibres naturelles. Généralement utilisée pour faire des sacs, la fibre de jute a trouvé une nouvelle voie d'exploitation dans les composites techniques. De part sa forte teneur en lignine, qui lui confère une forte raideur, elle est impropre à l'industrie de l'habillement. Afin d'utiliser la fibre de jute en tant que renfort dans un composite, elle a besoin de subir des modifications chimiques par l'utilisation d'un dérivé d'acides gras donnant à la fibre un caractère naturellement hydrophobe, car l'interface entre la fibre et la matrice n'est pas très bonne à cause du caractère hydrophile de la fibre [26]. Une autre solution pour résoudre ce problème est une modification de la matrice grâce à l'ajout d'un agent couplant. Ce composite modifié a un meilleur module d'élasticité que le composite non modifié [21-22].

La fibre de ramie, appelé aussi Ortie de Chine, est principalement utilisée dans le textile. Depuis quelques années, cette fibre est intégrée dans la fabrication de composites.

Les fibres subissent une mercerisations avant d'être intégrées dans la matrice. La mercerisations est un procédé chimique utilisant un bain de soude, qui change la composition biochimique d'une fibre végétale car cette méthode permet d'éliminer les constituants non-cellulosiques (hémicelluloses, lignines) ainsi que la partie amorphe de la cellulose. Cette méthode augmente jusqu'à trois fois la contrainte à la rupture de la fibre mais diminue son module d'élasticité [23]. Peu de fibres peuvent être utilisées sans un agent couplant ou sans une modification chimique, à cause d'une interface plus ou moins bonne entre la fibre et la matrice et/ou du caractère hydrophile de la fibre végétale. Cependant, elles sont de plus en plus utilisées dans différents domaines industriels.

L'utilisation de fibres naturelles dans les matériaux composites se révèle être une solution pertinente pour des motivations techniques, économiques et environnementales. Elles possèdent de bonnes propriétés mécaniques et une faible densité (Tableau 1) conduisant à l'obtention de propriétés spécifiques comparables à celles de fibres de verre (Wambua et al., 2003) [24]. Par opposition aux fibres synthétiques et minérales, les fibres naturelles présentent un faible impact environnemental (ressources renouvelables et peu transformées) et un faible coût matière. En conséquence, elles suscitent un intérêt croissant dans la communauté scientifique et de nombreuses études reportent l'utilisation dans les matériaux composites de fibres végétales telles que le chanvre, le lin, le sisal, la jute... (Andersons et al., 2009; [25]. Beckermann et al., 2009; [26]. Bessadok et al., 2007; [27]. Le Duigou et al., 2008[28].; Madsen et al., 2007a). [29].[30].[31].

Les propriétés mécaniques d'une fibre végétale sont généralement attribuées à leur géométrie, leurs constituants et à leur structure morphologique intrinsèque pouvant être comparée à un matériau composite. Ce que l'on appelle communément la fibre technique est elle-même composée de fibres élémentaires associées en faisceau, généralement liées par un ciment pectique. Ces fibres élémentaires sont constituées de microfibrilles de cellulose noyées dans une matrice d'hemicellulose et de lignine.

### **1.2.2 Les polymères dans les composites**

Le choix de la matrice pour le composite est très important. Par exemple, lors de la mise en œuvre du composite, la température de post-cuisson est un paramètre non négligeable. Une exposition des fibres végétales à des températures supérieures à 100°C entraînent des changements irréversibles au cœur des parois, notamment au niveau des hémicelluloses. On sait que la cellulose se dégrade entièrement à 250°C [32], par conséquent, une exposition, même brève, de la fibre végétale à plus de 200°C, provoquera des dommages sévères au sein des parois. La matrice doit aussi avoir une masse volumique faible pour conférer des propriétés mécaniques spécifiques élevées aux matériaux composites.

Il existe trois catégories de résines polymères :

- les thermoplastiques
- les thermodurcissables
- les thermostables

La grande différence entre les résines thermodurcissables et les thermoplastiques est leur caractère recyclable. Une fois polymérisés, les thermodurcissables ont une structure réticulée. Au contraire, une résine thermoplastique peut subir plusieurs recyclages.

Le tableau 1.2 donne quelques propriétés de certaines résines thermoplastiques et thermodurcissables communément utilisées dans les matériaux composites.

Tableau 1.2 : Propriétés des résines thermodurcissables [33].

Résine	Module d'élasticité (GPa)	Densité	Tmax (°C)
polyester	4	1,2	60-200
Epoxyde	4,5	1,2	90-200
Phénolique	3	1,3	120-200
Urée Formol	6-10	1,2-1,5	140

### 1.2.3- Matrice.

Dans le domaine des matières plastiques, le terme polyester, recouvre les deux grandes familles suivantes:

- les polyesters insaturés ;
- les polyesters saturés.

Les polyesters saturés sont des produits finis mis en oeuvre par fusion (injection, extrusion).

Les polyesters insaturés sont en général des liquides dont le durcissement est dû à une polymérisation par l'ajout d'un catalyseur [34].

Les polyesters insaturés (UP unsaturated polyester) sont d'un usage relativement ancien (1950), essentiellement dans le bâtiment. Ils ont connu un renouveau important à partir de 1980, à cause de leur prix, du nombre élevé de possibilités qu'elles offrent et des derniers progrès de la technique. Elles peuvent être des monocomposants adaptés aux procédés de fabrication les plus modernes et les plus automatisés [35]. Elles rentrent dans la fabrication de 95% des composites thermodurcis renforcés [36]. Les propriétés thermomécaniques des polyesters insaturés sont illustrées dans le tableau (1.3).

Tableau.1.3: Propriétés de la résine d'imprégnation «UP» non renforcée [35].

Polyester insaturés	Resistance à la rupture en (MPa)	Resistance à la rupture en traction (MPa)	Module en traction (GPa)	Allongement à la rupture (%)	Température limite (°C)
Orthophtallique	100	50	3,2 à 4,0	1,2 à 4,0	80 à 100
Isophtallique	110 à140	55 à 90	3,0 à 4,0	0,8 à 2,8	100 à 130

Les matériaux d'étude sont des matériaux composites à base d'une résine thermodurcissable, (Polyester, époxy) et de renfort en fibre tissée de jute , et d'une âme en liège aggloméré

### **1-3-Généralités**

Lors de la transformation d'un matériau composite, l'association d'au moins deux matériaux de base, (fibres de renfort et matrice), de propriétés différentes et non miscibles, permet de créer un nouveau matériau multi phase dont les propriétés sont, en tout ou partie, supérieures à celles des constituants dont il provient. En construction navale, les matériaux utilisés sont des résines thermodurcissables (polyester, époxy, ...) renforcées majoritairement par des fibres de verre et parfois par des fibres d'aramide ou de carbone.

Les performances des composites dépendent de toute évidence des matériaux de base mais aussi de leur capacité à s'associer ce qui fait appel à la notion d'interface fibres/matrice.

#### **1 Résines de stratification**

Les résines polyester sont les résines les plus utilisées en construction navale de plaisance en raison de leur faible coût (environ 2 euros du Kilo) et de leur facilité de transformation.

En revanche, l'emploi des époxydes est surtout réservé pour la construction des bateaux de compétition car elles présentent des performances mécaniques importantes mais sont plus difficiles à transformer et surtout beaucoup plus chères que les polyesters (10 euros du Kilo).

Les principaux avantages et limites d'utilisation de ces résines thermodurcissables sont regroupés dans le Tableau 2.1. Les formulations des résines de stratification sont nombreuses (surtout pour les polyesters) afin de répondre à des besoins très variés. Pour la mise en œuvre, elles doivent posséder une viscosité adaptée et une compatibilité suffisante (mouillabilité) pour bien imprégner les renforts. Ces paramètres sont des propriétés physiques qui dépendent directement de la composition et de la structure chimiques de la résine (masse moléculaire, fonctionnalité chimique, ...). Autrement dit, les formulations doivent être adaptées au type de procédé de transformation, à la complexité de la pièce à mouler et au temps de cycle désiré. Au sein du composite, la résine devenue matrice permet au final de garantir des fonctions essentielles telles que :

- assurer la géométrie de la pièce,
- transférer les charges vers les renforts,
- protéger les renforts vis-à-vis de l'environnement extérieur.

Pendant la mise en œuvre, les résines de stratification passent successivement de l'état liquide à l'état de gel puis à l'état solide. Ce processus caractéristique des résines thermodurcissables

est appelé réticulation et correspond à la formation d'un réseau tridimensionnel réalisé par des pontages chimiques entre molécules. Comme leur nom l'indique, les thermodurcissables sont transformés par la chaleur et conduisent à la réalisation d'un solide infusible et insoluble. La réaction de réticulation est néanmoins irréversible et le recyclage est extrêmement difficile en fin de vie.

## 2 Propriétés

Les résines polyester s'adaptent bien à la transformation des composites à usage naval et présentent les propriétés générales suivantes : une bonne facilité de mise en œuvre de la résine liquide (imprégnation des renforts), une copolymérisation rapide par rapport aux époxydes, de bonnes propriétés mécaniques et isolantes, et peuvent aussi être colorées.

### 2.1 Propriétés chimiques et physiques

Les résines polyester comportent deux aspects chimiquement faibles du point de vue de leur structure : les fonctions ester hydrolysables et les ponts « fistyréniques » sensibles aux oxydants et aux solvants. Le Tableau 2.3 regroupe les agents pour lesquels les résines sont résistantes et attaquées.

Tableau 1. 4\_ Résistance chimique des résines polyester.

Résistant	Sont attaqués
Acides jusqu'à une concentration de 20%	Alcalis (saponification)
Sels	Acides réducteurs
Alcools	Acétones
Hydrocarbures à température ambiante	Solvants halogénés

Par ailleurs, la réaction de copolymérisation d'une résine polyester est accompagnée d'un fort retrait. Il est de l'ordre de 5 à 10 % en volume et constitue une propriété gênante qui doit être prise en compte lors de la conception des moules de stratification. Ce retrait peut aussi engendrer des contraintes résiduelles non négligeables dans les pièces composites.

Cela se traduit par une compression radiale des fibres de renforts. La densité des résines polyester polymérisées est comprise entre 1,13 et 1,50. Elle est donc supérieure à celle de la résine liquide qui varie de 0,9 à 1,1. Un paramètre physique important pour la mise en œuvre d'une résine est sa viscosité. A température ambiante, elle varie entre 0,3 et 1,6 Pas pour des résines commerciales à application marine. La viscosité peut être ajustée par l'apport de monomère (styrène) et/ou de charges minérales (thixotropie) dans des proportions inférieures au pourcent.

## 2.2. - Propriétés mécaniques

Les résines polyester présentent de bonnes propriétés mécaniques surtout en terme de rigidité (module d'Young). En revanche, leurs contraintes et allongement à rupture restent inférieurs à ceux des résines époxyde et vinylester (Tableau 1.5).

Tableau.1. 5 \_ Propriétés mécaniques des principales résines de stratification [35-38].

Résine	Module de Young (GPa)	Contrainte de rupture (MPa)	Allongement à rupture (%)
Polyester	3.0-4.0	40-50	1.5-2.2
Vinylester	2.5-3.0	60	3.0-4.0
Epoxy	2.7-3.1	50-60	2.5-4.0

Au niveau macroscopique, les résines de stratification sont considérées comme isotropes. Leur comportement dépend de la température, il passe de l'état vitreux à l'état caoutchouteuse avec une augmentation de température. Ce passage s'effectue dans une certaine plage et une température de transition vitreuse  $T_g$  est définie. Comme tous les polymères, les therm durcissables ont aussi des propriétés mécaniques qui évoluent en fonction de la vitesse de sollicitation (comportement visqueux). Cependant, pour des sollicitations statiques à température ambiante, le comportement mécanique des résines réticulées est modélisable par une loi élasto-plastique. La figure 1.2 présente un exemple de courbe contrainte/allongement relevée lors d'un essai de traction sur une résine therm durcissable.

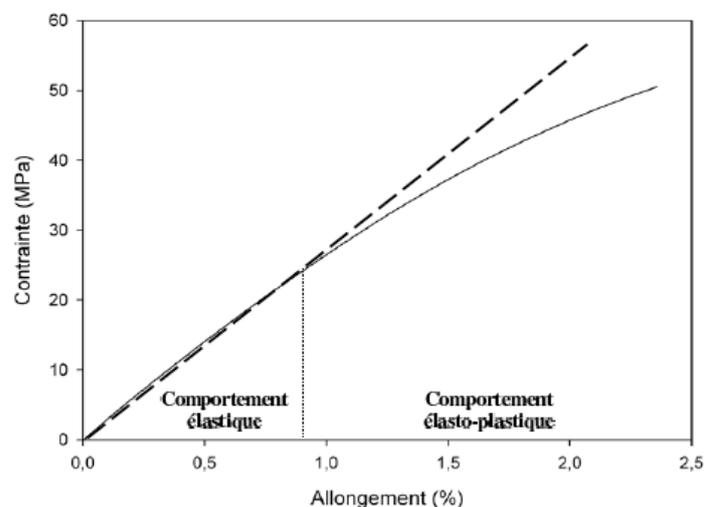


Figure1.2 : Courbe contrainte/allongement relevée lors d'un essai de traction sur une résine therm durcissable.

La présence de nombreux défauts (microfissures) qui sont le siège de concentrations de contraintes importantes

### **3.2. Caractéristiques des résines polyester**

Les résines thermodurcissables de type polyester sont les plus anciennes et les moins chères. Elles sont les plus répandues dans la fabrication de pièces en matériaux composites et rentrent dans la fabrication de 95% des composites thermodurcissables renforcés. Lors de leur fabrication, elles sont généralement additionnées de 30% à 40% de solvant pour écarter les chaînes du pré polymère.

La résine polyester polymérise par adjonction de catalyseur dans les proportions suivantes :

#### **Caractéristiques :**

- 0.8% minimum – temps de travail moyen.
- 2% maximum – temps de travail court.
- Le pourcentage est adapté en fonction des besoins de chaque pièce.
- Précision du mélange : ~1‰
- Masse volumique de la résine : ~1.2
- Masse volumique du catalyseur : ~1

Les résines polyester contiennent du styrène, solvant dont la composition est proche de celle de l'acétone, responsable de leur forte odeur, ayant pour but de maintenir la résine dans un état semi-liquide.

### **3.3 Caractéristiques des résines Epoxy**

L'époxy ou scientifiquement nommé poly époxyde est un thermodurcissable composé d'une résine dite pré polymère qui contient des monomères dont les fonctions époxydes sont les groupements réactifs de la résine, et le durcisseur permettant l'ouverture du cycle époxy et la liaison entre les monomères. Pour cela, les durcisseurs doivent posséder au moins deux fonctions pouvant réagir avec le pré polymère en déclenchant la copolymérisation (réaction de polycondensation) de la résine et en formant un réseau tridimensionnel, non cristallin et infusible. Ce sont souvent des amines ou des anhydrides.

D'autres ajouts peuvent être additionnés et sélectionnés selon le domaine d'application de la résine, tels que les diluants qui sont utilisés dans la formulation de la résine époxy pour réduire la viscosité ou éliminer les solvants. Ces ajouts permettent à la résine époxyde d'être la famille la plus polyvalente des résines, (peuvent être facilement modifiées) pour avoir des propriétés différentes. Cette modification peut être réalisée par :

- La sélection d'un pré polymère approprié ou une combinaison de différentes familles de pré polymère.
- La sélection d'un agent de durcissement et de mécanisme de réaction associé.

- L'addition simple des charges organiques ou inorganique et les composantes [39].

Les résines Epoxy sont chimiquement neutres et ne provoquent aucune réaction indésirable, il est cependant indispensable de porter des gants et si possible un masque respiratoire à cartouche car elles sont très nocives au contact de la peau (hypersensibilité, dermatoses, cancers, ...). Les avantages et les inconvénients des deux résines utilisées sont donnés dans le tableau 1.6 :

Tableau 1.6 : Avantages et inconvénients des deux résines utilisées :

Résine polyester	Résines époxy
Faible coût (~25F le kilo).	Aucune réaction indésirable.
Accroche totale en cas de reprise de stratification.	Très long temps de travail possible (15 heures).
Très faible viscosité.	Facilité de réalisation des mélanges même en petites quantités
Etuvage non indispensable.	<b>Inconvénients :</b>
<b>Inconvénients :</b>	Prix (~100F le kilo).
Très forte réactivité.	Forte nocivité par contact.
Odeur nauséabonde.	Etuvage impératif après stratification.
Difficulté des mélanges en faible quantité.	

### 3.4- Propriétés mécaniques

Les résines polyester présentent de bonnes propriétés mécaniques (Tableau 1.3) surtout en termes de rigidité (module d'Young). En revanche, leurs contraintes et allongement à rupture restent inférieurs à ceux des résines époxyde (Tableau 3). Au niveau macroscopique, les résines de stratification sont considérées comme isotropes. Leur comportement dépend de la température, il passe de l'état vitreux à l'état caoutchouteuse avec une augmentation de température. Ce passage s'effectue dans une certaine plage et une température de transition vitreuse définie.

Tableau 1.7 : Propriétés mécaniques des principales résines de stratification [35-40-41]. [37,38].

Caractéristiques	E [GPa]	$\sigma$ max [MPa]	$\epsilon$ max [%]
POLYESTER	3.0-4.0	40-50	1.5-2.2
EPOXY	2.7-3.1	50-60	2.5-4.0

Les résines thermodurcissables utilisées pour notre travail sont de type :

- la résine Polyester : AROPOL S 902-4205.
- la résine Epoxyde : HARENER 946 avec un durcisseur EPOCAST 50-A1.

#### **4- Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à présenter les notions liées aux matériaux Composites Sandwichs. En premier temps, nous avons présenté les principaux constituants de ces matériaux, ainsi que les procédés essentiels de leurs mises en forme. En deuxième lieu, nous nous sommes consacrés à la présentation des structures sandwichs, ainsi que les différents modes d'endommagements.

L'analyse de cette recherche bibliographique nous a permis d'orienter notre travail de recherche vers une proposition d'élaboration d'un sandwich, constitué de deux peaux stratifiées en fibres végétal (jute) imprégnés de résine thermdurcissable (époxyde et polyester) et d'une âme d'un matériau naturel (liège aggloméré) . La valorisation de la fibre écologique, la fibre biodégradable (origine végétale) par une utilisation dans la conception d'un sandwich composite est une question d'actualité, compte tenu de la biodégradabilité des matériaux et l'impact sur l'environnement.

## ***Chapitre 2 :***

***Fibres et âme naturelles pour  
matériaux composites stratifiés***

## **2. Introduction**

L'utilisation de fibres naturelles comme renfort de matériaux composite se justifie en partie pour développer des matériaux et des technologies prenant en compte les impacts sur l'environnement et dans les cas où le but est d'obtenir des produits légers, les fibres naturelles peuvent être utilisées en tant que renfort avec succès. Ces fibres peuvent également être utilisées comme isolants thermiques et acoustiques. Il existe de nombreuses études dans la littérature à la recherche de nouvelles applications avec des fibres naturelles pour la fabrication de matériaux dans lequel la résistance n'est pas la condition la plus importante ([50]).

Les fibres végétales présentent plusieurs avantages par rapport aux fibres synthétiques. Ils sont biodégradables, léger, renouvelable, de bonnes propriétés mécaniques et sont abondants. En outre, ils ne sont pas abrasif pour l'équipement de traitement, ont émission neutre de CO<sub>2</sub> et sont une source importante de revenus pour la population vivant dans les zones rurales ([51], [52]). Par rapport aux fibres de verre, la production de fibres naturelles provoque moins d'impacts environnementaux. Ce est parce que la culture de fibres naturelles dépend principalement de l'énergie solaire et doit petite quantité d'énergie à partir de combustibles fossiles dans les processus de production et d'extraction ([53]). Il existe certains inconvénients à l'utilisation de fibres naturelles comme renfort dans des matériaux composites, tels que: la qualité et l'efficacité de production, qui dépendent des conditions naturelles; hétérogénéité de leurs propriétés qui peuvent être associés à des conditions de production, d'extraction et de traitement des fibres, et le comportement hydrophile qui conduit à l'absorption d'eau dans les systèmes composites [54].

Plusieurs auteurs ont étudié le comportement en traction des fibres naturelles. Il existe de grandes différences entre les valeurs rapportées pour résistance à la traction et le module de Young dans la littérature. Comme fibres naturelles présentent généralement variables et sections irrégulières, leur mesure peut conduire à d'énormes erreurs dans le calcul de stress. La longueur de la jauge, la vitesse de déformation, de préhension, la résolution de la cellule de charge et la précision de l'actionneur peut également jouer un rôle important dans les résultats finaux. Enfin, la méthode de mesure du module d'élasticité est d'une grande importance que la conformité de la machine doit être prise en compte.

Defoirdt et al. ( [50] ) ont étudié la résistance à la traction de fibres de coco (blanc et brun), le bambou et de jute. Les fibres ont été testés dans un mini machine d'essai de traction à une vitesse de 0,1 mm / min, 1 mm / min et 5 mm / min de jute, de bambou et de coco, respectivement déplacement. Les essais ont été réalisés dans des longueurs différentes de jauge afin d'évaluer l'influence de la longueur de la résistance à la traction. L'aire de section transversale est calculé en déterminant le poids et la longueur de chaque fibre à partir de la densité moyenne obtenue par pycnométrie à gaz. Les fibres de coco ont présenté une faible résistance mécanique (177 MPa - coco blanc), un faible module d'élasticité (3,44 GPa) et haute capacité de déformation (37,85%), l'en d'autres termes, une grande capacité d'absorption d'énergie. Cela a été expliqué en raison de la faible teneur en cellulose (32-53%) et angle microfibrillaire élevée (30-49 °). Les fibres de jute ont une teneur en cellulose dans l'intervalle de 61 à 71,5% et l'angle microfibrillaire de 8 °, ce qui le rend résistant à la fibre (353 MPa) à haut module d'élasticité (GPa 26,25) et une faible capacité de déformation (3,05%).

Tomczak et al. [55] en corrélation les propriétés mécaniques de la fibre de curaua de diamètre, la longueur et la vitesse de déformation. Caractérisation morphologique a été réalisée en utilisant la microscopie électronique à balayage (MEB). Les fibres ayant des diamètres différents (26 à 64 µm) et de longueur de 20 mm ont été testés sous une charge de traction à une vitesse de 5 mm / min de déplacement. Les fibres d'un diamètre de 46 µm ont été testés à différentes longueurs (de 5 à 25 mm) à une vitesse de 5 mm / min de déplacement. En outre, des fibres de même diamètre (46 µm) et de même longueur (20 mm) ont été soumises à différentes vitesses de déplacement (de 5 à 50 mm / min). Les auteurs ont observé que la résistance à la traction et module d'élasticité ont diminué de 310 à 131 MPa et de 96,1 à 30,0 GPa, respectivement, tandis que la capacité de déformation est resté constant (4,57%) que le diamètre augmente. Avec des longueurs croissantes, la résistance à la traction a diminué de 223 à 173 MPa et la pression diminue également de 10,2 à 3,74%, et le module d'élasticité a augmenté de 26,6 à 52,9 GPa. Quand il y avait une augmentation de la vitesse de déformation, les valeurs de résistance à la traction a augmenté de 178 à 217 MPa, mais le module et la souche est resté inchangé (valeurs moyennes de 48,7 GPa et 4,57%, respectivement).

D'Almeida et al. ( [56] ) a annoncé les résultats des essais mécaniques, la composition chimique et les aspects morphologiques de la fibre de piassava. La conformité de la

machine prenait en compte pour mesurer le module d'élasticité de la fibre. Quinze essais ont été effectués pour des longueurs de calibre allant de 15 à 150 mm à une vitesse de 1 mm / min de déplacement. La morphologie a été observé par MEB. La fibre de piassava montré de faibles valeurs de résistance à la traction ( $133 \pm 13,5$  MPa) et le module élastique ( $2,9 \pm 1,2$  GPa) par rapport au sisal et jute, mais les propriétés mécaniques de piassava sont comparables à la fibre de coco (de résistance à la traction entre 106 et 270 MPa et un module d'élasticité compris entre 3 et 6 GPa).

Silva et al. ( [57] , [58] ) ont évalué le comportement mécanique des fibres de sisal. Les essais de traction ont été effectués pour des longueurs de calibre allant de 10 à 40 mm à une vitesse de 0,1 mm / min de déplacement. Le véritable module élastique a été calculé en tenant compte de la conformité de la machine. Les auteurs ont également analysé le mode de la fibre à la rupture en fonction de la microstructure et des défauts. L'échec souche à-diminué d'environ 5.2 à 2.6% lorsque la longueur de la jauge a été augmentée de 10 à 40 mm. La résistance à la traction, d'autre part, se est révélé être indépendant de la longueur entre repères. Résistance à la traction moyenne et module d'élasticité ont été signalés comme 400 MPa et 19 GPa, respectivement. Le module de Weibull a diminué de 4,6 à 3,0 lorsque la longueur de jauge a été augmenté de 10 à 40 mm, respectivement. ZafeiroPoulous, et al [59] Dijon et Baillie (2007)[60] ont rapporté d'importants travaux sur l'effet des traitements de surface sur la résistance à la traction de la fibre lin. Il a été constaté que les traitements n'on pas significativement changer la résistance à la traction de la fibre de lin.

L'utilisation de fibres naturelles comme renfort de matériaux composite se justifie en partie pour développer des matériaux et des technologies prenant en compte les impacts sur l'environnement. Le choix des fibres, de la matrice et le type de procédé de fabrication peut influencer fortement les propriétés mécaniques du matériau élaboré [61].

Dans notre étude, nous allons nous intéresser à une fibre naturelle d'origine végétale présentant l'avantage d'être biodégradable du point de vue environnement que l'on utilisera comme renfort pour l'élaboration d'un matériau composite.

En effet, cette matière étant tissée artisanalement, et en l'absence d'essais normalisés notre étude portera à priori sur le comportement mécanique en traction du jute tissé.

L'expérience montre que l'utilisation de matériaux traditionnels homogènes reste limitée dans un domaine d'application restreint et qui doit s'adapter aux caractéristiques intrinsèques de ces matériaux. De nouvelles perspectives sont apparues avec l'apport des matériaux composites dans ce domaine, de plus, nous pouvons adapter le matériau aux exigences des contraintes mécaniques qui se présentent en faisant, bien entendu, un choix judicieux de renforts et de matrice.

### 2.1. Intérêt de l'utilisation des fibres naturelles :

D'une manière générale, l'utilisation des fibres naturelles comme renfort de matériaux composites se justifie pour :

- valoriser une ressource locale dans des pays peu industrialisés, les composites à fibres naturelles ouvrant de nouveaux débouchés aux produits agricoles ;
- développer des matériaux et des technologies prenant en compte les impacts sur l'environnement. Les fibres naturelles sont des matériaux de qualité qui se fabriquent et se recyclent naturellement sur terre depuis des millions d'années (matériaux biodégradables et renouvelables par culture). Dans cet esprit, on envisage de remplacer les fibres de verre par des fibres naturelles, pour faire des économies, et parce que les matières premières renouvelables présentent des avantages écologiques.

Les principaux avantages des fibres naturelles (Tableau 2.1) sont leur coût, leur légèreté, leur disponibilité et leurs propriétés mécaniques spécifiques élevées. Grâce à un compromis idéal rigidité/résistance/légèreté, les composites renforcés par des fibres végétales concurrencent efficacement les matériaux traditionnels contenant des charges ou fibres minérales.

**Tableau 2.1** : Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts de matériaux composites.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
Faible coût	Absorption d'eau
Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité)	Faible stabilité dimensionnelle
Biodégradabilité	Biodégradabilité

Non abrasif pour les outillages	Faible tenue thermique (200 à 30°C max)
Neutre pour l'émission de CO2	Fibres anisotropes
Demande peu d'énergie pour être produite	Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de la météo...
Pas de résidus après incinération	Pour des applications industrielles, demande la gestion d'un stock
Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres	Renfort discontinu
Bonne isolation thermique et acoustique	
Ressource renouvelable	

Ces matériaux font notamment une percée importante dans le domaine de l'automobile en raison de leur légèreté.

Les fibres naturelles peuvent apporter un gain de poids de 40 % par rapport aux fibres de verre, ce qui représente 10 à 20 % de poids en moins dans un compound. De plus, les fibres naturelles sont issues de ressources renouvelables et elles représentent un atout dans les démarches de conception des constructeurs.

Actuellement, plusieurs types de fibres sont utilisés : le verre, le carbone, le kevlar, aussi le lin, le chanvre, le sisal, le kénaf, le bois ou les charges céréalières.

## 2.2 Classification des différentes fibres naturelles :

On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine (figure 1). [42]

**2.2.1 les fibres végétales** qui comprennent les fibres provenant des poils séminaux de graines (coton, kapok) ; les fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ramie) ; les fibres dures extraites de feuilles (sisal), de troncs (chanvre de Manille), d'enveloppes de fruits (noix de coco)

**2.2.2 Les fibres animales** qui proviennent des poils, telle que la toison animale, et des sécrétions telle que la soie ;

**2.2.3 Les fibres minérales.** Il s'agit plus exactement de fibres minérales artificielles non métalliques siliceuses, vitreuses.

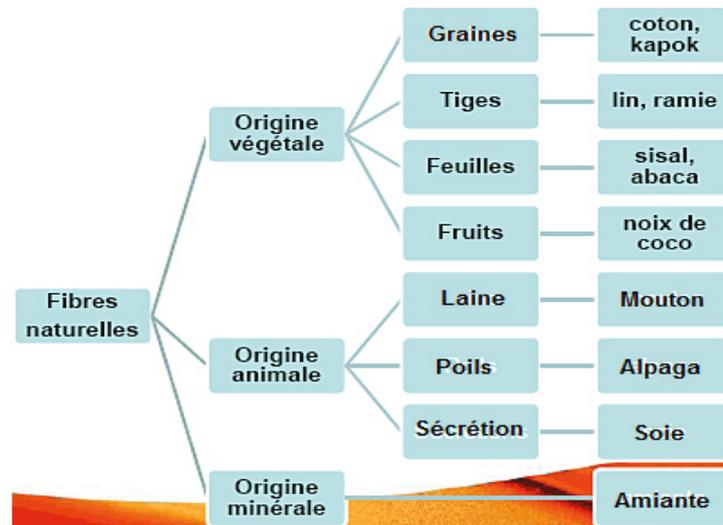


Figure 2.1: Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine

### 2.3 Comparaison des propriétés mécaniques en traction de diverses fibres

Le tableau 2.2 présente les caractéristiques mécaniques en traction de différentes fibres d'origine naturelle [43, 44] ainsi que celles des fibres de renfort couramment utilisées pour le renforcement de matériaux composites courants [45, 46].

Tableau 2.2 : Propriétés mécaniques moyennes en traction de différentes fibres naturelles comparées aux fibres de renfort habituellement utilisées dans l'industrie des matériaux composites [47].

Fibre	E (GPa)	A (%)	$\sigma_u$ (MPa)	Densité
<b>Fibres synthétiques</b>				
Verre E				
Filament vierge	72-73	4,6- 4,8	3200 – 3400	2,54
Filament industriel	72-73	3	200_2400	2,54
CarboneToray	230	1,5	3530	1,7 – 1,9
T300 Thorneel P-120S	825	0,3	2350	1,87 – 2
Aramide Kevlar 49	124	2,9	3620	1,44
<b>Fibres végétales</b>				
Lin	12 – 85	1- 4	600 – 2000	1,54
Lin: moyenne	58 ± 15	3,27 ± 0,84	1339 ± 486	1,53
Mini – maxi	27- 91	1,6 – 5,9	531 – 3282	
Ramie	61,4 – 128 27 65 ± 18	1,8 – 3,8 3,2	400 – 938 755 800 – 1000	1,56

Chanvre	35	1,6	389	1,07
<b>Jute</b>	<b>26,5</b>	<b>1,5 – 1,8</b>	<b>393 – 773</b>	<b>1,44</b>
Sisal	9 – 21	3 – 7	350 – 700	1,45
Noix de coco	4 – 6	15- 40	131 – 175	1,15
Coton	5,5 – 12,6	7 – 8	287 – 597	1,5 – 1,6

*E : module de Young en traction ; A : Allongement à rupture en traction ;  $\sigma_u$  : Contrainte à rupture en traction*

## 2.4 Fibre d’origines végétales :

### 2.4.1 Présentation de différentes fibres végétales

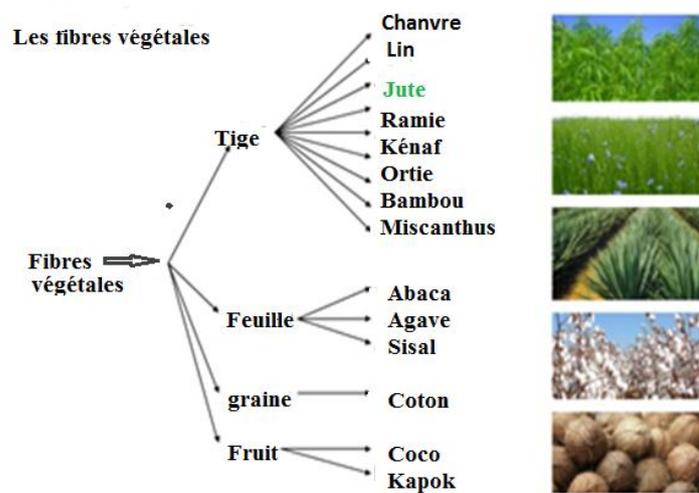


Figure 2.2 : Présentation de différentes fibres végétales

### 2.4.2 Structure d’une fibre végétale

En première approche, une fibre végétale est assimilable à un matériau composite renforcé par des fibrilles de cellulose (fig. 3.2) [49]. La matrice est principalement composée d’hémicellulose et de lignine.

Les fibrilles de cellulose sont orientées en hélice suivant un angle nommé angle micro fibrillaire. Habituellement, dans un matériau composite, le taux de renfort et l’orientation des fibres conditionnent les caractéristiques élastiques et à rupture [50]. De même, dans une fibre végétale, les propriétés physiques des fibres naturelles sont principalement déterminées selon la composition chimique et physique, la structure, le pourcentage de cellulose, l’angle micro fibrillaire, la section et le degré de polymérisation [51].

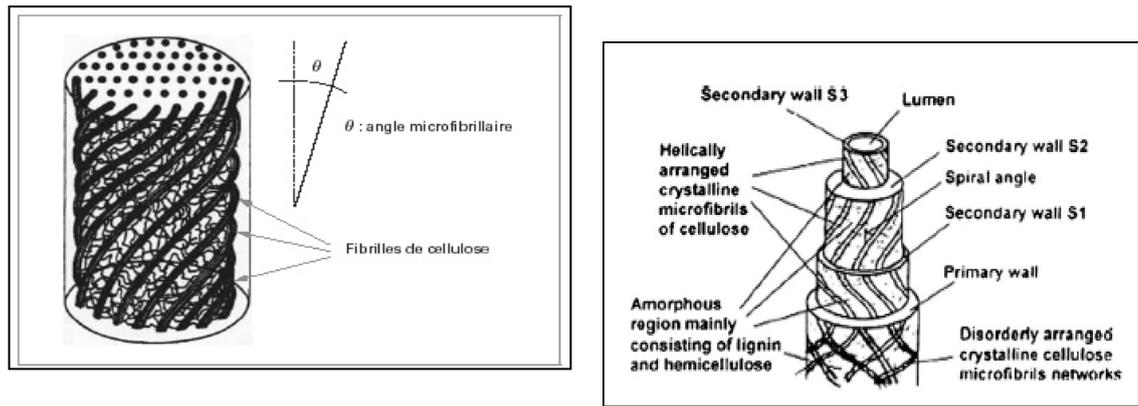


Figure. 2.3 – Microstructure d’une fibre naturelle [20,21].

En simplifiant, pour un pourcentage de cellulose donné, plus l’angle micro fibrillaire sera faible et plus la rigidité et la résistance de la fibre seront élevées [52] ; plus l’angle micro fibrillaire sera important et plus l’allongement à rupture sera important.

Le tableau 2.3 présente, pour différentes fibres végétales, le pourcentage de cellulose, l’angle micro fibrillaire, les dimensions des fibres et le rapport d’aspect L / d (longueur/diamètre) [53,47].

Tableau 2.3 : Composition et propriétés de différentes fibres végétales [53].

Nature Des Fibres	% de la cellulose	Angle Micro Fibrillaire Degres)	Diamètre (µM)	Longueur (mm)	Rapport L / D
Lin	64 – 71	10	5 – 76	4 – 77	1687
Ramie	83	7,5	6 – 126	40 – 250	3500
Chanvre	78	6,2	10 – 51	5 – 55	960
<b>Jute</b>	<b>61 – 71</b>	<b>8</b>	<b>25 – 200</b>	–	<b>110</b>
Sisal	67 – 78	20	7 – 47	0,8 – 8	100
Noix de coco	43	45	12 – 24	0,3 – 1	35

La fibre utilisée pour notre travail est la fibre de jute. Par conséquent un aperçu sur les caractéristiques de cette fibre est présenté dans les paragraphes suivants. pour ce la on donne une aperçu sur cette dernière.

### 2.4.3. Description de jute :

Jute nom masculin (mot anglais, du bengali jhuto).

Le jute est une plante cultivée dans les régions tropicales pour ses fibres. Le principal pays producteur est l'Inde. Il est utilisé essentiellement pour la fabrication de la toile forte et de la toile d'embourrure, très peu en tissu du fait de sa trop forte teneur en lignine.

*D'après Larousse.*

(Botanique : Jute est le nom commun des plantes du genre *Corchorus*, plantes tropicales annuelles de la famille des Tiliacée, surnommé la « fibre d'or », le jute est une des fibres naturelle les plus longues et les plus utilisées. On le retrouve dans divers textiles. )

Le jute est extrait de l'écorce du jute blanc (*Corchoruscapsularis*) et, dans une moindre mesure, de m : la corète potagère (*C. olitorius*). Cette fibre naturelle d'aspect soyeux est surnommée « fibre d'or » en raison de ses reflets. Il s'agit d'une culture annuelle qui prend environ 120 jours pour arriver à maturité (avril/mai-juillet/août).

Le jute prospère dans les terres tropicales situées à faible altitude et ayant un taux d'humidité compris entre 60 et 90 pour cent. C'est une culture pluviale peu gourmande en engrais et pesticides. Son rendement est d'environ deux tonnes de fibre sèche par hectare. Le jute est l'une des fibres naturelles les moins chères. Il vient en deuxième position derrière le coton sur le plan des volumes produits comme de la diversité des usages.



Figure 2.4: Jute vert et jute rouie

#### 2.4.4. 1. Structure et composition de la fibre naturelle jute :

Les propriétés mécaniques des fibres de jute est déterminées par leur :

Composition chimique : pourcentage de cellulose (microfibrille = renfort)

- Structure physique: angle microfibrillaire. La diminution de l'angle entraîne une augmentation de la rigidité et la résistance.

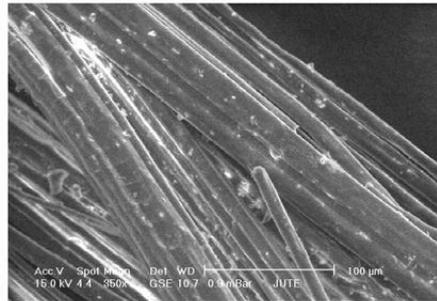


Figure 2.5 : Vue microscopique (MEB) d'une fibre de jute.

La figure 2.5 représente une observation au microscope électronique à balayage de la fibre naturelle du jute [17] avec une longueur de 2 mm et une largeur de 20 µm.

#### 2.4.4.2 Morphologie de La fibre de jute :

La fibre de jute est longue, douce et brillante. Sa longueur va de 1 à 4 mètres et son diamètre de 17 à 20 microns. Elle est essentiellement composée de cellulose végétale et de lignine, qui sont respectivement les principaux composants de la fibre végétale et de la fibre de bois (figure 2.7). Les méthodes de rouissage utilisées pour séparer l'écorce filamenteuse de la tige peuvent être biologiques ou chimiques, mais les premières sont plus répandues compte tenu du coût des produits chimiques.

Le rouissage biologique englobe plusieurs techniques consistant à lier les tiges en faisceaux avant de les faire tremper afin de séparer plus facilement les fibres de la tige. On gratte ensuite la matière non fibreuse, ce qui permet enfin d'arracher les fibres.

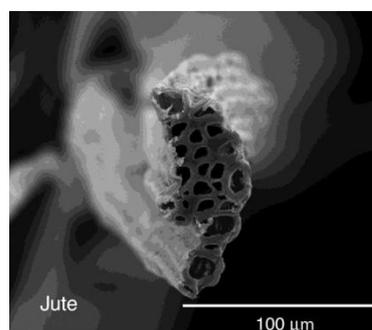


Figure 2.6 : Micrographies de la fibre de jute obtenu par l'analyse SEM. [16].

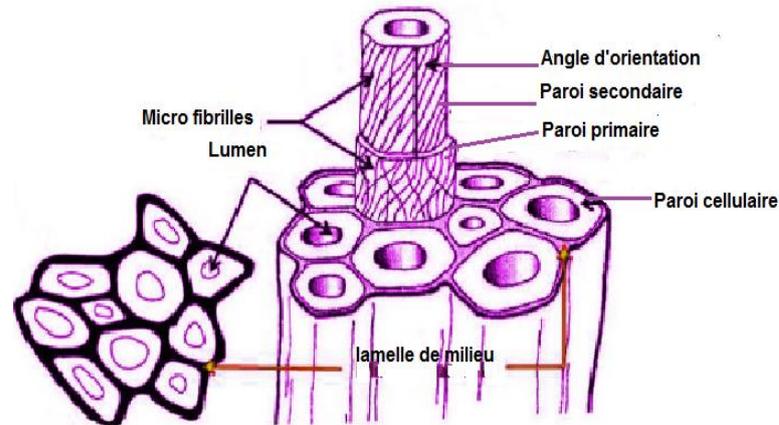


Figure 2.7 -Vue en coupe transversale d'une microstructure de la fibre de jute. [63]

#### 2.4.4.3 Composition chimique de la fibre de jute

Les fibres naturelles, comme d'ailleurs les fibres de chanvre, sont principalement

Constituées de cellulose, d'hémicellulose, de lignine et de pectine. Les proportions de chaque constituant dépendent de la nature de la plante source ainsi que des méthodes utilisées pour son extraction (Bismarcketal.2005) [151]. La majeure partie des fibres est constituée de cellulose. Les fibres naturelles sont généralement hydrophiles. Les proportions d'humidité sont non négligeables et peuvent être par fois très élevées suivant la provenance de la fibre.

#### 2.4.4.4 Avantages de la fibre de jute pour l'environnement :

Totalement biodégradable et recyclable, la fibre de jute est respectueuse de l'environnement. Un hectare de jute consomme environ 15 tonnes de dioxyde de carbone et relâche 11 tonnes d'oxygène. La rotation des cultures permet par ailleurs d'améliorer la fertilité des sols au profit de la récolte suivante. De surcroît, le jute ne produit pas de gaz toxique lorsqu'il est brûlé.

#### 2.4.5 Les usages du jute :

Le jute est une fibre polyvalente. Avec la révolution industrielle, il a largement devancé le lin et le chanvre dans la fabrication des sacs, lesquels représentent aujourd'hui encore l'essentiel des produits issus de cette fibre. Le jute a comme caractéristique intéressante de pouvoir être utilisé indépendamment aussi bien qu'avec diverses fibres et matières. S'il est de plus en plus souvent remplacé par des matières synthétiques, certains fabricants tirent parti de sa biodégradabilité pour des usages où ces dernières seraient inadaptées. On le retrouve par exemple dans des toiles pour mottes, destinées à la

plantation de jeunes arbres, ou encore dans les géotextiles, pour lutter contre l'érosion et maintenir les sols. Ces produits se désagrègent et il donc est inutile de les retirer du sol.

Le jute présente d'autres avantages. Bon isolant, il est doté de propriétés antistatiques intéressantes et affiche une faible conductivité thermique; sa capacité de rétention de l'humidité est moyenne. Plusieurs espèces du genre peuvent être exploitées pour produire de la fibre de jute, mais les deux espèces principalement cultivées à cet effet sont *Corchorus capsularis* et *Corchorus solitorius*. La plante, de type herbacée mesure 3 à 4 mètres de haut avec une tige de la grosseur d'un doigt humain. Les feuilles mesurent de 10 à 15 cm de long et 5 cm de large. Les fleurs sont de petites tailles et de couleur jaune.

Le jute pousse dans un climat chaud et humide, sur un sol de type alluvial ou argilo sableux. Il nécessite des précipitations moyennes de 75 à 100 mm pendant la phase de croissance. Les régions historiquement les plus prospères sont les vallées du Gange et du Brahmapoutre, mais le jute peut pousser dans tout autre milieu satisfaisant à ces conditions.

Le jute est une fibre polyvalente. Avec la révolution industrielle, il a largement devancé le lin et le chanvre dans la fabrication des sacs, lesquels représentent aujourd'hui encore l'essentiel des produits issus de cette fibre. Le jute a comme caractéristique intéressante de pouvoir être utilisé indépendamment aussi bien qu'avec diverses fibres et matières. S'il est de plus en plus souvent remplacé par des matières synthétiques, certains fabricants tirent parti de sa biodégradabilité pour des usages où ces dernières seraient inadaptées. On le retrouve par exemple dans des toiles pour mottes, destinées à la plantation de jeunes arbres, ou encore dans les géotextiles, pour lutter contre l'érosion et maintenir les sols. Ces produits se désagrègent et il donc est inutile de les retirer du sol.

Le jute présente d'autres avantages. Bon isolant, il est doté de propriétés antistatiques intéressantes et affiche une faible conductivité thermique ; sa capacité de rétention de l'humidité est moyenne.

### **2.5 Traitements des fibres naturelles:**

Les différents types de traitement des fibres naturelle sont pour objectifs primordiaux les points suivants:

- Améliorer la compatibilité (mouillage/polymère à l'état liquide) et l'adhérence fibre–matrice (résistance interfaciale au cisaillement/

polymère à l'état solide ) par modification chimique de la surface des fibres afin de créer des liaisons chimiques avec le polymère: utilisation de composés de type silane (hydrophobie), isocyanate, acide carboxylique(adhésion).

- Diminuer le caractère hydrophile des fibres (présence de groupements hydroxydes de la cellulose),
- Augmenter la rugosité de la surface des fibres.
- Améliorer la stabilité dimensionnelle des fibres.
- Améliorer la résistance à la dégradation environnementale.

Pour l'amélioration des caractéristiques mécaniques du jute, ainsi que son comportement en milieu humide, il existe plusieurs traitements de fibre ou processus de purification pour les fibres cellulosiques. Plusieurs travaux se sont intéressés aux traitements de surface du jute [58-67]. Ces traitements qui modifient l'interphase produisent également les changements morphologiques en fonction de celle-ci [59-68]. Ils sont réalisés à base d'alcaline, de silane ou d'alcaline et de silane [59-65]. L'hémicellulose et la lignine contenue dans la fibre de jute sont solubles dans une solution alcaline. Elles vont se dissoudre pendant le processus de traitement alcalin ce qui va provoquer une diminution de la masse des fibres. D'autres traitements se font sous rayonnement UV présentent une augmentation de 58% à la résistance à la flexion [66-67,69]. Le mode de rupture du renfort dans les stratifié diffère du fait des traitements des fibres. La rupture des fibres non traitées est nette, par contre, celle des fibres traitées au silane est moins nette grâce à la cohésion des fibrilles [70].

Les travaux de Stocchi et al [70] montrent que les traitements à l'alcaline effectués sur un stratifié jute/vinylester permettent une amélioration significative de la rigidité en traction biaxiale. Le traitement alcalin est un traitement d'épuration élimination des impuretés (cires, pectines, hémicelluloses et sels minéraux). Il produit des changements dans la structure supermoléculaire et morphologique des fibres cellulosiques. Le stratifié jute/vinylester traité pendant 4 heures à l'alcaline se comporte mieux en traction que le non traité avec une augmentation de 22% du module de Young. Par contre, après traitement durant 24 heures il se comporte moins bien et la différence avec le jute non traité est pratiquement nulle.

L'observation au MEB montre l'influence du traitement à l'alcaline sur l'effet de serrage des tissus jute à l'intérieur de la matrice. Dans le tissu non traité les filés qui

composent le jute sont disposés d'une manière aléatoire, ce qui va contribuer à un comportement aléatoire en traction aussi bien dans le sens chaîne que dans le sens trame (figure 11-1-a). Dans la figure 11-2-b, le traitement à l'alcaline pendant 4 heures a contribué à rassembler les filés entre eux, ce qui va permettre au renfort de se comporter de manière uniforme en traction [70].

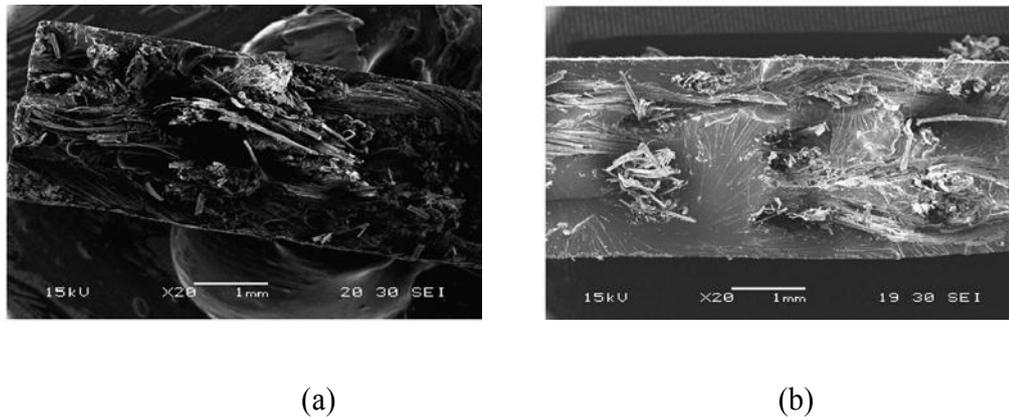


Figure 2.8 : Stratifié jute/pp : (a) non traité, (b) traité à l'alcaline [49].

Le traitement à l'alcaline des fibres de jute modifie non seulement la surface de la fibre mais change également la morphologie de la fibre [71]. Ce type de traitement permet d'avoir une bonne cohésion entre la matrice et le renfort ce qui permet d'améliorer considérablement les caractéristiques mécaniques du stratifié [72]. Les travaux d'Alvarez et al ont porté sur le traitement des fibres de jute avec la solution alcaline à différentes températures et la composition finale (cellulose, hémicellulose et la lignine) de la fibre a été déterminée par analyse chimique [73]. Les fibres de jute traitées à l'alcaline à la température ambiante montrent une masse résiduelle plus élevée, ce résultat est très important pour des applications structurales Le traitement du jute au silane augmente l'adhérence entre la fibre de jute et la matrice de polymère. Les travaux de Hong et al. [74] mettent en évidence cette amélioration de l'adhérence. En effet après rupture, les fibres de jute se cassent sans se détacher. Une grande partie de la matrice pp enduit toujours les fibres de jute en mettant en évidence le degré élevé d'adhérence entre la matrice et le renfort. Les propriétés mécaniques du stratifié jute/pp dépendent non seulement des propriétés des constituants mais également du degré d'adhérence entre la fibre et la matrice du polymère. La nature hydrophile des fibres naturelles affecte d'une manière défavorable l'adhérence à une matrice hydrophobe. Cette mauvaise adhérence mène à un faible transfert de charge à partir de la matrice

jusqu'aux fibres, ce qui va diminuer considérablement les propriétés mécaniques du stratifié. Pour réduire le caractère hydrophile des fibres de cellulose et améliorer ainsi leurs propriétés d'adhérence, il est nécessaire de modifier la surface de fibre [75].

La surface de la fibre non traitée est tout à fait lisse et il n'y a aucune évidence ou trace de n'importe quelle résine de matrice adhérente à la fibre de jute. Le dégagement considérable de la fibre est également évident dans la surface de rupture du stratifié non traité.

Pour ce qui est de la fibre traitée au silane, cette dernière est cassée sans rupture finale. On remarque la présence de matrice de pp enduisant toujours les fibres qui finissent par se casser sous l'effet de la bonne adhérence [76].

## **2.6 Le liège :**

### **2.6.1 Introduction :**

Le liège est un véritable cadeau pour un habitat écologique puisqu'il est par essence renouvelable, durable, résistant, peu combustible, très faible conducteur de son, isolant thermique et résilient.

Le liège est un matériau naturel de structure cellulaire possédant des propriétés très intéressantes: faible densité, grande compressibilité dimensionnelle, bon isolant thermique acoustique et vibratoire, stabilité chimique et longévité [56]. Les cellules de liège se composent principalement de la subérine et de la lignine (40% et 22%, respectivement), et de la cellulose de 9% [57]. Plusieurs études scientifiques sont portées sur le chêne-liège (croissance et production du liège), le liège naturel (biologie, chimie, propriétés et qualités du liège), le liège aggloméré (élaboration et caractérisation mécaniques et hygrothermiques) [57-61].

En ce qui concerne le liège naturel, les études scientifiques sont portées sur l'influence de la température et du milieu (humide ou sec) sur ses caractéristiques mécaniques et hygrothermiques. Dans le domaine de l'absorption, le liège naturel immergé dans l'eau absorbe suivant ses trois directions principales (axiale, radiale et tangentielle). L'absorption d'eau dans les parois de cellules creuses et non communicantes du liège cause son expansion.

Le pouvoir d'absorption du liège est deux fois plus important dans une eau portée à 100°C que dans une eau à température ambiante [58]. Quand le liège naturel est

chauffé à des températures élevées, les pertes de masse sont de 15% à 200°C et 62% à 350°C. Au-delà de cette température, la structure des parois de cellules est considérablement endommagée [59].

Ben Abdallah et al [60] ont étudié l'influence du chauffage du liège dans un milieu humide sur la variation de masse du liège naturel Tunisien. Les échantillons de liège sont chauffés à 100°C dans la vapeur d'eau durant 3 heures puis refroidit à l'eau froide. Ces échantillons sont mis dans une étuve portée à 70°C pendant 3 heures. Les résultats obtenus montrent une diminution de la densité suite à la vaporisation de l'eau contenue dans le liège. Pour le liège naturel Tunisien non chauffé, l'analyse thermogravimétrique (TGA) effectuée à 180°C montre une perte de masse de 4% dans les 10 premières minutes ensuite 0.3 % jusqu'à 30 minutes. A 220°C la perte de masse est croissante jusqu'à 30 minutes pour atteindre 7.16%, la couleur du liège devient marron foncé. Les observations au MEB montrent que les parois des cellules qui sont à l'origine ondulées deviennent presque droites sous l'effet de la chaleur. Ces gonflements sont responsables de l'expansion du liège, la masse diminue suite à l'évaporation de l'eau contenue dans le liège [61-62]. Dans le domaine mécanique, les essais de compression effectués sur le liège naturel se caractérisent par trois phases : une partie élastique correspondant au recourbement élastique des parois de cellules jusqu'à 5% de déformation, un palier (contrainte stable) correspondant à la compression des parois de cellules entre elles jusqu'à 60%, à 80% de la contrainte de rupture, il y a un écrasement et un effondrement des cellules jusqu'à la rupture. Ce comportement est identique dans les trois directions principales du liège [63]. A température ambiante, les essais de traction sur liège naturel montrent un module de traction plus grand dans le sens radial de 60% par rapport au sens tangentiel [64]. Les travaux de Fortesetal ont étudié expérimentalement le coefficient de Poisson dans les trois directions (axiale, radiale et tangentielle) jusqu'à 30% de déformation par rapport à la contrainte de rupture, les coefficients de Poisson dans les directions axiale et radiale sont équivalents [65].

Contrairement au liège naturel et son domaine d'utilisation assez limité, la transformation industrielle du liège couvre un domaine assez vaste allant des bouchons jusqu'aux isolements thermiques et acoustiques pour véhicules spatiaux ou autres objets design en passant par le bâtiment [66-70]. Le liège aggloméré est obtenu à partir de granulés de liège comprimés dans un autoclave et traversés par un écoulement de vapeur d'eau à 350°C qui lance l'agglomération des granulés [71-72]. Plusieurs études

scientifiques sont faites, elles portent en grande partie sur le liège aggloméré noir produit du Portugal. Les travaux de Gilon traitent l'influence de la densité sur les propriétés acoustiques des panneaux de liège aggloméré noir.

Le liège est un matériau présent dans l'écorce du chêne-liège (figure 2.9). Ce dernier dont le nom scientifique est **Quercus Suber** est une espèce extrêmement polymorphe comme la plupart des chênes. Cette espèce d'arbre est caractérisée par la formation subéreuse de son écorce qui donne le liège.

Le liège de faible densité due essentiellement à la quantité d'air élevée contenue dans les cellules possède un maximum de pouvoir isolant. [74]. En fin plusieurs études industrielles sur le liège transformé sont réalisées mais dans un cadre beaucoup plus commercial.

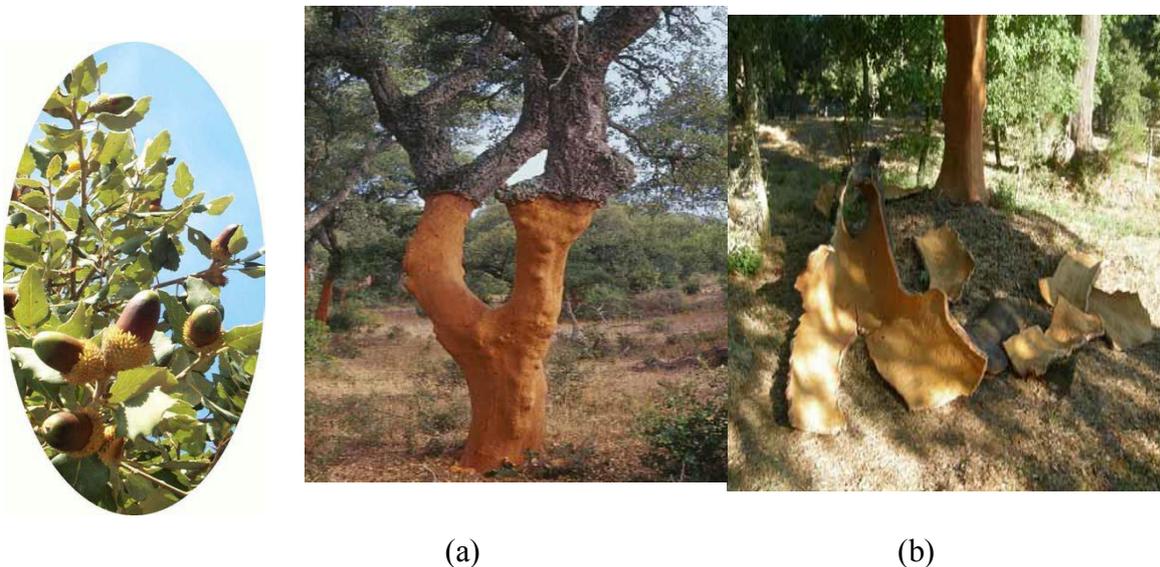


Figure : 2.9 : (a) Tronc après la levée du liège, (b) Chêne-liège

Le tronc de l'arbre ainsi que les rameaux sont recouverts d'une écorce crevassée, épaisse et spongieuse appelée liège. C'est une espèce typiquement méditerranéenne dont l'aire est limitée au bassin occidental de la Méditerranée, Tunisie, Algérie, Maroc, Espagne, France, Italie et aux côtes Atlantiques du Maroc et du Portugal (figure 12).

Il est observé une répartition plutôt atlantico-méditerranéenne du liège, pour une subéraie mondiale d'environ 2.687.000 hectares.

les forêts de chêne liège sont toutes d'origine naturelle et leur première mise en valeur par démasclage des arbres remonte à 1884, ce qui fait que les premières récoltes de liège de production avaient eu lieu en 1896 (12 ans plus tard).



Figure 2.10 ... Aire de répartition du chêne liège

### 2.6.2. Les propriétés de liège :

Le liège est apprécié pour son origine entièrement naturelle et ses qualités physiques : faible poids (densité), grande résistance mécanique, élasticité, imperméabilité (à l'eau), imputrescible, antistatique, isotherme, résiste relativement bien au feu, bon isolant thermique, acoustique et vibratoire, et résistant à l'eau grâce à la subérine qui imprègne les cellules. Il est difficilement inflammable, souple et se décompose lentement. Il est résistant à la compression et indéformable. Il résiste très bien au temps.

### 2.6.3 Applications

#### a) Utilisations des agglomérés

L'utilisation du granulé et des agglomérés dans la construction de bâtiments permet de réduire la perte de chaleur à travers les murs de 36%, et qui en couverture atteint les 53%.



#### b) Anciennes applications

Déjà PLINE, au 1ersiècle, conseillait l'utilisation du liège pour sa capacité isolante élevée, en citant son utilisation traditionnelle dans la construction de toits en Afrique du Nord.



**c) Epoque des Nuraghi (1700 a.c. –200 a.c):**

Dans quelques «nuraghi», des plaques en liège étaient employées pour isoler les bâtiments, de la même manière que sont aujourd'hui utilisés les panneaux en liège aggloméré. Pendant l'époque des «nuraghi», des bandes de liège sont utilisées pour protéger les armes de l'humidité(Nuraghe Losa).



Figure 2.11 : Plaques en liège étaient employées pour isoler les bâtiments.

**d) Epoque des Nuraghi(1700 a.c. –200 a.c)**

Dans le village nuragique de S'UrbaledeTetion a mis en évidence la technique d'utilisation du liège comme matériau isolant pour les bâtiments.

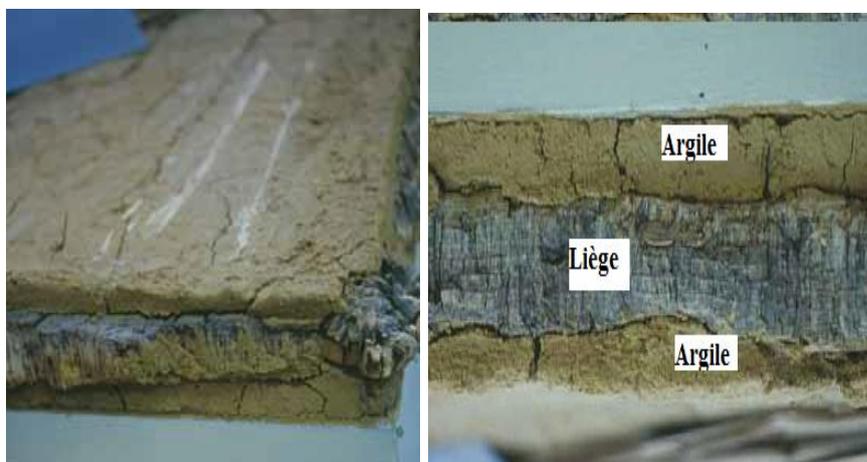


Figure 2.12 :L'utilisation du liège dans la construction de toits en Afrique du Nord.

**e) Ruche pour les abeilles**

Au 1ersiècle le botaniste Lucio Colameleasuggérel'utilisation du liège pour la construction des ruches, pour sa haute capacité d'isolation et de régulation thermique. Les ruches sont recouvertes avec d'autres planches en liège pour augmenter l'effet isolant.



Figure 2.13 : Utilisation du liège pour la construction des ruches

Hormis son usage traditionnel dans le secteur du bouchon de boisson, le liège trouve également des débouchés dans diverses industries telles que :

- Le Bâtiment et travaux publics
- L'industrie du froid
- La construction navale
- L'industrie automobile et le transport
- L'industrie de la mode (chapeaux, chaussures, textile)
- L'industrie chimique
- La fabrication d'articles de sport

#### 2.6.4. Le chêne liège dans la méditerranée

Le liège est l'écorce du chêne-liège « *quercus suber* », qui pousse principalement dans le bassin méditerranéen ainsi que la façade Atlantique du Portugal (Figure .)



Figure 2.14 : Carte de répartition de chêneliège dans le monde [50].

(<http://www.institutduliege.com>)

Cette écorce est constituée de plus de 40 millions de cellules au cm<sup>3</sup> remplies à 89 % de gaz à prédominance d'azote très proche de l'air, dont la disposition des parois alvéolées et élastiques rappelle le nid d'abeille. C'est bien un produit naturellement « doué » aux nombreuses qualités : léger, souple, peu conducteur, élastique, imperméable aux liquides... Ce polymère naturel a une structure cellulaire alvéolaire avec un ensemble intéressant de propriétés: une faible perméabilité aux gaz et liquide [71] [72], et stabilité chimiques et microbiologiques [73], une faible conductivité [74] et une élasticité remarquable avec récupération de dimensions [75], [76] et [77]. Compte tenu de ces caractéristiques, le liège est utilisé dans de nombreux domaines tels que l'isolation [78], chaussures semelle [79], l'adsorption des polluants [80] et bien évidemment comme bouchon pour sceller les bouteilles de vin [81] et [82].

En raison de la géométrie des cellules, disposées en une structure en nid d'abeilles alvéolaire, le liège est un matériau anisotrope avec des cellules tridimensionnelles vides, mais il n'y a aucun espace vide intercellulaire. Cependant, les canaux de forme lenticulaire, que l'on appelle lenticelles, traversant le bouchon le long de la direction radiale, forment une macroporosité hétérogène. La composition chimique du liège dépend principalement de l'origine géographique, l'âge de l'arbre (vierge ou la reproduction), l'origine génétique et les conditions de croissance [73], [83], [84], [85] et [86]. Néanmoins, la composition moyenne suivante peut être établie. Le composant majeur est la subérine (40 à 45% en poids) il est similaire d'un polyester à la cutine, composée de longues chaînes d'acides gras, des acides gras hydroxylés et des acides phénoliques liés par des groupes ester [85], [87], [88] et [89]. La lignine représente 22 à 27% en poids de la matière. Il est un polymère rigide et dur, avec des liaisons covalentes, connus pour être responsables de la résistance à la compression du bois [90]. La cellulose et l'hémicellulose compte de 9 à 12% en poids, sont les éléments de structure des parois cellulaires. Enfin, le liège contient d'autres composants, tels que des cires et des tanins, qui ne sont pas liés à la structure principale et donc facilement extractibles. Ces extractives représentent 10 à 12% en poids et certains d'entre eux sont connus pour prendre part dans les propriétés organoleptiques des vins [91].

Bien que la moitié des composants de liège sont hydrophobes, on peut la sorption d'environ 10% en poids de l'eau pour une humidité relative proche de la saturation à 25 ° C. La sorption d'eau sur liège se produit par un mécanisme de physisorption (avec

regroupement, associée à un gonflement de la matière [92]. Même si une légère hystérésis entre la sorption et la désorption est sensible, le phénomène est réversible et associée à une faible enthalpie de sorption à faible remplissage, autour de  $-60 \text{ kJ.mol}^{-1}$ . Surprisingly, si l'interaction de l'eau avec du bois a été largement étudiée [93], [94], [95], [96] et [97], les données relatives à l'effet de l'eau sur les propriétés physiques du liège sont rares. Les propriétés mécaniques de liège ont été principalement étudié en compression [75], [76], [77], [81] et [98]. Ils ont également été déterminé en tension, mais dans une moindre mesure [99] et [100]. Ces études ont été principalement axés sur l'effet de la qualité de liège et de la densité [76], [77], [99] et [100], ainsi que les paramètres du procédé (traitement bouillante) [101] et [102]. À notre connaissance, il n'y a pas de données dans la littérature déclaré l'effet d'hydratation sur les propriétés mécaniques de liège. Cette étude visait à évaluer les propriétés de compression de liège - lorsqu'ils sont stockés dans divers environnements d'humidité relative, de 0% à 100% à 25 ° C - le long des radiales et tangentiels directions, qui correspondent à la compression des directions dans le goulot d'étranglement.

le liège aggloméré :

Jardin et al. [106] ont suivi le changement de dimensions d'échantillons de liège aggloméré pendant le test de compression. Ils ont déterminé un coefficient de Poisson proche de 0,15 au début de la compression, ce qui diminue de 0,05 à 50% de déformation. Contrairement au liège aggloméré, qui peut être considéré comme isotrope, le liège naturel est anisotrope, au moins dans une direction par rapport aux deux autres. Ainsi, deux rapports de Poisson différentes peuvent être envisagées. Pour le liège naturel à basse tension (1-2%), a / non radiale radiale et une radiale / non radiale le rapport de Poisson de 0,097 et 0,064, respectivement, a été rapporté par Fortes et Nogueira [107]. Ce comportement est caractéristique d'une faible déformation des cellules de liège au cours de la compression, ce qui conduit à une légère expansion de l'échantillon.

### 2.6.5 Composition chimique du liège :

L'étude de la composition chimique du liège a été menée au cours de nombreux travaux qui ont conduit à des résultats parfois contradictoires. [108] La plupart des constituants du liège ne sont accessibles qu'après dépolymérisation. Néanmoins, au XVIIIème siècle,

le physicien britannique Robert Hooke arrive à obtenir la première image du liège en utilisant un microscope de son invention. Il découvre que les parois de ces cellules sont constituées de subérine, principal composant du liège (40% en poids sec), supportée par de la lignine (22%) et de la cellulose (20%). Les céroïdes, tanins et les autres extractibles représentent 18% [108,109].

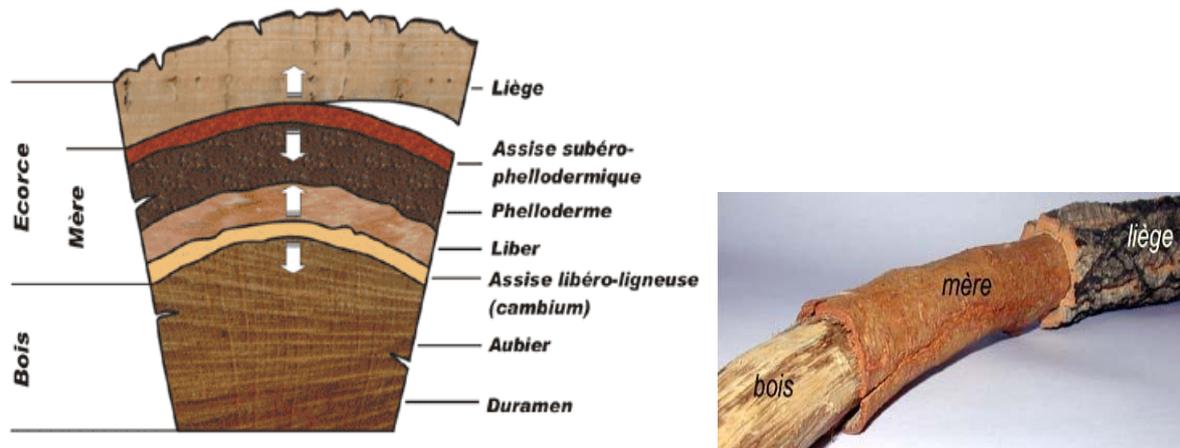


Figure 2.15 : Composition tissulaire du chêne liège. [120].

La subérine est un polymère de haut poids moléculaire, d'où c'est propriétés imperméable aux liquides et très faiblement perméable aux gaz Elle est composée d'une fraction polyester aliphatique liée de façon covalente à une fraction phénolique. Des unités  $\omega$ -hydroxyacide,  $\alpha$ ,  $\omega$ -dicarboxyacide, des acides gras à longue chaîne et certains alcools composent la fraction aliphatique [110-112] alors que la fraction phénolique est composée de polymère proche de la lignine majoritairement composé d'unités guaiacol. [108-113].

La lignine du liège est un polymère de masse moléculaire élevée similaire à celle d'une gymnosperme,[114] soit majoritairement constituée d'unité gaïacyles (98%) liées par une grande diversité de liaisons (éther, acétal, glucoside...). La fraction carbohydrate est composée à 48% de cellulose, 27% de xylose, 15% d'arabinose, 5% de mannose, 3% de galactose et 2% de rhamnose [115] La fraction extractible contient différents composés phénolique tel que les aldéhydes et les acides phénoliques, les coumarines, les proanthocyanidines et les ellagitannins [116-119]

### 2.6.6 Propriétés du liège :

Selon Quelinis[121], le liège est apprécié pour son origine entièrement naturelle : faible poids, grande résistance mécanique, élasticité, imperméabilité (à l'eau), imputrescible, antistatique,

isotherme, résiste relativement bien au feu, bon isolant thermique, acoustique et vibratoire, et résistant à l'eau grâce à la subérine qui imprègne les cellules. Il est difficilement inflammable, souple et se décompose lentement. La conductivité thermique est très faible :  $0,040\text{W/m}^\circ\text{C}$ .

### 2.6.6.1 Propriété chimique de liège:

D'après Perereira [73] [77] le liège est composé chimiquement comme suit :

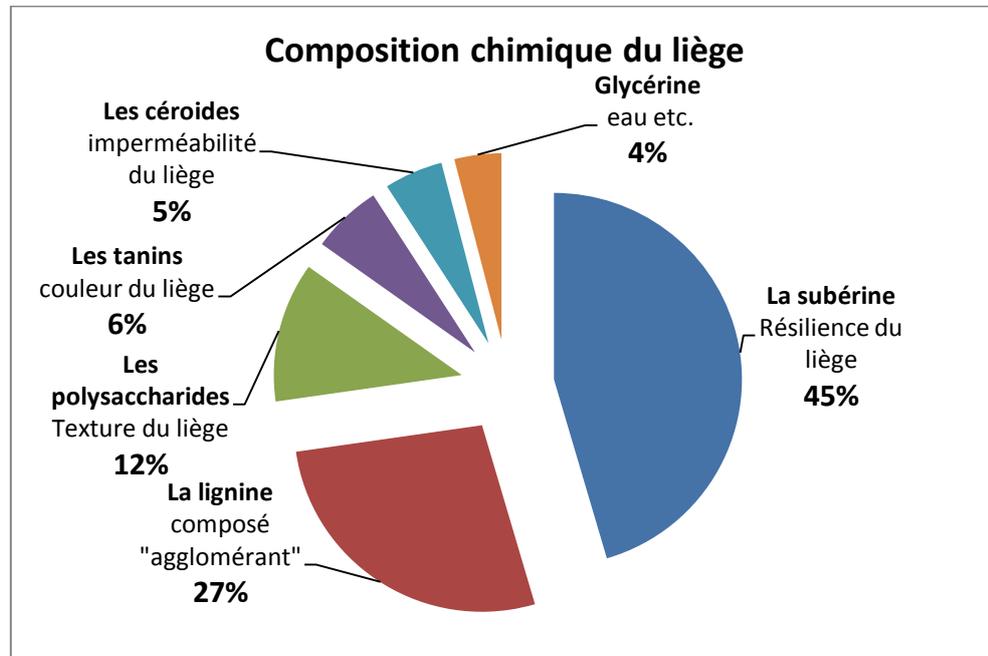


Figure 2. 16 : Composition chimique du liège [73] .

### 2.6.6.2- Propriétés physiques et mécaniques de liège:

- **La densité :** Le liège de reproduction est moins lourds que le liège male, sa densité varie de 0,18 à 0,2, elle peut atteindre 0,33 à 0,35 avec la croute [122].
- **L'humidité :** Une fois récolté le liège peut avoir une humidité de 30 à 35%, le séchage à l'air le fait baisser à 5-10% [122-123],[123].
- **Le gonflement :** du fait de son hygroscopie, le liège contrairement au bois, ne subit pas de retrait au séchage, mais lorsqu'on le fait bouillir, il gonfle ce qui induit une amélioration du calibre avec l'élimination de quelques défauts du liège et une diminution de la densité (Rosa et al. 1990).

Concernant les propriétés mécaniques de liège, il possède la particularité d'atténuer et d'absorber les chocs mécaniques et les vibrations acoustiques [77] En effet, il est déformé puis relâché, une fracture importante du travail est dissipée, elle est mesurée par le coefficient de pente qui varie de 0,1 à 0,3. Le liège possède une combustibilité et une élasticité linéaire d'environ 7% de la déformation. Ceci est dû à la grande flexibilité des membranes cellulaires. [122-123] La seconde

élasticité est très lente, le liège ne retrouve alors qu'en 24 heures 98% de sa taille initial [124]. Le liège possède encore un haut coefficient de frottement et une résistance considérables à l'usure [125].

Selon [121] le liège est apprécié pour son origine entièrement naturelle : faible poids, grande résistance mécanique, élasticité, imperméabilité (à l'eau), imputrescible, antistatique, isotherme, résiste relativement bien au feu, bon isolant thermique, acoustique et vibratoire, et résistant à l'eau grâce à la subérine qui imprègne les cellules. Il est difficilement inflammable, souple et se décompose lentement. La conductivité thermique est très faible : 0,040W/m°C.

Dans le domaine mécanique, les essais de compression effectués sur le liège naturel se caractérisent par trois phases : une partie élastique correspondant au recourbement élastique des parois de cellules jusqu'à 5% de déformation, un palier (contraintestable) correspondant à la compression des parois de cellules entre elles jusqu'à 60%, à 80% de la contrainte de rupture, il ya un écrasement et un effondrement des cellules jusqu'à la rupture. Ce comportement est identique dans les trois directions principales du liège [126]. A température ambiante, les essais de traction sur liège naturel montrent un module de traction plus grand dans le sens radial de 60% par rapport au sens tangentiel [127]. Les travaux de Fortes et al ont étudié expérimentalement le coefficient de Poisson dans les trois directions (axiale, radiale et tangentielle) jusqu'à 30% de déformation par rapport à la contrainte de rupture, les coefficients de Poisson dans les directions axiale et radiale sont équivalents [128].

Contrairement au liège naturel et son domaine d'utilisation assez limité, la transformation industrielle du liège couvre un domaine assez vaste allant des bouchons jusqu'aux isolements thermiques et acoustiques pour véhicules spatiaux ou autres objets de sign en passant par le bâtiment [128-129]. Le liège aggloméré est obtenu à partir de granulés de liège comprimés dans un autoclave et traversés par un écoulement de vapeur d'eau à 350° C qui lance l'agglomération des granulés [130-131]. Plusieurs études scientifiques sont faites, elles portent en grande partie sur le liège aggloméré noir produit du Portugal. Les travaux de Gilont traité l'influence de la densité sur les propriétés acoustiques des panneaux de liège aggloméré noir.

Le liège de faible densité due essentiellement à la quantité d'air élevée contenue dans les cellules possède un maximum de pouvoir isolant. [123]. Enfin plusieurs études industrielles sur le liège transformé sont réalisées mais dans un cadre beaucoup plus commercial.

### **2.6.6 3Présentation du liège**

Le chêne liège est un arbre du bassin méditerranéen, dont l'écorce donne du liège, utilisé depuis des milliers d'années dans divers domaines, notamment la fabrication de bouchons

Le **liège** est le produit de la récolte de l'**écorce** du **chêne-liège**. Les principaux producteurs sont le Portugal, l'Algérie, l'Espagne et le Maroc, les récoltes ayant lieu environ tous les 10 ans. En France, les zones de production se situent en Corse, dans le Var et les Pyrénées-Orientales.

La première couche de l'écorce appelée « mâle » a une texture dure et irrégulière et est réservée à l'**isolation**. Les couches suivantes, appelées « femelles » sont utilisées pour la fabrication de bouchons ou de revêtement de sols.

Le liège peut être utilisé **brut** (liège blanc) ou **expansé** (liège noir) : après l'avoir réduit en **granules**, il est passé à la vapeur en four autoclave (à 300°C). Grâce à sa propre résine, la **subérine**, les granules s'agglomèrent sans **aucun additif**. On obtient ainsi du **liège expansé**, souvent de couleur foncée en raison de la température. La matière obtenue forme un bloc compact dont l'expansion a dilaté la porosité et remplit les vides entre les granules, ce qui lui confère ses qualités d'**isolant thermique et phonique**.

Le liège est un matériau naturel de structure cellulaire possédant des propriétés très intéressantes (fig. 1) : faible densité, grande compressibilité dimensionnelle d'après les travaux de H.Periera [133], bon isolant thermique acoustique et vibratoire, stabilité chimique et longévité. Les cellules de liège se composent principalement de la subérine et de la lignine (40% et 22%, respectivement), et de la cellulose de 9% [134] [139].

La transformation industrielle du liège couvre un domaine assez vaste allant des bouchons jusqu'aux isolements thermiques et acoustiques pour véhicules spatiaux ou autres objets design en passant par le bâtiment [135.136].

Le liège aggloméré est obtenu à partir de granulés de liège comprimés dans un autoclave et traversés par un écoulement de vapeur d'eau à 350°C qui lance l'agglomération des granulés [137,138]

Plusieurs études scientifiques ont porté sur le chêne-liège (croissance et production du liège), le liège naturel (biologie, chimie, propriétés et qualités du liège), le liège aggloméré (élaboration et caractérisation mécaniques hygrothermiques) [140-144].

### **2.6.7-Economie du liège**

**2.6.7.1- Production mondiale du liège :**

Le Portugal est le premier producteur mondial de liège, à titre indicatif 33% de la subéraie mondiale est portugaise et correspond à près de 60% du commerce mondial de liège (ou 80% en considérant le produit fini fabriqué à partir du liège).

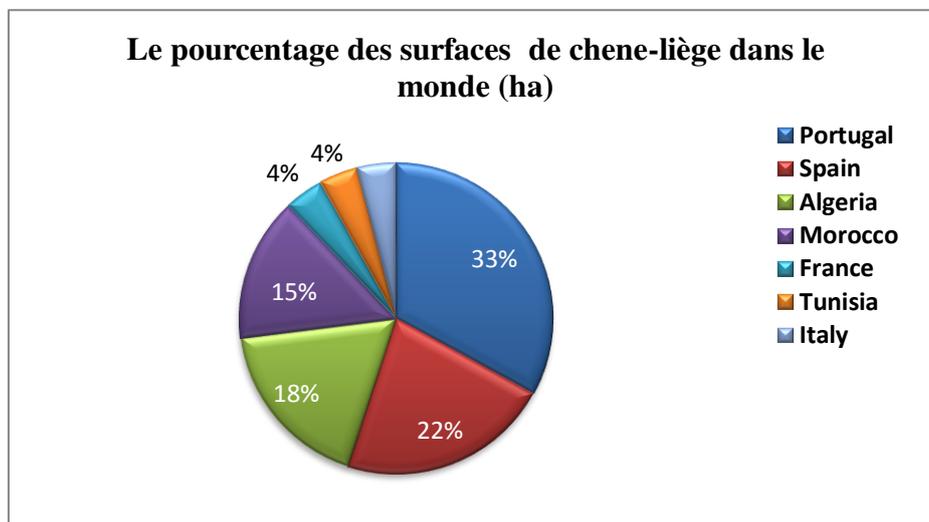


Figure 2.17 : Surface de chêne-liège dans le Monde (ha ).

Le Portugal et l’Espagne ont exportés plus de 300 millions d’euros en 2005 (Aronson et al.,2009) (Fig. 2.18)

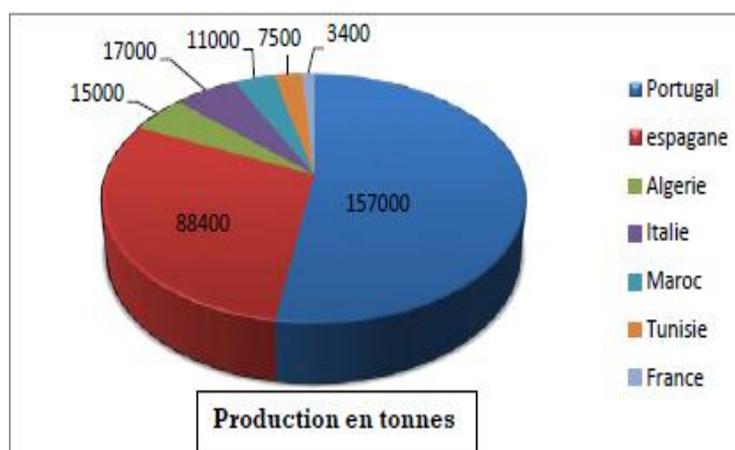


Figure 2.18 : Production mondiale du liège [145] Dehane, B et al. 2012/

**2.6.7.2 Le liège en Algérie :**

Dans les pays comme l’Algérie, la levée de l’écorce du chêne-liège fait participer un grand nombre de paysans locaux. En effet, ces derniers récupèrent le maximum d’écorce se trouvant sur leur terrain pour ensuite les revendre aux fabriques. Ainsi, ils bénéficient de cette activité tout comme les grosses entreprises. Par conséquent, petits paysans et grosses entreprises

modernes arrivent à tirer profits de l'activité de la production de liège. Le chêneliège s'étend d'une manière assez continue le long de la zone littorale et le reste est disséminé sous forme d'îlots de moindre importance dans la partie Ouest [146].

Elles se répartissent à travers 22 wilayas (fig.4).



Figure 2.19 : Aire de répartition du chêneliège en Algérie DGF, 2003- [147].

### **Production nationale :**

la transformation de liège naturel en Algérie se fait dans l'entreprise National des lièges dénommée « Telza lièges » située à l'Est de l'Algérie. cette entreprise produit des panneaux de liège aggloméré blanc de moyenne densité (granulés utilisés : à 2mm, 2 à 3 mm, 3 à 5mm) et de basse densité (granulés 4 à 6mm) et ceci, pour différentes épaisseurs allant de 2mm jusqu'à 30mm en fonction de leurs applications industrielles, dans cette étude, nous avons utilisé le liège aggloméré de moyenne densité avec des granulés de 20 et 30mm.

La production du liège a atteint des déceptions jamais reproduites depuis les premières concessions coloniales. A titre indicatif, en 1994 la production nationale n'a pas dépassé le seuil de 4000 tonnes puis elle a atteint subitement les 16 000 tonnes en 1998. Le taux de croissance moyen annuel de la production frôlait le 1,8% tandis que la production en 2010 a baissé de 73% par rapport à celle de 1965. La figure 15 résume les fluctuations de la production annuelle de la filière liège en Algérie entre 1965 et 2010.

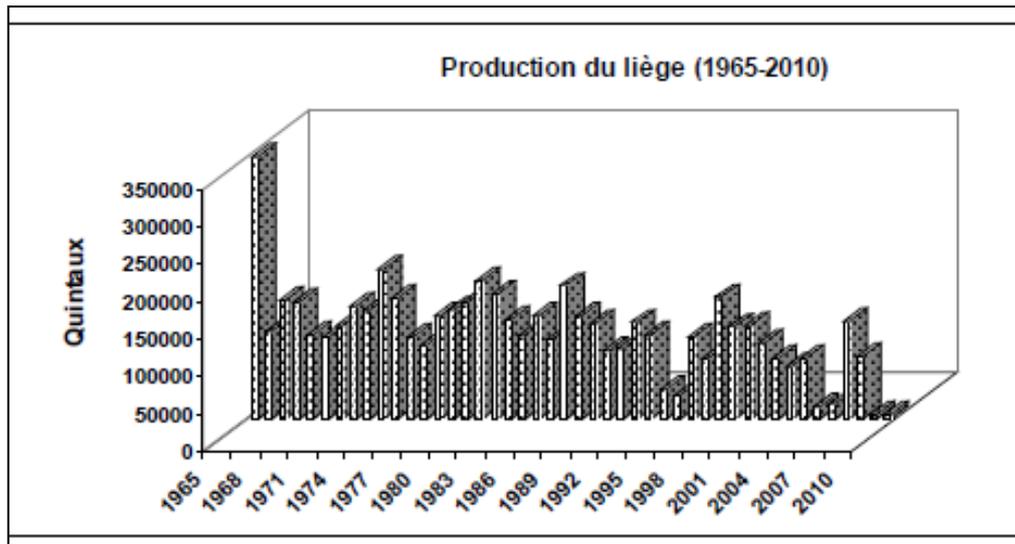


Figure 2.20 : Production nationale annuelle de liège entre 1965-2010 [148].



Figure 2.21 : La récolte du liège naturel

Benamirouche S et al [149] ont caractérisé géographiquement et donné quelques descriptions des peuplements porte-graines de chêne liège (*Quercus suber* L.) dans les wilayas de Jijel, Mila et Bejaia (Nord-est algérien). Ils ont constaté que 22 peuplements occupant une superficie totale de 1025 hectares ont été retenus. Au centre de chaque peuplement un point GPS, a été pris, puis utilisé pour établir les cartes de localisation par wilaya. Dans un deuxième temps, les peuplements en question sont en cours pour description détaillée permettant leur délimitation plus précise possible, leur caractérisation éco-dendrométrique et le renseignement de fiche signalétique pour chaque peuplement. En parallèle, les données recueillies sont transcrites au fur et à mesure dans la base de données géographique préalablement élaborée.

## 2.7 Présentation des matériaux

Le liège aggloméré blanc de moyenne densité est obtenu à partir de granulés de 1 à 5 mm . La colle utilisée est du polyuréthane alimentaire. Les caractéristiques fournies par l'entreprise nationale des lièges sont les suivantes :

### 2.7.1 Présentation du liège aggloméré blanc

La transformation du liège naturel se fait au sein l'Entreprise Nationale des Lièges dénommée *Taleza Lièges* située à l'Est de l'Algérie. Cette entreprise produit des panneaux de liège aggloméré blanc de moyenne densité (granulés utilisés : 1 à 2mm, 2 à 3mm, 3 à 5mm) et de basse densité (granulés 4 à 16mm), et ceci, pour différentes épaisseurs allant de 2mm jusqu'à 30 mm en fonction de leurs applications industrielles. Nous présentons dans ce qui suit les différents types de panneaux de liège aggloméré blanc fabriqués par cette entreprise.

### 2.7.2 Liège aggloméré blanc moyenne densité

Le liège aggloméré blanc de moyenne densité est obtenu à partir de granulés de 1 à 5mm (figure 3.1). La colle utilisée est du polyuréthane alimentaire. Les caractéristiques fournies par l'entreprise nationale des lièges sont les suivantes :

- Densité : 180 à 270kg/m<sup>3</sup> ou 20kg (données à titre indicatif vu les différents types de granulés utilisés (1/2, 2/3 et 3/5), dans ce qui suit la densité des plaques de liège aggloméré est calculée pour chaque type de granulés,
- Allongement: 5%,
- Comportement aux rayons solaires : Léger jaunissement après une année d'exposition,
- Résistance aux acides: (Après une heure dans l'acide chlorhydrique concentré fumant) avec une concentration massique d'acide chlorhydrique de 201.19gr/litre : aucune désagrégation de l'aggloméré,
- Résistance à l'eau bouillante durant trois heures : aucune désagrégation,
- Effet d'isolation : isolation thermique et phonique,
- Résistance au feu : brûle difficilement,
- Dimensions : 1028x514x2 à 30mm, 500x500x2 à 30mm.
- Stabilité dimensionnelle: Bonne stabilité,
- Variétés: Gamme assez variée.

### 2.7.4 Propriétés physique et mécaniques (1)

Résistance à la combustion Retardateur naturel de la progression du feu, Légèreté (flottabilité), Compressibilité, Élasticité (Indispensable pour la fabrication des bouchons) , Remarquables qualités anti sismique, Imperméabilité aux liquides et aux gaz(en raison de la présence de subérine, pratiquement infusible et insoluble)



Figure 2.23 : Résistance à la combustion de liège.

Absence des espaces intercellulaires +présence de tanins =tissu subéreux imputrescible et inaltérable sous l'action de l'humidité

Mauvaise conductibilité du point de vue thermique, acoustique et vibratoire

Résistance à la combustion, retardateur naturel de la progression du feu [150].[151].

## *Chapitre 3*

### *Caractérisation Des Matériaux Utilisés*

### **3- Caractérisation de la fibre de jute :**

#### **3-1 Introduction :**

Les fibres utilisées comme renfort dans les matériaux composites à matrice polymère sont principalement des fibres synthétiques comme les fibres de carbone ou de verre. Ces fibres présentent de très bonnes propriétés mécaniques et géométriques. Cependant d'autres fibres peuvent être utilisées comme les fibres végétales qui présentent des propriétés mécaniques, physiques et chimiques intéressantes ainsi que des avantages économiques et environnementaux certains [152]. Parmi les fibres végétales couramment utilisées, celles issues de la plante de jute présentent de bonnes propriétés mécaniques. Parmi toutes les fibres naturelles, le jute possède des caractéristiques mécaniques intéressantes en termes de résistance à la traction, avec des propriétés intéressantes en flexion [153]. De plus, le jute importé à l'état brut est traité, filé et tissé en Algérie, il est disponible et à faible coût.

Les matériaux composites renforcés par des fibres synthétiques, particulièrement, celles de verre, sont actuellement largement utilisées dans la production de pièces composites à grande diffusion. Cependant, leur utilisation soulève de plus en plus de questions tant du point de vue sanitaire qu'environnemental [154]. La consommation d'énergie pendant la production de ces fibres est élevée et est associée à l'émission de Composés Organiques Volatils (COV) nocifs lors de leur mise en œuvre. Il n'existe actuellement aucune solution économiquement viable pour le retraitement des composites renforcés de fibres traditionnelles en fin de vie, sans transfert de pollution. Une alternative consiste alors à utiliser les fibres naturelles, qui sont issues de ressources renouvelables, biocomposites et stables en fin de vie, et donc plus respectueuses de l'environnement. Ainsi, en remplaçant les fibres synthétiques par des fibres végétales, il est possible de réduire l'impact environnemental des renforts.

Les fibres naturelles offrent des perspectives prometteuses grâce à leurs propriétés spécifiques intéressantes, en raison de leur faible densité, et leur biodégradabilité [155].

Dans ce chapitre nous intéressons à la caractérisation des matériaux utilisés (jute, résine, liège aggloméré blanc de moyenne densité) dans l'élaboration des stratifiés et des panneaux sandwichs.

#### **3.2. Etude du comportement mécanique du renfort.**

Avant l'élaboration des stratifiés nous avons procédé à la caractérisation des fibres de renfort utilisé qui est le jute. Cette caractérisation consiste à des essais de traction réalisés dans le laboratoire LMMC ainsi que la mesure des poids et des densités en chaîne et en trame effectuées au niveau du laboratoire textiles de (CNTC) de Boumerdes (voir annexe A). Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 3-1 : Propriétés physiques de jute.

Echantillons	Poids au m <sup>2</sup> (g/m <sup>2</sup> )	Densité en chaîne (fil/10cm)	Densité en trame (fil/10cm)
A	517	40	80
B	421	50	40
C	418	60	60
D	457	60	60

Où :

- A : jute à grosse maille utilisée.
- B : jute à grosse maille non utilisée.
- C : jute à maille fine non utilisée.
- D : jute à maille fine utilisée.

### 3.3 Traitement des fibres de jute :

Pour améliorer l'adhésion fibre-matrice, un traitement de fibres a été testé et comparés à la fibre non traitée. Les fibres de jute sont traitées avec des solutions de NaOH à différentes concentrations (1, 5 et 10%) et durant des périodes d'immersion de 10min à 24h.

- ❖ Fibre non traité.
- ❖ Fibre traité avec la solution NaOH à 1% pendant 10 min.
- ❖ Fibre traité avec la solution NaOH à 5% pendant 4hrs.
- ❖ Fibre traité avec la solution NaOH à 5% pendant 12 hrs.
- ❖ Fibre traité avec la solution NaOH à 5% pendant 24 hrs.
- ❖ Fibre traité avec la solution NaOH à 10% pendant 24 hrs.

Après traitement, les fibres sont rincées à l'eau distillée. Les traces de NaOH sont neutralisées par une solution d'eau distillée à 2% d'acide sulfurique durant 10 min. Par la suite, les fibres sont séchées à l'air libre pendant 24 heures. Après séchages, les fibres sont caractérisées mécaniquement par l'essai de traction.

### Résultats :

Le traitement d'alcalisation influence les propriétés thermiques et physiques des fibres naturelles [155].(Tableau3-2 ).

Tableau 3- .2: Contrainte de la fibre de jute après traitement alcalin.

Fibre de jute	La contrainte en MPa
Fibre non traitée	250
NaOH 1% 10min	260
NaOH 5% 4hrs	255
NaOH 5% 12hrs	228
NaOH 5% 24hrs	120
NaOH 10 % 24hrs	Destruction totale

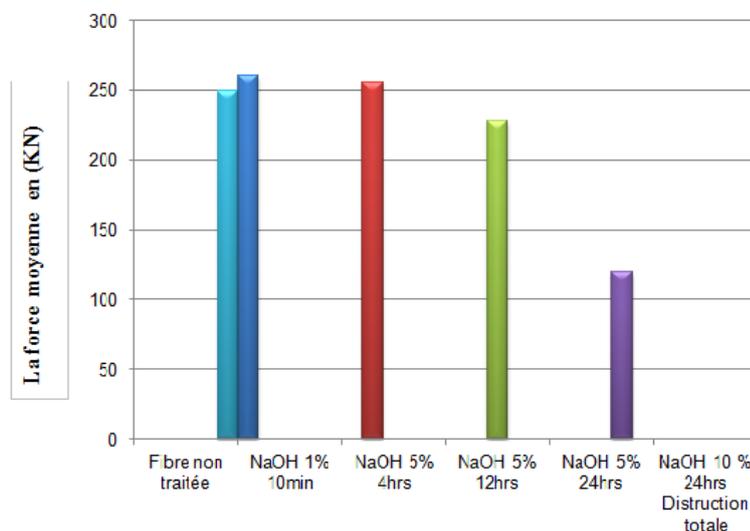


Figure.3.1 : Essai de traction sur des fibres de jute traitées avec différentes solutions de soude.

Les résultats obtenus lors de traction des fibres de jute traitées avec différentes concentration de soude et à des durée de temps différentes (de 10 min à 24 heures) montrent que :

- Pour le cas, ou la fibre est traitée avec la solution NaOH à 1% pendant 10 minutes. les résultats montrent une augmentation de la force de traction de 1.04% par rapport à la force de traction de la fibre non traitée , et une augmentation de 1.02% pour la fibre traité avec la solution NaOH à 5% pendant 4heurs.
- On remarque une diminution de la force de traction de 0.91% pour le cas, ou la fibre est traitée avec la solution NaOH à 5% pendant 12 heures et une diminution de 0.48% dans le cas de la fibre traité avec la solution NaOH à 5% pendant 24 hrs.
- Une destruction totale des fibres traitées avec la solution NaOH à 10% pendant 24 heures.

Ces résultats montrent que le traitement des fibres de jute par une solution de (NaOH 1 et 5%, 4 heures) améliore la résistance de la fibre. Ces résultats sont conformes aux résultats trouvés par Loan et al [156] qui ont étudié la modification de surface des fibres de jute. Et que le traitement des fibres de jute par la même solution de NaOH à une concentration supérieure à 5% diminue les propriétés mécaniques est causé par le traitement alcalin, qui supprime l'hémicellulose et la lignine qui explique que, la région interfibrillaire est moins dense et moins rigide, ce qui permet aux fibrilles de se réorganiser dans le sens de la traction. Est Lorsque les fibres sont étirées, de tels arrangements entre les fibrilles se traduirait par un meilleur partage de la charge.

La diminution de la densité lorsque le traitement se fait avec des concentrations de soude supérieures à 5% serait due à la disparition progressive des autres matières sensibles aux alcalins, conduisant à la formation de microvides. Ces derniers ne peuvent plus être compensés par la réorientation et la recristallisation de la cellulose provoquées par le changement de structure

### 3.4 Etude du comportement mécanique du renfort.

Avant l'élaboration des stratifiés nous avons procédé à la caractérisation des fibres de renfort utilisé qui est le jute. Cette caractérisation consiste à des essais de traction réalisés au niveau de l'Unité de Recherche Matériaux, Procédés et Environnement (URMPE) de l'Université de Boumerdes, ainsi que la mesure des poids et des densités en chaîne et en trame effectuées au niveau du laboratoire textiles de (CNTC) de Boumerdes. Les résultats sont donnés dans le tableau 3.3 suivant :

**Tableau 3.3 : Propriétés physiques de jute.**

<i>Echantillons</i>	<i>Poids au m<sup>2</sup> (g/m<sup>2</sup>)</i>	<i>Densité en chaîne (fil/10cm)</i>	<i>Densité en trame (fil/10cm)</i>
Jute	418	60	60

#### 3.4-1. Essais de traction du fil de jute :

L'essai de traction de la fibre de jute est effectué selon la norme ISO 5079:1995 sur une machine universelle de type Zwick 10 kN piloté par ordinateur (logiciel testXpert V 9.0) avec une vitesse d'essai de 2 mm/min (2).

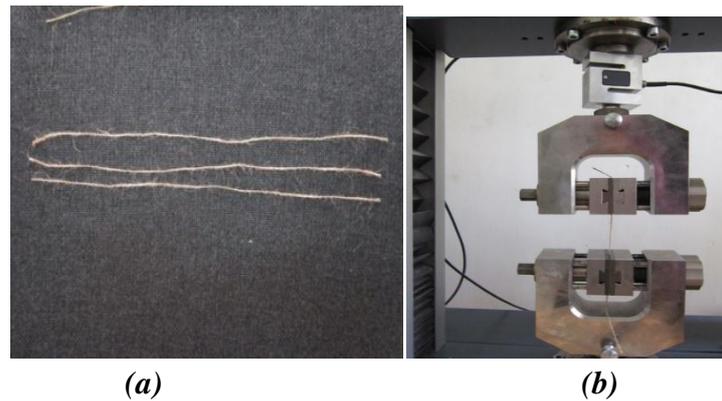


Fig.3.2 : Essai de traction de la fibre de jute  
(a);fibre de jute, (b) fibre de jute lors de l'essai.

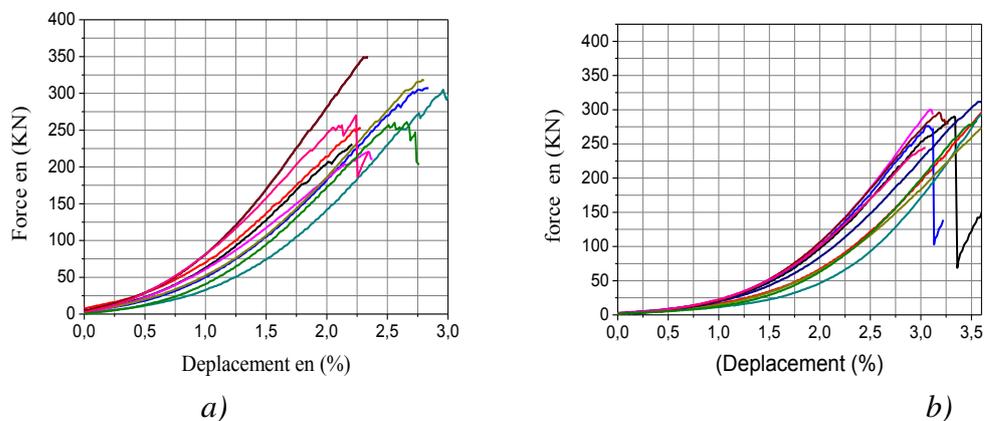


Fig. 3.3 a) Courbes de traction sens chaîne,  
b) Courbes de traction sens trame

### 3.4-2- Caractérisation du tissu de jute

Le tissu de jute présente une forme architecturale bi-axiale. Cette forme assure une perméabilité qui joue un rôle important pour faciliter l'écoulement de la résine à travers le renfort. Deux type de jute sont utilisé (jute neuf et jute utilisé).

#### 3.4-2.1 Essais de traction

L'essai de traction permet, à lui seul, de définir les caractéristiques mécaniques courantes des matériaux. Les résultats issus de cet essai, permettent de prévoir le comportement d'une pièce sollicitée en Traction, Cisaillement / Flexion et Compression. [157]

##### 3.4.2.1 Essais de traction sur différents types de jute

Dans cette partie préliminaire et relative aux choix à faire du renfort naturel utilisé ultérieurement dans l'élaboration des stratifiés, nous avons effectué plusieurs essais de traction (plus de 200 essais) sur le jute afin de définir ses caractéristiques mécaniques à la traction et d'en faire le choix adéquat.

##### 3.4.2.2. Techniques expérimentales

###### 1. Fabrication des éprouvettes

Dans la pratique, les essais de traction sont effectués en utilisant soit des éprouvettes en forme d'haltères, soit des éprouvettes droites avec des talons. (Berthelot, 1992).

Les éprouvettes utilisées ont des dimensions conformes à la norme AFNOR NF T 57-105 équivalent à la norme ASTM D 790-84a.(figure 5). Ces normes prévoient une longueur totale de l'éprouvette égale à 20 fois l'épaisseur h, une distance entre appuis de 16xh et une largeur b de 15 mm.

Les dimensions moyennes des éprouvettes sont données dans le tableau 3.2.

**Tableau 3-4 : dimensions des éprouvettes en (mm).**

Longueur totale L	Longueur entre mâchoires l	Epaisseur r h	Largeur r b
150	100	0.92 - 1	15

La figure 3.4, montre la géométrie des éprouvettes utilisées.



Figure 3.4. : Epreuves de traction de renfort en jute tissé.

## 2. . Dispositif d'essai

L'essai de traction a été effectué sur une machine universelle de type Zwick 250 KN de capacité, équipée par logiciel Test-Xpert permettant d'obtenir le graphe (F- ε) automatiquement (fig.3.2).

Les échantillons à tester sont maintenus entre deux mâchoires. La mâchoire supérieure est liée à la traverse supérieure mobile et l'autre mâchoire est liée à la traverse inférieure fixe (fig.3.3). La vitesse de déplacement de la traverse est injectée directement au programme d'essai, elle est choisie selon la norme NF T 57-105.dans notre cas elle est constante et égale à 2 mm/min.

**Tableau 3.5 : Dimensions des éprouvettes en (mm).**

Longueur totale L	Longueur entre mâchoires l	Epaisseur h	Largeur b
250	150	0.87-0.97	50



Figure 3.5 – Machine universelle de traction **ZWICK 250/SN5A**

La contrainte à la rupture en traction est donnée par la formule (1) suivante :

$$\sigma_{\text{rup}} = F/S \dots\dots\dots (1)$$

F et S sont respectivement la force appliquée à l'éprouvette au moment de la rupture et la section de l'éprouvette.

Le module d'élasticité est déterminé à partir de la loi de Hooke, cette dernière est exprimée par la relation (2) suivante :

$$\sigma_{\text{rup}} = E \cdot \varepsilon \dots\dots\dots (2)$$

- Ou:  $\varepsilon$  : la déformation,
- $\varepsilon = \Delta l/l_0$
- $\Delta l$  : le déplacement,
- $l_0$  : la longueur initiale.

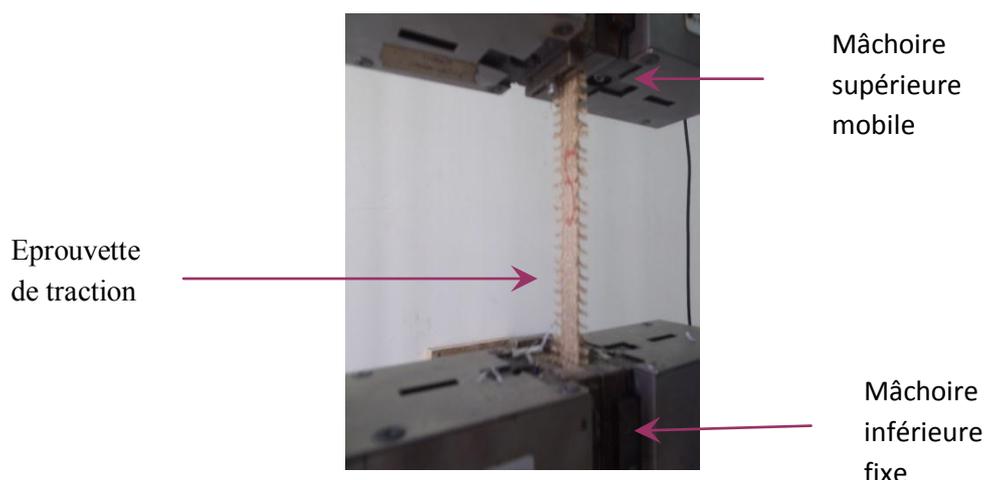


Figure 3.6 : Position de l'éprouvette entre les deux mâchoires.

Nous présentons ci-dessous des échantillons de jute unifilaires et tissés pour considérer la diversité de ce renfort naturel et ainsi mettre en relief la fluctuation de son comportement mécanique en fonction de ses caractéristiques physiques.

Le jute unifilaire se présente sous deux formes distinctes (Fig3.7) à savoir filé ou tressé (a), quant à sa forme tissée, peut être soit à mailles serrées (b) ou à grosses mailles (c).

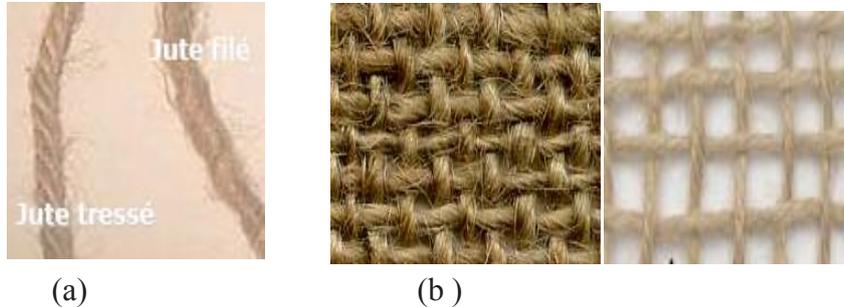


Figure 3.7 : (a) Jute filé, tressé, (b) mailles serrées, (c) grosses mailles.

La matière du jute étant naturelle, sensible à l’humidité, tissée artisanalement, nous considérons les essais de traction des séries d’éprouvettes à sec, humide à l’eau, ensimée à l’huile de lin.

Le dimensionnement des échantillons répond à la norme AFNOR NF T 57-105 équivalente à la norme ASTM D 790-84 a, ces normes prévoient une longueur totale de l’éprouvette de 20 fois l’épaisseur h (h = 3 mm) , une largeur b de 15 mm .

**3. 5 Résultats des essais de traction :**

Nous considérons les types de jute tissé les plus répandus à l’état neuf et utilisé, ensimés et non ensimés. Les échantillons de jute grosses mailles seront désignés de JT1 à JT 8. Tandis que les JT9 à JT16 désignent les échantillons de jute à mailles fines.

Les tableaux 3.6 et 3.15, ci-après, présentent respectivement les échantillons à grosses mailles et à mailles fines objet des essais de traction.

Chaque échantillons subi cinq essais de traction, pour le quel une feuille de relevés est établi, indiquant un tableau des valeurs trouvées, des courbes de traction fournies par le dispositif d’essai (machine- logiciel), ainsi qu’un bref commentaire sur la lecture des données établies.

Remarque : les échantillons qui sont soumis à l’eau ont subi un pourrissement.

**Tableau 3.6 : Jute tissé à grosse maille**

<b>GROSSES MAILLES</b>	UTILISE	0°	Non Ensimé	JT 1
			Ensimé	JT 2
		90°	Non ensimé	JT 3
			Ensimé	JT 4
		0°	Non ensimé	JT 5

	Neuf		Ensimé	JT 6
		90°	Non ensimé	JT 7
			Ensimé	JT 8

(a) - Essai de traction Jute 1(JT 1) :

Dans ce premier cas, nous considérons une série de cinq essais de traction sur la machine universelle Zwick 250 KN équipée d'un capteur de 2.5 KN (fig.4.2). Ces essais sont effectués sur un jute utilisé, non ensimé et suivant la direction zéro degré. (Fig. 4.5).

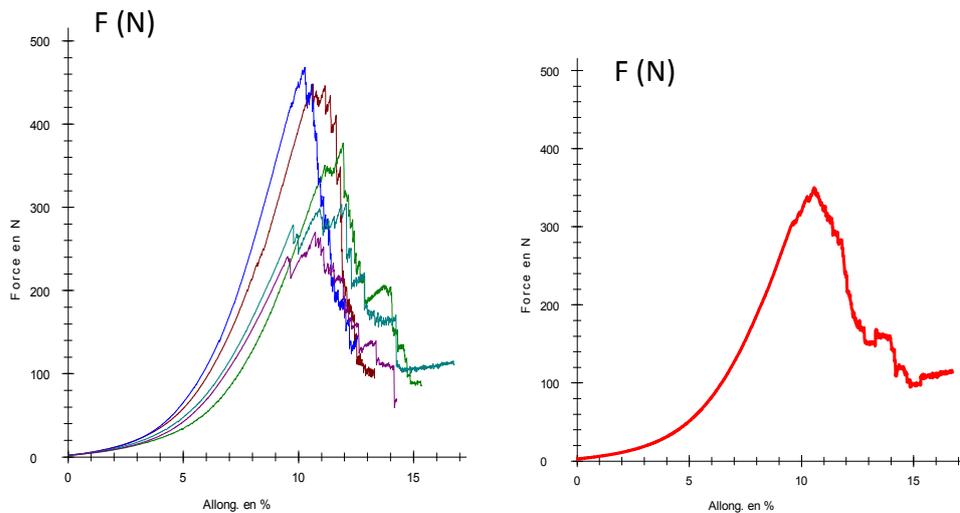


Fig. 3.8 : Essais de traction du jute utilisé non ensimé grosse maille à 0° (a)

Tableau 3.7 : Jute utilisé non ensimé grosse maille à 0° (a)

	a0	b0	L0	F <sub>max</sub>	F <sub>Rupt.</sub>	□-Rupt-	□-F <sub>max</sub>	E
Nr	mm	mm	mm	N	N	%	%	KN/m <sup>2</sup>
1	1	15	101,37	448,28	94,49	13,32	10,64	28,08
2	1	15	101,92	377,48	85,11	15,33	11,94	21,07
3	1	15	101,94	<b>468,67</b>	<b>146,88</b>	<b>12,59</b>	<b>10,28</b>	<b>30,39</b>
4	1	15	101,17	304,49	110,19	16,75	12,08	17,04
5	1	15	101,80	270,00	70,861	14,27		
<b>Moy</b>				<b>373.78</b>	<b>101.51</b>	<b>14.45</b>		

Note : 1 KN/mm<sup>2</sup>= 1 GPa

Les courbes obtenues montrent une variation importante de la force en Newtons et une faible variation dans l'allongement, avec une var

[Tapez une citation prise dans le document ou la synthèse d'un passage intéressant. Vous pouvez placer la zone de texte n'importe où dans le document. Utilisez l'onglet Outils de zone de texte pour modifier la mise en forme de la zone de texte de la citation.]

E de 16 à 28 GPa. Ceci est dû à la variation du diamètre de fils de jute tissé. Nous avons présenté dans la figure (4.5.b) la courbe moyenne représentant les cinq essais.

**(b) -Essai de traction Jute JT 2 :**

Dans le deuxième cas, nous considérons toujours une série de cinq essais de traction sur la même machine (fig. 4.2), les essais sont effectués maintenant sur un jute utilisé, ensimé à l'huile de lin pendant deux jours et toujours suivant la direction zéro degré. (F

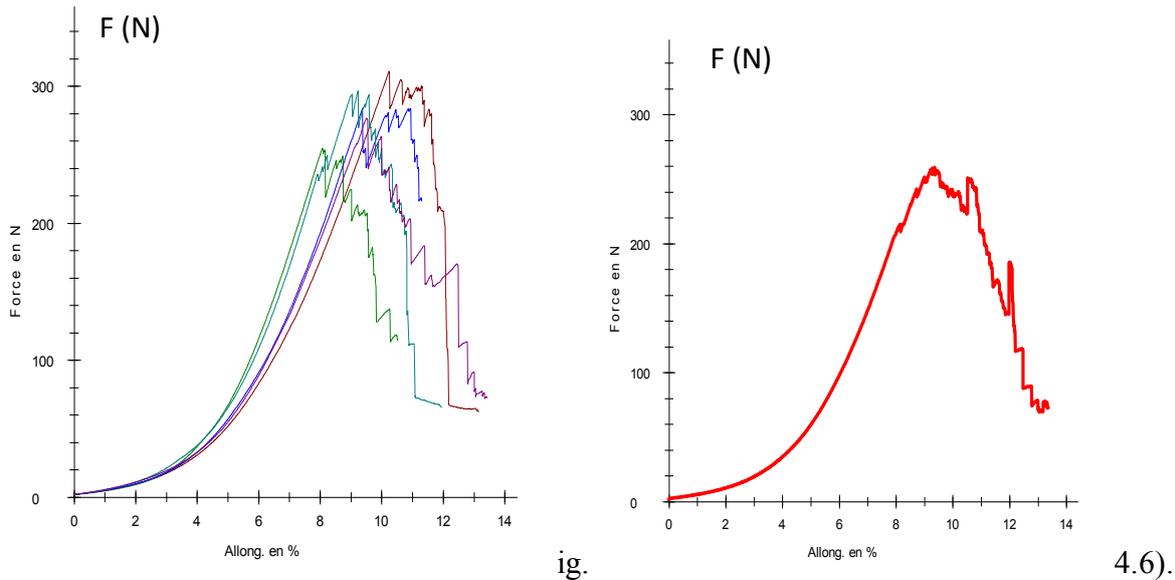


Figure 3.9 Essais de traction du jute utilisé ensimé grosse maille à 0° (a).

Tableau 3.8 : Jute utilisé ensimé grosse maille à 0° (a).

	a0	b0	L0	F <sub>max</sub>	F <sub>Rupt.</sub>	□-Rupt.	□-F <sub>max</sub>	E
Nr	Mm	mm	mm	H	N	%	%	KN/mm <sup>2</sup>
1	1	15	101,47	<b>310,95</b>	<b>62,13</b>	<b>13,14</b>	<b>10,24</b>	<b>20,24</b>
2	1	15	101,51	254,71	115,62	10,52	8,08	16,09
3	1	15	101,66	283,91	216,08	11,29	9,37	20,19
4	1	15	101,12	296,53	65,61	11,94	9,23	21,37
5	1	15	101,14	276,85	72,30	13,42	9,51	19,34
<b>Moy</b>				<b>284.40</b>	<b>106.35</b>	<b>12.06</b>	<b>9.29</b>	<b>20,40</b>

Les courbes obtenues montrent une faible variation de la force F allant de 254 à 310 Newtons et une variation conséquente dans l'allongement avec une variation de module d'élasticité E de 16 à 21 GPa. Nous avons présenté dans la figure (fig. 4.6.b) la courbe moyenne représentant les cinq essais.

**(c) Essai de traction Jute (JT 3) :**

Dans ce troisième cas, nous considérons toujours une série de cinq essais de traction sur la même machine (fig.4.2), les essais sont effectués maintenant sur un jute à grosse maille, utilisé, non ensimé mais cette fois-ci suivant la direction 90 degrés. (fig.4.7)

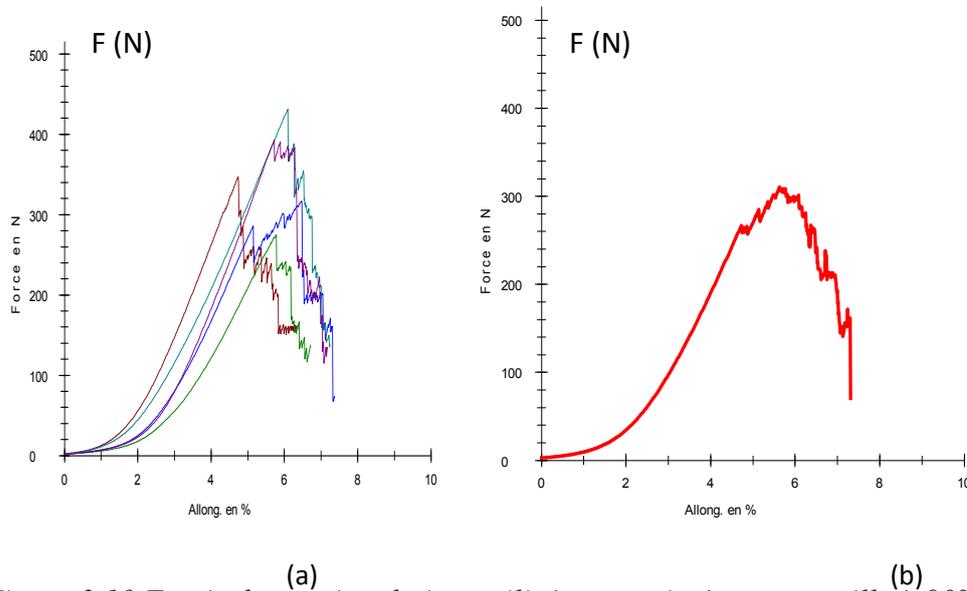


Figure 3.10 Essais de traction du jute utilisé non ensimé grosse maille à 90° (a).

Tableau 3.9 : Jute utilisé non ensimé grosse maille à 90° (a).

	a0	b0	L0	F <sub>max</sub>	F <sub>Rupt.</sub>	□-Rupt.	□-F <sub>max</sub>	E
N°	mm	mm	mm	N	N	%	%	KN/mm <sup>2</sup>
1	1	15	101,02	347,01	157,44	6,37	4,74	48,80
2	1	15	102,04	275,06	137,94	6,71	5,77	31,78
3	1	15	101,41	316,94	71,63	7,37	6,47	32,56
4	1	15	101,20	<b>431,26</b>	<b>138,80</b>	<b>7,24</b>	<b>6,09</b>	47,18
5	1	15	101,53	393,16	135,51	7,17	5,72	45,82
<b>Moy</b>				<b>352.69</b>	<b>128.26</b>	<b>6.97</b>	<b>5.76</b>	<b>40,82</b>

Les courbes obtenues montrent une variation importante de la force F allant de 275 à 431 Newtons avec une variation de module d'élasticité E de 31 à 47 GPa et une variation conséquente dans l'allongement. Nous avons présenté dans la figure (4.7.b) la courbe moyenne représentant les cinq essais.

**(d) Essai de traction Jute (JT 4) :**

Dans ce quatrième cas, nous considérons toujours une série de cinq essais de traction sur la même machine (fig.4.2), les essais sont effectués sur un jute à grosse maille, utilisé, ensimé à l'huile de lin pendant deux jours et suivant la direction 90 degrés.(fig. 4.8)

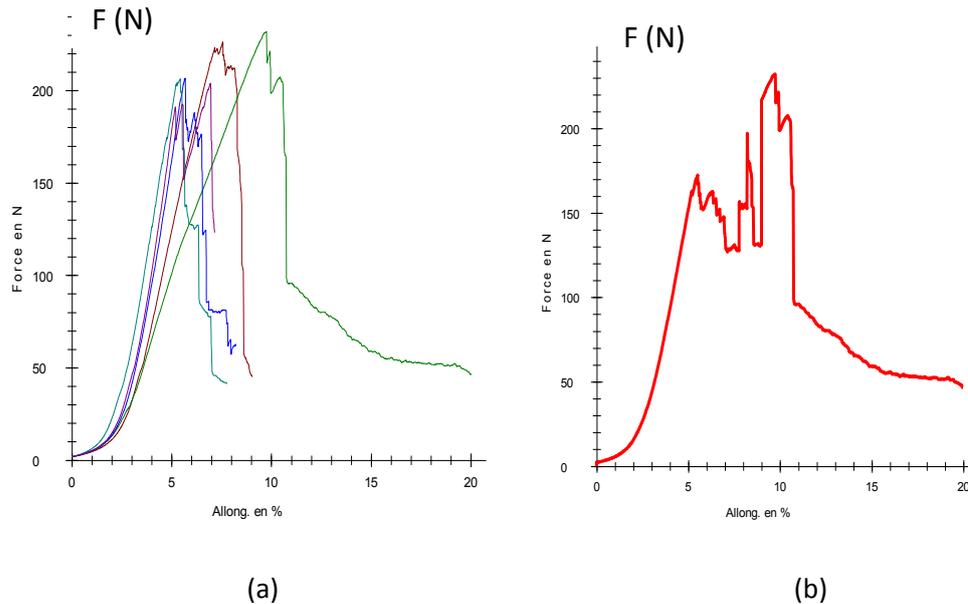


Figure 3.11 Essais de traction du jute utilisé ensimé grosse maille à 90° (b).  
**Tableau 3.10 : jute utilisé ensimé grosse maille à 90°.**

	a0	b0	L0	F <sub>max</sub>	F <sub>Rupt.</sub>	□- Rupt.	□-F <sub>max</sub>	E
Nr	Mm	mm	mm	H	H	%	%	KN/mm <sup>2</sup>
1	1	15	101,78	226,41	45,28	9,04	7,55	19,99
2	1	15	101,52	<b>232,11</b>	<b>46,42</b>	<b>20,01</b>	<b>9,73</b>	<b>15,97</b>
3	1	15	101,81	206,76	61,88	8,21	5,65	24,39
4	1	15	101,89	206,55	41,32	7,77	5,42	25,40
5	1	15	101,78	204,13	123,2 7	7,15	6,94	19,60
<b>Moy</b>	<b>1</b>	<b>15</b>	<b>101,78</b>	<b>215.19</b>	<b>63.63</b>	<b>10.44</b>	<b>7.06</b>	<b>20,32</b>

Les courbes obtenues montrent une valeur supérieure faible avec une variation de la force F allant de 204 à 232 Newtons et une variation importante dans l’allongement avec une variation de module d’élasticité E de 15 à 25 GPa. Nous avons présenté dans la figure (4. 8. b) la courbe moyenne représentant les cinq essais.

**(e) Essai de traction Jute (JT 5) :**

Dans le cinquième cas, nous considérons une série de cinq essais de traction sur la même machine (fig.4.2), les essais sont effectués sur un jute à grosse maille, neuf, non ensimé et suivant la direction 0 degrés.(fig. 4.9).

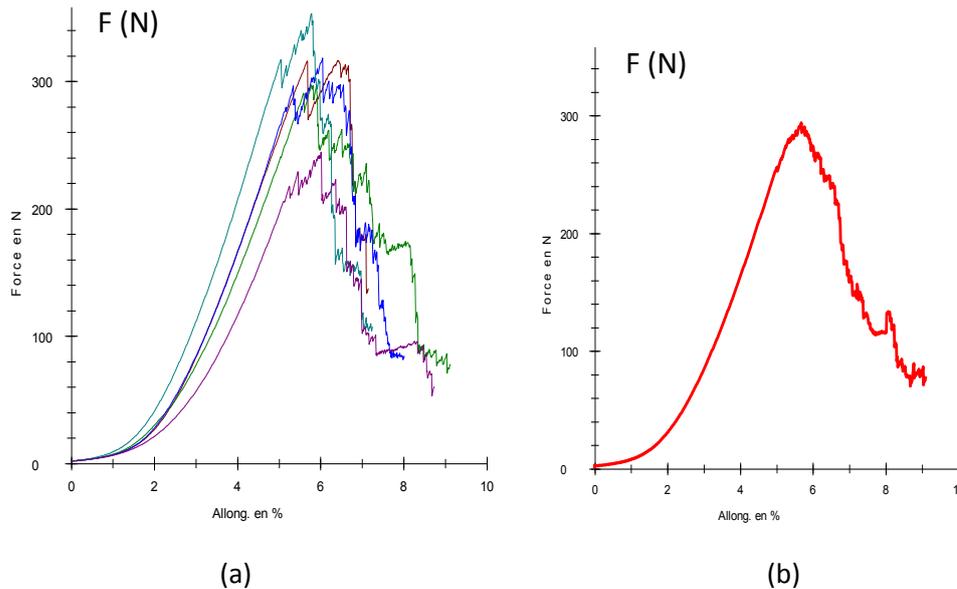


Figure 3.12 Essais de traction du jute neuf non ensimé grosse maille à 0° (b).

Tableau 3.11 : Jute neuf non ensimé grosse maille à 0°.

	a0	b0	L0	F <sub>max</sub>	F <sub>Rupt.</sub>	□- Rupt.	□-F <sub>max</sub>	E
Nr	Mm	mm	mm	H <sub>F</sub> (N)	N	%	%	KN/m <sup>2</sup>
1	1	15	101,96	316,54	137,71	7,14	6,42	32,87
2	1	15	102,83	297,33	78,04	9,12	5,90	33,59
3	1	15	101,45	318,59	84,76	8,02	6,04	35,16
4	1	15	101,88	<b>353,42</b>	<b>107,48</b>	<b>7,25</b>	<b>5,78</b>	<b>40,76</b>
5	1	15	102,50	244,50	60,66	8,73	6,01	27,12
<b>Moy</b>				<b>306.07</b>	<b>93.73</b>	<b>8.05</b>	<b>6.03</b>	<b>33,83</b>

Les courbes obtenues montrent une variation de la force F allant de 240 à 350 Newtons avec une variation de module d'élasticité E de 27 à 40 GPa et une variation importante dans l'allongement notamment de 2 à 6 %. Nous avons présenté dans la figure (4.9.b) la courbe moyenne représentant les cinq essais.

**(f) Essai de traction Jute (JT 6) :**

Dans le sixième cas, nous considérons une série de cinq essais de traction sur la même machine (fig.4.2), les essais sont effectués sur un jute à grosse maille, neuf, ensimé à l'huile de lin pendant deux jours et suivant la direction 0 degrés. (fig.4.10).

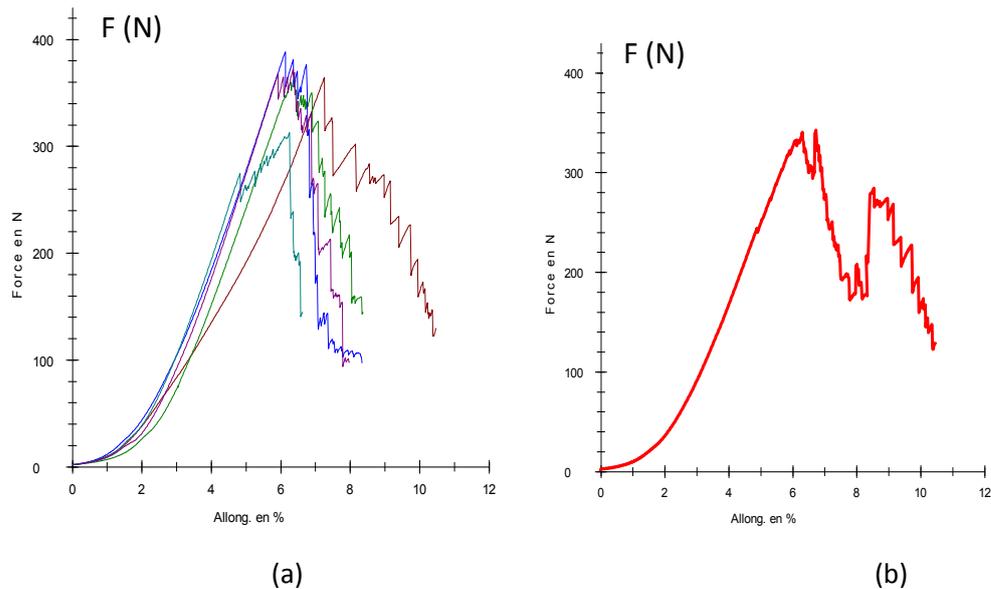


Figure 3.13 Essais de traction du jute neuf ensimé grosse maille à 0° (b).

Tableau 3.12 : jute neuf ensimé grosse maille à 0°.

	a0	b0	L0	F <sub>max</sub>	F <sub>Rupt.</sub>	□- Rupt.	□-F max	E
Nr	Mm	mm	mm	N	N	%	%	KN/m <sup>2</sup>
1	1	15	101,14	364,56	129,80	10,48	7,26	33,47
2	1	15	101,43	364,75	143,96	8,37	6,39	38,05
3	1	15	101,17	<b>388,36</b>	<b>96,89</b>	<b>8,33</b>	<b>6,13</b>	<b>42,23</b>
4	1	15	101,32	312,85	144,88	6,63	6,25	33,37
5	1	15	101,27	371,89	98,26	7,97	6,35	39,04
<b>Moy</b>				<b>366.42</b>	<b>122.75</b>	<b>8.36</b>	<b>6.48</b>	<b>37,69</b>

Les courbes obtenues montrent une variation de la force F allant de 312 à 388 Newtons et une variation importante dans l’allongement notamment de 2 à 6 %, avec une variation de module d’élasticité E de 33 à 42 GPa,. Nous avons présenté dans la figure (4.10. b) la courbe moyenne représentant les cinq essais.

**(g) Essai de traction Jute (JT7) :**

Dans le septième cas, nous considérons une série de cinq essais de traction sur la même machine (fig.4.2), les essais sont effectués sur un jute à grosse maille, neuf, non ensimé et suivant la direction 90 degrés. (fig.4.11).

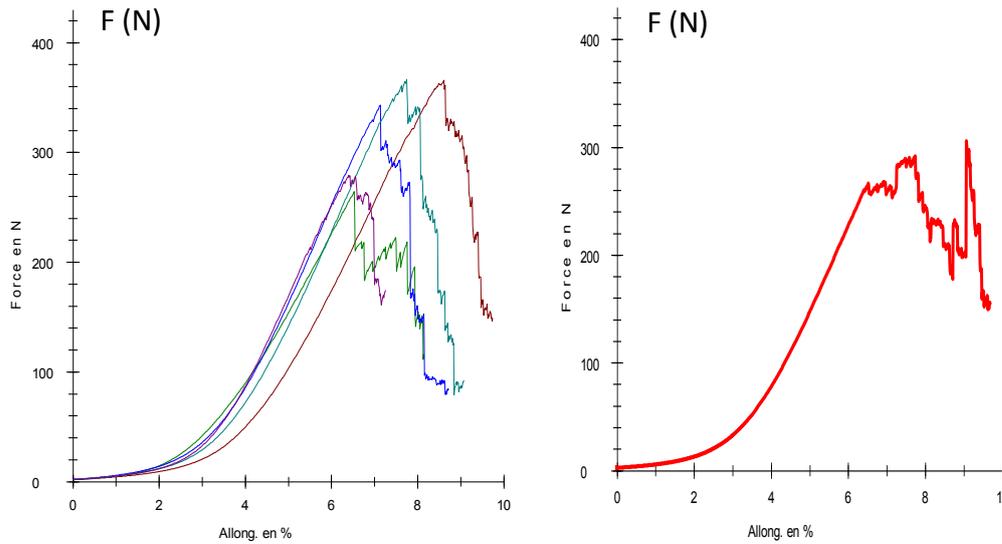


Figure 3.14 : Essais de traction du jute neuf non ensimé grosse maille à 90° (a) (b).

Tableau 3.13 : jute neuf non ensimé grosse maille à 90°.

	a0	b0	L0	F <sub>max</sub>	F <sub>Rupt.</sub>	□-Rupt.	□-F <sub>max</sub>	E
Nr	mm	mm	mm	H	N	%	%	KN/m <sup>2</sup>
1	1	15	102,61	365,66	148,89	9,74	8,61	28,31
2	1	15	102,88	264,61	116,24	8,14	6,53	27,01
3	1	15	101,64	343,08	83,58	8,71	7,13	32,00
4	1	15	102,55	<b>366,44</b>	<b>92,69</b>	<b>9,07</b>	<b>7,75</b>	<b>31,52</b>
5	1	15	102,29	279,09	174,77	7,25	6,40	29,07
<b>Moy</b>				<b>323.78</b>	<b>123.23</b>	<b>8.58</b>	<b>7.28</b>	<b>29,65</b>

Les courbes obtenues montrent une variation de la force F allant de 264 à 366 Newtons avec une variation de module d'élasticité E de 27 à 32 GPa et une variation importante dans l'allongement. Nous avons présenté dans la figure (4.11. b) la courbe moyenne représentant les cinq essais.

**(h) Essai de traction Jute (JT8) :**

Dans le huitième cas, nous considérons une série de cinq essais de traction sur la même machine (fig.4.2), les essais sont effectués sur un jute à grosse maille, neuf, ensimé à l'huile de lin pendant deux jours et suivant la direction 90 degrés.(fig.4.12).

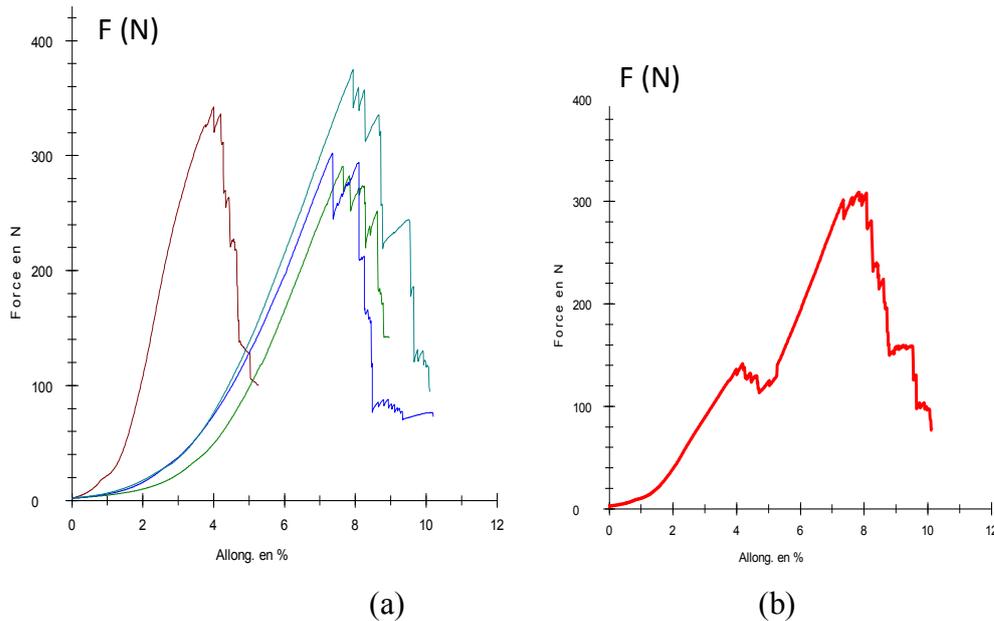


Figure 3.15 Essais de traction du jute neuf ensimé grosse maille à 0° (c).

Tableau 3.14 : jute neuf ensimé grosse maille à 0°.

	a0	b0	L0	F <sub>max</sub>	F <sub>Rupt.</sub>	ε-Rupt.	ε-F <sub>max</sub>	E
Nr	mm	mm	mm	N	N	%	%	KN/mm <sup>2</sup>
1	1	15	101,65	342,25	100,15	5,28	4,00	57,04
2	1	15	102,81	290,54	141,15	8,97	7,64	25,35
3	1	15	102,25	302,30	73,01	10,20	7,36	27,38
4	1	15	101,41	<b>374,80</b>	<b>94,73</b>	<b>10,10</b>	<b>7,93</b>	<b>31,50</b>
<b>Moy</b>				<b>327.47</b>	<b>102.26</b>	<b>8.64</b>	<b>6.73</b>	<b>32,43</b>

Les courbes obtenues montrent une variation de la force F allant de 290 à 360 Newtons et une variation importante dans l’allongement notamment entre la courbe marron et les quatre autres avec une variation de module d’élasticité E de 25 à 57 GPa. Nous avons présenté dans la figure (4.15..b)) la courbe moyenne représentant les cinq essais.

Quant aux échantillons à mailles fines et désignés par JT 9 à JT 16, ils sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.15 : Jute tissé maille fine.

<b>Mailles Fines</b>	Utilise	0°	Non ensime	JT 9
			Ensimé	JT 10
		90°	Non ensimé	JT 11
			Ensimé	JT 12
	Neuf	0°	Non ensimé	JT 13
			Ensimé	JT 14
		90°	Non ensimé	JT 15
			Ensimé	JT 16

**(i) Essai de traction Jute (JT9) :**

Dans ce cas, nous considérons une série de cinq essais de traction sur la même machine, utilisée précédemment, les essais sont effectués sur un jute à maille fine, utilisé non ensimé suivant la direction 0 degrés.

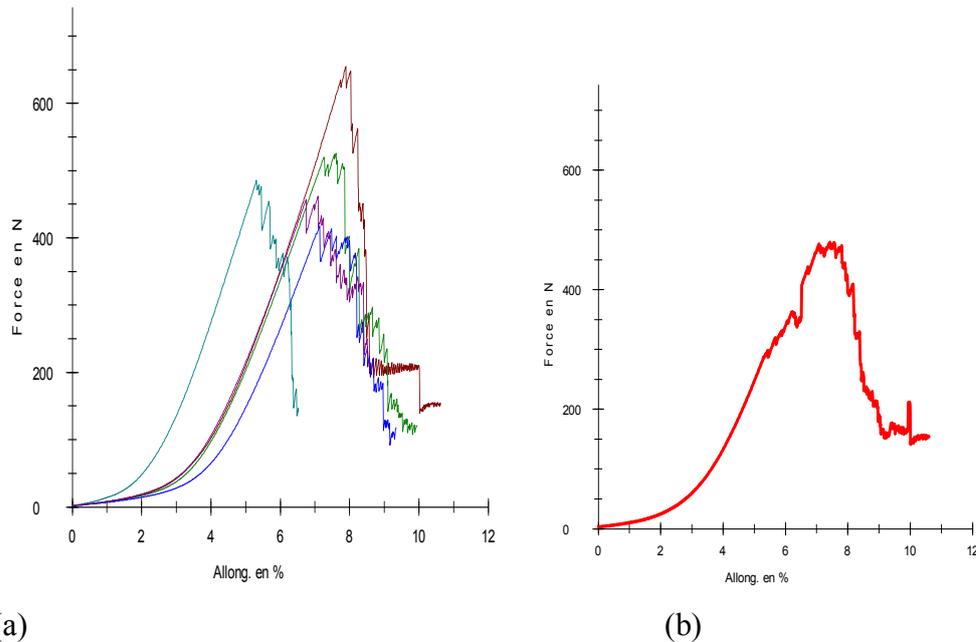


Figure 3.16 Essais de traction du jute utilisée non ensimé maille Fine à 0° (c).

**Tableau 3.16 : jute utilisée non ensimé maille Fine à 0° (c).**

	a0	b0	L0	F <sub>max</sub>	F <sub>Rupt.</sub>	ε-Rupt.	ε-F <sub>max</sub>	E
Nr	Mm	mm	mm	N	N	%	%	KN/m <sup>2</sup>
1	1	15	101,67	<b>654,97</b>	<b>151,56</b>	<b>10,63</b>	<b>7,89</b>	<b>55,34</b>
2	1	15	100,63	525,75	119,47	9,94	7,61	46,05
3	1	15	101,02	417,43	118,48	9,34	7,14	38,97
4	1	15	100,66	485,27	141,07	6,53	5,31	60,92
5	1	15	100,84	462,06	213,14	8,57	7,09	43,44
<b>Moy</b>				<b>509,09</b>	<b>148.74</b>	<b>9.00</b>	<b>7.01</b>	<b>48,41</b>

Les courbes obtenues montrent une variation de la force F allant de 417 à 654 Newtons et une variation importante dans l’allongement avec une variation de module d’élasticité E de 37 à 55 GPa. Nous avons présenté dans la figure (4.13. b) la courbe moyenne représentant les cinq essais.

**(j) Essai de traction Jute (JT10) :**

Dans ce cas, nous considérons une série de cinq essais de traction sur la même machine (fig.4.2), les essais sont effectués sur un jute à maille fine, utilisé,ensimé à l’huile de lin pendant deux jours et suivant la direction 0 degrés. (fig.4.14)

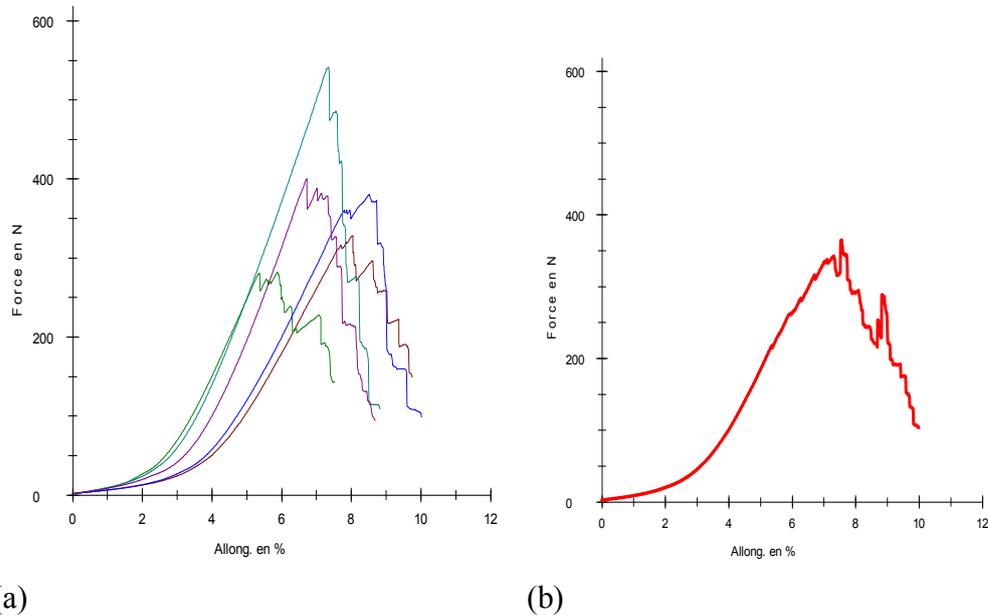


Figure 3.17 Essais de traction du jute utilisée ensimé maille Fine à 0° (c).

Tableau 3.17 : jute utilisée ensimé maille Fine à 0° (c).

Nr	a0 Mm	b0 mm	L0 mm	F <sub>max</sub> N	F <sub>Rupt.</sub> N	ε-Rupt. %	ε-F <sub>max</sub> %	E KN/mm <sup>2</sup>
1	1	15	100,89	328,11	148,83	9,76	8,04	27,20
2	1	15	100,79	282,05	143,14	7,53	5,87	32,03
3	1	15	100,89	379,96	98,43	10,01	8,50	29,80
4	1	15	100,65	<b>541,24</b>	<b>108,25</b>	<b>8,82</b>	<b>7,35</b>	<b>49,09</b>
5	1	15	100,60	400,49	93,95	8,69	6,72	39,73
<b>Moy</b>				<b>386,37</b>	<b>119,52</b>	<b>8,96</b>	<b>7,29</b>	<b>35,33</b>

Les courbes obtenues montrent une variation de la force F allant de 282 à 541 Newtons et une variation importante dans l’allongement avec une variation de module d’élasticité E de 27 à 49 GPa. Nous avons présenté dans la figure (4.14. b) la courbe moyenne représentant les cinq essais.

**(k) Essai de traction Jute (JT11) :**

Dans ce cas, nous considérons une série de cinq essais de traction sur la même machine (fig.4.2), les essais sont effectués sur un jute à maille fine, utilisé, non ensimé et suivant la direction 90 degrés. (fig.4.15).

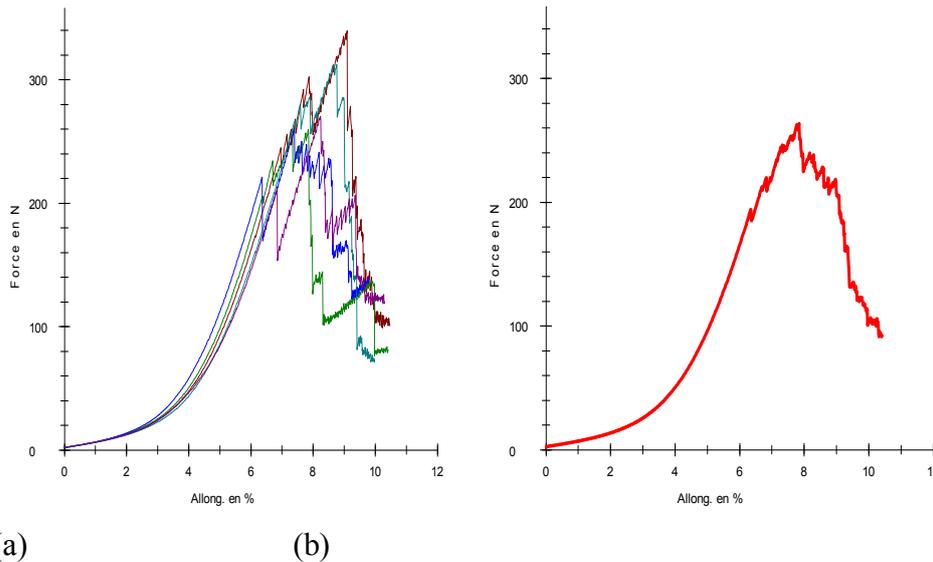


Figure 3.18 Essais de traction du jute utilisée non ensimé maille Fine à 90° (c).

Tableau 3.18 : jute utilisée non ensimé maille Fine à 90° (c).

	a0	b0	L0	F <sub>max</sub>	F <sub>Rupt.</sub>	ε <sup>-Rupt.</sup>	ε <sup>-F<sub>max</sub></sup>	E
Nr	mm	Mm	mm	N	N	%	%	KN/mm <sup>2</sup>
1	1	15	100,71	<b>339,67</b>	<b>100,26</b>	<b>10,47</b>	<b>9,10</b>	<b>24,88</b>
2	1	15	101,05	260,20	81,33	10,42	7,34	23,63
3	1	15	101,22	260,75	140,36	9,81	7,40	23,49
4	1	15	100,65	312,20	72,96	9,98	8,66	24,03
5	1	15	101,08	270,40	120,08	10,31	8,24	21,87
<b>Moy</b>				<b>288.64</b>	<b>102.99</b>	<b>10.19</b>	<b>8.14</b>	<b>23,63</b>

Les courbes obtenues montrent une variation de la force F allant de 417 à 654 Newtons et une variation importante dans l’allongement avec une variation de module d’élasticité E de 21 à 24 GPa. Nous avons présenté dans la figure (4.15. b) la courbe moyenne représentant les cinq essais.

**(I) Essai de traction Jute (JT12) :**

Dans ce cas, nous considérons une série de cinq essais de traction sur la même machine (fig.4.2), les essais sont effectués sur un jute à maille fine, utilisé, ensimé à l’huile de lin et suivant la direction 90 degrés. (fig4.16).

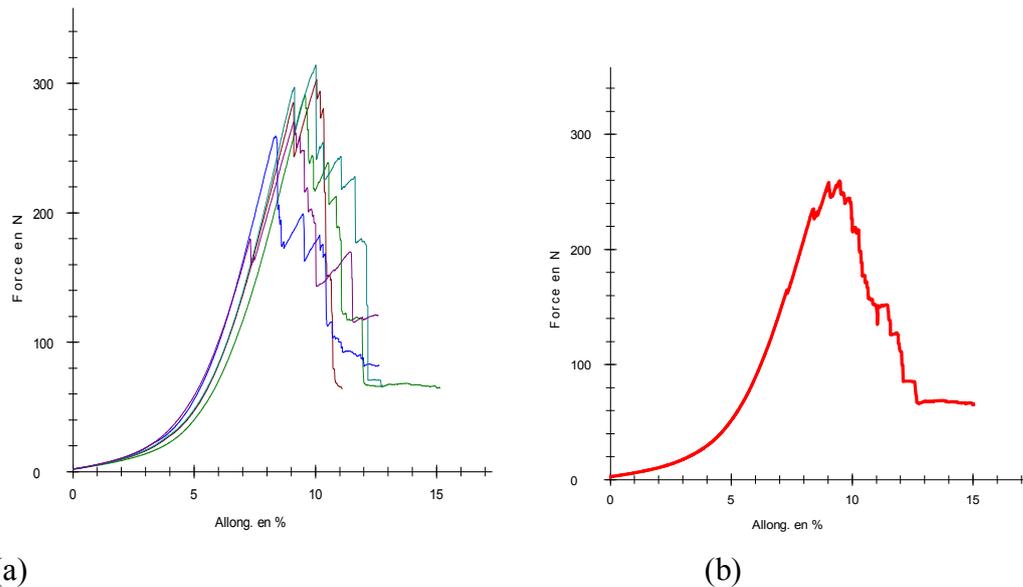


Figure 3.19 Essais de traction du jute utilisée ensimé maille Fine à 90° (c).

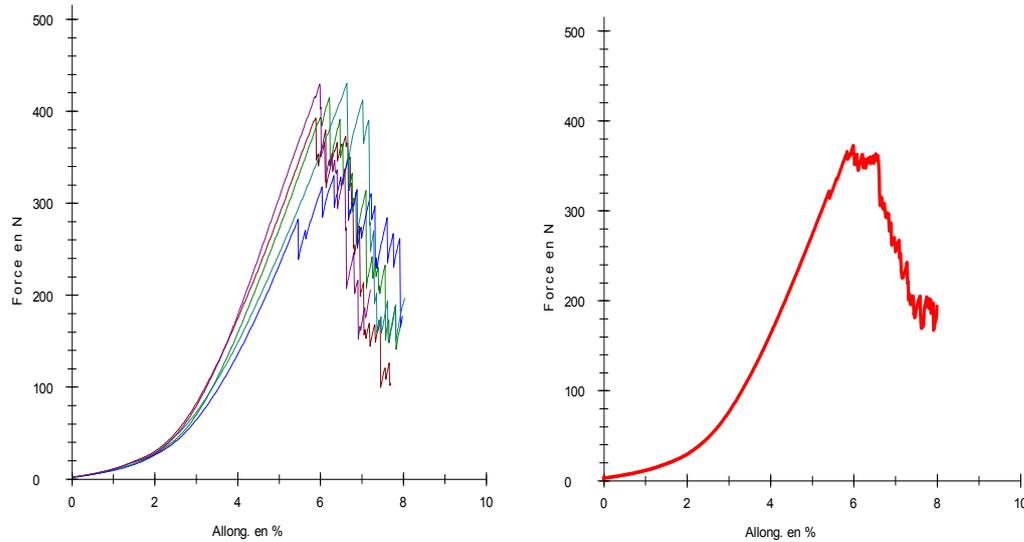
Tableau 3.19: jute utilisée ensimé maille Fine à 90° (c)

	<b>a0</b>	<b>b0</b>	<b>L0</b>	<b>F<sub>max</sub></b>	<b>F<sub>Rupt.</sub></b>	<b>ε -Rupt.</b>	<b>- ε F<sub>max</sub></b>	<b>E</b>
<b>Nr</b>	<b>Mm</b>	<b>Mm</b>	<b>Mm</b>	<b>N</b>	<b>N</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>KN/mm<sup>2</sup></b>
1	1	15	101,32	302,90	63,78	11,11	10,06	20,07
2	1	15	102,16	291,08	64,51	15,15	9,57	20,27
3	1	15	101,47	259,39	81,97	12,64	8,36	20,68
4	1	15	101,32	<b>314,16</b>	<b>66,34</b>	<b>12,79</b>	<b>10,02</b>	<b>20,90</b>
5	1	15	101,32	270,16	120,55	12,60	9,12	19,74
<b>Moy</b>				<b>287.53</b>	<b>79.43</b>	<b>12.85</b>	<b>9.42</b>	<b>20,34</b>

Les courbes obtenues montrent une variation de la force F allant de 259 à 314 Newtons et une variation dans l’allongement de 8 à 10, avec une légère variation du module d’élasticité E de 19.74 à 20.34 GPa. Nous avons présenté dans la figure (4.16. b) la courbe moyenne représentant les cinq essais.

**(m)Essai de traction Jute (JT13) :**

Dans ce cas, nous considérons une série de cinq essais de traction sur la même machine (fig.4.2), les essais sont effectués sur un jute à grosse maille, neuf, non ensimé suivant la direction 0 degrés.



(a)

(b)

Figure 3.20 Essais de traction du jute neuf non ensimé maille Fine à 0° (c).

Tableau 3.20: jute neuf non ensimé maille Fine à 0° (c).

	a0	b0	L0	F <sub>max</sub>	F <sub>Rupt.</sub>	ε -Rupt-	ε -F <sub>max</sub>	E
Nr	Mm	mm	mm	H	N	%	%	KN/mm <sup>2</sup>
1	1	15	100,55	392,78	104,72	7,69	5,88	44,53
2	1	15	100,67	415,41	172,57	7,95	6,21	44,59
3	1	15	102,04	347,32	177,67	7,98	6,66	34,76
4	1	15	100,66	<b>430,48</b>	<b>197,03</b>	<b>8,03</b>	<b>6,64</b>	<b>43,22</b>
5	1	15	100,97	429,62	205,96	7,21	5,98	47,89
<b>Moy</b>				<b>403.12</b>	<b>171.59</b>	<b>7.77</b>	<b>6.27</b>	<b>42,86</b>

Les courbes obtenues montrent une variation de la force F allant de 347 à 430 Newtons et une variation légère dans l’allongement avec une variation de module d’élasticité E de 34 à 47 GPa. Nous avons présenté dans la figure (4.17. b) la courbe moyenne représentant les cinq essais.

**(n) Essai de traction Jute (JT14) :**

Dans ce cas, nous considérons une série de cinq essais de traction sur la même machine (fig.4.2), les essais sont effectués sur un jute à maille fine , neuf, ensimé à l’huile de lin pendant deux jours et suivant la direction 0 degrés.

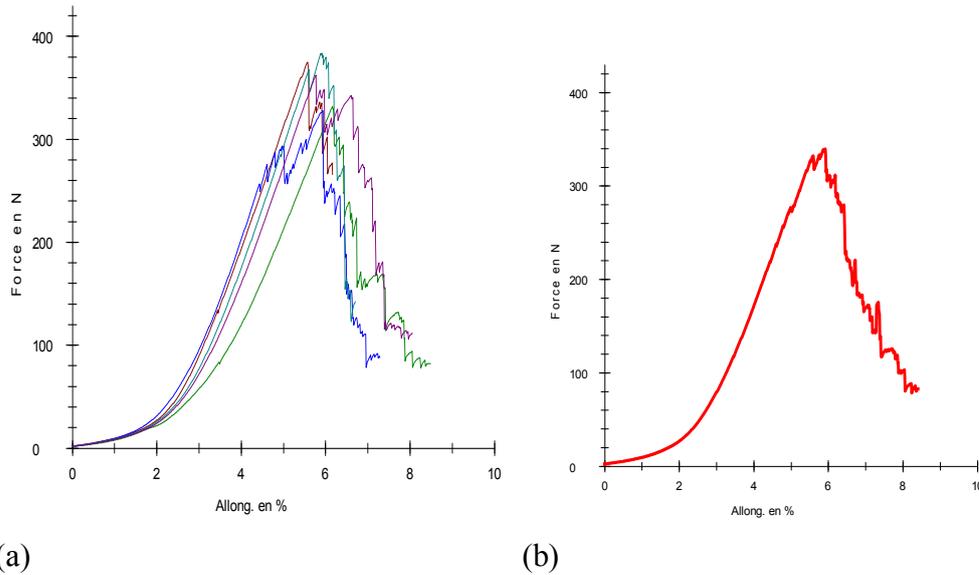


Figure 3.21 Essais de traction du jute neuf ensimé maille Fine à 0° (c).

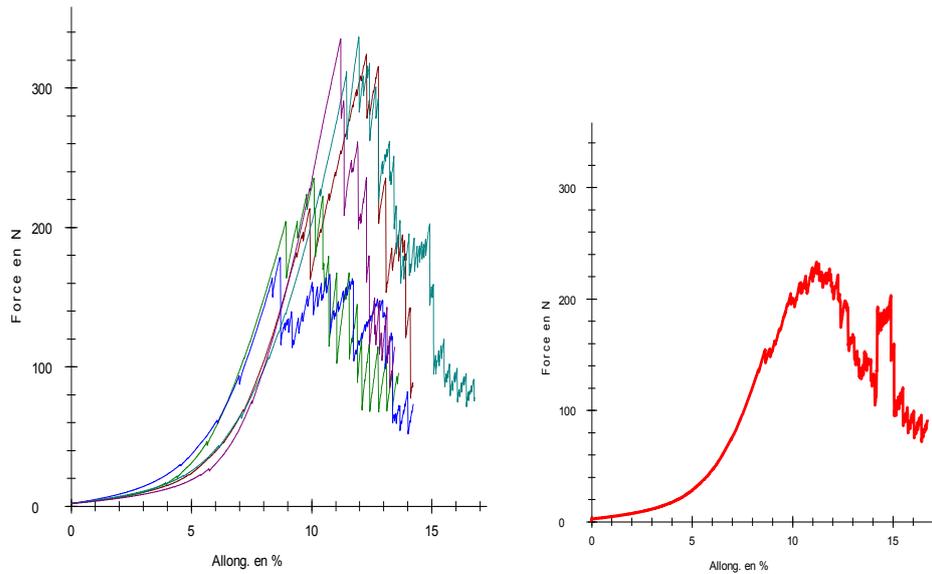
Tableau 3.21: jute neuf ensimé maille Fine à 0° (c).

	a0	b0	L0	F <sub>max</sub>	F <sub>Rupt.</sub>	ε -Rupt.	ε -F <sub>max</sub>	E
Nr	mm	mm	mm	N	N	%	%	KN/mm <sub>2</sub>
1	1	15	101,81	375,04	265,17	6,17	5,57	44,88
2	1	15	101,50	331,59	82,34	8,49	6,17	35,82
3	1	15	102,20	327,84	88,04	7,29	5,92	36,91
4	1	15	101,53	<b>383,75</b>	<b>142,67</b>	<b>6,71</b>	<b>5,91</b>	<b>43,28</b>
5	1	15	103,24	362,28	111,31	8,06	5,77	41,85
<b>Moy</b>				<b>356.10</b>	<b>137.90</b>	<b>7.34</b>	<b>5.86</b>	<b>40,53</b>

Les courbes obtenues montrent une variation de la force F allant de 327 à 383 Newtons et une variation légère dans l’allongement avec une variation de module d’élasticité E de 35 à 44.88 GPa. Nous avons présenté dans la figure (4.18. b) la courbe moyenne représentant les cinq essais.

**(o) Essai de traction Jute (JT15) :**

Dans ce cas, nous considérons une série de cinq essais de traction sur la même machine (fig.4.2), les essais sont effectués sur un jute à maille fine, neuf, non ensimé et suivant la direction 90 degrés.



(a)

(b)

Figure 3.22 : Essais de traction du jute neuf non ensimé maille Fine à 90° (c).

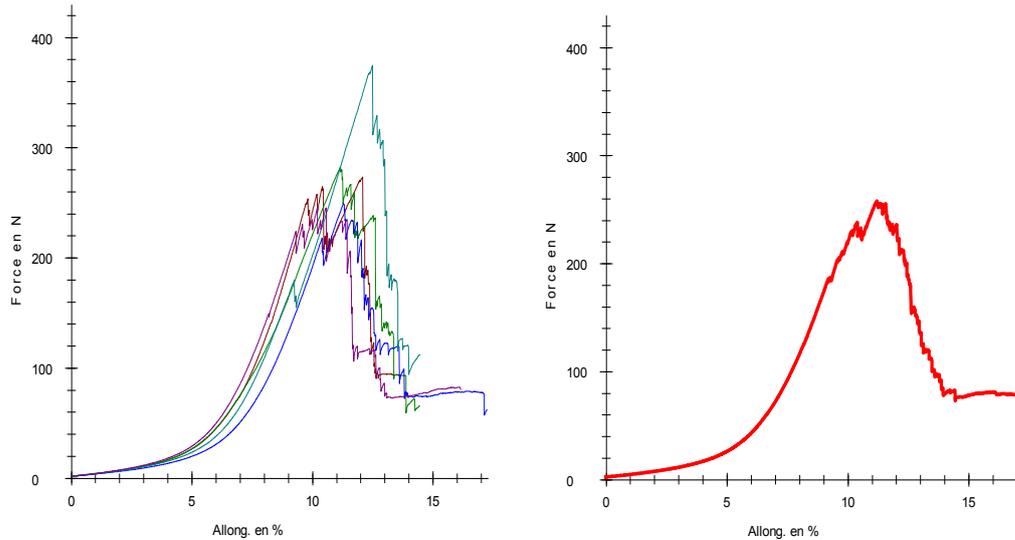
Tableau 3.22 : jute neuf non ensimé maille Fine à 90° (c).

	a0	b0	L0	F <sub>max</sub>	F <sub>Rupt.</sub>	ε <sub>-Rupt.</sub>	ε <sub>-F<sub>max</sub></sub>	E
Nr	mm	mm	Mm	N	N	%	%	KN/mm <sup>2</sup>
1	1	15	101,53	324,30	86,75	14,22	12,28	17,58
2	1	15	101,84	235,31	95,49	13,62	10,09	15,34
3	1	15	101,80	178,47	73,51	14,22	8,67	13,72
4	1	15	101,43	<b>336,63</b>	<b>78,02</b>	<b>16,78</b>	<b>11,96</b>	<b>18,76</b>
5	1	15	101,96	335,39	114,47	13,46	11,21	19,94
<b>Moy</b>				<b>282.02</b>	<b>89.64</b>	<b>14.46</b>	<b>10.44</b>	<b>18,00</b>

Les courbes obtenues montrent une variation de la force F allant de 178 à 336 Newtons et une variation importante dans l’allongement avec une variation de module d’élasticité E de 13 à 19 GPa. Nous avons présenté dans la figure (4.19. b) la courbe moyenne représentant les cinq essais.

**(p) Essai de traction Jute (JT16) :**

Dans ce cas, nous considérons une série de cinq essais de traction sur la même machine (fig.4.2), les essais sont effectués sur un jute à maille fine, neuf, ensimé à l’huile de lin pendant deux jours et suivant la direction 90 degrés.



(a)

(b)

Figure 3.23. Essais de traction du jute neuf ensimé maille Fine à 90° (c).

Tableau 3.23: jute neuf ensimé maille Fine à 90° (c).

	a0	b0	L0	F <sub>max</sub>	F <sub>Rupt.</sub>	ε -Rupt-	ε -F <sub>max</sub>	E
Nr	Mm	mm	Mm	N	N	%	%	KN/mm <sup>2</sup>
1	1	15	101,69	273,48	92,44	13,64	12,08	15,09
2	1	15	101,30	282,54	66,05	14,45	11,15	16,89
3	1	15	102,33	249,41	62,47	17,23	11,28	14,74
4	1	15	101,64	<b>374,86</b>	<b>112,32</b>	<b>14,48</b>	<b>12,49</b>	<b>20,00</b>
5	1	15	101,60	245,79	80,36	16,14	10,20	16,06
<b>Moy</b>				<b>285.21</b>	<b>82.72</b>	<b>15.18</b>	<b>11.44</b>	<b>16,62</b>

Les courbes obtenues montrent une variation de la force F allant de 245 à 374 Newtons et une variation importante dans l’allongement avec une variation de module d’élasticité E de 15 à 20 GPa. Nous avons présenté dans la figure (4.20.b) la courbe moyenne représentant les cinq essais.

Tableau 3.24 : Valeurs moyennes de la force maximale, module d’élasticité et de la déformation.

Variante	F Max (N)	E (GPa)	ε %
JT1	373.78	22	11.13
JT2	284.40	20	9.29
JT3	352.69	40	5.76
JT4	215.19	20	7.06
JT5	366.42	37	6.48
JT6	306.07	33	6.03

JT7	327.47	32	6.73
JT8	323.78	29	7.28
JT9	509.09	48	7.01
JT10	386.37	35	7.29
JT11	288.64	23	8.14
JT12	287.53	19	9.42
JT13	403.12	42	6.27
JT14	356.10	40	5.86
JT15	282.02	18	10.44
JT16	285.21	16	11.44

### 3.6 Essai de traction des tissus de jute :

#### 3.6.1 Fabrication des éprouvettes de jute :

Les essais de traction des échantillons fil de jute sont effectués sur une machine universelle Zwick de type Z250/SN5A dotée d'un capteur de force de 2,5 kN. Elle est pilotée par ordinateur (Logiciel TestXpertV12.0).

Les éprouvettes utilisées pour la traction ont des dimensions conformes à la norme AFNOR NF T 57-105 équivalent à la norme ASTM D 790-84a.

Les dimensions moyennes des éprouvettes sont données dans le tableau 3.

**Tableau 3.25 : Dimensions des éprouvettes en (mm).**

Longueur totale L	Longueur entre mâchoires l	Epaisseur h	Largeur b
250	150	0.87-0.97	50

La figure 5 montre la géométrie des éprouvettes utilisées.

#### 3.6.2. Dispositif d'essai

. Ces essais sont effectués sur une machine universelle de type Zwick 10 kN piloté par ordinateur (logiciel testXpert V 9.0) avec une vitesse d'essai de 2 mm/min et équipé d'un capteur de force de 2.5 kN (figure 3).

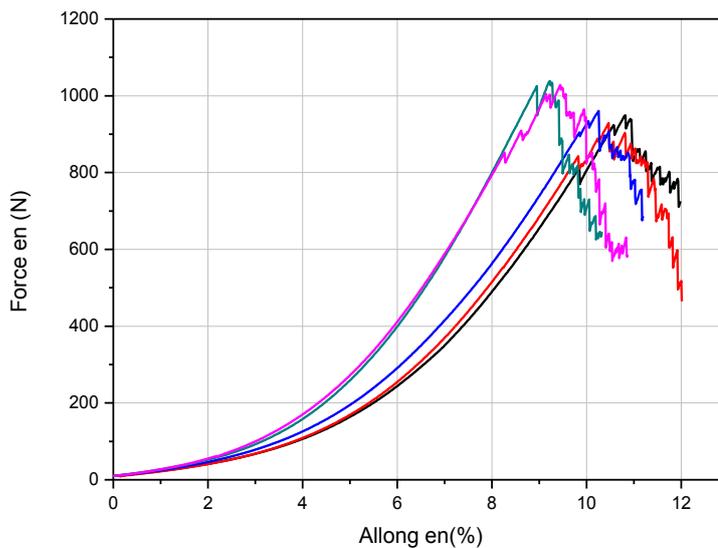


Figure 3.24: Evolution de la force en fonction du déplacement pour la fibre de jute à  $0^\circ$ .

**Tableau 3.26. : Valeurs moyennes de la force maximale, module d'élasticité et de la déformation.**

### 3.7. Interprétation

Variante Jute	F max (N)	E (MPa)	$\epsilon$ (%)
Moy	958.68	32	8.39

Les courbes obtenues montrent une variation force allongement qui se déroule en trois étapes : linéaire puis non linéaire passant par la force maximale suivi d'une légère diminution de la force et enfin la rupture totale et obtenue suite à une chute très rapide de celle-ci.

Les courbes moyennes obtenues montrent une variation force \_allongement qui se déroule en trois étapes : linéaire puis non linéaire passant par la force maximale suivi d'une légère diminution de la force et enfin la rupture totale et obtenue suite à une chute très rapide de celle-ci.

D'après ces valeurs nous remarquons que les résultats donnés par les tissus non ensimés sont meilleures que ceux ensimés pour toutes les variantes. Aussi les résultats donnés par les variantes selon la direction  $0^\circ$  sont meilleurs que ceux donnés par la direction  $90^\circ$ .

Ces différents types de jute sont utilisés pour l'élaboration des stratifiés. Ces derniers sont soumis à des essais de flexion permettant de mettre en évidence leur comportement mécanique.

**3-8 -Propriétés mécaniques de résines utilisées :**

Les résines polyester présentent de bonnes propriétés mécaniques surtout en termes de rigidité (module d'Young). En revanche, leur contrainte et allongement à rupture restent inférieurs à ceux des résines époxyde (Tableau 3). Au niveau macroscopique, les résines de stratification sont considérées comme isotropes. Leur comportement dépend de la température, il passe de l'état vitreux à l'état caoutchouteuse avec une augmentation de température. Ce passage s'effectue dans une certaine plage et une température de transition vitreuse définie (tableau 3.29).

**Tableau 3.29 : propriétés mécanique de la résine polyester et époxy :**

Résine	E [GPa]	$\sigma$ max [MPa]	$\epsilon$ max [%]
<b>POLYESTER</b>	3.0-4.0	40-50	1.5-2.2
<b>EPOXY</b>	2.7-3.1	50-60	2.5-4.0

Les deux types de résines que nous avons utilisées pour la réalisation des stratifiés sont les suivantes :

- ❖ La résine polyester AROPOL S 902-4205.
- ❖ La résine époxyde EPOCAST 50-A1.

**3-8-1-- Caractéristiques des résines polyester**

Les résines therm durcissables de type polyester sont les plus anciennes et les moins chères. Elles sont les plus répandues dans la fabrication de pièces en matériaux composites et rentrent dans la fabrication de 95% des composites therm durcissables renforcés. Lors de leur fabrication, elles sont généralement additionnées de 30% à 40% de solvant pour écarter les chaînes du pré polymère.

La résine polyester polymérise par adjonction de catalyseur dans les proportions suivantes (tableau 3.27):

Tableau 3.27 : caractéristiques de la résine polyester :

Caractéristiques
0.8% minimum – temps de travail moyen.
2% maximum – temps de travail court.
Le pourcentage est adapté en fonction des besoins de chaque pièce.
Précision du mélange : ~1‰
Masse volumique de la résine : ~1.2
Masse volumique du catalyseur : ~1

Les résines polyester contiennent du styrène, solvant dont la composition est proche de celle de l'acétone, responsable de leur forte odeur, ayant pour but de maintenir la résine dans un état semi-liquide

### 3-8- 2- Caractéristiques des résines Epoxy

La résine Epoxy polymérise par adjonction de durcisseur dans des proportions variant en fonction du produit (donc se référer aux indications écrites sur le pot)

**Tableau 3.28 : caractéristiques de la résine Epoxy:**

Caractéristiques
Résine Durcisseur
Densité: 1.11 1.03
Aspect: Violacée Limpide
Viscosité à 20°C: 1100 CP 1200 CP
Dosage poids: 60 40
Dosage volume: 2 /3 1/3

Les résines Epoxy sont chimiquement neutres et ne provoquent aucune réaction indésirable, il est cependant indispensable de porter des gants et si possible un masque respiratoire à cartouche car elles sont très nocives au contact de la peau (hypersensibilité, dermatoses, cancers, ...).

#### La résine (EPOCAST 50-A1) :

C'est un mélange homogène de résine (EPOCAST 50-A1) et de durcisseur (HARDENER 9816), tous deux de marque **HUNTSMAN**. (Fig. II-6, Fig. II-7). Les proportions ont été prises selon des normes imposées par le fabricant, qui exige comme mélange : 100 g de résine pour 15 g de durcisseur.



Figure 3.25. : (a)résine EPOCAST 50-A1, (b)durcisseur (HARDENER 9816)

#### Caractéristiques de la résine type EPOCAST 50-A1 :

EPOCAST 50-A1 est une résine de stratification de manipulation facile. Ce système peut être employé pour la fabrication ou la réparation des structures composites aéronautiques. Le produit est qualifié de BMS 8-201.

D'autres précisions concernant cette résine sont mentionnées dans la fiche technique remise par le fournisseur, voir Tableau 3.30.

**Tableau 3.30 : Caractéristiques des EPOCAST 50-A1/946.**

Densité	g/cm <sup>3</sup>	2
Coefficient de dilatation thermique	10k	35
Résistance en compression	MPa	140
Module d'élasticité en compression	MPa	11000-11500
Résistance en flexion	MPa	110
Retrait linéaire	%	0,05

### 3.9. Analyse thermique (ATD, ATG) :

La calorimétrie différentielle à balayage permet d'observer et de quantifier les phénomènes endothermiques ou exothermiques qui accompagnent un changement d'état physique du matériau tel qu'une évolution structurale (transition vitreuse ou effet du vieillissement physique) ou une réaction chimique (réaction entre une résine époxydique et un durcisseur amine par exemple). En effet, le calorimètre mesure le flux de chaleur à apporter à l'échantillon testé pour le maintenir à la même température qu'un échantillon de référence. Le signal ainsi enregistré est proportionnel à la différence de flux de chaleur (dH/dT) entre l'échantillon testé et la référence.

Les analyses thermiques ATD et ATG sont effectuées au niveau de l'UR- MPE; L'appareil utilisé est un calorimètre de type STANETZSCH (Simultaneous Thermal Analysis) 409. Ce dernier est basé, d'une part, sur la mesure différentielle de l'effet thermique à l'aide de deux piles thermoélectriques et, d'autre part, sur la mesure de la chute de masse sous l'effet de la température. Cette technique fait partie de la norme *NF-EN31357-2* (plastique. Analyse calorimétrique différentielle).

L'analyse est effectuée sur un échantillon de résine polyester réticulé sans subir de traitement thermique, La vitesse d'échauffement lors des essais de l'analyse thermique est de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . la température de chauffe 240 et 180°C.

Pour ces essais, nous avons pris comme référence une capsule vide.

La figure 3.26 représente l'appareil STA 409 constitué de deux cellules identiques (échantillon et référence) scellées dans un bloc hermétique programmé en température et équipé d'une balance pour l'analyse thermogravimétrique. La courbe représentant l'Allure des thermogrammes obtenus en DSC pour résine polyester (après réticulation à température ambiante) est représenté par la figure 3.27.



Fig. 3.26. L'appareil DSC.

Résine polyester :

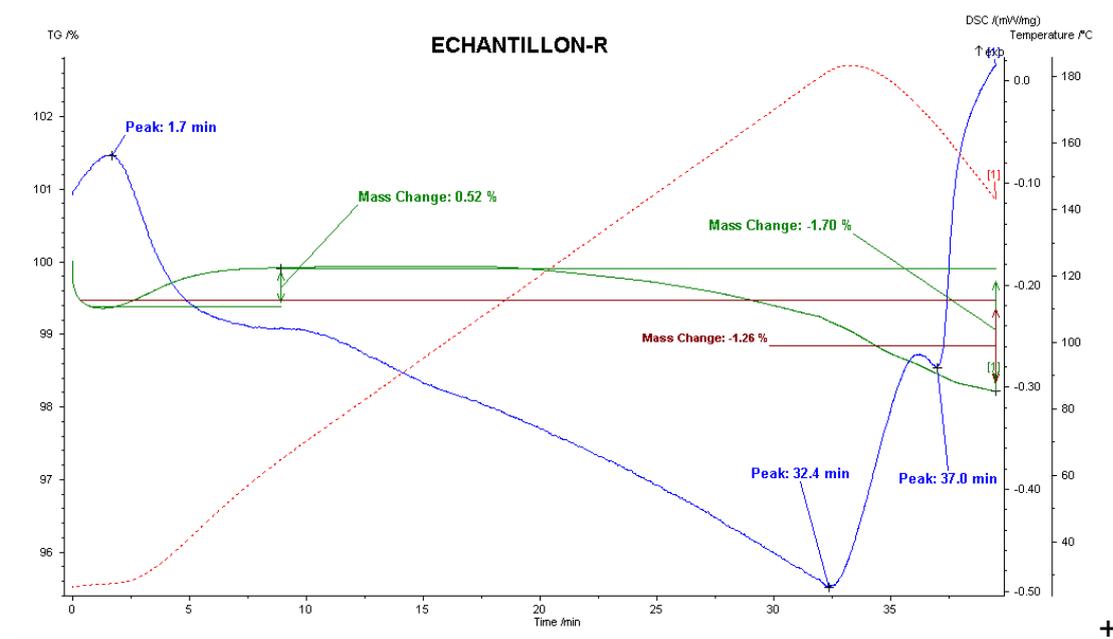


Fig. 3.27 : Allure des thermo grammes obtenus en DSC pour une résine polyester (après réticulation à température ambiante).

Comme on vient de le remarquer, l'analyse thermogravimétrique et l'analyse calorimétrique différentielle nous donnent une bonne approche de l'évolution de l'échantillon en fonction de la température. En effet, grâce à ces analyses, on sait lorsque l'échantillon subit une transformation (ceci se traduisant par une perte de masse), et quelle est la chaleur dégagée

ou consommée lors de cette transformation.

**Eprouvette de Traction (Résine pure):**

La caractérisation en traction de la résine époxy est effectuée sur des éprouvettes en forme d'haltère (Fig.3.28) conformément à la norme **NF EN ISO 527-2**. Ces éprouvettes sont réalisées par moulage en utilisant un moule en aluminium (Fig.) recouvert d'une fine couche de papier cellophane afin que la résine ne colle pas à la surface du moule après polymérisation.

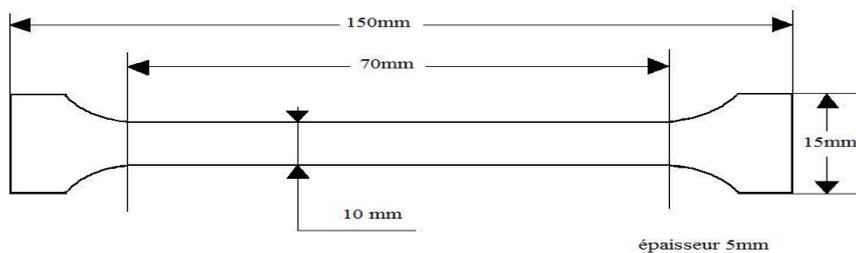


Figure :3.28 : Éprouvettes en forme d'haltère de la résine

Un nettoyage par l'acétone est nécessaire pour le dégraissage de la surface, suivi par un usinage et un polissage de ces dernières. (Fig 3.29.).

Au cours des essais, le déplacement  $u$  de l'éprouvette est relevé en fonction de l'effort  $F$  appliqué. Connaissant les paramètres géométriques des échantillons (épaisseur  $h$ , largeur  $b$ ), il est possible d'accéder au module d'Young  $E$  (pente de la partie linéaire de la courbe contrainte/allongement à la contrainte à rupture et à l'allongement à rupture des résines).



Figure : 3.29 Eprouvette en résine.

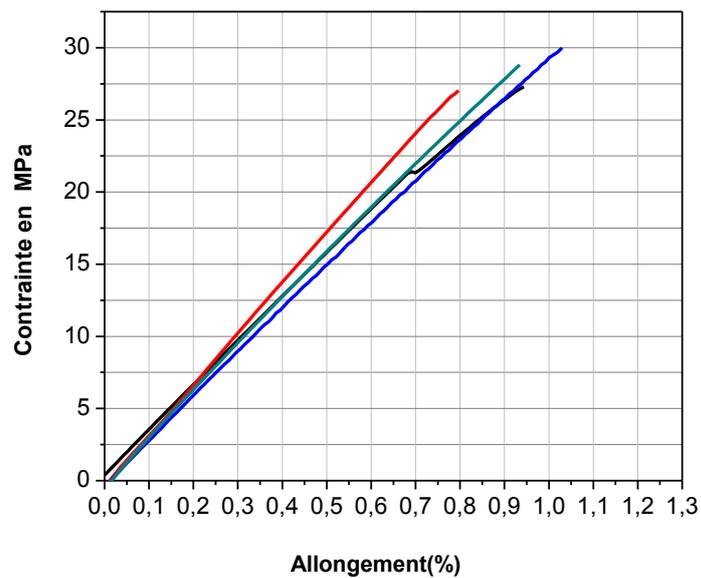
**Traction de la Résine Polyester :**

Figure : 3.30 : Traction de la Résine Polyester



Figure : 3.31: éprouvette de résine lors de l'essai de traction

Les résultats obtenus après l'essai de traction sur la résine époxy et la résine POLYESTER sont présentés dans les figures 3.31 et 3.32 ci-après :

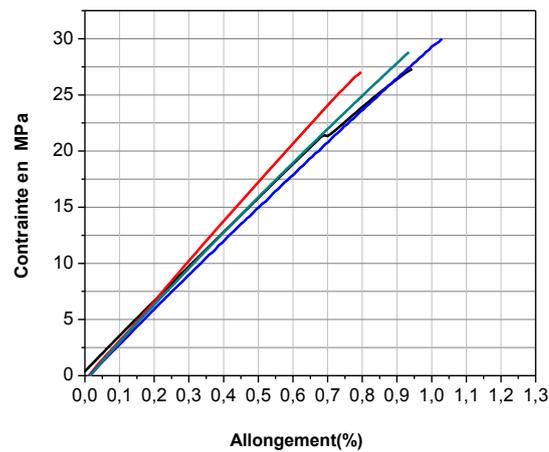


Figure 3.31 : courbe de Traction de la Résine Polyester

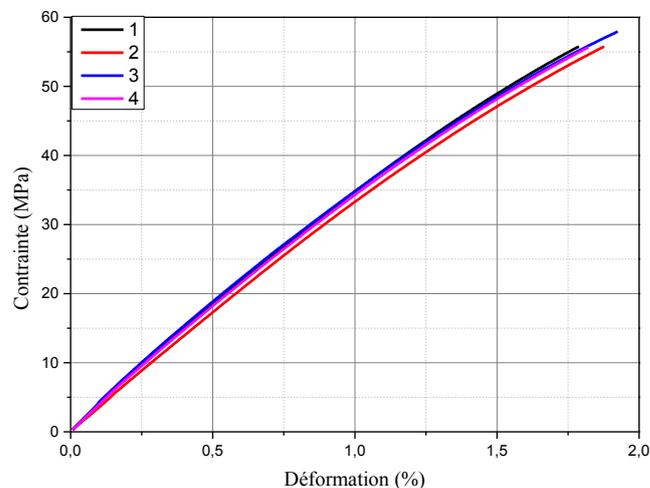


Figure 3.32 : courbe obtenus aux essais de traction de la résine époxy

Les figures suivantes (3.30 et 3.32) représentent l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation longitudinale de la résine polyester et de la résine époxy lesquelles montrent une faible fluctuation entre les différentes éprouvettes ce qui traduit l'homogénéité du matériau élaboré. Nous constatons que la contrainte varie de manière linéaire (zone totalement élastique) pour la résine polyester jusqu'à une valeur autour de 30 MPa avec un allongement de 1 % et une contrainte de rupture allant jusqu'à 28 MPa et un allongement de 0.9% ; tandis que la résine époxy, présente un allongement de 1.78 % et une contrainte de 55 MPa.

On note sur la figure 3.32, un comportement linéaire de tous les échantillons jusqu'à la rupture engendrée par les défauts de porosité à l'intérieur de la matrice (figure 3.33), ce qui indique la fragilité de cette résine destinée à l'aéronautique.



Figure 3.33 : Observations au MEB de la résine

La figure 3.34, présente le comportement en traction de cette résine par rapport aux autres résines utilisées dans L'unité de recherche URMPE à savoir AL, STR et INJ812 :

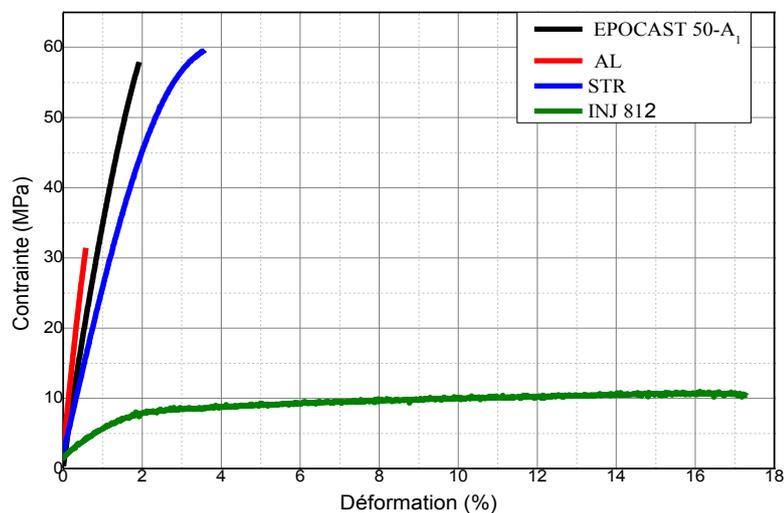


Figure 3.34 : Comportement de différentes résines suite aux essais de traction.

Les propriétés mécaniques sont calculées et présentés dans le Tableau 3.31, Ci-dessous: Nous constatons ici que la contrainte à la rupture pour la résine EPOCAST 50-A<sub>1</sub> est de même ordre que celle de la résine STR, par contre la déformation est inférieure, ce qui donne un module de Young supérieur.

Les propriétés mécanique sont calculées et présentés dans le Tableau 3.31, Ci-dessous :

Tableau 3.31 : Les propriétés mécanique de la résine Epocast 50-A<sub>1</sub>

Résine	Contrainte de rupture MPa	Déformation %	Module de Young GPa
<b>Epocast 50-A<sub>1</sub></b>	<b>58</b>	<b>1,92</b>	<b>4,0</b>
STR	59,40	3,58	3,52
INJ 812	10,43	17,23	0,9
AL	31,42	0,57	5,01

Nous constatons ici que la contrainte à la rupture pour la résine Epocast 50-A<sub>1</sub> est de même ordre que celle de la résine STR, par contre la déformation est inférieure, ce qui donne un module de Young supérieur.

### 3.10 Caractérisation mécanique de la résine polyester par l'essai de flexion :

L'essai de flexion trois points est le plus utilisé pour déterminer la rigidité et la résistance en flexion des matériaux composites en général.

Ces essais sont simple à mettre en œuvre et d'une bonne reproductibilité. Ils permettent de surmonter les problèmes de tenue des talons collés (glissement dans les mors) ainsi que les problèmes d'alignement. la figure 3.34 présente le comportement en flexion de cette résine

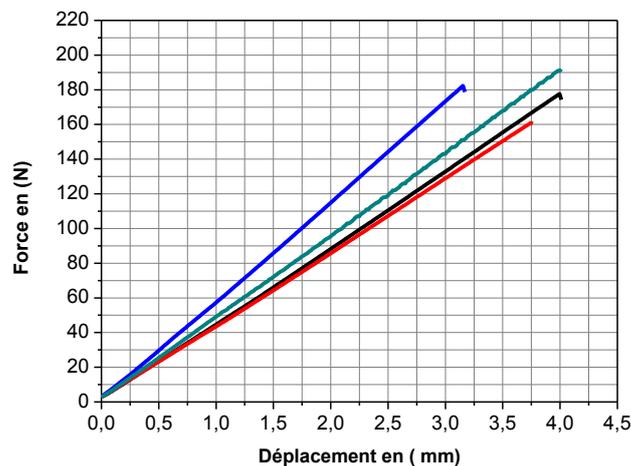


Figure 3.34 : le comportement en flexion de la résine polyester

### 3.11: Séchage du liège (Analyse hygrothermique):

L'analyse de la variation de la masse des panneaux de liège aggloméré blanc en fonction du temps, pour une température de 100°C en étuve pour une durée de 24 heures est, effectuée. Les échantillons de liège testés se caractérisent par les dimensions suivantes 250 x 250 x 10/20/30 mm<sup>3</sup>. Ces derniers sont pesés avant l'essai ; par la suite, des pesées sont effectuées

chaque heure, pendant 24 heures pour quantifier la perte de masse.

**Tableau 3.32 : la masse de liège après séchage.**

Séchage	La masse a0h	1 h	2h	3h	4h
L10	142,34	140,27	139,17	138,54	136,69
L20	280,11	277,07	275,79	274,2	272,05
L30	452,25	449,39	447,01	446,32	443,12

La figure 3.35 montre respectivement la variation de la masse des variétés du liège aggloméré, en fonction du temps de séchage dans une étuve, à une température de 100 °C. Au début de l'essai, la masse de toutes les variétés diminue, cela est dû à une évaporation rapide de l'eau qui est liée physiquement à travers les pores du matériau ; par la suite, une diminution de cette allure jusqu'à arriver à une stabilité de la masse, après les 4 premières heures de séchage.

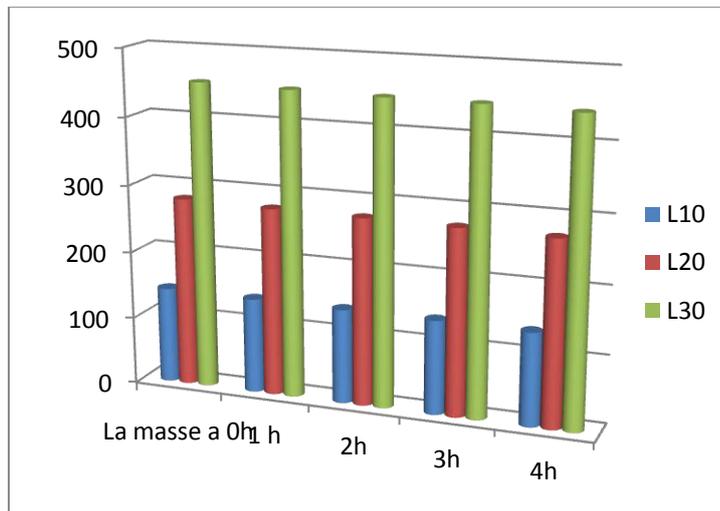


Figure 3.35 : séchage des échantillons de liège aggloméré blanc à différents épaisseurs (10 ,20 et 30mm).

Les résultats de séchage des échantillons de liège aggloméré blanc à différents épaisseurs (10 ,20 et 30mm) trouvées montrent qu'à la première heure une perte de masse varie de 0.06 à 1.45% pour les variantes à 10 et 30 mm ; passant par 1.08% pour la variante 20mm ; cette perte continue jusqu'à quatre heures où elle atteint les valeurs 2.01, 2.87 et 3.96% respectivement des variantes de liège de 10,20 et 30 mm d'épaisseur.

### 3.11: Analyse du pouvoir d'absorption d'eau des panneaux de liège aggloméré blanc :

Les essais consistent à peser les échantillons avant de les mettre en contact avec l'eau.

Ensuite, mettre la partie inférieure des éprouvettes en contact avec l'eau pendant une période de 24 heures selon la norme NF EN 1609 Juillet 1997 . Ces éprouvettes de dimensions 200 x

200 mm<sup>2</sup> sont maintenues dans un bac à eau par un poids pour ne pas flotter voir la (figure 3.36). Les essais sont effectués dans une salle à température contrôlée (23°C). Après 24 heures, les éprouvettes sont retirées et placées à 45° dans un support pour être égouttées pendant 10 minutes (figure 3.36 ).



**Figure 3.36** .Méthode de détermination de l'absorption d'eau à court terme en immersion partielle (a) : échantillons dans le bac à eau maintenus par un poids, (b) : équipement pour égouttage.

### 3.13 Étude du comportement mécanique du liège aggloméré blanc :

Cette caractérisation consiste à des essais de traction réalisés au niveau de l'Unité de Recherche Matériaux, Procédés et Environnement (URMPE) de l'Université de Boumerdes, ainsi que la mesure des poids et des densités.

#### 3.13.1. Essais de traction sur les deux variétés de liège

#### 3.13.2. Fabrication des éprouvettes

Les essais de traction des échantillons de liège de types 10, 20mm et 30mm sont effectués suivant les sens long.

Les échantillons de liège sont découpés à l'aide d'une scie métallique aux dimensions 250x50x20mm et 250x50x30mm. La figure 3.37 montre la géométrie des éprouvettes utilisées.



Figure 3.37. : Géométrie des éprouvettes de traction de liège.

Tableau 3.33. : Dimensions des éprouvettes en (mm).

Longueur Totale L	Epaisseur H	Largeur B
250	20	50
250	30	50



Figure 3.38 : Échantillons de lièges agglomérés instrumentés pour essais de traction.

#### Dispositif d'essai

Ces essais sont effectués sur une machine universelle de type Zwick 10 kN piloté par ordinateur (logiciel testXpert V 9.0) avec une vitesse d'essai de 2 mm/min et équipé d'un capteur de force de 2.5 kN .

#### Essai de traction

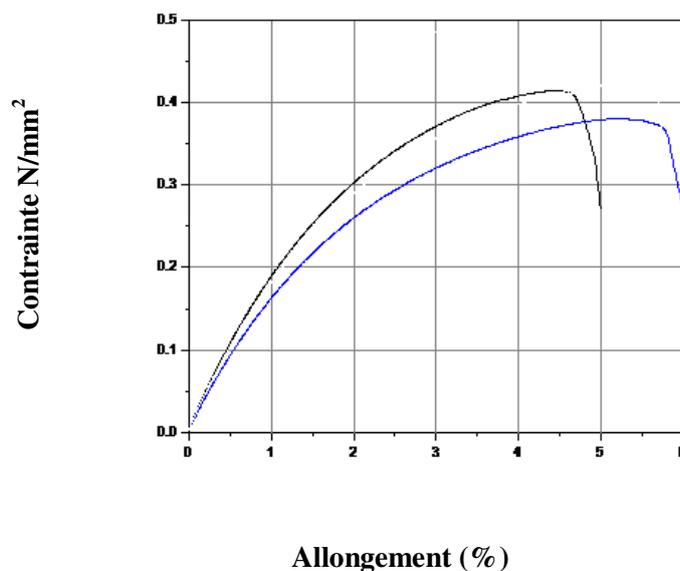


Figure 3.39 : Courbe de traction de liège aggloméré blanc d'épaisseur 30mm

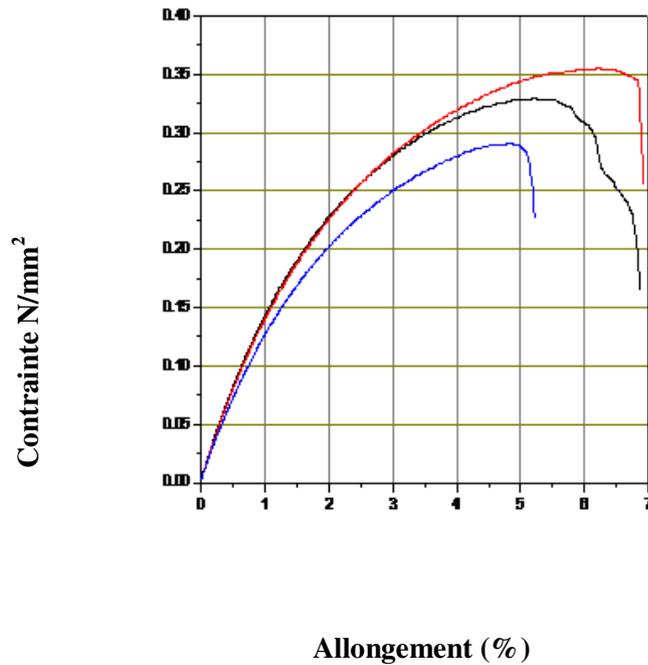


Figure 3.40: Courbe de traction de liège aggloméré blanc d'épaisseur 20mm

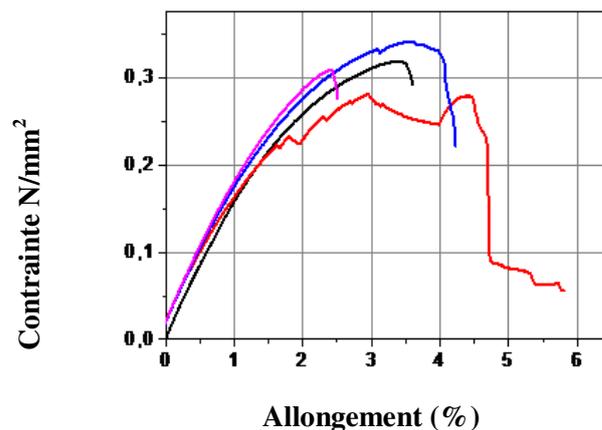


Figure 3.41 : Courbe de traction de liège aggloméré blanc d'épaisseur 10mm

### Résultats et discussions

Les figures suivantes («3.39 , 3.40 et 3.41 ) représentent l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation longitudinale pour le liège 20et30mm lesquelles montrent une faible fluctuation entre les différentes éprouvettes ce qui traduit l'homogénéité du matériau élaboré. Nous constatons que la contrainte varie de manière linéaire (zone élastique) jusqu'à une valeur autour de 0.2 N/mm<sup>2</sup> avec un allongement de 1.5 %.et une contrainte de rupture allant jusqu'a 0.3 N/mm<sup>2</sup> et un allongement de 6 % pour le liège d'épaisseur 20mm; tan disque le liège a 30mm d'épaisseur, présente un allongement de 5.5 % et une contrainte de 0.4 N/mm<sup>2</sup>

Les résultats des essais mécaniques en traction montrent que l'épaisseur de liège, modifie considérablement ses performances, en particulier ses caractéristiques mécaniques. On conclure que plus l'épaisseur augmente, plus la contrainte augmente aussi. et plus l'allongement diminue.

Le liège naturel aggloméré blanc présente de bonne caractéristiques mécanique et de bonne caractéristiques acoustique et phonique qui leurs permet d'être utilisé comme panneau pour l'isolation dans la construction.

***Chapitre 4 : Elaboration et  
caractérisation mécanique des  
stratifiés à renfort naturel***

## 4. Introduction

### 1. Introduction

Du fait d'une demande croissante d'éco-matériaux et du coût de plus en plus élevé des fibres synthétiques (carbone ou verre), de nouveaux matériaux contenant des fibres naturelles sont en cours de développement [158], [159], [160], Ils ont pour avantage d'être plus léger tout en ayant des propriétés mécaniques intéressantes [161], [162], [163], [164]. De plus, ils présentent l'avantage d'avoir un coût beaucoup moins élevés que les synthétiques, associés à une densité plus faible, et de constituer une ressource renouvelable. Les récentes avancées dans l'utilisation des fibres naturelles (lin, cellulose, bambou, chanvre, sisal, ...) dans les composites ont été étudiées par plusieurs équipes de recherche. [165]. [166],[167].

Comme les fibres végétales présentent des disparités de formes et de propriétés dépendantes de divers paramètres tel que : origine dans la plante, de la saison où elles ont été semées, du type de sol sur lequel elles ont été plantées, du climat, la manière avec laquelle elles ont été récoltées....

Cette étude contribue à la compréhension du 4comportement mécanique d'une famille de ces matériaux qui est la fibre de jute.

Nous présentons dans cette partie de notre travail, un certain nombre de combinaisons relatives aux différents types de jute : Tissu de jute comportant des fibres dans deux directions appelées sens chaîne et sens trame, Tissu de jute comportant autant de fibres dans les sens chaîne et trame le pli est dit tissé équilibré.

#### 4.1 Stratifiés

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié (Figure 4.1).

On appelle ainsi ce qui résulte de la superposition de plusieurs couches ou plis de nappes unidirectionnelles, de tissus ou de mats avec des orientations propres à chaque pli (Figure4.2) un stratifié. [194] .

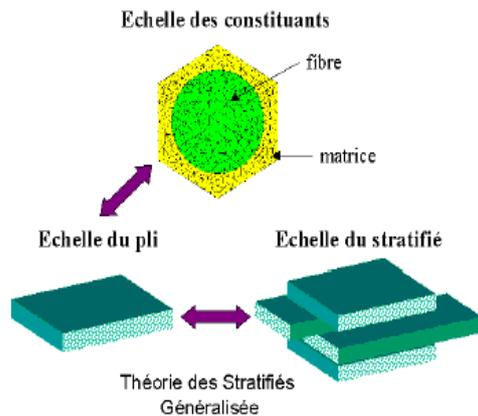


Figure 4.1. Stratifié à base de plis

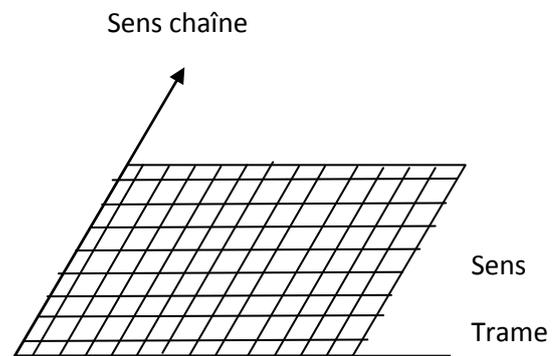


Figure 4.2. Pli bidirectionnel

Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques.

#### 4.2. Procédé d'élaboration des stratifiés :

L'élaboration du stratifié jute/polyester est réalisée par différentes méthodes à savoir,

- méthode par pression,
- méthode par infusion
- méthode dite par sac.

Nous avons utilisé trois types de résines sur un nombre limité de stratifiés, et en le faisant sur des échantillons de cinq stratifiés par type de résine.

##### a- Méthode par pression :

L'élaboration du stratifié jute/polyester est réalisée par compression à l'aide d'une presse hydraulique équipée de plaques chauffantes à température variable, la pression exercé est de  $28\text{Kg/cm}^2$  avec une température de  $\approx 80^\circ\text{C}$  pendant 01 heure (Fig.4.3.). Le tissu est préparé et découpé déjà aux dimensions  $300 \times 300\text{mm}$ . Les séquences d'empilement étudiées sont de type  $[0^\circ/90^\circ]_3$ ,



Fig. 4.3. (a) Tissu de jute, (b) plaque préparée pour le pressage

Les plaques obtenues, de dimensions de 300 x300 mm, sont lissées à 30 jours même -plus) en repos avant d'être découpées selon la norme AFNOR NF T 57-105 pour faire les essais mécanique.

Les plaques sont coupées à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté et lubrifié (Fig.4.4) : [168]. [169]. [170].



Figure 4.4. : Échantillons en composite stratifié (jute/polyester et jute /époxy).

**b- La méthode sous vide :**Le tissu est préparé et découpé déjà aux dimensions 300x300mm. (Fig.4.3.).

Nous avons utilisé trois types de résines sur un nombre limité de stratifiés, et en le faisant sur des échantillons de cinq stratifiés par type de résine.

Nous avons commencé par essayer le jute à mailles fines, en trois couches avec résines et durcisseurs. Les trois types de résines ont été utilisés avec durcisseurs dans des rapports bien distincts pour mettre en évidence le meilleur pourcentage résine/durcisseur pour le bon choix du stratifié, et sélectionner deux types de résines qui seront utilisées pour l'élaboration des stratifiés.

Les deux types de résines que nous avons utilisées pour la réalisation des stratifiés sont les suivantes :

- ❖ la résine Polyester : AROPOL S 902-4205.
- ❖ la résine Epoxyde : Epocast 50-A1.

**✚ Caractéristiques de la résine type Epocast 50-A1 :**

Epocast 50-A1 est une résine de stratification de manipulation facile. Ce système peut être employé pour la fabrication ou la réparation des structures composites aéronautiques. Le produit est qualifié de BMS 8-201.D'autres précisions concernant cette résine sont mentionnées dans la fiche technique remise par le fournisseur, voir Tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Caractéristiques des Epocast 50-A1/946.

Densité	g/cm <sup>3</sup>	2
90+00Coefficient de dilatation thermique	10k	35
Résistance en compression	MP	140
Module d'élasticité en compression	MP	11000-11500
Résistance en flexion	MP	110
Retrait linéaire	%	0,05

Il existe différents procédés pour la réalisation d'un stratifié mais le plus utilisé est le procédé par moulage. La mise en œuvre des stratifiés étudiés est réalisée par moulage au contact. Les plis sont stratifiés et imprégnés à température ambiante, puis moules pendant 24 à 48 heures entre le moule et le contre moule (moule métallique et moule en bois), sous l'influence d'un poids soumis sur le moule. Le rapport renfort /résine est de 70/30%.

Après cette durée les éprouvettes sont extraites du moule et mises dans une étuve de séchage ( $\approx 80^{\circ}\text{C}$ ), laisser reposer pendant un mois puis découpées selon la norme AFNOR NF T 57-105.[171]

#### Elaboration par infusion (sous vide)

Cette technique est limitée par la viscosité de la résine et le début de réticulation (temps de gel), ainsi que par la forme et la perméabilité du renfort. Le mécanisme de l'infusion consiste à remplacer progressivement le vide par la résine, c'est pour cela que l'ensemble doit être scellé sous un film du plastique (Fig. 4 .17). Après le remplacement complet du vide par la résine, la plaque reste sous dépression de pompe jusqu'à la vitrification complète de la matrice ; ensuite, elle est mise dans une étuve à  $80^{\circ}\text{C}$  pendant huit heures afin d'améliorer le taux de réticulation.



Figure 4.5. Elaboration sous vide, d'une plaque stratifiée.

- Découper et préparer les plaques du renfort tissu

- Découper le tissu d'arrachage et le tissu de drainage
- Préparer le tuyau d'injection de résine et d'aspiration
- Sécher les tissus de jute à l'aide d'un fer à repassé
- Préparation du sac
- Monter la plaque (disposition des différents éléments)
- Fermer le sac
- Relier le tuyau 1 au pot (piège à résine)
- Fermer le tuyau 2 et mettre en marche la pompe à vide
- Préparer la résine
- Immerger le tuyau 2 dans la résine
- La résine traverse la plaque
- Fermer le tuyau d'alimentation
- T=8h
- Arrêter la pompe et démouler la plaque

### 4.3 Caractérisation des stratifiés élaborés :

#### 4.3.1 Essais de flexion 3 points sur les stratifiés élaborés.

##### a) Définition

L'essai de flexion statique est un test mécanique statique, qui fait partie de la famille des essais indépendants du temps (comme le choc, la dureté...).

##### b) Principe

L'essai de flexion détermine l'aptitude à la déformation d'un matériau sur deux appuis avec une application de l'effort à mi-distance des appuis (figure 4.6).

Les contraintes varient de façon continue de part et d'autre de l'axe neutre, où elles sont nulles; d'un côté, elles sont en compression (coté concave de l'éprouvette) (figure 4.6) et de l'autre, en tension. Durant cet essai, la charge supportée par l'éprouvette est mesurée.

On impose à une éprouvette normalisée, une déformation, ou flèche, à vitesse de déformation constante, et on mesure la force qu'oppose l'éprouvette à cette déformation.



Figure 4.6 : Aptitude à la déformation d'un matériau composite.

Cet essai permet de connaître :

- Le comportement mécanique du matériau ;
- Les propriétés du matériau ;
- Les valeurs des caractéristiques du matériau.

#### c) Mécanisme de rupture

La rupture est due à la création et à la propagation de fissure(s), généralement localisée(s) sur la fibre externe la plus sollicitée en extension. [171]

Quand une contrainte locale devient égale à la résistance de cohésion de la matière, les liaisons interatomiques de cette région se rompent.

Des imperfections structurales ou géométriques augmentent de façon significative la sensibilité à la rupture (par exemple, impuretés, bavures, traces d'éjecteurs...).

On qualifie de fragile le comportement d'un matériau si la rupture intervient dans le domaine élastique sous une forte contrainte et une petite déformation. [172]

#### d) . Fabrication des éprouvettes

Les stratifiés utilisés sont élaborés et expérimentés au laboratoire LMMC (laboratoire des matériaux minéraux et composites) de l'Université de Boumerdes.

Les éprouvettes utilisées en flexion sont des barreaux de forme prismatique découpés de plaquettes de composite (figure 4.7). Les éprouvettes de flexion sont celles recommandées par les normes AFNOR NF T 57-105 et ASTM D 790-84a. (Fig.4.8).



Figure 4.7 : exemple de découpage de plaquettes de composite.



Figure 4.8 : éprouvette de flexion.

e) . Dispositif d'essai

La plupart des machines de flexion sont aujourd'hui dites universelles (traction, flexion, compression, voire fluage...). Une machine universelle est constituée d'un bâti rigide qui comprend une traverse fixe à laquelle est fixée la base du montage de flexion sur laquelle repose l'éprouvette (fig. 4.9).



Figure 4.9 : Machine universelle de flexion.

La partie du complément du montage qui va appuyer sur l'éprouvette est fixée à une traverse mobile. La figure 4.10 représente un essai de flexion sur une éprouvette du matériau étudié.

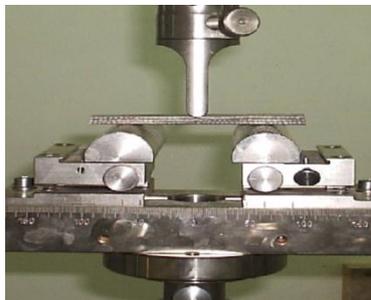


Figure 4.10 : Essai de flexion sur un stratifié à renfort végétal (jute).

Le dialogue homme/machine, la saisie et le traitement des valeurs s'effectuent à l'aide d'un micro-ordinateur.

Pour notre travail la machine de flexion est la même que celle de traction.

La distance entre appuis est réglée de telle façon à satisfaire la condition imposée par les normes AFNOR NF T 57-105 et ASTM D 790-84a..

$$L_0 = 16xh$$

$L_0$  et  $h$  sont respectivement la distance entre appuis et l'épaisseur de l'éprouvette.

La contrainte à la rupture en flexion est calculée par la formule suivante :

$$\sigma_{rupt} = 3FL_0 / 2bh^2$$

Avec :

$\sigma_{rupt}$  = contrainte de rupture maximale (N/mm<sup>2</sup>)

F = force maximale au moment de la rupture (N)

b = largeur de l'éprouvette (mm)

h = épaisseur de l'éprouvette dans le sens de la flexion (mm)

$l_0$  = distance entre les axes des cylindres d'appuis (mm)

### 4.3.2 Résultats des essais de flexion 3 points

En règle générale, un minimum de cinq éprouvettes est suffisant pour l'essai de flexion. Les stratifiés élaborés (voir annexe D) sont désignés de ST1 à ST 8 représentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4.2 : variantes des stratifiés élaborés.

RENFORT (JUTE)		STRATIFIE
<b>GROSSES MAILLES</b>	Neuf	0° ----- <b>ST1</b>
		90° ----- <b>ST2</b>
	Utilisé	0° ----- <b>ST3</b>
		90° ----- <b>ST4</b>
<b>Mailles fines</b>	Neuf	0° ----- <b>ST5</b>
		90° ----- <b>ST6</b>
	Utilisé	0° ----- <b>ST7</b>
		90° ----- <b>ST8</b>

Les stratifiés considérés sont ST1 à ST8 possédant tous le même nombre de plis.

Nous considérons une série de cinq essais de flexion sur la machine universelle Zwick 250 KN équipée d'un capteur de 2.5 KN figure 5.9. (La même machine utilise pour la traction).

#### 1) Essai de flexion 3 point du stratifié ST1 :

Ces essais sont effectués sur un stratifié en jute neuf à grosse maille non ensimé et suivant la direction zéro degré. (Fig. 5.11).

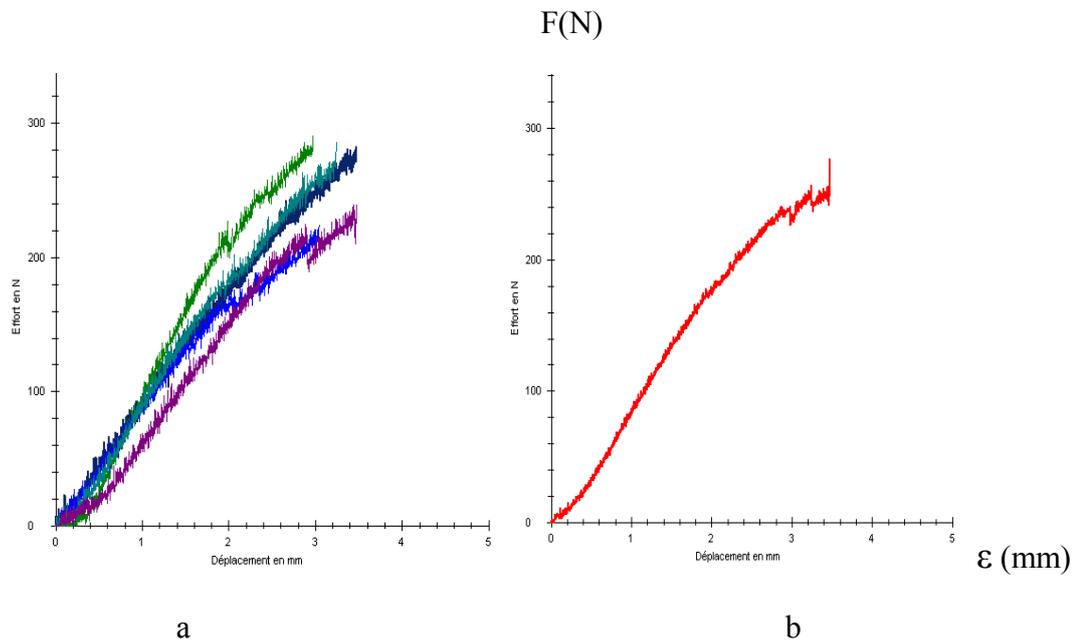


Figure 5.11 : a) courbe de flexion ST1, b) courbe moyenne :

Tableau 4.3 : Résultats d'essai de flexion 3 points de stratifié ST1

N	A <sub>0</sub> MM	B <sub>0</sub> MM	F <sub>MAX</sub> N	ε F <sub>MAX</sub> MM
1	4	16	282,93	3,47
2	4	16	291,20	2,97
3	4	16	225,04	3,04
4	4	16	286,41	3,24
5	4	16	240,27	3,48
<b>Moy</b>	4	16	<b>265,17</b>	<b>3,24</b>

Les courbes obtenues montrent une variation de la force F allant de 240 à 291 Newtons et une variation dans l'allongement de 2,97 à 3,48. Nous avons présenté dans la figure (5.11.b) la courbe moyenne représentant les cinq essais.

## 2) Essai de flexion 3 point du stratifié ST2 :

Ces essais sont effectués sur un stratifié en jute neuf à grosse maille non ensimé et suivant la direction 90 degré. (Fig. 5.12).

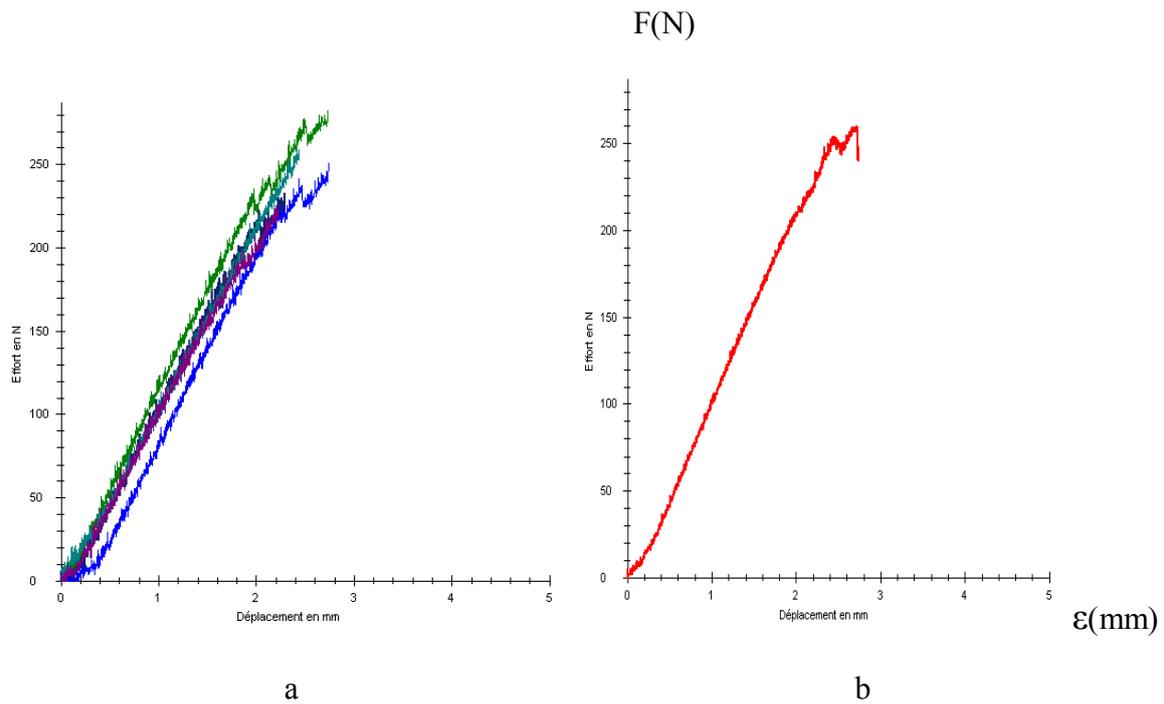


Figure 5.12 : a) courbe de flexion ST2, b) courbe moyenne

Tableau 4.4 : Résultats d'essai de flexion 3 points de stratifié ST2

N	A <sub>0</sub> MM	B <sub>0</sub> MM	F <sub>MAX</sub> N	ε F <sub>MAX</sub> MM
1	4	16	232,86	2,29
2	4	16	282,92	2,73
3	4	16	251,58	2,74
4	4	16	259,85	2,43
5	4	16	226,77	2,23
<b>Moy</b>	<b>4</b>	<b>16</b>	<b>250,79</b>	<b>2,23</b>

Les courbes obtenues montrent une variation de la force F allant de 226 à 282 Newtons et une variation dans l'allongement de 2,23 à 2,74. Nous avons présenté dans la figure (5.12.b) la courbe moyenne représentant les cinq essais.

### 3) Essai de flexion 3 point du stratifié ST3 :

Ces essais sont effectués sur un stratifié en jute utilisé à grosse maille non ensimé et suivant la direction zéro degré. (Fig. 5.13).

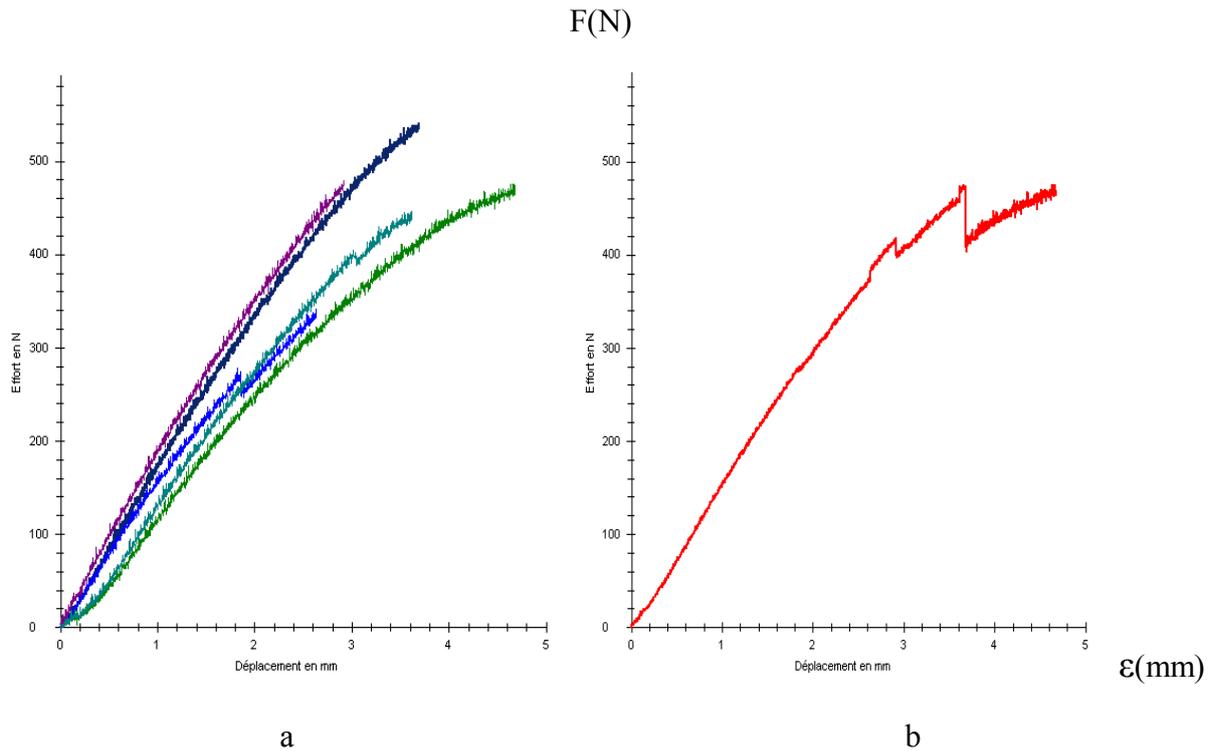


Figure 5.13 :(a) courbe de flexion ST3, (b) courbe moyenne

Tableau 4.5 : Résultats d'essai de flexion 3 points de stratifié ST3

N	A <sub>0</sub> MM	B <sub>0</sub> MM	F <sub>MAX</sub> N	ε F <sub>MAX</sub> MM
1	4	16	541,02	3,69
2	4	16	475,74	4,68
3	4	16	342,55	2,63
4	4	16	447,88	3,62
5	4	16	480,96	2,92
<b>Moy</b>	<b>4</b>	<b>16</b>	<b>457,63</b>	<b>3,51</b>

Les courbes obtenues montrent une variation de la force F allant de 342 à 541 Newtons et une variation dans l'allongement de 2,63 à 4,68. Nous avons présenté dans la figure (5.13.b) la courbe moyenne représentant les cinq essais.

#### 4) Essai de flexion 3 point du stratifié ST4 :

Ces essais sont effectués sur un stratifié en jute utilisé à grosse maille non ensimé et suivant la direction 90 degré. (Fig. 5.14).

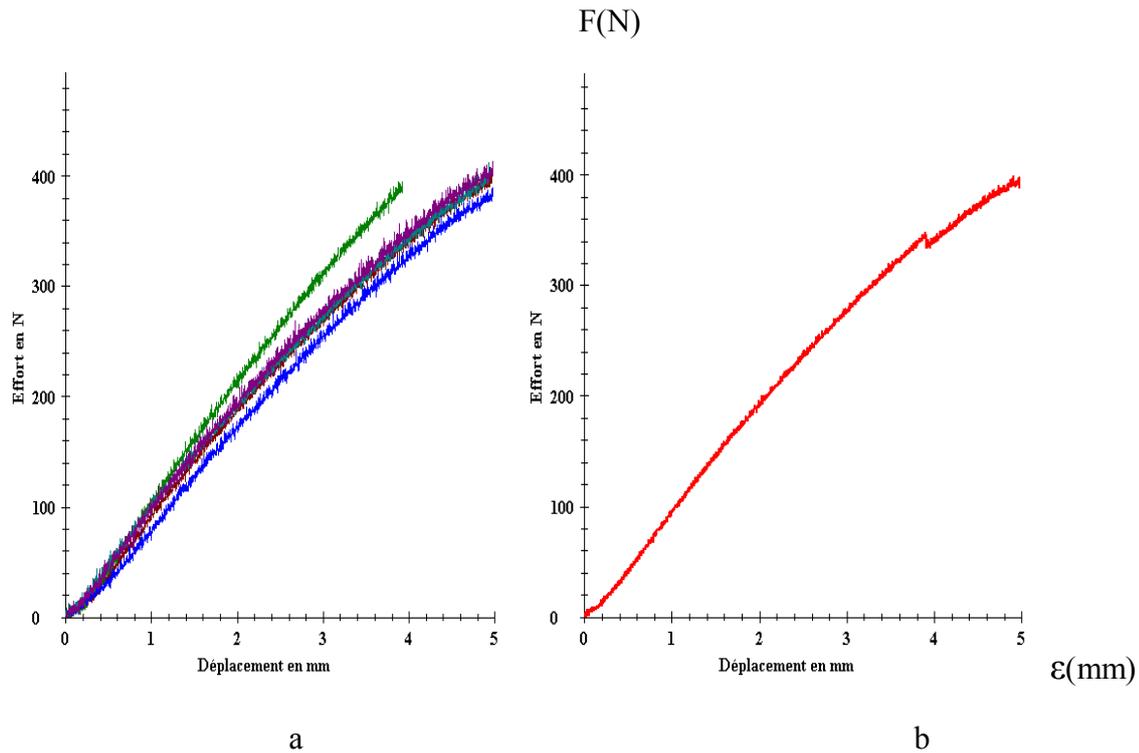


Figure 5.14 : a courbe de flexion ST4, b courbe moyenne

Tableau 4.6 : Résultats d’essai de flexion 3 points de stratifié ST4

N	A <sub>0</sub> MM	B <sub>0</sub> MM	F <sub>MAX</sub> N	ε F <sub>MAX</sub> MM
1	5,75	16	402,19	4,96
2	5,75	16	396,09	3,92
3	5,9	16	390,44	4,98
4	5,7	16	413,50	4,93
5	5,7	16	414,81	4,98
<b>Moy</b>	<b>5,76</b>	<b>16</b>	<b>403,41</b>	<b>4,75</b>

Les courbes obtenues montrent une variation de la force F allant de 390 à 414 Newtons et une variation dans l’allongement de 3,92 à 4,98. Nous avons présenté dans la figure (5.14.b) la courbe moyenne représentant les cinq essais.

### 5) Essai de flexion 3 point du stratifié ST5 :

Ces essais sont effectués sur un stratifié en jute neuf à maille fine non ensimé et suivant la direction zéro degré. (Fig. 5.15).

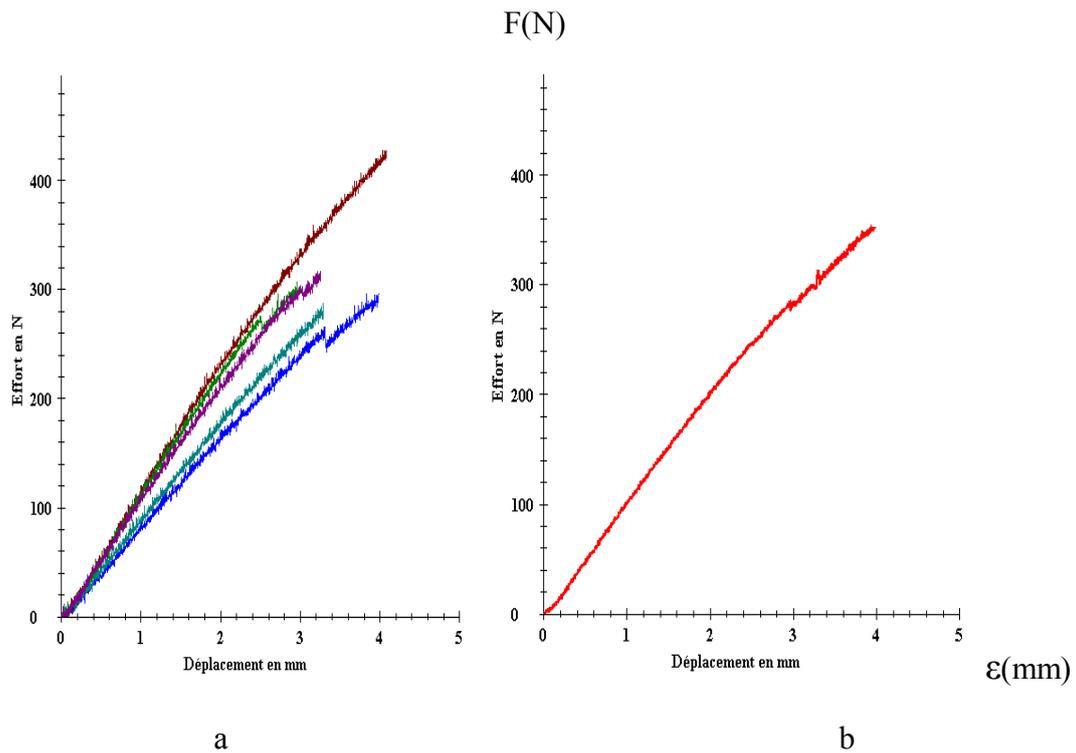


Figure 5.15 : a) courbe de flexion ST5, b) courbe moyenne

Tableau 4.7 : Résultats d'essai de flexion 3 points de stratifié ST5

N	A <sub>0</sub> MM	B <sub>0</sub> MM	F <sub>MAX</sub> N	ε F <sub>MAX</sub> MM
1	6	16	429,17	4,08
2	6	16	308,60	2,96
3	5,5	16	297,29	3,99
4	5,6	16	288,58	3,29
5	5,3	16	317,31	3,26
<b>Moy</b>	<b>5,766</b>	<b>16</b>	<b>328,19</b>	<b>3,51</b>

Les courbes obtenues montrent une variation de la force F allant de 288 à 429 Newtons et une variation dans l'allongement de 2,96 à 4,08. Nous avons présenté dans la figure (5.15.b) la courbe moyenne représentant les cinq essais.

#### 6) Essai de flexion 3 point du stratifié ST6 :

Ces essais sont effectués sur un stratifié en jute neuf à maille fine non ensimé et suivant la direction 90 degré. (Fig. 5.16).

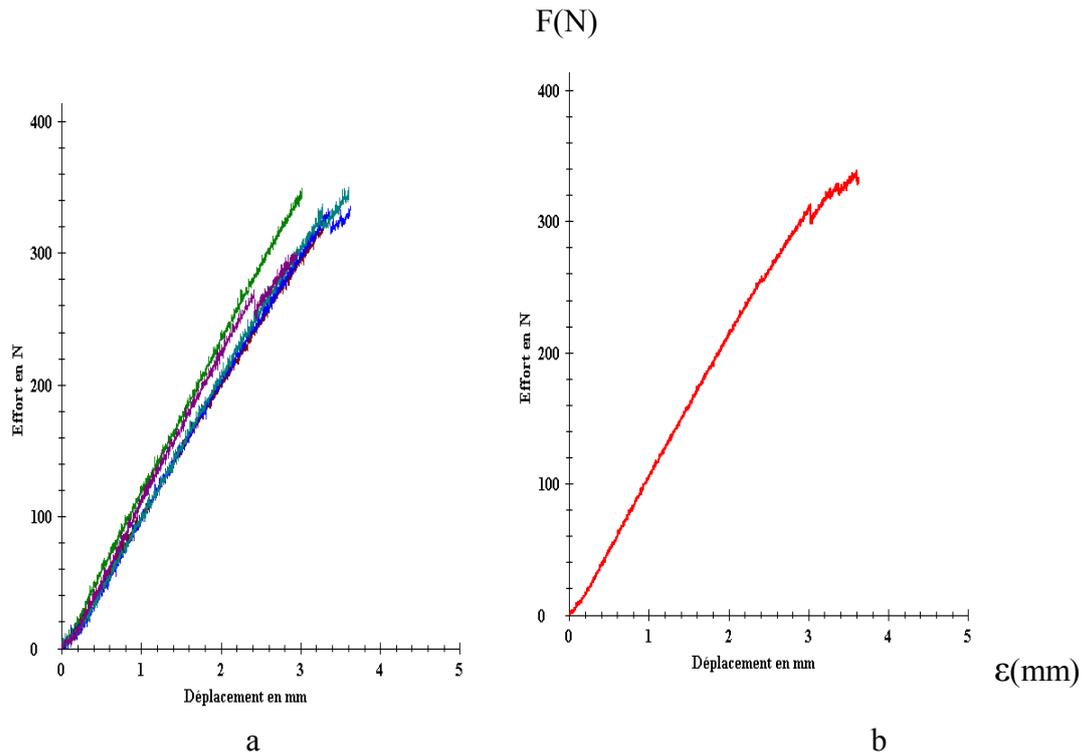


Figure 5.16 : a) courbe de flexion ST6, b) courbe moyenne

Tableau 4.8 : Résultats d’essai de flexion 3 points de stratifié ST6

N	A <sub>0</sub> MM	B <sub>0</sub> MM	F <sub>MAX</sub> N	ε F <sub>MAX</sub> MM
1	5,9	16	332,10	3,32
2	6	16	350,38	3,02
3	5,78	16	336,02	3,63
4	5,78	16	350,38	3,61
5	6,3	16	302,50	2,95
<b>Moy</b>	<b>5,952</b>	<b>16</b>	<b>334,27</b>	<b>3,31</b>

Les courbes obtenues montrent une variation de la force F allant de 302 à 350 Newtons et une variation dans l’allongement de 2,95 à 3,63. Nous avons présenté dans la figure (5.16.b) la courbe moyenne représentant les cinq essais.

**7) Essai de flexion 3 point du stratifié ST7 :**

Ces essais sont effectués sur un stratifié en jute neuf à maille fine non ensimé et suivant la direction zéro degré. (Fig. 5.17).

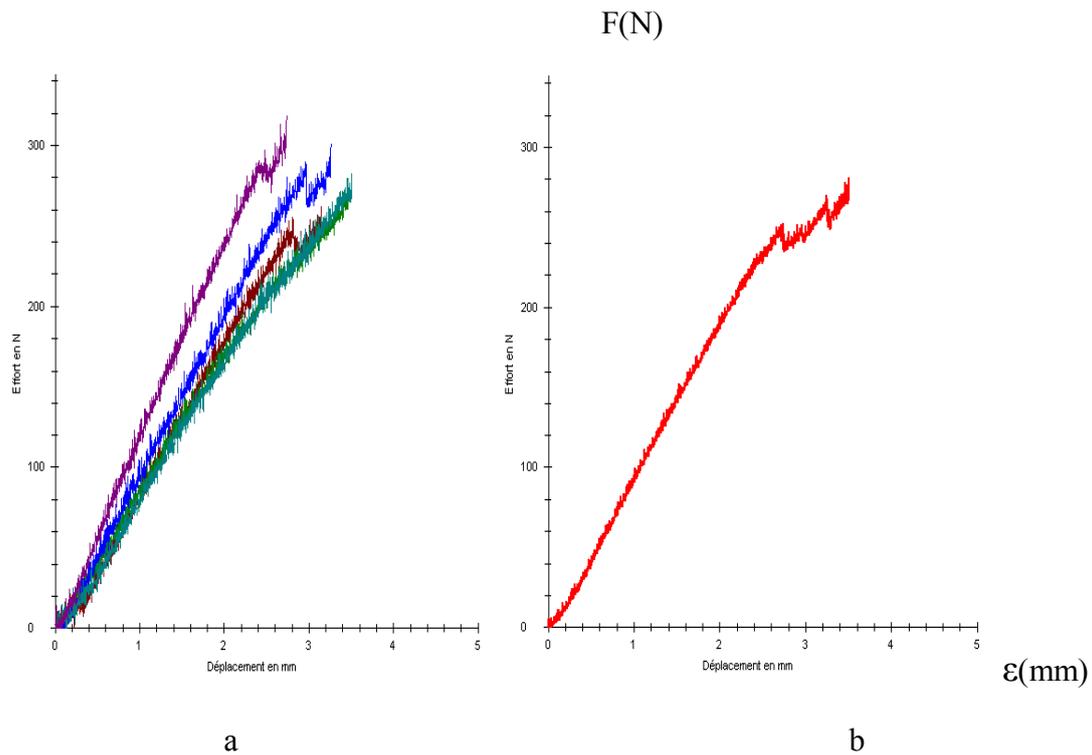


Figure 5.17 : a) courbe de flexion ST7, b) courbe moyenne

Tableau 4.9 : Résultats d'essai de flexion 3 points de stratifié ST7

N	A <sub>0</sub> MM	B <sub>0</sub> MM	F <sub>MAX</sub> N	ε F <sub>MAX</sub> MM
1	4	16	262,91	3,15
2	4	16	280,32	3,47
3	4	16	301,21	3,26
4	4	16	282,93	3,51
5	4	16	319,06	2,74
<b>Moy</b>	<b>4</b>	<b>16</b>	<b>289,28</b>	<b>3,22</b>

Les courbes obtenues montrent une variation de la force F allant de 262 à 319 Newtons et une variation dans l'allongement de 2,74 à 3,47. Nous avons présenté dans la figure (5.12.b) la courbe moyenne représentant les cinq essais.

#### 8) Essai de flexion 3 point du stratifié ST8 :

Ces essais sont effectués sur un stratifié en jute neuf à maille fine non ensimé et suivant la direction 90 degré. (Fig. 5.18).

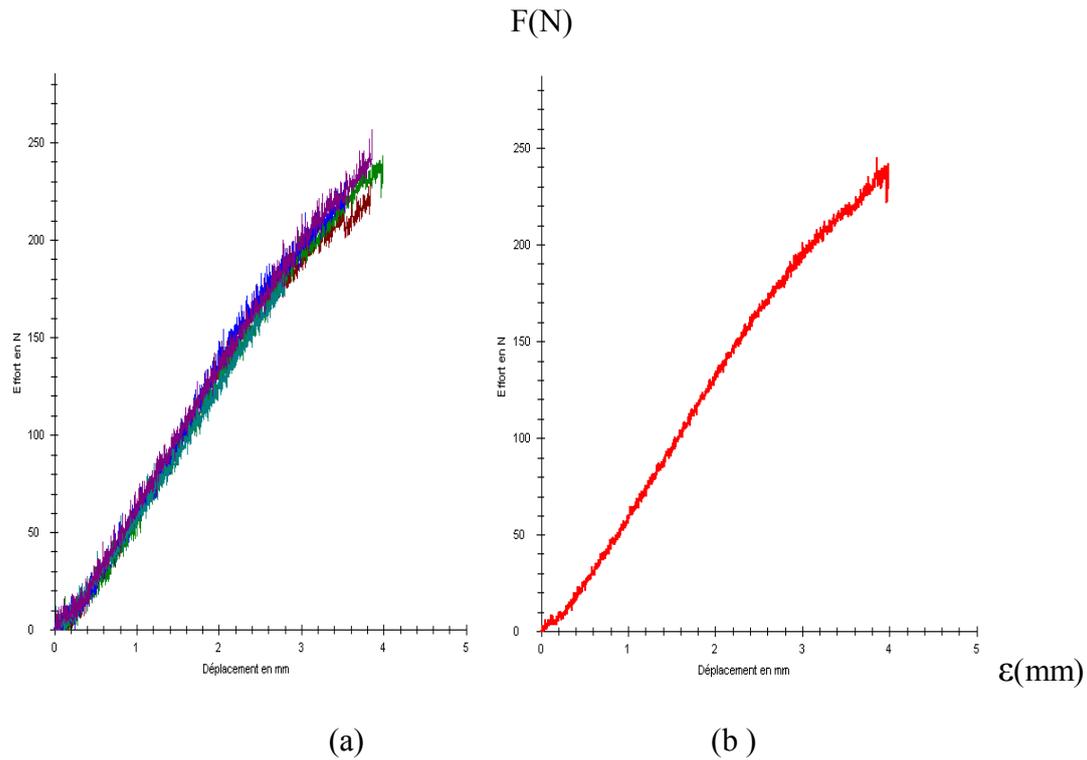


Figure 5.18 ( a ) courbe de flexion ST8, b courbe moyenne

Tableau 5.10 : Résultats d’essai de flexion 3 points de stratifié ST8

N	A <sub>0</sub> MM	B <sub>0</sub> MM	F <sub>MAX</sub> N	ε F <sub>MAX</sub> MM
1	4	16	230,25	3,84
2	4	16	243,75	3,99
3	4	16	230,25	3,53
4	4	16	190,21	2,81
5	4	16	257,24	3,86
<b>Moy</b>	<b>4</b>	<b>16</b>	<b>238,96</b>	<b>3,60</b>

Les courbes obtenues montrent une variation de la force F allant de 190 à 257 Newtons et une variation dans l’allongement de 2,81 à 3,99. Nous avons présenté dans la figure (5.13.b) la courbe moyenne représentant les cinq essais.

Tableau 4.11. Valeurs moyenne des contraintes à la rupture et des modules d’élasticité calculés en flexion 3 points.

EPROUVETTES	F <sub>MAX</sub> (N)	σ <sub>F MAX</sub> (M PA)	E <sub>F MAX</sub> (G PA)
ST1	265,17	111,37	15,56
ST2	250,79	105,33	20,48
ST3	403,41	163,43	16,87

ST4	457,63	192,20	16,38
ST5	328,19	137,83	19,98
ST6	334,27	140,39	16,38
ST7	289,28	121,49	19,66
ST8	238,96	100,36	16,87

#### 4.5. Analyse des résultats du point de vue comportement

– A partir des résultats obtenus nous remarquons que les valeurs calculées des contraintes à la rupture et des modules d'élasticité en flexion 3 points, varient d'une éprouvette à l'autre suivant le renfort, utilisé ou neuf et suivant la section des mailles (grosse maille et maille fine).

- La valeur de la contrainte à la rupture en flexion 3 points pour les huit types de stratifiés (ST1, ST2 à ST8) varie de 100,36 à 192,20 (MPa).

- Le module d'élasticité varie de 15,56 à 20,48 (GPa).

Nous constatons que les meilleurs résultats ont été obtenus avec le stratifié ST1, ce matériau possède le plus haut module d'élasticité et le stratifié ST5 qui possède le plus haut module d'élasticité la plus grande résistance à la rupture. Pour les autres stratifiés, les valeurs sont sensiblement les mêmes.

Les courbes obtenues montrent que les stratifiés testés présentent une phase linéaire élastique légèrement courbée en s'approchant du début de rupture qui correspond à l'apparition de la première fissure. Nous constatons que d'un stratifié à l'autre, les valeurs de la contrainte de rupture et des modules d'élasticité diffèrent, cela peut être expliqué par la présence de défauts d'élaboration et de réalisation des éprouvettes ainsi que la variation de diamètre et la direction à 0° et à 90° des fibres.

#### 5.6. Etude comparative

Comparaison avec un stratifié à renfort métallique :

Les premiers résultats sur les essais en flexion 3 points sur les stratifiés ont été comparés aux stratifiés à base de renfort métallique (plusieurs couches de grillage), réalisés par une autre équipe de recherche au laboratoire LMMC, et nous remarquons que le stratifié à base de jute se comporte mieux (voir les courbes ci-dessous fig 4.19) :

Courbe continue : stratifié à base de renfort métallique ;

Courbe discontinue : stratifiés à base de renfort naturel (jute).

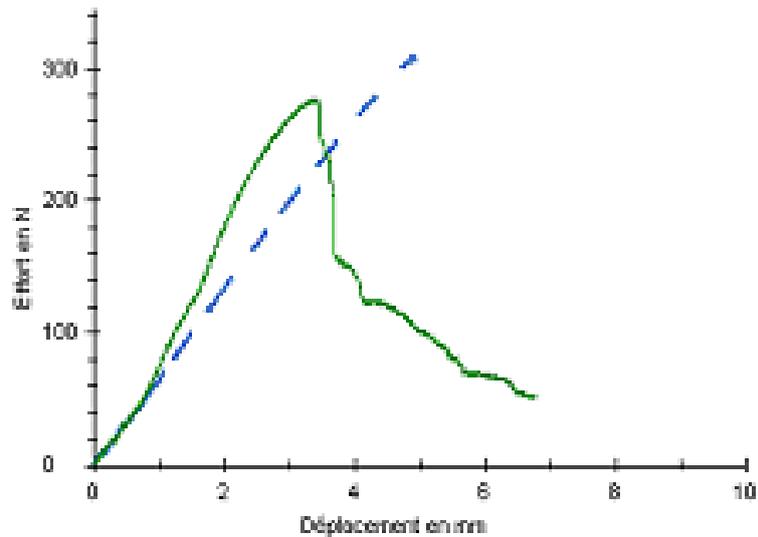


Figure 5.19 : Représentation de deux courbes (flexion 3 points) renfort naturel/métallique.

Les résultats obtenus sont comparés aux résultats des travaux publiés sur les stratifiés conçus avec : fibre de verre/époxyde et fibre de kevlar/époxyde et fibre métalliques /époxyde.

Le tableau suivant montre les valeurs de la contrainte à la rupture et le module d'élasticité pour les quatre types de stratifiés.

Avec :

- STRJ : stratifié à renfort végétal (jute).
- STRM : stratifié à renfort métallique.
- STRV : stratifié à renfort en fibre de verre.
- STRK : stratifié à renfort en fibre de kevlar.

Tableau 4.12. Valeurs de la contrainte à la rupture et le module d'élasticité

Matériau	Contrainte à la rupture $\sigma_f$ (M Pa)	Module d'élasticité $E_f$ (M Pa)
STRJ	192,20	20480,00
STRM	260,82	21723,24
STRV	145,84	2849,15
STRK	71,81	2538,58

Les quatre types de stratifiés ont les mêmes dimensions (la longueur  $L=100\text{mm}$ , la largeur  $b=15\text{mm}$ , l'épaisseur  $h=4\text{mm}$ ), la même fraction volumique de fibres (70% de renfort et 30% de matrice). Des valeurs obtenues, nous remarquons une amélioration importante des valeurs de la contrainte à la rupture et le module d'élasticité en flexion 3 points en utilisant la fibre végétale comme renfort.

D'après les données techniques publiées, nous remarquons l'importance environnementale de la fibre végétale, aussi leur coût, leur légèreté, leur disponibilité et leurs propriétés mécaniques spécifiques élevées. Grâce à un compromis idéal rigidité/résistance/légèreté, les composites renforcés par des fibres végétales concurrencent efficacement les matériaux traditionnels contenant des charges ou des fibres minérales.

Ces matériaux font notamment une percée importante dans le domaine de l'automobile en raison de leur légèreté (Comme le cas des stratifiés faisant l'objet de cette étude), ils peuvent même être utilisés dans plusieurs domaines d'application tel que peaux d'un panneau sandwich etc.

*Chapitre 5*  
*Matériaux composites*  
*sandwichs*

## **5.1. Introduction**

L'expérience montre que l'utilisation de matériaux traditionnels homogènes reste limitée à un domaine d'application restreint tributaire des caractéristiques intrinsèques de ces matériaux. De nouvelles perspectives sont apparues avec l'apport des matériaux composites dans tous les domaines. Les matériaux composites doivent répondre aux exigences des contraintes mécaniques imposées, à travers le choix judicieux de renforts et de matrice.

L'utilisation des matériaux composites dans des domaines bien spécifiques (aérospatiale, aéronautique, automobile, navale, isolation, etc.), représente un avantage considérable dans la mesure où, nous pouvons concevoir un matériau composite qui répond aux exigences des contraintes.

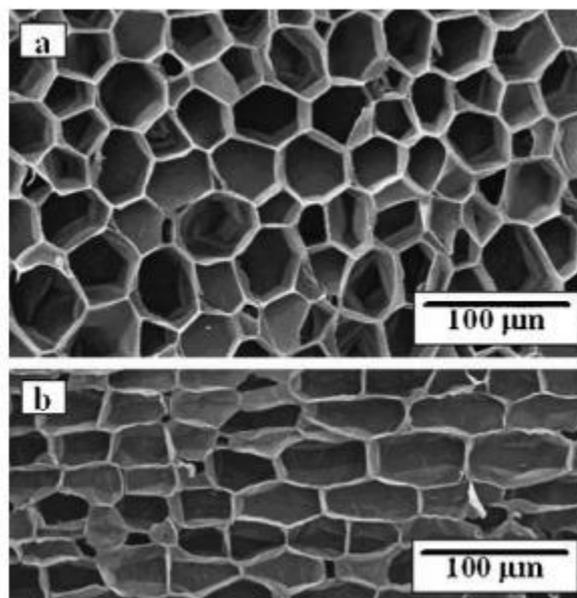
Notre travail qui consiste à étudier des sandwichs, élaborés au niveau de l'unité de recherche (URMPE), constitués de deux semelles en fibres végétal (jute) et d'une âme en liège. Ce choix est justifié par la nécessité de développer des matériaux et des technologies qui prennent en compte les impacts sur l'environnement. Le choix de ces matériaux peut influencer fortement les propriétés mécaniques du matériau élaboré, de plus, les matériaux d'origine végétale utilisés dans cette étude présentent l'avantage d'être biodégradable du point de vue environnement.

Pour étudier le comportement des différents sandwichs ainsi élaborés, nous avons procédé à une investigation expérimentale très riche qui permet de mieux appréhender le comportement. A cet effet, des essais mécaniques statiques (flexion, traction et cisaillement), des essais de caractérisation physico-chimiques ont été réalisés. Dans ce chapitre, on présente les aspects matériaux et les procédés expérimentaux considérés dans notre travail.

## **5.2- Composites sandwichs à base de liège**

Le liège est un matériau cellulaire et ses propriétés uniques, semblent provenir de la combinaison de cellules fermées alignées, prismatiques et leur agencement structurel (figure 1 (a) et (b)). Liège présente une élasticité non linéaire et la compressibilité sans fracture, ce qui fournit un mécanisme de dissipation d'énergie efficace. Outre les propriétés mécaniques, d'autres caractéristiques intéressantes concernent les propriétés thermiques et acoustiques remarquables d'isolation, avec une faible perméabilité au liquide [176,177].

Figure 1 montre l'anisotropie de la structure cellulaire du liège, ce qui implique que ses propriétés seront également anisotropes. Les cellules de liège sont fermées et creux, contenant dans leur intérieur un gaz, probablement similaire à l'air, qui joue un rôle important dans leurs propriétés. Le liège à partir de *Quercus suber* L. a des propriétés particulières telles que l'élasticité élevée et une faible perméabilité ; Ces résultats ont été, au moins partiellement, de sa composition chimique spécifique (et plus particulièrement de celle de la subérine) [178-180].



*Figure 5.1 : Image SEM de la structure cellulaire en liège naturel (après ébullition):  
(a) la section radiale et (b) de la section tangentielle [180].*

Le liège est composé de deux éléments de structure, d'une forme polymère vaste et complexe, ainsi que des composants non structurels. Ces derniers sont classés par extractive et non extractive. Les composants d'extraction sont divisées en des composés analogues à la cire, ce qui influence la perméabilité du liège, et phénoliques, ce qui semblent jouer un rôle protecteur contre les agressions d'organismes biologiques [181].

On estime que 75% du liège récolté est jeté comme un déchet de la production de bouchons de bouteilles perforées de haute qualité. Certains de ces déchets sont broyés en petits granules dont les granules relativement plus grandes sont faites dans des produits semblables à des panneaux d'isolation thermique et acoustique et anti construction vibratic - ou d'autres - fins. Cependant, une grande partie des déchets (20-

25% en poids) reste sous-utilisé parce que les granulés ont une densité non conforme ou sont de très petites dimensions, ou les deux [182].

Comme la production de bouchon liège de bouteille (bouchons en liège naturel) est seulement capable d'utiliser jusqu'à ce que, au plus, 25% de la matière première, les nouvelles applications ont été recherchées. Les granulés de liège sont produits comme sous-produits et des déchets par les industries de transformation du liège qui «bouchons» comme un produit principal. Ces granulés sont de faible densité et peuvent être utilisés comme agrégats légers pour la fabrication de bétons et mortiers avec des propriétés thermique - et acoustique - d'isolation et de déformabilité supérieur. Les composites de liège font partie des dérivés de liège actuels et sont l'un des domaines les plus prometteurs de l'évolution de la technologie de liège. Ils ont été étudiés pour les composites de ciment, avec des avantages environnementaux et techniques. Karade et al. [8] ont étudié la compatibilité des granulés de liège avec du ciment pour la fabrication de matériaux composites à base de ciment légers. Plusieurs qualités de granulés de liège, variant en termes de taille et de densité ont été étudiées et les effets de matières extractibles, de la taille des particules et la densité des granulés de liège ont été étudiés. Les résultats indiquent que ces paramètres influents sur l'hydratation du ciment d'une manière complexe. A des teneurs plus faibles en liège (10% en poids de ciment), seuls les extractibles ont une influence sur le comportement d'hydratation. A des teneurs plus élevées en liège (20% et 30%), la taille des particules et de densité affectent également la compatibilité, en raison de la variation de la surface du bouchon. Les résultats du test d'hydratation a montré que la grande taille (2-3 mm), et la taille moyenne des granules ( $\approx 1$  mm) en liège sont compatibles avec le ciment et peuvent être ajoutés jusqu'à 30% en poids du liant. Cependant, lorsqu'on utilise des granulés fins de grande taille, l'utilisation d'un accélérateur de prise ou d'un prétraitement des grains peut être nécessaire.

Nóvoa et al. [183] ont étudié le comportement mécanique d'un mortier polymère de liège modifié avec différentes résine / sable (à savoir, liant / agrégat fin) des rapports en poids. Les performances mécaniques du mortier de polymère modifié par du liège a été évaluée par des essais de flexion et de compression effectuées à la température ambiante. Dans cette recherche, une diminution linéaire de propriétés n'a été observée en fonction de la teneur en volume de liège (de 0% à 45% du volume cumulé total). Cependant, comme la teneur en liège augmente tout au long de chaque série d'essais, la matière

devient plus ductile, en particulier en compression, et montre l'échec moins fragile. On a également montré que, comparativement avec des matériaux de ciment classiques, le module d'élasticité des mortiers de polymère modifié de liège est très faible, mais le rapport en flexion / résistance à la compression est remarquablement élevée.

Prenant l'avance de la densité et de gaz à haute teneur faible de la structure cellulaire du liège dans la faible conductivité thermique, Panesar et al. [184] ont étudié l'impact du liège utilisé comme remplacement du sable ou de remplacement de la pierre sur le plastique, mécanique, transport, propriétés microstructurales et thermiques du mortier et du béton. Mélanger les variables de conception comprend le pourcentage de liège, la taille du liège et le mélange de liège.

Tous les mélanges de mortier ont été préparées comme 1: 2 mortiers (à savoir 1 partie de ciment pour 2 parties de sable en masse) avec un liant à l'eau (p / b), le rapport de 0,40. Les variables de mélange de mortier et de béton examinés comprenaient le pourcentage de liège en tant que remplacement du sable (0%, 10% et 20% en poids). Panesar et al. [185] ont conclu que la conductivité thermique des composites béton-liège diminue, la densité du béton diminue. Une résistance thermique de 46% supérieure a été mesurée pour les composites en béton-liège contenant 20% du liège par rapport au béton de référence sans bouchon.

La conductivité thermique est contrôlée par le pourcentage du liège utilisé, qui est attribué à la relation directe observée entre la densité du liège et la densité composite béton-liège. Pas de corrélation directe entre la taille du liège et du liège dégradé sur la conductivité thermique a été identifiée. Dans les applications de chaussures, les matériaux de liège sont idéaux pour les exigences techniques de l'industrie de la chaussure et peuvent être utilisés dans la première de propreté/semelles, talons, unique et charges fondent, milieu semelles, revêtements, semelles moulées (applications).

Les études de Lakreb et al [186] ont été basées sur l'élaboration, et la caractérisation thermomécanique et hygrothermique d'un composite sandwich multicouches à base de liège et bois de déroulage ils ont montré que les panneaux sandwichs multicouches innovants à base des produits naturels étaient obtenus à faibles coûts de production, et une empreinte écologique favorable a été élaborée avec placage du bois de pin d'Alep comme peau et deux types de lièges agglomérés (liège expansé et liège aggloméré blanc) avec différentes épaisseurs, ils ont montré aussi que l'aggloméré de liège fournit

un noyau de haute performance en compression perpendiculaire, tandis que les couches de bois protègent l'âme, et améliorent sa résistance mécanique, et Que plus le nombre de couches dans le panneau sandwich est important, plus la résistance mécanique est importante.

Les études de Mir et al [187] ont été basées sur la caractérisation mécanique et hygrothermique des panneaux sandwichs à base de liège aggloméré blanc (moyenne et basse densité), élaborés par une méthode simple et économique (méthode d'infusion). Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence du procédé de fabrication sur les panneaux sandwichs à base de liège en processus d'infusion qui aide les concepteurs à simuler les panneaux de liège lors de la conception des structures. Cette étude a pris en compte l'influence de la présence de résine à l'intérieur du liège agglomère dans le panneau sandwich; il est à noter que la variation de la densité du liège aggloméré et la présence de résine influencent les caractéristiques mécaniques et hygrothermiques des panneaux sandwichs.

Le travail de Sousa-Martins et al [188] a été concentrée sur le composite sandwich avec deux micro-agglomérés de liège composés (MAC) de différentes densités qui sont incorporées comme noyaux dans des structures sandwichs avec des feuilles de surface en alliage d'aluminium 5754-H22. Les échantillons ayant une épaisseur constante des feuilles de surface et différentes épaisseurs de noyau sont testés. Ces structures sont fixées sur un pendule balistique à câble et soumises à un souffle on de set proviennent de la détonation de 30g d'explosif brisant (C) à une distance de séparation fixe (300 mm). Après avoir atteint la limite d'élasticité, le liège présente une région de tension pratiquement constante jusqu'à ce que la densification croissante des déformations soit atteinte, ce qui lui permet d'absorber des quantités considérables d'énergie.

La flexion des feuilles de surface devant et derrière, ont été mesurées, ainsi que la transmission d'impulsion et le mouvement du balancier. Les effets sur la réponse de la structure des épaisseurs et des densités de noyau de base ont été déterminés. Une relation linéaire entre la réduction de l'épaisseur du noyau par rapport à l'épaisseur et de la base initiale est déterminée pour les deux composés MAC.

En général, une diminution de l'impulsion transmise à la structure avec l'augmentation de l'épaisseur de l'âme du sandwich, a été observée. Cependant, ce comportement global n'était pas clair pour tous les échantillons testés. Les valeurs ont été comparées avec l'épaisseur du noyau et de la densité initiale (pour les deux composés de NL20 et TB40) de façon à déduire le comportement de chaque composé. La plupart des

spécimens de faible densité des noyaux ont présenté des valeurs de déviation (à la fois pour les feuilles de la face avant et arrière) plus élevées que celles des échantillons de densité plus élevée.

Une relation linéaire de dépendance a été déterminée entre la réduction relative de l'épaisseur du noyau initial et l'épaisseur des deux composés. À partir du résultant des modes de déformation, il a été possible d'observer que la flexion est probablement la principale déformation du mécanisme possible qui peut être négligée.

Une solution de la structure sandwich-bruit pour le problème du rayonnement réalisé par James Sargianis et al [189], assure une effet synergique qui donne une structure composite sandwich sans bruit, sans sacrifier la performance mécanique ou poids, a été obtenue par couplage de surface des feuilles de fibres de carbone, l'un des matériaux plus résistants qui n'a jamais été fait, avec du liège aggloméré naturel tant que matériau de base qui, conçu de façon optimale, fournit une performance inégalée dans l'acoustique et les vibrations, sans la nécessité de matériel supplémentaire. En outre, le liège aggloméré montre des propriétés thermiques analogues à des mousses synthétiques, ce qui est important dans certaines application industrie aéronautique, aérospatiale. Ceci au impact fort et large dans diverses applications d'ingénierie, comme l'énergie éolienne, l'aéronautique ou automobile, qui peuvent tous sensiblement bénéficier d'une telle solution.

L'étude de La Rosa et al [190] a été concentrée sur l'analyse de la conductivité thermique et l'analyse de l'environnement pour différents matériaux qui sont destinés à être utilisés comme parois externes des bâtiments. L'analyse du Cycle de Vie (ACV) méthodologie a été appliquée pour évaluer les impacts environnementaux de quatre différents systèmes proposés.

Un matériau éco-sandwich contenant liège, fibres de line et résine époxy à base de biomatériaux naturels, a été fabriqué et testé a fin d'évaluer la conductivité thermique. Les résultats de l'ACV montrent que lors que l'éco-sandwich est utilisé, la performance environnementale est plus faible, comparée à d'autres matériaux traditionnels, dans la phase de fabrication. Néanmoins, les impacts dus aux transports du matériel et de l'installation pourraient être réduits en raison de la légèreté et de la manipulation de l'éco-sandwich.

D'après les résultats trouvés, il a été constaté :

-Une faible conductivité thermique permet d'appliquer des enveloppes relativement minces de construction à haute résistance thermique ( $m^2K/W$ ) et à faible coefficient de transmission thermique  $U$  ( $W / m^2K$ ).

-Un faible coefficient de transmission thermique permet d'utiliser moins de matériaux pour la construction du mur, mais les impacts environnementaux évalués dans la phase de fabrication dépendent plus du type de matériel que de leur poids. Néanmoins, les murs et les toitures légères ont l'avantage d'être faciles à monter.

L'installation rapide de structures légères peut réduire le temps de cycle de construction à quatre semaines [191].

Les études de Sanchez-Saez et al [192] ont été examinées le comportement d'impact à grande vitesse de structures sandwichs à base de liège aggloméré comme âme. La performance balistique a été étudiée par des tests impact perforation. Trois types d'échantillons différents ont été testés : liège aggloméré espacé de deux fines plaques d'aluminium, et une paire de plaques minces en aluminium séparées par liège aggloméré comme une âme. Le comportement du liège aggloméré et les effets de l'âme de liège ont été analysés en termes de limite balistique, de vitesse résiduelle, et absorption d'énergie. La limite balistique de structures de liège fourré a légèrement augmenté, tandis que l'énergie absorbée a été fortement augmentée par la présence de l'âme de liège.

Dans ce travail, le comportement balistique de liège aggloméré et son influence dans le comportement de plaques minces en aluminium soumis à grande vitesse les impacts d'un Project de faible masse ont été étudiés. La limite balistique du liège aggloméré est faible, étant environ la moitié de la limite balistique des plaques minces d'aluminium. L'énergie absorbée par le liège aggloméré diminue rapidement une fois la perforation complète de la plaque est produite. En revanche, l'énergie absorbée pour les plaques d'aluminium diminue plus lentement lorsque l'énergie de choc augmente. L'ajout d'une âme de liège à une structure composée de deux plaques minces d'aluminium ne modifie pas les mécanismes de rupture des plaques. Une augmentation de la limite balistique, et, en particulier, de l'énergie absorbée à vitesses d'impact qui causent perforation est observée lorsque le noyau de liège est inclus.

L'objectif de l'étude de Reis et Silva [193] a été focalisée sur l'analyse de la viabilité et le comportement mécanique des différents échantillons en sandwich, avec des faces

carbone/ époxy et de différents types de liège aggloméré comme des noyaux, et les résultats obtenus ont été comparés avec des échantillons similaires en utilisant les noyaux des matériaux courants. Les essais expérimentaux de cisaillement et les essais de flexion trois points ont été menés et les évolutions de la charge-déplacement des courbes des différents agglomérats de liège/ sandwichs ont été analysés et discutés. Les résultats obtenus montrent que des améliorations importantes existent encore dans l'utilisation des matériaux d'âme à base de liège aggloméré.

Dans tous les résultats obtenus, les charges maximales, les contraintes de cisaillement et le module de cisaillement, il existe une relation entre la taille des grains/ densité et le comportement des échantillons de liège aggloméré. Dans tous les essais, les noyaux obtenus, le nid d'abeilles et ROHACELL, beaucoup de valeurs plus élevées que les échantillons de liège aggloméré, indiquent que les noyaux de liège aggloméré doivent être améliorés pour de venir compétitifs en ce qui concerne leurs propriétés mécaniques. Les résultats montrent que les noyaux à base de liège sont adaptés pour une application comme des matériaux de base de type sandwichent, mais ils ne sont pas tous optimisés comme les matériaux utilisés pour la comparaison. Engénéral, la défaillance se produit dans le matériau utilisé pour coller les granulés de liège dans les agglomérés de liège, ce qui signifie qu'il est possible, en développant de nouvelles techniques et de matériaux liants, à améliorer le comportement des noyaux à base de liège aggloméré.

Un procédé breveté pour la production d'agglomérats composites comprenant un groupe fibres et de particules à partir de la fragmentation et/ ou de broyage de déchets, par exemple, des déchets d'emballage constitués par des couches de feuilles en matière plastique/ carton/ aluminium (briques de boisson) et des particules de liège sans ajout de liants externes ; par pressage et de chauffage pendant une période de temps suffisant pour réaliser l'agglomération et la résistance mécanique, a été mis au point .

Ce processus est utilisé, de préférence, avec des déchets d'emballage (par exemple des cartons de boissons, bouchons de liège), mais il peut aussi être utilisé par des déchets industriels. Il a été noté qu'il était possible de produire des matériaux composites intéressants basés sur les déchets urbain sou industriels sans utilisation de liants supplémentaires qui ont un large éventail des caractéristiques avec intérêt pour plusieurs applications. Les nouveaux matériaux composites ont un comportement physico mécanique qui est similaire à ceux des autres matériaux appropriés pour une large gamme d'applications et permettant de prévoient des utilisations comme revêtements de

sol, panneaux de séparation, des meubles et d'autres applications similaires. De nouvelles études sur ces composites sont également prévues, notamment, pour des applications comme matériaux anti-électrostatiques (par exemple, les revêtements de sol pour les salles informatiques) en raison de la présence d'un conducteur électrique (aluminium) et, également, des applications comme matériaux intelligents. Les mesures de la charge isotherme et courants de décharge de cartons liège / boissons composites ont été faites. Les caractéristiques actuelles isothermes et la conductivité des échantillons ont été étudiés dans des conditions de champ électrique, la température et l'environnement (vide et dans l'air à une humidité relative ambiante). Les nouvelles propriétés mécaniques et acoustiques des composite sont également été étudiées afin de comparer avec d'autres matériaux disponibles dans le commerce, également basés dans les composites de liège[194-211].

Un agglomérat des particules de liège avec des agents de liaison thermoplastiques a été Développé pour utiliser la plupart du temps la poudre de liège, les principaux déchets de liège industriel

Des essais ont été effectués en utilisant poudre de polyéthylène (PE) et le polypropylène(PP), avec de la poudre de liège : rapports volumiques thermoplastiques de 04/01et05/01. Faible indice de fusion thermoplastique a été choisi en raison de leurs avantages par rapport aux colles classiques, à savoir, l'absence de solvants et de non-toxicité. Dans le cas de certaines matières thermoplastiques, par exemple, le polyéthylène, le collage des feuilles de revêtement de surface, approprié est possible dans une opération d'agglomération unique. Ces nouveaux composites sont raides et durs et non élastiques, contrairement aux agglomérés de liège, et peuvent être utilisés pour les panneaux dans de multiples applications.

L'utilisation d'autres composants a également été prévue (par exemple les pailles) ; ces techniques et ces produits ont été brevetés [195-202]. Une autre étude de mélanges PP-liège [203] a été réalisée. Une modification de la surface du liège est réalisée afin d'améliorer l'adhérence matrice-bouchon, sur la base d'un traitement d'eau chaude à la température ambiante pendant 1-3 heures, puis séchage (70°C, 3h). La densité diminue en fonction du temps de traitement de l'eau. Les essais de traction de la matrice PP renforcés avec du liège traité, montrent l'importance de cette modification de surface.

Les Compositesde l'hydroxypropyl-cellulose (HPC), d'un polymère biocompatible, de la poudre de liège, le déchet le plus important dans la transformation du liège, offre une

nouvelle classe de matériaux d'intérêt. Films solides étaient préparés avec différentes quantités de poudre de liège (particules < 50 nm) (0.0 ; 0.5 ; 1.0 et 10% en poids / poids) et avec HPC et d'un acide, le 1.4-diisocyanato-butane (BDI) (7.0% p/p). Les films solides ont également été caractérisés par microscopie électronique à balayage (MEB) et une partie nucléation points (~0,3 μm) ont été trouvés [195, 201-204].

L'étude de l'agglomération de granulés de liège à l'aide de plusieurs liants écologiques extérieurs, fondé sur la lignine modifiée, par les conditions de fonctionnement (pression, chaleur et temps), qui ne suffit pas pour accomplir une bonne agglomération, a été réalisée par [205-206]. Certains des liants utilisés dans la composition de liège peuvent provoquer des problèmes toxicologiques (par exemple formaldéhyde) et outre cela, la production de liège aggloméré à base de poudre de liège est difficile, voire impossible, en raison de son énorme surface ; la découverte d'une technique d'agglomération pour pallier ces inconvénients serait très importante.

Les travaux scientifiques [207, 211] ont été basés sur des traitements préalables de la poudre de liège pour la subérine, polymérisation a été réalisée en utilisant en alternance les solutions alcalines et acidification suivies d'un processus d'élimination de la phase liquide jusqu'à un degré suffisant d'acidité sont obtenus. Par la suite, un pressage à chaud de cette matière séchée a été effectuée à l'aide de plusieurs moyens de remplacement et des conditions de fonctionnement, pour la polymérisation des constituants chimiques de liège qui fonctionnent comme des agents de liaison, afin d'avoir un produit de liège aggloméré à base de poudre de liège.

Le traitement de la poudre de liège peut être obtenu par hydrolyse alcaline dans l'eau ou dans l'alcool qui peut être aussi mélangé avec d'autres composants, avant l'étape de pressage. Les matériaux issus sont rigides et ont une masse volumique d'environ 1000 kg.m<sup>-3</sup>.

Une étude japonaise [208] est basée sur l'affirmation d'un matériau résine synthétique avec de liège. Ce matériau est formé par l'empilement d'une couche de résine oléfinique de synthèse contenant de la poudre de liège, une couche de corps en mousse de résine synthétique oléfinique et une couche de résine à l'intérieur ou sur la surface inférieure de la couche de corps de mousse. Au moins, un copolymère d'éthylène-oléfine en est compris dans la couche de résine oléfinique de synthèse contenant de la poudre de liège et dans la couche de résine synthétique du corps de mousse oléfinique.

D'autres matériaux peuvent être mentionnés d'après [209]. Une couche de mousse de résine de polyoléfine, une couche adhésive et une couche fibreuse sont successivement stratifiées sur une couche de résine contenant une résine de polyoléfine. La poudre de liège contenant du stratifié de résine de polyoléfine peut être utilisée comme un élément de construction avec d'excellentes propriétés physiques, propriétés antitaches, propriétés d'amortissement, propriétés isolantes et une bonne adhérence à un matériau de base en bois.

Les travaux d'Hernandez-Olivares [210] ont été basés sur une analyse expérimentale sur un nouveau matériau composite liège/gypse, il est montré que le liège et le plâtre sont compatibles entre eux, et que beaucoup de nouveaux matériaux de construction peuvent être élaborés en mélangeant les matériaux dans différentes fractions volumiques. Il existe une bonne interaction entre la matrice de gypse et de granulés de liège. Néanmoins, il apparaît que les propriétés mécaniques de ce nouveau matériau composite sont pauvres, en règle générale, et d'autres agents de renforcement (par exemple fibres de verre) sont nécessaires pour augmenter les résistances à la flexion et à la compression de ces composites ; les propriétés d'isolation sont très bonnes, suite à des essais de conductivité thermique.

Ce nouveau matériau composite est suggéré pour l'utilisation dans la création d'application, comme cloisons.

En ce qui concerne les caractéristiques d'isolation acoustique, ce composite est un matériau non absorbant le bruit, mais c'est un réfléchissant. Il est semblable à des plaques de plâtre pour plafonds et murs des cloisons, et il faut un certain type de perforation pour se comporter comme un matériau de construction absorbant du son et du bruit.

Un brevet japonais [211] a été basé sur un développement d'un panneau de liège/charbon. Le matériau solen liège est moulé en une feuille comme la forme d'un liant à base de résine et poudre de charbon de bois ou de particules et incorporé dans la feuille de liège. Ce matériau présente non seulement d'excellentes propriétés d'isolation thermique, les propriétés élastiques, les propriétés antimites, sonores propriétés absorbantes et perméabilité à l'air, mais aussi des effets commune action de déshumidification, une action désodorisante, et un ion négatif dont la libération améliorer la santé des utilisateurs.

Les travaux de [212] ont été étudiés deux types de formulations de mortier, avec différents rapports de poids, résine/sable (c.liant/agrégatfin). Dans chaque série, le liège varie de 0% à 45% du volume total cumulé. Les essais de flexion et de compression ont été effectués. À la fois, l'influence de la fraction volumique de liège et le rapport pondéral résine/sable ont été considérés par rapport à la tenue mécanique des mortiers de polymère modifié de liège. Une diminution linéaire a été observée dans les propriétés en fonction de la teneur en volume de liège. La faible densité de liège modifie les mortiers et conduit à une perte lisse des propriétés spécifiques. Les résultats conduisent à des bétons légers de polymères modifiés, avec une ductilité améliorée de compression.

Des essais en laboratoire ont été effectués [213] sur deux mélanges bitumineux contenant du caoutchouc ou du liège granulé et ont été comparés à celle d'un mélange classique.

Les mélanges ont été conçus pour intégrer une partie des déchets d'autres industries, en réduisant leur élimination dans les décharges, en modifiant les propriétés mécaniques des mélanges, ils pourraient contribuer à réduire le bruit d'interaction pneu-route et, donc favoriser la durabilité des revêtements. Des résultats mécaniques plus durables en comparaison avec d'autres mélanges étudiés ont été trouvés et, d'autre part, une meilleure adhérence entre les particules de liège et le bitume en raison de la structure alvéolaire des particules de liège, a été observé

Une étude [214] sur les effets des charges, à base des matériaux, notamment, du liège, de la résine de polyuréthane pour l'isolation passive roulement, a été réalisée. Une série de remplissages de liège constituée, réticulé, polyuréthane moulé (PU) de base de polyéthylène, a été synthétisée. Les propriétés mécaniques et thermiques ont été examinées dans les matériaux composites qui ont entre 1 et 15% de liège.

Les propriétés mécaniques des composites ont été trouvés, elles dépendent principalement de la quantité de la charge. L'addition de la charge de liège dans des composites de polyuréthane donne une augmentation du module d'Young et une diminution de l'allongement à la rupture.

Ce nouveau matériau composite polyuréthane liège avec de meilleures propriétés d'amortissement, peut être utilisé comme un tampon d'appui pour l'isolation acoustique et vibration, pour les lignes de chemin de fer / métro.

Le liège a une gamme limitée de variation des propriétés, en raison de sa morphologie et de structure définie - avec seulement des variations mineures, telles que décrites ci-dessus. Par conséquent, il pourrait ne pas être possible d'obtenir la vaste gamme de propriétés possibles avec, par exemple, le polystyrène expansé (EPS), polyuréthane (PU) ou en polyéthylène (PE) mousses, produits industriellement. Ainsi, il est intéressant de comparer les propriétés du liège avec celles d'autres mousses naturelles et synthétiques.

Le PSE est un polymère thermoplastique, de mousse rigide et résistant, à cellules fermées, consistant essentiellement en 98% d'air. Il est généralement blanc et de perles de polystyrène pré-expansées, présentant des propriétés remarquables d'isolation thermique. perles EPS sont un type d'agrégat non-absorbant ultra-léger artificielle [215]. À première vue, on pourrait conclure que le liège naturel a un comportement mécanique pauvre en comparaison avec d'autres types de matériaux de base, tels que les mousses synthétiques comme il est le cas des EPS, qui peut être produit avec différents niveaux de densité. Toutefois, pour certaines 5 applications particulières, le liège peut entrer en compétition avec ces matériaux. En fait, sa faible conductivité thermique combinée à une résistance à la compression raisonnable en fait un excellent matériel à des fins d'isolation thermique, ainsi que pour les applications dans lesquelles des charges de compression sont présents (Figure 3). Par rapport aux mousses synthétiques, ses propriétés acoustiques sont également importantes. Les meilleurs matériaux en termes de conductivité thermique par rapport résistance à la compression chutent dans le coin inférieur droit de la figure 3, où peut être remarqué que le liège réalise de façon similaire à des mousses de polymères rigides synthétiques [216].

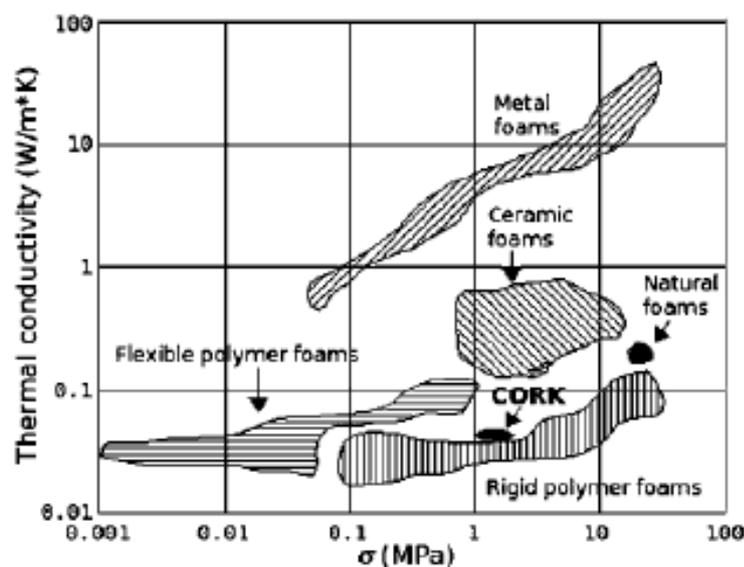


Figure 5.2 : Choix des matériaux graphique comparant la conductivité thermique avec résistance à la compression [217].

La réduction de la consommation d'énergie dans le secteur des bâtiments est une mesure importante pour aider à réduire la dépendance énergétique.

A cet effet, Plusieurs études ont étudié l'impact thermique des ponts sur la performance énergétique d'un bâtiment ou dans la santé des occupants en raison des effets de condensation. A titre d'exemple, Theodosiou et Papadopoulos [218] ont étudié un immeuble de trois étages typique avec un espace rez-de-chaussée ouvert et un toit plat; les façades sont composées de deux couches de briques avec isolation intercalée (5 cm polystyrène expansé). L'étude montre que la correction thermique des ponts, principalement effectuée par la mise en place d'une couche de 3 cm de polystyrène extrudé sur la surface extérieure des poutres et des piliers en béton, peut réduire la charge annuelle de chauffage de la construction d'environ 30%; au contraire, son effet sur la charge de refroidissement est négligeable.

Dans le contexte de rénover des maisons, Roberts [219] traite de la relation entre la qualité et l'humidité de l'air, en commentant le courants d'air et que lorsque les vieilles fenêtres sont remplacés par de nouveaux types scellés de fenêtres, la teneur en humidité de l'air intérieur augmente. Cela devient critique lorsque les températures de surface tombent si bas, comme autour des ponts thermiques, où l'humidité relative monte localement à 80% ou plus, la production de la condensation et de l'humidité associée. Ces effets de condensation peuvent également se produire dans des poutres ou des

pilliers et de la prévalence des symptômes du syndrome de malsains (SBS des bâtiments) peuvent survenir.

Dans [220], il a présenté une étude où il est analysé comment les membres d'États de l'Union européenne font leurs procédures de calcul thermiques dans beaucoup de ponts. Il est montré que tous les pays du Nord et en Europe centrale font face à ce problème en ce qui concerne les nouvelles constructions. Ce n'est pas le cas pour les projets de rénovation. Le problème thermique des ponts, apparaissant par exemple à la jonction entre deux éléments isolés séparément, ou entre un élément vertical et un horizontal, ne sont pas toujours correctement pris en compte.

L'analyse de l'impact thermique des ponts doit être faite et le développement d'une meilleure isolation des mortiers est nécessaire, à faible coût ce qui les rend facile à appliquer. Le principal défi présenté dans le travail de ANA Bras [221] consiste à développer un mortier de rendu avec une conductivité thermique plus faible, capable de réduire les effets des condensations, avec le liège ou EPS dose maximale que possible, tout en minimisant les changements de coûts par rapport aux mortiers EPS. Ainsi, il était nécessaire de définir les exigences pour cette conception de mortier.

Les exigences qualitatives relatives aux mortiers développés sont les suivantes :

- ♣ Présenter le plus haut pourcentage de liège / EPS possible.
- ♣ Avoir un temps ouvert supérieur à 30 minutes ;
- ♣ Bonne ouvrabilité présente pour rendre l'application des mortiers ;
- ♣ Avoir la compression appropriée et des propriétés de résistance à la traction ;
- ♣ Présente une conductivité thermique plus faible, le retard thermique plus élevée et de fournir une bonne résistance thermique lorsqu'elle est appliquée en couche sur une surface extérieure de la paroi.

Ce mortier cimentaire de haute performance a été développé en utilisant le remplacement partiel du sable par un déchet de liège (ou EPS), en présence d'un réducteur d'eau à haute gamme (de HRWR). Ainsi, l'enquête en cours compare également l'effet de différents niveaux de remplacement des déchets de liège (et EPS) sur les propriétés des mortiers de ciment, à savoir dans son évolution de la microstructure avec le temps.

Dans notre étude on s'intéresse à L'élaboration des panneaux sandwichs à âme en liège aggloméré blanc de moyenne densité produit en Algérie, par deux méthodes (par

pression et par la méthode de sac) et à la caractérisation mécanique de ces panneaux sandwichs

Le but de la caractérisation mécanique est d'identifier expérimentalement le module de cisaillement de ces plaques de liège et de voir l'influence de leur densité ainsi que la présence de résine dans le matériau sur leurs caractéristiques intrinsèques et leurs comportements mécaniques.

### 5.3- Présentation du liège aggloméré blanc

La transformation du liège naturel se fait au sein l'Entreprise Nationale des Lièges dénommée *Taleza Lièges* située à l'Est de l'Algérie. Cette entreprise produit des panneaux de liège aggloméré blanc de moyenne densité (granulés utilisés : 1 à 2mm, 2 à 3mm, 3 à 5mm) et de basse densité (granulés 4 à 16mm), et ceci, pour différentes épaisseurs allant de 2mm jusqu'à 30 mm en fonction de leurs applications industrielles. Nous présentons dans ce qui suit les différents types de panneaux de liège aggloméré blanc fabriqués par cette entreprise. Le liège utilisé dans notre travail est un liège aggloméré blanc de moyenne densité.

#### 5.3- 1 Liège aggloméré blanc moyenne densité

Le liège aggloméré est obtenu à partir de granulés de liège comprimés dans un autoclave et traversés par un écoulement de vapeur d'eau à 350°C qui lance l'agglomération des granulés [222]. Plusieurs études scientifiques sont faites, elles portent en grande partie sur le liège aggloméré noir produit du Portugal.

Le liège de faible densité due essentiellement à la quantité d'air élevée contenue dans les cellules possède un maximum de pouvoir isolant. [223]. En fin plusieurs études industrielles sur le liège transformé sont réalisées mais dans un cadre beaucoup plus commercial.

Le liège aggloméré blanc de moyenne densité est obtenu à partir de granulés de 1 à 5mm. La colle utilisée est du polyuréthane alimentaire. Les caractéristiques fournies par l'entreprise nationale des lièges sont les suivantes :

- Densité : 180 à 270kg /m<sup>3</sup> ou 20kg (données à titre indicatif vu les différents types de granulés utilisés 1/2, 2/3 et 3/5)
- Allongement: 5%,
- Comportement aux rayons solaires : Léger jaunissement après une année d'exposition,

- Résistance aux acides: (Après une heure dans l'acide chlorhydrique concentré fumant) avec une concentration massique d'acide chlorhydrique de 201.19gr/ litre : aucune désagrégation de l'aggloméré,
- Résistance à l'eau bouillante durant trois heures : aucune désagrégation,
- Effet d'isolation : isolation thermique et phonique,
- Résistance au feu : brûle difficilement,
- Dimensions : 1028x514x2 à 30mm, 500x500x2 à 30mm.
- Stabilité dimensionnelle: Bonne stabilité,
- Variétés: Gamme assez variée.

#### **5.4-Présentation d'une structure sandwich**

Généralement, on distingue deux types de matériaux composites structuraux: les stratifiés et les sandwichs. Les stratifiés sont formés de plusieurs couches élémentaire s'appelées monocouches. En effet, les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite, et sont formées d'une matière plastique (résine) renforcée d'un matériau fibreux (renfort). Les divers types de monocouches sont définis par la forme du renfort: à fibres longues (unidirectionnelles UD ou réparties aléatoirement), à fibres tissées, ou à fibres courtes. La superposition de plusieurs monocouches dans la direction de l'épaisseur permet d'obtenir une structure composite stratifiée. Un choix approprié de la séquence d'empilement ou autrement de l'orientation propre de chaque pli, confère aux structures composites stratifiées certaines caractéristiques mécaniques spécifiques importantes. Par ailleurs, l'idée d'insérer un matériau moins dense entre deux peaux en composites stratifiées, autrement dit, la construction sandwich, a permis d'améliorer davantage la rigidité en flexion des matériaux composites.

#### **5.5-Les constituants d'un matériau sandwich :**

Le concept de sandwich est une technique bien établie de construction qui combine le poids avec la rigidité et la force. On peut dire que, le sandwich est constitué d'un matériau de faible masse volumique (mousse) sur le quel sont collées deux semelles minces en matériau plus fort et plus rigide. La figure 5.3 présente les différents éléments constitutifs d'un matériau composite en construction sandwich.

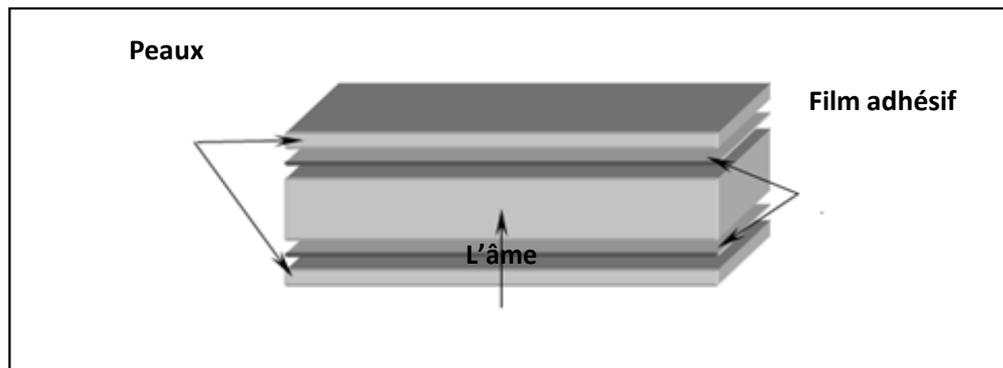


Figure 5.3. Présentation d'un sandwich

Les peaux (ou semelles) doivent résister aux moments de flexion. Elles peuvent être de plusieurs natures: en métal, en stratifié, en bois (contreplaqué) ou encore en plaque thermoplastique. Le choix de la nature de la peau s'effectue principalement en fonction des performances mécaniques exigées. Mais généralement, une rigidité élevée et une excellente résistance à la compression et à la tension sont les principales qualités recherchées [224].

L'âme, l'élément central d'une structure sandwich, est généralement un matériau ayant de faibles caractéristiques mécaniques. Elle a pour rôle de résister aux contraintes de cisaillement engendré ensuite au mouvement de glissement des peaux sous charge, et de maintenir leur écartement. En effet, si l'épaisseur des panneaux n'est pas maintenue constante, il en résulte une diminution des capacités des peaux externes à résister à la flexion [225]. L'âme est souvent épaisse et de faible masse volumique. L'épaisseur élevée de l'âme a pour but d'accroître le moment d'inertie du panneau sans augmenter la masse volumique. Comme le montre la figure 5.4, une structure sandwich d'épaisseur «4.t» est 37 fois plus rigide que celle d'épaisseur «t», pour seulement une augmentation de 6% de son poids. Les types d'âmes les plus utilisés dans le Secteur industriel sont: le bois de balsa, les nids d'abeilles et les mousses en polymères rigides.

L'effet de l'épaisseur de l'âme sur la rigidité en flexion d'une structure sandwich voir figure.

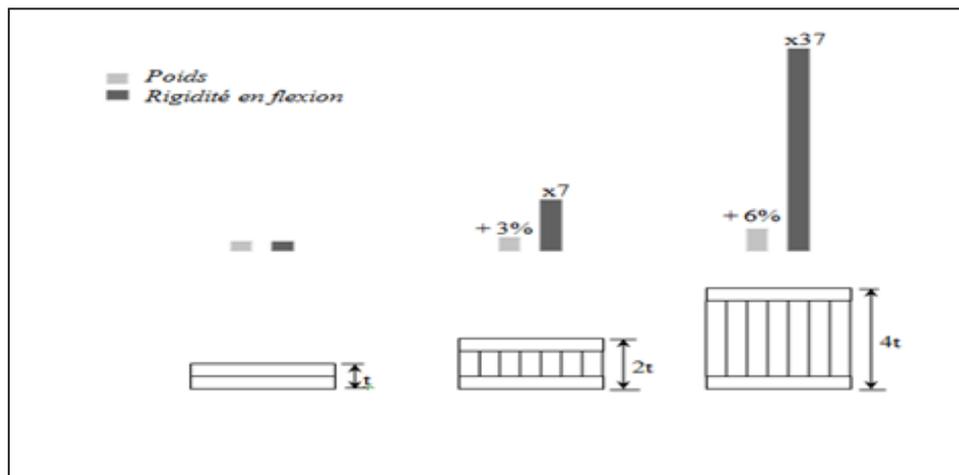


Figure 5.4. L'effet de l'épaisseur de l'âme sur la rigidité en flexion d'une structure sandwich.

L'élément tertiaire, dont l'importance est jugée également cruciale, est le film adhésif. Ce film crée la liaison entre l'âme et les peaux. Cette liaison doit être continue, sans porosité et d'épaisseur constante. Par ailleurs, une capacité suffisante pour s'opposer à la déformation est nécessaire afin de transmettre des sollicitations mécaniques. Mais, aussi, elle doit être suffisamment élastique pour absorber et atténuer les impacts [226]

Les différentes natures de matrices et renforts utilisées dans l'élaboration des sandwichs composites sont comme suit :

Les âmes

Dans les matériaux sandwichs, l'âme doit être constituée d'un matériau ayant une faible masse volumique et de bonnes propriétés en cisaillement (figure 5.4), afin de transmettre les contraintes de traction-compression exercées sur le sandwich. Pour les âmes creuses, les nids d'abeilles, sont généralement utilisées dans les structures à hautes performances mécaniques.

Elles ont des performances relativement élevées mais un coût de fabrication onéreux. Pour âmes pleines, les mousses ou le balsa, sont utilisées dans réalisation des structures sandwichs plane ou courbées, avec un rapport performance-prix relativement élevé. Les différents types d'âmes qui existent sur le marché sont :

Les mousses: utilisées en grande quantité, elles sont élaborées à partir de polychlorure de vinyle, polystyrène, polyuréthane ou d'autres polymères synthétiques. Les masses volumiques de ces dernières varient de 30 à 300 kg/m<sup>3</sup> et leurs épaisseurs de 3 à 40 mm

[227]. Leurs propriétés mécaniques sont bonnes, elles adhèrent bien à la résine et absorbent peu d'eau. Néanmoins leur point faible réside dans une faible résistance à l'impact.

Le bois: il est utilisé pour sa très bonne résistance à la compression notamment pour les supports d'accastillage. Le balsa est la variante la plus utilisée pour sa légèreté:  $100\text{kg/m}^3$  de masse volumique. L'inconvénient du matériau bois est sa porosité.

Le nid d'abeilles: c'est une structure hexagonale, élaborée à partir de différents matériaux, comme le papier et l'aluminium. Ses caractéristiques mécaniques dépendent du matériau et de la taille des cellules. Sa masse volumique varie de  $15$  à  $100\text{kg/m}^3$  et son épaisseur de  $3$  à  $50\text{mm}$ . Il admet des courbures modérées, alors les propriétés mécaniques changent selon l'orientation. Le collage peut aussi être un problème, car il se réalise sur la tranche de la structure. Les propriétés des nids d'abeilles sont excellentes, mais leurs difficultés résident dans leurs formations ainsi que leurs prix élevés. Les variétés les plus utilisées sont le Nomex et le Korex fabriquées à partir de Kevlar.

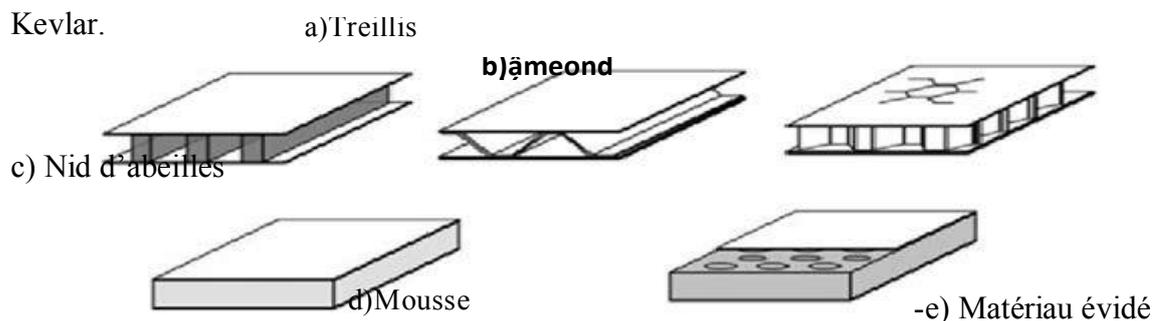


Figure 5.5. Différentes natures d'âmes

#### a) Les Peaux :

Les peaux des sandwichs sont généralement constituées de fibres (mat ou tissu) enrobées d'une matrice à base de résine. Il existe plusieurs types de fibres parmi lesquelles, on trouve :

Les fibres de verre, Les fibres de Kevlar ou aramide et les fibres de carbone

### 5.6-. Modes de dégradations des sandwichs

Les modes de rupture des structures sandwichs soumis à la flexion sont différents, d'où il est nécessaire de cerner ces modes de ruptures [228-233].

#### i. Flambement généralisé des peaux :

Une poutre sandwich soumise à la compression peut céder sous l'effet de conditions d'instabilité (Figure II.4). Le flambement généralisé peut avoir lieu si les contraintes dans les peaux et dans l'âme sont inférieures à leurs résistances à la rupture respectives. Le flambement du sandwich dépend des paramètres liés à ces dimensions, sa rigidité en flexion, la proportion de l'épaisseur du sandwich (peaux et l'âme) et le module de cisaillement de l'âme. Afin de remédier au problème du flambement généralisé, il est nécessaire d'avoir des peaux ayant un module d'élasticité élevé, d'augmenter l'épaisseur des peaux et l'épaisseur de l'âme.

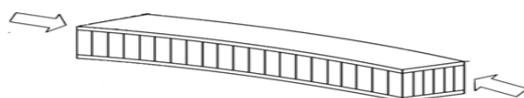


Figure 5.6. Flambement généralisé des peaux du sandwich [234].

**ii. Rupture des peaux en traction ou en compression :**

Dans ce cas, les contraintes dans les peaux sont supérieures aux contraintes admissibles du matériau constituant les peaux (Figure II.5). Afin d'éviter ce phénomène, il faudrait utiliser des matériaux dont les contraintes à la rupture sont plus élevées et augmenter l'épaisseur des peaux (ce qui réduit les contraintes appliquées), ou augmenter l'épaisseur de l'âme (ce qui permet également de réduire les contraintes dans les peaux). En général, on augmente l'épaisseur de l'âme. Par contre, si l'âme est plus rigide, elle n'affecte pas les contraintes dans la peau.

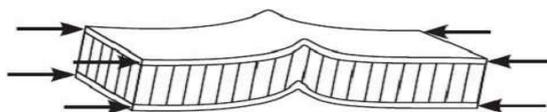


Figure 5.7. Rupture des peaux en traction ou en compression [184].

**iii. Modes locaux de rupture :**

Le mode de rupture locale est dû à une concentration de contraintes suite à l'application d'une charge localisée ou à l'appui de type ponctuel ou linéique (Figure 5.8).

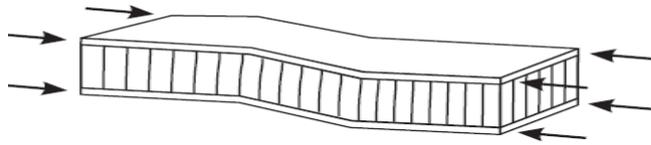


Figure. 5.8. Modes locaux de rupture par indentation [234]

iv. **Rupture de l'âme par cisaillement :**

Si la contrainte de cisaillement (prépondérante dans l'âme) dépasse la résistance au cisaillement du matériau constituant l'âme, il y a rupture de l'âme (Figure. II.7). Pour cela, on peut soit utiliser un matériau qui possède une résistance au cisaillement plus élevée, soit augmenter l'épaisseur de l'âme.

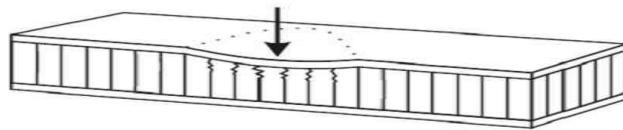


Figure. 5.9. Rupture de l'âme par cisaillement [234]

v. **Flambement généralisé de l'âme ou « crimping » :**

Le flambement généralisé prend la forme du flambement de l'âme, Si le rapport longueur/épaisseur est relativement faible, et que la rigidité de cisaillement est négligeable devant la rigidité de flexion. Le flambement de l'âme ne dépend pas des propriétés des peaux ; par contre, il augmente de façon linéaire avec l'épaisseur de l'âme et le module de cisaillement de l'âme. Pour augmenter la résistance à cette charge critique, il faut donc soit augmenter l'épaisseur de l'âme, soit utiliser une âme avec un module de cisaillement plus élevé (figure. II.8).

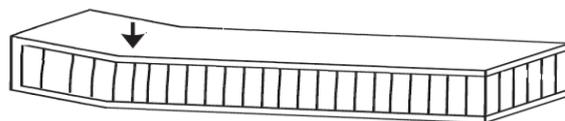


Figure 5.10. Flambement généralisé de l'âme du sandwich [234]

vi. **Flambement localisé, « wrinkling » :**

L'âme empêche le flambement du sandwich, car les peaux considérées sans connexion avec l'âme, flambent très facilement à cause de leur faible épaisseur. Cependant, si on atteint la contrainte limite, il se peut que l'âme ne soit plus capable d'empêcher le flambement. Dans ce cas, le flambement localisé des peaux, ou « wrinkling » (Figure II.9), se produit.

Contrairement au flambement généralisé, le flambement localisé peut prendre des configurations différentes qui ne résultent pas de la géométrie de la structure. Par contre, il dépend des modules élastiques des peaux et de l'âme, et le module de cisaillement de l'âme.

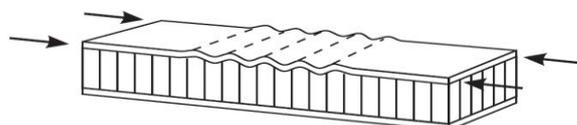


Figure 5.11. Flambement localisé « wrinkling » [234]

### 5.7 - Dégradation de l'adhésif :

La dégradation de l'adhésif est répartie en trois types :

- Dégradation de l'adhésif entre les peaux et l'âme,
- Dégradation de l'attachement des cellules de l'âme,
- Dégradation de l'attachement du nœud des cellules de l'âme.

La Figure 5.12 montre les différents modes de dégradation de l'adhésif. Ces modes de dégradation de l'adhésif sont provoqués essentiellement par leurs expositions à l'humidité. Cette dégradation conduit à la ruine avancée du panneau sandwich.

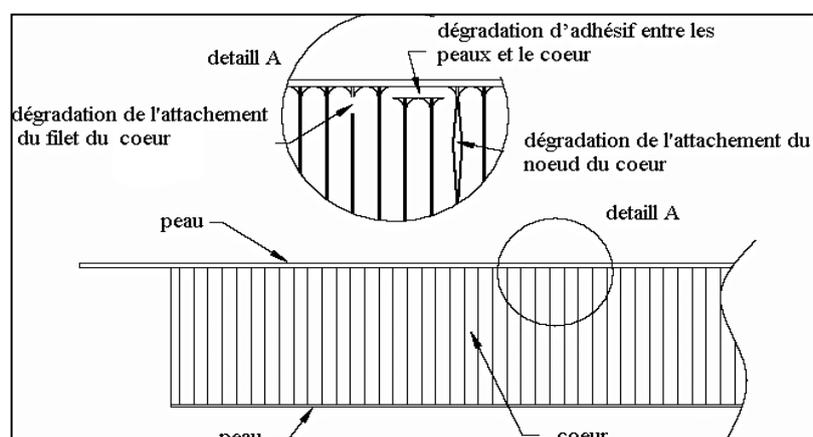


Figure 5.12. Type de dégradation de l'adhésif

### 5.7 - Elaboration de plaques sandwichs à âme en liège et peaux en jute/polyester et jute/époxy :

Les plaques de liège utilisé comme noyau dans les panneaux sandwichs ont un épaisseur de 10, 20 et 30 mm. Le liège brut a été obtenu à partir de la forêt de Skikda, en Algérie) et a été transformé dans les agglomérés de liège à l'usine industrielle " Taleza liège " .

Les agglomérés de liège étaient produits avec des granulés de liège avec des fractions granulométriques de 1-2 mm, 2-3 mm et 3-5 mm, en utilisant comme adhésif une qualité alimentaire résine de polyuréthane, et couper en planches rectangulaires avec une longueur et la largeur de respectivement 1000 mm et 500 mm, les agglomérats de liège ont une masse volumique de 280 kg/m<sup>3</sup> et une conductivité thermique (k) de 0.0375 (W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>).

Trois types de panneaux sandwichs à âme en liège et à peaux en jute/polyester est trois types de panneaux sandwichs à âme en liège et à peaux en jute/époxyde ont été produits

- SLJP30 : sandwich à noyau de liège aggloméré blanc de 30 mm d'épaisseur entre deux peaux de stratifiées jute/polyester.

- SLJP20 : un noyau en liège aggloméré blanc de 20 mm d'épaisseur.

- SLJP10 : un noyau en liège aggloméré blanc de 20 mm d'épaisseur.

- SLJE30 : sandwich à noyau de liège aggloméré blanc de 30 mm d'épaisseur entre deux peaux de stratifiées jute/époxyde.

- SLJE 20 : un noyau en liège aggloméré blanc de 20 mm d'épaisseur.

- SLJE 10 : un noyau en liège aggloméré blanc de 10 mm d'épaisseur.

Les plaques de lièges agglomérés blancs utilisés comme âme de sandwich sont découpées aux dimensions 300 x 300 mm suivant la norme NF T 57-105 équivalente à la norme ASTM D 790-84a.

Plusieurs types de plaques de liège aggloméré sont découpées et pour différentes épaisseurs (10, 20, et 30mm).

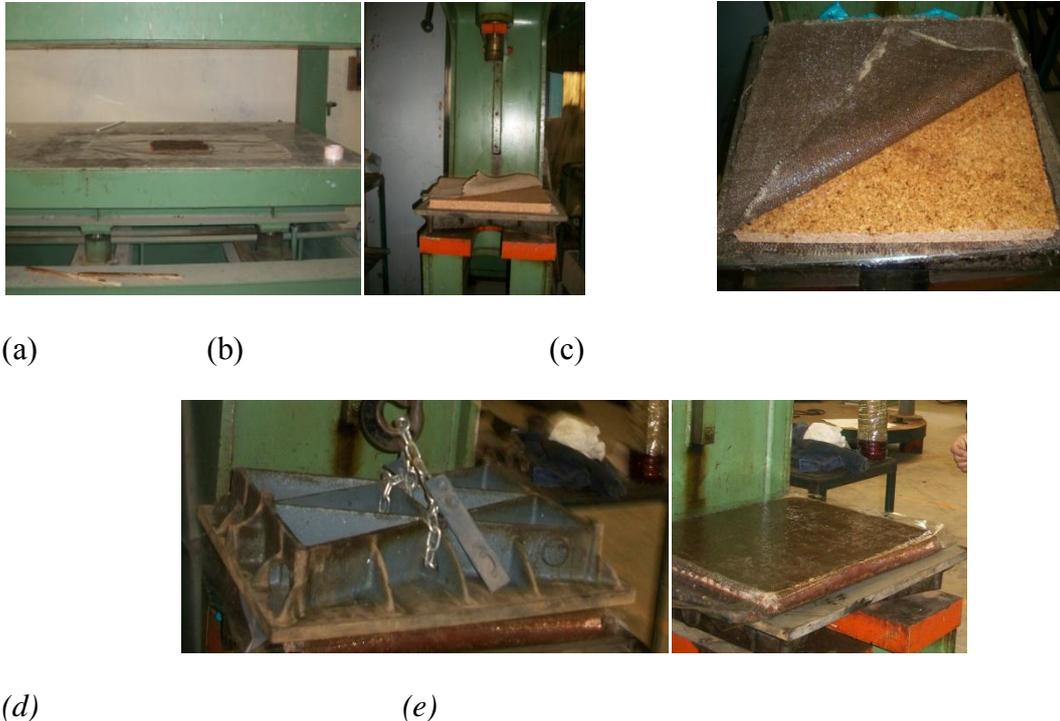
Le renfort composé de tissu de jute est découpé dans le sens de coupe aux dimensions de 300 x 300 mm. Trois nappes de tissu disposées à 0° constituent le renfort de la peau.

On cite en dernier l'élaboration des plaques composites par infusion (sous vide) avec ce procédé qu'on a élaboré nos plaques au niveau de la compagnie d'air Algérie et c'est d'ailleurs ce qu'utilise les techniciens de la compagnie pour leurs divers travaux.

#### ***a- Elaboration des panneaux sandwichs par pression :***

L'élaboration des sandwichs liège /jute/polyester est réalisée par compression à l'aide d'une presse hydraulique équipée de plaques chauffantes à température variable, la

pression exercé est de  $28\text{Kg/cm}^2$ . avec une température de  $\approx 80^\circ\text{C}$  pendant 01 heure (Fig.2.). le tissu est préparé et découpé déjà aux dimensions  $300 \times 300\text{mm}$ . les séquences d'empilement étudiées sont de type  $[0^\circ/90^\circ]_3$ ,



La Figure 5.13.(a) et (b). Presse Hydraulique ; (c). Plaque préparée pour le pressage ;  
(d) moule supérieur ;(e) plaque pressée.

La plaque obtenue, de dimensions de  $300 \times 300\text{ mm}$ , est mise dans une étuve à  $80^\circ\text{C}$  pendant huit heures afin d'améliorer le taux de réticulation. Ou bien on peut lissée la plaque 30 jours même -plus) ou en repos avant d'être découpées selon la norme AFNOR NF T 57-105 pour faire les essais mécanique.

#### ***b- Elaboration par infusion (sac à vide)***

L'élaboration des sandwichs par infusion ou à sac vide et s'effectue en plusieurs étapes .les plaques obtenus sont constituée de 4 couches en tissu de jute imbibé de la résine époxyde et une âme en liège aggloméré. Les plaques restent sous dépression de pompe (Figure 5.14) jusqu'à la vitrification complète de la matrice ;



Figure 5.14 : Dépôt de la résine sur le liège et sur le tissu de jute.

Cette opération s'effectue en plusieurs étapes :

- Poser un film de mise sous vide qui est un nylon vert spécial pochette (résistant à une température de 205°C) sur une plaque plane et on le fixe à l'aide d'un ruban adhésif.

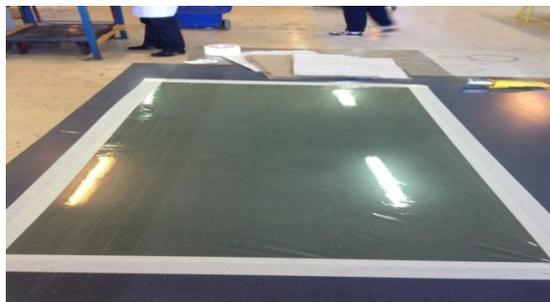


Figure 5.15 : Pose et fixation du film de mise sous vide

- Déposer sur le plan de travail le tissu de jute.
- Étaler la résine sur le tissu de jute.
- Déposer l'âme du Sandwich sur le tissu.
- Déposer les autres couches du tissu une par une, tout en déversant de la résine et en étalant sur toute la surface.
- déposer dessus un film séparateur perforé.
- Poser dessus un tissu appelé : tissu d'arrachage
- Poser Le feutre de drainage appelé aussi tissu de pompage.- L'ensemble est ensuite couvert par un sac à vide. Un tuyau de pompage est mis entre le sac à vide et le tissu de pompage
- Fermer hermétiquement le sac à vide avec un mastic d'étanchéité sous forme d'un ruban adhésif souple et pâteux.

- L'opération de mise sous vide est lancée, elle consiste à pomper l'air et récupérer le surplus de résine qui va finir dans le tissu de pompage (Fig. 5.16).

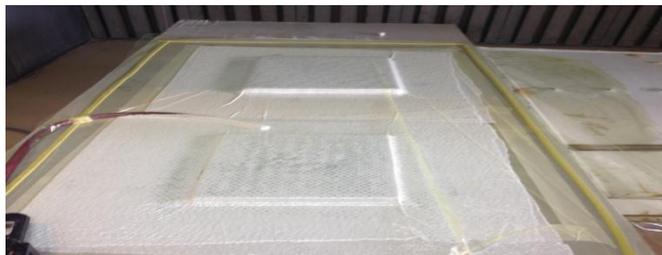


Figure 5.16 : Début du processus de pompage

- Chauffer les plaques Afin que la résine polymérise d'une façon uniforme sur toute la surface de des plaques



Figure 5.17 Placement du pistolet chauffant

- Après polymérisation on procède au démoulage.

Une fois le panneau sandwich élaboré, la polymérisation pour ce type de résine peut se faire à température ambiante durant 7 jours ou à 50°C pendant 15 heures ou à 80°C pendant 8heures. Nous avons choisit un durcissement (polymérisation) de 8heures dans une étuve portée à 80°C.

La découpe des échantillons de sandwichs est effectuée à l'aide d'une scie circulaire suivant la norme AFNORNFT54-606(1987). Le tableau 4.1 représente les dimensions des différents échantillons de sandwichs suivant leurs épaisseurs.

**Tableau5.1 : Dimensions normalisées des différents échantillons de sandwichs.**

Epaisseur sandwich h (mm)	Longueur totale L (mm)	Longueur entre appuis l (mm)	Largueur b (mm)
$h:16m$	300	280	40
$h:26mm$	300	280	40
$h:35mm$	460	435	50

La figure 4.9 représente des échantillons de sandwichs jute-époxy-liège de différents types et d'épaisseurs destinés aux essais de flexion trois et quatrepoints.



Figure 5.18 : Échantillons de sandwichs découpés suivant la norme AFNOR NF T 54-606.

## 5.8 - Caractérisation mécanique

La caractérisation mécanique des échantillons panneaux sandwichs est effectuée à travers plusieurs essais. Ces essais ont été effectués à l'Unité de recherche Matériaux, Procédés et Environnement (UR-MPE) de l'Université de Boumerdès, Algérie.

Les tests ont été effectués sur une machine universelle du type Zwick 250, pilotée par ordinateur avec le logiciel d'acquisition TestXpert V9.0, doté d'un capteur de force de 250 kN. Les tests suivants ont été effectués : compression perpendiculaire [235], traction perpendiculaire [236], compression pure et avec flambage [237], flexion trois et quatre points [238] et essai de cisaillement [239], selon les normes françaises, respectivement, NFT 54-602 (1983) [235], NF T 54-603 (1983) [236], NFT 54-604 (1986) [237], NF T 54-606 (1987) [238] et NFT 54-605 (1983) [239].

### 5.8.1. Essai de la compression perpendiculaire

L'essai de la compression dans la direction perpendiculaire a été effectué avec des échantillons de  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  (longueur x largeur) à une vitesse de traverse constante de  $4 \text{ mm min}^{-1}$ . Le module d'élasticité a été déterminé entre déformations 2.5% ( $\epsilon$ ) et 7.5% ( $\epsilon$ ). La contrainte à 10% ( $\sigma$ ) a également été calculée correspondant à  $\epsilon=10\%$ . La contrainte maximale ( $\sigma_{\text{max}}$ ) atteinte au cours de l'essai, était d'environ 1 MPa et la valeur d'écrasement ( $\Delta h_{\text{max}}$ ) pour cette charge correspondent à une déformation maximale d'environ 70% ( $\epsilon$ ).

Après l'essai, les échantillons ont été conservés dans l'environnement du laboratoire pendant 14 jours, après, l'épaisseur du panneau a été mesurée pour calculer le taux de relaxation ( $\Gamma$ ).

Les propriétés mécaniques suivantes ont été calculées à partir des courbes contrainte-déformation :

$$\varepsilon_{max} = (\Delta h_{max} / h_0) \times 100 \dots\dots\dots (1),$$

$$Ea = [(F_2 - F_1) / (\Delta h_2 - \Delta h_1)] \times h_0 S_0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\eta = [(hf_2 - hf_1) / hf_1] \times 100 \dots\dots\dots (3)$$

L’essai porté sur la détermination de la résistance en traction perpendiculaire d’une structure sandwich ; conformément à la norme NFT54-603 (Novembre1983) [236]. L’essai consiste à soumettre l’éprouvette, à un effort de traction normal aux semelles du sandwich, transmis à l’éprouvette par l’intermédiaire de dispositifs d’attache constitués par des blocs d’attaches épaisses indéformables, collés sur ces semelles avec une résine époxy.

Les spécimens de traction de dimensions 50x50mm<sup>2</sup> (longueur x largeurs) ont été fabriqués selon la norme.

Les tests ont été effectués sur une machine universelle du type Zwick, avec une vitesse de déplacement de la charge constante, fixée à 1.2 mm/min selon la norme en vigueur.

La contrainte à la rupture en traction perpendiculaire, est calculée à l’aide de la formule suivante:

$$\sigma_p = \frac{F_R}{S_0} \dots\dots\dots (4)$$

Où F est la force à la rupture (N) de la structure sandwich ; F<sub>R</sub> est la force maximale(N) ;

Sest l’aire initiale de la section droite de l’éprouvette(mm<sup>2</sup>).

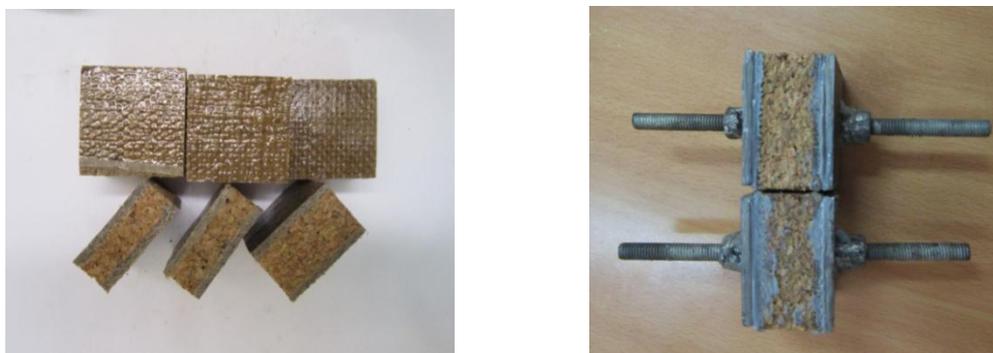


Figure 5.19 : Eprouvettes à différent épaisseurs de l’essai de traction selon la norme (NF T 54-603).

### 5.8.2. Essai de compression longitudinale sans ou avec flambage

Les essais de compression longitudinaux, avec ou sans flambage ont été réalisés afin de déterminer la résistance à la compression pour les deux cas ont été spécifiés dans la norme (NF T 54-604, 1986) [237] :

- ✓ Compression pure, si la longueur de l'échantillon est jusqu'à deux fois l'épaisseur totale de la structure en sandwich ;
- ✓ Compression avec flambage si la longueur de l'échantillon est comprise entre 10 à 12 fois l'épaisseur totale de la structure sandwich.

Les échantillons ont été coupés avec une largeur de 50 mm et une longueur de 70 mm et 450 mm respectivement pour la compression pure et compression avec flambage. Les deux extrémités de section rectangulaire des échantillons ont été soigneusement usinés pour être plats, parallèles entre elles et perpendiculaires à la charge. Les essais ont été réalisés à une vitesse de traverse constante de  $0.21 \text{ mm min}^{-1}$  et  $1.35 \text{ mm min}^{-1}$  respectivement pour la compression pure et la compression avec flambage respectivement. La contrainte maximale à la compression où déformation de la structure en sandwich est exprimée en Mpa telle que :

$$\sigma_N = \frac{FN}{S}$$

Où  $F$  est la force maximale (N), et  $S$  est la section initiale de l'éprouvette ( $\text{mm}^2$ ).

### 5.8.3 Essai de flexion trois et quatre points.

L'essai de la flexion trois et quatre points : Les essais ont porté sur la détermination des modules de rigidité en flexion ( $D$ ), cisaillement en flexion ( $N$ ) et cisaillement de l'âme ( $G_a$ ). Les éprouvettes sont découpées aux dimensions conformément à la norme NF T 54-606 (Octobre 1987) [238]. Elles sont ensuite posées en appui simple sur des rouleaux cylindriques pour subir les essais de flexion 3 et 4 points, avec une vitesse de  $2 \text{ mm/min}$  selon la norme citée ci-dessus (*Figure 5.20*). La flexion trois points est un essai mécanique qui consiste à poser une poutre sur deux appuis simples. Les contacts entre ces appuis et la poutre sont considérés ponctuels et sont situés sur les extrémités de la poutre. Une charge concentrée est appliquée au milieu de cette poutre. Le contact entre la charge et la poutre est considéré aussi comme une liaison ponctuelle [239]. Lorsque la charge augmente progressivement sans dépasser la limite de résistance

pratique, la poutre se déforme suivant une flèche déterminée selon la nature des composants constituant la poutre.

Dans le cas de la flexion quatre points les mêmes appuis simples sont utilisés mais deux charges sont appliquées au lieu d'une seule charge concentrée. Lorsque la charge augmente progressivement sans dépasser la limite de résistance pratique, la poutre se déforme suivant une flèche déterminée selon la nature des composants constituant de la poutre. Cet essai s'effectue sur la même machine que la flexion trois points. La flexion 4 points permet en particulier de créer un moment de flexion pur dans la zone centrale. La figure 2 représente les essais de flexion 3 et 4 points.

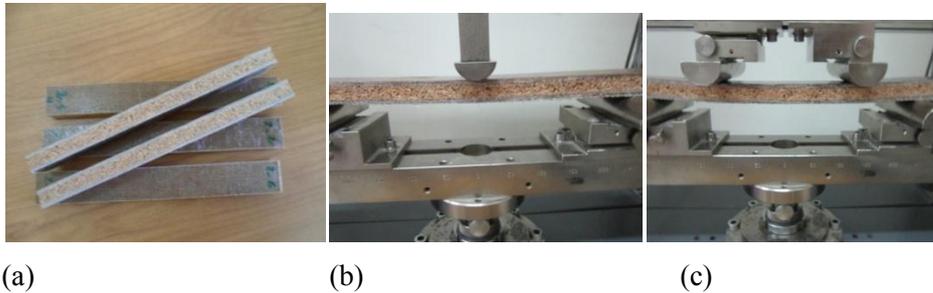


Figure 5.20 : Essais de flexion : (a) Échantillon des sandwichs (b) flexion trois points, c) flexion 4 points.

Plusieurs essais ont été effectués sur un même type de sandwich pour voir l'influence de l'épaisseur sur le même type de sandwich. Les figures 4, 5 et 6 montrent les courbes de l'évolution du déplacement en fonction de la force appliquée sur les différents composites sandwichs désignés par SLJP10, SLJP20 et SLJP30 selon l'épaisseur correspondante de 10, 20 et 30mm. Les contraintes normales maximales  $\sigma_3$  et  $\sigma_4$  sont respectivement les contraintes en flexion 3 et 4 points. Ces contraintes sont appelées aussi résistance en traction ou en compression des semelles suivant la norme NF T 54-606, elles sont représentées par les équations suivantes (6) et (7)

$$\sigma_3 = \frac{P_1 d_1}{2es(h+ea)b} \quad (6)$$

$$\sigma_4 = \frac{P_2 d_2}{4es(h+ea)b} \quad (7)$$

Avec

$P_1$  est la contrainte maximale de la flexion trois points(N);

$P_2$  est la contrainte maximale de flexion quatre points(N);

$H$  est l'épaisseur du sandwich (mm);  $e$  est l'épaisseur de l'âme (mm);

$b$  est la largeur du sandwich(mm);

$\sigma_3$  et  $\sigma_4$  est la contrainte de flexion 3 et 4 points(MPa);

$\sigma$  est la contrainte de flexion 4 points(MPa);

$d_1$  est la distance entre les supports de flexion 3 points(mm);

$d_2$  est la distance entre les supports de flexion 4 points ;

$e$  est l'épaisseur des semelles(mm);

$p$  est la charges de rupture par cisaillement(N);  $W$  est la flèche mesurée à mi-portée sous la charge  $P$  (mm);  $W_{est}$  la flèche mesurée à mi-portées sous la charge totale  $P$ (mm);

$N$  est la rigidité en cisaillement de la structure sandwich (N) et  $D$  est la rigidité en flexion de la structure sandwichent (N.mm<sup>2</sup>).

### 2.3 Dispositif d'essai.

Les essais de flexion 3 et 4 points sont effectués sur une machine universelle de type Zwick 250 kN, piloté par ordinateur avec une vitesse d'essai de 2 mm/min et équipé

d'un capteur de force de 2.5 kN (figure 3). L'acquisition des données est réalisée à l'aide du logiciel testXpert V 9.0 qui enregistre le déplacement en fonction de la force.

#### 5.8.4. Détermination des caractéristiques en flexion du sandwich

La norme NF T 54-606 permet à partir de résultats obtenus d'essais mécaniques flexion trois et quatre points sur des sandwichs, de définir le module de rigidité en flexion  $D$ , le module de cisaillement en flexion  $N$  et le module de cisaillement de l'âme  $G_a$ . L'équation (8) donne la valeur du module de rigidité en flexion  $D$  (Nmm<sup>2</sup>).

$$D = \frac{P_1 d_1 \left[ 1 - \left( \frac{11 d_1^2}{8 d_2^2} \right) \right]}{48 w_1 \left[ 1 - \left( \frac{2 P_1 d_1^2 w_2}{P_2 d_2^2 w_1} \right) \right]} \quad (8)$$

L'équation (9) définit le module de cisaillement en flexion  $N$  exprimé en Newtons.

$$N = \frac{P_1 d_1 \left[ \left( \frac{8 d_1^2}{11 d_2^2} \right) - 1 \right]}{4 w_1 \left[ \left( \frac{16 P_1 d_1^3 w_2}{11 P_2 d_2^3 w_1} \right) - 1 \right]} \quad (9)$$

L'équation (10) définit le module de cisaillement de l'âme. Il est exprimé en Newtons par millimètre carré.

$$G_a = N 4 e a / (h + e a) 2 b \quad (10)$$

#### 5.8.5. Essai de cisaillement

Les essais de cisaillement sont effectués sur une machine universelle de type Zwick 250 kN piloté par ordinateur (logiciel testXpert V 9.0) avec une vitesse d'essai de 1 mm/min et équipé d'un capteur de force de 2.5 kN (figure 15). Les échantillons testés sont découpés à l'aide d'une scie métallique selon la norme NF T 54-605. Ils ont pour dimensions 250 x 50 x 30 mm. L'échantillon est fixé aux mors mécaniques de la machine grâce aux deux supports métalliques indéformables. Durant le chargement, le déplacement et la charge appliquée sont enregistrés. Plusieurs éprouvettes en sandwich de type SLJP10, SLJP20 et SLJP30 sont testées. Les figures 13 et 14 montrent le montage réalisé pour effectuer les essais de cisaillement.



Figure 5.21 : Plaque de liège fixée sur deux supports métalliques indéformables.

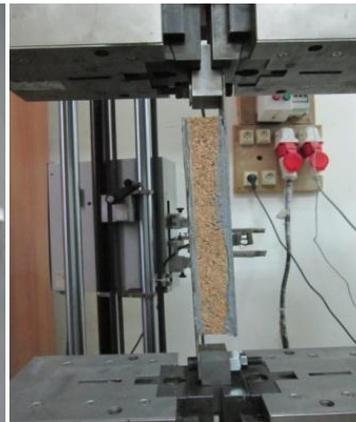


Figure 5.22 : Montage d'essai de sur machine de traction.

### 5.8.6. Calcul du module de cisaillement du liège :

Le module de cisaillement du liège peut être calculé par la norme NFT 54-605. Cette méthode consiste à fixer le sandwich sur un montage spécifique (cf. figure 13) pour effectuer des essais de cisaillement et calculer le module de cisaillement du liège avec résine. Le module de cisaillement est calculé dans deux plans orthogonaux de la plaque de liège aggloméré. L'équation (11) donne la valeur du module de cisaillement exprimé en méga pascal

$$G = \frac{h \tan a}{A} \quad (11)$$

Avec :

G : module de cisaillement (MPa)

h : épaisseur initial de l'éprouvette (mm)

A : longueur L x largeur b (mm<sup>2</sup>)

tan a :  $\Delta F / \Delta e$  (différence de force sur différence de déplacement dans la zone élastique)

### 5.8.7 Calcul de la contrainte maximale de cisaillement :

La contrainte maximale de cisaillement peut être calculé par la formule (12) selon la norme NFT 54-605.

$$\tau_m = \frac{F_m}{l \times b} \quad (12)$$

ou

$\tau_m$  = contrainte maximale de cisaillement exprimée en mégapascals,

$F_m$  = force maximal appliquée à l'éprouvette au cours de l'essai exprimée en newtons,

$L$  = longueur initial de l'éprouvette exprimée en millimètres.

$b$  = la largeur initial de l'éprouvette, exprimée en millimètres.

## 5.9. Résultats et discussion

### 5.9.1 Sandwichs à âmes en liège et semelles en jute et résine polyester :

Lors de l'élaboration des sandwichs liège /jute/polyester par compression à l'aide d'une presse hydraulique équipée de plaques chauffantes à température de  $\approx 80^\circ\text{C}$  et à pression exercé est de  $28\text{Kg}/\text{cm}^2$ . pendant 01 heure (Fig.2.); dont le tissu est préparé et découpé déjà aux dimensions  $300 \times 300\text{mm}$  avec des séquences d'empilement de type  $[0^\circ/90^\circ]_3$ , on a remarqué qu'il n'est y a pas d'affinité entre les stratifiés à base de jute et la résine polyester et que les peaux des sandwichs sont détachés de l'âme en liège (figure 5.23) .



Figure 5.23 : décollement de la peau de sandwich à base de résine polyester.

L'augmentation de la pression d'essai et l'augmentation de la température et même l'augmentation des deux facteurs ensemble lors de l'essai ; non pas donner une solution au problème d'affinité entre le liège aggloméré et les peaux en stratifiés jute/ polyester aggloméré blanc (figure 5.23 et 5.24.). Par contre l'ajout d'un film de résine époxy sur le liège aggloméré avant l'élaboration des sandwichs a améliorée les résultats (figure 5.25.)

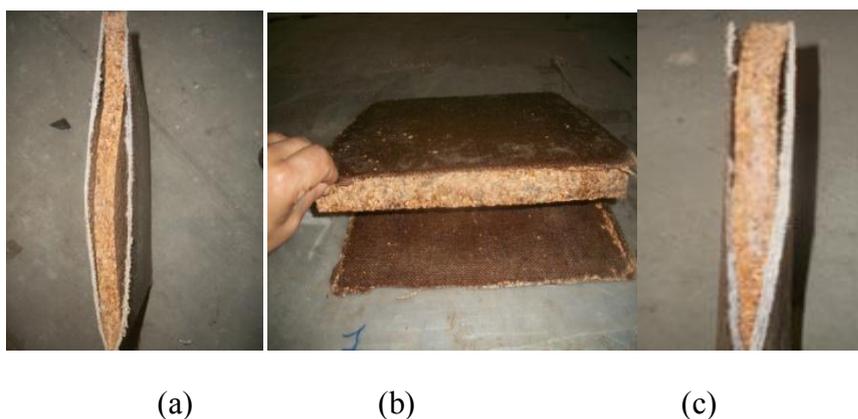


Figure 5.24 : Séparation entre la peau et l'âme du sandwich ; (a) L'augmentation de la pression d'essai ; (b) l'augmentation de la température d'essai ; (c) L'augmentation de la température et la pression d'essai.



Figure..5.25 : Liège aggloméré avec et sans film de résine époxy.

### 5.9.2- Influence de l'épaisseur du sandwich sur la force de rupture en flexion:

Les figures 4, 5 et 6 montrent les courbes d'évolution du déplacement ou de la flèche en fonction de la force appliquée sur les différents composites sandwichs (jute/polyester/liège) désignés par SLJP10, SLJP20 et SLJP30 selon l'épaisseur correspondante de 10, 20 et 30mm. Les résultats montrent que pour le composite SLJP20, le comportement est linéaire, ensuite une phase non linéaire apparaît jusqu'à la rupture à 750N pour un déplacement de 14 mm. Le SLJP30 possède un comportement linéaire, puis la rupture se fait à 400 N pour un déplacement de 15mm. Pour le SLJP10 la rupture se fait à 850 N pour un déplacement de 9mm. La figure 3 représente les essais de flexion 3 points. En raison de la faible différence entre effort maxi pour les deux types de sandwichs, la différence entre valeurs de  $h$ ,  $e_a$ ,  $b$  et  $d_1$  influent sur la valeur des contraintes en flexion ce qui explique cette différence en faveur du SLJP10.(tableau 1)

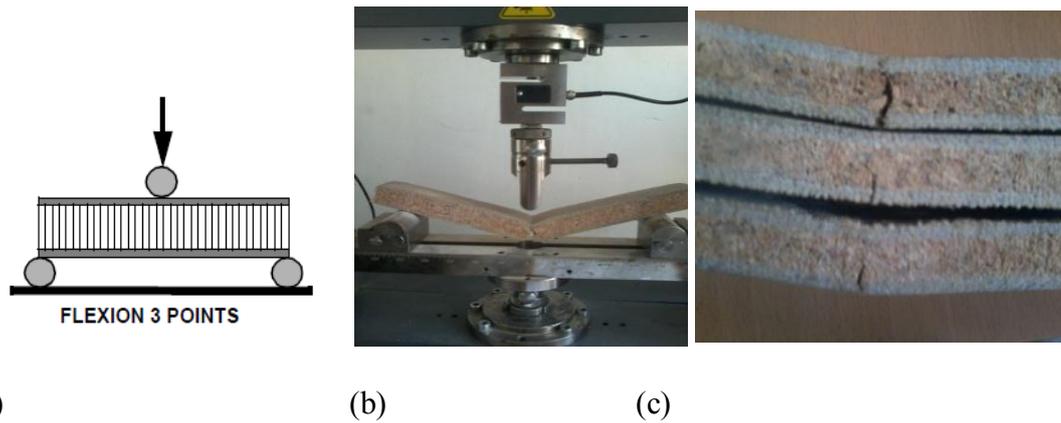


Figure 5.26 : Essais de flexion trois points (a) : schéma de l'essai, (b) : fin d'essai, (c) éprouvettes après essai

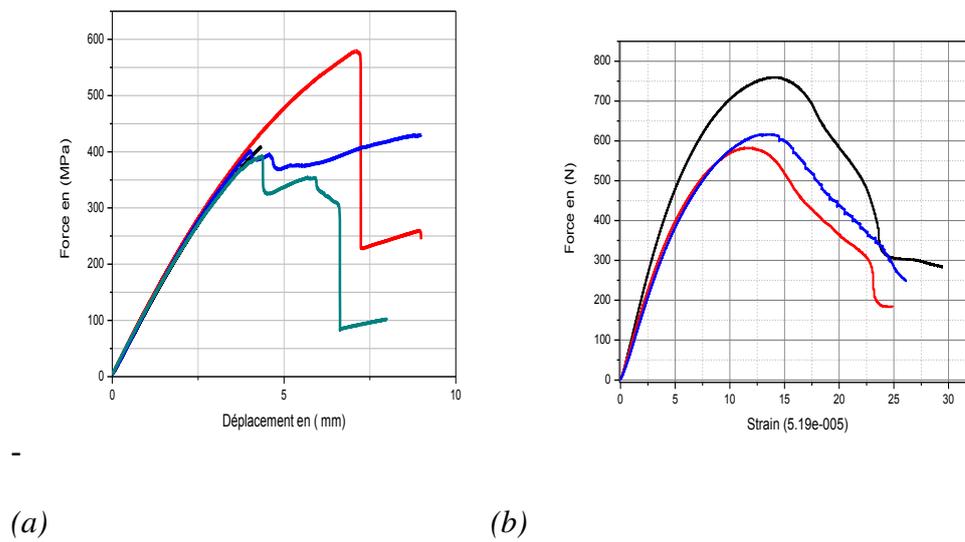


Figure 5.27 : Flexion 3points sandwich liège 10 et 20mm

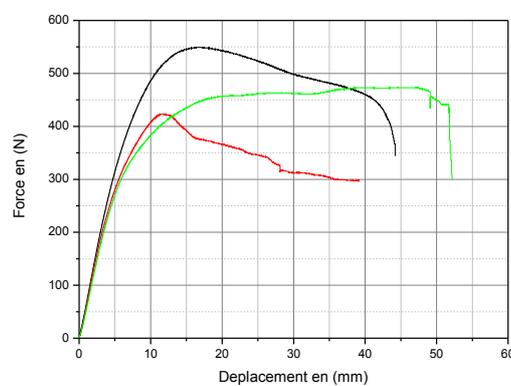


Figure 5.28 : Flexion 3points sandwich liège 30mm

Concernant les composites sandwichs sollicités à la flexion 4 points, les figures 7, 8, 9 et 10 représentent les essais et les résultats qui permettent d'analyser l'effet de l'épaisseur sur la force de rupture.

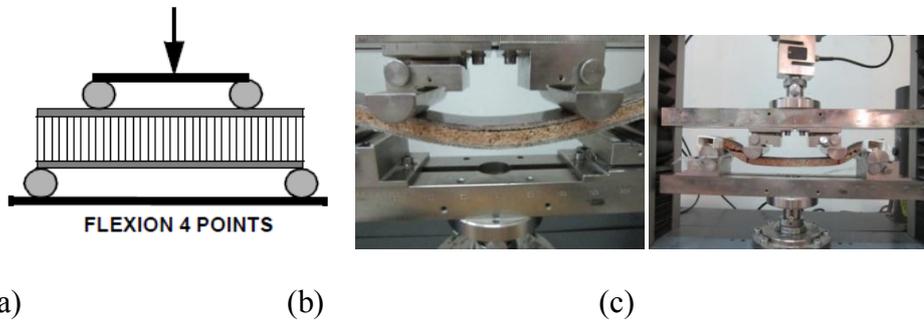


Figure 5.29 : Essais de flexion quatre points (a) : schéma de l'essai, (b) : au milieu de l'essai (c) : fin de l'essai

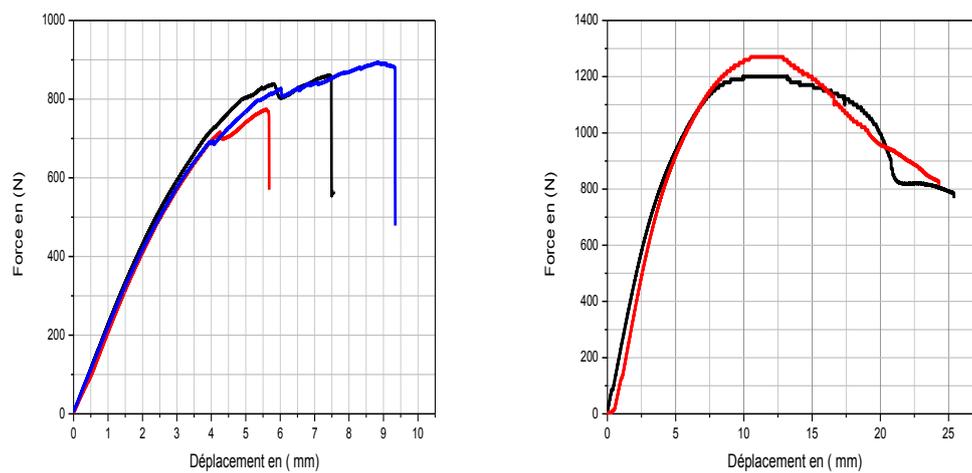


Figure 5.30 : Flexion 4 points sandwich liège 10 et 20 mm

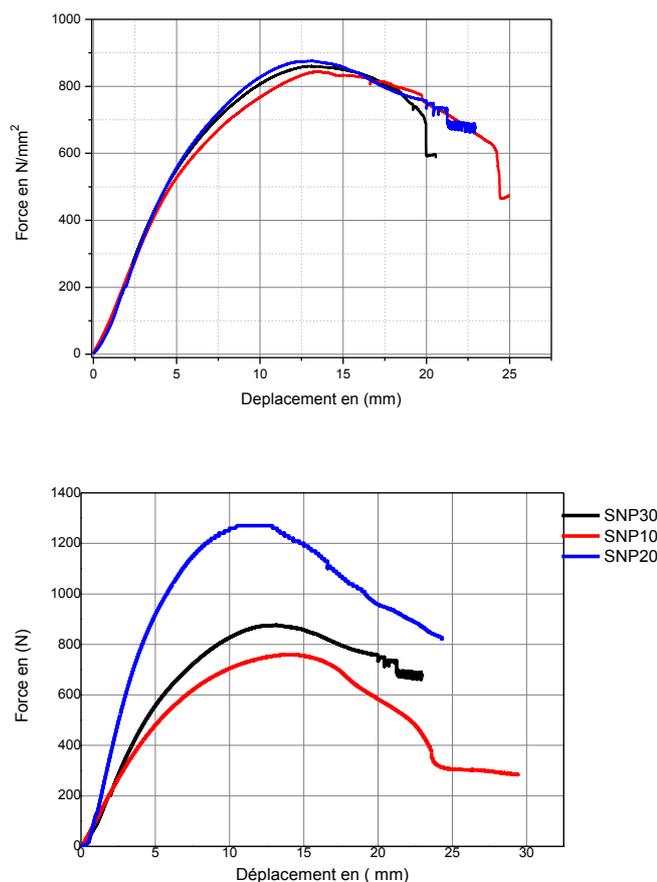


Figure 5.31 : Flexion 4 points sandwich liège 30mm.

Le tableau 1 donne les valeurs de la contrainte normale en flexion trois et quatre points  $\sigma_3$  et  $\sigma_4$  ainsi que la rigidité en flexion  $D$  et la rigidité en cisaillement  $N$  et le module de coulomb  $G_a$  de l'âme, des différents structures sandwichs, à âme 10, 20 et 30 mm d'épaisseur.

Tableau5.2: caractéristiques mécaniques calculées selon la norme NF T 54-606.

Sandwich	$\sigma_3$ (M Pa)	$\sigma_4$ (MPa)	$D$ (N.mm <sup>2</sup> )	$N$ (N)	$G_a$ (N/mm <sup>2</sup> )
SLJP10	3,36	1,53	D1=-1;43283005	N1=1,6739E-08	Ga1=2,7652E-05
SLJP20	3,18	1,13	D2=-0.12946075	N2=2,0043E-09	Ga2=6,6222E-06
SLJP30	2,44	0,51	D3=-0.22460423	N3=2,6061E-09	Ga3=1,2916E-05

Les résultats obtenus à partir des essais de flexion trois et quatre point montrent que:

- La contrainte normale en flexion  $\sigma$  est plus élevée pour le SLJP10 de 5,35% par rapport à SLJP20 et de 27,38% par rapport à SLJP30 pour la flexion trois points.

- La contrainte normale en flexion  $\sigma$  est plus élevée pour le SLJP10 de 26,18% par rapport à SLJP20 et de 58,53% par rapport à SLJP30 pour la flexion quatre points.

De même, pour la rigidité en flexion (D) et la rigidité au cisaillement (N), les plus grandes valeurs sont données par la variante SLJP10.

### 5.9.3- Analyse du mode de rupture en flexion trois et quatre points :

La rupture enregistrée en flexion quatre points sur les sandwichs est remarquée sur l'âme (rupture transversal) (voir figure 12).

En observant de plus près cette transversalité, suivant l'effort exercé sur l'échantillon, on note une fissure, juste en dessus de la semelle inférieure, qui se propage le long de l'épaisseur du sandwich (cf. figure12). Ce mode de rupture est totalement différent de celui obtenu en flexion trois points où on n'a pas remarqué la rupture de l'âme (figure 7).

Début de la fissure de lame      Fissuration transversal total et délaminage



(a)

(b)

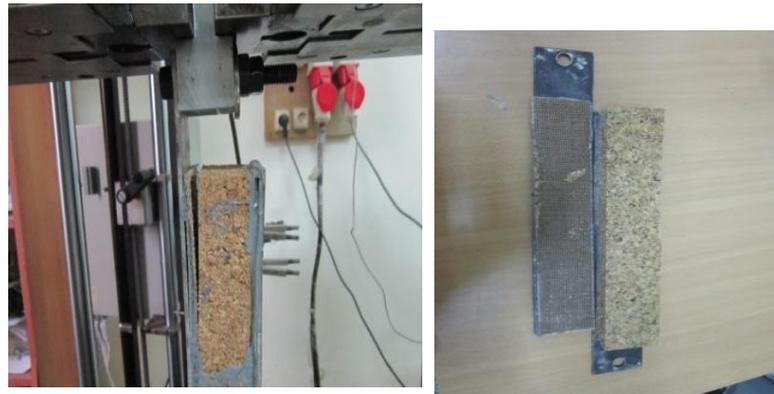
Figure 5.32 : Essais de flexion quatre points : (a) avant rupture, (b) après rupture.

### 5.9.4 Influence de l'épaisseur sur les caractéristiques de cisaillement du sandwich

Les figures 15, 16 et 17 illustrent l'évolution de déplacement en fonction de la variation de la force de cisaillement appliquée au composite sandwich SLJP10, SLJP20 et SLJP30. Lors de l'essai, un bruit de craquement a été entendu sur les éprouvettes testées lorsque celles-ci sont soumises à une charge. Par expérience, c'est le signe d'un décollement du stratifié de l'âme sandwich. Ceci affaiblit considérablement l'ensemble de la structure, ce qui a été déjà remarqué par Reis et Silva [240] dans la fabrication d'un sandwich du stratifié polyester d'un pont de bateau par le fabricant de produits composites SOLOPLAST-VOSSCHEMIE en 2007. Par ailleurs, ce décollement n'a pas été remarqué dans le cas des sandwichs à base de résine époxy et dans les travaux de Mir et al [241] aussi les travaux de Osvaldo et al [242], aussi dans nos travaux

concernant les sandwichs à peau en résine époxy, on a pas remarqué le décollement des peaux; mais parcontre on a remarqué une déchirure de l'âme de liège voir (figure ).

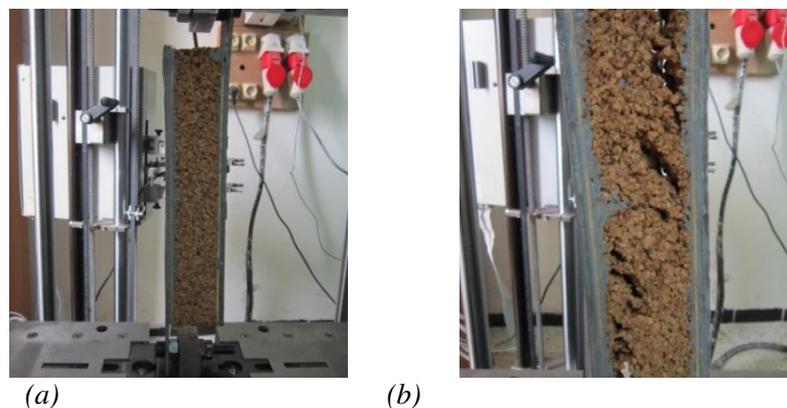
Les résultats de la contrainte maximale et du module de cisaillement des sandwichs SLJP10, SLJP20 et SLJP30 ne sont pas significatives car il y a eu un décollement des peaux lors de l'essai (Figure 21 b ; due à la mauvaise adhérence entre le liège et la résine polyester.



(a)

(b)

Figure 5.33 : Essais de cisaillement (a) : début de décollement de la peau en jute/polyester du sandwich, (b) : fin d'essai avec décollement total des peaux.

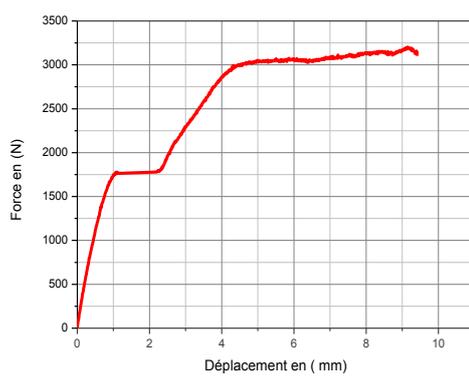


(a)

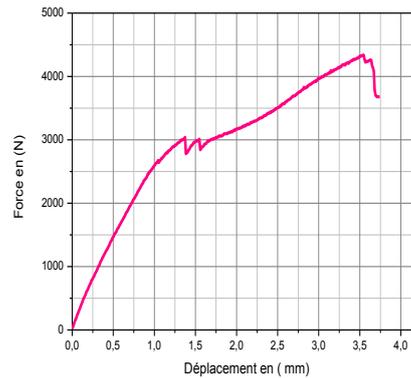
(b)

Figure 5.34 : Essais de cisaillement (a) : début de décollement de la peau en jute/époxy du sandwich, (b) : fin d'essai avec déchirure total de l'âme du liège.

Les Résultats de l'essai *Cisaillement des sandwichs* à peau en jute/ époxy sont présenté par les courbes suivants:



(a)



(b)

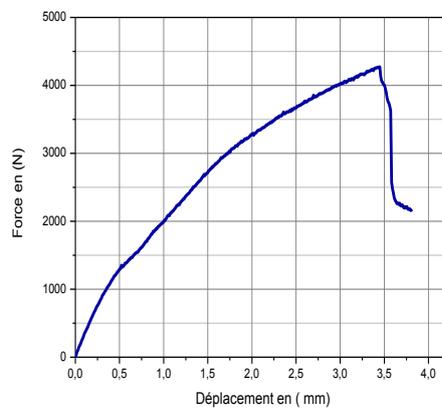


Figure 5.35: Cisaillements sandwich ; (a) 10mm ; (b) ; 20 mm ; (c) 30mm.

Le tableau 5.2 donne les valeurs de la contrainte maximale et du module de cisaillement des sandwichs à différents épaisseurs d'âme du liège.

**Tableau 5.3 : la contrainte maximale et du module de cisaillement des sandwichs à différents épaisseurs d'âme du liège.**

	SA 10	SA 20	SA 30
$\tau_m$ (M Pa)	0,2569	0,3484	0,3405
<b>G (MPa)</b>	4,1208	5,918	7,645

Les résultats de la contrainte maximale et du module de cisaillement des sandwichs montrent que ces derniers varient en fonction de l'épaisseur de l'âme du liège (figure 5.36), plus l'épaisseur de l'âme est grande, plus les valeurs de module de cisaillement et de la contrainte maximale de cisaillement sont grandes.

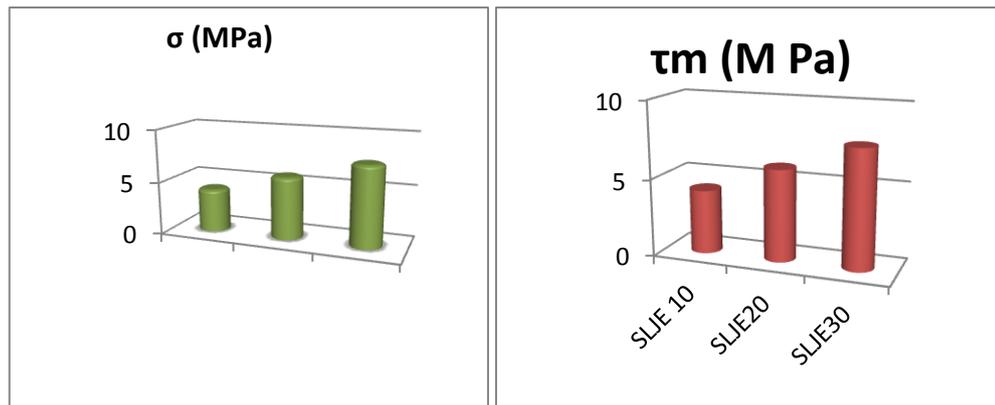


Figure 5.36 : variation du module de cisaillement et de la contrainte maximale et de cisaillement en fonction de l'épaisseur de l'âme.

**5.10 Essai de la compression perpendiculaire**

L'essai de la compression dans la direction perpendiculaire a été effectué avec des échantillons de 50 x 50 mm<sup>2</sup> (longueur x largeur) à une vitesse de traverse constante de 4 mm min<sup>-1</sup>. Le module d'élasticité a été déterminé entre déformations 2.5% (ε1) et 7.5% (ε2). La contrainte à 10% (σ10) a également été calculée correspondant à ε = 10%. La contrainte maximale (σmax) atteinte au cours de l'essai, était d'environ 1 MPa et la valeur d'écrasement (Δh max) pour cette charge correspondent à une déformation maximale d'environ 70% (εmax). Après l'essai, les échantillons ont été conservés dans l'environnement du laboratoire pendant 14 jours, après, l'épaisseur du panneau a été mesurée pour calculer le taux de relaxation (η). Les propriétés mécaniques suivantes ont été calculées à partir des courbes contrainte-déformation :

$$\epsilon_{max} = \frac{\Delta h_{max}}{h_0} \times 100 \dots\dots\dots (5.1),$$

$$Ea = \frac{F_2 - F_1}{\Delta h_2 - \Delta h_1} \times h_0 S_0 \dots\dots\dots (5.2)$$

$$\eta = \frac{h_{f2} - h_{f1}}{h_{f1}} \times 100 \dots\dots\dots (5.3)$$

**5.11 -Essai de traction perpendiculaire**

L'essai porté sur la détermination de la résistance en traction perpendiculaire d'une structure sandwich ; conformément à la norme NF T 54-603 (Novembre 1983) . L'essai consiste à soumettre l'éprouvette, à un effort de traction normal aux semelles du sandwich, transmis à l'éprouvette par l'intermédiaire de dispositifs d'attache constitués

par des blocs d'attaches épaisses indéformables, collés sur ces semelles avec une résine époxy.

Les spécimens de traction de dimensions 50 x 50 mm<sup>2</sup> (longueur x largeurs) ont été fabriqués selon la norme.

Les tests ont été effectués sur une machine universelle du type Zwick, avec une vitesse de déplacement de la charge constante, fixée à 1.2 mm/min selon la norme en vigueur.

La contrainte à la rupture en traction perpendiculaire, est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\sigma_P = F_R / S_0 \dots \dots \dots (5.4)$$

Où  $F_R$  est la force à la rupture (N) de la structure sandwich ;  $F_M$  est la force maximale (N) ;  $S_0$  est l'aire initiale de la section droite de l'éprouvette (mm<sup>2</sup>).



Figure 5.37 : Éprouvette placée pour l'essai de traction selon la norme (NF T 54-603).

Lors de l'essai de traction perpendiculaire des panneaux sandwichs dont les peaux et à base de jute/polyester ; on a remarqué un décollement trop rapide des peaux figure.11 .Ce qui n'a pas donné de résultats.



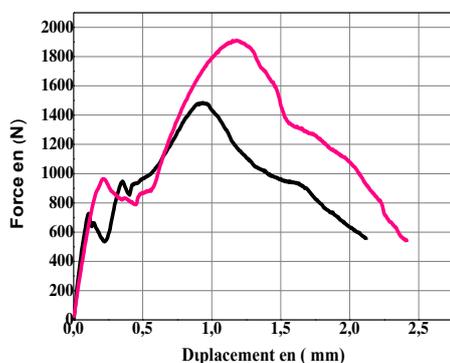
Figure 5.38 : décolllement de la peau de panneau sandwich.

Mais Lors de l'essai de traction perpendiculaire des panneaux sandwichs dont les peaux et à base de jute/époxy ; on n'a pas remarqué le décollement des peaux, mais par contre on a remarqué que la rupture se situe toujours dans le noyau (liège aggloméré), et la rupture entre les feuilles de surface et le noyau n'est jamais produite. La première fissure apparaît dans le liège aggloméré, lorsqu

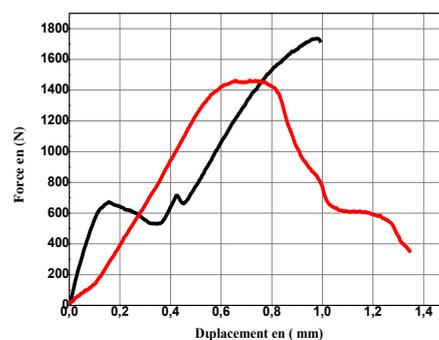
elachargemaximaleaétéatteinteetpropagéehorizontalementverslafindel'éprouvette. Elle se produit toujours entre les granules de liège (Figure 5.37).

Le comportement à la traction des trois types de panneaux sandwichs était similaire, bien que les panneaux sandwich à faible épaisseur SNJE10 aient des valeurs de contrainte de traction et de déformation à la rupture maximale, plus élevées par rapport aux deux autres panneaux SNJE20 et SNJE30.

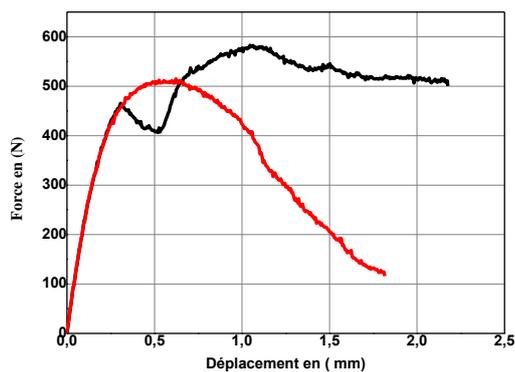
La figure 5.39 montre les courbes force-déplacement pour les panneaux sandwichs sous une charge de traction appliquée dans la direction perpendiculaire et le tableau 5.4 présente les valeurs moyennes des propriétés de traction. Le comportement sous une force de traction a montré trois phases : d'abord, une augmentation linéaire de la charge appliquée, suivie d'un zigzag puis une continuité de comportement non linéaire jusqu'à ce que la charge maximale soit atteinte, et finalement une diminution de la force à la rupture totale. La déformation des éprouvettes est irréversible, une rupture totale est située et toujours dans la zone de l'âme, attestant d'une bonne qualité de réalisation des éprouvettes et d'une bonne adhésion de la colle entre la peau et l'âme. La figure V.20 montre les courbes force-déplacement pour les panneaux sandwichs SNJE10, SNJE20 et SNJE30 sous charge appliquée de traction dans la direction perpendiculaire.



(a)



(b)



(c)

Figure 5.39 : Courbes force-déplacement des panneaux sandwichs SNJE10, SNJE20 et SNJE30 sous contrainte de traction appliquée dans la direction perpendiculaire ]

Les valeurs moyennes des propriétés mécaniques en traction sont présentées dans le tableau 5.4

Tableau 5.4. la Contrainte maximale ( $\sigma_m$ ) et la force maximale ( $F_m$ ) et le déplacement correspondant des panneaux sandwichs SNJE10, SNJE20 et SNJE30 sous contrainte de traction appliquée dans la direction perpendiculaire

Panneau sandwich	$F_m$ (N)	$D_m$ (mm)	$\sigma_m$ (MPa)
SNJE10	1675	1.10	0.667
SNJE20	1450	0.85	0.578
SNJE30	1500	0.75	0.598

### 5.12 - Essai de compression longitudinale sans ou avec flambage

Les essais de compression longitudinaux, avec ou sans flambage ont été réalisés afin de déterminer la résistance à la compression pour les deux cas ont été spécifiés dans la norme (NF T 54-604, 1986) :

- compression pure, si la longueur de l'échantillon est jusqu'à deux fois l'épaisseur totale de la structure en sandwich ;
- compression avec flambage si la longueur de l'échantillon est comprise entre 10 à 12 fois l'épaisseur totale de la structure sandwich.

Les échantillons ont été coupés avec une largeur de 50 mm et une longueur de 70 mm et 380 mm respectivement pour la compression pure et compression avec flambage. Les deux extrémités de section rectangulaire des échantillons ont été soigneusement usinés pour être plats, parallèles entre elles et perpendiculaires à la charge. Les essais ont été réalisés à une vitesse de traverse constante de 0.21 mm min<sup>-1</sup> et 1.35 mm min<sup>-1</sup> respectivement pour la compression pure et la compression avec flambage respectivement. La contrainte maximale à la compression où déformation de la structure en sandwich est exprimée en Mpa telle que :

$$\sigma_M = F_M / S_0 \quad \dots\dots\dots (5.5)$$

Où  $F_M$  est la force maximale (N), et  $S_0$  est la section initiale de l'éprouvette (mm<sup>2</sup>).



Figure 5.40 : Essais de compression : (a) compression perpendiculaire des sandwichs (b) compression avec flambement (c) compression pure.

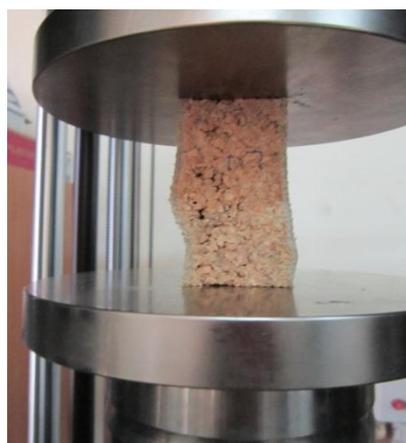


Figure:5.50.Mode de défaillance de panneau sandwich soumise à compression pure

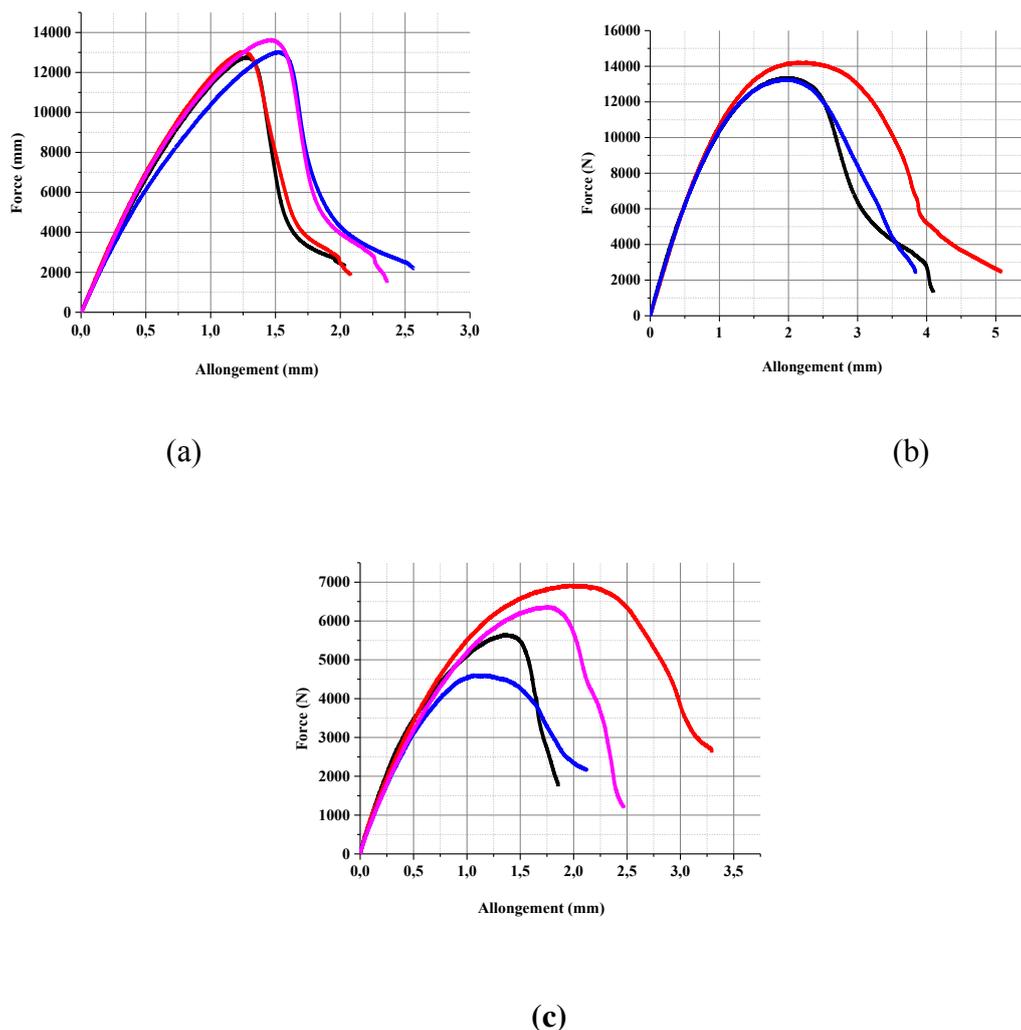


Figure 5.51: Courbes force-déplacement des panneaux sandwichs (a): SNJE10, (b): SNJE20 et (c): SNJE30 sous l'action de l'essai de compression pure.

Tableau 5.6 les valeurs calculées des caractéristiques de compression pure.

Panneaux sandwichs	Compression avec flambage FM[N]	Compression avec flambage $\sigma_M$ [MPa]	Compression pure FM [N]	Compression pure $\sigma_M$ [MPa]
SNLJE10	16500	0.733	13200	3.7366
SNLJE20	15250	0.487	13333	3.8058
SNLJE30	5500	0.242	5875	1.6946

Le comportement à la compression des panneaux sandwichs est similaire à ce qui est rapporté pour la compression de liège [193 ,209 ,211]. Ce comportement montre que les

propriétés de compression des panneaux sandwichs ont été déterminées par le liège aggloméré de base, plus précisément par la structure cellulaire du liège ; qui est clairement visible dans les granules de liège aggloméré ce qui permet de grandes déformations et reprise dimensionnelle. Les résultats trouvés étaient similaires à la valeur de 2.8 MPa; obtenue pour le sandwich à base de liège aggloméré comme âme et des feuilles de fibres de carbone comme peau [199], mais un peu plus basse que les valeurs 6.0 MPa à 8.5 MPa rapportées pour les panneaux sandwichs avec micro-aggloméré de liège comme âme et feuilles de surface en alliage d'aluminium [198]; pour le composite de polymère de liège elles sont de 5.4 MPa et 9.8 MPa [202], et pour le liège aggloméré, elle est 7.4 MPa [200].

C'est certainement une zone où le développement des propriétés ciblées peut être obtenues par variation de la dimension des grains de liège et en optimisant l'adhésif et le procédé de fabrication du panneau.

La déformation sous charge élevée a été prise par les granules de liège qui réduisent sensiblement leurs dimensions (lors de l'essai de compression de liège). La valorisation atteinte après 15 jours, par les panneaux sandwichs était en moyenne de 83%, ce qui est presque comparable à la pleine récupération du liège après une contrainte de déformation de 50% [201].

### 5.13 - Conclusion du chapitre :

L'analyse des différents résultats mécaniques et physico-chimiques obtenus dans cette étude montre clairement d'une part, que la combinaison tissu de jute comme renfort et plaque de liège aggloméré comme âme peut constituer une solution de substitution aux matériaux traditionnels fréquemment utilisés dans la réalisation des sandwichs et d'autre part, cette solution permet d'obtenir des seuils de résistance très acceptable pour des applications nécessitant pas des résistances élevées. Aussi, un impact direct sur l'environnement est observé étant donné que ces matériaux sont biodégradables. Bien que généralement conçues pour être soumises à des efforts en flexion, les structures sandwichs le sont aussi pour répondre à d'autres exigences, comme l'isolation thermique, etc. Le choix du type de sandwich dépend surtout de son application. Le recours à la fibre naturelle telle que le jute aura certainement un impact sur l'environnement et permet de valoriser les fibres de jute (fibre naturelle) à travers une application rationnelle et effective dans le domaine si vaste des structures composites.

Les essais mécaniques de flexion 3 et 4 points ainsi que le cisaillement réalisés sur les sandwichs de différentes épaisseurs d'âme de liège montrent que les contraintes, les

déformations, la rigidité en flexion et en cisaillement ainsi que le mode de rupture sont fonctions de l'épaisseur de l'âme et dépend de la nature de résine utilisée. Avec la résine polyester, un décollement des peaux de l'âme est constaté. Aucun délaminage n'a été constaté au niveau des peaux par contre un décollement entre l'âme et les peaux. Pour remédier au problème de la faible adhérence entre la résine polyester et le liège, une étude de traitement de surface et d'amélioration d'affinité entre le liège et la résine polyester est actuellement en cours de réalisation.

L'analyse des faciès de rupture des différents sandwichs ont permis de relever l'influence de l'épaisseur de l'âme utilisée dans la réalisation du sandwich. L'avantage de cette structure est certainement sa faible densité massique et certaines caractéristiques mécaniques laissent entrevoir des applications plus particulièrement dans le domaine des isolations (domaine de construction).

Enfin, cette étude préliminaire doit être complétée par une étude portant sur l'amélioration d'adhérence entre la résine polyester et la surface du liège et pourquoi pas l'utilisation d'une résine naturelle à caractère écologique présentant certaines propriétés mécaniques importantes qui peuvent améliorer les performances mécaniques et écologiques de telles structures.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'analyse des différents résultats mécaniques et physico-chimiques obtenus dans cette étude montre clairement d'une part, que la combinaison tissus de jute comme renfort et plaque de liège agglomère comme âme peut constituer une solution de substitution aux matériaux traditionnels fréquemment utilisés dans la réalisation des sandwichs et d'autre part, cette solution permet d'obtenir des seuils de résistance très acceptable pour des applications nécessitant pas des résistances élevées. Aussi, un impact direct sur l'environnement est observé étant donné que ces matériaux sont biodégradables .

Bien que généralement conçues pour être soumises à des efforts en flexion, les structures sandwichs le sont aussi pour répondre à d'autres exigences, comme l'isolation thermique, etc. Le choix du type de sandwich dépend surtout de son application.

Le recours à la fibre naturelle telle que le jute aura certainement un impact sur l'environnement et permet de valoriser les fibres de jute (fibre naturelle) à travers une application rationnelle et effective dans le domaine si vaste des structures composites.

Les essais mécaniques de compression, de flexion 3 et 4 points ainsi que le cisaillement réalisés sur les sandwichs de différentes épaisseurs d'âme du liège aggloméré blanc montrent que les contraintes, les déformations, la rigidité en flexion et en cisaillement ainsi que le mode de rupture sont fonctions de l'épaisseur de l'âme (plus l'épaisseur de l'âme augmente plus la résistance mécanique augmente) et dépend aussi de la nature de la résine utilisée.

Avec la résine polyester, un décollement des peaux de l'âme est constaté. (un décollement entre l'âme et les peaux est remarqué;par contre , aucun délaminage n'a était constaté au niveau des peaux.Pour remédier au problème de la faible adhérence entre la résine polyester et le liège, une étude de traitement de surface et d'amélioration d'affinité entre le liège et la résine polyester est actuellement en cours de réalisation.

L'analyse des faciès de rupture des différents sandwichs ont permis de relever l'influence de l'épaisseur de l'âme utilisée dans la réalisation du sandwich. L'avantage de cette

structure est certainement sa faible densité massique et certaines caractéristiques mécaniques laissent entrevoir des applications plus particulièrement dans le domaine des isolations (domaine de construction).

L'aggloméré de liège fournit un noyau de haute performance en compression perpendiculaire, tandis que les couches des stratifiées protègent l'âme, et améliorent sa résistance mécanique. La rupture des panneaux sandwichs lors des essais mécaniques est produite par la rupture entre les granulés de liège dans le noyau ; cela signifie qu'il est possible d'améliorer le comportement mécanique du noyau à base de liège aggloméré, par exemple, en améliorant la conception du produit, à savoir, en ce qui concerne le type d'adhésif, la géométrie des grains (forme et dimensions).

La faible densité, les bonnes propriétés mécaniques des panneaux sandwichs élaborés ont contribué à valoriser ces derniers pour des applications intérieures dans la construction.

En perspective, il serait intéressant de poursuivre ces travaux par l'étude de comportement des matériaux fabriqués à l'impact, l'indentation et la fatigue et l'étude de l'isolation phonique et acoustique.

Enfin, cette étude préliminaire doit être complétée par une étude portant sur l'amélioration d'adhérence entre la résine polyester et la surface du liège et pour quoi pas l'utilisation d'une résine naturelle à caractère écologique présentant certaines propriétés mécaniques importantes qui peuvent améliorer les performances mécaniques et écologiques de telles structures.

Bilan des communications et  
articles publiés dans le cadre de cette thèse

---

**Production scientifiques:****Publications Internationales:**

- 1- **C. Belkacemi and B. Bezzazi**, “Quasi-static mechanical characterization and fatigue of a composite laminates” *Advances in Applied Science Research*, 2014, 5(3):328-335. Pelagia Research Library. ISSN: 0976-8610. CODEN (USA): AASRFC. [www.pelagiaresearchlibrary.com](http://www.pelagiaresearchlibrary.com)
- 2 - **C. Belkacemi and B. Bezzazi** “Sandwich Panels From Cork and Polyester in Presence of Epoxy Resin as Interfacial Adhesive.” *International Journal of Physical Sciences*. November 2016, ISSN: 1992-1950.

**Publications Nationales :**

- 3 - **C. Belkacemi, N. Lakreb, B. Bezzazi.**« Caractérisation mécanique d'un matériau composite stratifié Jute/polyester ». Actes du colloque International sur les Matériaux et le Développement Durable **CIMDD'2013**, ISBN : 978-9931-9090-1-9, Université de Boumerdès, **06-09 Mai 2013**, 330 pages. <http://www.urmpe.dz/valorisation-scientifique/livres.html>

**Communications Internationales :**

- 4 - **C. Belkacemi , B. Bezzazi** ' Caractérisation Mécanique En Compression Des Panneaux Sandwichs à Renfort et Ame Naturels' □ *1<sup>er</sup> congrès international sur les ingénieries civile, mécanique et électrique pour l'énergie CMEEE 2015 – Marrakech* Dépôt légal : 2015PE0102 / ISSN : 2458-6226 16, 17, 18 et 19 Novembre 2015 □
- 5 - **C. Belkacemi , B. Bezzazi** : Caractérisation mécanique en flexion trois et quatre points d'un composite sandwich a âme en liège et peaux en jute / polyester. *International Symposium on Aircraft Materials - ACMA 2014 - Marrakech - Morocco - April 23-26 2014. Page 294. ISBN 978-2-9534804-3-6 acma2014.uiz.ac.ma/*
- 6 - **C. Belkacemi , B. Bezzazi**, « Elaboration et caractérisation mécanique quasi statique d'un composite stratifié jute/polyester ». *1er Congrès International des Composites et des Matériaux Avancés, CICMA 2014, Khenchela, 03 et 04 Mars 2014.*
- 7 - **N.Lakreb, B.Bezzazi, C. Aribi ,C.Belkacemi, N.Ferahi**, « Elaboration et caractérisation d'un nouveau matériau composite à base d'éco-matériaux Algériens. ». *1er Congrès International des Composites et des Matériaux Avancés, CICMA 2014, Khenchela, 03 et 04 Mars 2014.*
- 8 - **C. Belkacemi, N. Lakreb, B. Bezzazi.** «Etude du comportement mécanique d'un stratifié juté/polyester ». *Séminaire International sur le Bâtiment Intelligent et Développement Durable* » 30 avril 2013 .*BATIDEV2013. Oran.*
- 9 - **C. Belkacemi , B. Bezzazi** Valorisation d'un déchet de jute dans la fabrication d'un matériaux composite stratifié Séminaire International (Gestion Et Traitement Des Déchets Spéciaux Pour Une Meilleure Santé Publique ) **GEDES 2013 ( 26 /10/2013) Tlemcen.**

- 10** - N. Lakreb, A. Benmounaha, **C, Belkacemi** « Effet du dosage de l'adjuvant super-fluidifiant (Aeternum3) sur la durabilité et le comportement mécanique des ciments composés dans les milieux agressifs » 1er Congrès International de Génie Civil et d'Hydraulique 2012 - **Guelma, 10-11 décembre 2012**
- 11** - **C. Belkacemi** , B. Bezzazi Etude de comportement mécanique d'un liège agglomère blanc», *Colloque International « Caractérisation et Modélisation des Matériaux et Structures » CMMS14 le 12 & 13 novembre 2014. Tizi-Ouzou.*
- 12** - A. Mir, **C. Belkacemi**, B. Bezzazi, B. Belokrichi, B. Hachemane. Etude du comportement mécanique en traction d'un renfort à base de fibres naturelles : Le Jute. Séminaire de Mécanique. Ecole Polytechnique Militaire. Bordj El bahri. Mai 2006.

*Communications Nationales :*

- 13** - **C. Belkacemi** , **B. Bezzazi** Etude comparative du comportement en traction des stratifiés à renfort naturel et différentes matrices (époxy et polyester) *5ème Séminaire National sur les Matériaux, Procédés et Environnement, Vème SNMPE'2014 , Boumerdès, Algérie, 11 et 12 Mai 2014*
- 14** - **C. Belkacemi** , **B. Bezzazi** « Caractérisation Mécanique En Compression Des Panneaux Sandwichs à Renfort et Ame Naturels » *2nd CIMDD, 9 -10 November 2015 University M'hamed Bougara Boumerdes Algeria*
-

**Références bibliographiques**

- [1]. FAO. <http://faostat.fao.org/desktopdefault.aspx?pageid=291&lang=fr>.
- [2]. M. Karus and M. Kaup. Natural fibres in the european automotive industry. *J. Ind. Hemp*, 7(1):119\_131, 2002.
- [3]. J. Nichel and U. Riedel. Activities in biocomposites. *Mater. Today*, 6(4):44\_48, 2003.
- [4]. C. Baley. Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. *Techniques de l'Ingénieur*, AM 5130:1\_12, 2004.
- [5]. C. Baley. Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase. *Composite Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 33(n°7):939\_948, 2002.
- [6]. C. Baley. Contribution à l'étude de matériaux composites à matrice organique renforcés par des fibres de lin. Rapport HDR, Université de Bretagne Sud - Lorient, 2003.
- [7]. C. Baley, Y. Grohens, and I. Pillin. Etat de l'art sur les matériaux composites biodégradables. *Revue des composites et des matériaux composites avancés*, vol.14:135\_166, 2004.
- [8]. K. Van de Velde and P. Kiekens. Thermoplastic pultrusion of natural fibre reinforced composites. *Composite Structures*, 54(2-3):355\_360, 2001.
- [9]. M.J.A. Van den Oever, H.L. Bos, and M. Van Kemenade. Influence of the physical structure of flax fibre on the mechanical properties of flax fibre reinforced polypropylene composites. *Applied Composite Material*, vol. 7(n° 5):387\_402, 2000.
- [10]. N. Defroidt and al. Assessment of the tensile properties of coir, bamboo and jute fibre. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41(n°5):588\_595, 2010.
- [11]. A. K. Bledzki, A. Jaszkiwicz, and D. Scherzer. Mechanical properties of PLA composites with man-made cellulose and abaca fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(4):404\_412, April 2009.
- [12]. S. Ochi. Development of high strength biodegradable composites using manila hemp fiber and starch-based biodegradable resin. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(11):1879\_1883, November 2006.
- [13]. F. Vilaseca, A. Valadez-Gonzalez, P.J. Herrera-Franco, M. À. Pèlach, J. P. López, and P. Mutjé. Biocomposites from abaca strands and polypropylene. part i: Evaluation of the tensile properties. *Bioresource Technology*, 101(1):387\_395, January 2010.
- [14]. M. Brahmakumar, C. Pavithran, and R.M. Pillai. Coconut fibre reinforced polyethylene composites: effect of natural waxy surface layer of the fibre on fibre/matrix interfacial bonding and strength of composites. *Composites Science and Technology*, 65(3-4):563\_569, March 2005.
- [15]. S. V. Prasad, C. Pavithran, and P. K. Rohatgi. Alkali treatment of coir fibres for coir-polyester composites. *Journal of Materials Science*, 18(5):1443\_1454, May 1983.
- [16]. N. E. Zafeiropoulos, D. R. Williams, C. A. Baillie, and F. L. Matthews. Engineering and characterisation of the interface in flax fibre /polypropylene composite materials. part i: Development and investigation of surface treatments. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(8):1083\_1093, August 2002.

- 
- [17]. N. E. Zafeiropoulos, C. A. Baillie, and J. M. Hodgkinson. Engineering and characterisation of the interface in flax fibre/polypropylene composite materials. part ii: The effect of surface treatments on the interface. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(9):1185\_1190, September 2002.
- [18]. A. Le Duigou, I. Pillin, P. Bourmaud, A. and Davies, and C. Baley. Effect of recycling on mechanical behaviour of biocompostable flax/poly(l-lactide) composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(9):1471\_1478, September 2008.
- [19]. Paul Wambua, Jan Ivens, and Ignaas Verpoest. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology*, 63(9):1259\_1264, July 2003.
- [20]. A. G. Facca, M.T. Kortschot, and N. Yan. Predicting the elastic modulus of natural fibre reinforced thermoplastics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(10):1660\_1671, October 2006.
- [21]. P. Mutjé, A. Lòpez, M.E. Vallejos, J.P. Lòpez, and F. Vilaseca. Full exploitation of cannabis sativa as reinforcement/filler of thermoplastic composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(2):369\_377, February 2007.
- [22]. A. Bourmaud and C. Baley. Investigations on the recycling of hemp and sisal fibre reinforced polypropylene composites. *Polymer Degradation and Stability*, 92(6):1034\_1045, June 2007.
- [23]. A. Bourmaud and C. Baley. Rigidity analysis of polypropylene/vegetal fibre composites after recycling. *Polymer Degradation and Stability*, 94(3):297\_305, March 2009.
- [24]. M. Jacob and K. T. Thomas, S. and Varughese. Mechanical properties of sisal/oil palm hybrid fiber reinforced natural rubber composites. *Composites Science and Technology*, 64(7-8):955\_965, June 2004.
- [25]. Y. Li, Y.-W. Mai, and L. Ye. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. *Composites Science and Technology*, 60(11):2037\_2055, August 2000.
- [26]. F. Corrales, F. Vilaseca, M. Llop, J. Giron?, J.A. M?ndez, and P. Mutj? Chemical modification of jute fibers for the production of green-composites. *Journal of Hazardous Materials*, 144(3):730\_735, June 2007.
- [27]. T.-T.-L. Doan, S.-L. Gao, and E. Mäder. Jute/polypropylene composites. part i: Effect of matrix modification. *Composites Science and Technology*, 66(7-8):952\_963, June 2006.
- [28]. T.-T.-L. Doan, H. Brodowsky, and E. Mäder. Jute fibre/polypropylene composites. part ii: Thermal, hydrothermal and dynamic mechanical behaviour. *Composites Science and Technology*, 67(13):2707\_2714, October 2007.
- [29]. K. Goda, M.S. Sreekala, A. Gomes, T. Kaji, and J. Ohgi. Improvement of plant based natural fibers for toughening green composites\_effect of load application during mercerization of ramie fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(12):2213\_2220, December 2006.
- [30]. F. Windels. Des composites renforcés de fibres végétales. Fiche Technique CCI Agro-Industrie, 26:<http://veillestrategie.champagne.ardenne.cci.fr/>, 2007.
- [31]. D. Gay. Matériaux composites. Hermes Science - Paris - Lavoisier, 2005.
- [32]. D. Wyart. Les polymères biodégradables. *Techniques de l'Ingénieur*, AM 3579:1\_21, 2007.
-

- 
- [33]. A. Bergeret and P. Krawczak. Liaison renfort/matrice - comportement des composites. *Techniques de l'Ingénieur*, AM 5307:1\_19, 2006.
- [34]. M.D.H. Beg and K.L. Pickering. Reprocessing of wood fibre reinforced polypropylene composites. part ii: Hygrothermal ageing and its effects. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(9):1565 \_ 1571, 2008.
- [35]. M.D.H. Beg and K.L. Pickering. Reprocessing of wood fibre reinforced polypropylene composites. part i: Effects on physical and mechanical properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(7):1091 \_ 1100, 2008.
- [36]. J. Vallade. Structure et développement de la plante. Morphogénèse et biologie de la reproduction des angiospermes. Dunod, Paris, 1999.
- [37]. K. Persson. Micromechanical modelling of wood and fibre properties. PhD thesis, Department of Mechanics and Materials - Lund University, 2000.
- [38]. A. Béakou, R. Ntenga, J. Lepetit, J.A. Atéba, and L.O. Ayina. Physico-chemical and microstructural characterization of "rhectophyllum camerunense" plant fiber. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(1):67\_74, January 2008.
- [39]. J.P. Thiery. Mise en évidence des polysaccharides sur coupes fines en microscopie électronique. *J. Microsc.*, 6:987, 1967.
- [40]. V. Bossuyt. Etude de la structure et des propriétés mécaniques de la fibre de lin .PhD thesis, Lille, 1941.
- [41]. C.T. Brett and K.W. Wamdron. Physiology and biochemistry of plant cell walls. Chapman et Hall, 1996.
- [42]. Defoirdt N, S Biswas, Vriese L, Tran LQN, Acker JV, Ahsan Q, et al. L'évaluation des propriétés de traction de la fibre de coco, bambou et fibre de jute. *Compos A Appl Sci Fabric*. 2010 ; 41: 588-95.
- [43]. Alves C, Ferrão PMC, Silva AJ, Reis LG, M Freitas, Rodrigues LB, et al. Écoconception de composants automobiles faisant usage de jute naturelle composites de fibres. *J Cleaner Prod*. 2010 ; 18: 313-27.
- [44]. Peijs T. Composites passent au vert. *e-Polymer*. 2002 ; 112 :. n T\_002.
- [45]. Joshia SV, Drzal LT, Mohanty AK, Arora S. Composites en fibres naturelles sont écologiquement supérieure à la fibre de verre composites renforcés ?. *Compos A ?? Appl Sci Fabric*. 2004 ; 35: 371-6.
- [46]. Tomczak F. Estudos sobre a estrutura e Propriedades de fibras de coco e curaua do Brasil. Universidade Federal do Paraná; 2010. [Thèse de doctorat]. - Tomczak F, G Satyanarayana, Sydenstricker THD. Des études sur les fibres lignocellulosiques du Brésil : la partie III -morphology et les propriétés des fibres de curaua brésiliens. *Compos A . Appl Sci Fabric*. 2007 ; 38: 2227-36.
- [47]. D ' Almeida JRM, GRC Aquino, Monteiro SN. Propriétés mécaniques en traction aspects morphologiques et caractérisation chimique de piassava (*Attalea funifera* ) fibres. *Compos A ?? Appl Sci Fabric*. 2006 ; 37: 1473-9.
- [48]. Silva FA, N Chawla, Toledo Filho RD. Comportement en traction haute performance (sisal) fibres. *Compos Sci Technol*. 2008 ; 68: 3438-43.
- [49]. Silva FA, N Chawla, Toledo Filho RD. Comportement mécanique des fibres de sisal naturelles. *J Biobased Mater bioénergie*. 2010; 4: 106-13.
- [50]. Zafeiropoulos, D. R. Williams, C. A. Baillie, and F. L. Matthews. *Engineering*.
-

- and characterisation of the interface in \_ax \_bre/polypropylene composite materials. part i: Development and investigation of surface treatments. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(8):1083\_1093, August 2002.
- [51]. Stocchi A., Lauke B., Va'zquez A., Bernal C. A novel fiber treatment applied to woven jute fabric/vinylester laminates. *Composites : Part A* 38 (2007) 1337–1343.
- [52]. ASTM. ASTM c1557, Méthode d'essai standard pour la résistance à la traction et Young 'du Module de fibres. West Conshohocken, PA, Etats-Unis: American Society for Testing and Materials; 2008.
- [53]. A.J. Panshin and C. deZeeuw. *Textbook of Wood Texchnology Vol 1*, 3rd edition. McGraw-Hill, 1970.
- [54]. R.D. Preston. *The physical biology of plant cell walls*. Chapman and Hall, Halsted Press, 1974.
- [55]. Dietrich Fengel. The ultrastructure of cellulose from wood - part i:Wood ..as the basic V CC material for the isolation of cellulose. *Wood Science and Technology*, 3(3):203\_217, September 1969.
- [56]. Products Laboratory Forest. An interactive java program for determining micro fibril angle from x-ray di\_raction data. *TechLine*, 4:1\_2, 2005.
- [57]. H.F. Jang. Measurement of \_bril angle in wood fbres with polarization confocal microscopy. *Journal of pulp and paper science*, 24:224\_230, 1998.
- [58]. Mohanty A.K., Misra M., Drzal L.T., Selke, Harte B.R., Hinrichsen G., (2005), *Natural Fibres, Biopolymers and Biocomposites: An Introduction*, In *biopolymers and biocomposites*, CRC Press LLC, Boca Raton (FL), pp. 1-36.
- [59]. .Sydenstricker THD, Mochnaz S, Amico SC. Tirez-out et d'autres évaluations dans biocomposites de polyester renforcé de sisal. *Polym Test*. 2003; 22: 375-80.
- [60]. Wang W, Z Cai, J. Yu L'étude sur le procédé de modification chimique de la fibre de jute. *J Eng Fibres Fabr*. 2008; 3: 1-11.
- [61]. Tripathy SS, Landro LD, Fontanelli D, Marchetti A, Levita G. Les propriétés mécaniques des fibres de jute et la force interfaciale avec une résine époxy. *J Appl Polym Sei*. 2000; 75: 1585-1596.
- [62]. Maria Ernestina Alves Fidelis a, Thatiana Vitorino Castro Pereira, Otávio da Fonseca Martins Gomesb,c, Flávio de Andrade Silvaa,\* , Romildo Dias Toledo Filhoa. The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. *ournal of Materials Research and Technology*. Volume 2, Issue 2, April–June 2013, Pages 149-157
- [63]. Angelini (L.G.), Lazzeri (A.), Levita (G.), Fontanelli (D.) et Bozzi (C.). – Ramie (Boehmeri nivea (L.) Gaud.) and Spanish Broom (Spartium junceum L.) fibres for composites materials : agronomical aspects, morphology and mechanical properties. *Industrial Crops and Products*, 11, p. 145-131 (2000).
- [64]. AGRICE-ADEME. – Produits renouvelables : vers un nouvel âge d'or du végétal. Communication Agrice (Agriculture pour la chimie et l'énergie) du 15 janvier 2002. <http://www.Ademe.fr>
- [65]. LI (Y.), MAI (Y.W.) et YE (L.) . – Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. *Composites Science and Technology*, vol. 60, issue 11, p. 2037-2055, août 2000.
-

- 
- [66]. LUYCKX (J.). – Fibres de carbone. Techniques de l'Ingénieur A 2 210, Plastiques et Composites (1995).
- [67]. BATRA (S.K.). – Other long vegetable fibers. In: Lewin (M.), Pearce (E.M.), editors. Handbook Of fibre Science and Technology. New York. Marcel Dekker, vol. IV, Fibre Chemistry, p. 505-575 (1998).
- [68]. MUKHERJEE (P.S.) et SATYANARAYANA (K.G.). – Structure and properties of some vegetable fibbers. II. Pineapple fibre. II. Pine-apple fibre. Journal of Materials Science, vol. 21, p. 51-56 (1986).
- [69]. K.L.PickeringaM.G. AruanEfendyabT.M.Leac . A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance .Composites Part A: Applied Science and Manufacturing  
Volume 83, April 2016, Pages 98-112
- [70]. BEZAZI A.R. Thèse de doctorat.- Etude théorique et expérimentale du comportement mécanique en statique et en fatigue des matériaux composites stratifiés et sandwichs en flexion 3 points 193 pages 2003.
- [71]. S. Lequin, D. Chassagne, T. Karbowski, JM Simon, C. Paulin, JP Bellat "Diffusion de l'oxygène dans le liège" J Agric Food Chem., 60 (2012), pp. 3348-3356
- [72]. T. Karbowski, RD Gougeon, JB ALINC, L. Brachais, F. Debeaufort, A. Voilley, et al. oxydation du vin et le rôle du liège Crit Rev Food Sei., 50 (2010), pp. 20-52 [SD-008]
- [73]. H. Pereira Cork: biologie, production et utilisations Elsevier Science, Amsterdam (2007) [SD-008]
- [74]. JF Mano, NT Correia, JJM Ramos, B. Saramago Le mécanisme de relaxation moléculaire dans le liège comme étudié par les courants de décharge stimulés thermiquement J Mater Sci., 30 (1995), pp. 2035-2041.
- [75]. ME Rosa, MA Fortes effets de taux sur la compression et la récupération des dimensions de liège J Mater Sei., 23 (1988), pp. 879-885
- [76]. O. Anjos, C. Rodrigues, J. Morais, H. Pereira "Effet de la densité sur le comportement de compression de liège" Mater design., 53 (2014), pp. 1089-1096.
- [77]. O. Anjos, H. Pereira, ME Rosa "Effet de la qualité, de la porosité et de la densité sur les propriétés de compression en liège" Eur J Wood Prod., 66 (2008), pp. 295-301
- [78]. J. Abenojar, AQ Barbosa, Y. Ballesteros, JC del Real, LFM da Silva, MA Martinez Effet des traitements de surface sur liège naturel: énergie de surface, l'adhérence, et l'isolation acoustique Bois Sci Technol., 48 (2014), pp. 207-22.
- [79]. GE Reiber, DG Smith, C. Wallace, K. Sullivan, S. Hayes, C. Vath, et al. Effet de chaussures thérapeutiques à pied reulceration chez les patients atteints de diabète - Un essai contrôlé randomisé J Am Med Assoc., 287 (2002), pp. 2552-2558.
- [80]. AMA Pintor, CIA Ferreira, JC Pereira, P. Correia, SP Silva, VJP Vilar, et al. L'utilisation de poudre de liège et de granulés pour l'adsorption des polluants: Un examen Eau Res., 46 (2012), pp. 3152-3166.
- [81]. LJ Gibson, KE Easterling, MF Ashby "La structure et la mécanique du liège"
- [82]. Proc R Soc Lond A, 377 (1981), pp. 99-117.
- [83]. L. Culléré, J. Cacho, V. Ferreira Etude comparative du profil aromatique de différents types de bouchons de vin en liège Food Chem., 112 (2009), pp. 381-387.
-

- [84]. JA Maga, JL Puech Cork et les boissons alcoolisées *Rev alimentaire Int.*, 21 (2005), pp. 53-68
- [85]. H. Pereira La variabilité de la composition chimique du liège *BioResources.*, 8 (2013), pp. 2246-2256.
- [86]. SP Silva, MA Sabino, EM Fernandes, VM Correlo, LF Boesel, RL Reis Cork: propriétés, les capacités et les applications *Int Mater Rev.*, 50 (2005), pp. 345-365.
- [87]. [ AM Gil, M. Lopes, J. Rocha, C. Pascoal Neto Une étude spectroscopique par résonance magnétique nucléaire C à l'état solide de la structure de la paroi cellulaire du liège: l'effet de l'enlèvement de la subérine *Int J Biol Macromol.*, 20 (1997), pp. 293-305
- [88]. N. Cordeiro, MN Belgacem, AJD Silvestre, C. Pascoal Neto, A. Gandini
- [89]. Cork subérine comme une nouvelle source de produits chimiques .: 1. isolement et la caractérisation chimique de sa composition *Int J Biol Macromol.*, 22 (1998), pp. 71-80
- [90]. S. Santos, V. Cabral, J. Graca Cork subérine structure moléculaire: stéréochimie des C-18 époxy et vic-diol oméga-hydroxyacides et alpha, oméga-diacides analysé par RMN J *Agric Food Chem.*, 61 (2013), pp. 7038-7047
- [91]. MA Bernards Démystifier subérine *Can J Bot.*, 80 (2002), pp. 227-240
- [92]. H. Pereira La composition chimique et la variabilité de bouchon de *Quercus suber* L *Bois Sci Technol.*, 22 (1988), pp. 211-218
- [93]. S. Varea, MC Garcia-Vallejo, E. Cadahia, BF de Simon
- [94]. Polyphénols susceptibles de migrer à partir de liège bouchons à vin *Eur aliments Res Technol.*, 213 (2001), pp. 56-61.
- [95]. S. Lequin, D. Chassagne, T. Karbowiak, Rg Gougeon, L. Brachais, MM Bellat
- [96]. "Adsorption équilibres de la vapeur d'eau sur Cork" *J Agric Food Chem.*, 58 (2010), pp. 3438-3445
- [97]. WW Barkas Relations Bois-eau, la partie III. Sorption moléculaire de l'eau par le bois d'épicéas de Sitka *Proc Phys Soc.*, 49 (1937), pp. 237-242
- [98]. WT Simpson, JY Liu "La dépendance du coefficient de diffusion de la vapeur d'eau de tremble (*Populus* sp.) Sur la teneur en humidité" *Bois Sci Technol.*, 26 (1991), pp. 9-21
- [99]. T. Nakano "Effets de la structure cellulaire sur la sorption de l'eau pour le bois" *Holzforschung.*, 57 (2003), pp. 213-218 [SD-008]
- [100]. N. Sombatsompop, K. Chaochanchaikul " Effet de la teneur en humidité sur les propriétés mécaniques, la stabilité thermique et la structure et la texture du produit d'extrusion en poly (chlorure de vinyle) / bois composites de sciure *Polym Int.*, 53 (2004), pp. 1210-1218 [SD-008]
- [101]. N. Stark "Influence de l'absorption de l'humidité sur les propriétés mécaniques des composites bois-farine polypropylène" *J Thermoplast Compos.*, 14 (2001), pp. 421-432 [SD-008].
- [102]. V. Oliveira, ME Rosa, H. Pereira "La variabilité des propriétés de compression en liège" *Bois Sci Technol.*, 48 (2014), pp. 937-948 [SD-008].
- [103]. O. Anjos, H. Pereira, ME Rosa "Les propriétés de traction de liège dans la direction tangentielle : Variation avec la qualité, la porosité, la densité et la position radiale dans la planche de liège" *Mater design.* 31 (2010), pp. 2085-2090 [SD-008].
-

- 
- [104]. O. Anjos, H. Pereira, ME Rosa. "Les propriétés de traction de Cork en contrainte axiale et l'influence de la porosité, la densité, la qualité et la position radiale dans la planche " Eur J Wood Prod., 69 (2011), pp. 85-91 [SD-008]
- [105]. M. Rosa, M. Fortes "Effets de chauffage à la vapeur d'eau sur la structure et les propriétés du liège" Bois Sci Technol., 23 (1989), pp. 27-34 [SD-008]
- [106]. M. Rosa, H. Pereira, M. Fortes "Effets de traitement de l'eau chaude sur la structure et des propriétés de Cork" Fibre de bois Sci., 22 (1990), pp. 149-164 [SD-008]
- [107]. Charte des Bouchonniers liègeurs. Fédération Française des Syndicats du Liège; 2006. [SD-008]
- [108]. KSW Sing, DH Everett, Haul RAW, L. Moscou, RA Pierotti, J. Rouquerol, et al."La communication des données de physisorption pour / systèmes solides de gaz" Pure & Appl Chem., 57 (1985), pp. 603-619 [SD-008]
- [109]. O. Anjos, H. Pereira, ME Rosa " Caractérisation des propriétés de flexion radiales de liège" Eur J Wood Prod., 69 (2011), pp. 557-563 [SD-008].
- [110]. RT Jardin, Fernandes FAO, AB Pereira "Alves de Sousa RJ. Réponse mécanique statique et dynamique des différents agglomérés de liège" Matériaux et conception., 68 (2015), pp. 121-126 [SD-008].
- [111]. MA Fortes, M. Teresa Nogueira "L'effet de poison dans le liège" Materials Science and Engineering: A., 122 (1989), pp 227-232 [SD-008].
- [112]. E. Obataya, M. Norimoto, J. Gril" Les effets de l'eau adsorbé sur les propriétés mécaniques dynamiques de bois" Polymer., 39 (1998), pp. 3059-3064 [SD-008].
- [113]. P. Blasi, SS D'Souza, F. Selmin, PP DeLuca "Plastification effet de l'eau de poly (lactide-co-glycolide)" J Release Control., 108 (2005), pp. 1-9 [SD-008]
- [114]. A. Marzec, PP Lewicki " Antiplastification de produits à base de céréales par l'eau. Partie I. pain plat extrudé" J alimentaire Eng., 73 (2006), pp. 1-8[SD-008].
- [115]. YH Roos, M. Karel "Effet plastifiant de l'eau sur le comportement thermique et la cristallisation des modèles alimentaires amorphes J Food Sei., 56 (1991), pp. 38-43 [SD-008]
- [116]. P. Pittia, G. Sacchetti "Antiplastification effet de l'eau dans les aliments amorphes" Un avis. Food Chem., 106 (2008), pp. 1417-1427 [SD-008]
- [117]. N. Cordeiro, NM Belgacem, A. Gandini, CP Neto " Cork subérine comme une nouvelle source de produits chimiques: 2. Cristallinité, propriétés thermiques et rhéologiques" Bioressources Technol., 63 (1998), pp. 153-158 [SD-008]
- [118]. MH Lopes, CP Neto, AS Barros, D. Rutledge, I. Delgadillo, AM Gil "La quantification de la subérine aliphatique dans Quercus suber L. Cork par spectroscopie FTIR et à l'état solide 13 spectroscopie RMN C- Biopolymers., 57 (2000), pp. 344-351 [SD-008]
- [119]. BC Hancock, G. Zografi "La relation entre la température de transition vitreuse et la teneur en eau des solides pharmaceutiques amorphes" Pharmaceut Res., 11 (1994), pp. 471-477 [SD-008]
- [120]. KJ Zeleznak, RC Hosney "La transition vitreuse en amidon"Cereal Chem., 64 (1987), pp. 121-124 [SD-008]
- [121]. JF Mano "Les propriétés viscoélastiques de liège" J Mater Sei., 37 (2002), pp. 257-263 [SD-008]
-

- [122]. RS Rohella, N. Sahoo, SC Paul, S. Choudhury, V. Chakravorty " Études thermiques sur la lignine isolée et purifiée" *Thermochim Acta.*, 287 (1996), pp. 131-138 [SD-008]
- [123]. GM Irvine " L'importance de la transition vitreuse de la lignine dans la fabrication de pâte thermomécanique " *Bois Sci Technol.*, 19 (1985), pp. 139-149 [SD-008]
- [124]. L. Szczesniak, A. Rachocki, J. Tritt-Goc "Température de transition vitreuse et de la décomposition thermique de la poudre de cellulose " *Cellulose.*, 15 (2008), pp. 445-451 [SD-008].
- [125]. H. Montes, K. Mazeau, JY Cavaillé "Relaxations mécaniques secondaires dans la cellulose amorphe" *Macromolecules.*, 30 (1997), pp. 6977-6984 [SD-008]
- [126]. E. Rosa, M.A. Fortes. Effects of water vapour on structure and properties of cork. *Wood and fiber science*, 23 1989, pp 27-34.
- [127]. M.E.Rosa, M.A.Fortes. Deformation and fracture of cork in tension. *Journal of Materials Science* 26 (1991) 341-348.
- [128]. M.A.Fortes, M.T.Nogueira. The Poisson effect in cork. *Materials Science and Engineering. A* 122 (1989) 227-232.
- [129]. R. Pinto. B. Melo: *Boletim da Junta Nacional de Cortic,a*, 1988, 602, pp 322–328.
- [130]. A. Tadeu. P. Santos. *Appl. Acoust.*, 2003, volume 64, pp 287–310.
- [131]. M. E. Rosa. H. Pereira: *Holzforschung*, 1994, volume 48, pp 226–232.
- [132]. L. Gil. Effect of hot pressing densification on the cellular structure of black agglomerated cork board. *Holz ais Roh und Werkstoff* 52 (1994) 131-134 Springer Verlag.
- [133]. A. M. Gil, M. Lopes, J. Rocha and C. P. Neto: *Int. J. Biol. Macromol.*, 1997, 18, 63–71.
- [134]. KHELIFI H., 1987 – Contribution à l'étude phytoécologique et phytosociologique des formations à chêne liège dans le Nord est algérien. Mémoire de magister. Univ. Sci Technol H Boumediene. Alger.
- [135]. DGF, 2003 - Troisième session du forum des nations unies sur les forêts. Genève, du 26 Mai au 06 Juin 2003. pp 9.
- [136]. Anjos, O, Pereira H, Rosa ME, 2008: Effect of quality, porosity and density on the compression properties of cork. *Holz Roh-Werkst* 66(4), pp.295–301.
- [137]. Aronson, J., Pereira, J.S., & Puasas, J.G., 2009 : *Cork Oak Woodland on the edge*. Islandpress. Washington. Covelo. London. 350 p.
- [138]. Dehane, B., Bouhraoua, R.T., Gonzalez-Adrados, J.R., Belhoucine, L., 2011: Caractérisation de la qualité du liège selon l'état sanitaire des arbres par la méthode d'analyse d'image Cas des forêts de M'Sila et de Zariéffet (Nord-Ouest de l'Algérie). *Forêt méditerranéenne t. XXXII, n° 1*, pp. 39-50.
- [139]. Dehane, B., 2012 : incidence de l'état sanitaire des arbres du chene-liege sur les accroissements annuels et la qualité du liege de deux suberaies oranaises : M'Sila (w.Oran) et Zariéffet (w. Tlemcen). These. Doct. Dept. Forest. Fac. Sci., Univ. Tlemcen, 293p.
- [140]. D.G.F., 2011 : Bilan de la production national de liège. 1p.
- [141]. JHata K.; Sogo M. et Fukuhara T., 1969 : On the Suberine in the outer bark of some Jpenese tree species. *Techn.Bull.Agric.Kagawa Univ.* 20:112-119.
- [142]. Margot P., 2006 : *Du chêne-liège au bouchon* , éditions Ketty & Alexandre, 1063
-

- [143]. Chappelle-sur-Moudon (Suisse) - N° ISBN 2-88114-045-9.
- [144]. Natividade J.V., 1956 : Subericulture. Ecole Nationale des eaux et forêts, Nancy, 302p.
- [145]. Quelinis, N., 2008 : Fiche technique Agro-industrie « Le liège ».Fiche n°33. 6p.
- [146]. Rosa, M.E., Pereira, H., & Fortes, M.A. 1990 : Effects of hot water on the structure and compressive properties of cork. *Wood and fiber Sci.*22,pp.149-164.
- [147]. Santos Pereira, J., Burgalho, M.N. & Caldeira M.C., 2008: From the cork oak to cork. A sustainable systeme. APCOR( Portugal). 44p.
- [148]. Sesbou A. et Hachmi M., 1989 : le liège, caractéristiques technologiques et utilisation, ENFI., Salé.p : 20.
- [149]. H. Pereira (2007). *Cork: Biology, production and uses*. Book 336 pages. Elsevier, Amsterdam.]
- [150]. Agostino Pintus Colloque International “Liège et écoconstruction”, 13- 15 juin 2012, Vivès *Wood Sci. Techn.* 22 (1988) 211-218.].
- [151]. Khelifi H., 1987. Contribution à l'étude phytoécologique et phytosociologique des formations à chêne-liège dans le Nord-Est algérien. mémoire de Magister. Univ. Sci. Technol. H. Boumédiène. Alger, 151 p.
- [152]. Mr GHEFAR Mohammed, 2013-2014. Etat d'infestation des forêts de chêne liège (*Quercus suber*) de l'oranie par *Platypus cylindrus* (Coleoptera, Curculionidae, Platypodinae) et étude biologique de l'insecte dans le bois. . Mémoire de Magister. Univ. Abou Bekr Belkaid.. Tlemcen. Alger, 94 p
- [153]. M. E. Rosa. M. A. Fortes. Temperature induced alterations of the structure and
- [154]. mechanical properties of cork. *Mater. Science Eng.*, 1988, 100, 69–78.
- [155]. F. Ben Abdallah, R. Ben Cheikh, M. Baklouti, Z. Denchev. Characterization of Composite Materials Based on PP-Cork Blends. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 25, No. 14, 1499-1506 (2006).
- [156]. M. E. Rosa, H. Pereira and M. A. Fortes. Effects of hot water treatment on the structure and properties of cork. *Wood and Fiber Science*, 1990, 22(2), 149–164.].
- [157]. Mohanty A.K., Misra M., Drzal L.T., Selke, Harte B.R., Hinrichsen G., (2005), *Natural Fibres, Biopolymers and Biocomposites: An Introduction*, In *biopolymers and biocomposites*, CRC Press LLC, Boca Raton (FL), pp. 1-36.
- [158]. Bismarck A., Mishra S., Lampke T., (2005), *Plant Fibres as Reinforcement for Green Composites*, *Natural fibres, Biopolymers and Biocomposites*, CRC Press, Boca Raton (FL).
- [159]. S.Sanchez-Saez,E.Barbero,J.Cirne,2010.Experimental study of agglomerated-cork-cored structures subjectd to ballistic impacts.*journal of Materials Letters* 65 ;2152-2154.
- [160]. R. Pinto. B. Melo: *Boletim da Junta Nacional de Cortic,a*, 1988, 602, pp 322–328.
- [161]. A. Tadeu. P. Santos. *Appl. Acoust.*, 2003, volume 64, pp 287–310. wich âme en liège et peaux jute/époxy. AMAC. 17 émes Journées .
- [162]. M. E. Rosa. H. Pereira: *Holzforschung*, 1994, volume 48, pp 226–232. 2 juin 2011 - ites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France.
- [163]. L. Gil. Effect of hot pressing densification on the cellular structure of black agglomerated cork board. *Holz ais Roh und Werkstoff* 52 (1994) 131-134 Springer Verlag.

- [164]. H. Pereira. (1988) Chemical composition and variability of cork from *Quercus suber* L. *Wood Science and Technology* 22(3):211-218 · September 1988
- [165]. Sousa-Martins J., Kakogiannis D., Coghe F., Reymen B., Teixeira-Dias F. « Behaviour of sandwich structures with cork compound cores subjected to blast waves *Engineering Structures* ». *Engineering Structures* 46, 140–146, (2013).
- [166]. Silva, M. A.; Julien, M.; Jourdes, M.; Teissedre, P. L., Impact of closures on wine post-bottling development: a review. *Eur. Food Res. Technol.* 2011, 1-10.
- [167]. The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers Maria Ernestina Alves Fidelis a, Thatiana Vitorino Castro Pereira, Otávio da Fonseca Martins Gomes, Flávio de Andrade Silva,\*, Romildo Dias Toledo Filho. *Journal of Materials Research and Technology* Volume 2, Issue 2, April–June 2013, Pages 149–157.
- [168]. H. Pereira. The thermochemical degradation of cork. *Wood Science and Technology* 26 pp 259-269 (1992).
- [169]. Mir A., « Etude mécanique, thermomécanique et hygrothermique d'un matériau composite sandwich à âme en liège et peaux en jute/époxy ». Thèse de doctorat, Université M'hamed Bougara – Boumerdes, (2010).
- [170]. Le Duigou A, Davies P, Baley C. « Interfacial bonding of flax fiber/poly(L-lactide) bio-composites ». *Composites Science and Technology*. Vol. 70, pp. 231-239, 2010.
- [171]. Wambua P, Ivens J, Verpoest I. « Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? ». *Composites Science and Technology*; Vol. 63, pp. 1259–1264, 2003.
- [172]. A Le Duigou, I Pillin, A Bourmaud, P Davies, C Baley. « Effect of recycling on mechanical behaviour of biocompostable flax/poly(L-lactide) composites ». *Composites: Part A*. Vol. 39, pp. 1471–1478, 2008. *Comptes Rendus des JNC 17 - Poitiers 2011*.
- [173]. Doan Thi Thu Loan; Investigation on jute fibres and their composites based on polypropylene and epoxy matrices; Thèse de doctorat, l'université de Dresden, 2006.
- [174]. Maya Jacob John, Rajesh D. Anandjiwala, 2008; *Recent Developments in Chemical Modification and Characterization of Natural Fiber-Reinforced Composites*; *Polymer composites*, 187-207.
- [175]. A.K. Bledzki, J. Gassan, 1999; *Composites reinforced with cellulose based fibres*; *Prog. Polym. Sci.* 24, 221-274.
- [176]. M. S. Sreekala, M. G. Kumaran, Sabu Thomas, 1997, *Oil Palm Fibers: Morphology, Chemical Composition, Surface Modification, and Mechanical Properties*; *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 66, 821-835.
- [177]. L.Y. Mwaikambo, M.P. Ansell, 1999; The effect of chemical treatment on the properties of hemp, sisal, jute and kapok fibres for composite reinforcement; *Die Angewandte Makromolekulare Chemie* 272, 108-116.
- [178]. K. H. Wang, M. H. Choi, C. M. Koo, Y. S. Choi, Chung IJ, 2001; *Synthesis and characterization of maleated polyethylene/clay nanocomposites*; *Polym J* 42, 9819-9826.
- [179]. Dipa Ray, B K Sarkar, A K Rana, N R Bose, 2001, *Effect of alkali treated jute fibres on composite properties*; *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 24, No. 2, 129-135.
-

- 
- [180]. Mahuya Das, Debabrata Chakraborty, 2008; Evaluation of Improvement of Physical and Mechanical Properties of Bamboo Fibers Due to Alkali Treatment; *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 107, 522–527.
- [181]. D. Ray, B.K. Sarkar, A.K. Rana, N.R. Bose, 2001; The mechanical properties of vinylester resin matrix composites reinforced with alkali-treated jute fibres; *Composites: Part A* 32, 119-127.
- [182]. C. Baley, « Analysis of the flax fibers tensile behavior and analysis of the tensile stiffness increase », *Composites Part A*, 2002.
- [183]. A. Khalil, H.D Rozman, N.N Ahmad, H. Ismail, « Acetylated plant-fiber-reinforced polyester composites: a study of mechanical, hygrothermal, and aging characteristics». *Polymer Technology Engineering*, vol.39, n 04, p. 757-781, 2000.
- [184]. H. Lilholt, H. Toftegaard, A.B. Thomsen, A.S. Schmidt, « Natural composites based on cellulosic fibres and polypropylene matrix. Their processing and characterization». *Proceedings of ICCM 12, Paris, July, 1999*.
- [185]. M.R. Piggott, A. Sanadi, P.S. Chua, D. Andison, « Mechanical interactions in the interfacial region of fiber reinforced thermosets». In Ishida H. and Koenig J.L., eds, *Composites interfaces*, Elsevier Science publishing, p. 109-121, 1986.
- [186]. B. Miller, P. Muri, L. Rebenfeld, « A microbond method for determination of the shear strength of a resin/fibre interface». *Composites Science and Technology*, 28, 1987, p.17-32.
- [187]. B.D. Pallensen, « The quality of combined-harvested fibre flax for industrial purposes depends on the degree of retting». *Industrial Crops and Products*, vol.5, p.65-78, 1996.
- [188]. L.Y. Mwaikambo, M.P. Ansell, 2003, Hemp fibre reinforced cashew nut shell liquid composites; *Composites Science and Technology* 63, 1297-1305.
- [189]. W.H. Morrison III, D.D. Archibald, H.S.S. Sharma, D.E. Akin, 2000; Chemical and physical characterization of water- and dew-retted flax fibers; *Industrial Crops and Products* 12, 39-46.
- [190]. A. Valadez-Gonzalez, J.M. Cervantes-Uc, R. Olayo, P.J. Herrera-Franco, 1999; Effect of fiber surface treatment on the fiber–matrix bond strength of natural fiber reinforced composites; *Composites: Part B* 30, 309-320.
- [191]. K Chalet, JP Jernot, J Breard, M Gomina. « Scattering of morphological and mechanical properties of flax fibres ». *Industrial Crops and Products*. 2010.
- [192]. Duigou A, Davies P, Baley C. « Interfacial bonding of flax fiber/poly(L-lactide) biocomposites ». *Composites. Science and Technology*. Vol. 70, pp. 231-239, 2010.
- [193]. A Le Duigou, I Pillin, A Bourmaud, P Davies, C Baley. « Effect of recycling on mechanical behaviour of biocompostable flax/poly(L-lactide) composites ». *Composites: Part A*. Vol. 39, pp. 1471–1478, 2008. *Comptes Rendus des JNC 17 - Poitiers 2011*
- [194]. S.J. Gassan, A. Bledzki, «Composites reinforced with cellulose based fibres». *Progress in Polymer Science*, vol .24, p.221-274,1999.
- [195]. , C. Baley, T. D'Anselme, J. Guyader, « Fibres végétales : renfort de matériaux composites à matrice organique». *Revue des composites et des matériaux avancés, Hermès*, vol. 7, p.79-97,1997.
-

- [196]. , C. Baley, B. Lamy, « Propriétés mécaniques des fibres de lin utilisées comme renforts de matériaux composites ». *Revue des composites et des matériaux avancés*, Hermès, vol. 10, n 11, p.7-24,2000...
- [197]. T. Munikenche Gowda, A. C. B. Naidu, T.M. Rajput Chhaya, "Some mechanical properties of untreated jute fabric reinforced polyester composites", *Composites Part*, Volume 30, Issue 3 (1999), 277-284.
- [198]. [2] A. Mir, R. Zitoune, F. Collombet, B. Bezzazi. "Study of Mechanical and Thermomechanical Properties of Jute / Epoxy Composite Laminate". *Journal of Reinforced Plastics and Composites* Volume 29 Number 11. 2010. pp1669-1680.
- [199]. A. M. Gil, M. Lopes, J. Rocha and C. P. Neto: *Int. J. Biol. Macromol.*, 1997, 18, 63–71.
- [200]. R. Pinto and B. Melo: *Boletim da Junta Nacional de Cortiça*, 1988, 602, 322–328.
- [201]. Vernet J.L., « Les données historiques et l'étude de la flore méditerranéenne », *Coll. Int/C.N.R.C.no 235*, P.305-353, (1974).
- [202]. Jaudon J.L., « Le Lami bois, nouveau matériau dérivé du bois ». Paris : Centre technique du bois, 27 p. +6 annexes, (1981).
- [203]. Jaquiot C. «Atlas anatomique des bois des conifères », Paris ,80 p, (1955).
- [204]. Keller R., «Structures -Composition- Formation du bois », Cours de D.E.A. Sciences du bois. E. N.G.R.E.F, p.p. 15, (1994).
- [205]. Harrington J., «Les caractéristiques physiques et mécaniques du bois de pin d'Alep». *Softwood structure* (1996), [http:// www.mech.canterbury.ac.nz/sp](http://www.mech.canterbury.ac.nz/sp).
- [206]. Nahal L., « Le Pin d'Alep (*Pinus-halepensis* Mili), étude taxonomique, phytogéographique, écologique et sylvicole ». *Annales des Forêts et de Station de Recherche et Expériences*. Nancy (1962).
- [207]. Centre technique du bois (C.T.B). « Principaux bois utilisés en France». P 13, (1983).
- [208]. NF T 54-602, Norme Française, « Structures sandwich à base de plastique, essai de la compression perpendiculaire ». Afnor 83647 ; Novembre (1983).
- [209]. NF T 54-603, Norme Française, « Structures sandwich à base de plastique, essai de traction perpendiculaire », Afnor 83648 ; Novembre (1983).
- [210]. NF T 54-604, Norme Française, « Structures sandwich à base de plastique, essai de la compression longitudinale sans ou avec flambage », Afnor 86618 ; Décembre (1986).
- [211]. NF T 54-606, Norme Française, « Structures sandwich à base de plastique, essai de flexion. Afnor 87461 ; Octobre (1987).
- [212]. NF T 54-605, Norme Française, «Structures sandwich à base de plastique, essai de cisaillement», Afnor 83650 ; Novembre (1983).
- [213]. Lakreb N., Bezzazi B., Pereira H., «Mechanical strength properties of innovative sandwich panels with expanded cork agglomerates», *Journal of Wood and Wood products-Springer*.
- [214]. Sousa-Martins J., Kakogiannis D., Coghe F., Reymen B., Teixeira-Dias F. « Behaviour of sandwich structures with cork compound cores subjected to blast waves *Engineering Structures* ». *Engineering Structures* 46, 140–146, (2013).
- [215]. James S., Hyung-ick K., Jonghwan S., « Natural cork agglomerate employed as an environmentally friendly solution for quiet sandwich composites», *Scientific Reports*; 403(2):1–6, (2012).

- [217]. Anjos O., Pereira H., Rosa M.E., «Effect of quality; porosity and density on the compression properties of cork», *Holz Roh Werkst* 66(4):295–301, (2008).
- [218]. Anjos O., Rodrigues C., Morais J., Pereira H., «Effect of density on the compression behaviour of cork», *Materials and Design*, 53:1089–1096, (2014).
- [219]. Moreira R.A.S., Melo F.J.Q., Dias Rodrigues J.F., «Static and dynamic characterization of composition cork for sandwich beam cores». *Journal of Materials Science*, 45 (12): 3350-3366, (2010).
- [220]. Soares B., Reis L., Sousa L., «Cork composites and their role in sustainable development», *Process Engineering*; 10: 3214–9, (2011).
- [221]. Gibson L.J., Easterling K. E., Ashby M. F., «The structure and mechanics of cork». *Proceeding of the Royal Society of London A*, 377: 99-117, (1981).
- [222]. Rosa M.E., Fortes M.A. «Rate effects on the compression and recovery of dimensions of cork». *Journal of Materials Science*; 23(3):879–85, (1988).
- [223]. Rosa M.E., Pereira H, Fortes M.A. «effects of hot water treatment on the structure and properties of cork. *wood and fiber science* ; Number 2 / April 1990.
-