

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



Faculté De Génie De Construction  
Département de Génie Mécanique  
**Mémoire de fin d'études**



En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER ACADEMIQUE**

En Génie Mécanique

Spécialité :

Génie Des Matériaux

## Thème

**Durabilité et comportement au vieillissement des panneaux sandwichs à âme en liège et peaux en jute/ résine époxy**

Présenté par

**Mlle. BOUAZOUNI Fadhila**

**M. BOUCEBCI Toufik**

Devant le jury composé de :

Président	Mr. FILALI	Said	MCB	UMMTO
Promotrice	Mme. MEGHLAOU	Bahia	MCB	UMMTO
Examinatrice	Mme. MENDIL	Sabrina	MCB	UMMTO

Soutenu le: 29 Septembre 2025

**2024/2025**

# *Remerciements*

*Avant toute chose, nous rendons grâce à Dieu Tout-Puissant pour nous avoir donné la volonté et l'endurance nécessaires à l'accomplissement de ce travail.*

*Nous adressons nos plus sincères remerciements à notre promotrice de mémoire, Mme MEGHLAOUI Bahia (MCB, UMMTO), pour la confiance qu'elle nous a accordée, ainsi que pour sa disponibilité et ses conseils avisés tout au long de ce projet.*

*Notre gratitude s'étend à l'ensemble des enseignants du département de Génie Mécanique qui ont contribué à notre formation.*

*Nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail et de nous honorer de leur présence.*

*Enfin, nous n'oublions pas nos familles et nos amis, dont le soutien moral et l'affection ont été essentiels à la réalisation de ce mémoire..*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail,*

*À mes très chers parents, que dieu les protège, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien infailible.*

*À mes chers frères, Karim et Samir, et à mes merveilleuses sœurs, Djedjiga et Rabiha. Je dédie également ce travail à leurs épouses, leurs époux et à tous mes neveux et nièces, pour la force et la joie que notre grande famille m'apporte.*

*À tous mes proches et amis, pour leurs encouragements constants.*

*Et enfin, je dédie ce travail avec une pensée toute particulière et émue à la mémoire de mon cher oncle, Dada Ali. Puisse ce travail honorer son souvenir.*

*Toufik*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail*

*À mes chers parents, pour leurs encouragements et  
leur soutien inconditionnel.*

*À mes frères et sœurs, en particulier à ma sœur Assia.*

*À mon binôme, M. Boucebci Toufik, pour son soutien  
essentiel durant la réalisation de ce mémoire.*

*Fadhila*

## **Résumé**

Ce travail porte sur l'élaboration et la caractérisation de panneaux sandwichs innovants, appartenant à la famille des biocomposites. L'objectif est de développer une alternative écologique en utilisant des fibres naturelles : une âme en liège aggloméré est associée à des peaux en composite de jute et de résine époxy.

L'étude se concentre sur la durabilité de ces matériaux, en analysant l'impact du vieillissement par immersion dans l'eau distillée sur leurs propriétés mécaniques. Un point crucial de la recherche est l'amélioration de l'interface fibre/matrice, qui est le maillon faible de ce type de composite. Pour cela, un traitement de surface (spécifiquement un traitement alcalin) est appliqué aux fibres de jute.

La méthodologie compare des échantillons traités et non traités via des essais mécaniques (flexion, compression), une analyse de l'absorption d'eau, et une caractérisation non destructive par ultrasons.

Les résultats confirment que le traitement alcalin est essentiel : il réduit l'absorption d'eau, protège l'interface et permet au panneau de conserver une bien meilleure résistance mécanique après vieillissement, validant ainsi la viabilité de cette solution pour des applications durables.

**Mots-clés :** Panneau sandwich, Matériaux composites, Biocomposites, Fibres de jute, Liège aggloméré, Compression, Flexion trois points, Absorption d'eau, Ultrasons

## **Abstract**

This work focuses on the design and characterization of innovative sandwich panels, belonging to the biocomposite family. The objective is to develop an ecological alternative using natural fibers: an agglomerated cork core is combined with skins made of a jute and epoxy resin composite.

The study concentrates on the durability of these materials by analyzing the impact of hygrothermal aging (water immersion) on their mechanical properties. A crucial point of the research is the improvement of the fiber/matrix interface, which is the weak link in this type of composite. To achieve this, a surface treatment (specifically an alkaline treatment) is applied to the jute fibers.

The methodology compares treated and untreated samples through mechanical tests (bending, compression), a water absorption analysis, and non-destructive characterization by ultrasound.

The results confirm that the alkaline treatment is essential: it reduces water absorption, protects the interface, and allows the panel to maintain a much better mechanical resistance after aging, thus validating the viability of this solution for sustainable applications.

**Keywords:** Sandwich Panel, Composite Materials, Biocomposites, Jute Fibers, Agglomerated Cork, Compression, Three-Point Bending, Water Absorption, Ultrasound.

## ملخص

يركز هذا العمل البحثي على تصميم وتوصيف ألواح ساندويتش (عازلة) مبتكرة تنتمي إلى عائلة المواد المركبة الحيوية. الهدف هو تطوير بديل صديق للبيئة باستخدام ألياف طبيعية، حيث يتكون الهيكل من قلب من الفلين المضغوط وطبقتين خارجيتين (جلود) من مادة مركبة تتكون من ألياف الجوت وراتنج الإيبوكسي.

تركز الدراسة على متانة هذه المواد من خلال تحليل تأثير التقادم الرطوبي الحراري (عبر الغمر في الماء) على خصائصها الميكانيكية. تتمثل إحدى النقاط الحاسمة في البحث في تحسين السطح البيني بين الألياف والمصفوفة، والذي يعتبر الحلقة الأضعف في هذا النوع من المواد المركبة. ولتحقيق ذلك، تم تطبيق معالجة سطحية (تحديداً معالجة قلووية) على ألياف الجوت.

تعتمد المنهجية على مقارنة العينات المعالجة وغير المعالجة عبر اختبارات ميكانيكية (الضغط والانحناء ثلاثي النقاط)، وتحليل امتصاص الماء، بالإضافة إلى التوصيف غير المتلف باستخدام الموجات فوق الصوتية.

تؤكد النتائج أن المعالجة القلووية ضرورية، حيث إنها تقلل من امتصاص الماء، وتحمي السطح البيني، وتسمح للوح بالحفاظ على مقاومة ميكانيكية أفضل بكثير بعد التقادم، مما يثبت جدوى هذا الحل للتطبيقات المستدامة.

**الكلمات المفتاحية:** لوح ساندويتش (عازل)، مواد مركبة، مواد مركبة حيوية، ألياف الجوت، فلين مضغوط، ضغط، انحناء ثلاثي النقاط، امتصاص الماء، موجات فوق صوتية.

# **Sommaire**

## Sommaire

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : Généralités sur les matériaux composites et les panneaux sandwichs</b>	
<b>I.1 Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>I.2 Généralités sur les matériaux composites et les panneaux sandwich .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2.1 Introduction aux matériaux composites .....</b>	<b>3</b>
<b>I.3 Structure et constituants des panneaux sandwichs .....</b>	<b>4</b>
I.3.1 Définition et principe des structures sandwiches .....	4
I.3.2 Matériaux constitutifs des peaux .....	5
I.3.3 Matériaux constitutifs de l'âme .....	6
I.3.4 Interfaces et adhésifs .....	7
<b>I.4 Propriétés mécaniques des panneaux sandwichs .....</b>	<b>8</b>
I.4.1 Comportement en flexion .....	8
I.4.2 Comportement en compression .....	9
I.4.3 Comportement au cisaillement .....	10
I.4.4 Comportement à l'impact .....	10
<b>I.5 Applications des panneaux sandwichs.....</b>	<b>11</b>
I.5.1 Applications dans le secteur du bâtiment .....	11
I.5.2 Applications dans le secteur des transports .....	11
I.5.3 Applications dans d'autres secteurs industriels.....	12
<b>I.6 Avantages et limites des matériaux écologiques dans les panneaux sandwichs. 12</b>	
I.6.1 Avantages environnementaux .....	12
I.6.2 Défis techniques et économiques .....	13
I.6.3 Perspectives d'amélioration .....	13
<b>I.7 Durabilité et mécanismes de vieillissement des matériaux composites .....</b>	<b>14</b>
I.7.1 Introduction aux phénomènes de vieillissement .....	14

I.7.2 Principaux mécanismes de vieillissement.....	15
I.7.2.1 Vieillissement physique .....	15
I.7.2.2 Vieillissement chimique .....	16
I.7.2.3 Vieillissement hygrothermique.....	17
I.7.2.4 Vieillissement mécanique.....	20
<b>I.8 Effets du vieillissement sur les propriétés mécaniques des matériaux composites</b> .....	<b>21</b>
I.8.1 Évolution des propriétés en traction .....	21
I.8.2 Évolution des propriétés en flexion.....	21
I.8.3 Évolution des propriétés en cisaillement .....	22
I.8.4 Évolution de la résistance à l'impact.....	23
<b>I.9 Méthodes d'évaluation du vieillissement .....</b>	<b>23</b>
I.9.1 Vieillissement naturel .....	23
I.9.2 Vieillissement accéléré .....	24
<b>I.10 Stratégies d'amélioration de la durabilité .....</b>	<b>25</b>
I.10.1 Traitement des fibres naturelles .....	25
I.10.2 Modification des matrices polymères.....	27
I.10.3 Optimisation des interfaces.....	28
I.10.4 Revêtements protecteurs .....	29
<b>I.11 Conclusion .....</b>	<b>30</b>
<b>CHAPITRE II : Partie expérimentale</b>	
<b>II.1 Introduction.....</b>	<b>31</b>
<b>II.2 Structure des panneaux sandwichs .....</b>	<b>31</b>
II.2.1 Âme en liège aggloméré.....	31
II.2.2 Peaux en composite époxy /jute.....	31
II.2.3 Interface âme/peaux : .....	32

<b>II.3 Matériaux utilisés pour préparer les panneaux sandwich Époxy/jute/liège .....</b>	<b>32</b>
II.3.1 Matériaux pour l'Âme .....	32
II.3.2 Matériaux pour les peaux .....	33
II.3.3 Matériaux auxiliaires .....	33
<b>II.4 Préparation des panneaux sandwichs Époxy/jute/liège .....</b>	<b>34</b>
II.4.1 Préparation de l'Âme en liège .....	34
II.4.2 Préparation des peaux en composite époxy/jute .....	34
II.4.3 Préparation de mélange de résine .....	35
II.4.4 Fabrication des peaux en composite époxy/jute par moulage au contact .....	36
II.3.3 Préparation du panneau sandwich Époxy/jute/liège .....	36
<b>II.5 Conditions de vieillissement des panneaux sandwichs jute/époxy /liège .....</b>	<b>40</b>
II.5.1 Équipement et les conditions de vieillissement .....	40
II.5.2 Procédure .....	40
<b>II.7 Conclusion .....</b>	<b>47</b>
<b>CHAPITRE III : Résultats et discussions</b>	
<b>III.1 Introduction .....</b>	<b>48</b>
<b>III.1 Absorption d'eau .....</b>	<b>48</b>
III.1.1 Effet de traitement .....	49
III.1.2 Effet du temps de vieillissement .....	51
<b>III.2 Test de compression .....</b>	<b>53</b>
III.2.1 Comportement en compression de l'âme : Liège .....	53
III.2.2 comportement en compression des panneaux sandwichs .....	55
III.2.2 Effet de vieillissement .....	60
<b>III.3 Test de flexion à trois points .....</b>	<b>67</b>
III.3.1 Comportement en flexion à trois points des constituants .....	67
III.3.1.1 L'âme : Le liège seul .....	67

---

III.3.1.2 La peau : Composite en jute/époxy .....	68
III.3.2 Effet de traitement.....	69
III.3.3 Effet de vieillissement.....	73
<b>III.4 Caractérisation acoustique par ultrasons.....</b>	<b>78</b>
III.4.1 Analyse des constituants à l'état initial .....	78
III.4.2 Analyse de l'impact du vieillissement sur les panneaux sandwichs .....	79
<b>III.5 Conclusion .....</b>	<b>81</b>
<b>Conclusion générale et perspectives .....</b>	<b>82</b>
<b>Bibliographie.....</b>	
<b>Annexe A : Norme ASTM D570 – Méthode d'essai standard pour l'absorption d'eau .....</b>	
<b>Annexe B : Les courbes contrainte-déformation des essais de flexion trois points.....</b>	
<b>Annexe C : Résultats bruts des essais acoustiques par ultrasons.....</b>	

# Liste des figures

## Liste des figures

**CHAPITRE I : Généralités sur les matériaux composites et les panneaux sandwichs**

<b>Figure I. 1:</b> Différents constituants d'un matériau composite .....	<b>3</b>
<b>Figure I. 2:</b> Schématisation d'une plaque sandwich .....	<b>5</b>
<b>Figure I. 3:</b> Matériaux pour les peaux .....	<b>5</b>
<b>Figure I. 4 :</b> Facteurs influençant la qualité de l'interface des panneaux sandwichs .....	<b>7</b>
<b>Figure I. 5:</b> schéma représentant un sandwich en flexion à trois points .....	<b>8</b>
<b>Figure I. 6:</b> Rupture des peaux en traction ou en compression .....	<b>9</b>
<b>Figure I. 7:</b> Mode de rupture par cisaillement de l'âme.....	<b>10</b>
<b>Figure I. 8:</b> Les applications des panneaux sandwichs varient de la construction à l'industrie....	<b>12</b>
<b>Figure I. 9:</b> Mécanismes de vieillissement des panneaux sandwichs à âme en liège .....	<b>15</b>
<b>Figure I. 10:</b> Étapes de l'oxydation des polymères .....	<b>17</b>
<b>Figure I. 11:</b> Stratégies d'amélioration de la durabilité des composites.....	<b>25</b>

**CHAPITRE II : Partie expérimentale**

<b>Figure II. 1:</b> Structure d'un panneau sandwich à âme en liège et peau en jute/résine.....	<b>31</b>
<b>Figure II. 2:</b> Toile de jute-naturelle 230g/ m <sup>2</sup> .....	<b>33</b>
<b>Figure II. 3:</b> Les étapes de traitement alcalin .....	<b>35</b>
<b>Figure II. 4:</b> a) Tissu de jute non traité b) Tissu de jute traité.....	<b>35</b>
<b>Figure II. 5 :</b> Peau en composite Résine époxy/ jute non traité.....	<b>36</b>
<b>Figure II. 6 :</b> Application de l'adhésif sur la face supérieure de l'âme en vue de l'assemblage du panneau sandwich .....	<b>37</b>
<b>Figure II. 7:</b> Application d'un poids mort (blocs de béton) pour assurer une pression uniforme lors du collage du panneau sandwich .....	<b>37</b>
<b>Figure II. 8 :</b> Vue du panneau sandwich après polymérisation et démoulage .....	<b>38</b>
<b>Figure II. 9 :</b> Vue du panneau sandwich après opérations de finition .....	<b>38</b>
<b>Figure II. 10 :</b> Une scie à format .....	<b>39</b>
<b>Figure II. 11:</b> Les éprouvettes pour la flexion et la compression .....	<b>39</b>
<b>Figure II. 12:</b> L'immersion des éprouvettes dans l'eau distillée .....	<b>41</b>

<b>Figure II. 13:</b> Renouvellement d'eau après 7 jours .....	<b>41</b>
<b>Figure II. 14:</b> Montage d'essai de flexion à trois points.....	<b>44</b>
<b>Figure II. 15:</b> un schéma d'une compression longitudinale .....	<b>44</b>
<b>Figure II. 16:</b> un schéma d'une compression perpendiculaire .....	<b>45</b>
<b>Figure II. 17:</b> Essai de compression perpendiculaire.....	<b>46</b>
<b>Figure II. 18:</b> Détecteur de défauts par ultrasons utilisé pour la caractérisation acoustique .....	<b>47</b>

### CHAPITRE III : Résultats et discussions

<b>Figure III. 1:</b> Évolution du taux d'absorption d'eau en fonction du temps pour les panneaux avec jute traitée (PS-JT-V7J) et non traitée (PS-JNT-V7J).....	<b>49</b>
<b>Figure III. 2:</b> Évolution du taux d'absorption d'eau en fonction du temps pour les panneaux avec jute traitée (PS-JT-V14J) et non traitée (PS-JNT-V14J).....	<b>50</b>
<b>Figure III. 3:</b> Évolution du taux d'absorption d'eau en fonction du temps pour les panneaux avec jute traitée (PS-JT-V21J) et non traitée (PS-JNT-V21J).....	<b>50</b>
<b>Figure III. 4:</b> Taux d'absorption d'eau des panneaux sandwichs à peaux de jute traitée en fonction de la durée d'immersion.....	<b>51</b>
<b>Figure III. 5:</b> Courbe force –déplacement en compression longitudinale et perpendiculaire du l'âme : liège seul .....	<b>53</b>
<b>Figure III. 6 :</b> Courbe force –déplacement en compression longitudinale et perpendiculaire .....	<b>57</b>
<b>Figure III. 7:</b> Courbe force –déplacement en compression longitudinale et perpendiculaire des panneaux sandwichs vieillis 7 jours (jute traitée et non traitée).....	<b>57</b>
<b>Figure III. 8:</b> Courbe force –déplacement en compression longitudinale et perpendiculaire des panneaux sandwichs vieillis 14 jours (jute traitée et non traitée).....	<b>58</b>
<b>Figure III. 9:</b> Courbe force –déplacement en compression longitudinale et perpendiculaire des panneaux sandwichs vieillis 21 jours (jute traitée et non traitée).....	<b>58</b>
<b>Figure III. 10:</b> Évolution de la force maximale en compression longitudinale et perpendiculaire selon le temps de vieillissement (jute traitée et non traitée).....	<b>62</b>
<b>Figure III. 11:</b> Variation du déplacement à la force maximale en compression longitudinale et perpendiculaire en fonction de la durée de vieillissement (jute traitée et non traitée).....	<b>62</b>
<b>Figure III. 12:</b> Module d'élasticité des panneaux sandwichs en compression longitudinale et perpendiculaire suivant le temps de vieillissement (jute traitée et non traitée).....	<b>63</b>

<b>Figure III. 13:</b> Contrainte maximale en compression longitudinale et perpendiculaire en fonction de la durée de vieillissement (jute traitée et non traitée).....	<b>63</b>
<b>Figure III. 14:</b> Évaluation comparative des performances relatives (force maximale) en compression longitudinale et perpendiculaire en fonction de la durée de vieillissement .....	<b>66</b>
<b>Figure III. 15:</b> Évaluation comparative des performances relatives (contrainte maximale) en compression longitudinale et perpendiculaire en fonction de la durée de vieillissement .....	<b>66</b>
<b>Figure III. 16:</b> Courbe force –déplacement en flexion à trois points des éprouvettes de liège seul .....	<b>67</b>
<b>Figure III. 17:</b> Courbe force –déplacement en flexion à trois points des éprouvettes des peaux (composite jute/époxy) .....	<b>68</b>
<b>Figure III. 18:</b> Courbe force-déplacement en flexion à trois points de panneau sandwich non vieilli à jute non traitée (PS-JNT-NV) et à jute traitée (PS-JT-NV).....	<b>70</b>
<b>Figure III. 19:</b> Courbe force-déplacement en flexion à trois points des panneaux sandwichs à jute non traitée vieilli 7 jours (PS-JNT-V7J et à jute traitée (PS-JT-V7J).....	<b>70</b>
<b>Figure III. 20:</b> Courbe force-déplacement en flexion à trois points des panneaux sandwichs à jute non traitée vieilli 14 jours (PS-JNT-V14J et à jute traitée (PS-JT-V14J).....	<b>71</b>
<b>Figure III. 21:</b> Courbe force-déplacement en flexion à trois points des panneaux sandwichs à jute non traitée vieilli 21 jours (PS-JNT-V21J et à jute traitée (PS-JT-V21J).....	<b>71</b>
<b>Figure III. 22:</b> La force maximale en fonction du temps de vieillissement (0,7,14 et 21 jours) pour PS-JNT et PS-JT. ....	<b>74</b>
<b>Figure III. 23:</b> Module de flexion en fonction du temps de vieillissement (0,7,14 et 21 jours) pour PS-JNT et PS-JT. ....	<b>74</b>
<b>Figure III. 24:</b> Contrainte à la flexion en fonction du temps de vieillissement (0,7,14 et 21 jours) pour PS-JNT et PS-JT. ....	<b>75</b>
<b>Figure III. 25:</b> Évaluation comparative des performances relatives (force maximale) en flexion trois points en fonction de la durée de vieillissement .....	<b>76</b>
<b>Figure III. 26:</b> Évaluation comparative des performances relatives (module de flexion) en flexion trois points en fonction de la durée de vieillissement .....	<b>77</b>
<b>Figure III. 27:</b> Évaluation comparative des performances relatives (contrainte à la flexion ) en flexion trois points en fonction de la durée de vieillissement .....	<b>77</b>
<b>Figure III. 28:</b> Histogramme de vitesse de propagation des ultrasons dans les constituants à l'état initial (Jour 0). ....	<b>79</b>

**Figure III. 29:** Évolution de la vitesse de propagation des ultrasons dans les panneaux sandwich au cours du vieillissement. ....80

# Liste des tableaux

Liste des tableaux

**CHAPITRE II : Partie expérimentale**

**Tableau II. 1:** Caractéristiques du liège aggloméré.....**32**  
**Tableau II. 2:** Notations des différents panneaux sandwichs.....**42**

**CHAPITRE III : Résultats et discussions**

**Tableau III. 1:** Notations des différents panneaux sandwichs .....**49**  
**Tableau III. 2:** Caractéristiques mécaniques de liège soumis à la compression longitudinale et perpendiculaire.....**54**  
**Tableau III. 3:** Notations des différents matériaux soumis à la compression longitudinale et perpendiculaire.....**56**  
**Tableau III. 4:** Caractéristiques mécaniques en compression des panneaux sandwichs selon l'orientation de la sollicitation et la durée de vieillissement.....**61**  
**Tableau III. 5:** Caractéristiques mécaniques en flexion des panneaux sandwichs selon le traitement des fibres et le vieillissement .....**73**

# **Introduction générale**

---

## Introduction générale

Dans un contexte mondial marqué par la nécessité de développer des technologies durables et respectueuses de l'environnement, l'industrie des matériaux connaît une transformation profonde. La recherche de solutions innovantes, alliant performance mécanique et faible impact écologique, est devenue une priorité majeure. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre étude, consacrée à la conception et à la caractérisation de panneaux sandwich à base de matériaux biosourcés. Ces structures, reconnues pour leur excellent rapport rigidité/poids, trouvent des applications variées allant du bâtiment aux transports, où l'allègement des structures est un levier essentiel d'efficacité énergétique.

Ce mémoire s'articule autour de l'étude d'un panneau sandwich composite innovant, constitué d'une âme en liège aggloméré et de peaux en composite de fibres de jute imprégnées d'une résine époxy. Le choix de ces matériaux n'est pas anodin : le liège et la jute sont des ressources naturelles, renouvelables et biodégradables, qui présentent des propriétés intrinsèques prometteuses pour des applications techniques. Cependant, leur origine naturelle soulève des questions cruciales quant à leur durabilité et leur comportement face aux agressions environnementales, notamment l'humidité et la chaleur, qui peuvent altérer leurs performances à long terme.

La problématique centrale de ce travail est donc d'évaluer la viabilité et la performance de cette solution de panneau sandwich écologique. Pour ce faire, nous nous sommes fixé plusieurs objectifs. Il s'agira d'abord de fabriquer ces panneaux en suivant un protocole opératoire rigoureux, puis de caractériser leurs propriétés mécaniques fondamentales à l'état initial. Par la suite, nous chercherons à comprendre l'impact du vieillissement, simulé par immersion dans l'eau, sur ces mêmes propriétés. L'enjeu est de déterminer comment la structure réagit aux contraintes environnementales et d'identifier les mécanismes de dégradation potentiels au niveau des constituants et de leurs interfaces.

Pour répondre à ces questions, ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux.

Le premier chapitre établit les fondations théoriques de notre étude. Il présente les généralités sur les matériaux composites et les panneaux sandwichs, en détaillant la structure, les constituants et les propriétés mécaniques de ces derniers. Une attention particulière est portée aux matériaux écologiques comme le liège et la jute, ainsi qu'aux mécanismes de vieillissement qui affectent la durabilité des composites à fibres naturelles.

Le deuxième chapitre est consacré au mode opératoire. Il décrit de manière détaillée le processus de fabrication des panneaux sandwich, depuis la préparation des matériaux jusqu'à l'assemblage final. Ce chapitre expose également les protocoles expérimentaux mis en place pour la caractérisation mécanique des éprouvettes, ainsi que la méthodologie de vieillissement retenue pour cette étude.

Enfin, le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux et leur discussion. Nous y analyserons et interpréterons les données issues des essais de flexion à trois points, de compression, de l'évolution du taux d'absorption d'eau et des tests de résonance, à la fois sur des échantillons non vieillis et après vieillissement. Une comparaison entre les performances des panneaux avec et sans traitement des fibres de jute permettra de mettre en lumière l'importance des interfaces et d'élucider les mécanismes de dégradation observés, afin de statuer sur la pertinence et le potentiel de ces matériaux pour des applications durables.

**CHAPITRE I: Généralités sur les  
matériaux composites et les panneaux  
sandwich**

## I.1 Introduction

Ce chapitre établit le cadre scientifique pour l'étude des panneaux sandwichs. Il commence par les principes des matériaux composites, définis comme une association d'un renfort (fibres de jute) et d'une matrice (résine époxy), en soulignant l'importance de l'interface pour le transfert des charges.

Ensuite, il modélise la structure sandwich comme une poutre en I, où les peaux rigides supportent la flexion et l'âme légère résiste au cisaillement, optimisant ainsi le rapport rigidité/poids.

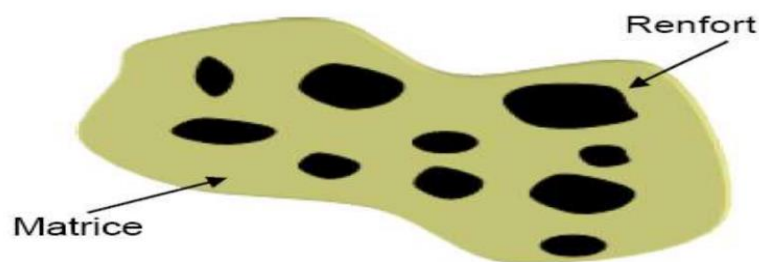
Le chapitre analyse ensuite les constituants : le caractère hydrophile des fibres de jute, qui affecte la durabilité, et la structure cellulaire du liège, qui lui confère ses propriétés isolantes et mécaniques.

Enfin, il aborde les mécanismes de vieillissement, notamment la diffusion de l'eau et la dégradation chimique (hydrolyse, plastification), qui altèrent les propriétés mécaniques du composite. Cette base théorique est essentielle pour interpréter les résultats expérimentaux à venir.

## I.2 Généralités sur les matériaux composites et les panneaux sandwich

### I.2.1 Introduction aux matériaux composites

Les matériaux composites représentent une classe de matériaux avancés constitués d'au moins deux composants distincts dont l'association confère à l'ensemble des propriétés qu'aucun des constituants pris séparément ne possèdent [1]. Ces matériaux sont généralement formés d'une matrice (phase continue) et d'un renfort (phase discontinue), chacun jouant un rôle spécifique dans le comportement global du composite. La matrice assure la cohésion de la structure et la transmission des efforts vers le renfort, tandis que ce dernier apporte principalement les propriétés mécaniques recherchées [2].



**Figure I. 1:** Différents constituants d'un matériau composite [3] .

L'intérêt croissant pour les matériaux composites s'explique par leur capacité à combiner les avantages de différents matériaux tout en minimisant leurs inconvénients respectifs. Cette approche permet de concevoir des matériaux "sur mesure" répondant à des cahiers des charges spécifiques, ce qui représente un avantage considérable par rapport aux matériaux traditionnels [4]. Les composites offrent généralement un excellent rapport résistance/poids, une bonne résistance à la fatigue et à la corrosion, ainsi qu'une grande flexibilité de conception.

Dans le contexte actuel de développement durable, une attention particulière est portée aux composites intégrant des constituants d'origine naturelle, comme les fibres végétales et les matrices biosourcées. Ces "biocomposites" présentent des avantages environnementaux significatifs tout en offrant des propriétés mécaniques intéressantes [5].

### **I.3 Structure et constituants des panneaux sandwichs**

#### **I.3.1 Définition et principe des structures sandwichs**

Les panneaux sandwichs constituent une catégorie particulière de matériaux composites caractérisés par une structure stratifiée comprenant une âme légère placée entre deux peaux minces et rigides [2]. Cette configuration structurale s'inspire directement du principe de la poutre en I, où la matière est éloignée de l'axe neutre pour maximiser le moment d'inertie et, par conséquent, la rigidité en flexion [6].

Le principe fondamental des structures sandwichs repose sur la complémentarité fonctionnelle entre l'âme et les peaux. Les peaux, généralement constituées de matériaux à haute résistance, supportent principalement les contraintes de traction et de compression induites par la flexion, tandis que l'âme, plus légère et moins rigide, supporte essentiellement les contraintes de cisaillement et maintient l'écartement entre les peaux [1]. Cette synergie structurale permet d'obtenir des panneaux présentant une rigidité spécifique (rapport rigidité/masse) exceptionnelle.

La structure sandwich peut être comparée, par analogie, à une poutre en I où les semelles correspondraient aux peaux et l'âme au cœur du sandwich [7]. Cette configuration permet d'augmenter considérablement l'inertie de flexion sans augmentation proportionnelle de la masse, ce qui explique l'excellente efficacité structurale de ces matériaux.

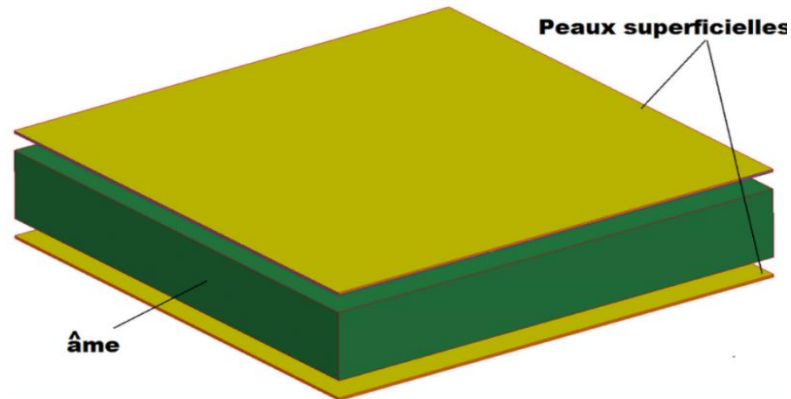


Figure I. 2: Schématisation d'une plaque sandwich [8]

### I.3.2 Matériaux constitutifs des peaux

Les peaux des panneaux sandwich peuvent être constituées de divers matériaux, le choix étant principalement guidé par les propriétés mécaniques recherchées et les conditions d'utilisation revues [5]. Traditionnellement, les matériaux métalliques (aluminium, acier) et les composites à fibres synthétiques (verre, carbone, aramide) associés à des matrices polymères (époxy, polyester) sont largement utilisés pour la fabrication des peaux.

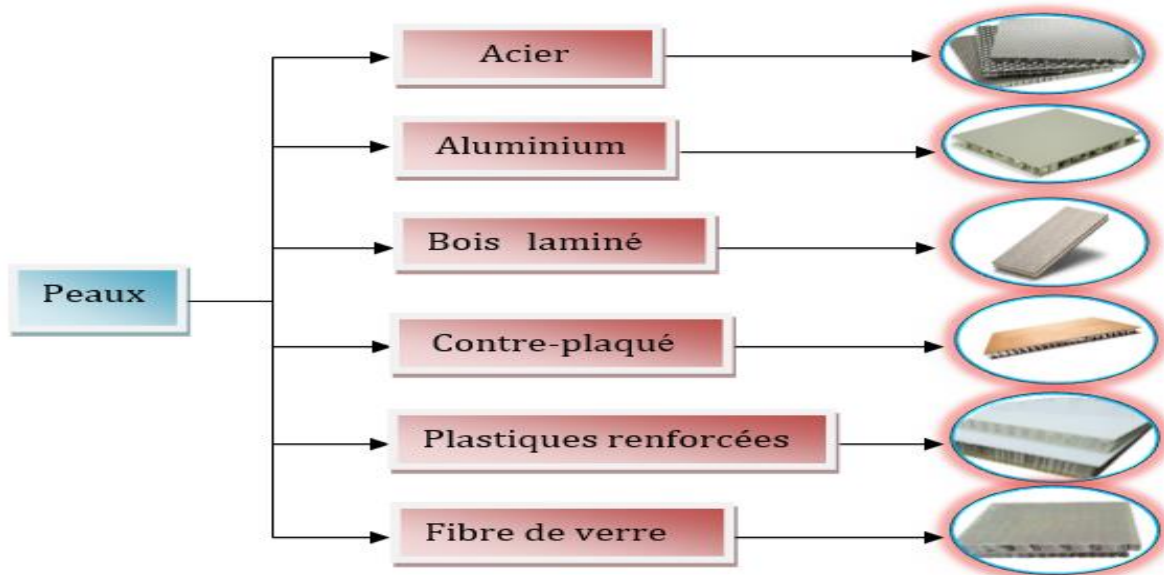


Figure I. 3: Matériaux pour les peaux

Dans une perspective de développement durable, les composites à fibres naturelles connaissent un intérêt croissant pour cette application. Parmi ces fibres, la jute présente un potentiel particulièrement intéressant en raison de ses propriétés mécaniques relativement élevées, sa disponibilité et son faible coût [2]. Les fibres de jute sont principalement composées de cellulose (61-71%), d'hémicellulose (14-20%), de lignine (12-13%) et de pectine (0,2-0,4%), cette composition leur conférant une bonne résistance mécanique tout en restant biodégradables [9].

Les peaux en composite jute/résine sont généralement fabriquées par imprégnation de tissus ou de mats de jute avec une résine thermodurcissable (époxy, polyester) ou thermoplastique.

Les propriétés mécaniques de ces composites dépendent fortement du taux de fibres, de leur orientation, du type de résine utilisé et de la qualité de l'interface fibre/matrice [2]. Des traitements spécifiques des fibres peuvent être nécessaires pour améliorer cette interface et, par conséquent, les performances mécaniques du composite.

### **I.3.3 Matériaux constitutifs de l'âme**

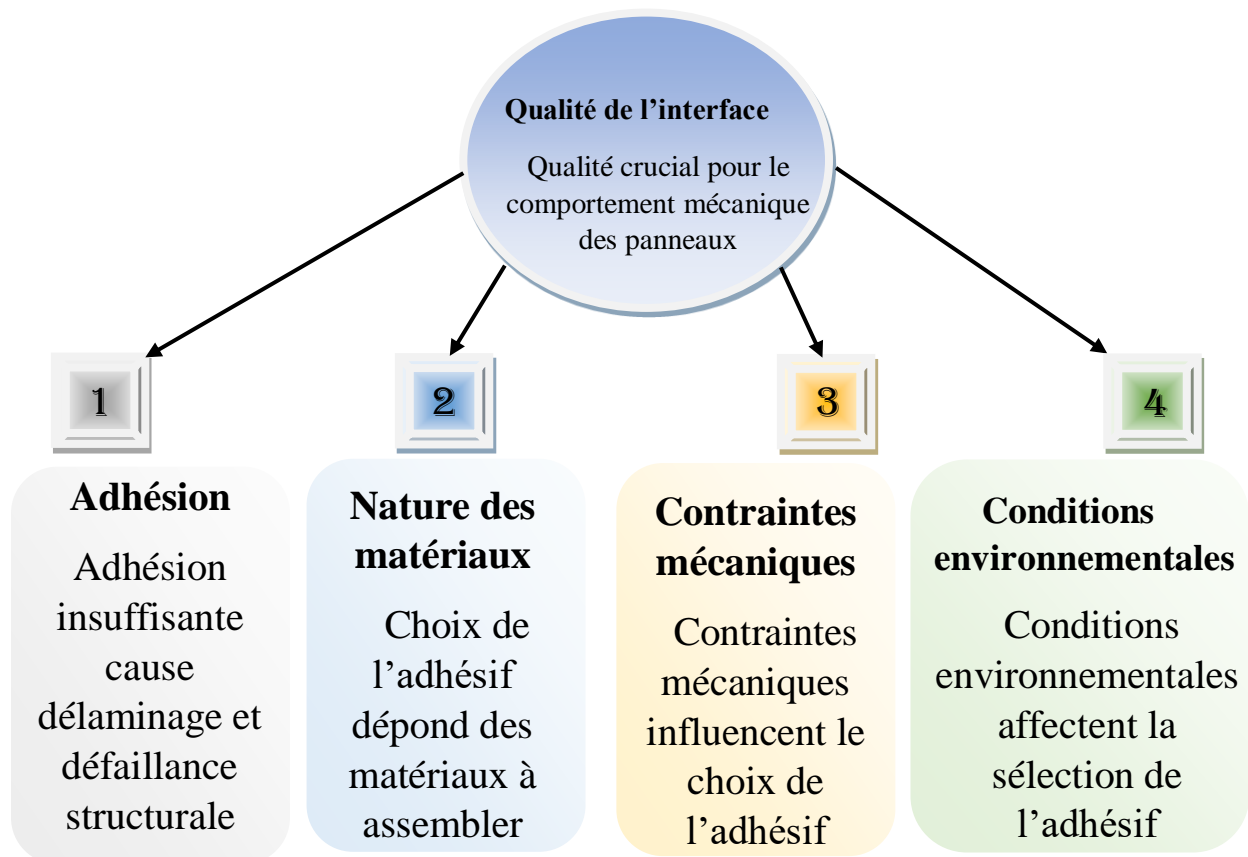
L'âme des panneaux sandwichs doit présenter une faible densité tout en offrant une résistance suffisante au cisaillement et à la compression. Différents types de matériaux peuvent être utilisés comme âme, les plus courants étant les mousses polymères (polyuréthane, polystyrène), les nids d'abeilles (aluminium, aramide, papier) et les bois légers (balsa) [2].

Le liège, matériau naturel issu de l'écorce du chêne-liège (*Quercus suber* L.), représente une alternative écologique intéressante pour la fabrication des âmes de panneaux sandwich. Ce matériau cellulaire présente une structure alvéolaire fermée constituée de cellules prismatiques dont les parois sont principalement composées de subérine (45%), de lignine (27%), de polysaccharides (12%) et de cires (5%) [2]. Cette composition chimique et cette structure confèrent au liège des propriétés remarquables : faible densité (120-240 kg/m<sup>3</sup>), bonne isolation thermique et acoustique, excellente résilience et résistance à l'eau [10].

Le liège peut être utilisé sous forme d'aggloméré pour la fabrication des âmes de panneaux sandwich. L'aggloméré de liège est obtenu par agglomération de granulés de liège sous pression et à température élevée, avec ou sans ajout de liant [1]. Les propriétés mécaniques de l'aggloméré dépendent principalement de sa densité, de la taille des granulés et du type de liant utilisé. La résistance au cisaillement de l'aggloméré de liège varie généralement entre 0,2 et 1,2 MPa, tandis que son module de cisaillement se situe entre 5 et 20 MPa [3].

### I.3.4 Interfaces et adhésifs

La qualité des interfaces entre l'âme et les peaux joue un rôle crucial dans le comportement mécanique global des panneaux sandwich. Une adhésion insuffisante peut entraîner un délaminage prématuré et, par conséquent, une défaillance structurale [11]. Le choix de l'adhésif dépend principalement de la nature des matériaux à assembler, des contraintes mécaniques prévues et des conditions environnementales d'utilisation.



**Figure I. 4 :** Facteurs influençant la qualité de l'interface des panneaux sandwichs

Pour les panneaux sandwichs à âme en liège et peaux en jute/résine, différents types d'adhésifs peuvent être utilisés : résines époxy, polyuréthanes, polyesters ou phénoliques[1]. Les résines époxy sont particulièrement adaptées en raison de leur excellente adhérence sur de nombreux substrats, leur bonne résistance mécanique et leur durabilité. L'adhésion peut également être améliorée par des traitements de surface spécifiques de l'âme et des peaux.

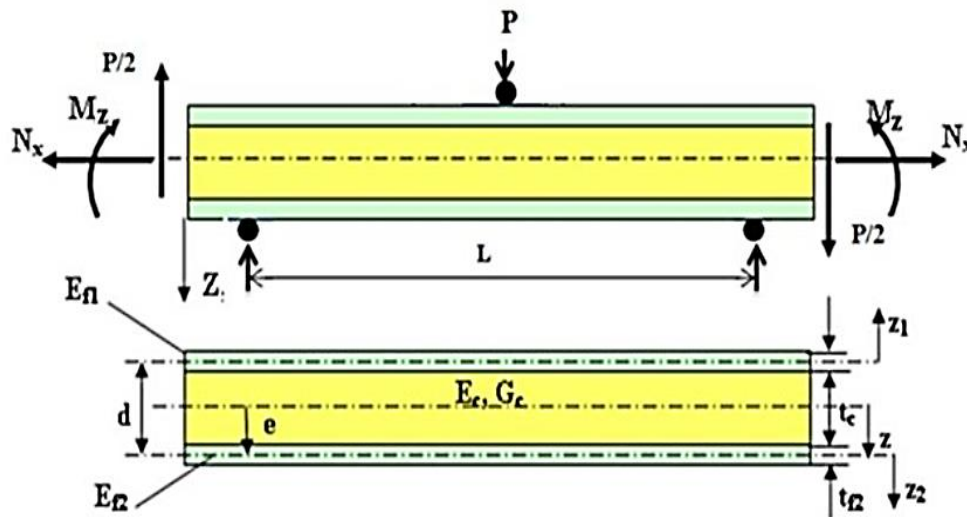
Dans certains cas, notamment lorsque les peaux sont fabriquées par moulage au contact ou par infusion, l'adhésion peut être réalisée directement pendant le processus de fabrication des peaux,

la résine de la matrice servant également d'adhésif avec l'âme [10]. Cette approche permet de simplifier le processus de fabrication tout en assurant une bonne continuité à l'interface.

## I.4 Propriétés mécaniques des panneaux sandwichs

### I.4.1 Comportement en flexion

Le comportement en flexion constitue l'une des caractéristiques les plus importantes des panneaux sandwichs, ces structures étant principalement conçues pour résister à ce type de sollicitation. Sous l'effet d'un chargement en flexion, les peaux supportent essentiellement des contraintes normales (traction et compression), tandis que l'âme est principalement soumise à des contraintes de cisaillement.



**Figure I. 5:** schéma représentant un sandwich en flexion à trois points [12]

La rigidité en flexion d'un panneau sandwich dépend principalement de trois facteurs : les propriétés mécaniques des peaux, l'épaisseur de l'âme (qui détermine la distance entre les peaux) et la résistance au cisaillement de l'âme [4]. Pour un panneau sandwich à peaux minces et identiques, la rigidité en flexion peut être approximée par la relation suivante :

$$D = (E_f \cdot t_f \cdot d^2) / 2$$

Où

**D** : est la rigidité en flexion,

**E<sub>f</sub>** : le module d'Young des peaux,

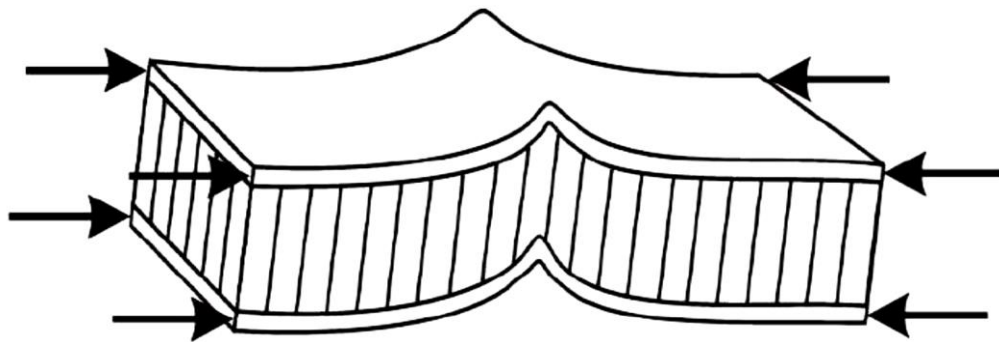
**t<sub>f</sub>** : l'épaisseur des peaux

**d** : est la distance entre les lignes moyennes des peaux

Les modes de rupture en flexion des panneaux sandwichs peuvent être variés : rupture en traction ou compression des peaux, cisaillement de l'âme, écrasement local de l'âme sous les appuis, ou délaminage à l'interface âme/peaux [1]. Le mode de rupture prédominant dépend des propriétés relatives des constituants et de la géométrie du panneau.

#### I.4.2 Comportement en compression

Sous compression dans le plan, les panneaux sandwichs peuvent présenter différents modes de défaillance : flambage global, flambage local des peaux (wrinkling), écrasement de l'âme (crimping) ou cisaillement de l'âme [10]. La résistance à la compression dépend principalement de la rigidité des peaux, de la résistance au cisaillement et à la compression de l'âme, ainsi que de la qualité des interfaces.

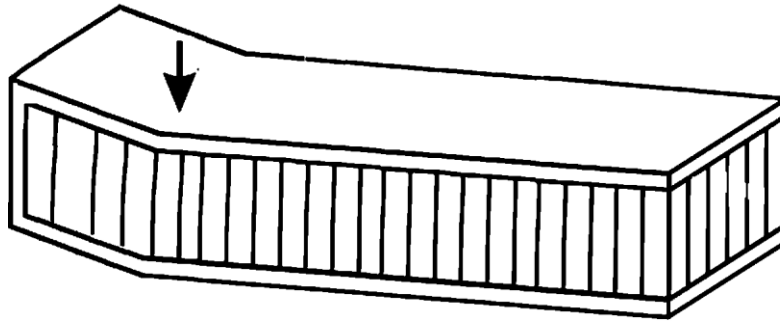


**Figure I. 6:** Rupture des peaux en compression

Pour les panneaux sandwichs à âme en liège et peaux en jute/résine, le comportement en compression est influencé par les propriétés viscoélastiques du liège et le caractère anisotrope des composites à fibres naturelles [4].

### I.4.3 Comportement au cisaillement

La résistance au cisaillement des panneaux sandwichs est principalement déterminée par les propriétés de l'âme, les peaux contribuant peu à cette caractéristique [9]. Le module de cisaillement de l'âme influence directement la rigidité globale du panneau et sa résistance au flambage.



**Figure I. 7:** Mode de rupture par cisaillement de l'âme.

L'aggloméré de liège présente un comportement au cisaillement relativement linéaire jusqu'à la rupture, avec un module de cisaillement généralement compris entre 5 et 20 MPa selon la densité [13]. Ce comportement diffère de celui des mousses polymères conventionnelles, qui présentent souvent une phase de plateau après la région élastique.

### I.4.4 Comportement à l'impact

La résistance à l'impact constitue un avantage significatif des panneaux sandwichs, particulièrement ceux intégrant des âmes en matériaux cellulaires comme le liège [10]. Sous impact, l'énergie cinétique est absorbée par différents mécanismes : déformation élastique et plastique des peaux, compression et cisaillement de l'âme, et éventuellement délaminage aux interfaces.

Le liège présente une excellente capacité d'absorption d'énergie grâce à sa structure cellulaire et son comportement élastique [5]. Contrairement à de nombreuses mousses polymères qui se déforment de manière permanente après impact, le liège peut récupérer une grande partie de sa déformation, ce qui peut être avantageux pour des applications nécessitant une résistance à des impacts répétés.

Les composites à fibres de jute présentent également un bon comportement à l'impact, les fibres naturelles ayant généralement une capacité d'absorption d'énergie supérieure à celle des fibres

---

synthétiques comme la fibre de verre [7]. Cette caractéristique est particulièrement intéressante pour des applications nécessitant une bonne tolérance aux dommages.

## **I.5 Applications des panneaux sandwichs**

### **I.5.1 Applications dans le secteur du bâtiment**

Le secteur du bâtiment constitue l'un des principaux domaines d'application des panneaux sandwich, notamment pour les éléments de façade, les cloisons intérieures et les toitures [9]. Dans ce contexte, les panneaux sandwich offrent une combinaison avantageuse de légèreté, de rigidité et d'isolation thermique et acoustique.

Les panneaux sandwich à âme en liège et peaux en jute/résine présentent un intérêt particulier pour ce secteur en raison de leur caractère écologique et de leurs propriétés isolantes [11].

Le liège offre une excellente isolation thermique (conductivité thermique de 0,04 à 0,05 W/m·K) et acoustique, tandis que les composites à fibres naturelles présentent un impact environnemental réduit par rapport aux matériaux conventionnels.

Ces panneaux peuvent être utilisés pour diverses applications dans le bâtiment : panneaux de façade ventilée, cloisons intérieures, faux plafonds, ou éléments de mobilier [4]. Leur légèreté facilite la manutention et l'installation, tandis que leur caractère écologique répond aux exigences croissantes en matière de construction durable.

### **I.5.2 Applications dans le secteur des transports**

Le secteur des transports (automobile, ferroviaire, naval) constitue également un domaine d'application important pour les panneaux sandwich, la réduction de masse étant un objectif constant pour améliorer l'efficacité énergétique des véhicules [11]. Dans ce contexte, les panneaux sandwichs sont utilisés pour diverses applications : planchers, cloisons, habillages intérieurs, ou éléments structuraux non critiques.

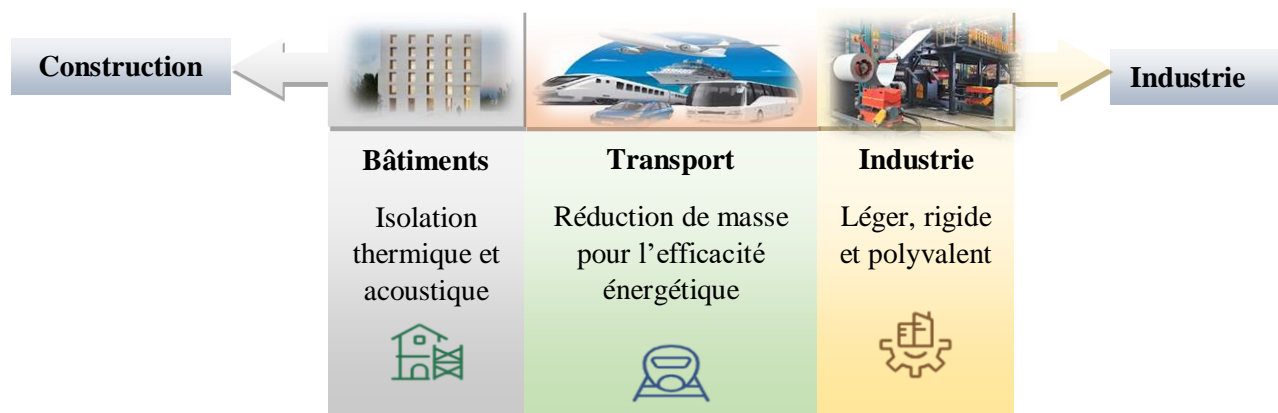
Les panneaux sandwichs à âme en liège et peaux en jute/résine peuvent contribuer à la réduction de l'impact environnemental des véhicules, non seulement par leur légèreté qui réduit la consommation d'énergie, mais aussi par l'utilisation de matériaux renouvelables et biodégradables [5]. Le liège offre également une bonne capacité d'amortissement des vibrations, ce qui peut améliorer le confort acoustique dans les véhicules.

Dans le secteur naval, ces panneaux peuvent être utilisés pour les aménagements intérieurs des navires, les liners de cales, ou certains éléments de pont non structuraux. La résistance à l'humidité du liège et sa flottabilité représentent des avantages significatifs pour cette application.

### I.5.3 Applications dans d'autres secteurs industriels

Au-delà du bâtiment et des transports, les panneaux sandwich trouvent des applications dans divers secteurs industriels : emballage, mobilier, sports et loisirs, ou équipements industriels [6]. Dans ces domaines, les panneaux sandwichs sont appréciés pour leur légèreté, leur rigidité et leur polyvalence.

Les panneaux sandwichs à âme en liège et peaux en jute/résine peuvent être particulièrement adaptés pour la fabrication de mobilier écologique, d'équipements sportifs (planches de surf, kayaks), ou d'emballages techniques réutilisables [13]. Leur caractère biodégradable facilite également la gestion de la fin de vie des produits, un aspect de plus en plus important dans une perspective d'économie circulaire.



**Figure I. 8:** Les applications des panneaux sandwich varient de la construction à l'industrie.

## I.6 Avantages et limites des matériaux écologiques dans les panneaux sandwichs

### I.6.1 Avantages environnementaux

L'utilisation de matériaux écologiques comme le liège et les fibres de jute dans les panneaux sandwichs présente plusieurs avantages environnementaux significatifs [7]:

- **Renouvelabilité :** Le liège et la jute sont des ressources renouvelables, contrairement aux matériaux synthétiques dérivés du pétrole.

- **Bilan carbone favorable** : Ces matériaux naturels stockent du carbone pendant leur croissance et nécessitent généralement moins d'énergie pour leur transformation.
- **Biodégradabilité** : En fin de vie, ces matériaux peuvent se dégrader naturellement sans générer de déchets persistants.
- **Réduction des émissions de composés organiques volatils (COV)** : Les matériaux naturels émettent généralement moins de COV que leurs équivalents synthétiques.

La production de liège présente également des avantages écologiques spécifiques, les forêts de chêne-liège constituant des écosystèmes riches en biodiversité et contribuant à la lutte contre la désertification dans les régions méditerranéennes [5].

### I.6.2 Défis techniques et économiques

Malgré leurs avantages environnementaux, l'utilisation de matériaux écologiques dans les panneaux sandwich présente également certains défis techniques et économiques :

- **Variabilité des propriétés** : Les matériaux naturels présentent généralement une plus grande variabilité de leurs propriétés que les matériaux synthétiques, ce qui peut compliquer la conception et le contrôle qualité.
- **Sensibilité à l'humidité** : Les fibres naturelles comme la jute sont hydrophiles, ce qui peut affecter la durabilité des composites en environnement humide.
- **Résistance au feu** : Les matériaux naturels sont généralement plus inflammables que leurs équivalents synthétiques, nécessitant parfois l'ajout de retardateurs de flamme.
- **Coût et disponibilité** : Bien que le liège et la jute soient des matériaux relativement abordables, leur coût peut être supérieur à celui de certaines mousses synthétiques, et leur disponibilité peut varier selon les régions.

Ces défis nécessitent des approches spécifiques en termes de conception, de fabrication et de protection des panneaux sandwichs écologiques pour assurer leur performance et leur durabilité dans diverses applications.

### I.6.3 Perspectives d'amélioration

Plusieurs voies d'amélioration sont explorées pour surmonter les limitations des matériaux écologiques dans les panneaux sandwich [2]:

- Traitements des fibres naturelles pour réduire leur hydrophilie et améliorer leur compatibilité avec les matrices polymères.
- Développement de résines biosourcées (dérivées d'huiles végétales, d'amidon, etc.) pour remplacer les résines synthétiques traditionnelles.
- Optimisation des procédés de fabrication pour réduire la variabilité des propriétés et améliorer la reproductibilité.
- Hybridation avec des matériaux synthétiques pour combiner les avantages des différents types de matériaux tout en minimisant leur impact environnemental global.

Ces développements s'inscrivent dans une tendance plus large vers l'éco-conception et l'utilisation de matériaux biosourcés dans divers secteurs industriels, stimulée par les préoccupations environnementales croissantes et l'évolution des réglementations [13].

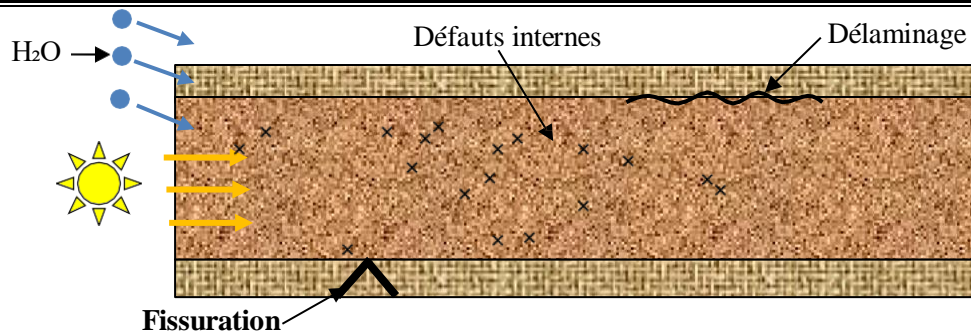
## **I.7 Durabilité et mécanismes de vieillissement des matériaux composites**

### **I.7.1 Introduction aux phénomènes de vieillissement**

La durabilité des matériaux composites, et particulièrement des panneaux sandwichs à constituants naturels comme le liège et la jute, est un enjeu majeur pour leur utilisation à long terme dans diverses applications. Le vieillissement de ces matériaux se manifeste par une évolution de leurs propriétés physico-chimiques et mécaniques au cours du temps, sous l'effet de contraintes environnementales et/ou mécaniques [1].

La compréhension des mécanismes réactionnels de dégradation des polymères et des composites est nécessaire pour pouvoir proposer des stratégies de stabilisation et prédire des durées de vie sur la base de tests de vieillissement artificiels [2]. Il est essentiel d'utiliser des méthodes analytiques destinées à caractériser la dégradation du polymère aux différentes échelles pour appréhender correctement les phénomènes de vieillissement.

Dans le cas spécifique des panneaux sandwichs à âme en liège et peaux en jute/résine, la présence de matériaux d'origine naturelle rend ces structures particulièrement sensibles à certains types de vieillissement, notamment le vieillissement par immersion dans l'eau distillé [4]. La nature hydrophile des fibres naturelles comme la jute et la structure cellulaire du liège peuvent influencer significativement les mécanismes de dégradation et la cinétique du vieillissement.



**Figure I. 9:** Mécanismes de vieillissement des panneaux sandwich à âme en liège

## I.7.2 Principaux mécanismes de vieillissement

### I.7.2.1 Vieillissement physique

Le vieillissement physique des matériaux composites correspond à une évolution de leur structure et de leurs propriétés sans modification chimique des macromolécules. Ce type de vieillissement peut être réversible ou irréversible [5].

#### a) Relaxation structurale

La relaxation structurale est un phénomène qui se produit lorsque le matériau polymère n'est pas dans un état d'équilibre thermodynamique. Ce phénomène se traduit par une densification du réseau macromoléculaire et une augmentation de la rigidité du matériau au cours du temps [2]. Dans le cas des composites à matrice thermodurcissable, comme les composites jute/époxy, ce phénomène peut conduire à une fragilisation progressive du matériau.

#### b) Migration d'adjuvants

Les adjuvants présents dans les matrices polymères (plastifiants, stabilisants, etc.) peuvent migrer vers la surface du matériau ou vers les interfaces fibre/matrice. Cette migration peut entraîner une modification des propriétés mécaniques et physico-chimiques du composite [6]. Dans le cas des panneaux sandwich, la migration d'adjuvants peut également affecter l'adhésion entre l'âme et les peaux, compromettant ainsi l'intégrité structurale de l'ensemble.

#### c) Absorption d'eau et gonflement

L'absorption d'eau est un mécanisme de vieillissement particulièrement important pour les composites à fibres naturelles. Les fibres de jute, de par leur nature hydrophile, peuvent absorber une quantité significative d'eau, entraînant un gonflement qui génère des contraintes internes dans

---

le matériau [1]. Ce phénomène peut conduire à une dégradation de l'interface fibre/matrice et à une diminution des propriétés mécaniques du composite.

Le liège, bien que naturellement résistant à l'humidité, peut également absorber de l'eau dans des conditions d'exposition prolongée, ce qui peut affecter ses propriétés mécaniques et son adhésion avec les peaux du panneau sandwich [7].

### **I.7.2.2 Vieillesse chimique**

Le vieillissement chimique implique des modifications de la structure chimique des polymères constituant la matrice et/ou les fibres. Ces modifications sont généralement irréversibles et peuvent avoir un impact significatif sur les propriétés du matériau [4].

#### **a) Thermo-oxydation**

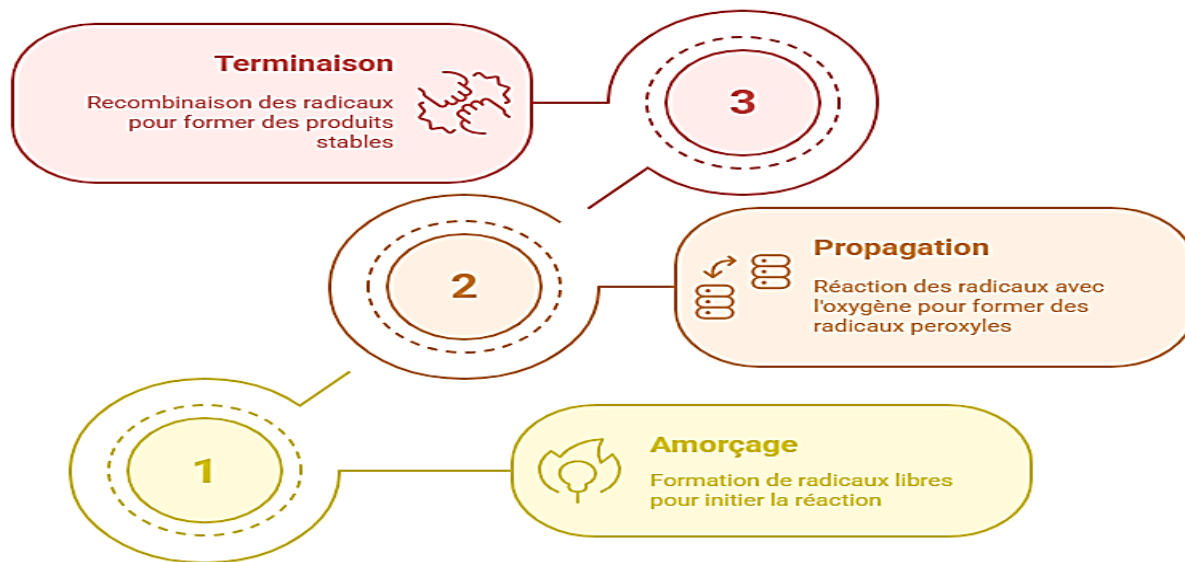
La thermo-oxydation est un mécanisme de dégradation résultant de l'action combinée de l'oxygène et de la température. Ce processus implique la formation de radicaux libres qui initient des réactions en chaîne conduisant à la scission des chaînes polymères ou à leur réticulation [2].

Dans le cas des composites à matrice polymère, la thermo-oxydation peut entraîner une fragilisation de la matrice, une dégradation de l'interface fibre/matrice et, par conséquent, une diminution des propriétés mécaniques du matériau [9]. Pour les panneaux sandwichs, ce mécanisme peut également affecter l'adhésion entre l'âme et les peaux.

#### **b) Photo-oxydation**

La photo-oxydation est un mécanisme de dégradation induit par l'action combinée de la lumière (principalement les rayonnements UV) et de l'oxygène. Les modifications de structure chimique du polymère résultant du photo-vieillesse sont pour une part importante dues à des réactions d'oxydation, et donc caractérisées par la formation de photo produits d'oxydation, dont l'identification permettra d'approcher les mécanismes de dégradation [2].

L'oxydation des polymères, que ce soit sous l'effet de la lumière et/ou de la température, peut être décrite par un mécanisme radicalaire en chaîne, représenté par le schéma suivant [2]:



**Figure I. 10:** Étapes de l'oxydation des polymères

### c) Hydrolyse

L'hydrolyse est une réaction chimique dans laquelle une molécule d'eau provoque la rupture d'une liaison chimique, généralement une liaison ester dans le cas des polymères. Ce mécanisme est particulièrement important pour les matrices polyester insaturé et époxy, couramment utilisées dans les composites à fibres naturelles [10].

Dans le cas des composites jute/polyester, l'hydrolyse de la matrice peut entraîner une diminution significative des propriétés mécaniques du matériau. De plus, l'hydrolyse peut également affecter les fibres de jute elles-mêmes, en dégradant la cellulose et les hémicelluloses qui les constituent [1].

#### I.7.2.3 Vieillessement hygrothermique

Le vieillissement hygrothermique résulte de l'action combinée de l'humidité et de la température. Ce type de vieillissement est particulièrement critique pour les composites à fibres naturelles et les structures sandwich incorporant des matériaux d'origine naturelle [3].

#### Mécanismes de diffusion d'eau

La diffusion de l'eau dans les matériaux composites est généralement décrite par la loi de Fick, qui caractérise la cinétique d'absorption d'eau en fonction du temps [11].

$$J = -D \cdot \frac{dC}{dx}$$

- **J** : flux de diffusion (mol/m<sup>2</sup>·s)
- **D** : coefficient de diffusion (m<sup>2</sup>/s)
- **dC/dx** : variation de concentration en fonction de la position
- Le signe négatif (-) indique que la diffusion se fait vers les zones de plus faible concentration

Cependant, dans le cas des composites à fibres naturelles, des écarts à ce comportement fickien sont souvent observés, en raison de la complexité des interactions entre l'eau, les fibres hydrophiles et la matrice polymère [1].

Plusieurs mécanismes de transport d'eau peuvent coexister dans un composite à fibres naturelles [10]:

- Diffusion des molécules d'eau dans la matrice polymère
- Capillarité le long de l'interface fibre/matrice
- Transport par les microfissures et les vides
- Absorption directe par les fibres hydrophiles

Dans le cas des panneaux sandwichs à âme en liège et peaux en jute/résine, la diffusion de l'eau peut également se produire à travers l'interface âme/peaux, créant des chemins préférentiels pour la pénétration de l'humidité [14].

#### a) Effets sur la matrice polymère

L'absorption d'eau par la matrice polymère peut entraîner plusieurs phénomènes [3]:

- Plastification de la matrice, conduisant à une diminution de la température de transition vitreuse (T<sub>g</sub>)
- Gonflement, générant des contraintes internes

- Hydrolyse des chaînes polymères
- Microfissuration due aux cycles d'absorption/désorption

Ces phénomènes peuvent conduire à une diminution significative des propriétés mécaniques de la matrice, notamment sa rigidité et sa résistance à la rupture [11].

### **b) Effets sur les fibres naturelles**

Les fibres naturelles comme la jute sont particulièrement sensibles à l'humidité en raison de leur caractère hydrophile. L'absorption d'eau par ces fibres peut entraîner [1]:

- Un gonflement important, générant des contraintes à l'interface fibre/matrice
- Une dégradation des constituants des fibres (cellulose, hémicelluloses, pectines)
- Une diminution des propriétés mécaniques des fibres
- Une augmentation de la sensibilité aux attaques biologiques

Ces effets sont généralement plus prononcés à température élevée, en raison de l'accélération des cinétiques de diffusion et de dégradation [8].

### **c) Effets sur l'interface fibre/matrice**

L'interface fibre/matrice est souvent considérée comme le "maillon faible" des composites à fibres naturelles soumis à un vieillissement hygrothermique [4]. L'eau peut pénétrer préférentiellement à cette interface, entraînant:

- Une dégradation des liaisons chimiques entre la fibre et la matrice
- Un décollement à l'interface
- Une diminution de l'efficacité du transfert de charge entre la fibre et la matrice

Ces phénomènes conduisent généralement à une diminution significative des propriétés mécaniques du composite, notamment sa résistance à la traction et au cisaillement interlaminaire [11].

### I.7.2.4 Vieillessement mécanique

Le vieillissement mécanique résulte de l'application de contraintes mécaniques, statiques ou cycliques, sur le matériau. Ces contraintes peuvent accélérer les autres mécanismes de vieillissement et induire des dégradations spécifiques [9].

#### a) Fatigue

La fatigue est un phénomène de dégradation progressive des propriétés mécaniques d'un matériau sous l'effet de sollicitations cycliques. Dans le cas des composites, la fatigue peut se manifester par [13]:

- L'initiation et la propagation de microfissures dans la matrice
- La rupture progressive des fibres
- Le délaminage aux interfaces
- La dégradation de l'interface fibre/matrice

Dans le cas des panneaux sandwichs, la fatigue peut également entraîner un décollement entre l'âme et les peaux, compromettant ainsi l'intégrité structurale de l'ensemble [10].

#### b) Fluage

Le fluage est la déformation progressive d'un matériau soumis à une contrainte constante. Ce phénomène est particulièrement important pour les polymères et les composites à matrice polymère, en raison de leur comportement viscoélastique [5].

Dans le cas des panneaux sandwichs à âme en liège, le fluage peut entraîner une déformation permanente de la structure, affectant ainsi ses performances en service [7]. Ce phénomène est généralement accentué par la température et l'humidité.

#### c) Couplage avec les autres mécanismes de vieillissement

Les contraintes mécaniques peuvent accélérer les autres mécanismes de vieillissement, notamment [9]:

- L'absorption d'eau, par ouverture de microfissures
- L'oxydation, par augmentation de la diffusion de l'oxygène

- La dégradation des interfaces, par concentration de contraintes

Ce couplage entre les différents mécanismes de vieillissement rend la prédiction du comportement à long terme des composites particulièrement complexe.

## **I.8 Effets du vieillissement sur les propriétés mécaniques des matériaux composites**

### **I.8.1 Évolution des propriétés en traction**

Le vieillissement des matériaux composites, et particulièrement des composites à fibres naturelles, entraîne généralement une diminution de leurs propriétés en traction [4].

L'évolution des propriétés mécaniques en traction des composites est un indicateur clé de la qualité de l'interface fibre-matrice. Lors de l'incorporation de fibres naturelles non traitées dans une matrice polymère, on observe typiquement une modification contrastée des propriétés. D'une part, la résistance à la rupture et l'allongement à la rupture tendent à diminuer à mesure que le taux de fibres augmente. Cette dégradation peut être attribuée à la faible compatibilité entre les fibres polaires et la matrice apolaire, qui conduit à une mauvaise dispersion et à l'agrégation des fibres. Ces agglomérats agissent comme des concentrateurs de contraintes, rendant le matériau plus fragile et moins résistant, un phénomène documenté par plusieurs auteurs [15]. D'autre part, et à l'inverse, le module d'élasticité du composite augmente considérablement avec l'ajout de fibres. Cette amélioration de la rigidité s'explique simplement par le module intrinsèque élevé des fibres naturelles par rapport à celui de la matrice thermoplastique, un constat en accord avec les travaux de Bouhank [16] et Fadel [17]. Ainsi, bien que la rigidité soit améliorée, l'efficacité du transfert de charge reste limitée, ce qui impacte négativement la résistance globale du matériau.

Dans le cas des composites jute/résine, le vieillissement par immersion dans l'eau distillé peut entraîner une diminution de la résistance à la traction pouvant atteindre 30 à 50% après une exposition prolongée à un environnement humide [11].

### **I.8.2 Évolution des propriétés en flexion**

Les propriétés en flexion des composites sont particulièrement sensibles au vieillissement, en raison de la combinaison des contraintes de traction, compression et cisaillement générées lors de ce type de sollicitation [5].

Pour les panneaux sandwichs à âme en liège et peaux en jute/résine, le vieillissement hygrothermique peut entraîner :

L'évolution des propriétés en flexion des matériaux composites est un indicateur essentiel de leur performance structurelle, particulièrement sensible à la qualité de l'interface fibre-matrice. Le vieillissement ou une faible adhésion interfaciale se manifeste généralement par une diminution du module de flexion et une réduction significative de la résistance à la flexion. Cette perte de performance est principalement due à une mauvaise transmission des contraintes entre la matrice et le renfort. Lorsque l'interface est dégradée, elle ne peut plus transférer efficacement les charges, ce qui entraîne un glissement entre les fibres et la matrice, et une rupture prématurée du composite sous des charges plus faibles [18].

En plus de la perte de rigidité et de résistance, une dégradation de l'interface entraîne souvent une modification du mode de rupture du matériau. Un composite avec une bonne adhésion présente typiquement un comportement élastique linéaire suivi d'une rupture fragile. Cependant, lorsque l'interface est affaiblie, le comportement devient non linéaire plus rapidement. Cette non-linéarité accrue est le signe d'une mobilité réduite des chaînes polymères et d'une dégradation de la cohésion interne, ce qui diminue la capacité du matériau à se déformer avant de rompre [19]. La dégradation de l'interface fibre-matrice est donc le facteur prédominant qui régit la détérioration des propriétés en flexion.

Ces évolutions sont généralement attribuées à la dégradation des peaux, de l'âme et de l'interface entre ces deux composants [7].

### **I.8.3 Évolution des propriétés en cisaillement**

Les propriétés en cisaillement des composites et des panneaux sandwichs sont fortement influencées par la qualité des interfaces (fibre/matrice pour les composites, âme/peaux pour les sandwichs). Le vieillissement, en dégradant ces interfaces, peut entraîner une diminution significative de la résistance au cisaillement interlaminaire des composites et de la résistance au cisaillement transverse des panneaux sandwich [13].

Dans le cas des panneaux sandwichs à âme en liège, le vieillissement par immersion dans l'eau distillé peut également affecter les propriétés en cisaillement de l'âme elle-même, en modifiant sa structure cellulaire [7].

### **I.8.4 Évolution de la résistance à l'impact**

La résistance à l'impact des matériaux composites peut être significativement affectée par le vieillissement [5]:

La durabilité des composites à fibres naturelles, notamment leur résistance à l'impact, est fortement conditionnée par leur comportement en milieu humide. L'interaction avec l'eau induit des mécanismes complexes et parfois contradictoires. Dans un premier temps, l'absorption d'eau peut provoquer une plastification de la matrice polymère, ce qui peut paradoxalement conduire à une augmentation initiale de la ténacité du matériau en le rendant moins fragile.

Cependant, cet effet bénéfique est transitoire. Sur le long terme, l'exposition à l'humidité entraîne une dégradation progressive des fibres et, surtout, de l'interface fibre-matrice. L'eau affaiblit l'adhésion entre les deux phases, ce qui compromet le transfert de charge et mène à une diminution générale de la résistance à l'impact. De plus, les cycles répétés d'absorption et de désorption d'eau sont particulièrement dommageables. Ils génèrent des contraintes internes qui peuvent provoquer l'apparition de microfissures au sein du composite. Ces microfissures agissent comme des sites d'initiation pour la propagation de fissures lors d'un choc, un phénomène qui fragilise la structure et accélère la perte de performance, comme le suggèrent les études sur l'endommagement des composites [20].

Pour les panneaux sandwichs, le vieillissement peut également affecter la capacité d'absorption d'énergie de l'âme, réduisant ainsi la résistance globale de la structure aux sollicitations dynamiques .

## **I.9 Méthodes d'évaluation du vieillissement**

### **I.9.1 Vieillissement naturel**

Le vieillissement naturel consiste à exposer les matériaux aux conditions environnementales réelles pendant une période prolongée. Cette approche fournit les données les plus représentatives du comportement réel des matériaux, mais présente l'inconvénient majeur de nécessiter des durées d'exposition très longues [2].

Pour les composites à fibres naturelles et les panneaux sandwichs incorporant des matériaux biosourcés, le vieillissement naturel peut être réalisé dans différentes conditions climatiques (tropical, tempéré, etc.) pour évaluer l'influence des paramètres environnementaux sur la durabilité des matériaux [13].

## I.9.2 Vieillissement accéléré

Le vieillissement accéléré vise à reproduire, de manière intensifiée, les conditions environnementales auxquelles les matériaux seront exposés durant leur vie utile. Plusieurs types de vieillissement accéléré peuvent être mis en œuvre [5]:

### a) Vieillissement hygrothermique accéléré

Ce type de vieillissement consiste à exposer les matériaux à des conditions contrôlées de température et d'humidité. Les protocoles couramment utilisés incluent [4]:

- L'immersion dans l'eau à différentes températures
- L'exposition à une atmosphère à humidité relative contrôlée
- Les cycles d'immersion/séchage

Ces conditions permettent d'accélérer les mécanismes de diffusion d'eau et de dégradation hydrolytique.

### b) Vieillissement UV accéléré

Le vieillissement UV accéléré vise à reproduire les effets du rayonnement solaire sur les matériaux. Il est généralement réalisé dans des enceintes équipées de lampes UV, avec ou sans pulvérisation d'eau pour simuler l'effet combiné du rayonnement et de l'humidité [2].

Pour les composites à fibres naturelles, ce type de vieillissement est particulièrement pertinent, car les fibres et les matrices polymères peuvent être sensibles à la photo-dégradation [21].

### c) Vieillissement thermique accéléré

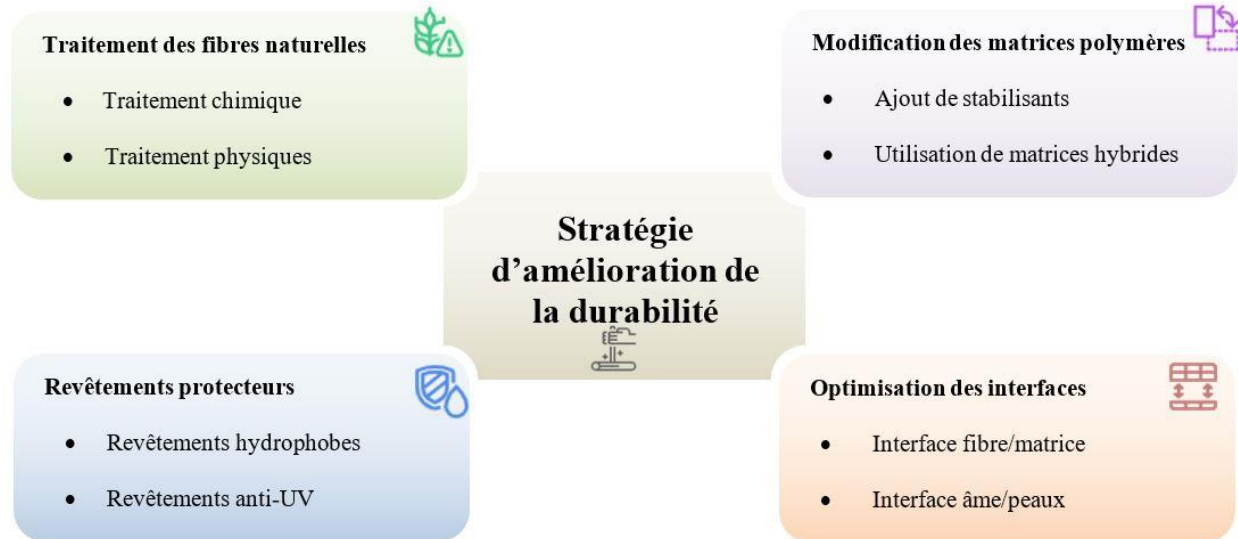
Le vieillissement thermique accéléré consiste à exposer les matériaux à des températures élevées pour accélérer les mécanismes de dégradation thermique et thermo-oxydative [4]. Ce type de vieillissement est particulièrement important pour évaluer la durabilité des composites dans des applications à température élevée.

### d) Vieillissement cyclique

Le vieillissement cyclique combine plusieurs types de sollicitations (température, humidité, UV, etc.) appliquées de manière séquentielle ou simultanée [2]. Cette approche permet de mieux

reproduire les conditions réelles d'exposition des matériaux, qui sont généralement soumis à une combinaison de facteurs environnementaux.

### I.10 Stratégies d'amélioration de la durabilité



**Figure I. 11:** Stratégies d'amélioration de la durabilité des composites

#### I.10.1 Traitement des fibres naturelles

Le traitement des fibres naturelles est une approche efficace pour améliorer leur résistance au vieillissement, notamment au vieillissement par immersion dans l'eau distillé [1]. Plusieurs types de traitements peuvent être envisagés:

##### a) Traitements chimiques

Les traitements chimiques visent à modifier la surface des fibres pour réduire leur caractère hydrophile et améliorer leur compatibilité avec la matrice polymère [10]. Ces traitements incluent:

L'amélioration de la compatibilité entre les fibres naturelles hydrophiles et les matrices polymères hydrophobes est une étape cruciale pour l'élaboration de composites performants. Pour y parvenir, plusieurs techniques de modification chimique de la surface des fibres sont employées. Le but principal est de réduire le caractère hydrophile des fibres et d'améliorer l'adhésion interfaciale, ce qui favorise un meilleur transfert de charge.

Parmi les méthodes les plus étudiées, le traitement alcalin, également connu sous le nom de mercerisation, est largement privilégié en raison de son efficacité et de son faible coût. Ce procédé, qui consiste à immerger les fibres dans une solution de soude caustique (NaOH) [22], a pour effet d'éliminer une partie des composants amorphes et non-cellulosiques tels que l'hémicellulose, la lignine et les pectines présents à la surface de la fibre [15]. L'élimination de ces substances nettoie non seulement la surface mais augmente également sa rugosité, ce qui améliore l'accrochage mécanique avec la matrice[23]. De plus, ce traitement peut modifier la structure cristalline de la cellulose, passant de la cellulose I à la cellulose II, ce qui peut influencer les propriétés mécaniques finales [24].

D'autres traitements chimiques sont également explorés dans la littérature. Le traitement par des agents de couplage silane est une méthode efficace où les molécules de silane agissent comme un pont chimique, créant des liaisons covalentes entre les groupes hydroxyles de la cellulose et la matrice polymère [25]. L'acétylation et le traitement par des isocyanates sont d'autres approches qui visent à greffer des groupes chimiques (acétyle ou isocyanate) sur la surface des fibres. Ces modifications réduisent le nombre de groupes hydroxyles libres, diminuant ainsi l'affinité des fibres pour l'eau et améliorant leur compatibilité avec les polymères non polaires [26].

Ces traitements permettent généralement de réduire l'absorption d'eau des fibres et d'améliorer la qualité de l'interface fibre/matrice, contribuant ainsi à une meilleure résistance au vieillissement par immersion dans l'eau distillé [4].

### **b) Traitements physiques**

Les traitements physiques modifient la structure et la morphologie des fibres sans altérer significativement leur composition chimique [5]. Ces traitements incluent:

En complément des approches chimiques, les traitements physiques représentent une autre voie pour l'amélioration de l'interface fibre-matrice. Contrairement aux méthodes chimiques qui altèrent la composition de la fibre, les traitements physiques modifient principalement ses propriétés de surface et sa structure, notamment en augmentant sa rugosité et son énergie de surface pour favoriser l'adhésion.

Parmi les techniques les plus reconnues, on trouve les traitements par décharge électrique, tels que le traitement corona et le traitement par plasma froid. Ces procédés exposent la surface des fibres à un gaz ionisé, ce qui la rend plus active chimiquement et plus apte à se lier avec la matrice

polymère. Une autre approche est le traitement thermique, qui consiste à soumettre les fibres à une température contrôlée. Ce dernier peut aider à éliminer l'humidité, à stabiliser la structure de la cellulose et à retirer certaines impuretés volatiles. Ces méthodes sont particulièrement efficaces pour des substrats polymères non actifs comme le polypropylène ou le polyéthylène, et peuvent améliorer l'adhésion sans recourir à des produits chimiques [27].

Ces méthodes peuvent améliorer l'adhésion fibre/matrice et, par conséquent, la durabilité des composites [1].

### **I.10.2 Modification des matrices polymères**

La modification des matrices polymères peut également contribuer à améliorer la durabilité des composites [2]:

#### **a) Ajout de stabilisants**

L'incorporation de stabilisants dans la matrice polymère peut significativement améliorer sa résistance au vieillissement [5].

Au-delà de la modification des fibres, la protection de la matrice polymère elle-même est fondamentale pour assurer la durabilité à long terme des matériaux composites. L'incorporation de stabilisants est une stratégie efficace pour améliorer la résistance de la matrice face aux agressions environnementales et au vieillissement. Ces additifs agissent en retardant les mécanismes de dégradation qui affaiblissent le composite.

Plusieurs types de stabilisants peuvent être utilisés en fonction des contraintes prévues. Pour contrer la dégradation thermique, des antioxydants sont ajoutés afin de prévenir les réactions de thermo-oxydation qui fragilisent les chaînes polymères à haute température. Pour protéger le matériau des rayonnements solaires, des absorbeurs UV sont incorporés ; ils dissipent l'énergie lumineuse et limitent ainsi la photo-dégradation, qui peut causer une perte de couleur et de propriétés mécaniques. Enfin, pour les applications en milieu humide, des agents anti-hydrolytiques peuvent être intégrés pour réduire la sensibilité de la matrice à l'hydrolyse, un mécanisme qui peut être particulièrement délétère pour certains polymères comme les polyesters.

#### **b) Utilisation de matrices hybrides**

Les matrices hybrides, combinant différents types de polymères ou incorporant des nanocharges, peuvent présenter une meilleure résistance au vieillissement que les matrices conventionnelles [3].

Par exemple, l'incorporation de nanoargiles dans une matrice époxy peut réduire la diffusion d'eau et améliorer la stabilité thermique du matériau.

### **I.10.3 Optimisation des interfaces**

L'optimisation des interfaces est cruciale pour améliorer la durabilité des composites et des panneaux sandwich [10]:

#### **a) Interface fibre/matrice**

L'optimisation de l'interface entre le renfort et la matrice est le paramètre le plus déterminant pour les performances mécaniques finales d'un matériau composite. En raison de l'incompatibilité fondamentale entre les fibres naturelles polaires et les matrices thermoplastiques apolaires, une faible adhésion interfaciale peut limiter l'usage de ces composites. Pour surmonter cette difficulté, plusieurs stratégies d'amélioration de l'interface sont mises en œuvre.

La première approche, et la plus couramment étudiée, consiste à effectuer un traitement de surface des fibres, comme le traitement alcalin mentionné précédemment. Ce procédé modifie la chimie et la topographie de la surface des fibres pour favoriser une meilleure adhésion avec la matrice. Une deuxième stratégie complémentaire est la modification de la matrice polymère elle-même, par exemple en y incorporant des additifs ou des copolymères qui augmentent sa polarité et donc sa compatibilité avec les fibres. Enfin, une troisième méthode consiste en l'utilisation d'agents de couplage spécifiques, tels que les silanes ou les anhydrides maléiques. Ces molécules bifonctionnelles agissent comme un "pont" moléculaire, créant des liaisons chimiques fortes entre la surface de la fibre et les chaînes de la matrice polymère. L'application combinée de ces techniques permet de créer une interface robuste, capable d'assurer un transfert de charge efficace du renfort vers la matrice, et ainsi d'améliorer significativement les propriétés mécaniques du composite [27].

Une interface optimisée présente généralement une meilleure résistance à la dégradation par l'eau et aux contraintes mécaniques.

#### **b) Interface âme/peaux**

Dans le cas des panneaux sandwich, l'optimisation de l'interface âme/peaux est essentielle pour assurer la durabilité de la structure. La performance et la durabilité d'une structure sandwich dépendent de manière critique de la qualité de l'interface entre l'âme et les peaux. Une adhésion robuste à cette interface est essentielle pour garantir la cohésion de l'ensemble et prévenir les

---

défaillances prématurées comme le délaminage. L'obtention d'une telle interface repose sur la maîtrise de plusieurs facteurs clés.

Le premier facteur est le choix d'un adhésif approprié. Celui-ci doit non seulement être compatible avec les matériaux de l'âme et des peaux, mais aussi posséder une résistance adéquate à l'humidité et aux variations de température prévues en service, car ces conditions peuvent dégrader les liaisons adhésives au fil du temps. Le deuxième facteur est la préparation adéquate des surfaces avant le collage. Une surface propre, dégraissée et présentant une certaine rugosité est indispensable pour assurer un bon accrochage mécanique et chimique de l'adhésif. Enfin, le troisième facteur réside dans l'optimisation des paramètres de mise en œuvre. Des conditions contrôlées de pression, de température et de temps de polymérisation sont nécessaires pour garantir une cohésion structurale optimale et un durcissement complet de l'adhésif. La maîtrise de ces trois aspects est impérative pour limiter les risques de délaminage et assurer la résistance globale du panneau sandwich au vieillissement [28].

Une interface âme/peaux de qualité limite les risques de délaminage et améliore la résistance globale du panneau sandwich au vieillissement.

#### **I.10.4 Revêtements protecteurs**

L'application de revêtements protecteurs sur les composites et les panneaux sandwich peut significativement améliorer leur durabilité en limitant leur exposition aux facteurs environnementaux agressifs [5].

La durabilité des composites à fibres naturelles est limitée par deux facteurs principaux identifiés dans les études sur le sujet : la sensibilité des fibres à l'humidité et la dégradation de la matrice polymère sous l'effet des agressions environnementales. Pour répondre à ces défis, des stratégies de protection de surface peuvent être envisagées.

Le caractère hydrophile des fibres, qui augmente l'absorption d'eau du composite et affaiblit l'interface, est un problème majeur [29]. Pour contrôler cela, l'application d'un revêtement hydrophobe en surface agirait comme une barrière externe, limitant la pénétration de l'humidité et préservant ainsi l'intégrité de l'interface fibre-matrice. Par ailleurs, la matrice polymère elle-même peut se dégrader sous l'effet du rayonnement solaire. Pour prévenir ce phénomène de photo-dégradation, un revêtement anti-UV peut être appliqué. Enfin, pour une protection globale, des revêtements multifonctionnels qui combinent ces différentes propriétés pourraient offrir une

---

solution complète, protégeant simultanément le composite de l'humidité et des UV, et améliorant ainsi sa durée de vie en service.

Ces revêtements constituent une barrière efficace contre les agents de dégradation et peuvent prolonger considérablement la durée de vie des matériaux.

### **I.11 Conclusion**

Ce premier chapitre a permis de poser les fondations théoriques indispensables à la compréhension des matériaux composites à renfort de fibres naturelles. En partant des généralités, nous avons détaillé la structure de ces matériaux et souligné le rôle prépondérant de l'interface fibre-matrice, dont la qualité gouverne les performances mécaniques globales.

L'analyse des propriétés mécaniques a mis en lumière un compromis fondamental : si l'ajout de fibres naturelles permet d'augmenter la rigidité des composites, il peut simultanément en dégradant la résistance et la ductilité en raison de l'incompatibilité physico-chimique entre le renfort hydrophile et la matrice hydrophobe. Cette incompatibilité est également à l'origine des mécanismes de vieillissement, notamment l'absorption d'eau, qui affaiblit l'interface et diminue la durabilité du matériau.

Face à ces défis, plusieurs stratégies d'amélioration ont été explorées. L'optimisation de l'interface, par le biais de traitements chimiques des fibres ou de l'utilisation d'agents de couplage, apparaît comme la voie la plus prometteuse pour améliorer le transfert de charge. De plus, la protection de la matrice par l'ajout de stabilisants et l'application de revêtements protecteurs en surface constituent des approches complémentaires pour ralentir les processus de dégradation et prolonger la durée de vie des composites.

En conclusion, ce chapitre a non seulement défini le contexte scientifique et technique, mais il a surtout mis en évidence la problématique centrale : l'amélioration de l'adhésion interfaciale et la maîtrise des mécanismes de vieillissement sont les verrous technologiques majeurs à lever pour valoriser pleinement le potentiel de ces éco-matériaux. Le chapitre suivant s'attachera à décrire le protocole expérimental mis en place pour répondre à ces enjeux.

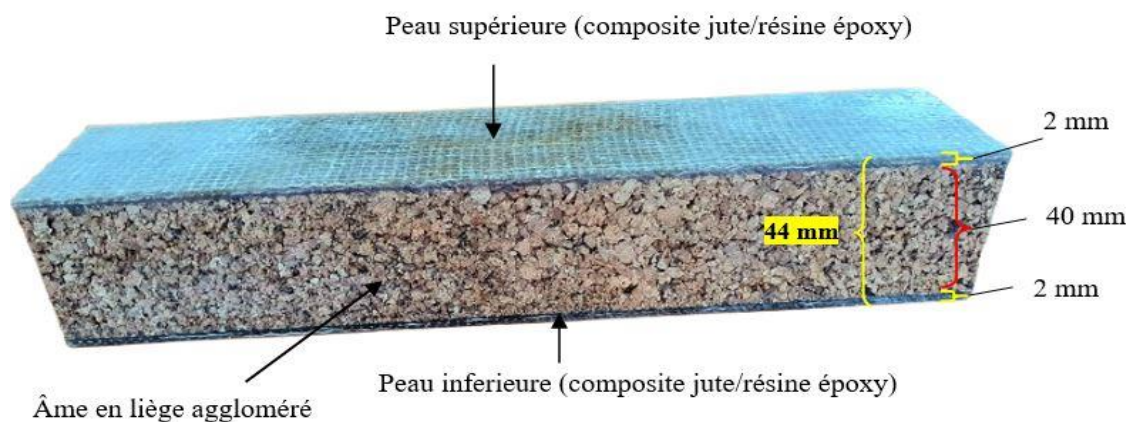
## **CHAPITRE II : Partie expérimentale**

## II.1 Introduction

Ce chapitre présente le mode opératoire détaillé pour la fabrication de panneaux sandwichs composés d'une âme en liège aggloméré et de peaux en composite jute/résine époxy, ainsi que le protocole de vieillissement pour évaluer leur durabilité. Cette structure sandwich combine les propriétés isolantes et la légèreté du liège avec la résistance mécanique des composites à fibres naturelles de jute, offrant une solution écologique pour diverses applications.

L'utilisation de matériaux biosourcés comme le liège et le jute s'inscrit dans une démarche de développement durable, réduisant l'impact environnemental par rapport aux matériaux synthétiques traditionnels. Cependant, la durabilité de ces matériaux naturels face aux conditions environnementales doit être évaluée rigoureusement pour garantir leur performance à long terme.

## II.2 Structure des panneaux sandwichs



**Figure II. 1:** Structure d'un panneau sandwich à âme en liège et peau en jute/résine

Les panneaux sandwichs étudiés présentent une structure en trois couches :

### II.2.1 Âme en liège aggloméré

- Épaisseur : 40 mm
- Densité : 140-170 kg/m<sup>3</sup>
- Granulométrie : 16/4 mm
- Propriétés : excellente isolation thermique (conductivité thermique) ( $\lambda = 0.049 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ ), stabilité dimensionnelle, résistance aux températures de -40°C à +150°C [30]

### II.2.2 Peaux en composite époxy /jute

- Épaisseur: 2 mm par peau

- Structure : stratifié de 2 à 4 plis de tissu de jute imprégné de résine époxy
- Propriétés : bonne résistance mécanique, sensibilité à l'humidité (absorption jusqu'à 4% d'eau après 8h à 70% d'humidité (HR))

### II.2.3 Interface âme/peaux :

- Adhésif structural époxy assurant la liaison entre l'âme et les peaux
- Épaisseur de la couche adhésive : 0,3-0,5 mm référence [31]

L'épaisseur totale du panneau sandwich est d'environ 44 mm, combinant la légèreté de l'âme en liège avec la rigidité des peaux en jute/époxy pour obtenir un matériau performant avec un excellent rapport rigidité/poids.

## II.3 Matériaux utilisés pour préparer les panneaux sandwich Époxy/jute/liège

### II.3.1 Matériaux pour l'Âme

Le liège aggloméré utilisé comme âme dans les panneaux sandwichs présente les caractéristiques représentées sur le **tableau II.1**

**Tableau II. 1:** Caractéristiques du liège aggloméré

Caractéristique	Valeur/Description
<b>Composition</b>	<b>Granulés de liège naturel agglomérés par une colle polyuréthane (colle alimentaire)</b>
<b>Formats standard</b>	<b>Panneaux de 1000 x 500 x 40 mm</b>
<b>Granulométrie</b>	<b>16/4 mm</b>
<b>Densité</b>	<b>140 kg - 170 kg/m<sup>3</sup></b>
<b>Coefficient de conductibilité thermique à 20°C</b>	<b><math>\lambda = 0.049 \text{ W/m } ^\circ\text{K}</math></b>
<b>Température courante d'isolation</b>	<b>-40°C à +150°C</b>
<b>Célérité du son</b>	<b>274 m/s</b>
<b>Vieillessement</b>	<b>Inaltérable. Grande stabilité dimensionnelle. Durée de vie indéfinie sous protection des intempéries.</b>
<b>Variation dimensionnelle selon l'humidité</b>	<b>&gt; 0.1%</b>
<b>Compressibilité (sous poids constant)</b>	<b>Compression à 25°C pendant 20 ans: aucune dégradation</b>
<b>Résistance chimique et thermique</b>	<b>Résiste aux acides et aux températures de -40 à +150°C</b>
<b>Classement au feu</b>	<b>M2 (difficilement inflammable)</b>

### II.3.2 Matériaux pour les peaux

#### a) Tissu de jute

- Grammage : 230g/ m<sup>2</sup>
- Armure : toile
- Dimensions : prévoir 15% supplémentaire par rapport aux dimensions finales du panneau



**Figure II. 2:** Toile de jute-naturelle 230g/ m<sup>2</sup>

#### b) Résine époxy

- Système époxy bi-composant (résine + durcisseur) compatible avec les fibres naturelles
- Rapport résine/durcisseur : selon les spécifications du fabricant (généralement 100/ 30 en masse)
- Viscosité moyenne pour faciliter l'imprégnation des fibres de jute
- Temps de gel : minimum 60 minutes à température ambiante

### II.3.3 Matériaux auxiliaires

- Agent de démoulage : cire ou film démoulant PVA
- Adhésif structural : colle époxy thixotrope pour l'assemblage âme/peaux.
- L'hydroxyde de sodium NaOH pour le traitement chimique du jute.
- Table de travail plane et propre
- Balance de précision ( $\pm 0,1$  g)
- Outils de découpe (cutter, ciseaux pour tissus, scie pour le liège)
- Mètre ruban et règle métallique
- Récipients pour la préparation de la résine
- Spatules et rouleaux pour l'application de la résine

- Brosses pour l'application de l'agent démoulant
- Gants en nitrile, lunettes de protection, masques respiratoires

## II.4 Préparation des panneaux sandwichs Époxy/jute/liège

L'élaboration d'un panneau sandwich est un processus d'assemblage multi-étapes. Avant de pouvoir fabriquer la structure composite finale, il est primordial de préparer méticuleusement chacun de ses constituants principaux. Les sections suivantes détaillent donc la préparation de l'âme en liège ainsi que celle des peaux en composite.

### II.4.1 Préparation de l'Âme en liège

#### 1. Découpe du liège :

- Découper la plaque de liège aggloméré aux dimensions souhaitées pour le panneau sandwich
- Poncer légèrement les surfaces pour améliorer l'adhérence avec les peaux
- Dépoussiérer soigneusement les surfaces
- Stocker le liège découpé dans un environnement à température contrôlée (20-25°C)
- Maintenir une humidité relative de 40-60%
- Durée minimale de conditionnement : 24 heures.

### II.4.2 Préparation des peaux en composite époxy/jute

#### a) Découpe du tissu

- Découper le tissu de jute aux dimensions requises (prévoir une marge de 50 mm sur chaque côté)
- Préparer le nombre de plis nécessaire pour chaque peau (généralement 2 à 4 plis)
- Orienter les plis selon la séquence d'empilement définie (par exemple :  $[0^\circ/90^\circ]$  pour 2 plis)

#### b) Traitement alcalin

- Immerger le tissu dans une solution de NaOH à 5% pendant 2 heures
- Rincer abondamment à l'eau distillée jusqu'à la neutralité du pH
- Sécher à température ambiante pendant 24 heures
- Ce traitement améliore l'adhésion fibre/matrice et les propriétés mécaniques



Figure II. 3: Les étapes de traitement alcalin

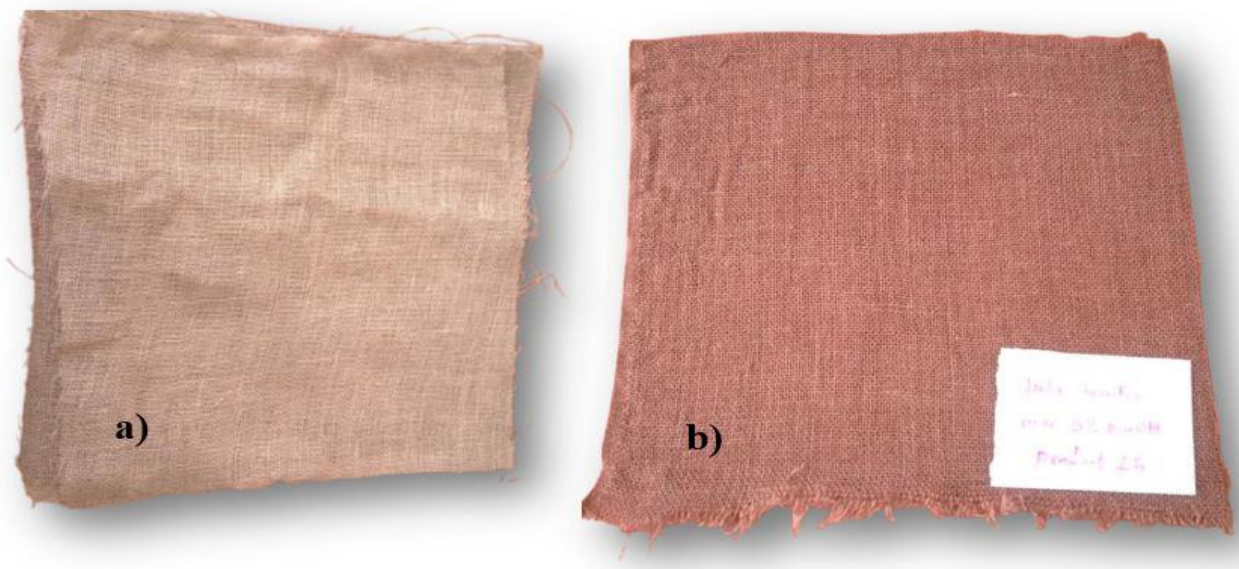


Figure II. 4: a) Tissu de jute non traité b) Tissu de jute traité

#### II.4.3 Préparation de mélange de résine

La résine époxy se compose de deux éléments, **A** (la résine) et **B** (le durcisseur), qui sont assemblés comme suit : L'élément **A** correspond à **65%** alors que l'élément **B** est de **35%**.

On mélange les deux constituants pendant **3 à 5 min** pour garantir une bonne polymérisation.

#### II.4.4 Fabrication des peaux en composite époxy/jute par moulage au contact

Pour fabriquer les peaux en composite époxy/jute pour notre panneau sandwich époxy/jute/liège par la méthode moulage au contact. En préalable, nous avons commencé par la préparation de moule en appliquant 2 à 3 couches de cire sur le moule pour garantir une finition de surface de haute qualité, puis nous avons appliqué une première couche de résine époxy avec le pinceau. Sans attendre, nous avons positionné notre première nappe de tissu de jute sur la résine encore humide. Nous avons utilisé un rouleau débulleur pour bien imprégner les fibres par la résine et chasser toutes les bulles d'air. Nous avons répété ce processus, pour préparer un stratifié de deux couches.



**Figure II. 5 :** Peau en composite Résine époxy jute non traitée

Une fois la stratification des peaux terminée, nous sommes passés à l'étape de polymérisation pour la durcir. Nous avons laissé le stratifié à température ambiante pendant 24 heures, ce qui a permis à la résine de durcir initialement. Pour optimiser les propriétés mécaniques finales de notre pièce et garantir sa résistance maximale

#### II.3.3 Préparation du panneau sandwich Époxy/jute/liège

La préparation du panneau sandwich Époxy/jute/liège est passer par ces différentes étapes :

- Nous avons réalisé un ponçage léger sur sa face interne afin de créer une rugosité de surface, condition essentielle pour garantir une adhésion mécanique optimale.
- En parallèle, nous avons préparé l'adhésif en résine époxy en mélangeant ses composants
- Nous avons ensuite appliqué une couche uniforme de cet adhésif sur la face poncée de la

première peau en composite époxy/jute, avant de positionner l'âme en liège

- Une seconde couche d'adhésif en résine époxy a été appliquée sur la face supérieure de l'âme, et la préparer ainsi pour recevoir la seconde peau en composite Époxy/jute.



**Figure II. 6 :** Application de l'adhésif sur la face supérieure de l'âme en vue de l'assemblage du panneau sandwich

- Placer le panneau sandwich entre deux plaques planes. Pour finaliser l'assemblage, nous avons placé l'ensemble du panneau entre deux plaques planes sous une pression d'un poids mort répartis uniformément afin d'assurer un contact intime entre toutes les couches et une bonne cohésion structurale. Le tout a ensuite été laissé à polymériser pendant 24 heures à température ambiante, une étape cruciale pour le durcissement complet de la résine de l'adhésif.



**Figure II. 7:** Application d'un poids mort (blocs de béton) pour assurer une pression uniforme lors du collage du panneau sandwich

- Après 24 h, nous avons démoulé le panneau sandwich de son moule une fois que la résine est totalement durcie (polymérisée).



**Figure II. 8 :** Vue du panneau sandwich après polymérisation et démoulage

Après démoulage, les panneaux sandwichs à peaux en jute/résine époxy et âme en liège sont découpés aux dimensions pour l'étude de vieillissement et pour la caractérisation mécanique en utilisant une scie circulaire avec lame adaptée aux composites avec une vitesse de coupe modérée pour éviter l'échauffement et maintenir fermement le panneau pour éviter les vibrations. Ensuite, on ponce les bords pour éliminer les bavures avec un papier abrasif.



**Figure II. 9 :** Vue du panneau sandwich après opérations de finition

Les éprouvettes sont préparées selon la norme **NF T-606** pour la flexion et 50\*50mm pour la compression. Elles sont découpées à l'aide d'une scie à format, comme illustré sur la Figure II 10. Cette machine a été choisie en raison de sa précision de coupe et de sa stabilité, essentielles pour l'obtention d'échantillons aux dimensions strictes.



**Figure II. 10 :** Une scie à format



**Figure II. 11:** Les éprouvettes pour la flexion et la compression

## II.5 Conditions de vieillissement des panneaux sandwichs jute/époxy /liège

L'étude de vieillissement vise à évaluer la durabilité et le comportement des panneaux sandwichs à âme en liège et peaux en jute/résine époxy dans différentes conditions environnementales. Les essais proposés permettent de simuler de manière accélérée les effets du temps et des conditions d'utilisation sur les propriétés physiques, mécaniques et structurelles des panneaux.

Les objectifs spécifiques sont :

- Déterminer l'évolution des propriétés mécaniques au cours du vieillissement
- Identifier les mécanismes de dégradation spécifiques aux interfaces âme/peaux
- Fournir des données pour la prédiction de la durée de vie des panneaux

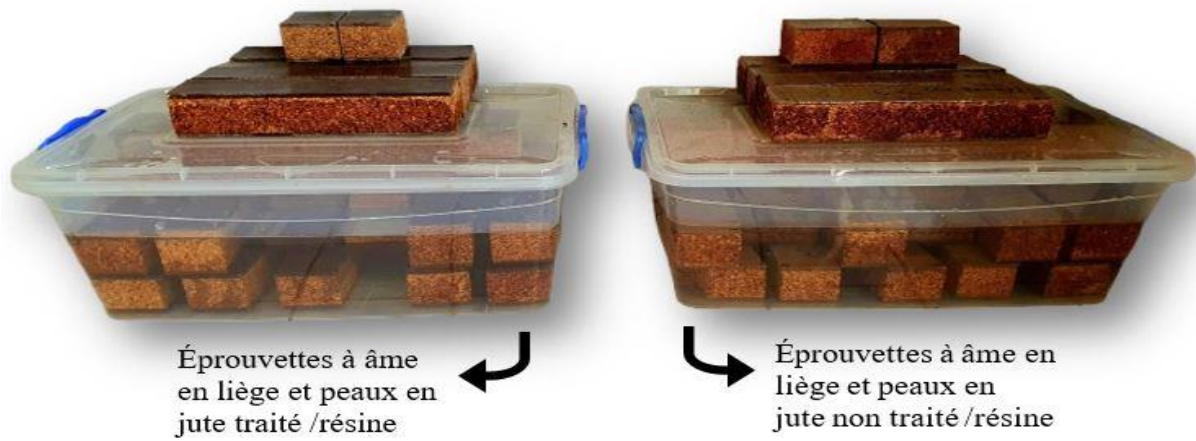
Dans notre étude, nous avons utilisé la méthode de vieillissement par immersion dans l'eau distillée afin de simuler les effets de l'humidité sur les panneaux sandwichs étudiés.

### II.5.1 Équipement et les conditions de vieillissement

- Bacs d'immersion en matériau inerte (verre ou plastique)
- Supports pour maintenir les éprouvettes immergées
- Eau distillée
- Température :  $23 \pm 2^\circ\text{C}$
- Durée : 500 heures ( $\approx 21$  jours)

### II.5.2 Procédure

La procédure consiste à plonger complètement nos éprouvettes dans un bac rempli d'eau distillée à température ambiante, en veillant à maintenir un espacement minimal de 20 mm entre chacune pour garantir une exposition uniforme de toutes les surfaces. Afin d'éviter la saturation du milieu et de maintenir des conditions constantes, nous avons renouvelé l'eau distillée toutes les semaines. L'évolution de l'absorption d'eau et les propriétés mécanique et acoustique des panneaux sandwich ont été étudiées.



**Figure II. 12:** L'immersion des éprouvettes dans l'eau distillée



**Figure II. 13:** Renouvellement d'eau après 7 jours

Afin de faciliter la compréhension des résultats présentés dans le chapitre trois, les notations des échantillons étudiés est détaillée dans le **Tableau II.2**

**Tableau II. 2:** Notations des différents panneaux sandwichs

Notations	Désignations
PS-JNT	Panneau sandwich à peaux avec jute non traitée
PS-JT	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée
PS-JNT-V7J	Panneau sandwich à peaux avec jute non traitée vieilli 7 jours
PS-JTV-7J	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée vieilli 7 jours
PS-JNT-V14J	Panneau sandwich à peaux avec jute non traitée vieilli 14 jours
PS-JT-V14J	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée vieilli 14 jours
PS-JNT-V21J	Panneau sandwich à peaux avec jute non traitée vieilli 21 jours
PS-JT-V21J	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée vieilli 21 jours
PS-JNT-L	Panneau sandwich à peaux avec jute non traitée compression longitudinale
PS-JNT-P	Panneau sandwich à peaux avec jute non traitée compression perpendiculaire
PS-JT-L	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée compression longitudinale
PS-JT-P	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée compression perpendiculaire
PS-JNT-V7J-L	Panneau sandwich à peaux avec jute non traitée vieilli 7 jours compression longitudinale
PS-JNT-V7J-P	Panneau sandwich à peaux avec jute non traitée vieilli 7 jours compression perpendiculaire
PS-JT-V7J-L	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée vieilli 7 jours compression longitudinale
PS-JT-V7J-P	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée vieilli 7 jours compression perpendiculaire
PS-JNT-V14J-L	Panneau sandwich à peaux avec jute non traitée vieilli 14 jours compression longitudinale
PS-JNT-V14J-P	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée vieilli 14 jours compression perpendiculaire
PS-JT-V14J-L	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée vieilli 14 jours compression longitudinale
PS-JT-V14J-P	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée vieilli 14 jours compression perpendiculaire
PS-JNT-V21J-L	Panneau sandwich à peaux avec jute non traitée vieilli 21 jours compression longitudinale
PS-JNT-V21J-P	Panneau sandwich à peaux avec jute non traitée vieilli 21 jours compression perpendiculaire
PS-JT-V21J-L	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée vieilli 21 jours compression longitudinale
PS-JT-V21J-P	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée vieilli 21 jours compression perpendiculaire

## II.6 Les techniques de caractérisation

Pour mettre en évidence la performance et l'effet de vieillissement sur les panneaux sandwichs à âme en liège et peaux en jute/époxy, différentes techniques de caractérisation ont été utilisées à savoir :

- Caractérisation physique : absorption d'eau
- Caractérisation mécanique : test de flexion 3 points et test de compression.
- Caractérisation acoustique

### II.6.1 Caractérisation physique : absorption d'eau

La caractérisation de l'absorption d'eau vise à quantifier le comportement des matériaux composites lorsqu'ils sont immergés dans l'eau sur une période prolongée. La méthode employée suit la norme **ASTM D570**. La méthode employée suit la norme ASTM D570, dont le détail est fourni en **Annexe A**

Le protocole consiste d'abord à sécher les échantillons dans une étuve jusqu'à l'obtention d'une masse constante, notée  $m_0$ , qui correspond à la masse initiale sèche. Ensuite, les échantillons sont complètement immergés dans un bac d'eau distillée à température ambiante. À intervalles de temps réguliers, les échantillons sont retirés de l'eau, leur surface est rapidement essuyée avec un papier absorbant pour enlever l'excès d'eau, puis ils sont pesés pour obtenir leur masse humide, notée  $m_t$ .

Le taux d'absorption d'eau (**AE**) en pourcentage est alors calculé à chaque intervalle de temps en utilisant la formule suivante :

$$AE (\%) = ((m_t - m_0) / m_0) \times 100$$

Où :

$m_t$  : est la masse de l'échantillon humide à un temps  $t$ .

$m_0$  : est la masse de l'échantillon sec initial.

### II.6.2 Caractérisation mécanique

#### II.6.2.1 Test de flexion à trois points

La caractérisation des échantillons est effectuée à travers des essais de flexion à trois points suivant la norme **AFNOR NF T54-606 (1987)**.

Les tests de flexion à trois points sont réalisés sur une machine universelle Zwick/Rolle ZO10, à l'unité de recherche UR-MPE (**Figure II.14**), qui est équipée d'un capteur de force d'une capacité de 10 kN. Cette machine est dirigée par le logiciel TextXpert 12.0 qui enregistre la courbe (force - déplacement). L'avance se fait à une vitesse de 5 mm/min



Figure II. 14: Montage d'essai de flexion trois points

### II.6.2.2 Test de compression

Les essais de compression ont été menés afin d'évaluer la résistance des matériaux sous une charge axiale. Pour obtenir une caractérisation complète, les tests ont été réalisés selon deux configurations distinctes :

- **Compression longitudinale** : La charge est appliquée perpendiculairement au plan du panneau sandwich, sollicitant principalement l'âme en compression.

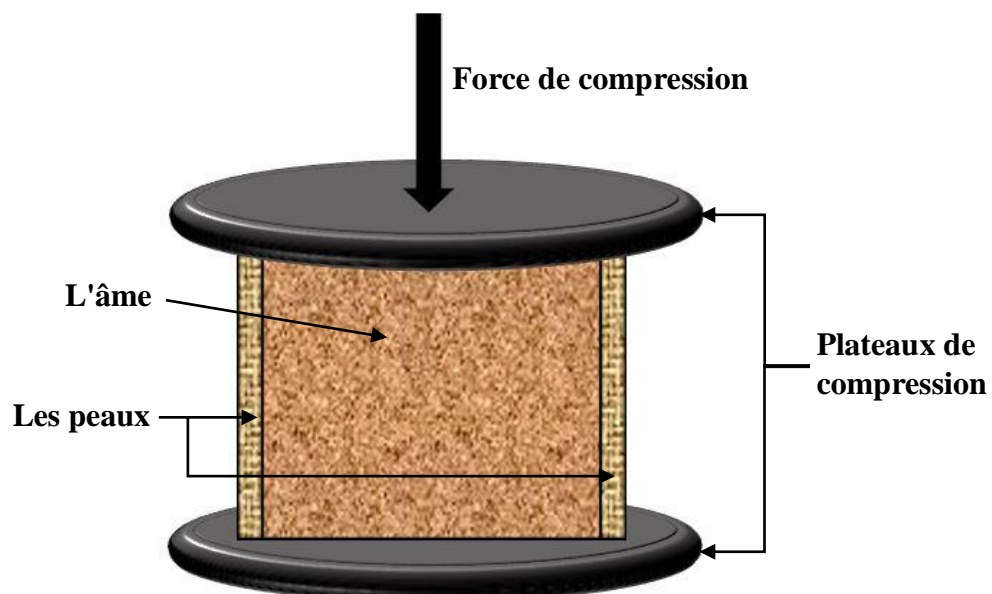
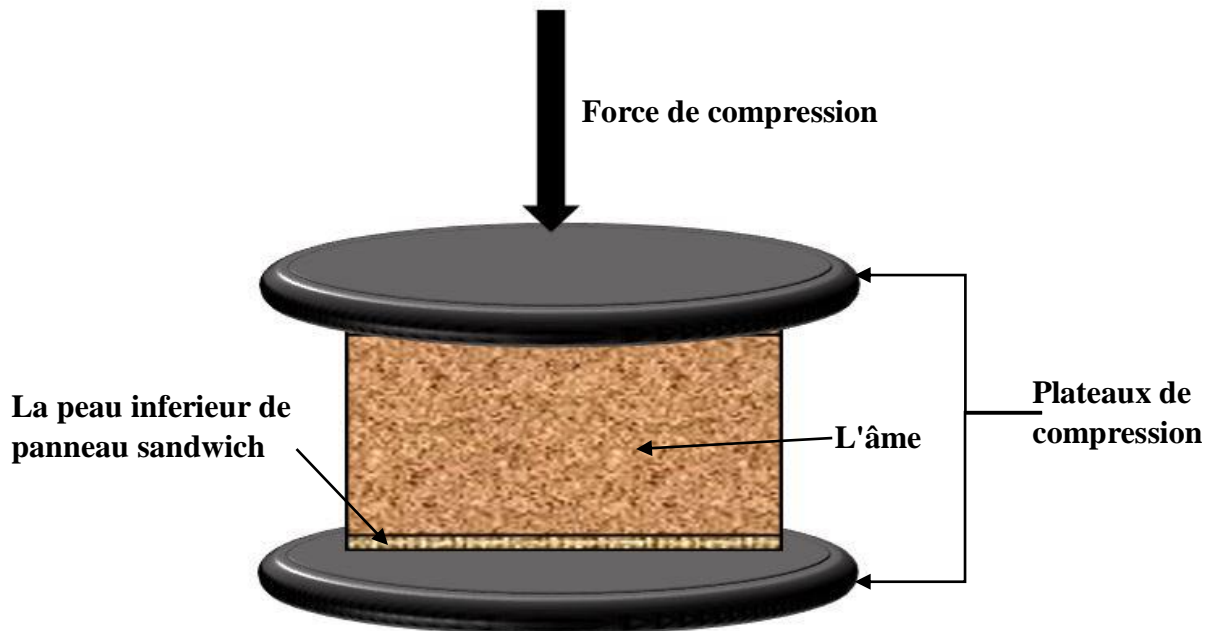


Figure II. 15: Un schéma d'une compression longitudinale

- **Compression perpendiculaire :** La charge est appliquée parallèlement au plan du panneau, sollicitant à la fois l'âme et les peaux.



**Figure II. 16:** Un schéma d'une compression perpendiculaire

Pour chaque compression, les essais ont été conduits sur des éprouvettes carrées de dimensions 50x50 mm, à la fois pour les échantillons non vieillis (témoins) et pour ceux ayant subi un vieillissement, afin de comparer leur comportement.

Nous avons utilisé une machine d'essai universelle électromécanique de type **IBERTEST**, modèle **ELIB-200 E/W**, située au laboratoire de Génie Civil de l'Université Mouloud Mammeri. Cet équipement, piloté par ordinateur, est doté d'un capteur de force et possède une capacité maximale de **200 kN**.

Conformément à la norme **NF EN 826**, chaque éprouvette a été soigneusement alignée au centre du plateau de compression pour garantir une application de la charge parfaitement axiale. L'essai a été conduit à température ambiante avec une vitesse de chargement constante de 10 mm/min jusqu'à la rupture de l'échantillon.



**Figure II. 17:** Essai de compression perpendiculaire

### II.5.2.3 Test acoustique

Le but de la caractérisation acoustique était d'évaluer l'intégrité structurelle et de mesurer la vitesse de propagation des ondes ultrasonores. Ce test non destructif permet de détecter d'éventuels défauts internes (fissures, délaminages) et de calculer des propriétés matérielles comme le module d'élasticité dynamique. L'analyse a été menée sur les panneaux sandwichs vieillis et non vieillis, ainsi que sur des échantillons de liège seul, afin d'isoler le comportement de l'âme et de comparer les performances avant et après assemblage et vieillissement.

Le test a été effectué à l'aide d'un détecteur de défauts par ultrasons portable, comme celui présenté sur la figure ci-dessous. L'équipement se compose d'une unité centrale de contrôle et de deux transducteurs (un émetteur et un récepteur) fonctionnant à une fréquence de **54 kHz**.

La méthode employée, dite par transmission, consistait à placer l'émetteur et le récepteur de part et d'autre de l'échantillon (panneau sandwich ou liège), parfaitement alignés. Pour assurer un contact optimal et éliminer toute couche d'air parasite qui pourrait perturber la mesure, une fine couche de gel de couplage a été appliquée sur les surfaces de contact entre les transducteurs et l'échantillon. L'émetteur envoyait une impulsion ultrasonore à travers le matériau, et le récepteur mesurait le temps de parcours de l'onde. Ce temps de vol, ainsi que l'épaisseur de l'échantillon, ont permis de calculer la vitesse de propagation des ondes dans le matériau.



**Figure II. 18:** Détecteur de défauts par ultrasons utilisé pour la caractérisation acoustique

## II.7 Conclusion

Ce chapitre a méthodiquement détaillé le protocole expérimental qui constitue le fondement de cette étude. La première partie a été consacrée à la phase de fabrication, depuis la sélection rigoureuse des matières premières l'âme en liège et les peaux en composite jute/époxy jusqu'à l'élaboration des panneaux sandwich finaux. Un accent particulier a été mis sur la préparation des constituants, notamment le traitement alcalin des fibres de jute, une étape clé visant à améliorer l'adhésion interfaciale.

La seconde partie a défini le cadre de caractérisation des matériaux. Nous avons établi les procédures pour une analyse multi-échelle, incluant des essais mécaniques destructifs (compression, flexion) pour quantifier la résistance, et des essais non destructifs (ultrasons) pour évaluer l'intégrité structurelle. En parallèle, un protocole de vieillissement par immersion a été mis en place pour simuler les conditions d'usage en milieu humide et évaluer la durabilité de nos matériaux.

L'ensemble de ces protocoles, de la fabrication des échantillons à la définition des méthodes de test, a permis de construire une base expérimentale solide et cohérente. Nous sommes désormais en mesure de procéder à l'analyse des données, qui fera l'objet du chapitre suivant, où les résultats seront présentés, interprétés et discutés.

## **CHAPITRE III : Résultats et discussions**

### III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats expérimentaux obtenus lors de la caractérisation des panneaux sandwichs à âme en liège et peaux en composite jute/époxy. L'objectif principal est d'évaluer l'influence de deux paramètres clés sur le comportement mécanique et la durabilité de ces biocomposites : le traitement de surface des fibres de jute et le vieillissement hygrothermique par immersion dans l'eau distillée à température ambiante.

L'analyse s'articule autour de plusieurs axes. Nous commencerons par étudier les courbes d'absorption d'eau afin de quantifier la cinétique de pénétration de l'humidité au sein des matériaux, ce qui permettra de corrélérer directement la dégradation des propriétés mécaniques à ce phénomène. Ensuite, nous présenterons les résultats des essais de compression, qui permettent de mesurer la rigidité et la résistance des panneaux sous des charges axiales, en distinguant les configurations longitudinale et perpendiculaire pour isoler le rôle respectif des peaux et de l'âme. Par la suite, nous aborderons les essais de flexion trois points, essentiels pour évaluer la performance structurelle globale des panneaux, une sollicitation typique pour ce type de structure. Enfin, une caractérisation acoustique par ultrasons viendra compléter cette étude en offrant un regard sur l'intégrité microstructurale des matériaux avant et après vieillissement.

Pour chaque type d'essai, l'analyse sera menée de manière comparative : nous évaluerons d'abord les performances à l'état initial (non vieilli) pour établir une référence et quantifier l'impact du traitement alcalin. Puis, nous étudierons la cinétique de dégradation en analysant les données à 7, 14 et 21 jours de vieillissement, afin de comprendre comment les propriétés évoluent dans le temps.

L'ensemble de ces résultats permettra de tirer des conclusions robustes sur l'efficacité du traitement de surface et sur la viabilité de ces panneaux sandwich écologiques pour des applications durables.

#### III.1 Absorption d'eau

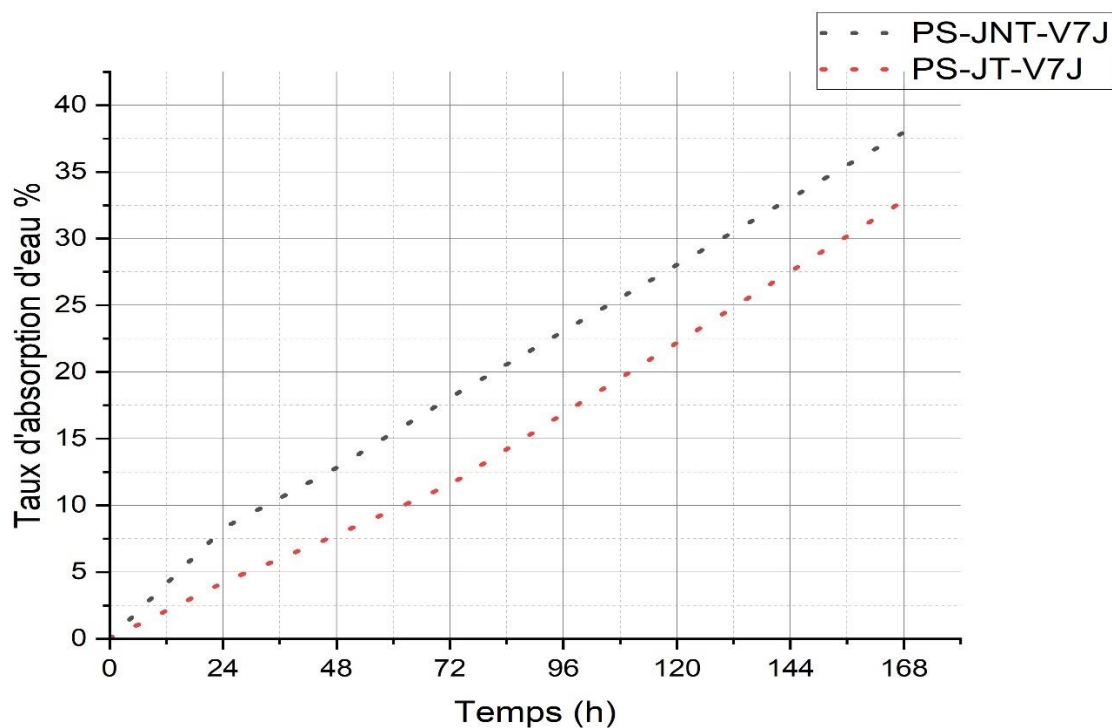
Afin de faciliter la lecture et la comparaison des résultats, les différentes éprouvettes de panneaux sandwichs ont été désignées par des notations spécifiques. **Le Tableau III.1** ci-dessous récapitule ces abréviations en fonction du traitement des fibres de jute (traitées ou non traitées) et de la durée du vieillissement par immersion dans l'eau distillé

**Tableau III. 1:** Notations des différents panneaux sandwichs

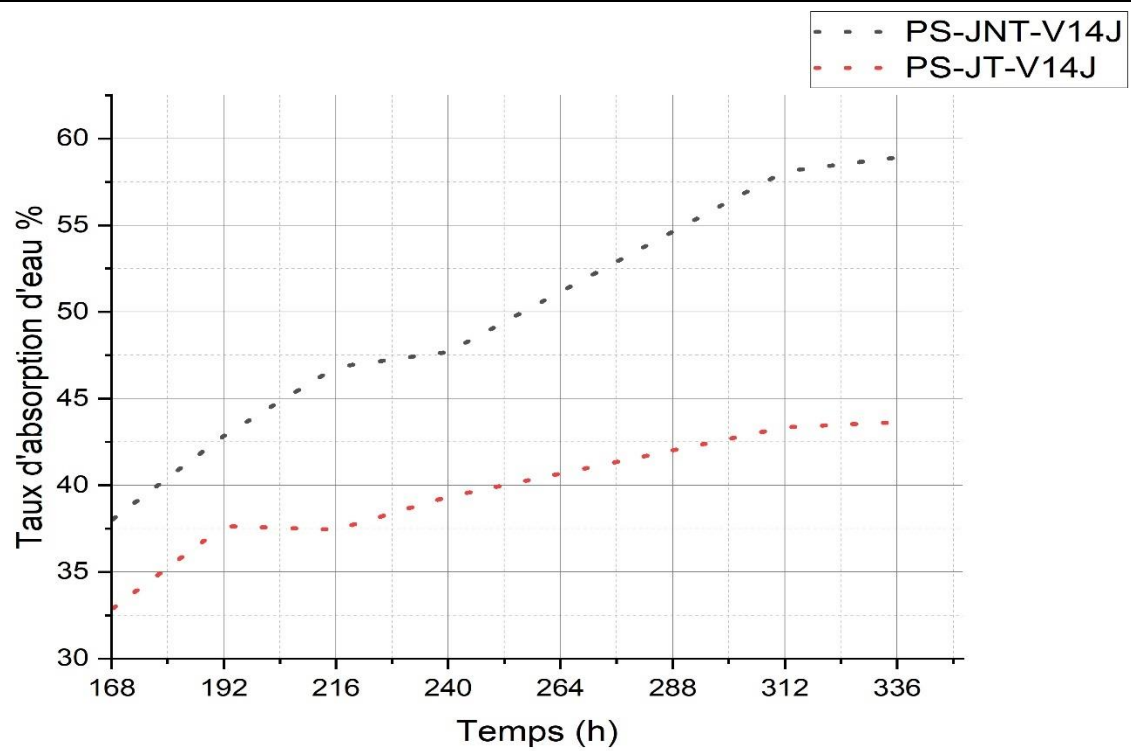
Notations	Désignations
<b>PS-JNT</b>	Panneau sandwich à peaux avec jute non traitée
<b>PS-JT</b>	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée
<b>PS-JNT-V7J</b>	Panneau sandwich à peaux avec jute non traitée vieilli 7 jours
<b>PS-JTV-7J</b>	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée vieilli 7 jours
<b>PS-JNT-V14J</b>	Panneau sandwich à peaux avec jute non traitée vieilli 14 jours
<b>PS-JT-V14J</b>	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée vieilli 14 jours
<b>PS-JNT-V21J</b>	Panneau sandwich à peaux avec jute non traitée vieilli 21 jours
<b>PS-JT-V21J</b>	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée vieilli 21 jours

### III.1.1 Effet de traitement

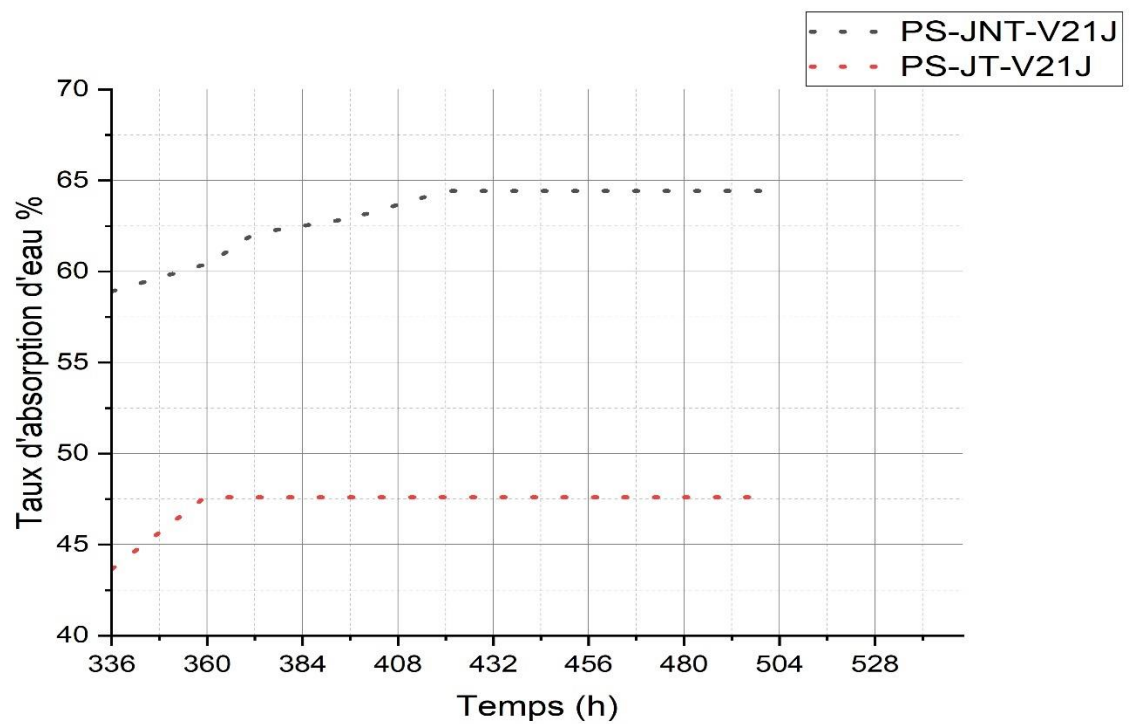
Les **figures III.1, III.2 et III.3** ci-dessous présentent les courbes de la cinétique d'absorption d'eau. Chaque courbe représente des résultats obtenus pour un type de panneau sandwich (à base de jute traitée ou non traitée), après 7, 14 et 21 jours de vieillissement par immersion dans l'eau distillé.



**Figure III. 1:** Évolution du taux d'absorption d'eau en fonction du temps pour les panneaux avec jute traitée (PS-JT-V7J) et non traitée (PS-JNT-V7J)



**Figure III. 2:** Évolution du taux d'absorption d'eau en fonction du temps pour les panneaux avec jute traitée (PS-JT-V14J) et non traitée (PS-JNT-V14J)



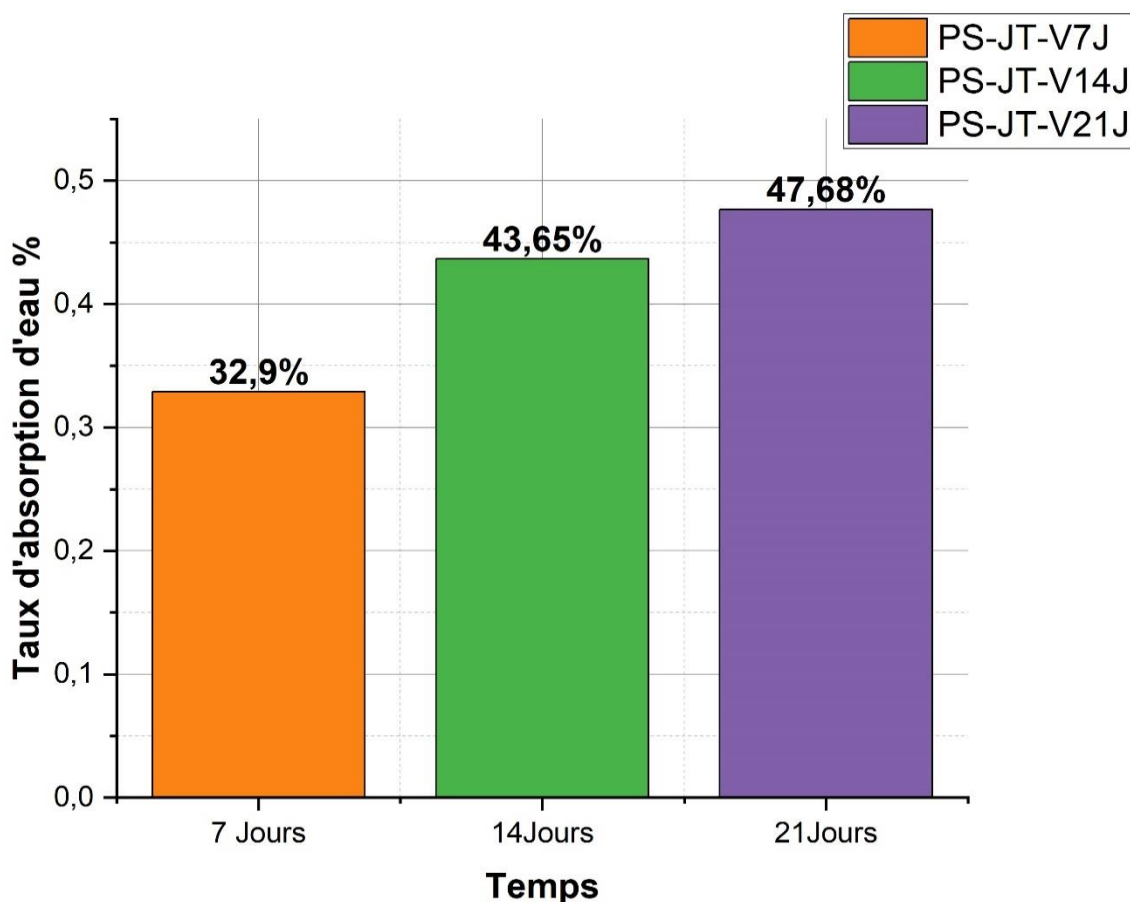
**Figure III. 3:** Évolution du taux d'absorption d'eau en fonction du temps pour les panneaux avec jute traitée (PS-JT-V21J) et non traitée (PS-JNT-V21J)

### Interprétation des résultats

Le traitement alcalin des fibres de jute (PS-JT) réduit significativement l'absorption d'eau par rapport aux panneaux sandwichs à jute non traitée (PS-JNT). Cela est dû au fait que le traitement alcalin élimine une partie des composites non cellulosiques (hémicellulose, lignine, pectines) de la surface des fibres de jute, rendant ainsi les fibres moins sensibles à l'humidité. De plus, ce traitement améliore l'adhésion entre les fibres de jute et la résine époxy, ce qui limite la pénétration de l'eau à l'interface fibre/matrice, souvent considérée comme le point faible des biocomposites.

#### III.1.2 Effet du temps de vieillissement

Les résultats de l'essai d'absorption d'eau sont présentés dans la figure III.4. Cet histogramme compare le pourcentage d'eau absorbée par les panneaux sandwichs à peaux de jute traitée après 7, 14 et 21 jours d'immersion.



**Figure III. 4:** Taux d'absorption d'eau des panneaux sandwichs à peaux de jute traitée en fonction de la durée d'immersion

### Interprétation des résultats

L'histogramme met clairement en évidence une augmentation progressive du taux d'absorption d'eau à mesure que la durée d'immersion dans l'eau distillée s'allonge. Pour les panneaux sandwichs avec peaux en jute traitée (**PS-JT**) :

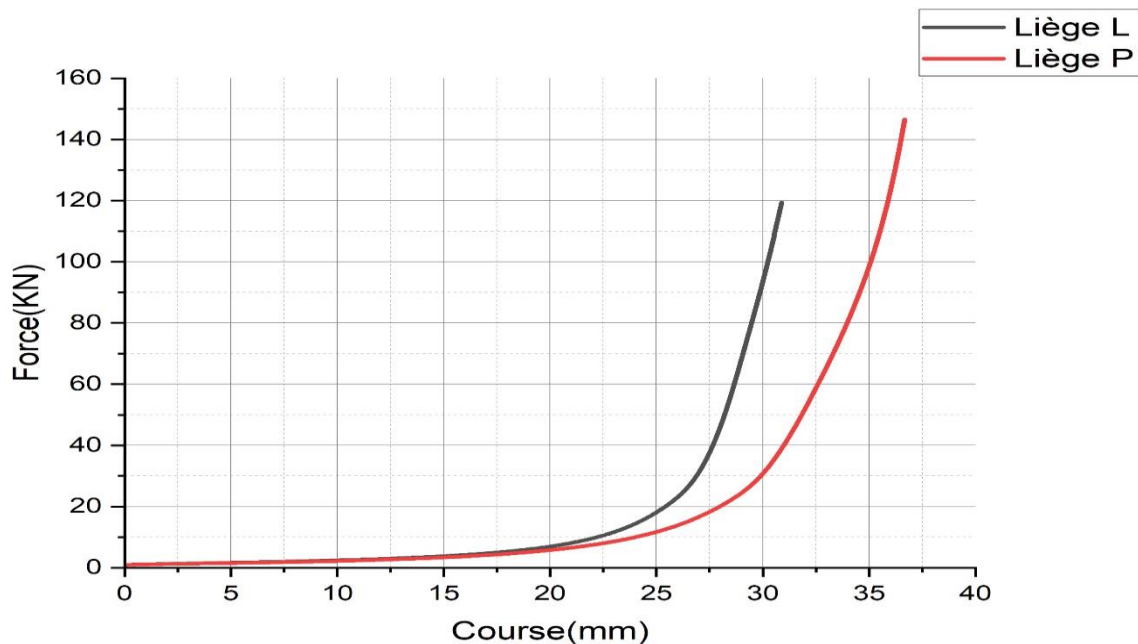
- Après 7 jours d'immersion, le taux d'absorption est d'environ **32,90 %**.
- Après 14 jours d'immersion, ce taux passe à environ **43,65 %**.
- Après 21 jours d'immersion, le taux d'absorption atteint environ **47,68 %**.

Cette tendance indique que, même avec un traitement des fibres de jute, les panneaux sandwichs continuent d'absorber de l'eau au fil du temps. L'augmentation est significative entre 7 et 14 jours, puis elle ralentit légèrement entre 14 et 21 jours, suggérant une possible approche de saturation ou un ralentissement du processus d'absorption après une période prolongée. Cela souligne l'importance de la durée d'exposition à l'eau sur la performance et la durabilité de ces matériaux, même lorsqu'ils sont traités pour améliorer leur résistance à l'eau. La tendance indique une absorption croissante, même avec traitement, soulignant l'effet de la durée d'immersion sur la durabilité des panneaux.

## III.2 Test de compression

### III.2.1 Comportement en compression de l'âme : Liège

La **figure III.5** présente les courbes force-déplacement du liège soumis à un essai de compression, réalisées selon deux directions distinctes : longitudinale (L) et perpendiculaire (P) à la structure cellulaire.



**Figure III. 5:** Courbe force –déplacement en compression longitudinale et perpendiculaire de l'âme : liège seul

### Interprétation

La **figure III.5** présente les courbes force-déplacement pour le liège seul en compression longitudinale et en compression perpendiculaire. Ces courbes sont caractéristiques du comportement des matériaux poreux et peuvent être divisées en trois zones principales :

**Zone linéaire (ou Élastique) :** Au début de la compression (faibles déformations), la courbe montre une pente relativement raide et linéaire. Dans cette zone, le liège se déforme élastiquement, ce qui signifie qu'il reprendrait sa forme originale si la contrainte était relâchée. La rigidité du matériau est élevée, et la déformation est principalement due à la flexion des parois cellulaires du liège. On observe une différence de rigidité entre la compression longitudinale et perpendiculaire, la compression perpendiculaire étant généralement plus rigide.

**Zone plastique :** Après la zone linéaire, la courbe présente un plateau plus ou moins prononcé, où la force augmente très peu pour une augmentation significative du déplacement. Cette zone correspond à la déformation plastique du liège, où les cellules commencent à s'effondrer et à se rompre de manière irréversible. L'énergie est absorbée par la déformation permanente de la structure cellulaire. C'est dans cette zone que le matériau peut absorber une grande quantité d'énergie sans une augmentation drastique de la contrainte.

**Zone de densification :** Enfin, à des déformations plus importantes, la courbe remonte brusquement avec une pente très raide. Cette zone est appelée zone de densification. Elle se produit lorsque les cellules du liège sont presque entièrement effondrées et que le matériau devient compact. Les parois cellulaires entrent en contact les unes avec les autres, et la résistance à la compression augmente rapidement car le matériau se comporte alors comme un solide dense. À ce stade, le liège perd sa porosité et sa capacité à absorber davantage d'énergie par déformation cellulaire.

En résumé, le liège présente un comportement en compression typique des matériaux cellulaires, avec une phase élastique initiale, suivie d'un plateau de déformation plastique dû à l'effondrement des cellules, et enfin une phase de densification où le matériau devient rigide en raison du contact entre les parois cellulaires.

**Tableau III. 2:** Caractéristiques mécaniques de liège soumis à la compression longitudinale et perpendiculaire

Echantillon	Sollicitation	Rigidité (N/mm)	Limite d'élasticité (KN/mm <sup>2</sup> )	Force maximale (KN)	Déplacement correspondant à la force maximale en (mm)
Liège	Compression perpendiculaire	7599,5827	5,86813	146,5568	36,66199
	Compression longitudinale	159,1607	6,94715	119,38515	30,88

### Interprétation des résultats du Tableau III.2

L'analyse comparative des données du tableau révèle des différences significatives entre les deux modes de compression du liège :

**Rigidité :** La compression perpendiculaire montre une rigidité extraordinairement plus élevée (**7599,5827 N/mm**) que la compression longitudinale (**159,1607 N/mm**). Cela signifie que le liège résiste beaucoup plus à la déformation lorsqu'il est compressé dans le sens de la croissance de ses cellules.

**Force maximale :** Le liège supporte une force maximale plus importante en compression perpendiculaire (**146,5568 KN**) qu'en compression longitudinale (**119,38515 KN**). Cela confirme sa meilleure résistance mécanique dans la direction perpendiculaire.

**Déplacement à la force maximale :** Le déplacement nécessaire pour atteindre cette force maximale est plus grand en compression perpendiculaire (**36,66199 mm**) qu'en compression longitudinale (**30,88 mm**). Cela indique que, non seulement il est plus résistant en perpendiculaire, mais il peut aussi subir une plus grande déformation avant d'atteindre son point de rupture ou de densification maximale.

En résumé, le liège est un matériau nettement plus performant (plus rigide et plus résistant) lorsqu'il est sollicité en compression perpendiculaire. Cette anisotropie est une caractéristique clé de sa structure cellulaire et doit être prise en compte lors de son utilisation dans des applications structurelles.

#### III.2.2 comportement en compression des panneaux sandwichs

Pour l'étude du comportement en compression des panneaux sandwich, un système de notation a été mis en place afin de différencier clairement chaque configuration d'échantillon. Le **Tableau III.3** synthétise ces notations et leur désignation complète.

**Tableau III. 3:** Notations des différents matériaux soumis à la compression longitudinale et perpendiculaire

Notations	Désignations
<b>PS-JNT-L</b>	Panneau sandwich à peaux avec jute non traitée compression longitudinale
<b>PS-JNT-P</b>	Panneau sandwich à peaux avec jute non traitée compression perpendiculaire
<b>PS-JT-L</b>	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée compression longitudinale
<b>PS-JT-P</b>	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée compression perpendiculaire
<b>PS-JNT-V7J-L</b>	Panneau sandwich à peaux avec jute non traitée vieilli 7 jours compression longitudinale
<b>PS-JNT-V7J-P</b>	Panneau sandwich à peaux avec jute non traitée vieilli 7 jours compression perpendiculaire
<b>PS-JT-V7J-L</b>	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée vieilli 7 jours compression longitudinale
<b>PS-JT-V7J-P</b>	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée vieilli 7 jours compression perpendiculaire
<b>PS-JNT-V14J-L</b>	Panneau sandwich à peaux avec jute non traitée vieilli 14 jours compression longitudinale
<b>PS-JNT-V14J-P</b>	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée vieilli 14 jours compression perpendiculaire
<b>PS-JT-V14J-L</b>	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée vieilli 14 jours compression longitudinale
<b>PS-JT-V14J-P</b>	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée vieilli 14 jours compression perpendiculaire
<b>PS-JNT-V21J-L</b>	Panneau sandwich à peaux avec jute non traitée vieilli 21 jours compression longitudinale
<b>PS-JNT-V21J-P</b>	Panneau sandwich à peaux avec jute non traitée vieilli 21 jours compression perpendiculaire
<b>PS-JT-V21J-L</b>	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée vieilli 21 jours compression longitudinale
<b>PS-JT-V21J-P</b>	Panneau sandwich à peaux avec jute traitée vieilli 21 jours compression perpendiculaire

Les **figures III.6, III.7, III.8 et III.9** ci-dessous présentent les courbes force –déplacement en compression longitudinale et perpendiculaire. Chaque courbe représente des résultats obtenus pour un type de panneau sandwich (à base de jute traitée ou non traitée), après 0, 7, 14 et 21 jours de vieillissement par immersion dans l'eau distillée.

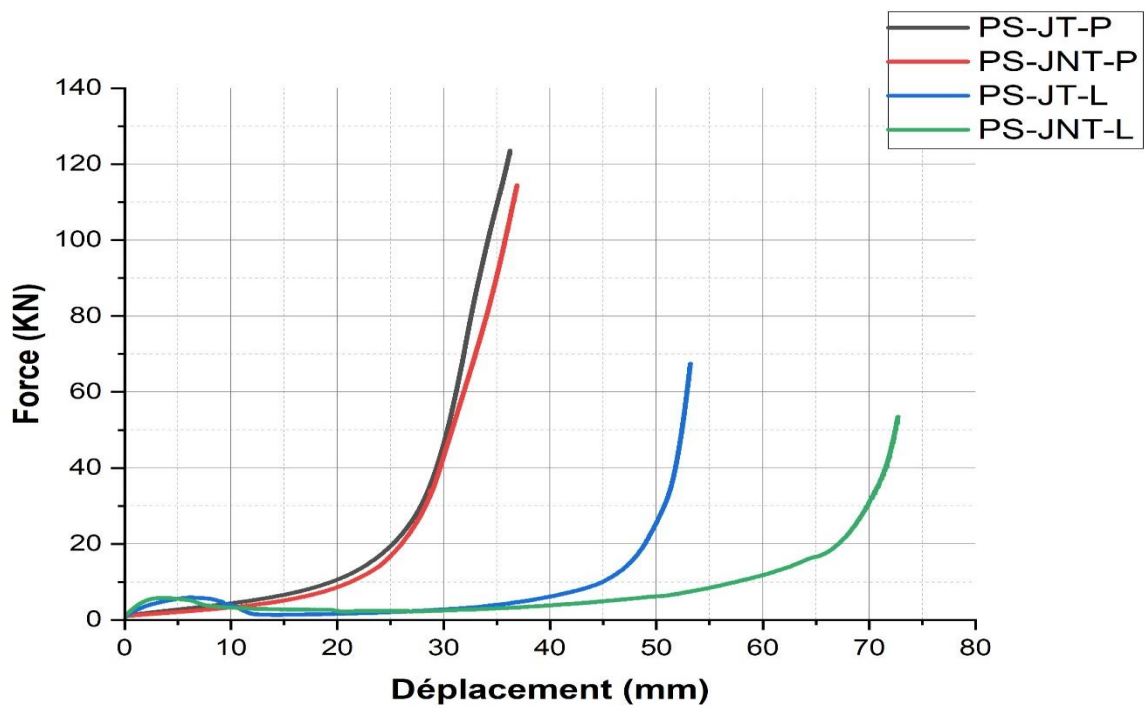


Figure III. 6 : Courbe force –déplacement en compression longitudinale et perpendiculaire des panneaux sandwichs non vieillis (jute traitée et non traitée)

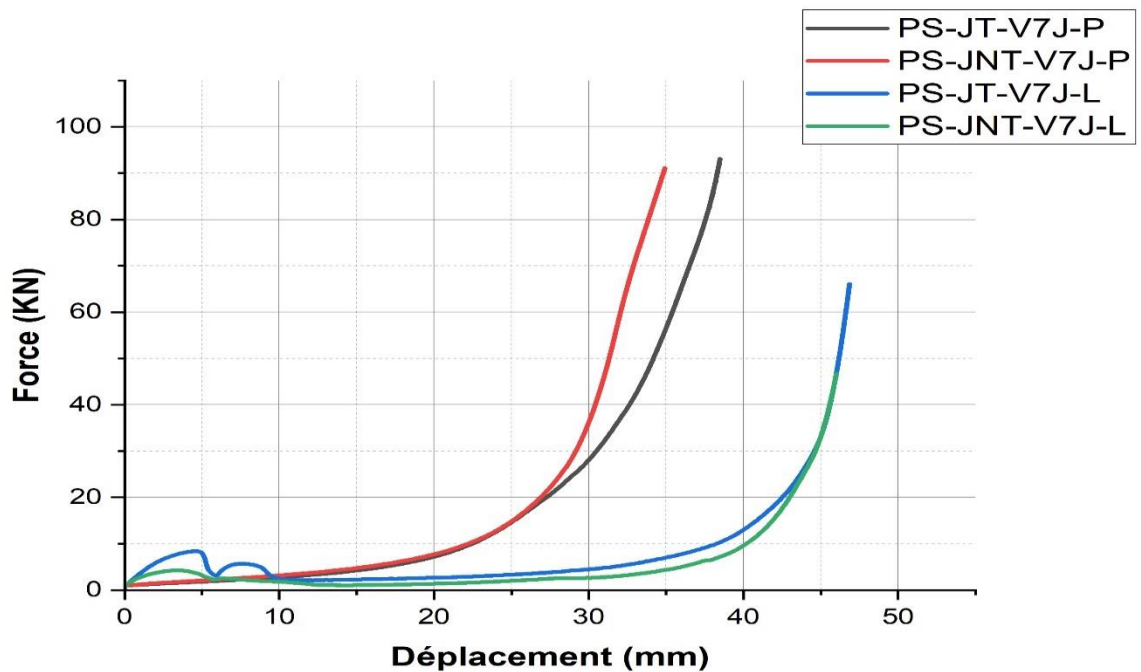


Figure III. 7: Courbe force –déplacement en compression longitudinale et perpendiculaire des panneaux sandwichs vieillis 7 jours (jute traitée et non traitée)

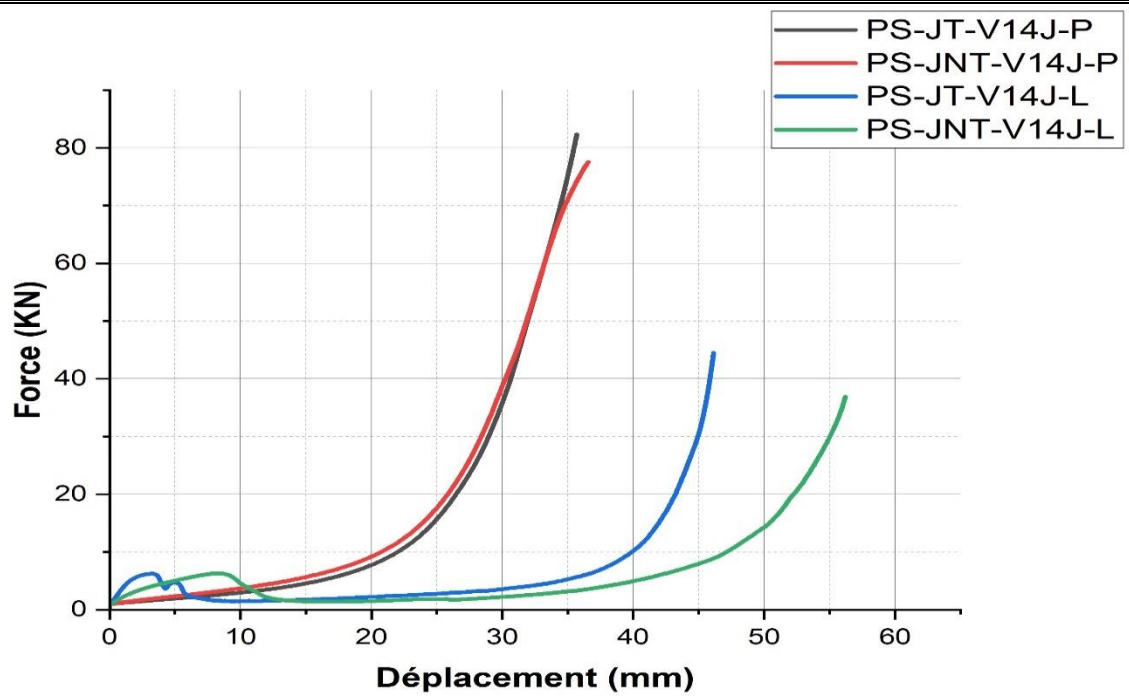


Figure III. 8: Courbe force –déplacement en compression longitudinale et perpendiculaire des panneaux sandwichs vieillis 14 jours (jute traitée et non traitée)

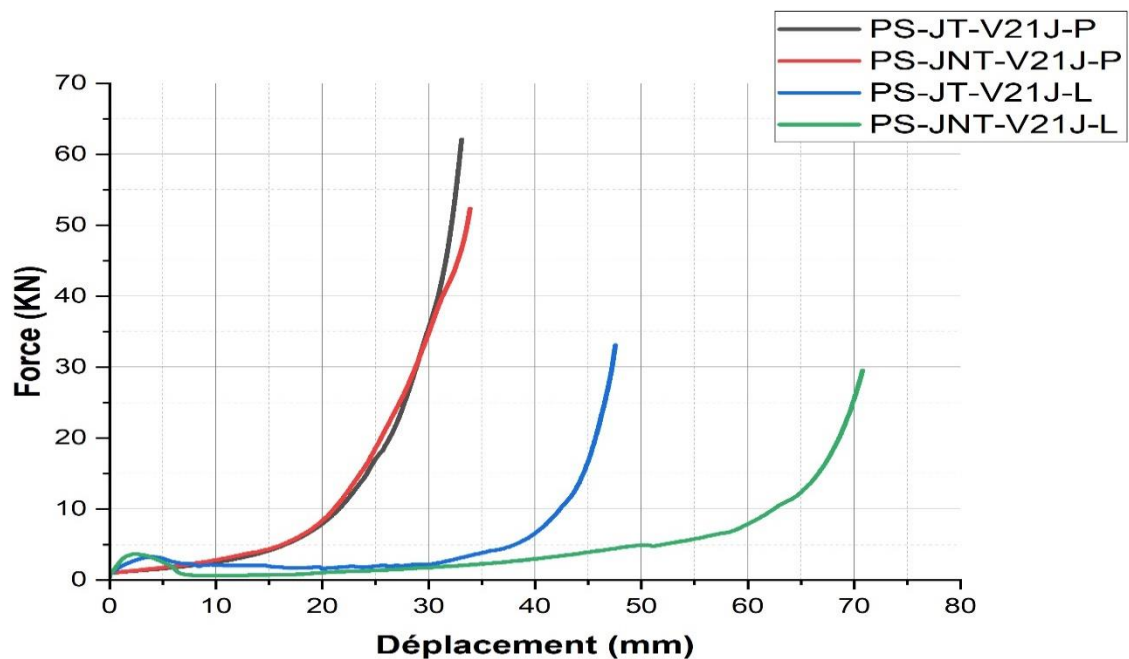


Figure III. 9: Courbe force –déplacement en compression longitudinale et perpendiculaire des panneaux sandwichs vieillis 21 jours (jute traitée et non traitée)

---

## Interprétation

### a) Comportement général des panneaux sandwichs en compression

Les courbes force – déplacement présentent typiquement trois zones distinctes, caractéristiques des matériaux cellulaires et composites sandwich :

**Zone élastique (linéaire) :** Au début de la compression, la relation force-déplacement est linéaire, indiquant une déformation élastique réversible. La pente dans cette zone correspond à la rigidité du panneau.

**Zone plastique :** Suite à l'élasticité, la courbe atteint un palier où l'augmentation de la force est faible malgré un déplacement important. Cela correspond à un effondrement progressif des cellules de l'âme en liège et/ou à un écrasement local des peaux. Cette zone est associée à une absorption d'énergie significative par déformation plastique.

**Zone de densification :** Pour de grandes déformations, la courbe montre une montée rapide de la force, car les cellules sont entièrement compactées et le matériau devient densément solide, ce qui entraîne une forte résistance à l'écrasement supplémentaire.

### b) Influence du type de compression (longitudinale vs perpendiculaire)

- **Compression longitudinale (PS-JNT-L, PS-JT-L) :** La rigidité et la force maximale sont inférieures à celles observées en compression perpendiculaire. La direction longitudinale sollicite moins favorablement la structure cellulaire du liège, avec un effondrement plus précoce et une densification plus rapide. Cela conduit à un comportement global plus souple et moins résistant.
- **Compression perpendiculaire (PS-JNT-P, PS-JT-P) :** Sous cette sollicitation, la force maximale et la rigidité sont généralement plus élevées. Cela s'explique par le fait que la compression est exercée dans le sens de croissance des cellules de liège, qui offre une meilleure résistance structurelle. Les panneaux montrent une zone élastique plus marquée et un plateau plus stable lors de l'effondrement des cellules.

### c) Influence du traitement alcalin des fibres de jute

Les panneaux avec fibres de jute traitées (PS-JT-L, PS-JT-P) montrent une meilleure performance mécanique que ceux avec fibres non traitées, pour les deux directions de compression. Cela se traduit par une rigidité plus élevée, une force maximale accrue et une meilleure résistance à la déformation.

Ce gain provient principalement d'une amélioration de l'interface fibre/matrice due au traitement alcalin qui élimine les composants hydrophiles des fibres, renforce la liaison avec la résine époxy, réduit la pénétration d'eau et limite les défauts ainsi que le délaminage.

Pour la compression perpendiculaire, les bénéfices du traitement sont plus marqués, soulignant l'importance d'un renfort efficace dans la direction principale de charge.

En compression longitudinale, bien que les effets soient plus modestes, le traitement alcalin confère néanmoins une meilleure tenue mécanique, notamment dans la zone élastique et le début de la zone plastique.

Les quatre courbes force-déplacement traduisent les interactions complexes entre la structure cellulaire du liège, la nature et le traitement des fibres de jute, ainsi que le type de sollicitation en compression. La compression perpendiculaire est dans tous les cas plus favorable pour la performance mécanique des panneaux sandwichs. Le traitement alcalin améliore les propriétés, confirmant son rôle clé dans la durabilité et la performance de ces matériaux écologiques. Cette amélioration contribue à retarder le début des phases plastiques et augmente les charges maximales supportées.

### III.2.2 Effet de vieillissement

La contrainte maximale  $\sigma_{\max}$  est calculée par la formule :

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{A}$$

Où

$F_{\max}$  : est la force maximale appliquée

$A$  : la surface de la section transversale.

Le module d'élasticité  $E$  est calculé à partir de la pente initiale de la courbe force-déplacement, par :

$$E = \frac{K \times L_0}{A}$$

Avec :

$K = \frac{\Delta F}{\Delta \delta}$  : la raideur,

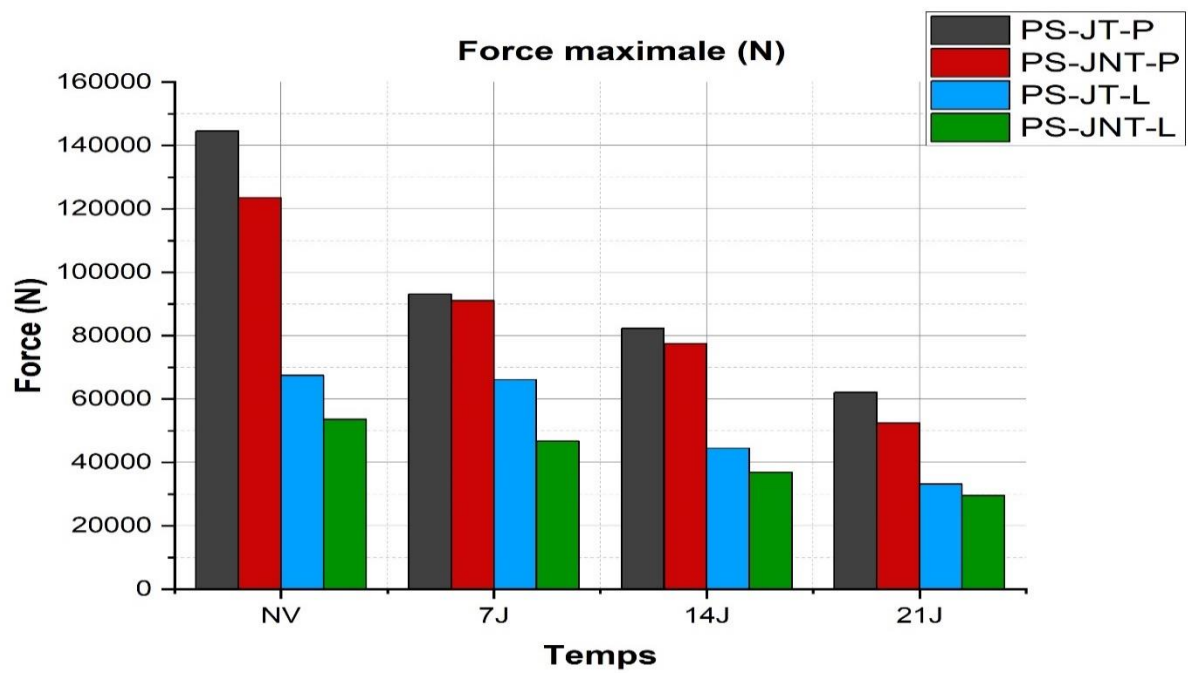
$L_0$  la longueur initiale de l'éprouvette dans la direction de compression, et  $A$  la surface de section.

Les résultats sont présentés dans le **Tableau III.4** ci-dessous.

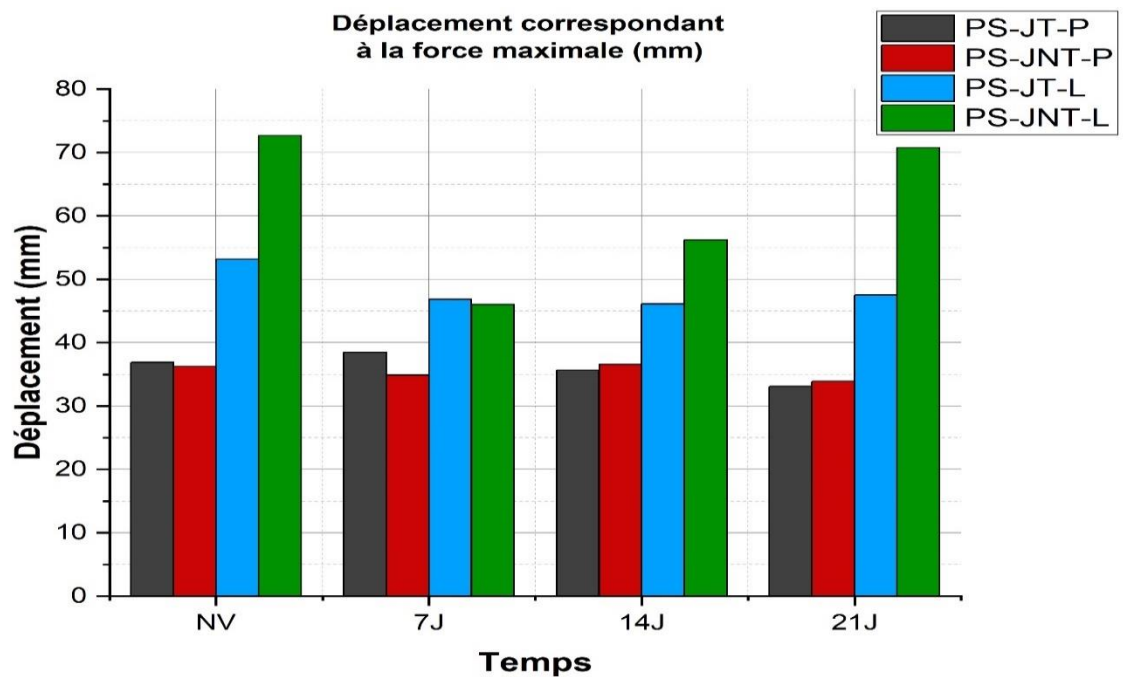
**Tableau III. 4:** Caractéristiques mécaniques en compression des panneaux sandwichs selon l'orientation de la sollicitation et la durée de vieillissement

Type de panneau sandwich	Force maximale (N)	Déplacement correspondant à la force maximale (mm)	Module d'élasticité (GPa)	Contrainte maximale (MPa)
PS-JT-NV-P	144507	36,8934	0,00558	57,8028
PS-JNT-NV-P	123541,8	36,23404	0,00543	49,41672
PS-JT-NV-L	67469,07	53,18003	0,00153	30,66775
PS-JNT-NV-L	53571,33	72,70158	0,00107	24,3506
PS-JT-V7J-P	93106,29	38,48122	0,00479	37,24252
PS-JNT-V7J-P	91108,56	34,91601	0,00325	36,44342
PS-JT-V7J-L	66097,97	46,84872	0,00112	30,04453
PS-JNT-V7J-L	46761,92	46,00843	0,00107	21,25541
PS-JT-V14J-P	82316,35	35,67998	0,00375	32,92654
PS-JNT-V14J-P	77509,47	36,55369	0,00299	31,00379
PS-JT-V14J-L	44489,03	46,1346	0,00203	20,22228
PS-JNT-V14J-L	36892,22	56,19681	0,00194	16,76919
PS-JT-V21J-P	62145,06	33,08002	0,00312	24,85802
PS-JNT-V21J-P	52383,39	33,88794	0,0029	20,95336
PS-JT-V21J-L	33156,31	47,545	0,00074	15,07105
PS-JNT-V21J-L	29566,93	70,79041	0,00065	13,43951

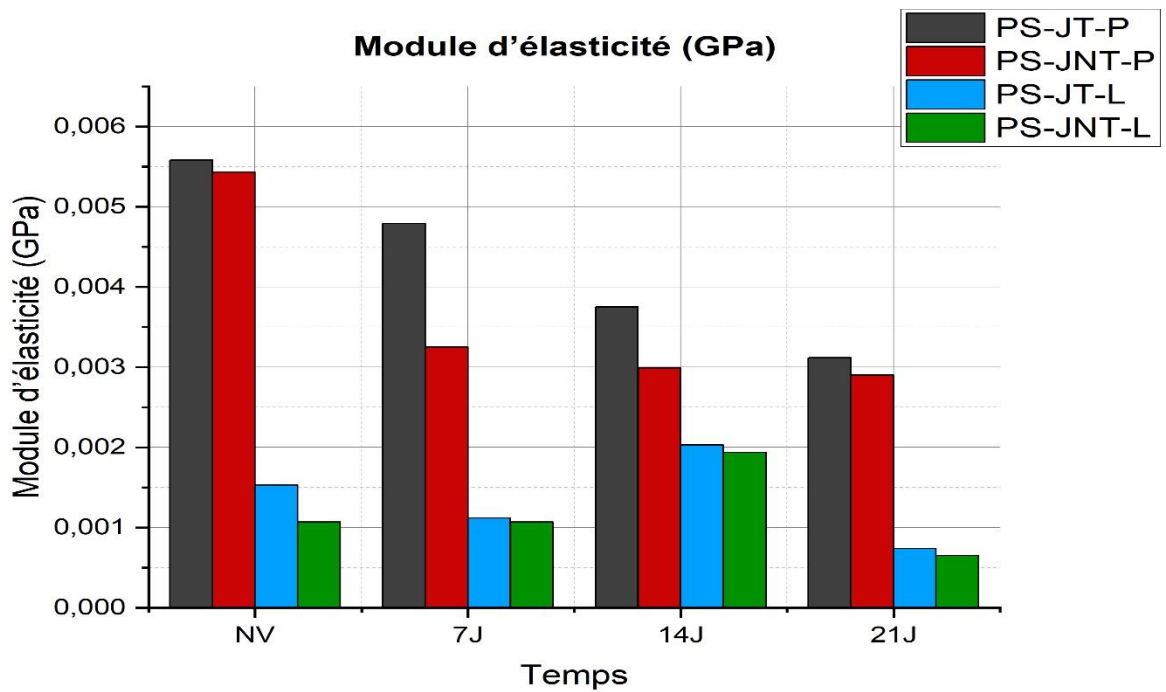
Les résultats du **Tableau III.4** sont présentés sous forme d'histogrammes dans les figures ci-dessous Figure **III.10**, **III.11**, **III.12** et **III.13** pour chaque durée de vieillissement (0, 7, 14 et 21 jours) concernant la force maximale, le déplacement correspondant à la force maximale, le module d'élasticité (rigidité) et la contrainte maximale.



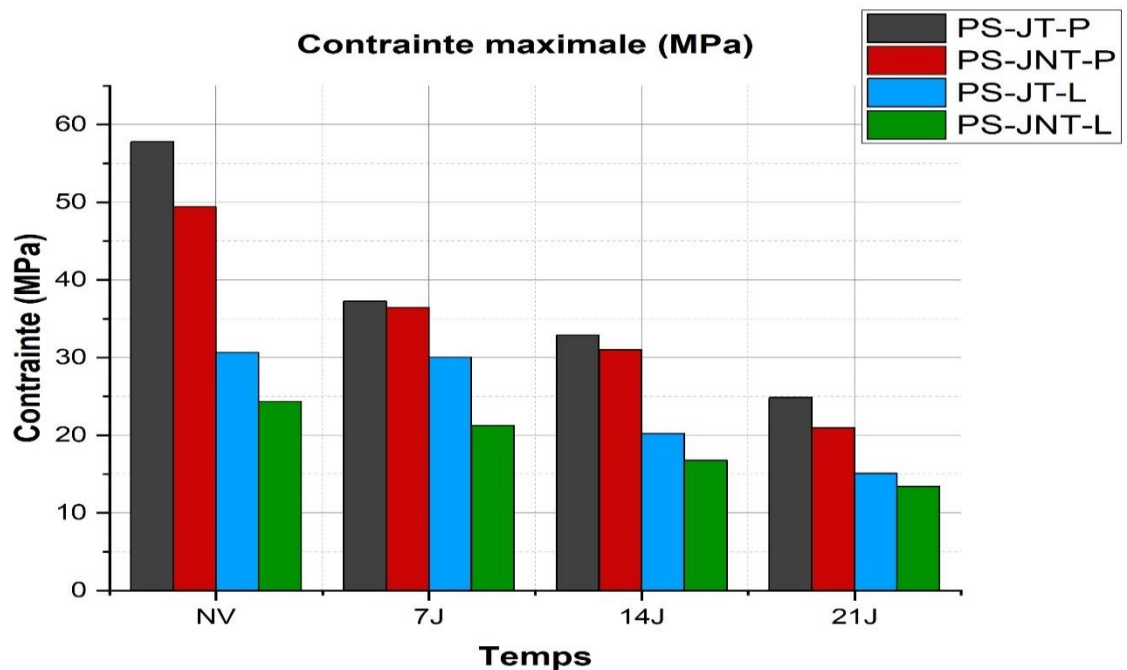
**Figure III. 10:** Évolution de la force maximale en compression longitudinale et perpendiculaire selon le temps de vieillissement des panneaux sandwichs à jute traitée et non traitée.



**Figure III. 11:** Variation du déplacement à la force maximale en compression longitudinale et perpendiculaire en fonction de la durée de vieillissement des panneaux sandwichs à jute traitée et non traitée.



**Figure III. 12:** Module d'élasticité des panneaux sandwichs en compression longitudinale et perpendiculaire suivant le temps de vieillissement des panneaux sandwichs à jute traitée et non traitée.



**Figure III. 13:** Contrainte maximale en compression longitudinale et perpendiculaire en fonction de la durée de vieillissement des panneaux sandwichs à jute traitée et non traitée.

## Interprétation

### a) Influence du temps de vieillissement sur la force maximale

La force maximale supportée par les panneaux sandwichs décroît de manière progressive et significative avec l'augmentation du temps d'immersion dans l'eau distillée. À l'état initial (0 jour), les panneaux sandwichs à jute traitée (**PS-JT**) présentent une force maximale plus élevée que les panneaux sandwichs à jute non traitée (**PS-JNT**), ce qui souligne l'efficacité du traitement alcalin des fibres de jute. Après 7, 14, puis 21 jours de vieillissement, la force maximale diminue, avec une perte encore plus accentuée pour les **PS-JNT**. Cela traduit une dégradation de la résistance mécanique principalement liée à l'absorption d'eau et à la dégradation de l'interface fibre/matrice.

### b) Effet sur le déplacement correspondant à la force maximale

Le déplacement maximal avant rupture diminue aussi avec le vieillissement, montrant une perte de ductilité du matériau. Les panneaux sandwichs à jute traitée (**PS-JT**) conservent un déplacement plus élevé que les panneaux sandwichs à jute non traitée (**PS-JNT**), indiquant que le traitement alcalin aide à mieux maintenir la capacité de déformation du panneau durant le vieillissement.

### c) Impact sur le module d'élasticité (rigidité)

Le module d'élasticité décroît de façon significative avec le vieillissement, révélant une perte de rigidité des panneaux. Cette baisse est plus prononcée dans les panneaux sandwichs à jute non traitée (**PS-JNT**), confirmant que le traitement alcalin permet de limiter la dégradation de la rigidité par une meilleure protection de l'interface et un moindre gonflement des fibres.

### d) Influence sur la contrainte maximale

La contrainte maximale suit la même tendance décroissante, témoignant de la perte de capacité à supporter les contraintes mécaniques avec le temps de vieillissement. La meilleure performance des panneaux sandwichs à jute non traitée (**PS-JNT**) souligne l'importance du traitement de surface pour la durabilité mécanique.

En conclusion, les histogrammes montrent une dégradation mécanique progressive en compression avec l'augmentation du temps de vieillissement par immersion dans l'eau distillée. Le

traitement alcalin des fibres de jute apparaît clairement comme un facteur clé pour diminuer cette dégradation, en améliorant l'adhésion fibre/matrice, en limitant l'absorption d'eau, et en participant au maintien des propriétés mécaniques des panneaux sandwichs. Les panneaux sandwichs à jute traitée conservent de meilleures performances mécaniques (force, déplacement, rigidité et contrainte) que les panneaux à jute non traitée à chaque stade de vieillissement.

Cette analyse souligne que vieillissement par immersion dans l'eau distillé affecte majoritairement l'interface et la matrice, fragilisant le composite, mais que des traitements adaptés peuvent significativement prolonger la durée de vie et la fiabilité des matériaux écologiques étudiés.

### **Les performances relatives des panneaux sandwichs en compression perpendiculaire et longitudinale**

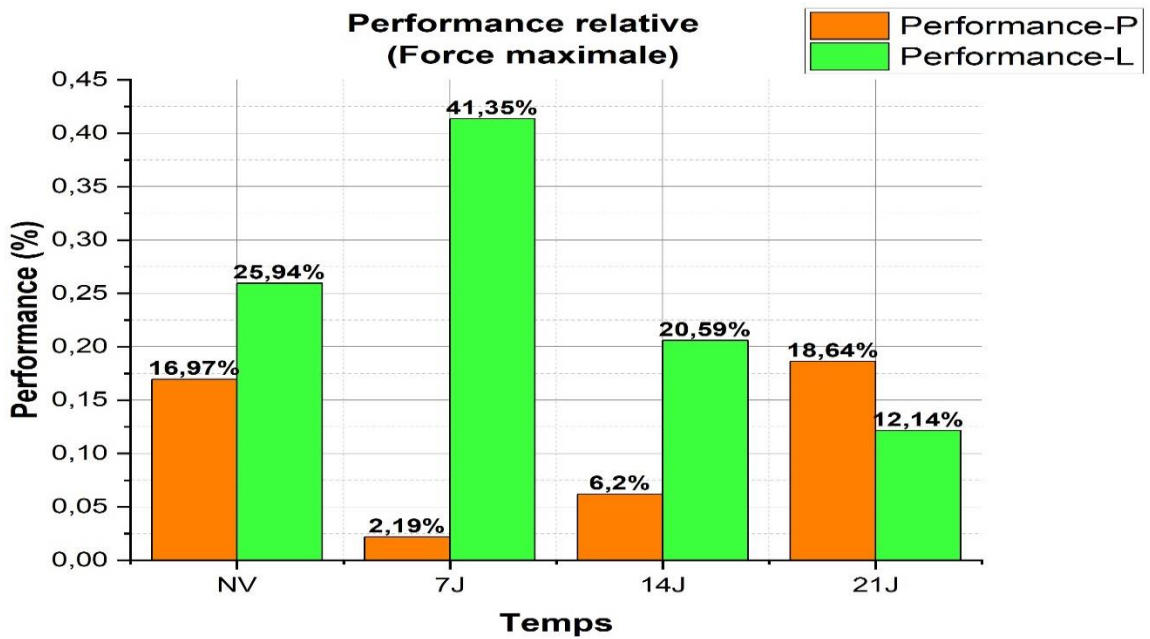
Les performances relatives des panneaux sandwichs à jute traitée (**PS-JT**) par rapport aux panneaux à jute non traitée (**PS-JNT**) sont calculées par le rapport des valeurs mesurées pour chaque paramètre mécanique (force maximale, contrainte maximale à la flexion) à différents temps de vieillissement (0, 7, 14, 21 jours). Cette performance relative **PR** est donnée par la formule :

$$PR = \frac{PT}{PNT}$$

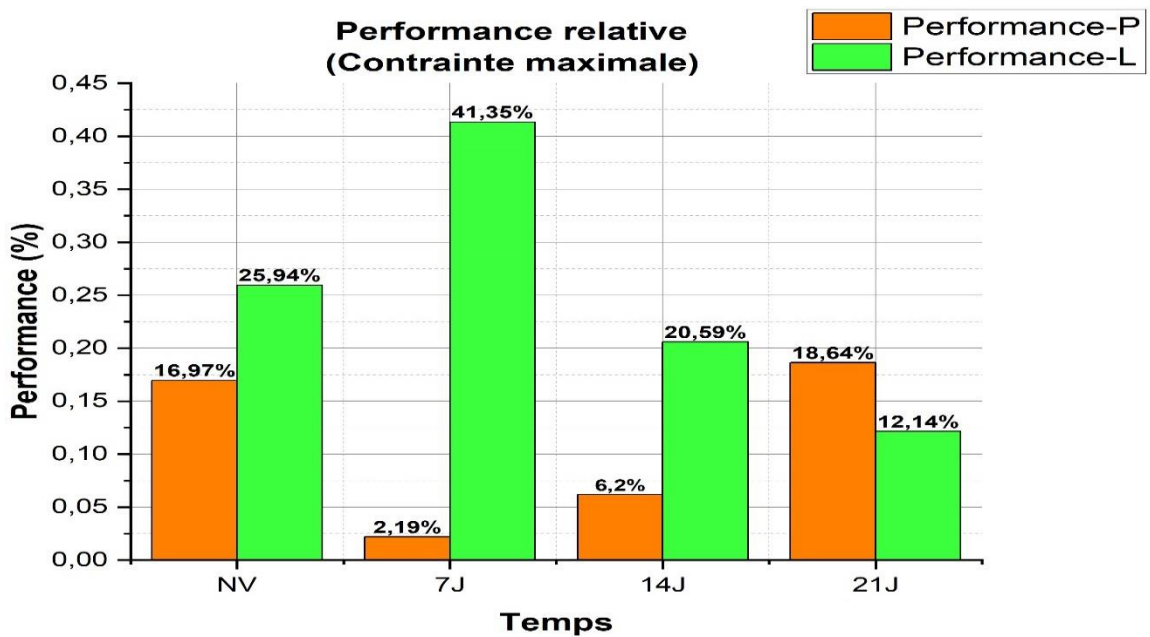
où

**PT** : (force maximale, contrainte maximale) du panneau sandwich à jute traitée (PS-JT).

**PNT** : (force maximale, contrainte maximale) du panneau sandwich à jute non traitée (PS-JNT).



**Figure III. 14:** Évaluation comparative des performances relatives (force maximale) en compression longitudinale et perpendiculaire en fonction de la durée de vieillissement



**Figure III. 15:** Évaluation comparative des performances relatives (contrainte maximale) en compression longitudinale et perpendiculaire en fonction de la durée de vieillissement

La performance relative en compression met en évidence l'efficacité du traitement alcalin des fibres de jute pour améliorer la durabilité et la résistance mécanique des panneaux sandwichs. Ce traitement réduit la sensibilité à l'absorption d'eau, protège l'interface fibre/matrice, et permet ainsi aux panneaux sandwichs de mieux résister aux sollicitations compressives sur toute la durée de vieillissement par immersion dans l'eau distillée étudiée.

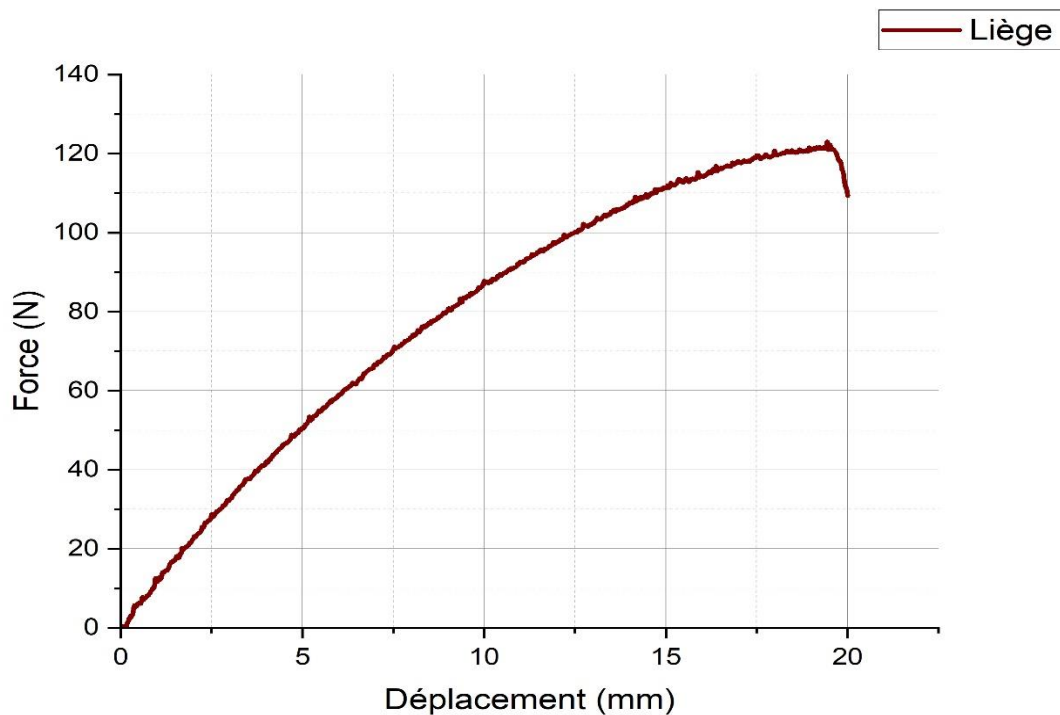
En résumé, la supériorité des panneaux sandwichs à jute traitée est notable et maintenue dans le temps, ce qui confirme la pertinence de ce traitement pour des applications structurelles durables de ces biocomposites en environnement humide.

### III.3 Test de flexion à trois points

#### III.3.1 Comportement en flexion à trois points des constituants

##### III.3.1.1 L'âme : Le liège seul

La **Figure III.16** représente la courbe force-déplacement obtenue lors du test de flexion trois points sur des échantillons de liège seul



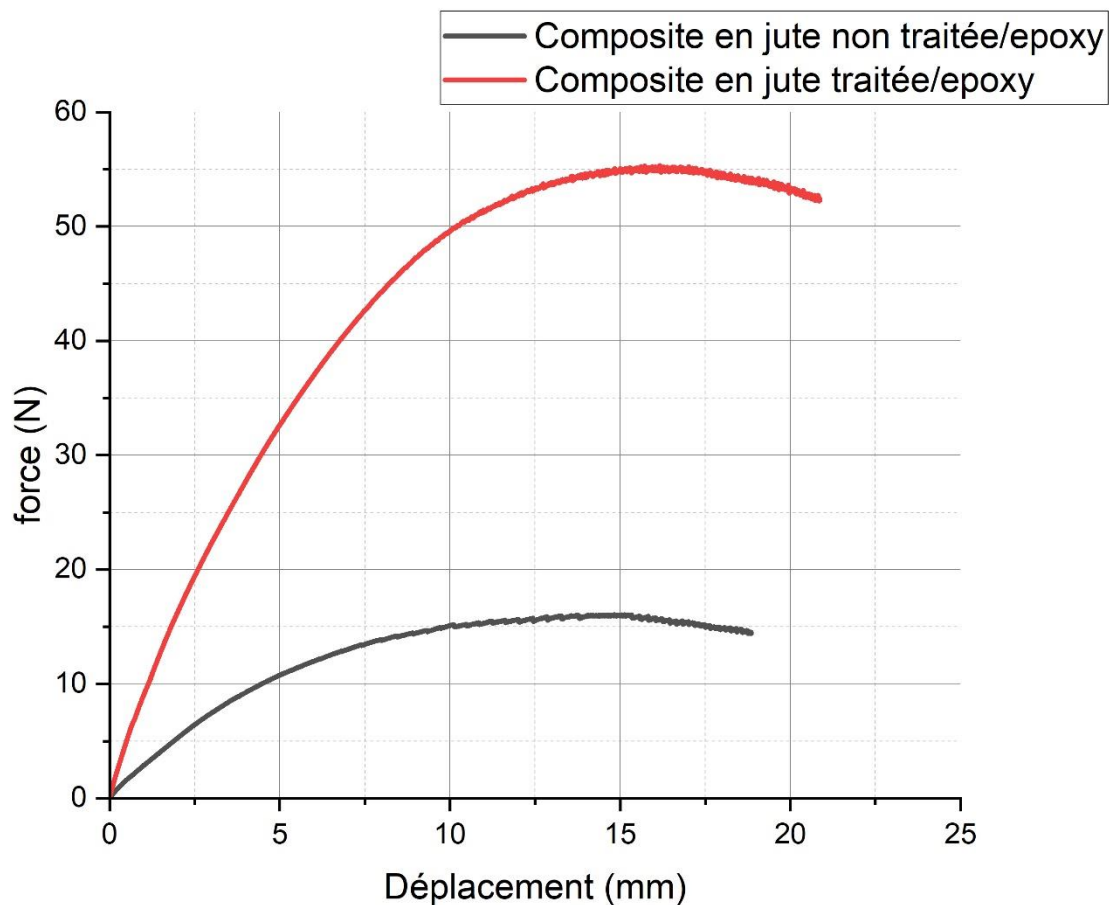
**Figure III. 16:** Courbe force –déplacement en flexion à trois points des éprouvettes de liège seul.

## Interprétation

Le liège, utilisé comme âme dans les panneaux sandwichs, présente un comportement typique des matériaux cellulaires en flexion à trois points. Il montre d'abord une phase élastique avec une déformation linéaire, suivie d'un plateau où les cellules s'effondrent progressivement, offrant une bonne absorption d'énergie. Enfin, à forte déformation, la densification des cellules entraîne une montée rapide de la résistance. Ce profil confère au liège légèreté, résilience et capacité d'amortissement, idéaux pour des applications structurales dans des panneaux sandwich

### III.3.1.2 La peau : Composite en jute/époxy

La **Figure III.17** illustre les courbes force-déplacement obtenues lors d'un essai de flexion à trois points réalisé sur des éprouvettes de peaux en composite jute/époxy.



**Figure III. 17:** Courbe force –déplacement en flexion à trois points des éprouvettes des peaux (composite jute/époxy)

---

**Interprétation**

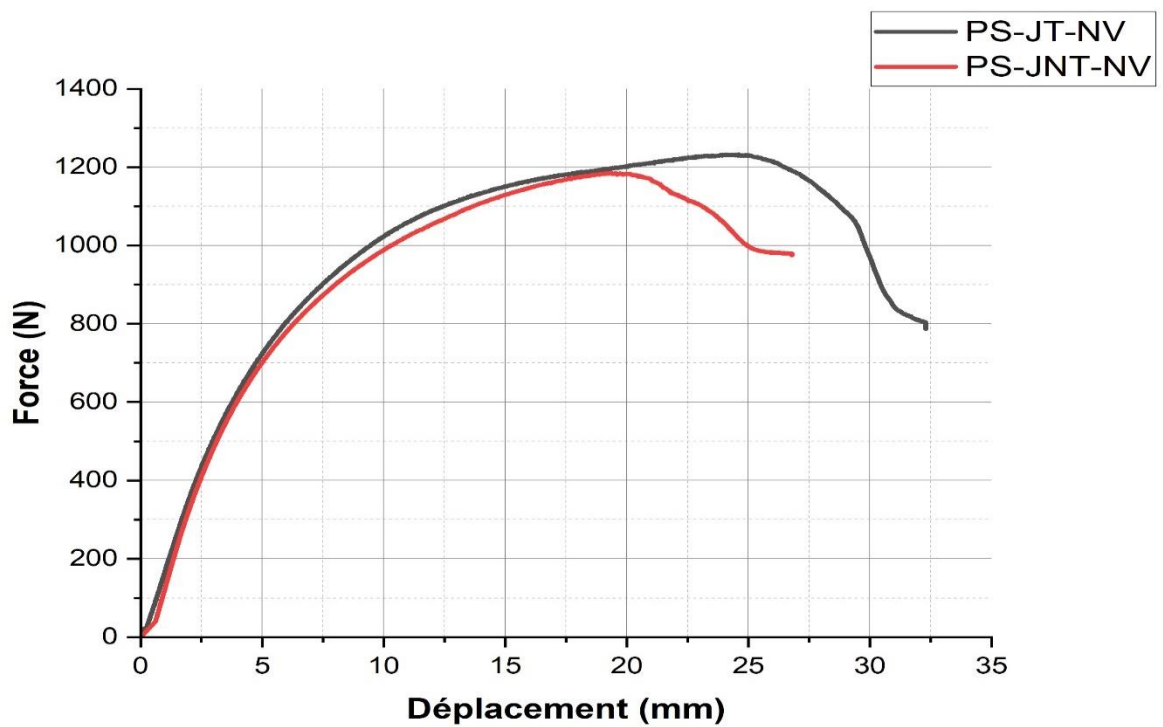
Les peaux en composite jute/époxy, testées en flexion à trois points, montrent une influence marquée du traitement sur leur comportement mécanique.

**La peau en jute non traitée** présente d'abord une phase élastique avec une déformation quasi linéaire, suivie d'un long plateau où le matériau s'endommage progressivement sous une charge faible et constante. Ce comportement indique une faible rigidité et une résistance limitée.

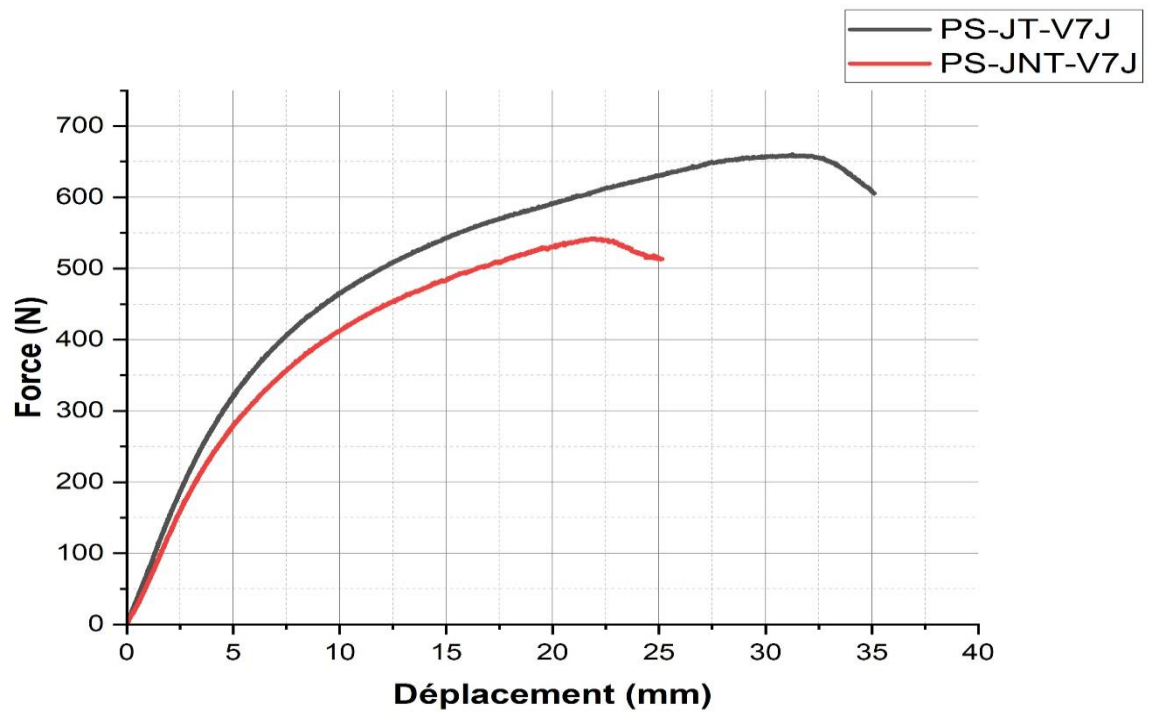
**À l'inverse, la peau en jute traitée** affiche une phase élastique beaucoup plus raide, démontrant une rigidité nettement supérieure. Elle atteint un pic de résistance très élevé avant d'amorcer une phase de descente progressive, signe d'un début d'endommagement contrôlé sans rupture fragile. Ce profil comparatif démontre que le traitement améliore de manière spectaculaire la rigidité et la résistance du composite. Cette amélioration confère au matériau traité des propriétés mécaniques de haute performance, le rendant apte à des applications structurelles exigeantes où la capacité à supporter des charges élevées est primordiale.

**III.3.2 Effet de traitement**

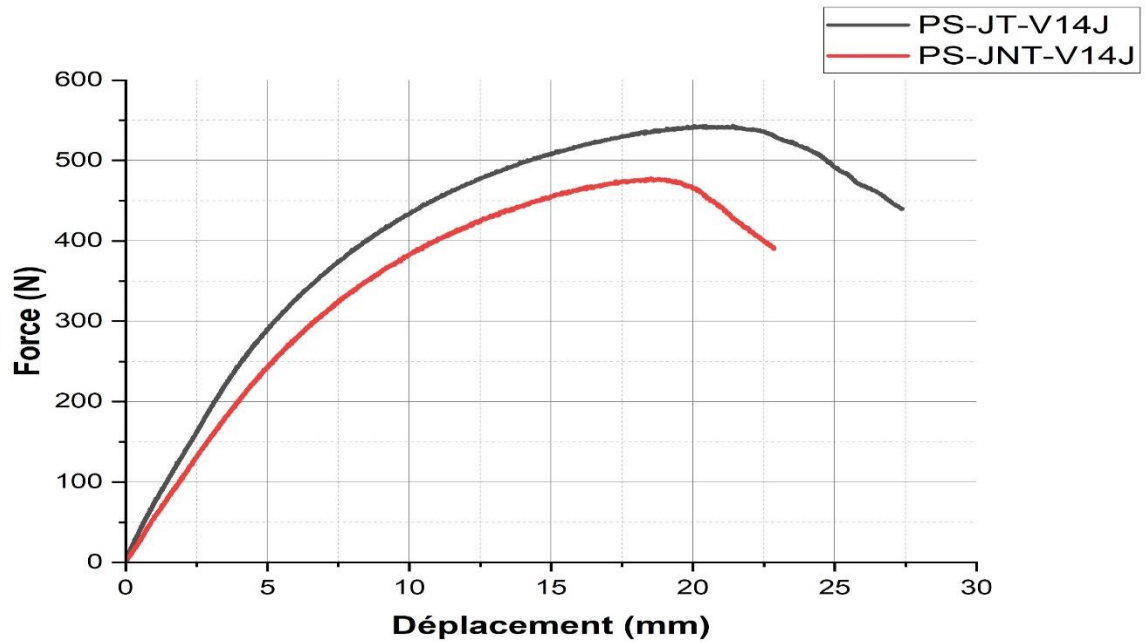
**Figure III.18, III.19, III.20 et III.21** ci-dessus représentent les courbes force-déplacement obtenues lors des essais de flexion à trois points sur les panneaux sandwichs à jute non traitée (PS-JNT) et les panneaux sandwichs à jute traitée (PS-JT), à l'état non vieilli (NV) ainsi qu'après vieillissement par immersion dans l'eau distillé de 7, 14 et 21 jours.



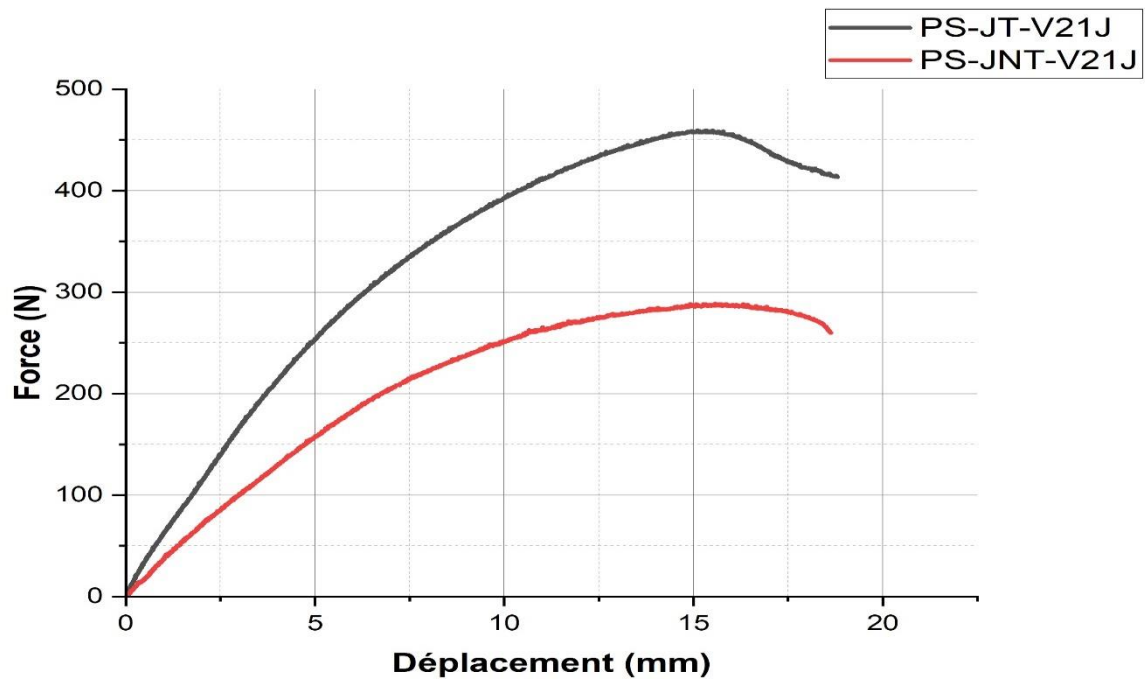
**Figure III. 18:** Courbe force-déplacement en flexion à trois points des panneaux sandwichs non vieillis à jute non traitée (PS-JNT-NV) et à jute traitée (PS-JT-NV)



**Figure III. 19:** Courbe force-déplacement en flexion à trois points des panneaux sandwichs à jute non traitée vieillis 7 jours (PS-JNT-V7J) et à jute traitée (PS-JT-V7J)



**Figure III. 20:** Courbe force-déplacement en flexion à trois points des panneaux sandwichs à jute non traitée vieilli 14 jours (PS-JNT-V14J et à jute traitée (PS-JT-V14J)



**Figure III. 21:** Courbe force-déplacement en flexion à trois points des panneaux sandwichs à jute non traitée vieilli 21 jours (PS-JNT-V21J et à jute traitée (PS-JT-V21J)

---

**Interprétation****a) À l'état initial (non vieilli)**

Les panneaux sandwichs à jute traitée non vieillis (**PS-JT-NV**) présentent une meilleure résistance mécanique en flexion que ceux à jute non traitée non vieillis (**PS-JNT-NV**). Cette supériorité se traduit par une force maximale plus élevée et un module de flexion accru, ce qui indique une rigidité et une capacité à supporter des charges plus importantes sans rupture. Ce gain est principalement attribué à une meilleure adhésion entre les fibres de jute et la matrice époxy, résultant du traitement alcalin qui améliore la compatibilité interfaciale et la dispersion des fibres.

**b) À l'état vieilli (7, 14 et 21 jours)**

Avec le vieillissement par immersion dans l'eau distillée, les performances mécaniques des deux types de panneaux diminuent progressivement. Cependant, à chaque durée de vieillissement étudiée (**7, 14 et 21 jours**), les panneaux sandwichs à jute traitée conservent systématiquement de meilleures caractéristiques mécaniques que les panneaux sandwichs à jute traitée. Les courbes montrent une diminution moins accentuée de la force maximale et du module de flexion pour les panneaux sandwichs à jute traitée, soulignant que ce traitement protège en partie l'interface fibre/matrice contre la dégradation induite par la présence d'eau.

L'amélioration des performances mécaniques due au traitement alcalin est liée à la réduction de l'absorption d'eau par les fibres, ce qui limite le gonflement des fibres et la dégradation chimique aux interfaces. En réduisant ces effets délétères, le traitement alcalin permet une meilleure transmission des contraintes dans le composite et retarde les phénomènes de fissuration et de délaminage.

En conclusion, le traitement alcalin des fibres de jute s'avère être une stratégie efficace pour renforcer la durabilité des panneaux sandwich biosourcés, en améliorant significativement leur résistance en flexion avant vieillissement et en limitant la dégradation mécanique lors d'une exposition prolongée à des conditions hygrothermiques sévères. Cette approche accroît ainsi la viabilité de ces matériaux pour des applications durables où la résistance mécanique en milieu humide est un critère clé.

### III.3.3 Effet de vieillissement

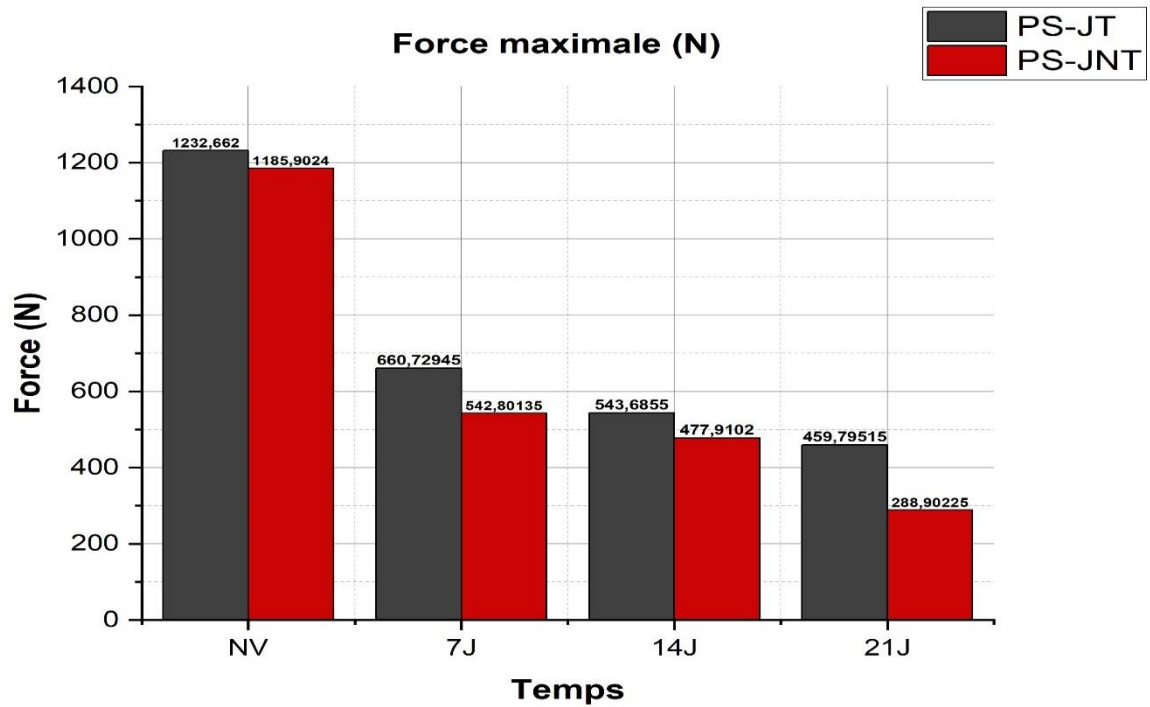
Le **Tableau III.5** présente les caractéristiques mécaniques obtenues lors des essais de flexion à trois points sur les panneaux sandwichs

Le module de flexion et la contrainte à la flexion sont calculés à partir des courbes contrainte-déformation présentes dans l'**annexe B**.

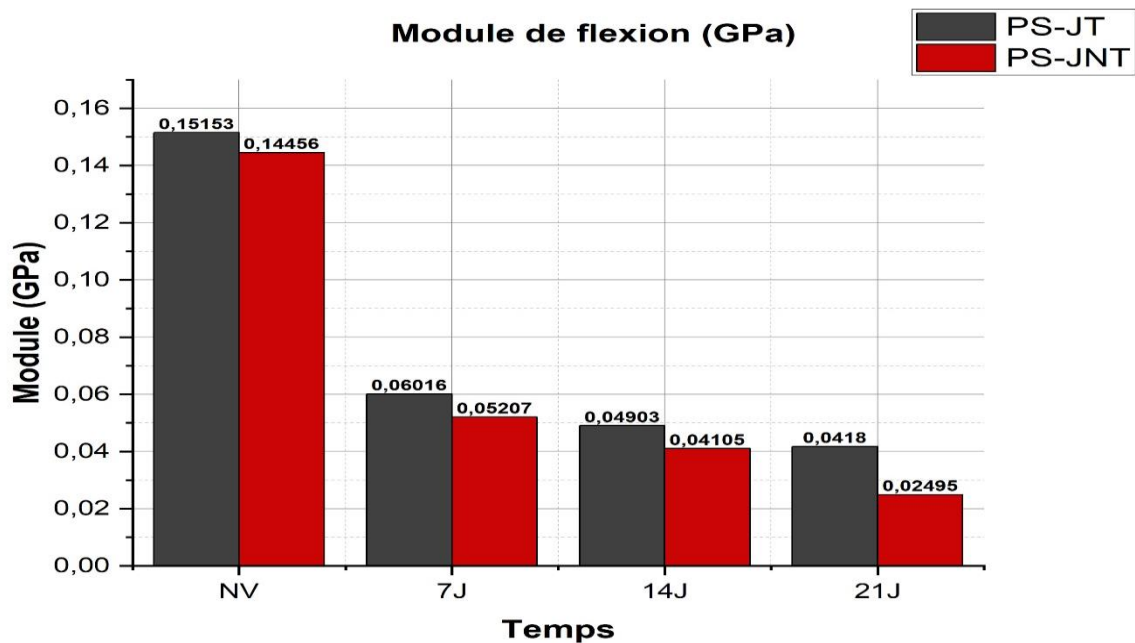
**Tableau III. 5:** Caractéristiques mécaniques en flexion des panneaux sandwichs selon le traitement des fibres et le vieillissement

Type de panneau sandwich	Force maximale (N)	Déplacement correspondant à la force maximale(mm)	Module de flexion (GPa)	Contrainte à la flexion (MPa)
PS-JT-NV	1232,662	24,58949	0,15153	3,47294
PS-JNT-NV	1185,9024	19,35356	0,14456	3,3412
PS-JT-V7J	660,72945	31,2673	0,06016	1,86156
PS-JNV-7J	542,80135	21,96491	0,05207	1,52931
PS-JT-V14J	543,6855	20,43638	0,04903	1,5318
PS-JNT-V14J	477,9102	18,52086	0,04105	1,34648
PS-JT-V21J	459,79515	15,10855	0,0418	1,29544
PS-JNT-V21J	288,90225	15,56878	0,02495	0,81396

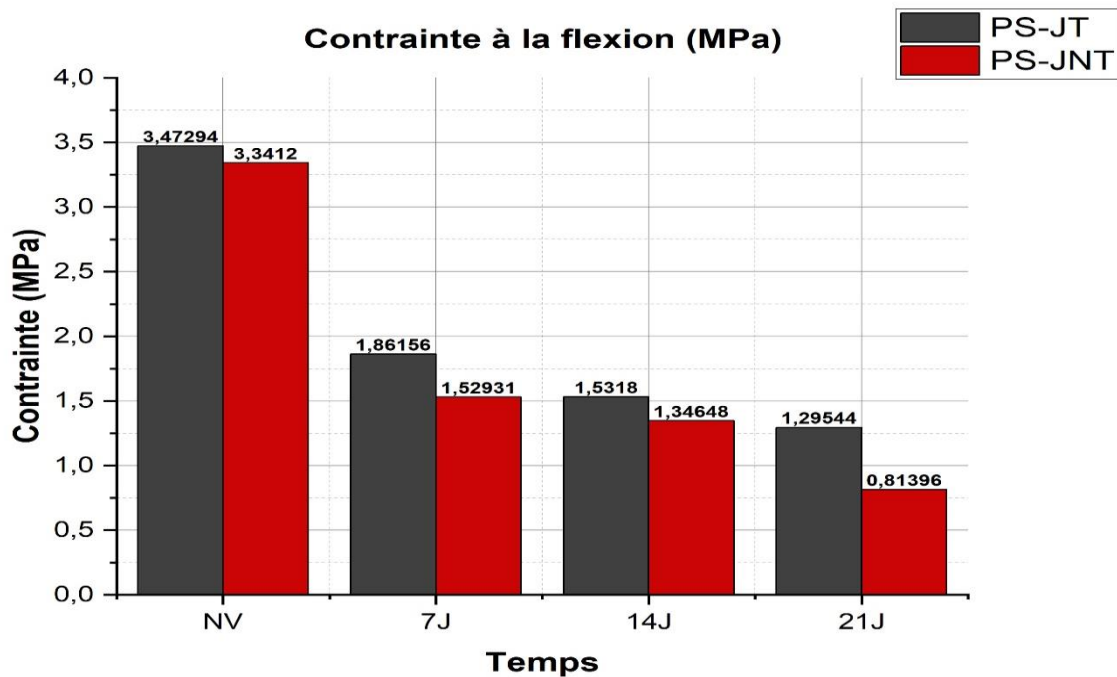
Les résultats du **Tableau III.5** sont présentés sous forme d'histogrammes dans les figures ci-dessous **Figure III.22, III.23 et III.24** pour chaque durée de vieillissement (0, 7, 14 et 21 jours) concernant la force maximale, le déplacement correspondant à la force maximale, le module d'élasticité (rigidité) et la contrainte maximale.



**Figure III. 22:** La force maximale en fonction du temps de vieillissement (0,7,14 et 21 jours) pour PS-JNT et PS-JT.



**Figure III. 23:** Module de flexion en fonction du temps de vieillissement (0,7,14 et 21 jours) pour PS-JNT et PS-JT.



**Figure III. 24:** Contrainte à la flexion en fonction du temps de vieillissement (0,7,14 et 21 jours) pour PS-JNT et PS-JT.

L'analyse des résultats des essais de flexion à trois points montre une dégradation progressive des performances mécaniques des panneaux sandwichs sous vieillissement par immersion dans l'eau distillé, avec des différences notables entre les panneaux sandwichs avec fibres de jute traitées et les panneaux sandwichs avec fibres de jute non traitées.

La force maximale des panneaux sandwichs à jute traitée (**PS-JT**) diminue de **1232,66 N** à **459,80 N** après **21 jours**, soit une baisse d'environ **62,7%**, tandis que les panneaux sandwichs à jute non traitée (**PS-JNT**) subit une réduction plus marquée de **1185,90 N** à **288,90 N**, soit **75,6%**.

Le module de flexion suit une tendance similaire, diminuant de **0,152 GPa** à **0,042 GPa** pour le **PS-JT (-72,4%)** et de **0,145 GPa** à **0,025 GPa** pour le **PS-JNT (-82,8%)**, ce qui indique une perte de rigidité plus importante sans traitement. La contrainte à la flexion chute également de **3,47 MPa** à **1,30 MPa (-62,5%)** pour les panneaux sandwichs à jute traitée, contre **3,34 MPa** à **0,81 MPa (-75,7%)** pour les panneaux sandwichs à jute non traitée.

Pour le déplacement à la force maximale, les panneaux sandwichs avec à jute traitée, montre une augmentation initiale de **24,59 mm** à **31,27 mm** après **7 jours**, traduisant une ductilité accrue due à une plastification temporaire de la matrice sous l'effet de l'humidité, avant de retomber

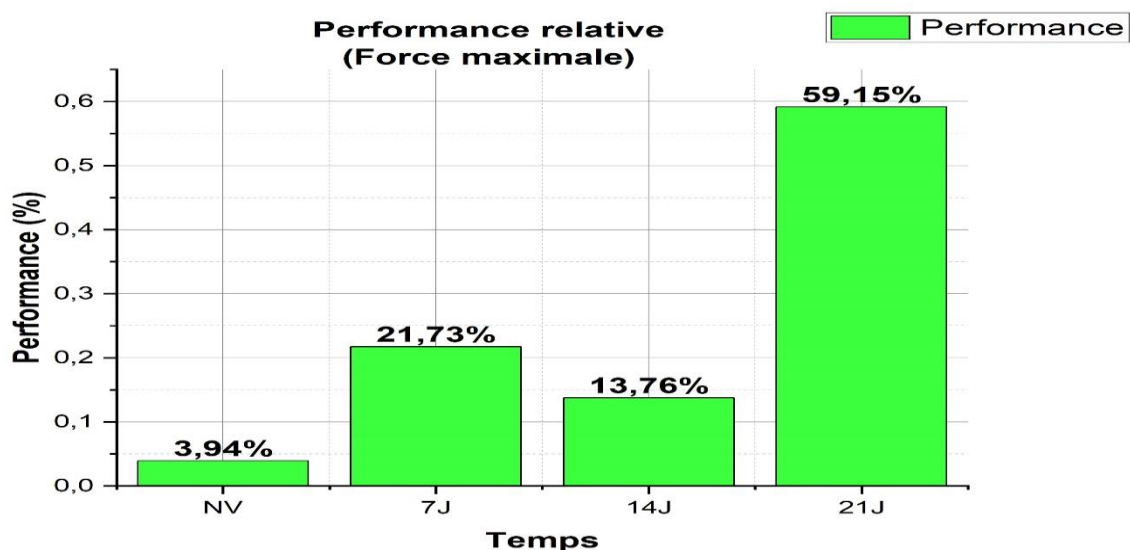
à **15,11 mm** après **21 jours**, tandis que les panneaux sandwichs à jute traitée suit une évolution similaire mais avec des valeurs inférieures, témoignant d'une moindre capacité de déformation avant rupture.

Ces résultats soulignent que le traitement alcalin des fibres de jute améliore significativement la durabilité mécanique des panneaux sandwichs en renforçant l'adhésion fibre/matrice, en limitant la pénétration d'eau et en protégeant l'interface contre la dégradation liée au vieillissement par immersion dans l'eau distillé. La diminution marquée des modules et contraintes à la flexion illustre l'affaiblissement progressif des peaux composites en jute/époxy ainsi que des interfaces âme/peaux. En somme, bien que le vieillissement impacte négativement les performances des panneaux biosourcés, le traitement alcalin demeure une stratégie efficace pour en améliorer la résistance dans le temps

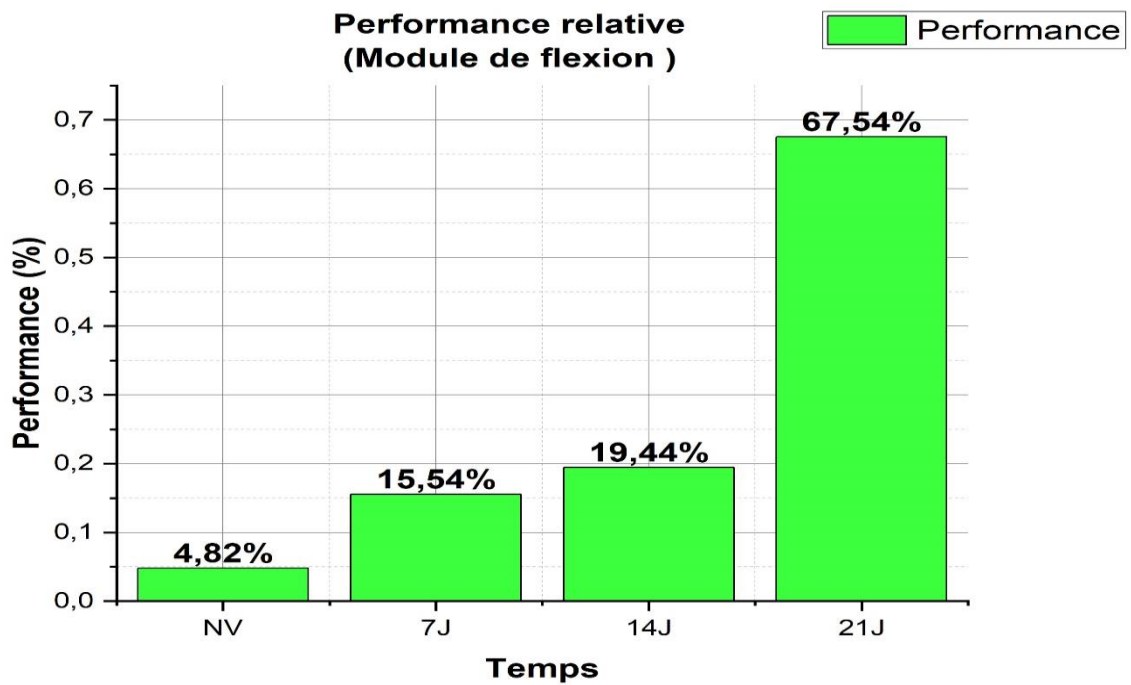
### Effet de traitement sur les performances mécanique

Les figures **III.25**, **III.26** et **III.27** présentent une série d'histogrammes évaluant l'efficacité du traitement alcalin des fibres de jute sur les propriétés mécaniques des panneaux sandwichs.

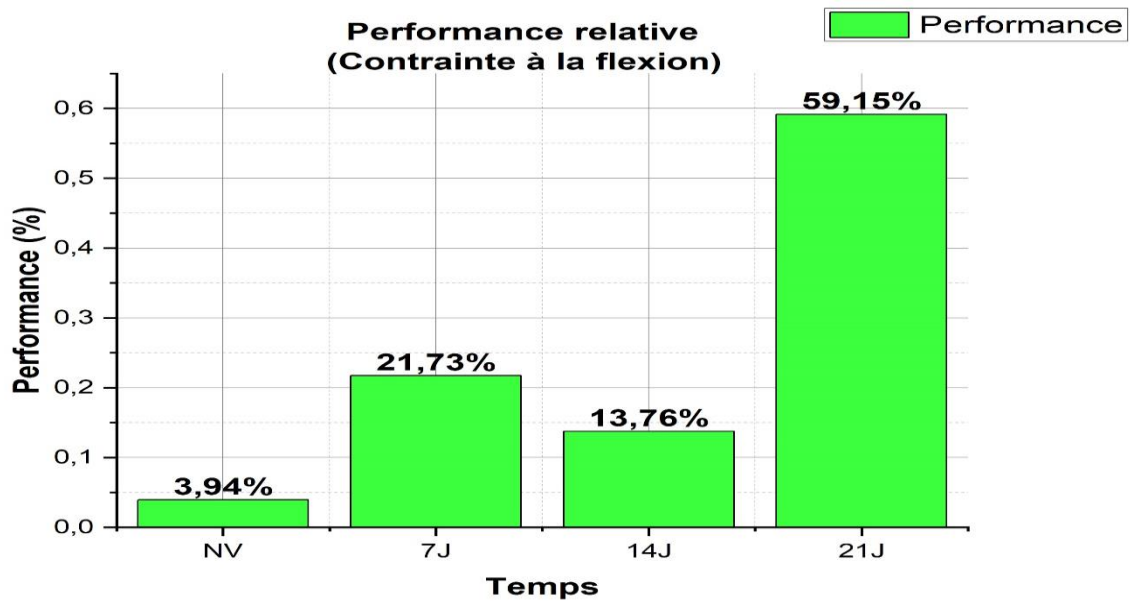
Ces graphiques illustrent la (performance relative), calculée en comparant les résultats des panneaux sandwichs à jute traitée (**PS-JT**) à ceux des panneaux sandwichs à jute non traitée (**PS-JNT**).



**Figure III. 25:** Évaluation comparative des performances relatives (force maximale) en flexion à trois points en fonction de la durée de vieillissement



**Figure III. 26:** Évaluation comparative des performances relatives (module de flexion) en flexion à trois points en fonction de la durée de vieillissement



**Figure III. 27:** Évaluation comparative des performances relatives (contrainte à la flexion) en flexion à trois points en fonction de la durée de vieillissement

L'analyse comparative des performances relatives, illustrée par les **figures III.26, III.27 et III.28**, démontre de manière concluante l'efficacité du traitement des fibres de jute sur les propriétés mécaniques des panneaux sandwichs, particulièrement sous l'effet du vieillissement par immersion dans l'eau distillé. À l'état non vieilli, le traitement apporte déjà une amélioration modeste de la force maximale, de la contrainte et de la rigidité (**environ 4-5 %**). Le traitement est donc un facteur crucial pour garantir la durabilité et la fiabilité des panneaux sandwichs dans des conditions d'usage exigeantes.

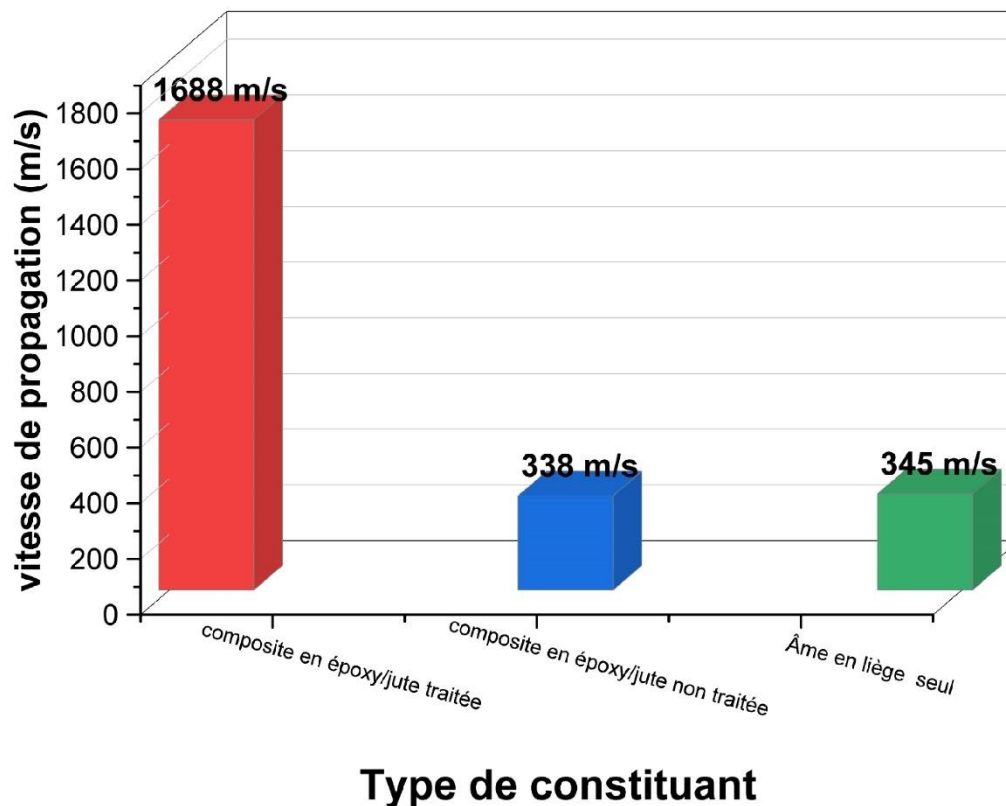
### III.4 Caractérisation acoustique par ultrasons

#### III.4.1 Analyse des constituants à l'état initial

L'étude des composants de base du panneau sandwich à l'état sec (**Jour 0**) est une étape fondamentale pour établir une référence de performance et isoler la contribution de chaque matériau. Les données de cette analyse, extraites des signaux bruts présentés en **Annexe C**, sont regroupées dans le **Tableau III.6**. Pour visualiser l'écart de performance entre les constituants, ces données sont présentées sous forme d'histogramme sur la **Figure III.28**.

**Tableau III. 6:** Vitesse de propagation des ultrasons (en m/s) pour les constituants à l'état initial (Jour 0)

Type de constituant	Vitesse de propagation (m/s)
Peau: Composite en époxy/ jute traitée	1688
Peau: Composite en époxy/ jute non traitée	338
Âme : Liège seul	345



**Figure III. 28:** Histogramme de vitesse de propagation des ultrasons dans les constituants à l'état initial (Jour 0).

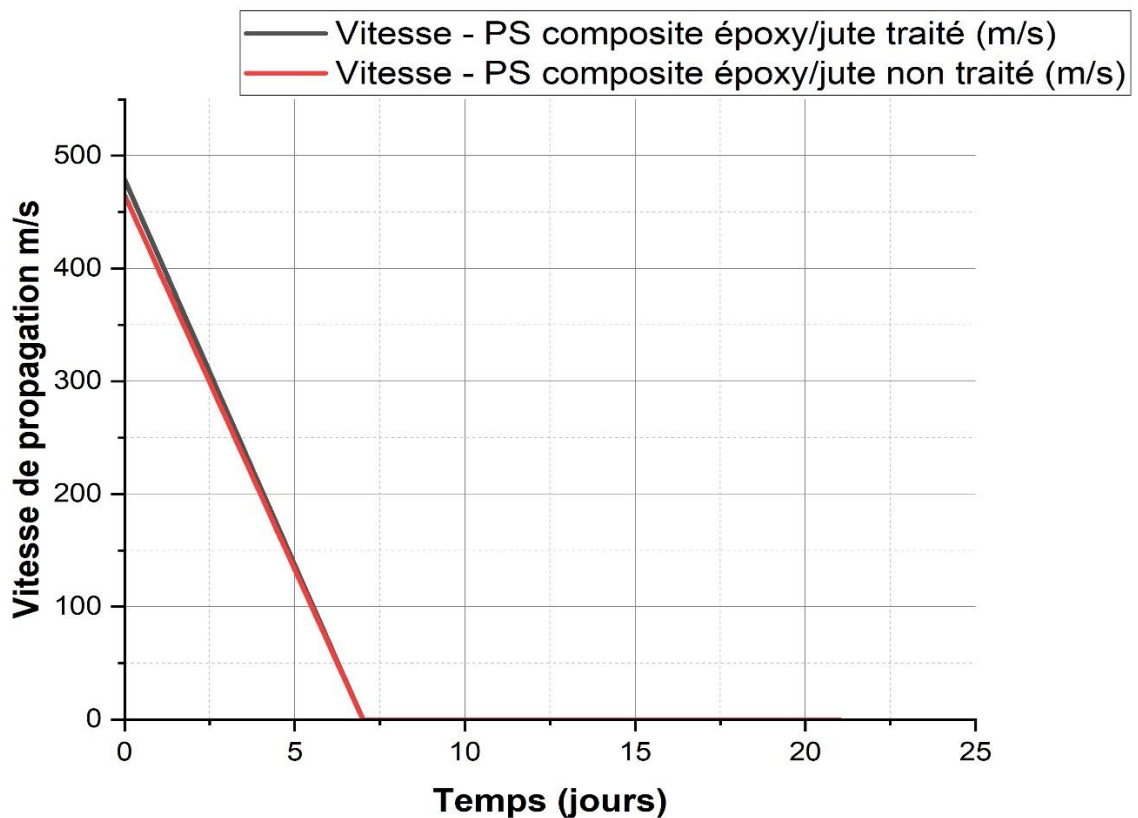
L'analyse comparative des données, illustrée par la **Figure III.28**, révèle des différences de comportement spectaculaires. La peau en composite époxy/jute traitée se distingue par une vitesse de propagation très élevée de **1688 m/s**, ce qui atteste de la haute qualité de l'interface fibre-matrice obtenue grâce au traitement alcalin. À l'inverse, l'âme en liège seul et la peau en composite époxy/jute non traitée présentent des vitesses très faibles et similaires **345 m/s** et **338 m/s** respectivement (**Tableau III.6**).

#### III.4.2 Analyse de l'impact du vieillissement sur les panneaux sandwichs

L'évaluation des panneaux sandwichs assemblés au cours du vieillissement permet de comprendre le comportement de la structure globale face à l'humidité. Le **Tableau III. 7** montre l'évolution de la vitesse de propagation des ultrasons, dont la tendance est visualisée par les courbes de la **Figure III. 29**

**Tableau III. 7:** Évolution de la vitesse de propagation des ultrasons (en m/s) pour les panneaux sandwichs en fonction de temps du vieillissement.

Temps de vieillissement (jours)	Vitesse – panneaux sandwichs à jute traitée (m/s)	Vitesse – Panneaux sandwichs à jute non traitée (m/s)
0	479	465
7	0	0
14	0	0
21	0	0



**Figure III. 29:** Évolution de la vitesse de propagation des ultrasons dans les panneaux sandwichs en fonction de temps du vieillissement.

## Interprétation

L'impact du temps de vieillissement, tel que quantifié dans le **Tableau III.7** et illustré par la **Figure III.29**, est à la fois immédiat et radical. À l'état initial, les panneaux sandwichs à jute traitée (PS-JT) et à jute non traitée (PS-JNT) affichent des vitesses de **479 m/s** et **465 m/s** respectivement. Cependant, dès 7 jours d'immersion, la vitesse de propagation chute à **0 m/s** pour tous les panneaux sandwichs. Ce résultat signifie que le signal ultrasonore est complètement atténué, un phénomène attribuable à la saturation en eau de l'âme en liège qui devient acoustiquement opaque.

L'analyse acoustique offre un éclairage complémentaire et essentiel aux essais mécaniques. Elle démontre que les mécanismes de dégradation affectent différemment les propriétés des panneaux sandwichs. D'une part, la dégradation de la résistance mécanique est principalement gouvernée par la vulnérabilité des peaux en composite époxy/jute non traitée à l'humidité. D'autre part, la dégradation des propriétés acoustiques, comme le montre la chute de la vitesse à **0 m/s** est entièrement dominée par la saturation en eau de l'âme en liège.

## III.5 Conclusion

L'analyse expérimentale menée dans ce chapitre a permis de mettre en évidence l'influence notable du vieillissement par immersion dans l'eau distillé sur les performances mécaniques des panneaux sandwichs à âme en liège et peaux en composite jute/époxy. Les essais d'absorption d'eau, de compression, de flexion à trois points ainsi que la caractérisation ultrasonore ont montré une dégradation progressive des propriétés mécaniques au fur et à mesure de l'exposition à l'humidité.

Toutefois, l'application d'un traitement alcalin sur les fibres de jute s'est révélée déterminante. En modifiant la morphologie et la composition de surface des fibres, ce traitement améliore l'adhésion fibre/matrice, limite l'absorption d'eau et réduit la fragilisation de l'interface. Les résultats comparatifs démontrent ainsi que les panneaux sandwichs intégrant des fibres de jute traitée conservent des propriétés mécaniques nettement supérieures, aussi bien en compression qu'en flexion, après plusieurs cycles de vieillissement.

Ce chapitre met en évidence l'importance cruciale du renforcement interfacial pour la durabilité des biocomposites. L'optimisation du traitement des fibres constitue une voie prometteuse pour assurer la durabilité de ces structures dans des environnements agressifs.

## **Conclusion générale et perspectives**

## Conclusion générale et perspectives

Ce mémoire s'inscrit dans la problématique de la mise au point de matériaux composites biosourcés, combinant performance mécanique et respect des impératifs environnementaux. L'objectif principal était d'élaborer, fabriquer et caractériser des panneaux sandwichs constitués d'une âme en liège aggloméré et de peaux en composite jute/époxy, et d'évaluer leur durabilité sous vieillissement par immersion dans l'eau distillé.

Les principaux résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

- La faisabilité de la fabrication de panneaux sandwichs écologiques a été démontrée, en mettant en avant les avantages structurels du liège et du jute.
- Le vieillissement par immersion dans l'eau distillée à température ambiante, a confirmé la sensibilité des fibres naturelles et des interfaces aux conditions humides, entraînant une perte progressive de rigidité et de résistance.
- Le traitement alcalin des fibres de jute a montré une efficacité notable pour améliorer l'adhésion fibre/matrice, réduire l'absorption d'eau et maintenir de meilleures performances mécaniques après vieillissement.

Ces résultats confirment que l'intégration de fibres naturelles traitées dans les panneaux sandwichs ouvre des perspectives réelles pour des applications dans les secteurs du bâtiment, du transport et de l'industrie, en particulier lorsque les contraintes environnementales sont importantes.

Néanmoins, ce travail met également en lumière la nécessité de poursuivre les recherches, notamment dans les directions suivantes :

- Étudier l'apport de traitements hybrides ou de couplage avec des revêtements protecteurs afin de renforcer davantage la résistance à l'humidité.
- Explorer l'utilisation de matrices biosourcées pour substituer totalement les résines pétrosourcées et réduire l'empreinte environnementale globale.
- Développer des modèles prédictifs de durabilité permettant d'anticiper le comportement des biocomposites en conditions réelles de service.

En conclusion, ce travail démontre le potentiel technique et environnemental des panneaux sandwichs biosourcés à base de liège et de fibres de jute, tout en soulignant que leur industrialisation future passera nécessairement par l'optimisation des interfaces et l'amélioration de leur stabilité en conditions agressives.

## **Bibliographie**

---

---

## Bibliographie

- [1] Ludovic Freund, “Étude du vieillissement hygrothermique des composites renforcés de fibres naturelles : approche expérimentale et modélisation”, Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2018.
- [2] Jacques Lacoste et Sandrine Therias, “Vieillissement des matériaux polymères et des composites”, Société Chimique de France, 2015.
- [3] Dr A.BENHIZIA “Elaboration et caractérisation des matériaux composites”, Support de cours, UNIVERSITE BATNA 2.
- [4] El Hadi Saidane, “Etude de l’effet du vieillissement hygrothermique sur le comportement mécanique d’éco-composites à renfort hybride”, Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2015.
- [5] B. Mortaigne, “Vieillissement des composites - Mécanismes et méthodologie d’étude”, Techniques de l’Ingénieur, 2018. ».
- [6] Jacques Lacoste Sandrine Therias “Vieillissement des matériaux polymères et des composites”, Société Chimique de France, 2015.
- [7] A. Mir, B. Bezzazi, R. Zitoune, F. Collombet, “Caractérisation mécanique d’un panneau sandwich à âme en liège et peaux jute/époxy”, 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), 2011.
- [8] Karthik Ram RAMAKRISHNAN “Impact behaviour of sandwich composites with nanoparticle modied facesheets” Thèse de doctorat, l’École Nationale Supérieure d’Arts et Métiers, ParisTech, 2014.
- [9] Michael Berges, “Mécanismes de dégradation sous sollicitations hydrothermomécaniques de biocomposites et renforts en fibres végétales \_ application au développement de mobiliers urbains ultralégers et mobiles”, Université Bourgogne Franche-Comté, 2018.
- [10] Matthias Rouch, “Contribution à la compréhension des mécanismes de vieillissement hydrothermique de matériaux composites unidirectionnels polyester insaturé/fibre de lin”, ResearchGate, 2018.

- [11] N. Haddar, I. Ksouri, T. Kallel, et N. Mnif, “Effet du vieillissement hygrothermique sur les propriétés mécaniques du composite PA6/GF50”, *Polymer Composites*, vol. 35, n° 3, p. 501-508, , doi: 10.1002/pc.22688, 2014
- [12] AQIL MOUSA ALMUSAWI, “ Mise en Œuvre et Optimisation des Propriétés d’une Structure Sandwich en Matériaux Biosourcés (Fibre et Bois de Chanvre) avec une Matrice en Polystyrène Expandé pour le Bâtiment”, Thèse de doctorat , l’Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2017.
- [13] Philippe CASTAING “Vieillessement des matériaux composites verre-polyester sous contrainte en milieu marin”, Thèse de doctorat ,L’INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, 1992.
- [14] Arthur MONTI , Abderrahim EL MAHI , Laurent GUILLAUMAT et Zouhaier JENDLI, “Elaboration et étude d’une structure sandwich bio-sourcée. Des constituants à la structure ”, JNC 19 – Lyon - 2015
- [15] Do Thi V. V. “Matériaux composites fibres naturelles/polymère biodégradables ou non” Thèse de doctorat, Université de Grenoble, France, 2011.
- [16] Bouhank S. “Elaboration de matériaux composites PVC/fibres de Genêt d’Espagne: Formulations et caractérisations”, Thèse de doctorat, Université Ferhat ABBAS –Sétif 1-, 2009.
- [17] Fadel A, “Influence des diverses modifications du Genêt d’Espagne sur les propriétés mécaniques, rhéologiques et thermiques de composites à matrice thermoplastique”, Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas-Setif-1, 2014.
- [18] Augier L “Etude de l’élaboration de matériaux composites PVC/bois à partir de déchets de menuiserie : formulation, caractérisation, durabilité et recyclabilité”, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France, 2007.
- [19] Mijiyawa F. “formulation, caractérisation, modélisation et prévision du comportement thermomécanique des pièces plastiques et composites de fibres de bois: application aux engrenages” Thèse de doctorat en ingénierie (PH.D.), université du Québec à trois –rivières, 2017.
- [20] Borchani K.E “ Développement d’un composite à base d’un polymère biodégradable et de fibres extraites de la plante d’Alfa” Thèse de doctorat, Université de Lyon, France, 2016.

- [21] Ludovic FREUND, "Etude du vieillissement hygrothermique des composites renforcés de fibres naturelles : Approche expérimentale et modélisation", l'Université de Lorraine, 2018.
- [22] B. Meghlaoui, M. O. Ouali, et S. Hocine, "Effect Of Chemical Treatment Of Alfa Natural Fibers On The Mechanical Properties Of Polyethylene Matrix Composites "U.P.B. Sci. Bull. B, 81, 115 , 2019 .
- [23] B. Meghlaoui, "Elaboration et caractérisation d'un composite biodégradable a matrice polymère et renfort naturel", thèse de doctorat. Université Mouloud MAMMERI Tizi-Ouzou, 2020.
- [24] Maya Jacob John, Rajesh D. Anandjiwala "Recent Developments in Chemical Modification and Characterization of Natural Fiber-Reinforced Composites. Polymer composites", 187- 207, 2008
- [25] Kokta B.V., Maldas D., Daneault C., "Béland P.Composites of polyvinyl chloride-wood fibers. III: effect of silane as coupling agent " Journal of Vinyl and Additive Technology, Vol. 12, 1999, pp 146-153, 1999
- [26] J. Summerscales, " Tserki V., Panayiotou C., Zafeiropoulos N. E. A. study of the effect of acetylation and propionylation on the interface of natural fibre biodegradable composites, Advanced Composites Letters 14 ,2005, 65-71, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 36, n° 8, p. 1029, août 2005, doi: 10.1016/j.compositesa.2004.11.001.
- [27] Bledzki A. K., Gassan J, " Composites reinforced with cellulose based fibres. Progress in Polymer Science", vol. 24, 1999, 221-274, 1999.
- [28] Haddar, N, " Effet du vieillissement hygrothermique sur les propriétés mécaniques du composite" PA6/GF50, polymer and composites 2014.
- [29] Bessadok A , "Effect of Chemical Treatments of Alfa (Stipa Tenacissima) Fibres on Water-Sorption Properties",2007, Consulté le: 28 juillet 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026635380600159X>
- [30] " Fiche technique des plaques de liège aggloméré", Entreprise Boudjelida Liege (E.B.L) ,2025.

- [31] Arthur MONTI, “Élaboration et caractérisation d’une structure composite sandwich à base de constituants naturels”, thèse de doctorat, Université du Maine, 2016

## **Annexes**

## Annexe A : Norme ASTM D570 – Méthode d'essai standard pour l'absorption d'eau

### A.1 Principe de la méthode

Une éprouvette normalisée est séchée, pesée, puis immergée dans l'eau à température contrôlée. Après immersion pendant un temps défini, elle est retirée, essuyée et pesée à nouveau. L'absorption d'eau est exprimée en pourcentage de gain de masse par rapport à la masse initiale.

### A.2 Équipements requis

- Balance de précision  $\pm 0,001$  g
- Bain d'eau thermostaté à  $23 \pm 1$  °C (ou à 100 °C selon le type de matériau)
- Étuve pour le séchage des éprouvettes
- Chronomètre ou dispositif de suivi du temps
- Chiffons non pelucheux pour le séchage superficiel

### A.3 Procédure d'essai

1. Conditionner les éprouvettes à  $23 \pm 2$  °C et  $50 \pm 5$  % HR pendant 24 h minimum.
2. Sécher les éprouvettes dans une étuve à 50 °C jusqu'à masse constante.
3. Peser chaque éprouvette : masse initiale ( $M_1$ ).
4. Immerger complètement les éprouvettes dans l'eau à  $23 \pm 1$  °C pendant 24 h.
5. Retirer, essuyer rapidement et peser à nouveau : masse après immersion ( $M_2$ ).
6. Calculer l'absorption d'eau à l'aide de la formule ci-dessous.

### A.4 Calcul

L'absorption d'eau, exprimée en pourcentage, est calculée comme suit :

$$\text{Absorption d'eau (\%)} = ((M_2 - M_1) / M_1) \times 100$$

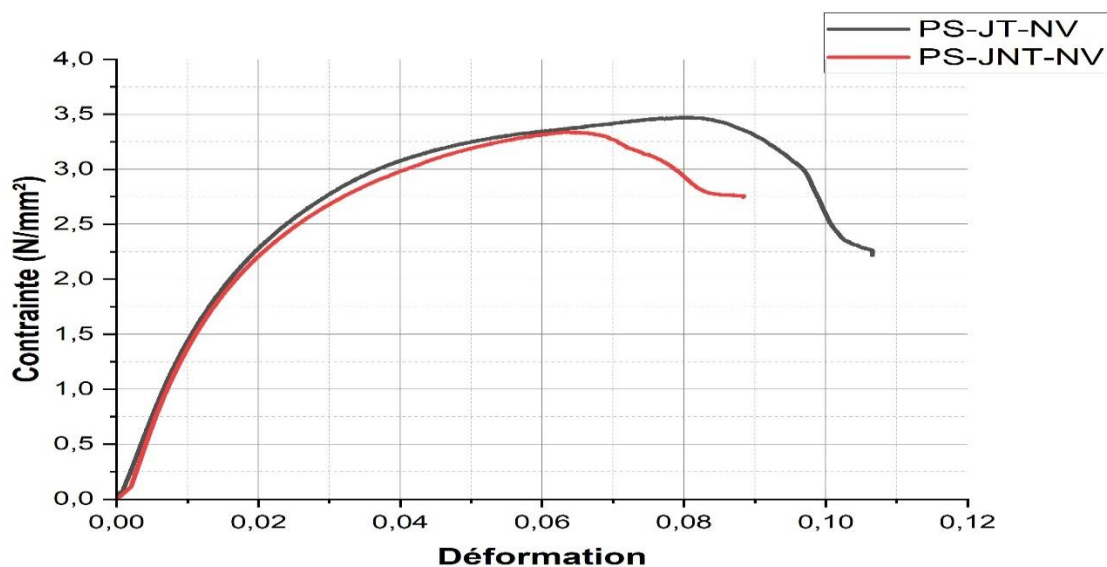
### Exemple de calcul :

$M_1$ (g)	$M_2$ (g)	Absorption d'eau (%)
10,000	10,218	2,18 %

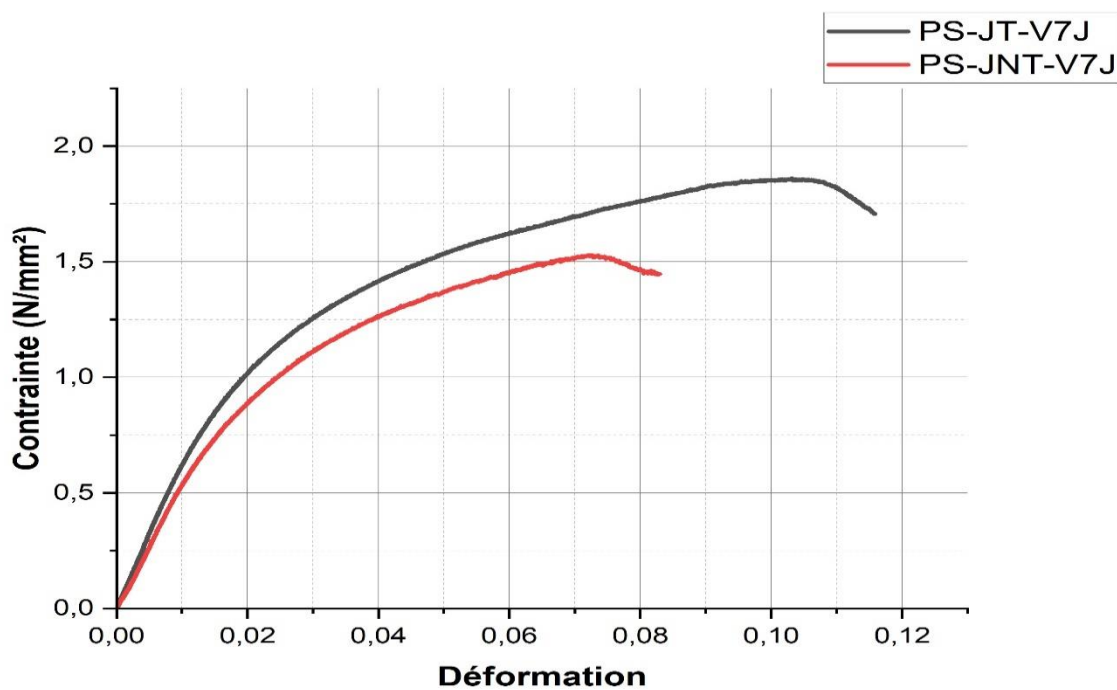
### A.5 Interprétation des résultats

Une absorption d'eau élevée indique une sensibilité du matériau à l'humidité et peut affecter ses propriétés mécaniques et dimensionnelles. Les polymères amorphes absorbent généralement plus d'eau que les polymères semi-cristallins

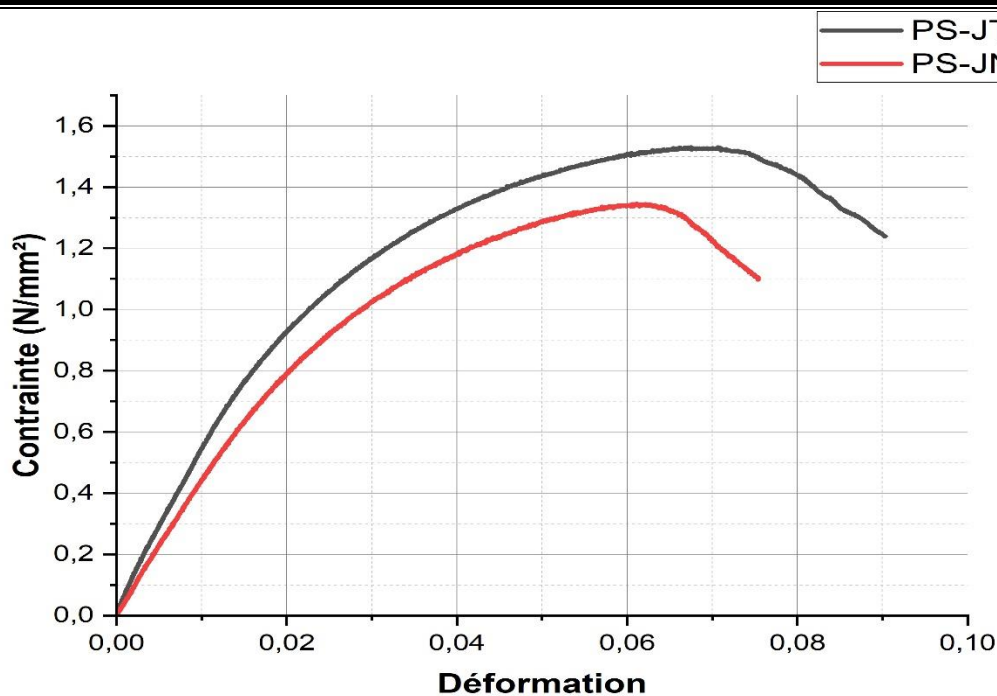
## Annexe B : Les courbes contrainte-déformation des essais de flexion trois points



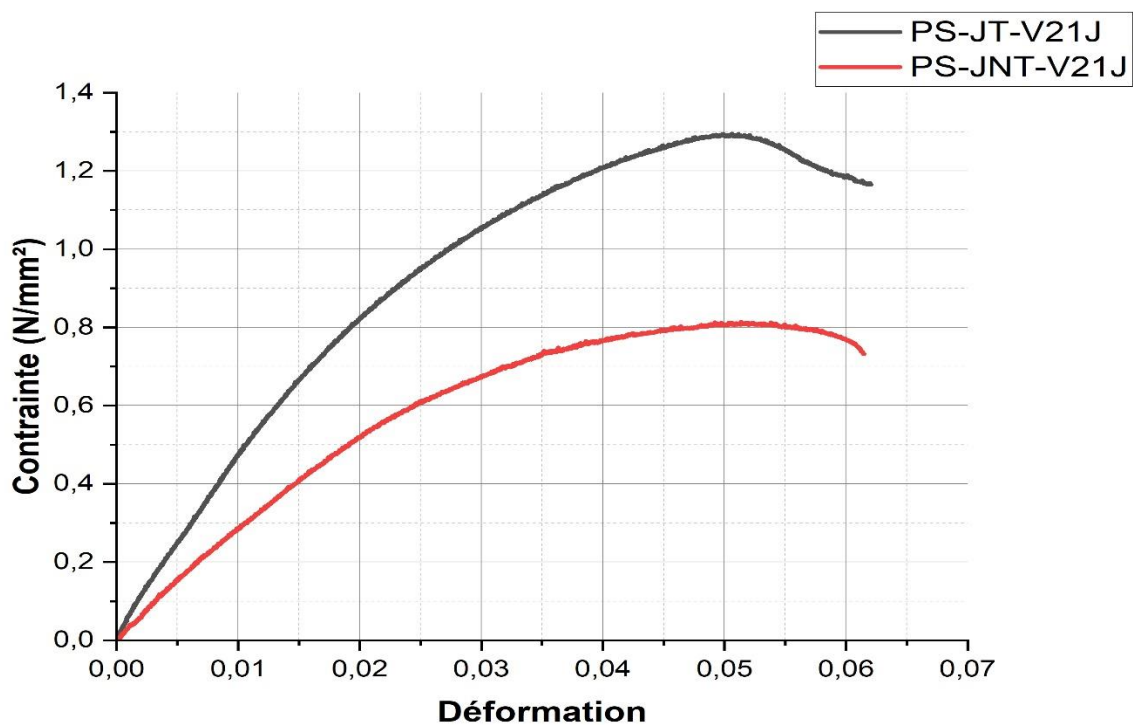
**Figure B.1 :** Courbe contrainte-déformation en flexion à trois points des panneaux sandwichs à jute non traitée- non vieilli (PS-JNT-NV) et à jute traitée (PS-JT-NV)



**Figure B.2 :** Courbe contrainte-déformation en flexion à trois points des panneaux sandwichs à jute non traitée -vieilli 7 jours (PS-JNT-V7J et à jute traitée (PS-JT-V7J)



**Figure B.3 :** Courbe contrainte-déformation en flexion à trois points des panneaux sandwichs à jute non traitée- vieilli 14 jours (PS-JNT-V14J) et à jute traitée (PS-JT-V14J)



**Figure B.4 :** Courbe contrainte-déformation en flexion à trois points des panneaux sandwichs à jute non traitée - vieilli 21 jours (PS-JNT-V21J) et à jute traitée (PS-JT-V21J)

## Annexe C : Résultats bruts des essais acoustiques par ultrasons

### C.1 - Essais sur les constituants à l'état initial

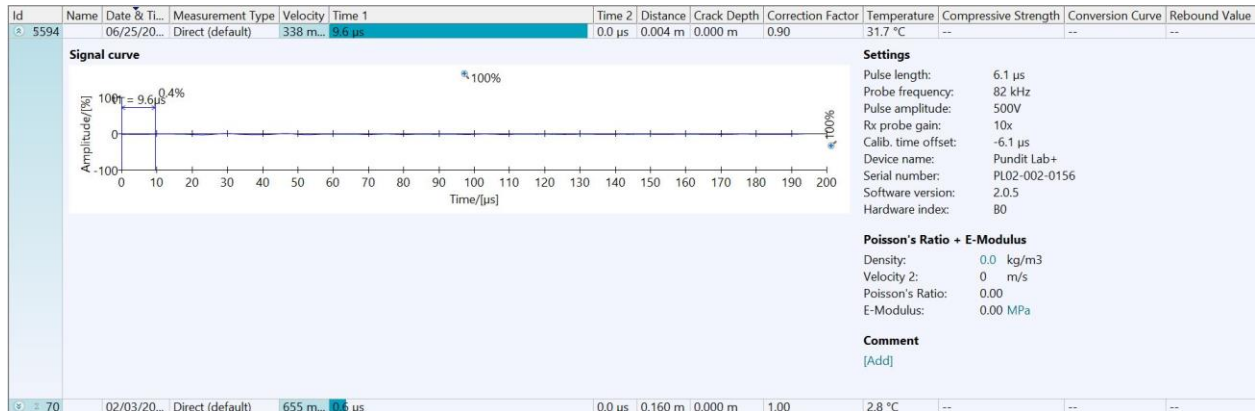


Figure C.1 : Signal ultrasonore de la peau en composite époxy/ jute non traitée.



Figure C.2 : Signal ultrasonore de la peau en composite époxy /jute traitée.

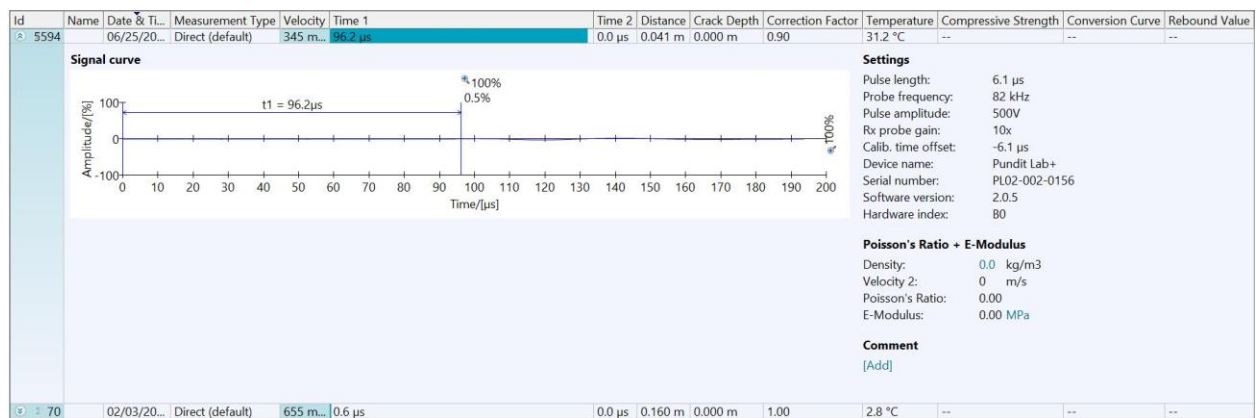
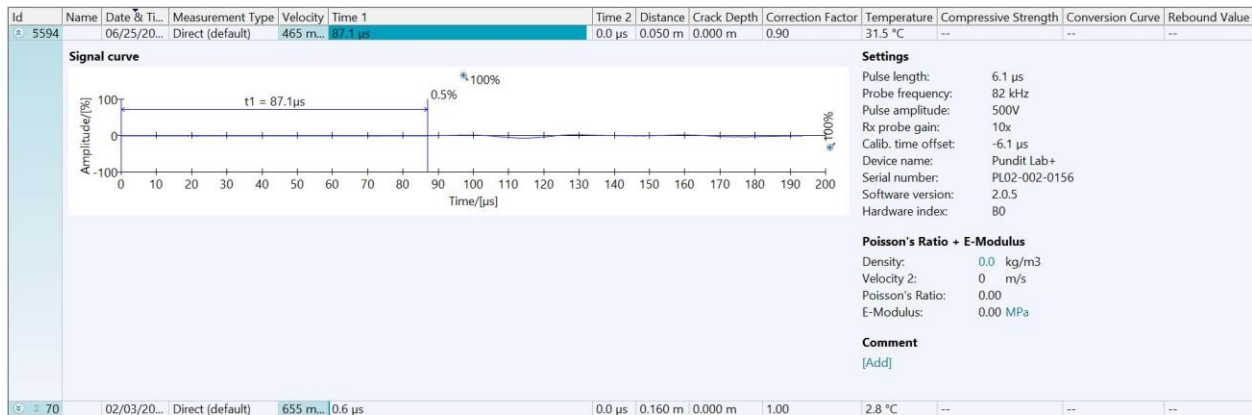
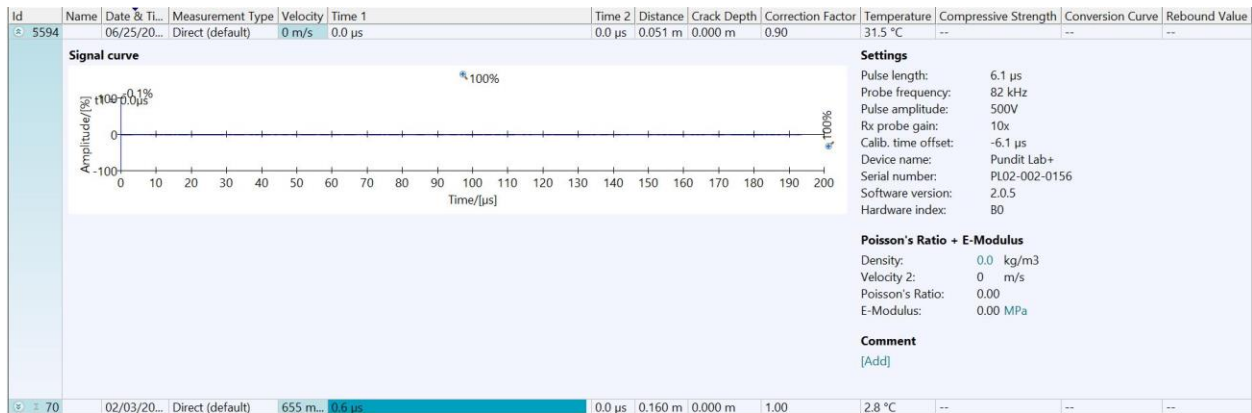


Figure C.3 : Signal ultrasonore du liège seul (Âme).

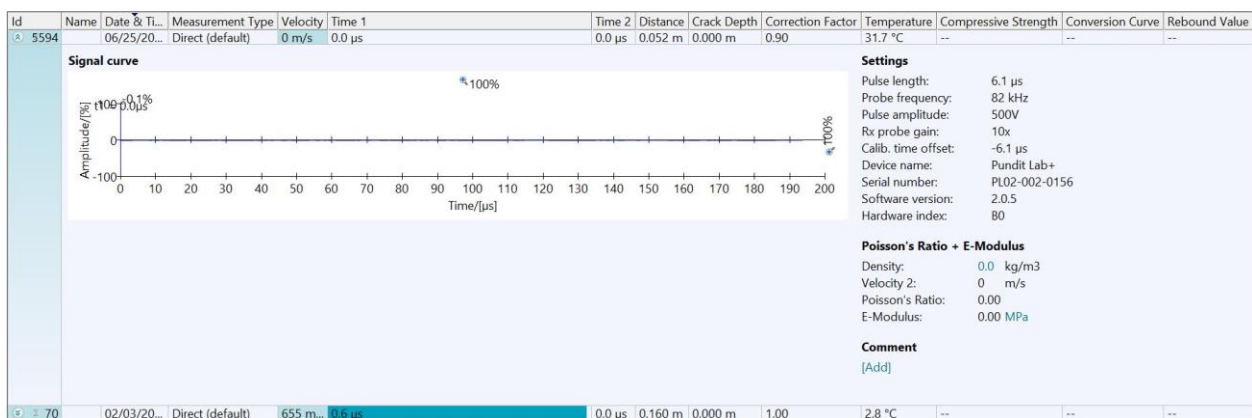
## C.2 - Essais sur les panneaux sandwichs à jute non traitée



**Figure C.4 :** Signal ultrasonore des panneaux sandwichs à jute non traitée à l'état initial (non vieilli).



**Figure C.5 :** Signal ultrasonore des panneaux sandwichs à jute non traitée vieilli pendant 7 jours.



**Figure C.6 :** Signal ultrasonore pour des panneaux sandwichs à jute non traitée vieilli pendant 14 jours.

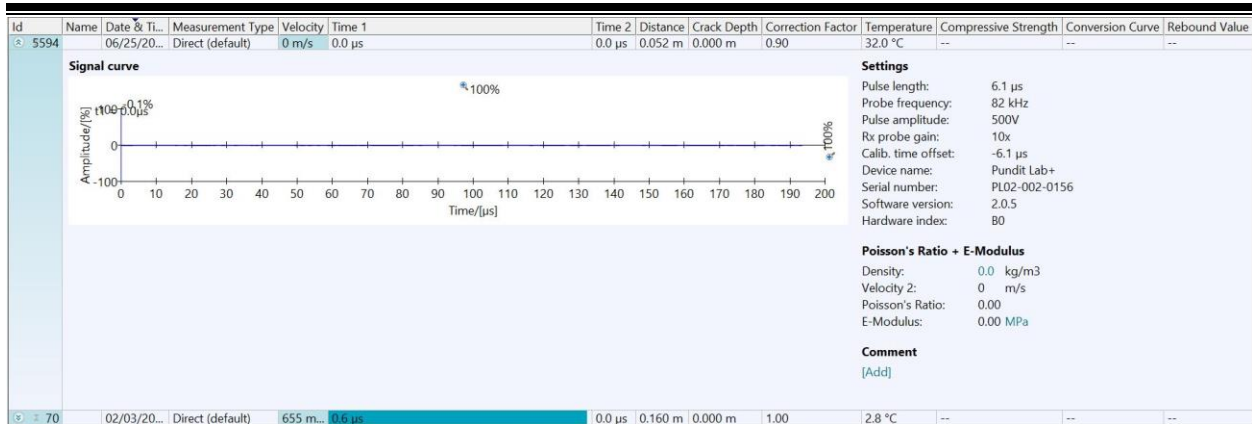


Figure C.7 : Signal ultrasonore pour des panneaux sandwichs à jute non traitée vieilli pendant 21 jours.

### C.3 - Essais sur les panneaux sandwichs à jute traitée

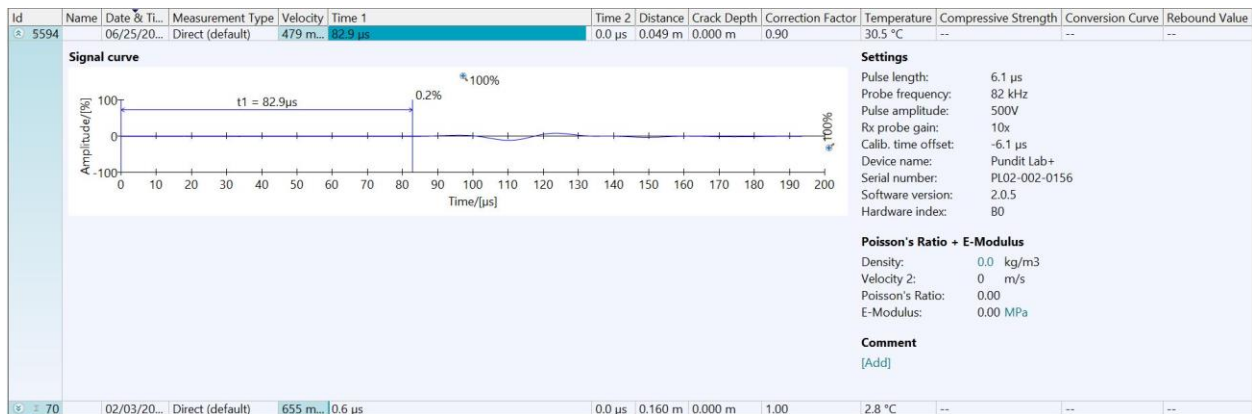


Figure C.8 : Signal ultrasonore des panneaux sandwichs à jute traitée à l'état initial (non vieilli).

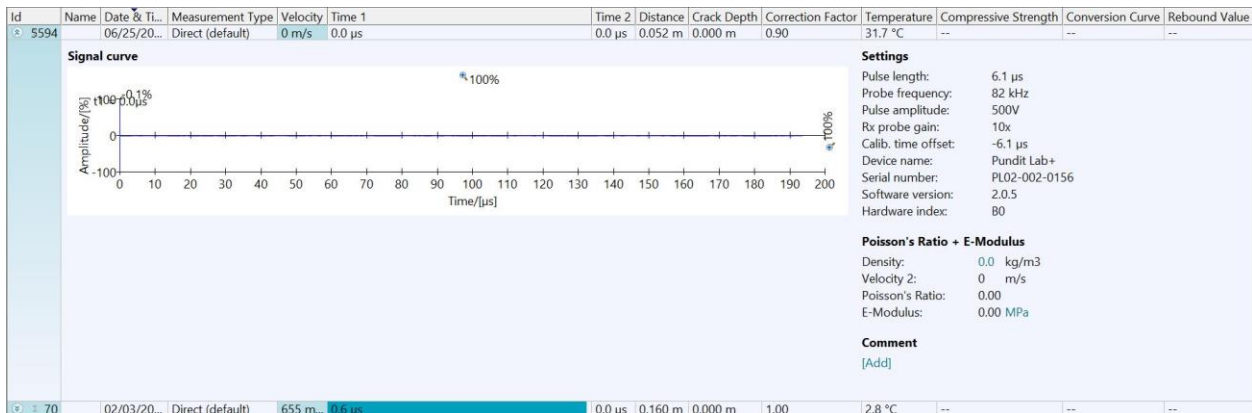


Figure C.9 : Signal ultrasonore pour des panneaux sandwichs à jute traitée vieilli pendant 7 jours.

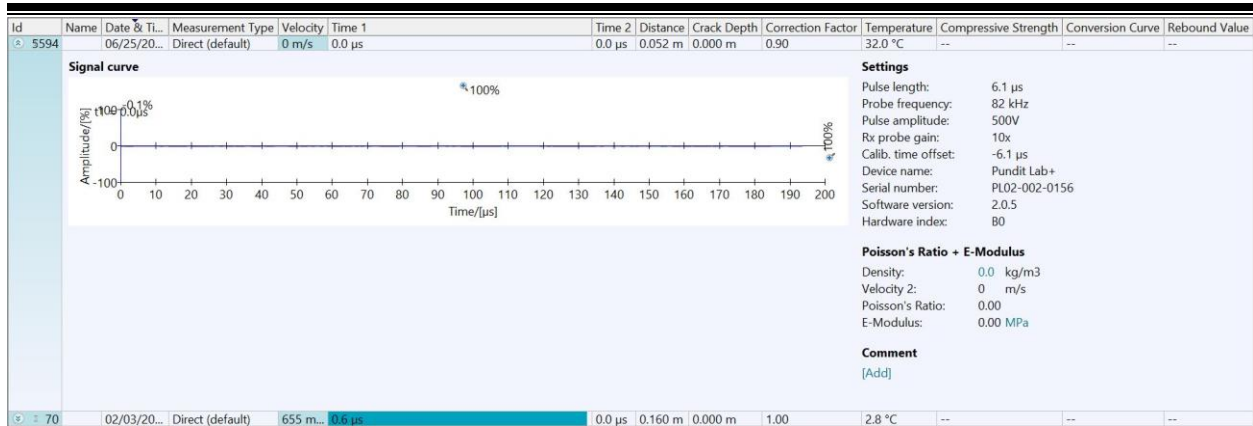


Figure C.10 : Signal ultrasonore pour des panneaux sandwichs à jute traitée vieilli pendant 14 jours.

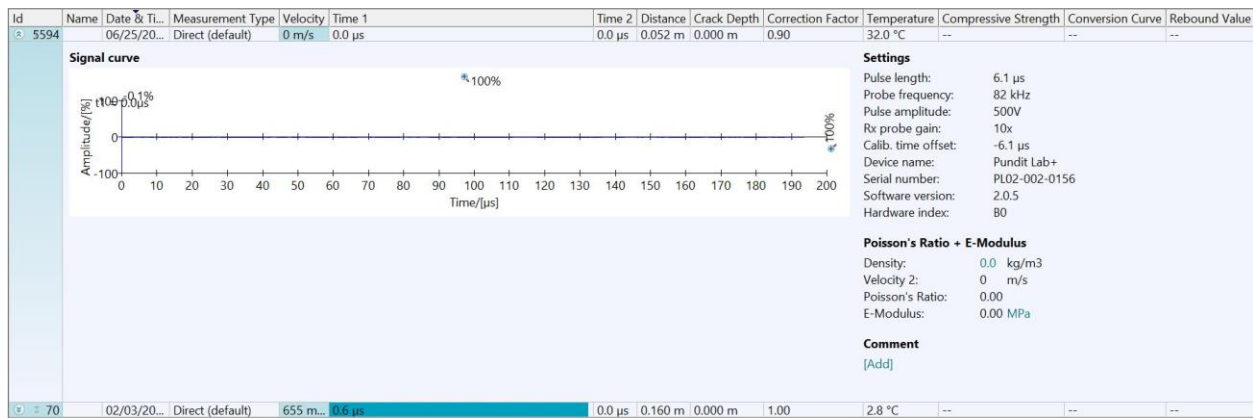


Figure C.11 : Signal ultrasonore pour des panneaux sandwichs à jute traitée vieilli pendant 21 jours.