

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARRA-BOUMERDES



Faculté des sciences de l'ingénieur

Mémoire de Magistère

Présenté par :

BOUZIT Fatima

En vue de l'obtention du diplôme de **MAGISTERE** en :

Filière : Sciences et Génie des Matériaux

Option : Physique et mécanique des matériaux

Élaboration et caractérisation mécanique, en statique et en fatigue, des panneaux sandwichs à base de renforts naturels

Devant le Jury composé de :

| | | | | |
|---------------------|------------------|------------|--------------|------------------|
| Mr BENMOUNAH | Abdelbaki | Pr | UMBB | President |
| Mr BEZZAZI | Boudjema | Pr | UMBB | Promoteur |
| Mr AZEM | Said | Pr | UMMTO | Membre |
| Mr MIR | Abdellah | MCA | UMBB | Membre |

Résumé

Résumé

Ce travail a pour objet de caractériser en statique et en fatigue des matériaux sandwichs à base de renforts naturels. Les peaux des sandwichs constituées des fibres végétales (jute, sisal et lin), l'âme est un liège aggloméré.

Nous avons étudié les matériaux constituant les sandwichs (les fibres, les stratifiés et le liège).

Des essais statiques du type flexion trois et quatre points sont effectués sur les sandwichs. Ces essais ont permis de déterminer les caractéristiques nécessaires aux essais de fatigue et mis en évidence leur comportement mécanique. Les résultats enregistrés sont proches à ceux obtenus par des sandwichs constitués des fibres de verre.

Les essais de fatigue en flexion trois et quatre points réalisés à nombre de cycles limité nous renseignent sur le comportement de ces sandwichs.

Après des essais de fatigue, les éprouvettes subissent des essais statiques afin de déterminer les caractéristiques mécaniques.

Mots clés : matériaux sandwichs, renforts naturels, fibres végétales, fatigue, flexion trois et quatre point.

يهدف هذا العمل الى دراسة سلوك المواد المركبة على شكل شطائر متكونة من تعزيزات طبيعية في حالة

الصفائح الخارجية للشطائر مكونة من الياق نباتية (الياق الجوت, الياق السيزال و الياق الكتان), الشطيرة فهو عبارة عن فلين مكوم.

قمنا في بداية البحث بدراسة المواد المكونة للشطائر (الألياف, الصفائح و الفلين).

بعدها اجرينا تجارب استاتيكية للانحناء ذو ثلاث و اربع نقاط. هذه التجارب سمحت لنا بتحديد الصفات الميكانيكية اللازمة

طائر الميكانيكي. النتائج المسجلة قريبة من النتائج

المحصل عليها من التجارب على شطائر مكونة من الياق

Résumé

, العينات تجارب الاستاتيكية من اجل تحديد الصفات الميكانيكية .

كلمات مفتاحية: المواد الشطائرية, تعزيزات طبيعية, الياف نباتية, .

Abstract

This work has as object a characterisation in static and fatigue of sandwich materials constituted of natural reinforcement.

The skins of sandwich materials are made of vegetable fibers (jute, sisal and flax), the core of sandwich is an agglomerated cork.

Firstly, we have studied the materials constituents of sandwich (fibers, laminates and cork).

Then, we carried out static tests in three and four-points bending on materials sandwich. These tests in the static mode permitted the determination of the mechanical characteristics necessary to the fatigue tests and the mechanical behaviour of materials.

The fatigue tests, in three and four-points bending executed on limited number of cycles, inform about the mechanical behaviour of these sandwiches.

After fatigue testing, specimens go through static testing to determine the mechanical characteristics.

Keywords: Sandwich materials, natural reinforcement, vegetable fibers, fatigue, three and four-points bending.

Remerciements

Ce travail a été réalisé à l'Unité de **Recherche Matériaux Procédés et Environnement (UR-MPE)** de l'Université de Boumerdès.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Mr **Bezzazi Boudjema** Professeur à l'Université de Boumerdès pour avoir bien voulu m'encadrer dans ce travail de magister.

Un grand remerciement à Mr **ARIBI Chouaib**, pour ses aides et sa collaboration tout au long de ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à Mr **MIR Abdellah** Maître de conférences à l'université de Boumerdes pour sa disponibilité et ses précieux conseils.

Je remercie tous les membres de mon jury.

Un grand remerciement aux différentes personnes de l'unité, en particulier Mr **AIT HASSAN Said**, mes remerciements vont à tous mes collègues, ainsi qu'à toute personne ayant contribué de près ou de loin à ce modeste travail.

DEDICACES

Je tiens à dédier ce modeste travail :

À mes chers et valeureux parents

À mon cher mari Mouloud

À mon petit enfant Abdellah

À mes sœurs, en particulier "Sarah"

À mon frère Yacine

À ma belle mère

À toute ma famille

SOMMAIRE

| | |
|----------------------------|---|
| Introduction générale..... | 1 |
|----------------------------|---|

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

| | |
|--|----|
| 1.1 Introduction | 4 |
| 1.2 Présentation des matériaux composites | 4 |
| 1.2.1 Matrice..... | 5 |
| 1.2.1.1 Matrices thermoplastiques..... | 6 |
| 1.2.1.2 Matrices thermodurcissables..... | 6 |
| 1.2.2 Renfort..... | 8 |
| 1.2.2.1 Principales catégories des renforts..... | 8 |
| 1.2.2.2 Présentation commerciales des renforts fibreux..... | 9 |
| 1.2.2.2.1 Fibres discontinues | 9 |
| 1.2.2.2.2 Fibres continues | 9 |
| 1.3 Propriétés des matériaux composites..... | 12 |
| 1.3.1 Absence de corrosion..... | 12 |
| 1.3.2 Vieillissement en milieu agressif..... | 12 |
| 1.3.3 Légèreté..... | 12 |
| 1.3.4 Performances mécaniques..... | 13 |
| 1.3.5 Tenue au feu..... | 13 |
| 1.3.6 Conductivité thermique..... | 13 |
| 1.4 Renforts naturels pour matériaux composites..... | 13 |
| 1.4.1 Avantages et inconvénients des fibres végétales..... | 15 |
| 1.4.2 Quelques fibres végétales..... | 16 |
| 1.4.2.1 Le sisal..... | 16 |
| 1.4.2 Le lin..... | 17 |
| 1.4.2.3 Le jute..... | 17 |
| 1.4.3 Structure et composition des fibres naturelles d'origine végétale..... | 17 |
| 1.4.3.1 Structure de la fibre végétale..... | 18 |
| 1.4.3.2 Les constituants de la fibre végétale..... | 20 |

SOMMAIRE

| | |
|----------------------|----|
| 1.5. Conclusion..... | 21 |
|----------------------|----|

CHAPITRE 2 : ELABORATION ET CATACTERISATION DES MATERIAUX DE L'ETUDE

| | |
|---|----|
| 2.1. Introduction..... | 23 |
| 2.2. Fabrication des nappes à base du renfort naturel (fibres de sisal et fibres de lin)..... | 23 |
| 2.3. Caractérisation des renforts naturels..... | 25 |
| 2.3.1. Essais de traction sur mèches..... | 25 |
| 2.4. Elaboration des plaques stratifiées par la méthode d'infusion..... | 27 |
| 2.5. Caractérisation mécanique des stratifiés..... | 28 |
| 2.5.1. Essai de traction..... | 28 |
| 2.5.2. Essai de flexion..... | 30 |
| 2.6. Analyse thermogravimétrique ATG..... | 32 |
| 2.7. Caractérisation du liège..... | 33 |
| 2.7.1. Essai de cisaillement du liège..... | 33 |
| 2.7.2. Analyse hygrothermique..... | 35 |
| 2.7.2.1. Séchage en étuve..... | 35 |
| 2.7.2.2. Analyse thermogravimétrie ATG..... | 35 |
| 2.7.2.3. Pouvoir d'absorption..... | 36 |
| 2.8. Conclusion..... | 38 |

CHAPITRE 3 : ELABORATION, CARACTERISATION MECANIQUE ET ANALYSE HYGROTHERMIQUE DES MATERIAUX SANDWICHES

| | |
|---|----|
| 3.1 Introduction..... | 40 |
| 3.2. Bibliographie sur les structures sandwiches | 40 |
| 3.2.1. Généralités | 41 |
| 3.2.1.1. Bref historique et domaine d'utilisation | 41 |
| 3.2.1.2. Éléments constituant les sandwiches..... | 43 |

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| 3.2.1.3 Modes de dégradations des sandwichs..... | 44 |
| 3.2.1.3.1 Flambement généralisé des peaux | 44 |
| 3.2.1.3.2 Rupture des peaux en traction ou en compression..... | 45 |
| 3.2.1.3.3 Mode locaux de rupture..... | 45 |
| 3.2.1.3.4 Rupture de l'âme en cisaillement | 46 |
| 3.2.1.3.5 Flambement généralisé de l'âme ou « crimping » | 46 |
| 3.2.1.3.6 Flambement localisé « wrinkling » ou « dimpling »..... | 46 |
| 3.2.1.3.7 Dégradation de l'adhésive | 47 |
| 3.2.2 Comportement mécanique des structures sandwichs en statique et en fatigue | 48 |
| 3.2.2.1 Comportement des sandwichs en statique..... | 48 |
| 3.2.2.1.1 Flexion 3 points..... | 49 |
| 3.2.2.1.2 Flexion 4 points | 53 |
| 3.2.2.2 Comportement des structures sandwichs en fatigue | 55 |
| 3.3 Elaboration des plaques sandwichs | 56 |
| 3.3.1 Fabrication des plaques par la méthode d'infusion (sous vide) en "one shoot"..... | 57 |
| 3.4. Procédures expérimentales..... | 59 |
| 3.5 Caractérisation mécanique en statique des sandwichs..... | 59 |
| 3.5.1 Essai de flexion trois points | 60 |
| 3.5.1.1 Analyse des modes de rupture en flexion trois points | 61 |
| 3.5.2 Essai de flexion quatre points | 64 |
| 3.5.2.1 Modes de rupture en flexion quatre points..... | 66 |
| 3.5.2.2 Détermination des propriétés mécaniques | 68 |
| 3.5.3 Essais de cisaillement | 69 |
| 3.5.4 Essais de compression perpendiculaire | 72 |
| 3.6 Caractérisation mécanique en fatigue des sandwichs | 74 |
| 3.6.1 Essai de fatigue en flexion trois points..... | 74 |
| 3.6.2 Essai de fatigue en flexion quatre points..... | 79 |

SOMMAIRE

| | |
|---|-----|
| 3.7 Analyse hygrothermique | 84 |
| 3.7. 1 Chauffage des sandwiches en étuve | 84 |
| 3.7.1.1 Méthode d'essai | 84 |
| 3.7.1.2 Analyse de la variation de la masse après séchage en étuve pendant 24 heures..... | 85 |
| 3.7.2. Pouvoir d'absorption d'eau des sandwiches | 85 |
| 3.7.2.1 Méthode d'essai | 86 |
| 3.7.2.2. Analyse des résultats de l'essai de pouvoir d'absorption | 86 |
| 3.8 .Conclusion | 88 |
| Conclusion générale..... | 90 |
| Références bibliographiques..... | 94 |
| Annexe A : Fiche technique de résine MEDAPOXY INJECT812..... | 99 |
| Annexe B : Fiche technique de liège aggloméré..... | 100 |

Liste des figures

Figures du chapitre 1

| | |
|---|----|
| Figure 1.1 : Différentes bases pour classification des composites..... | 5 |
| Figure 1.2 : Les différents types des matrices..... | 6 |
| Figure 1.3 : Principaux types de tissages..... | 11 |
| Figure 1.4 : Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine..... | 14 |
| Figure 1.5 : les plantes : (a) jute ; (b) lin ; (c) sisal..... | 17 |
| Figure 1.6 : Schéma des parois d'une fibre de lin..... | 18 |
| Figure 1.7 : Représentation de microfibrilles formant un angle..... | 19 |

Figures du chapitre 2

| | |
|---|----|
| Figure 2.1 : Étapes de fabrication des nappes à base du renforts naturels..... | 24 |
| Figure 2.2 : Essai de traction sur mèches..... | 25 |
| Figure 2.3 : Courbes des essais de traction des mèches en jute..... | 25 |
| Figure 2.4 : Courbes des essais de traction des mèches en sisal..... | 26 |
| Figure 2.5 : Courbes des essais de traction des mèches en lin..... | 26 |
| Figure 2.6 : Élaboration des stratifiés par la méthode d'infusion (sous vide)..... | 28 |
| Figure 2.7 : Éprouvettes de traction munies de talons..... | 28 |
| Figure 2.8 : Montage de l'essai de traction..... | 29 |
| Figure 2.9 : Comportement en traction des stratifiés..... | 29 |
| Figure 2.10 : Montage de l'essai de flexion trois points..... | 30 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 2.11 : Courbes de flexion 3 points sur stratifiés..... | 31 |
| Figure 2.12 : Courbes ATG des différents stratifiés..... | 32 |
| Figure 2.13 : Essai de cisaillement du liège..... | 34 |
| Figure 2.14 : Comportement en cisaillement du liège..... | 34 |
| Figure 2.15 : Variation de la masse du liège en fonction du temps de chauffage..... | 35 |
| Figure 2.16 : Courbes de l'ATG du lièges..... | 36 |
| Figure 2.17 : Immersion partielle du liège..... | 37 |
| Figure 2.18 : Histogramme du pouvoir d'absorption d'eau des lièges..... | 38 |

Figures du chapitre 3

| | |
|---|----|
| Figure 3.1 : Procédé Brodeau (D'après "Quinze Ans d'Aéronautique Française..... | 41 |
| Figure 3.2 : Avion Mosquito produit par De Havilland au cours de la seconde guerre mondiale..... | 42 |
| Figure 3.3 : Comparaison des performances mécaniques en flexion entre un panneau de référence et deux panneaux sandwiches..... | 43 |
| Figure 3.4 : Flambement généralisé des peaux du sandwich..... | 45 |
| Figure 3.5 :Rupture des peaux en traction ou en compression..... | 45 |
| Figure 3.6 :Modes locaux de rupture par indentation..... | 45 |
| Figure 3.7 :Rupture de l'âme en cisaillement..... | 46 |
| Figure 3.8 :Flambement généralisé de l'âme du sandwich..... | 46 |
| Figure 3.9 :Flambement localisé « wrinkling »..... | 47 |
| Figure 3.10 :Flambement localisé «damppling»..... | 47 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 3.11: Flexion trois-points..... | 49 |
| Figure 3.12 : Répartition des contraintes de cisaillement..... | 50 |
| Figure 3.13: Déformation en cisaillement dans l'âme..... | 52 |
| Figure 3.14: Flexion 4 points..... | 53 |
| Figure 3.15 : Disposition des éléments constitutants de la plaque et les tissus d'élaboration..... | 57 |
| Figure 3.16 : Avance de résine à travers la plaque sandwich..... | 58 |
| Figure 3.17 : Éprouvettes des essais..... | 58 |
| Figure 3.18 : Essai de flexion 3 points..... | 60 |
| Figure 3.19: Courbes (force-déplacement) en flexion 3 points des différents types de sandwiches..... | 61 |
| Figure 3.20: Modes de rupture en essai de flexion trois points des différents sandwiches..... | 63 |
| Figure 3.21: Représentation d'un sandwich (deux peaux et une âme)..... | 64 |
| Figure 3.22: Essai de flexion quatre points..... | 65 |
| Figure 3.23 : Courbes (force-déplacement) en flexion 4 points des différents types du sandwiches..... | 65 |
| Figure 3.24 : Modes de rupture en flexion quatre points des différents sandwiches.. | 67 |
| Figure 3.25: Essai de cisaillement..... | 69 |
| Figure 3.26: Comportement en cisaillement (liège sans et avec résine)..... | 70 |
| Figure 3.27: Histogrammes comparatifs des valeurs de module de cisaillement G et contrainte en cisaillement des différents types du lièges..... | 71 |
| Figure 3.28: Comportement en compression perpendiculaire des structures sandwiches..... | 73 |

Liste des figures

- Figure 3.29 :** Évolution de la charge F en fonction du nombre de cycles des différents sandwichs en essai de fatigue par flexion trois points.....76
- Figure 3.30:** Courbes (charge-déplacement) en essai de flexion trois points des sandwichs ayant subis des essais de fatigue.....77
- Figure 3.31 :** Modes de rupture en essai statique (flexion trois points) des éprouvettes ayant subis des essais de fatigue.....78
- Figure 3.32 :** Histogrammes comparatifs des valeurs des charges maximales (essai de flexion trois points) et des contraintes des éprouvettes saines et les éprouvettes ayant subis des essais de fatigue.....79
- Figure 3.33 :** Évolution de la charge F en fonction de nombre de cycles des différents sandwichs en flexion quatre points.....81
- Figure 3.34 :** Courbes (charge-déplacement) en essais de flexion quatre points des sandwichs ayant subis des essais de fatigue.....81
- Figure 3. 35 :** Modes de rupture en essai statique (flexion quatre points) des éprouvettes ayant subis des essais de fatigue83
- Figure 3. 36:** Histogrammes comparatifs des valeurs des charges maximales (essai de flexion quatre points) et des contraintes en cisaillement des éprouvettes saines et des éprouvettes ayant subis des essais de fatigue.....84
- Figure 3.37 :** Variation des masses des sandwichs en fonction du temps de séchage.85
- Figure 3.38 :** Pouvoir d'absorption d'eau en immersion partielle des sandwichs.....87

Liste des tableaux

Tableaux de chapitre 1

| | |
|---|----|
| Tableau 1.1 : Tableau comparatif entre les résines thermodurcissables..... | 8 |
| Tableau1.2 : Propriétés des fibres végétales comparées aux fibres de verre..... | 15 |
| Tableau1.3 : Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts des matériaux composites..... | 16 |
| Tableau. 1.4 : Quelques exemples de valeurs de l'angle des microfibrilles dans la couche S2..... | 20 |
| Figure 1.5 : Composition en pourcentage massique des différentes fibres..... | 20 |

Tableaux de chapitre 2

| | |
|---|----|
| Tableau 2.1 : Principales caractéristiques de la résine INJ812..... | 27 |
| Tableau 2.2 : Caractéristiques mécaniques en traction des différents stratifiés..... | 30 |
| Tableau 2.3 : Caractéristiques mécaniques en flexion trois points des différents stratifiés..... | 32 |
| Tableau 2.4 : Les valeurs de perte de masse des différents stratifiés..... | 33 |

Tableaux de chapitre 3

| | |
|---|----|
| Tableau 3.1 : Classification et appellation des sandwichs en fonction des types du renforts..... | 59 |
| Tableau 3.2 : Résultats de l'essai de flexion trois points pour les différents sandwichs..... | 64 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 3.3 : Résultats de l'essai de flexion quatre points pour les différents sandwiches..... | 68 |
| Tableau 3.4 : Propriétés mécaniques déduites des essais de flexion trois et quatre points des sandwiches..... | 68 |
| Tableau 3.5 : Valeurs obtenues par deux méthodes de calcul des modules et des contraintes de cisaillement de liège sans et avec résine (seul et âme de SD-J). | 71 |
| Tableau 3.6 : Caractéristiques mécaniques en compression perpendiculaire des sandwiches..... | 73 |
| Tableau 3.7 : Résultats de l'essai de flexion trois points des éprouvettes ayant subis des essais de fatigue..... | 78 |
| Tableau 3.8 : Résultats de l'essai de flexion quatre points sur des éprouvettes ayant subis des essais de fatigue..... | 83 |

Introduction générale

Introduction générale

Le protocole de Kyoto (1997) sur les changements climatiques mondiaux a eu pour effet d'accélérer la transition vers une économie durable et plus respectueuse de l'environnement en remplaçant progressivement des produits pétrochimiques par des ressources renouvelables, telle que les fibres naturelles d'origine végétale qui se trouvent en abondance dans la nature.

Les fibres végétales se démarquent des fibres de verre par leurs propriétés mécaniques spécifiques élevées grâce à une faible densité, qui induira lors d'applications structurales un gain de masse se traduisant par une économie d'énergie. De plus, les fibres végétales ont aussi l'avantage d'être bio-sourcées et certaines sont disponibles annuellement.

L'utilisation des fibres naturelles pour renfort des matériaux composites se justifie pour :

- ✓ Valoriser une ressource locale pour des pays peu industrialisés ;
- ✓ Développer des matériaux et des technologies permettant de réduire les impacts sur l'environnement

Notre étude porte sur l'élaboration et la caractérisation d'un nouveau matériau composite de type sandwich à base de fibres végétales du jute, de sisal et de lin comme peaux et du liège aggloméré comme âme. Ce matériau composite est destiné à être utilisé dans les domaines de la construction et du transport.

Ce travail se compose de trois chapitres. Le chapitre 1 est consacré à une étude bibliographique sur les matériaux composites. Cette revue débutera avec présentation des matériaux composites et ces constituants. En suite, les propriétés des matériaux composites et leur intérêt. Finalement. Nous présentons les renforts naturels pour matériaux composites, leurs avantages et leurs inconvénients, leur structure et leur composition.

Le deuxième chapitre est consacré à l'élaboration et la caractérisation des matériaux de l'étude. En premier temps, les fibres sont caractérisées mécaniquement par des essais de traction sur mèche afin de déterminer leurs propriétés intrinsèques. Une élaboration des stratifiés à base de fibres naturelles est effectuée par la méthode d'infusion. En suite, nous avons effectué une caractérisation mécanique et des analyses hygrothermiques (ATG, séchage en étuve et absorption d'eau) des différents stratifiés. Les essais mécaniques réalisés sont de type traction et flexion trois points. En fin, nous s'intéressons à déterminer le module de cisaillement de liège aggloméré qui sera utilisé comme âme des structures sandwiches, les analyses hygrothermiques sont des analyses indispensables dans le cas d'un matériau naturel comme le liège.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude expérimentale des matériaux sandwiches à âme en liège aggloméré et peaux en fibres naturelles/époxy. Cette étude est divisée en deux parties : une caractérisation mécanique en statique (des essais de type flexion trois et quatre points, cisaillement et compression perpendiculaire) et une caractérisation mécanique en fatigue cyclique (par flexion trois et quatre points). Le chapitre se termine par des analyses hygrothermiques (ATG, séchage en étuve et pouvoir d'absorption d'eau).

En fin, les divers résultats obtenus lors de ce travail sont repris dans la conclusion générale.

Chapitre 1 :
Étude bibliographique

1.1 Introduction

L'étude bibliographique dans ce chapitre présente dans un premier temps les matériaux composites et leurs constituants (renfort et matrice) ainsi que leurs domaines d'utilisation.

Ensuite dans le cadre d'un souci écologique, nous présentons une brève étude des fibres naturelles d'origine végétale.

Cette étude concerne les différents types des fibres naturelles d'origine végétale, leurs avantages et leurs inconvénients, leur structure et leur composition ainsi que leurs propriétés mécaniques.

1.2 Présentation des matériaux composites

Étant donné le nombre important des matériaux qui peuvent être considérés comme composites et une large gamme d'utilisations pour lesquelles des matériaux composites peuvent être conçus, il est difficile de convenir d'une définition simple et concise. Cependant, comme définition pratique commune, l'appellation « matériau composite » peut être limitée aux matériaux qui contiennent un constituant continu appelé « matrice » qui lie ensemble, un autre constituant plus résistant et plus rigide appelé « renfort ». Le matériau résultant possède des propriétés structurelles supérieures à l'un ou l'autre des matériaux constitutifs. [1]

Il existe de nombreux matériaux composites fabriqués avec plus de deux matières premières. Ces matériaux ne sont pas miscibles et possèdent des caractéristiques dissemblables. La quantité, la position et l'orientation des renforts ainsi que la sélection de la matrice sont des aspects critiques de la conception et de développement de produit. Ces paramètres doivent être optimisés pour améliorer constamment le produit.

La classification des matériaux composites se fait selon deux niveaux :

- ▶ Le premier niveau se fait habituellement par rapport à la matrice :
 - 1) Composites à matrice métallique CMM (alliages légers et utralégers d'aluminium, de magnésium, de titane,..) ;
 - 2) Composites à matrice organique CMO ;
 - 3) Composites à matrice minérale ou céramique CMC.

- Le deuxième niveau de classification se rapporte à la forme du renfort : renforts particuliers, renforts de fibres courtes, renforts de fibres longues et renforts à fibres tissées.

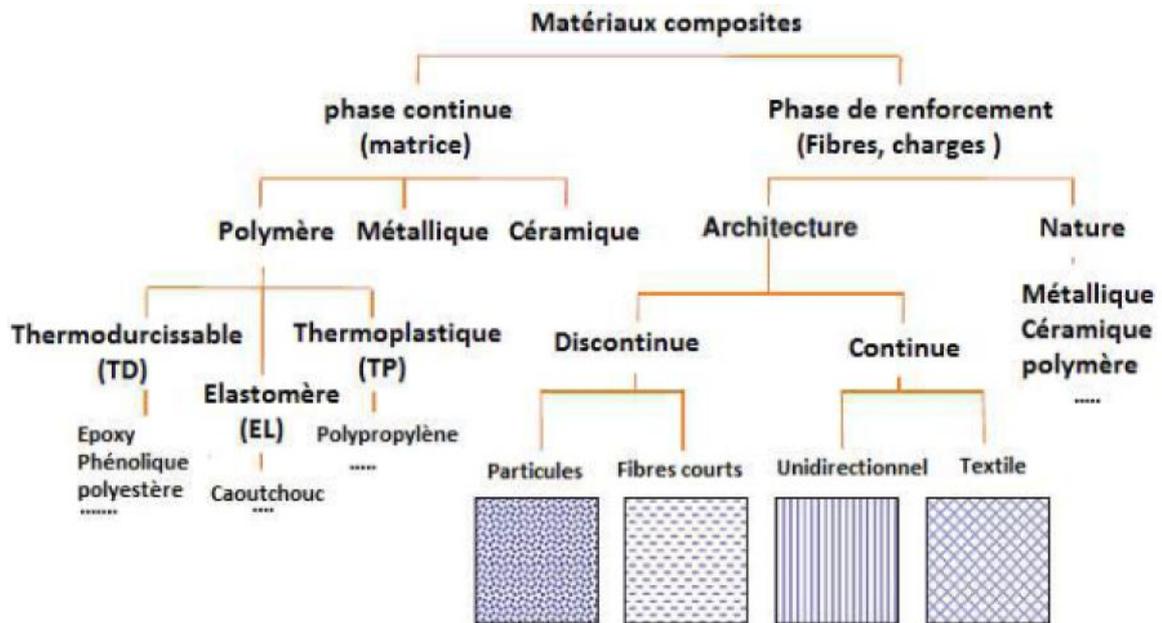


Figure 1.1 : Différentes bases pour classification des composites.

1.2.1 Matrice

La matrice est la phase continue dont les fonctions sont :

- De réaliser la liaison entre les renforts de manière à répartir les sollicitations et ainsi de prévenir les ruptures catastrophiques ;
- D'assurer la protection de ces renforts vis-à-vis des agents agressifs ;
- De donner la forme à la pièce et garantir ses caractéristiques géométriques.

Les matrices utilisées dans les matériaux composites se divisent en deux grandes familles : les matrices organiques et les matrices inorganiques (minérales). La figure 1.2 présente les types des matrices.

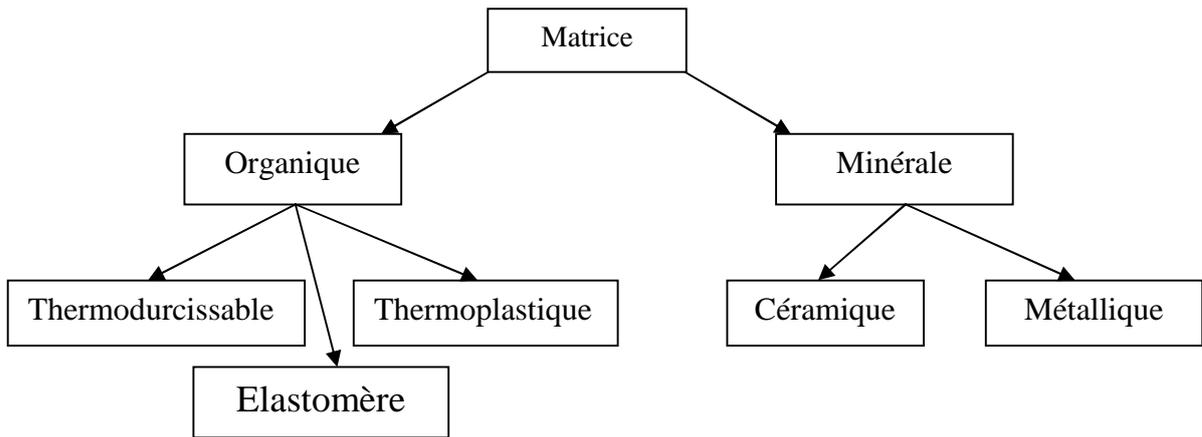


Figure 1.2 : Les différents types des matrices.

Les matrices les plus employées sont les matrices thermodurcissables et thermoplastiques.

1.2.1.1 Matrices thermoplastiques

Les matrices ou les résines thermoplastiques présentent la propriété de passer de façon réversible de l'état solide à l'état pâteux. [2]

| Avantages | inconvénients |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">- Mise en œuvre rapide- Possibilité de retransformation- Meilleure ténacité | <ul style="list-style-type: none">- Une faible tenue en température- Peu de résistance aux solvants |

1.2.1.2 Matrices thermodurcissables

Ces résines possèdent la propriété de passer de façon irréversible d'un état liquide à l'état solide [3] ; elles durcissent après un cycle de chauffage appelé « cycle de polymérisation » ou « cycle de réticulation »

Les résines thermodurcissables principalement utilisées dans la fabrication des matériaux composites sont :

- **Résine polyester** : présente un bon accrochage sur les fibres, un prix bas, mais un retrait important et une tenue réduite à la chaleur humide ;

Chapitre 1 : Étude bibliographique.

- **Résine phénolique** : ayant de moins bonnes propriétés mécaniques que les résines époxydes, elle n'est utilisée que lorsqu'il y a des exigences vis-à-vis de la tenue au feu ;
- **Résine polyimide** : d'un emploi relativement difficile et chère, elle a l'avantage de garder des bonnes caractéristiques sur une large plage de température (de -100 à +260°C) ;
- **Résine époxyde** : (c'est la résine utilisée dans notre étude) les résines époxydes se présentent sous la forme de plusieurs ingrédients à mélanger :
 - Une **résine principale** portant les terminaisons époxydes ; c'est un liquide plus ou moins visqueux ou un solide qui est, dans certaines conditions, soluble ou fusible ;
 - Un **diluant** réactif (avec des terminaisons époxydes, en général) ou non réactif (solvants organiques, en général) ; c'est un liquide très fluide, dont le rôle est d'abaisser la viscosité du système lorsque le mélange est effectué ;
 - Un **flexibilisant** réactif (avec des terminaisons époxydes, en général) ou non réactif ; c'est un liquide plus ou moins visqueux, dont le rôle est de rendre la résine durcie plus flexible ;
 - Un **durcisseur** portant les terminaisons chimiques qui réagissent sur les terminaisons époxydes des autres ingrédients pour constituer, en fin de cycle de polymérisation, un solide, c'est un liquide ou un solide (poudre, paillettes, blocs solubles ou fusibles).

La proportion de chaque produit entrant dans la composition du système de résine dépend des conditions de mise en œuvre à obtenir et des propriétés recherchées. [3]

Le tableau 1.1 donne une comparaison entre les différentes résines.

Tableau 1.1 : Tableau comparatif entre les résines thermodurcissables.[4]

| | Polyesters | Phénoliques | Epoxydes | Polyimides |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Caractéristiques mécaniques | Moyennes | Faibles | Très bonnes | Excellentes |
| Tenue aux chocs | Très bonne | Très faible | Bonne | Très bonne |
| Tenue en fatigue | Faible | Faible | Moyenne | Bonne |
| Pouvoir adhésif | Moyen | Moyen | Très bon | Très bon |
| Température maxi d'utilisation | 140°C | 130°C | 190°C | 260°C |
| Tenue au feu | Mauvaise | Bonne | Moyenne | Très bonne |
| Retrait | Important | Faible | Très faible | Très faible |
| Durée de polymérisation | Courte | Courte | Longue | moyenne |
| Mise en œuvre | Très facile | Difficile | Facile | Difficile |

1.2.2 Renfort

Le renfort est le constituant qui confère au composite ses caractéristiques mécaniques : la rigidité, la résistance à la rupture, la dureté, ect. Les caractéristiques recherchées pour les renforts sont de propriétés mécaniques élevées, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec les résines, une facilité de mise en œuvre, un faible cout, ect.

1.2.2.1 Principales catégories des renforts

Il existe un grand nombre des renforts sous forme de fibres que l'on peut diviser en quatre grandes catégories : [5]

- **Les fibres naturelles** : il s'agit essentiellement de fibres végétales (lin, chanvre, sisal, jute, ect) ou animales (poiles et la soie de sécrétion) ;
- **Les fibres artificielles** : elles sont obtenues après dissolution de matières naturelles et filage de la solution par un procédé d'extrusion. Les fibres les plus utilisées sont : **les fibres de viscose** haute ténacité ; **les fibres d'alginate** et **les fibres de chitosane**.
- **Les fibres synthétiques** : ces fibres sont obtenues par filage d'un polymère synthétique et mise en œuvre à partir d'un procédé d'extrusion/filage par voie fondu ou solvant. Les principales variétés sont : polyamides, polyesters,

polyoléfines, chlorofibres, fibres de PVA et les thermoplastiques hautes performances.

- **Les fibres de spécialité** : cette catégorie regroupe les fibres les plus utilisées dans l'industrie :

1) **Fibres organiques à haute performance**

(a) **Mécanique** : para-aramides (Kevlar, Twaron), para-polyéthylène haute ténacité ;

(b) **Thermique** : méta-aramide (Nomex), polyamide-imide (Kermel), copolyimide ;

(c) **Mécanique et thermique** : Zylon, M5.

2) **Fibres inorganiques**

- Fibres de verre ;
- Fibres de basalte (issues des roches volcaniques) ;
- Fibres céramiques haute température ;
- Fibres de carbone ;
- Fibres métalliques.

1.2.2.2 Présentation commerciales des renforts fibreux

Les propriétés mécaniques et physiques de la pièce finale en matériaux composites dépendent fortement à la forme du renfort. Cette dernière permet de diviser les composites en deux classes : les composites à **fibres courtes** ou **coupées (discontinues)** et les composites à **fibres continues**.

Les deux classes de matériaux composites sont assez différentes.

1.2.2.2.1 Fibres discontinues

Des fibres courtes ou particules (charges sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écaillés ou de poudres), améliorent le comportement mécanique du matériau composé de la matrice seule, mais celle-ci reste l'élément de base et on obtient un polymère renforcé ;

1.2.2.2.2 Fibres continues

Celles-ci jouent un rôle principal dans le comportement mécanique du composite, la fonction de la matrice étant, en particulier, d'empêcher les déplacements relatifs des fibres continues. C'est ce type de composites qui est utilisé dans les applications structurelles fortement sollicitées. [7]

Les renforts continus se trouvent sous plusieurs formes commerciales :

a) Nappes unidirectionnelles

Elles sont constituées de fibres parallèles entre elles orientées dans une seule direction. La cohésion transversale est assurée :

- Pour les préimprégnés, par la résine ;
- Pour les nappes sèches :
 - Soit par un ruban adhésif déposé suivant un pas déterminé ;
 - Soit par un léger tissage, on obtient un tissu unidirectionnel dans lequel la masse de fibres dans le sens chaîne présente plus de 70% de la masse totale. [2]

b) Tissus

Les fibres (monofilaments) sont en général rassemblées en mèche (ou fil), éventuellement réunies par torsion. Le renfort tissé est constitué par l'entrecroisement de fils de chaîne (suivant la direction d'enroulement sur son support) et des fils de trame (déposés perpendiculairement). Un tissu est équilibré si le poids de chaîne est égal au poids de trame.

Les armures les plus courantes utilisées sont les suivantes :

- Le **taffetas** dans lequel les fibres de chaîne et trame s'entrecroisent alternativement, en obtient un tissu peu déformable ayant une planéité excellente ;
- Le **satins** : le fil de chaîne flotte au dessus de plusieurs fils de trame, cette forme est la plus déformable : elle est utilisée pour réaliser des formes complexes. Les satins utilisés pour les composites sont les satins de 5 et 8.
- Le **sergé** est intermédiaire de taffetas et de satin. Un fil de chaîne passe sous plusieurs fils de trame successifs puis en dessus d'un fil de trame, en suivant un schéma régulier. Ce type d'armure produit un motif diagonal, ces tissus sont à la fois denses et souples.

La figure 1.3 présente les principaux motifs d'armures

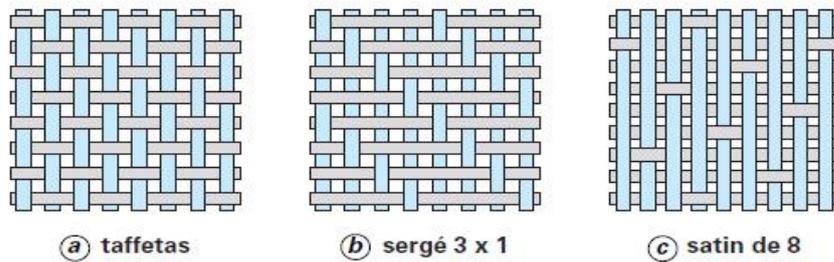


Figure 1.3: Principaux types de tissages.

Pour les applications particulières, les catalogues des tissus proposent des tissus mixtes en utilisant des matériaux différents dans les directions chaîne et trame, ou tissus hybrides en employant des fils de nature différente dans la même direction. [3]

La texture est définie par :

- Le mode d'entrecroisement ou armure ;
- Le nombre de fils par unité de longueur dans les sens de la chaîne et de la trame ;
- La nature et les caractéristiques des fils utilisés dans ces deux directions ;
- La masse surfacique.

c) Feutres ou mats :

Nous appelons feutre ou mat un tapis de fibres, coupées ou non, aléatoirement orientées dans un plan. Les produits tels quels ou sous forme préimprégnés.

Dans le cas de produits tel quel ; les fibres doivent être liées entre elles : soit chimiquement par le dépôt à faible taux de colles, soit mécaniquement par aiguilletage pour conserver leur comportement en feuilles lors de leur mise en œuvre.

d) Autres types de renforts :

Les mèches (ou les fils) peuvent être liées entre elles par d'autres façons.

Les tricots sont très déformables ce qui est nécessaire pour obtenir des formes très non développables. Les renforts multidirectionnels permettent des applications demandant de hautes performances, en particulier aérospatiales. [7]

1.3 Propriétés des matériaux composites

Les matériaux composites trouvent naturellement un champ d'applications qui ne cesse de s'élargir. Ces matériaux prennent une place prépondérante dans différents domaines par leur simplicité d'élaboration, leur légèreté ainsi que leurs caractéristiques mécaniques. Contrairement aux matériaux classiques qui présentent des caractéristiques mécaniques intrinsèques, les matériaux composites peuvent répondre aux exigences de différents types de contraintes à partir d'une élaboration et d'un choix judicieux de matrice et renfort, et ceci, dans différents domaines.

1.3.1 Absence de corrosion

Il est évident que les composites à matrice organique n'étant pas corrodables, ils induisent des économies substantielles en terme de maintenance.

1.3.2 Vieillissement en milieu agressif

Le vieillissement en milieu agressif des composites à matrice organique et généralement très bon.

Le mécanisme de vieillissement d'un composite est totalement différent de celui d'un matériau métallique ; le vieillissement de composite n'est pas un phénomène de surface. Il s'opère à partir de l'eau absorbée par le matériau soit par :

- Diffusion à travers la résine ;
- Transfert à travers les porosités et par capillarité le long des microfissures ou des interfaces fibres/matrice.

1.3.3 Légèreté

La masse volumique des composites reste bien inférieure à celle des matériaux métalliques.

Cet allègement des structures est, sans conteste, un des arguments majeurs pour l'emploi des matériaux composites en construction navale militaire, construction aérospatiale, aéronautique, automobile, ect.

1.3.4 Performances mécaniques

Comparés aux matériaux métalliques, les composites à matrice organique se caractérisent par des lois de comportement sensiblement différentes : une tenue en fatigue bien supérieure, ainsi que des niveaux de modules d'élasticité sensiblement inférieurs.

Le comportement singulier des composites, présentant un domaine purement élastique jusqu'à la rupture constitue un avantage certain.

Pour les composites à matrice organique, les contraintes à la rupture et les modules d'élasticité dépendent essentiellement de la nature et de l'orientation des fibres dans la structure.

1.3.5 Tenue au feu

Le comportement à la flamme (réaction au feu), caractéristique de la matrice, peut être considérablement amélioré dans le cas d'un composite ; d'un part en raison du rôle de protection joué par les fibres présentes dans la matrice, d'autre part par un choix judicieux de la résine (résine phénolique).

L'incorporation des charges permet également de réduire la sensibilité à la flamme de la matrice réputée vulnérable.

1.3.6 Conductivité thermique

Les composites à matrice organique conduisent faiblement la chaleur, notamment lorsqu'ils sont mis en œuvre sous la forme sandwich.

1.4 Renforts naturels pour matériaux composites

Sous le terme « fibres naturelles » se trouvent des fibres organiques d'origine végétale (cellulosique) et animale (protéinique), et des fibres minérales telles que l'amiante.

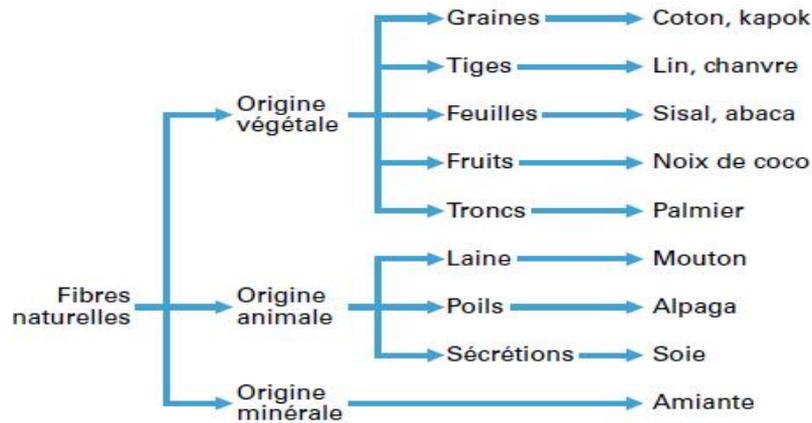


Figure1.4 : Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine.[10]

L'utilisation des fibres naturelles pour renfort des matériaux composites se justifie pour :

- ✓ Valoriser une ressource locale pour des pays peu industrialisés ;
- ✓ Développer des matériaux et des technologies permettant de réduire les impacts sur l'environnement. [9]

Les **fibres végétales** sont couramment utilisées car se sont les fibres les plus disponibles ;

Les **sois animales**, bien que peu utilisées, présentent un allongement à la rupture très important ; en terme d'absorption d'énergie mécanique, elles sont inégalées dans le monde des fibres naturelles et synthétiques.

Le choix des fibres provenant d'un milieu naturel et présentant des performances mécaniques intéressantes se fait en tenant compte :

- ✓ De leur origine et fonction ;
- ✓ De leur disponibilité avec des propriétés maîtrisées ;
- ✓ De leur composition et structure souvent complexe ;
- ✓ De la connaissance des impacts environnementaux.

Pour le renforcement de polymères, on s'intéresse aux fibres ayant fonction structurelle dans la nature. Les fibres végétales provenant des tiges, des feuilles et des

Chapitre 1 : Étude bibliographique.

fruits, ainsi que les sécrétions animales, présentent des propriétés mécaniques les plus intéressantes.

Tableau1.2: Propriétés des fibres végétales comparées aux fibres de verre. [10, 11, 12, 13 et14]

| Fibres | E (GPa) | A (%) | σ_u (MPa) | Densité ρ (kg/m ³) | Module spécifique E/ρ |
|---------|------------|----------|---------------------|---|----------------------------------|
| Verre E | 72-74 | 3,2-3,5 | 2300-2500 | 2,54 | 28-29 |
| Ramie | 27-108 | 1,2-3,8 | 400-1000 | 1,56 | 39-82 |
| Lin | 30-110 | 1,2-3 | 400-2000 | 1,53 | 20-72 |
| Chanvre | 60-70 | 1,6-1,8 | 389-1100 | 1,42 | 42-50 |
| Jute | 10-30 | 1,5-1,8 | 393-800 | 1,44 | 7-21 |
| Sisal | 9-38 | 2-7 | 350-700 | 1,45 | 6,5-15,5 |
| Coco | 4-6 | 15-40 | 131-175 | 1,15 | 3,5-5 |
| Coton | 6-13 | 7-8 | 300-600 | 1,5-1,6 | 4-8 |

1.4.1 Avantages et inconvénients des fibres végétales

Pour des raisons de disponibilité et de coût, les fibres naturelles d'origine végétale sont les plus utilisées pour le renforcement des matériaux composites ; elles constituent une alternative intéressante aux fibres de verre en raison de leur recyclabilité. Ces fibres présentent de nombreux avantages comme renfort des composites. En revanche, certains inconvénients peuvent être un frein au niveau de développement industriel.

Chapitre 1 : Étude bibliographique.

Tableau1.3: Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts des matériaux composites.

| Avantages | Inconvénients |
|--|--|
| Faible coût | Absorption d'eau |
| Biodégradabilité | Biodégradabilité |
| Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité) | Tenue thermique limitée (200 à 230 °C max) |
| Non abrasif pour les outillages | Fibres anisotropes |
| Neutre pour l'émission de CO2 | Renfort discontinu |
| Peu d'énergie pour production | Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de la météo. |
| Pas de résidus après incinération | Culture annuelle Demande la gestion d'un stock |
| Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres | |
| Ressource renouvelable | |

1.4.2 Quelques fibres végétales

1.4.2.1 le sisal

Les fibres de sisal sont extraites des feuilles du sisal, appelé *Agave sisalana*, dont la longueur peut atteindre 1 mètre. Il s'agit d'une plante tropicale, principalement cultivé en Amérique du sud et en Afrique. Les fibres sont impropres à l'industrie de l'habillement car elles sont trop raides. Mais elles sont de plus en plus utilisées dans les composites, augmentant ainsi le module d'élasticité du composite mais diminuant sa résistance à la traction [15,16]. Par exemple, le sisal est utilisé en tant que renfort dans les panneaux de toiture ondulés, car la fibre apporte une bonne résistance mécanique et une bonne tenue au feu.

1.4.2.2 le lin

Le lin est une plante de la famille des Linacées et du genre *Linum*, qui comporte plus de deux cents espèces et pousse dans le monde entier, aussi bien en Asie qu'en Europe. Cette plante est constituée d'une tige dont l'extrémité est formée de plusieurs petites fleurs bleues. Elle contient sur toute sa hauteur de longues fibres qui lui confèrent sa rigidité. Sont précisément ces fibres qui ont des bonnes caractéristiques physiques et mécaniques comparables à celles de quelques fibres synthétiques, qui font du lin un renfort envisageable de matrices polymère. [17]

1.4.2.3 le jute

Le jute est cultivé au Bangladesh et en Inde, c'est une plante des régions tropicales appartenant à la famille des liliacées. La tige atteint une hauteur de 4 à 6 m avec un diamètre d'environ 3 cm. La fibre ultime est très courte et très lignifiée. [18]



(a)

(b)

(c)

Figure 1.5 : les plantes : (a) jute ; (b) lin ; (c) sisal.

1.4.3 Structure et composition des fibres naturelles d'origine végétale.

Les propriétés mécaniques des fibres naturelles sont déterminées par leur :

- Composition chimique : pourcentage de cellulose (microfibrille = renfort)
- Structure physique : angle microfibrillaire. La diminution de l'angle entraîne une augmentation de la rigidité et la résistance.

1.4.3.1. Structure de la fibre végétale

La fibre végétale est considérée comme un matériau multicouche du fait des parois cylindriques concentriques qui la composent. Au centre de la fibre élémentaire, on distingue le lumen qui contenait, jusqu'à maturité de la fibre, le noyau cellulaire et le cytoplasme. La taille du lumen permet de déterminer la qualité et le degré de maturité de la fibre [19]. La paroi végétale, qui est l'enveloppe de la cellule végétale, est composée essentiellement de composés glucidiques. Elle comporte 2 parties présentées sur la figure 1.6 :

- la paroi primaire
- la paroi secondaire, elle-même composée de 3 couches : S1, S2 et S3

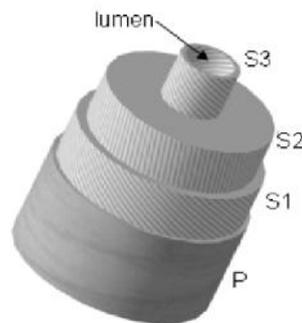


Figure 1.6 : Schéma des parois d'une fibre de lin. [20]

La paroi primaire est la paroi la plus externe dont l'épaisseur est comprise entre 0,1 et 0,5 μm (Figure 1.6) [21]. Cette paroi est poreuse et élastique [22]. Elle est constituée principalement de pectines et de microfibrilles de cellulose orientées aléatoirement [23, 24].

La paroi secondaire ou paroi interne possède une épaisseur d'environ 10 μm , constituant la plus grande partie du volume de la fibre. Cette paroi se divise en 3 couches : S1, S2 et S3. Ces trois sous-couches se différencient par leur composition biochimique, leur épaisseur ainsi que par leur arrangement.

La paroi primaire ainsi que la paroi secondaire sont considérées comme des composites renforcés de fibrilles. Leurs principaux constituants sont la cellulose, les hémicelluloses et la lignine qui constitue la matrice du composite. Chacune des sous-couches est constituée de lamelles concentriques, qui consistent en un enroulement de

Chapitre 1 : Étude bibliographique.

microfibrilles de cellulose parallèles entre elles dans une matrice de lignine, les hémicelluloses assurent l'interphase.

L'élément constitutif des parois est appelé microfibrille. Les microfibrilles sont disposées en forme de spirale, formant un angle avec l'axe longitudinal de la fibre (Figure 1.7). Cet angle est appelé l'angle des microfibrilles (AMF), il est déterminé par diverses techniques dont la microscopie confocale polarisante et la diffraction des rayons X [25,26]. Plus l'angle est petit, plus les microfibrilles de cellulose sont verticales. Ainsi, la couche *S2*, qui est la couche la plus riche en cellulose, a une disposition favorisant le soutien de la plante. Cette couche est donc très importante pour la résistance mécanique.

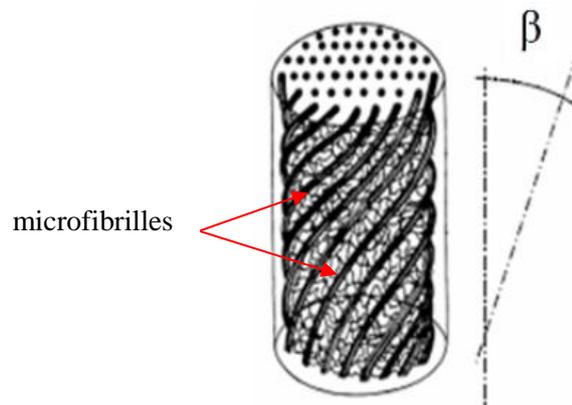


Figure 1.7 : Représentation des microfibrilles formant un angle.

La couche *S1* est constituée d'un treillis de fibres dont l'angle varie de -80 à $+80^\circ$, elle représente 5 à 10 % de l'épaisseur totale de la paroi végétale (Figure 1.6).

La couche *S2*, qui est la plus épaisse, occupe environ 75 à 85% de l'épaisseur de la paroi végétale (Figure 1.6) et assure la rigidité mécanique globale de la fibre végétale. Les microfibrilles ont un angle compris entre 0° et 45° (tableau 1.4).

Chapitre 1 : Étude bibliographique.

Tableau. 1.4 : Quelques exemples de valeurs de l'angle des microfibrilles dans la couche S2.
[10, 20, 22, 27, 28, 29, 30, 31 et 32]

| Fibre | Angle microfibrillaire (°) |
|---------------|----------------------------|
| Lin | 6 - 11 |
| Chanvre | 6 - 7,5 |
| Ramie | 3 - 8 |
| Jute | 7,5 - 8 |
| Sisal | 20 - 36 |
| Noix de Coco | 40 - 45 |
| Bois | 5 - 45 |
| Recktophyllum | 40 |

Les microfibrilles de la couche S3 font un angle égal à \pm (40°- 80°) avec l'axe de la fibre [20]. L'épaisseur de la couche varie entre 5 et 10% de l'épaisseur totale de la paroi cellulaire (Figure 1.6).

1.4.3.2 Les constituants de la fibre végétale

Une cellule végétale est principalement constituée de cellulose, d'hémicellulose, et de lignine. Le tableau 1.5 donne la composition biochimique de certaines fibres.

Tableau 1.5 : Composition en pourcentage massique des différentes fibres. [33, 34, 35 et 36]

| | Cellulose | Hémicelluloses | Lignines | Pectines | Autres (cire, eau,...) |
|---------|-----------|----------------|----------|----------|------------------------|
| Lin | 64-85 | 5-20 | 0-5 | 2-20 | 9-12 |
| Chanvre | 58-85 | 10-23 | 3-6 | 1-17 | 11 |
| Jute | 61-75 | 11-15 | 8-15 | 0,2-1 | 11 |
| Ramie | 68,6-76,2 | 13-17 | 0,6 | 1,9-2 | 8,3 |
| Sisal | 66 | 12 | 9,9 | 0,8 | 11,3 |

1.5 Conclusion

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique des matériaux composites. Une présentation des constituants (renfort, matrice) a mis en évidence l'importance du choix du renfort et de la résine pour l'élaboration d'un matériau composite répondant aux exigences du cahier des charges. D'un point de vue écologique, nous avons vu que les fibres naturelles peuvent remplacer certaines fibres synthétiques. Plusieurs fibres naturelles sont présentées avec leurs caractéristiques mécaniques, leurs avantages et inconvénients.

Chapitre 2 :

Élaboration et caractérisation des matériaux de l'étude

2.1 Introduction

Les exigences environnementales nous obligent de remplacer les matériaux à base pétrolière par des matériaux naturels renouvelables, et pour des écoconceptions, on a choisi à étudier des renforts naturels (fibres de jute, de sisal et de lin) et les utiliser dans la fabrication des panneaux sandwichs.

Dans ce chapitre, nous présentons les matériaux constituant les structures sandwichs (leur mise en forme, leurs caractéristiques mécaniques et hygrothermiques).

Dans un premier temps, une caractérisation mécanique des renforts par des essais de traction sur mèches. Par la suite, nous caractérisons les stratifiés mécaniquement (essais de traction et flexion trois points) et par des analyses hygrothermiques à savoir l'ATG, le séchage en étuve et l'absorption d'eau, et enfin, des essais de cisaillement sont effectués sur le liège aggloméré afin de déterminer son module de cisaillement (ce liège sera utilisé comme âme des structures sandwichs). Et pour compléter l'étude, des analyses hygrothermiques (ATG, séchage en étuve et absorption d'eau) sont effectuées sur ce type de liège aggloméré.

Toutes les essais de cette étude sont réalisés au niveau de l'unité de recherche *UR-MPE* (université de Boumerdes).

2.2 Fabrication des nappes à base du renfort naturel (fibres de sisal et fibres de lin)

Les fibres de sisal et de lin utilisées dans cette étude sont les produits qui existent sur le marché algérien, ainsi le tissu de jute. Ces fibres ne subissent aucun traitement chimique au niveau de laboratoire.

Les renforts sont tissés manuellement pour obtenir des nappes utilisées dans l'élaboration des stratifiés et des sandwichs.

La figure 2.1 montre les étapes suivies pour la fabrication des nappes :

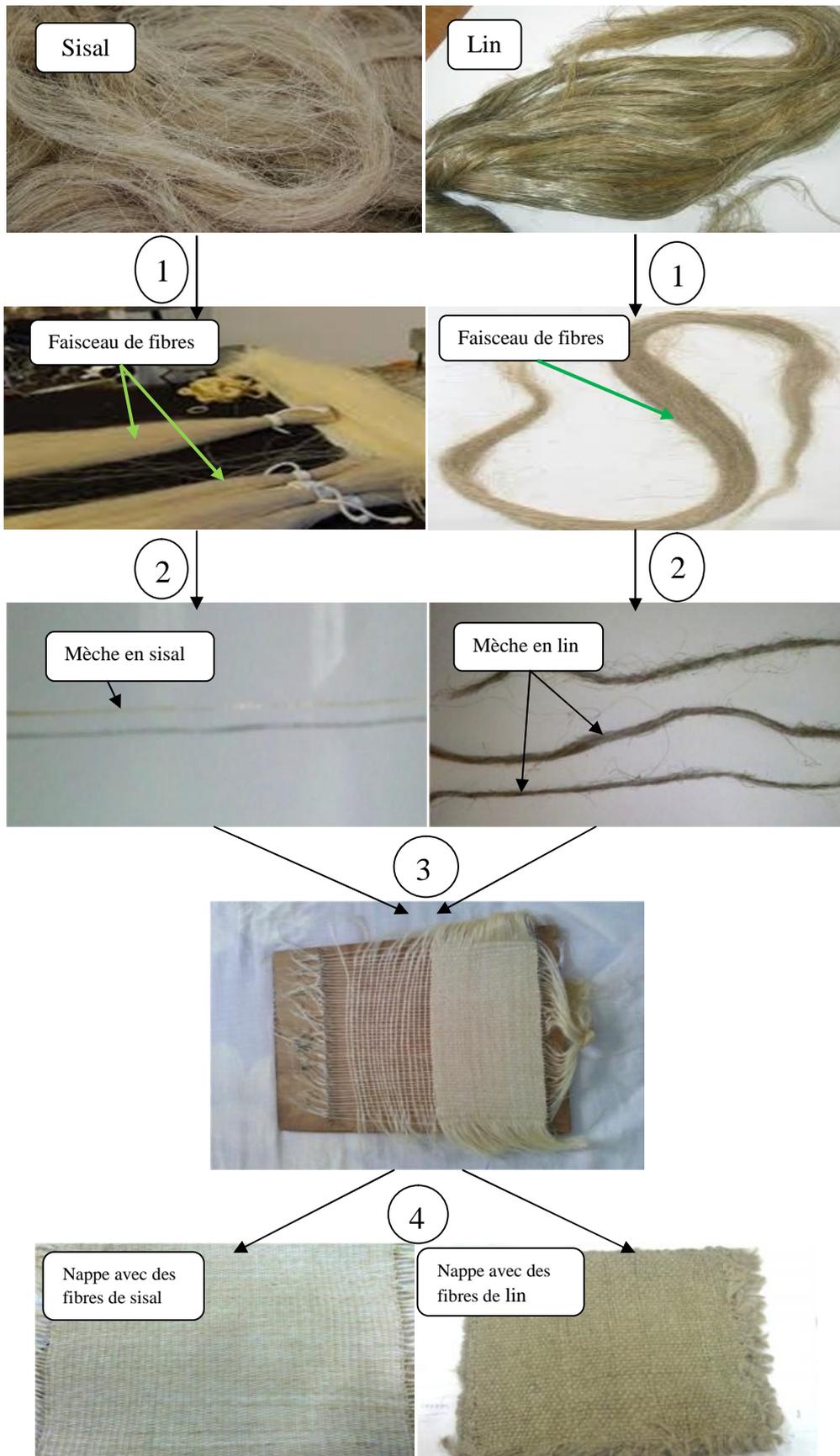


Figure 2.1: Étapes de fabrication des nappes à base des renforts naturels.

2.3 Caractérisation des renforts naturels

2.3.1 Essai de traction sur mèches

L'essai de traction sur les mèches des différents renforts a été effectué sur une machine universelle de type Zwick/Roll équipée d'un capteur de force de 2.5 kN et pilotée par ordinateur qui enregistre les résultats à l'aide de logiciel « testXpert standard ». Les échantillons ont des dimensions de 80mm de longueur, la vitesse des essais réalisés est de 1mm/min.

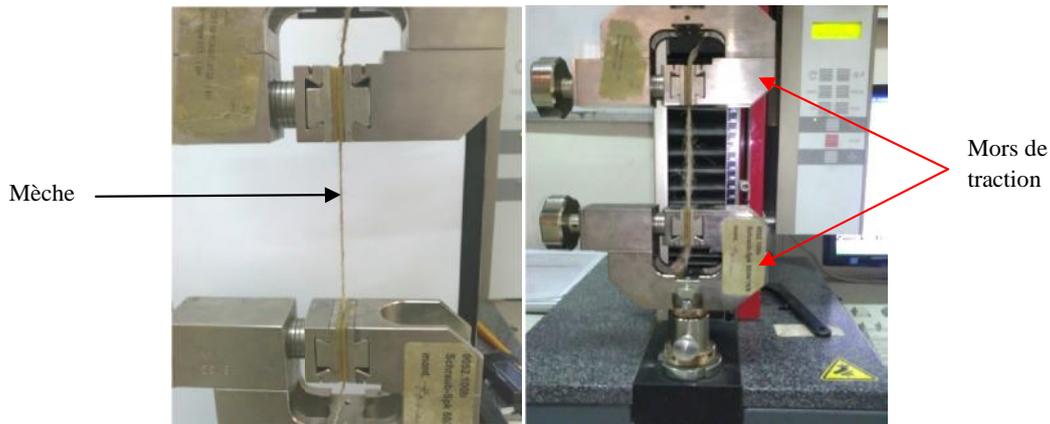


Figure 2.2: Essai de traction sur mèches.

Les courbes (charge – déformation) obtenues à partir de l'essai de traction montrent une variation des charges maximales et des déformations.

Pour les mèches en jute (figure 2.3), on note une variation de la charge maximale de 3100N à 3700N. Les mèches en jute se rompent à la charge maximale.

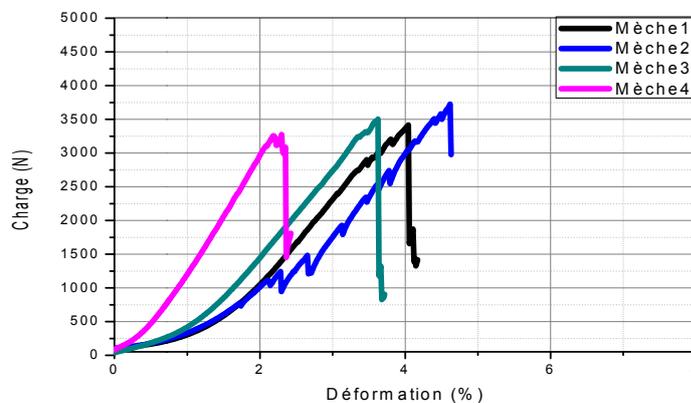


Figure 2.3: Courbes des essais de traction des mèches en jute.

Les courbes (charge – déformation) des mèches en sisal (figure 2.4) montrent des variations importantes de la charge maximale à la rupture allant de 5500N jusqu'à 10200N. Ces mèches ne se coupent pas à la charge maximale.

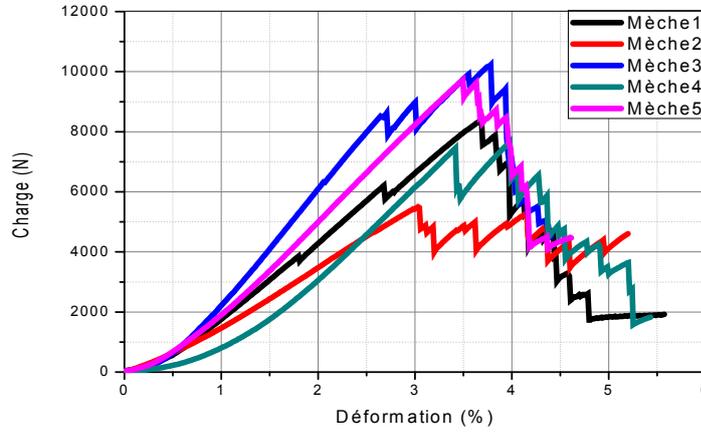


Figure 2.4: Courbes des essais de traction des mèches en sisal.

Le même comportement est observé pour les mèches en lin, la charge maximale varie de 14400N à 16300N. (Figure 2.5)

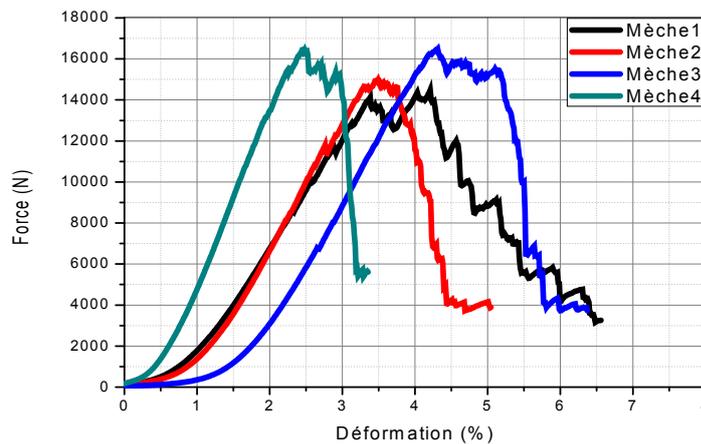


Figure 2.5: Courbes des essais de traction des mèches en lin.

Ces variations des résultats (dans le même type du renfort) s'expliquent par la variation de plusieurs facteurs à savoir : le diamètre de la mèche et de fibres, nombre de fibres constituant la mèche, l'angle microfibrillaire, etc...

2.4 Élaboration des plaques stratifiées par la méthode d'infusion (sous vide)

Nous avons utilisé une résine de nature époxyde de faible viscosité, cette résine est notée INJ812 (MEDAPOXY INJECT) fournie par la société GRANITEX (fiche technique annexe A). Des études sont effectuées sur cette résine au niveau de l'unité UR-MPE. Les principales caractéristiques mécaniques trouvées sont données dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Principales caractéristiques mécaniques de la résine INJ812.

| Essai de | rup (%) | rup (N/mm ²) | E (MPa) | élas. (%) | plas. (%) | / | Densité (g/m ³) |
|------------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------------------|--|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| traction | 15.93 | 10.13 | 468.83 | 1.62 | 14.3 | / | 1.1186 |
| Essai de flexion | Flèche Y (mm) | Force (N) | f (N/mm ²) | E_f (N/mm ²) | Y_{élas.} (mm) | Y_{plas.} (mm) | |
| | 11.52 | 28.13 | 16.01 | 240.16 | 2.7 | 8.82 | |

L'élaboration des stratifiés est réalisée par la méthode dite « infusion ». Cette technique est limitée par la viscosité de la résine et le début de la réticulation, ainsi par la perméabilité du renfort. Le mécanisme de l'infusion consiste à remplacer progressivement le vide par la résine, c'est pour cela que l'ensemble doit être scellé sous un film du plastique. (Figure 2.6)

Après le remplacement complet du vide par la résine, l'ensemble reste sous vide pendant 8 heures jusqu'à la vitrification complète de la résine ; en suite, la plaque réalisée est mise dans une étuve à 80°C pendant 8 heures afin d'améliorer le taux de réticulation.

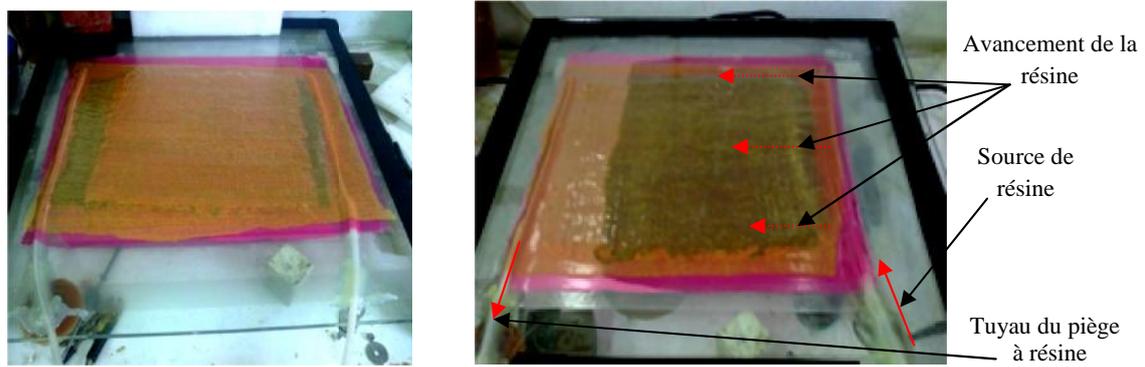


Figure 2.6 : Élaboration des stratifiés par la méthode « infusion » (sous vide).

2.5 Caractérisation mécanique des stratifiés

2.5.1 Essai de traction

Pour l'essai de traction, les éprouvettes sont découpées suivant la norme *NF EN ISO 527-1*, cette découpe est réalisée avec une scie en diamant. Les éprouvettes de dimensions 250* 50 mm sont représentées sur la figure 2.7 et munies des talons en aluminium, ce qui permet d'éviter l'effet de glissement entre les mors de serrage et l'éprouvette.

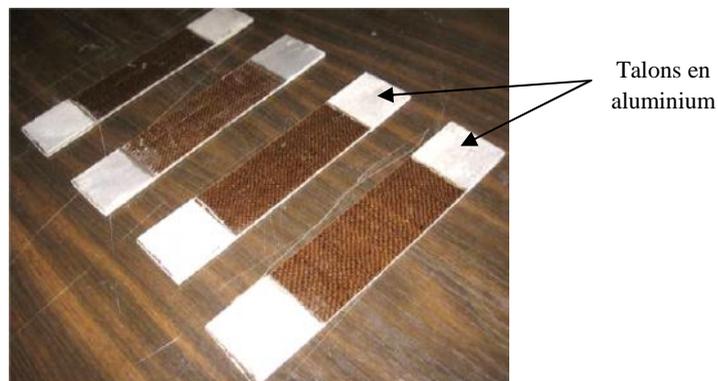


Figure 2.7 : Éprouvettes de traction munies de talons.

Les essais de traction sont effectués à température ambiante sur une machine universelle de type Zwick 250 doté d'un capteur de force de capacité 250kN. Cette machine est pilotée par ordinateur à l'aide de logiciel TestXpert9.0 (Figure 2.8). La vitesse de déplacement est constante, soit 2mm/min.

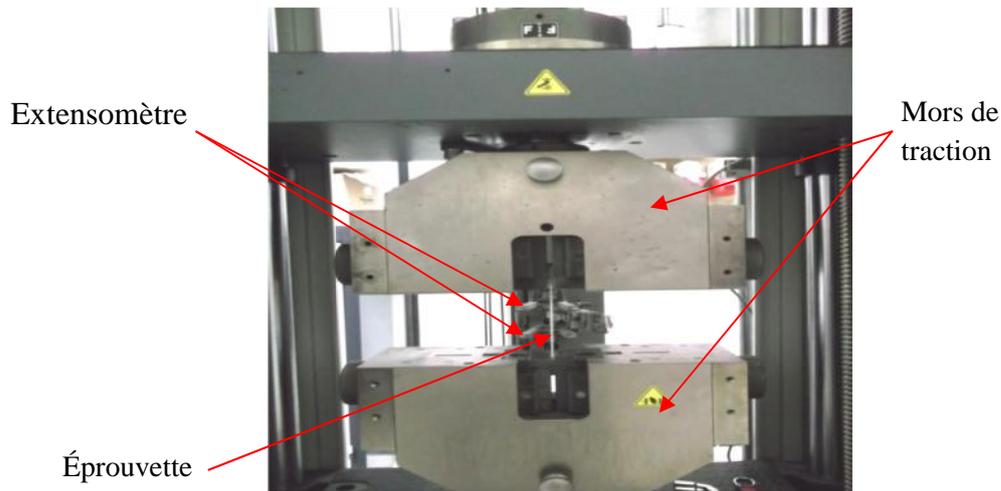


Figure 2.8 : Montage de l'essai de traction.

La figure 2.9 donne l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation des éprouvettes des différents stratifiés, sollicités en traction. Les courbes montrent un comportement commun pour tous les stratifiés, qui débute par une linéarité élastique, suivie d'une phase plastique non linéaire jusqu'à la rupture. Les valeurs de la contrainte maximale varie d'un stratifié à l'autre.

Ces courbes nous permettent de déterminer les valeurs du module de Young, de la contrainte et l'allongement à la rupture. Ces valeurs seront données dans le tableau 2.2.

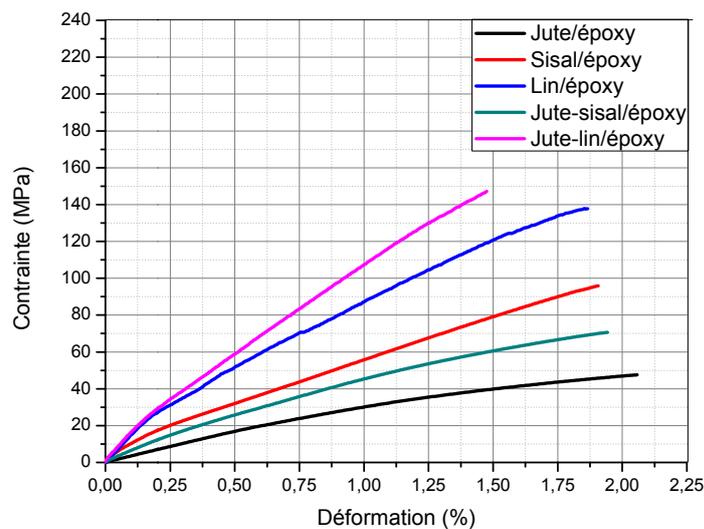


Figure 2.9 : Comportement en traction des stratifiés.

Tableau 2.2 : Caractéristiques mécaniques en traction des différents stratifiés.

| Stratifié | r_{rup} (MPa) | r_{rup} (%) | E (GPa) |
|----------------------------|-----------------|---------------|---------|
| Stratifié jute/époxy | 47.4 | 2 | 2.7 |
| Stratifié sisal/époxy | 95.5 | 1.89 | 8.9 |
| Stratifié lin/époxy | 137.9 | 1.85 | 14.6 |
| Stratifié jute-sisal/époxy | 70.5 | 1.9 | 5.6 |
| Stratifié jute-lin/époxy | 149.8 | 1.47 | 14.7 |

2.5.2 Essai de flexion trois points

Les essais de flexion trois points sont effectués sur des éprouvettes de différents stratifié, de dimensions 100 x10mm. (Figure 2.10). Ces essais sont réalisés sur la machine universelle Zwick/Roll équipée d'un capteur de force de 2.5kN.

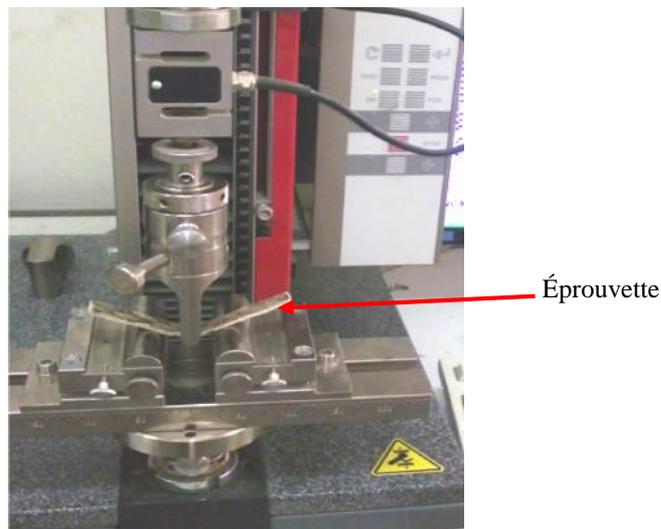


Figure 2.10 : Montage de l'essai de flexion trois points.

La figure 2.11 représente les courbes (contrainte- déformation) lors de l'essai de flexion trois points sur les éprouvettes stratifiées. Le comportement mécanique enregistré par cet essai est non linéaire. La contrainte maximale varie d'un stratifié à l'autre (selon le renfort qui constitue le stratifié) et nous avons enregistré des contraintes résiduelles qui dues à la plasticité de la résine.

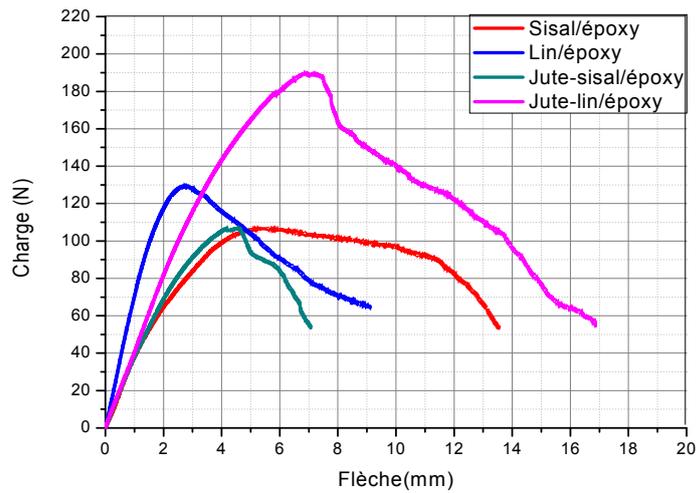


Figure 2.11 : Courbes de flexion 3 points sur stratifiés.

La contrainte de rupture en flexion trois points est calculée par la formule 2.1, avec :

F_{max} : la force maximale de rupture (N) ;

L : la distance entre appuis (mm) ;

b : largeur de l'éprouvette (mm) ;

h : l'épaisseur de l'éprouvette (mm).

$$\sigma_{max} = (3 F_{max} \times L) / (bh^2) \dots(2.1)$$

Le module de flexion est donné par l'équation (2.2), avec :

f : la flèche maximale (mm).

$$E = (FL^3) / (4bh^3) \dots\dots\dots(2.2)$$

Les valeurs de la contrainte et le module de flexion seront données le tableau 2.3.

Tableau 2.3 : Caractéristiques mécaniques en flexion des différents stratifiés.

| Stratifié | Fleche (mm) | (MPa) | E (GPa) |
|----------------------------|-------------|-------|---------|
| Stratifié sisal/époxy | 9.15 | 41.83 | 0.62 |
| Stratifié lin/époxy | 9.11 | 57.5 | 2.84 |
| Stratifié jute-sisal/époxy | 7.07 | 41 | 1.7 |
| Stratifié jute-lin/époxy | 16.87 | 22.44 | 0.54 |

2.6 Analyse thermogravimétrique ATG

L'analyse thermique ATG est effectuée à l'aide de l'appareil de type STA NETZSCH 409. Cette analyse est basée sur la mesure de la chute de masse sous l'effet de la température en atmosphère contrôlée. L'élévation de température commence par 25°C jusqu'à 200°C avec une vitesse de 10°C/min.

Les résultats de cette essai est présentés par la figure 2.13. Les courbes montrent la perte de masse des échantillons.

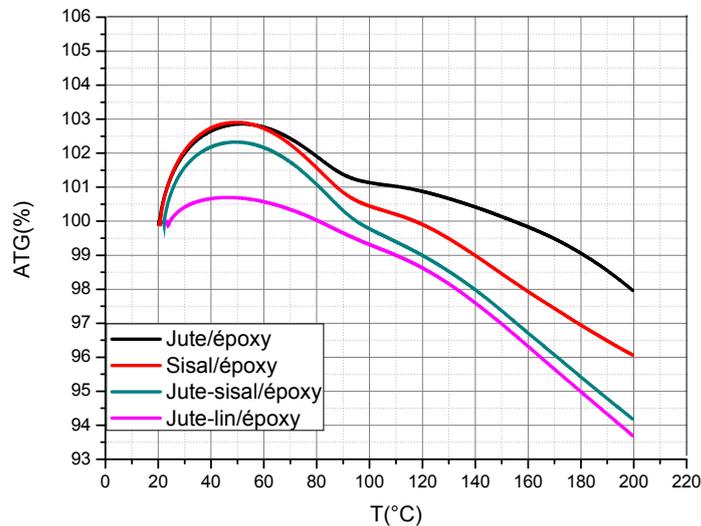


Figure 2.12 : Courbes ATG des différents stratifiés.

Les valeurs de la perte de masse des différents échantillons sont données dans le tableau 2.3.

On remarque une variabilité des valeurs de la perte de masse des stratifiés. Les stratifiés constitués de deux types du renfort représentent des pertes de masse élevées comparés aux stratifiés composés d'un seul type du renfort. Ceci peut s'expliquer du fait que les stratifiés composés de deux renforts absorbent plus de résine lors de l'élaboration par rapport aux stratifiés. Cette résine (INJ812) composée des ajoutes chimiques (diluant) qui s'évaporent sous l'action de la température.

Tableau 2.3 : Les valeurs de perte de masse des différents stratifiés.

| Échantillons | Perte de masse (%) |
|----------------------------|---------------------------|
| Stratifié jute/époxy | 2 |
| Stratifié sisal/époxy | 4 |
| Stratifié jute-sisal/époxy | 5.9 |
| Stratifié jute-lin/époxy | 6.2 |

2.7 Caractérisation du liège

Dans cette étude, nous avons utilisé du liège aggloméré blanc 2/3, fourni par l'entreprise Taleza Liège située à l'Est de l'Algérie. La densité de liège est de 260kg/m^3 , l'épaisseur des plaques utilisées est 10mm. (Fiche technique annexe B).

2.7.1 Essai de cisaillement du liège

Les essais de cisaillement sont réalisés suivant la norme NF EN 12090(1997). L'essai consiste à soumettre une éprouvette d'essai à un effort de cisaillement transmis par l'intermédiaire de supports collés sur l'éprouvette d'essai, puis d'établir la courbe force-déplacement correspondante. Cet essai est effectué sur une machine universelle Zuick/Roll, doté d'un capteur de force de capacité de 10kN. Cette machine est pilotée par ordinateur à l'aide de logiciel TextExpert12.0. La vitesse de déplacement des mors est de 2mm/min. (figure 2.13)

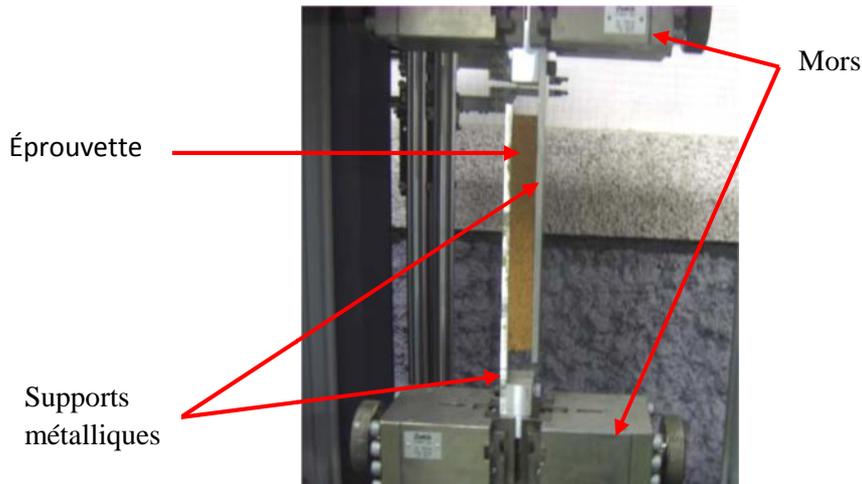


Figure 2.13 : Essai de cisaillement du liège.

La courbe 2.14 représente le comportement du liège en essai de cisaillement. On observe une phase linéaire élastique au début de l'essai allant jusqu'à 245N ; au delà de cette charge, on note un comportement non linéaire jusqu'à la rupture. La charge maximale de rupture est de 970N. Le module de cisaillement du liège aggloméré est de 5.12MP (Le module de cisaillement du liège aggloméré de 11 mm d'épaisseur et de 270 kg/m³ de densité trouvé par Reis et al est de 4,86 MPa pour des granulés allant de 1 mm à 4 mm) [52].

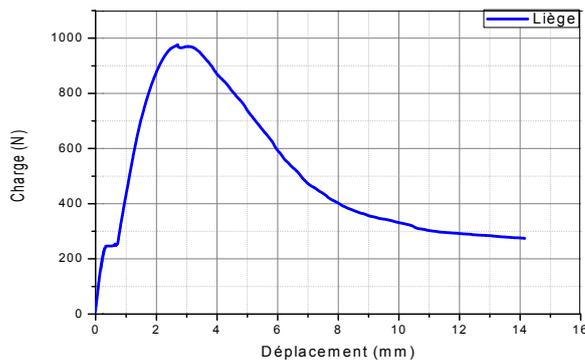


Figure 2.14 : Comportement en cisaillement du liège.

2.7.2 Analyse hygrothermique

2.7.2.1 Séchage en étuve

L'analyse de la variation de la masse du liège en fonction du temps est effectuée à une température de 100°C dans une étuve pendant 24 heures. Les échantillons sont pesés avant l'essai, par la suite, les pesées sont effectuées chaque heure pendant 24 heures pour quantifier la perte de masse.

La figure 2.15 montre la variation de la masse du liège aggloméré en fonction du temps de séchage dans une étuve à 100°C.

Le liège perd dans les 5 premières heures 5% de sa masse, ensuite 0.17% jusqu'à 24 heures.

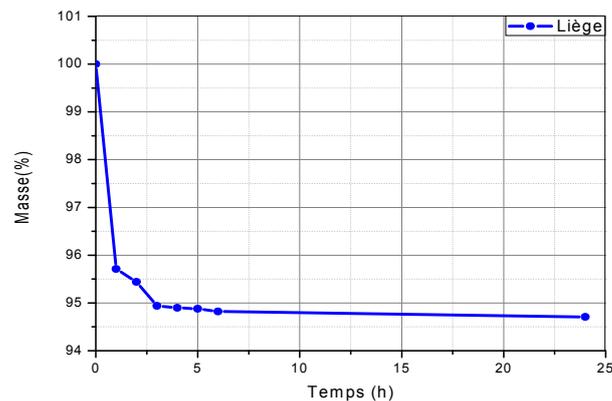


Figure 2.15 : Variation de la masse du liège en fonction du temps de chauffage à 100°C.

2.7.2.2 Analyse thermogravimétrique ATG

L'analyse thermogravimétrique ATG est effectuée en atmosphère contrôlée. Le chauffage des échantillons est commencé par une élévation de température de 25°C jusqu'à 600°C avec une vitesse de 10°C/min afin de voir l'influence de la température de 600°C sur le liège.

La figure 2.16 montre la variation de la masse du liège sans résine et liège avec résine durant l'analyse thermogravimétrique ATG. On remarque une perte de masse faible jusqu'à une température de 220°C, cette perte est de 3% ; au-delà de

cette température, la perte de masse est importante et elle est de 67.17% pour le liège sans résine et de 71.27% pour le liège avec résine, pour des températures qui varient de 220°C jusqu'à 500°C. À partir de cette température, la perte de masse devient faible (2%).

(Le liège avec résine est obtenu par enlèvement des deux semelles d'une sandwich).

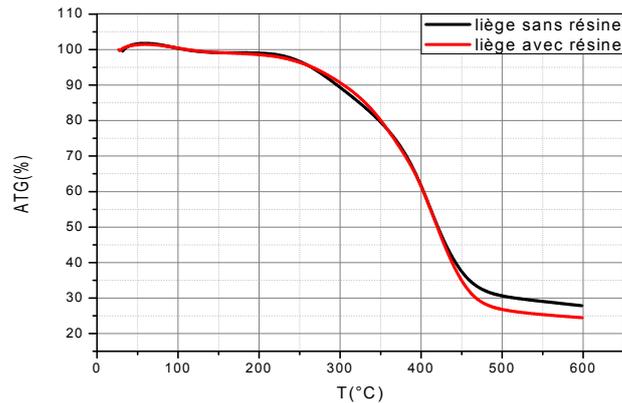


Figure 2.16 : Courbes de l'ATG du lièges.

2.7.2.3 Pouvoir d'absorption d'eau

Les essais du pouvoir d'absorption d'eau sont réalisés par immersion partielle des échantillons dans l'eau pendant 24 heures (selon la norme AFNOR NF 1609 (1997)). Les échantillons sont maintenus par un poids pour ne pas flotter sur l'eau (figure 2.17). L'égouttage des échantillons se fait pendant 10 minutes, les échantillons sont placés à 45°.



Figure 2.17 : Immersion partielle du liège.

Le pouvoir d'absorption d'eau est donné par l'équation 2.3 :

$$W_p = \frac{m_{24} - m_0}{A_p} \quad \dots(2.3)$$

Avec :

W_p : pouvoir d'absorption d'eau (kg/m^2) ;

m_0 : masse initiale (kg) ;

m_{24} : masse après 24 heures (kg) ;

A_p : Aire de l'éprouvette (m^2).

La figure 2.18 donne les valeurs du pouvoir d'absorption d'eau du liège aggloméré sans résine et avec résine en immersion partielle dans un bac d'eau pendant 24 heures.

On remarque que le pouvoir d'absorption du liège aggloméré sans résine est très important comparé au liège avec résine. Le liège sans résine possède un pouvoir d'absorption de l'ordre de 1.86Kg/m^2 et le liège résiné de l'ordre de 0.096Kg/m^2 . Cette différence est liée à l'existence de résine entre les granulés de liège qui empêche l'eau de pénétrer à l'intérieur de liège.

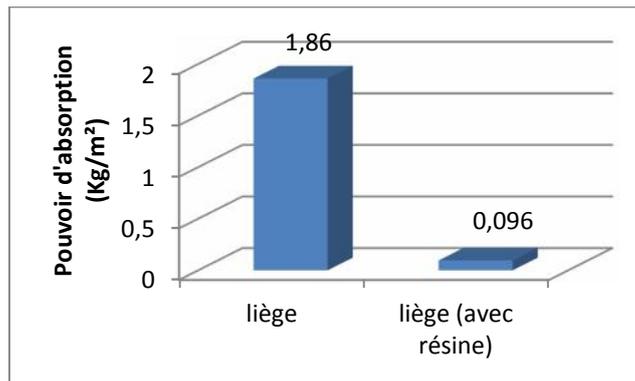


Figure 2.18 : Histogramme du pouvoir d'absorption d'eau des lièges.

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés dans la confection des structures sandwiches de chapitre 3, leur mise en forme, caractérisation mécanique (essai de traction, de flexion trois points et de cisaillement) et les analyses hygrothermiques (ATG, séchage et absorption d'eau).

Chapitre 3 :

**Élaborations, caractérisation
mécanique et analyse hygrothermique
des matériaux sandwiches**

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwiches.

3.1 Introduction

Aujourd'hui, la construction des structures composites est devenue très opportune quant aux conséquences particulières qu'elle entraîne à savoir la réduction du poids et les améliorations structurelles.

Les structures sandwiches sont constituées par deux peaux de grande rigidité, séparées l'une de l'autre par un matériau d'âme de faible densité.

Dans ce chapitre, nous présentons les matériaux composites sandwiches à âme en liège et peaux en renforts naturels (jute, sisal et lin).

Nous nous intéressons à l'étude de leur comportement mécanique en statique et en fatigue cyclique.

Le premier point porte sur une recherche bibliographique sur les structures sandwiches ; par la suite, nous entamons l'étude expérimentale des panneaux sandwiches. Cette partie de l'étude concerne l'élaboration des plaques sandwiches, la caractérisation mécanique en statique (flexion 3 et 4 points, compression perpendiculaire et cisaillement) et en fatigue cyclique à nombre limité des cycles.

Et enfin une analyse hygrothermique donne une idée sur le comportement de ces sandwiches en température et en milieu humide.

3.2 Bibliographie sur les structures sandwiches

De par leur légèreté et de leur rigidité, les composites sandwiches sont utilisées dans nombreuses applications. Beaucoup d'obstacles ont freiné leur développement au début de leur découverte.

Actuellement, les innovations opérées dans les matériaux constitutifs et l'adéquation des procédés de mise en œuvre avec la fabrication en série redonnent un regain d'intérêt des industriels pour ce type de matériaux.

3.2.1 Généralités

3.2.1.1 Bref historique et domaine d'utilisation

Le premier à discuter de l'intérêt à faire travailler deux peaux éloignées de la ligne moyenne a été le Français Duleau en 1920 [37]. Mais les premières applications n'ont débuté qu'une certaine années plus tard avec la naissance de l'industrie aéronautique.

La conception des structures d'aéronefs étant soumise à des impératifs de performances toujours accrues en termes de rigidité, de résistance et de poids, la recherche de construction nouvelle et permanente. Si les débuts de l'aviation ont consacré la construction bois et toile ; la solution peau mince métallique raidie par cadre et lissée a été adoptée dès les années 20. Dans les années 30, les industriels ont envisagé la possibilité de réaliser des éléments de structures en sandwiches fabriqués dans les matériaux de l'époque.

Le procédé Brodeau (1934), consiste en « deux épaisseurs de contreplaqué qui enserrent en sandwich une certaine épaisseur de matière légère, du liège ou de l'aggloméré de liège ». Ce type de solution fut étudié simultanément par les grands pays de la construction aéronautique d'avant-guerre et fut appliqué ponctuellement à la conception de certains éléments de structure (Avion Lignel (1938,F), schneider 1938,F), De havilland Albatros(1938,GB), Skydine (1938,USA)).

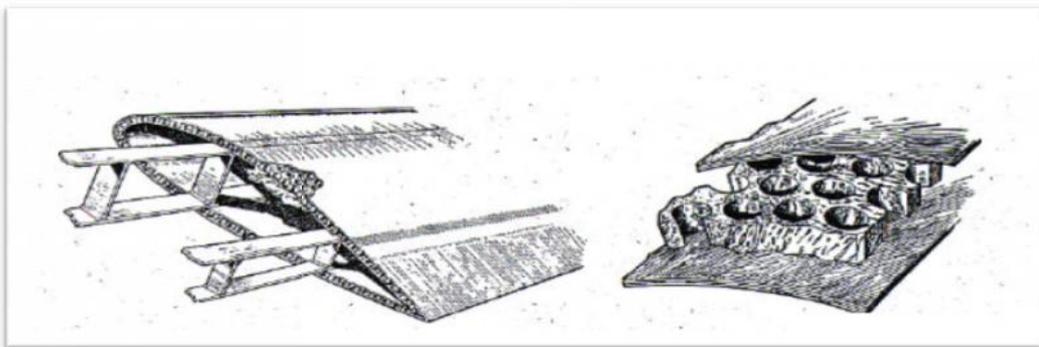


Figure 3.1: Procédé Brodeau (D'après "Quinze Ans d' Aéronautique Française: 1932-1947")

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwichs.

L'application la plus popularisée qui marquera le réel début de la construction sandwich fut le bombardier De Havilland Mosquito (1943, 7741 exemplaires), l'extrados de l'aile était construit avec de sandwich peau contre plaqué, cœur balsa. [38,39]



Figure 3.2 : Avion Mosquito produit par De Havilland au cours de la seconde guerre mondiale.

Par la suite, l'utilisation de sandwichs à peau métallique se généralisa y compris pour des éléments de structure primaire. L'apparition des fibres de verre tissées et de résines performantes au début des années 50, permit la fabrication des premiers sandwichs à peau composites et cœur nid d'abeille [38]. Ils furent, en France, appliqués à des éléments de structures secondaires de l'avion vautour (1953).

Le fait du pouvoir construire léger et rigide intéresse de nombreux autres domaines. Les premiers coques de bateau en fibres de verre (Balsa datent du début des années 60 et l'utilisation dans ce domaine prend de l'ampleur avec l'arrivée de frégates militaires furtives et de bateaux et de bateaux de grande vitesse [40] [41].

Par ailleurs, les impératifs de diminution de l'émission de CO_2 conduit les constructeurs automobiles à changer de technologie et à rechercher des solutions sandwichs pour construire des structures plus légères.

Les mêmes contraintes conduisent à l'apparition de construction hybrides sandwichs /aluminium dans le matériel ferroviaire [42].

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwichs.

Le génie civil utilise aussi des sandwichs pour réaliser des voute de grandes portées [43].

D'une manière générale, on trouve des sandwichs dans toutes les applications où le rapport rigidité /masse volumique apparente de la structure doit être le plus élevé.

3.2.1.2 Éléments constituant les sandwichs

Les sandwichs sont constitués de deux peaux (semelles) éloignées l'une de l'autre par une âme (ou cœur) creuse ou plane, qui maintient leur écartement.

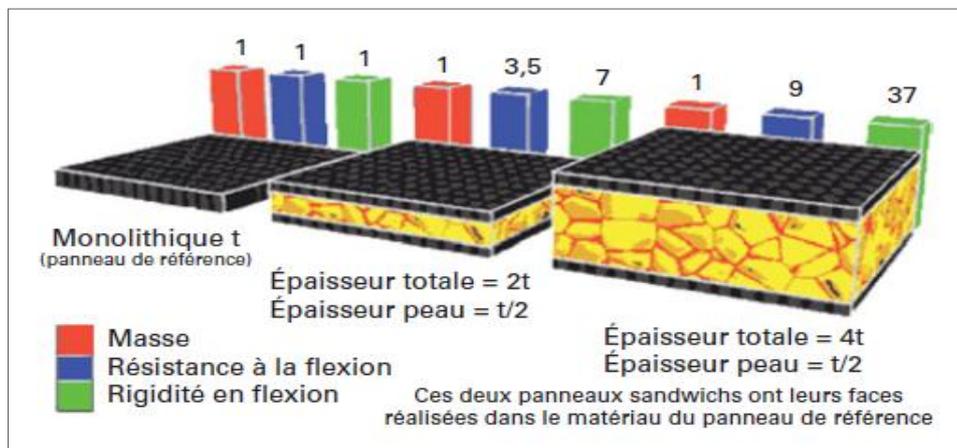


Figure 3.3 : Comparaison des performances mécaniques en flexion entre un panneau de référence et deux panneaux sandwichs.[44]

Les peaux sont constituées le plus souvent :

- Pour les composites à moyennes et hautes performances, des stratifiés à matrice polymère et d'un renfort fibreux ;
- Pour les structures portantes, des tôles métalliques ;
- Pour les structures de moyennes à faibles performances, de bois, laminée, stratifié, contre-plaqué.

Les âmes sont souvent classées en deux grandes catégories : les âmes pleines et creuses.

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwiches.

Les matériaux les plus couramment utilisés pour les âmes pleines sont :

- Le balsa, qui fut les premiers matériaux utilisés pour les structures sandwichs ;
- Les mousses de polymère expansé (mousses de poly méthane (pur), polyvinylique PVC,.....) ;
- Les résines thermodurcissables dans les quelles ont été incorporées des charges creuses (microbilles de verre,.....)
- Les âmes creuses, type nid d'abeilles très utilisées dans l'industrie aéronautique, les matériaux sont des feuillets d'alliages légères, en particulière à base d'aluminium, des feuilles de papier Kraft ou papier Nomex %o [45] généralement trempées dans une résine phénolique ou polyamide, voir polyester, ou insaturé, encore des voiles de renforts (verre, carbone, aramide) imprégnés de résines polyester insaturé, phénolique,..... .

3.2.1.3 Modes de dégradations des sandwiches

Dans ce paragraphe, on présente des différentes modes de rupture des structures sandwiches soumis à la flexion [45, 46, 47].

3.2.1.3.1 Flambement généralisé des peaux

L'endommagement par flambement des peaux est dû à une instabilité en compression d'un parement. Les cœurs à structure périodique creuse favorise ce mode d'endommagement. La charge qui cause ce flambement dépend de paramètres tel que les dimensions de sandwich, le type de sandwich, la rigidité en flexion, l'épaisseur des peaux, l'épaisseur et le module de cisaillement de l'âme.

Si l'on craint un flambement généralisé, on peut utiliser des peaux ayant un module d'élasticité plus élevés, augmenter l'épaisseur des peaux, augmenter l'épaisseur de l'âme ou encore utiliser pour l'âme un matériau avec un module de cisaillement plus élevé.

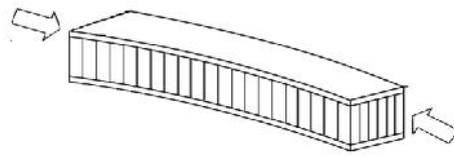


Figure 3.4 : Flambement généralisé des peaux du sandwich.

3.2.1.3.2 Rupture des peaux en traction ou en compression

Il s'agit des cas où les contraintes dans les peaux sont supérieures aux contraintes admissibles pour les matériaux constituant les peaux.

Ce phénomène peut être évité en utilisant un matériau dont les contraintes à rupture sont plus élevées, en augmentant l'épaisseur de l'âme (ce qui permet également de réduire les contraintes dans les peaux).

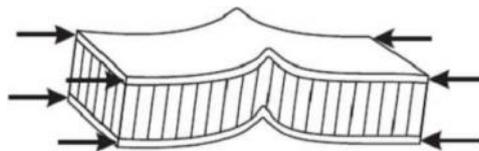


Figure 3.5 : Rupture des peaux en traction ou en compression.

3.2.1.3.3 Mode locaux de rupture

L'indentation locale est un mode localisé de rupture dû à une concentration de contraintes résultants, soit de l'application de contraintes localisée, soit de la position d'un appui de type ponctuel ou linéique.

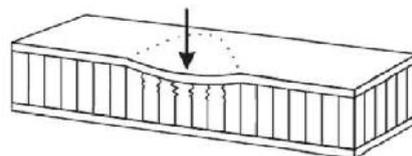


Figure 3.6 : Modes locaux de rupture par indentation.

3.2.1.3.4 Rupture de l'âme en cisaillement

Si la contrainte de cisaillement (prépondérante dans l'âme) dépasse la résistance au cisaillement du matériau de l'âme, il y a rupture de l'âme.

Pour résoudre ce problème, on peut soit utiliser un matériau d'âme possède une résistance au cisaillement plus élevée, soit augmenter l'épaisseur de l'âme.

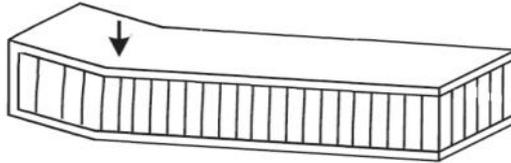


Figure 3.7 : Rupture de l'âme en cisaillement.

3.2.1.3.5 Flambement généralisé de l'âme ou « crimping »

Si le rapport longueur/épaisseur est relativement faible, et que la rigidité de cisaillement est négligeable devant la rigidité de flexion, le flambement généralisé prend la forme du flambement de l'âme. Pour augmenter la résistance à cette critique, il faut donc soit augmenter l'épaisseur de l'âme, soit utiliser une âme avec un module de cisaillement plus élevé.

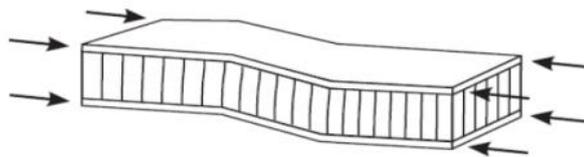


Figure 3.8 : Flambement généralisé de l'âme du sandwich.

3.2.1.3.6 Flambement localisé « wrinkling » ou « dimpling »

Les peaux, sans connexion avec l'âme, flambent très facilement à cause de leur faible épaisseur, c'est l'âme qui empêche leur flambement. Cependant, si on atteint la contrainte limite, il se peut que l'âme ne soit pas plus capable d'empêcher le

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwichs.

flambement. Dans ce cas, le flambement localisé des peaux ou « wrinkling » se produit.

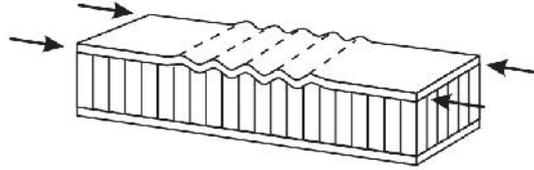


Figure 3.9 : Flambement localisé « wrinkling »

Contrairement au flambement généralisé, le flambement localisé peut prendre des configurations différentes qui ne dépendent pas de la géométrie de la structure.

Par contre, il est influencé par les modules élastiques des peaux et de l'âme, et le module de cisaillement de l'âme.

Dans le cas d'une âme en nid d'abeille, mise à part les ruptures par « wrinkling », il peut s'en produire un autre mode de rupture ou flambement localisé de la peau par fossettes, appelé « dimpling ».

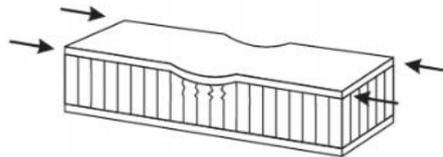


Figure 3.10 : Flambement localisé «dimpling»

3.2.1.3.7 Dégradation de l'adhésive : (dégradation de l'interface peau/âme ou délaminage)

Ce type d'endommagement est contrôlé par la qualité de l'interface âme/peaux. Puisque les propriétés de l'interface sont beaucoup plus dispersées et beaucoup moins accessibles que les matériaux constitutifs, et puisque ce type d'endommagement est catastrophique, le type d'interface et le procédé utilisé sont

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwichs.

généralement choisis pour assurer une cohésion supérieure à la limite à la rupture du matériau du cœur.

Zinkert considère que la présence des défauts dans les structures sandwichs est due aux deux causes [37], les endommagements engendrés par le mode de fabrication. Les défauts peuvent déjà exister dans la fabrication des différents constituants des matériaux, tels que les fissures et les parasites dans les peaux, les délaminages entre les peaux stratifiés et l'âme, la porosité élevée de certaines âmes en mousses cellulaire par exemple.

3.2.2 Comportement mécanique des structures sandwichs en statique et en fatigue

Les structures sandwichs sont déjà couramment utilisées dans l'industrie et leur excellente propriété en flexion est donc largement traitée dans la littérature. Les travaux d'Allen [48] ou de Zenkert [37] modélisent le comportement mécanique des sandwichs avec des âmes de différentes natures en utilisant un modèle simplifié (le comportement de peaux considère comme linéaire et l'âme comme étant rigide ; les déplacements dans l'âme sont considérés linéaires).

Frostig et al [49] ont actualisé et amélioré ces travaux grâce à la prise en compte des chargements localisés en utilisant un modèle d'ordre élevé (HOPST : High Order sandwich Panel Theory). L'expression « ordre élevé » fait référence au non linéarité qui caractérise les déplacements dans l'âme et qui permet d'expliquer les phénomènes d'indentation.

3.2.2.1 Comportement des sandwichs en statique

Les essais de flexion 3 et 4 points permettent de déterminer les éléments suivants :

- ✓ Caractéristiques élastique des peaux (flexion 4 points) et de l'âme (Flexion 3points) avec une bonne fiabilité ;
- ✓ Résistance de l'âme ou des peaux suivant les modes de ruptures.

3.2.2.1.1 Flexion 3 points

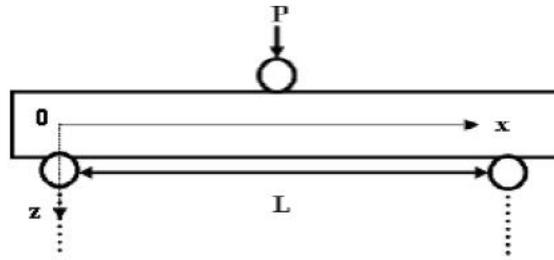


Figure 3.11 : Flexion trois-points.

Dans le cas d'un chargement central d'une poutre (figure 3.11)

- Le moment fléchissant s'écrit :

$$M = \frac{Px}{2} \quad \text{Pour } 0 < x < \frac{L}{2} \quad (3.1)$$

$$M = \frac{P(L-x)}{2} \quad \text{Pour } L/2 < x < L \quad (3.2)$$

Avec P : étant la charge appliquée et x la distance par rapport à l'origine.

- L'effet tranchant s'écrit :

$$T = -\frac{P}{2} \quad \text{pour } 0 < x < L/2 \quad (3.3)$$

$$T = \frac{P}{2} \quad \text{pour } L/2 < x < L \quad (3.4)$$

- Les contraintes de traction ou de compression dans les peaux sont alors :

$$\delta_f = \frac{Mz}{D} E_f \quad \text{pour } \frac{t_c}{2} \leq z \leq \frac{h}{2} \quad \text{et} \quad -\frac{h}{2} \leq z \leq -\frac{t_c}{2} \quad (3.5)$$

Avec : t_c : épaisseur de l'âme ;

t_f et E_f : sont respectivement l'épaisseur et le module de d'élasticité du peau.

D : rigidité en flexion du sandwich.

Le maximum étant obtenu pour $z = \pm \frac{h}{2}$ et $x = \frac{L}{2}$; on obtient :

$$\delta_{fmax} = \pm \frac{PLh}{8D} E_f \quad (3.6)$$

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwichs.

Pour l'âme nous obtenons :

$$\delta_c = \frac{M.z}{D} E_c \quad \text{si } -\frac{t_c}{2} < z < \frac{t_c}{2} \quad (3.7)$$

Les contraintes planes maximales supportées par l'âme s'expriment alors pour :

$$\delta_{cmax} = \frac{PLt_c}{8D} E_c \quad (3.8)$$

- En ce qui concerne la contrainte de cisaillement τ_c dans l'âme, du fait de l'hétérogénéité de la structure, on tient compte de changement de module d'élasticité dans la section transversale, d'où

$$\tau_c = \frac{T}{Db} \sum S.E \quad (3.9)$$

Avec

b : largeur au niveau z_1 et S : moment statique par rapport à l'axe (oy) pour le quel $z < z_1$, la distribution des contraintes de cisaillement est illustrée sur la figure 3.12.

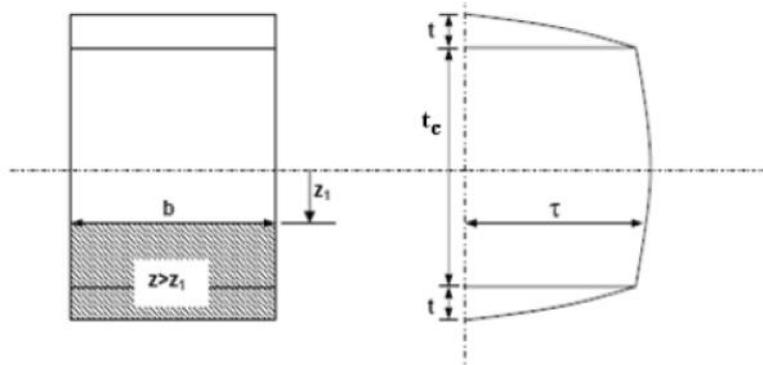


Figure 3.12 : Répartition des contraintes de cisaillement [47]

Dans l'expression (3.9) : D est la rigidité en flexion de la structure et ($\sum S.E$) représente la somme des produits de toutes parties de la section pour les quelles $z < z_1$.

Cette somme peut s'écrire sous la formule suivante :

$$S.E = E_f \frac{bt_f d}{2} + \frac{E_c b}{2} \left(\frac{t_c}{2} - z \right) \left(\frac{t_c}{2} + z \right) \quad (3.10)$$

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwiches.

D'où la contrainte de cisaillement dans l'âme au niveau z :

$$\tau_c = \frac{T}{D} \left[E_f \frac{t_f d}{2} + \frac{E_c}{2} \left(\frac{t_c^2}{4} - Z^2 \right) \right] \quad (3.11)$$

Cette contrainte est maximale au centre de sandwich et vaut :

$$\tau_{cmax} = \frac{P}{4D} \left(E_f t_f d + E_c \frac{t_c^2}{4} \right) \quad (3.12)$$

De plus, sachant que $E_f > E_c$, on peut négliger le terme tenant compte du module de Young de l'âme. La contrainte de cisaillement maximale s'écrit alors :

$$\tau_{cmax} = \frac{P}{4D} E_f t_f d \quad (3.13)$$

La rigidité en flexion D est la grandeur caractéristique d'un matériau sandwich, est donnée pour la relation suivante :

$$D = \int E b z^2 dz = \frac{E_f b t_f^3}{6} + 2 E_f b t_f \left[\frac{d}{2} \right]^2 + \frac{E_c b t_c^3}{12} = \frac{E_f b t_f^3}{6} + \frac{E_f t_f b d^2}{2} + \frac{E_c b t_c^3}{12}$$

$$D = 2D_f + D_0 + D_c \quad (3.14)$$

Avec :

t_f et E_f : sont respectivement l'épaisseur et le module d'élasticité du matériau peau ;

t_c et E_c : sont respectivement l'épaisseur et le module d'élasticité du matériau d'âme ;

$2D_f$: rigidité des peaux par rapport à leur propre axe neutre ;

D_0 : contribution à la rigidité en flexion des peaux par rapport à l'axe neutre du sandwich au centre de l'âme pour un sandwich symétrique ;

D_c : rigidité apportée par l'âme par rapport à son axe neutre.

En fonction des caractéristiques, un certain nombre d'approximation sont utilisées :

- L'approximation de peaux minces :

$$\frac{2D_f}{D_0} < 0.01 \quad \text{si} \quad 3 \left[\frac{d}{t_f} \right]^2 > 100 \quad \text{or} \quad \frac{d}{t_f} > 5,77 \quad (3.15)$$

- Les approximations d'âme faible :

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwiches.

$$\frac{D_c}{D_0} < 0.01 \quad \text{si} \quad \frac{6E_f t_f d^2}{E_c t_c^3} > 100 \quad (3.16)$$

Si les deux relations ci-dessus sont satisfaites, la rigidité en flexion est limitée à :

$$D \simeq E_f \frac{b t_f d^2}{2} \quad (3.17)$$

Remplaçant la relation (3.17) dans la relation (3.13) ; on obtient la contrainte maximale de cisaillement dans l'âme :

$$\tau_{cmax} = \frac{P}{2db} \quad (3.18)$$

Nous pouvons constater que τ_{cmax} est constante dans l'épaisseur de l'âme.

Si maintenant, on observe une partie de la structure sandwich soumise à la flexion (figure 3.13), nous pouvons constater que les points a,b,c et d qui étaient alignés avant le chargement ne le restent pas. Les sections droites des peaux, par rapport à leur propre axe neutre, restent droites. Ceci n'est pas le cas pour l'âme, qui subit une déformation en cisaillement.

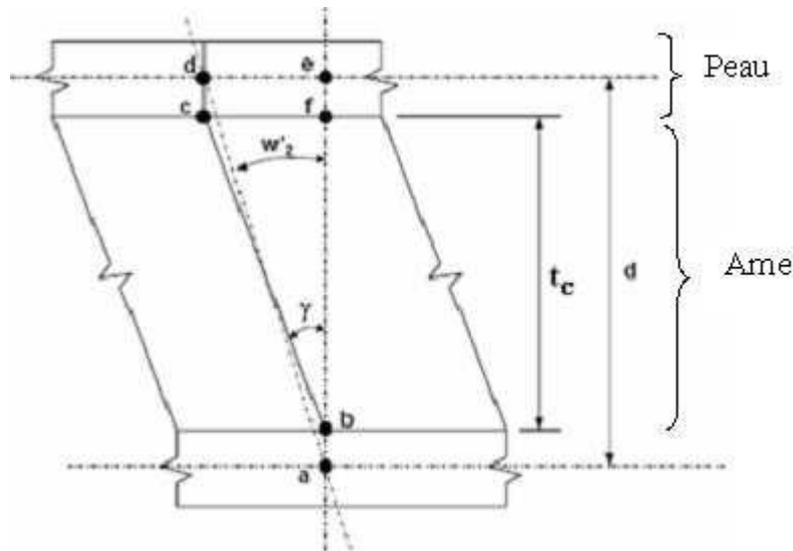


Figure 3.13 : Déformation en cisaillement dans l'âme.

Le déplacement mesuré, pour un matériau sandwich soumis à la flexion trois points, se compose de deux parties indépendantes [47] :

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwiches.

- Le déplacement dû à la flexion w_1 ;
- Le déplacement dû au cisaillement w_2 ;

Avec :

$$W_t = W_1 + W_2.$$

La flèche due à la flexion peut être calculée par la théorie classique de la flexion :

$$W_1 = \frac{PL^3}{48D} \quad (3.19)$$

Le déplacement dû au cisaillement w_2 est obtenu par l'intégration de l'expression :

$$\frac{\partial w_2}{\partial x} = \gamma \frac{c}{d} ; \text{ Ce qui donne : } W_2 = \frac{PL}{4S}$$

$$W_t = W_1 + W_2 = \frac{PL^3}{48D} + \frac{PL}{4S} \quad (3.20)$$

3.2.2.1.2 Flexion 4 points

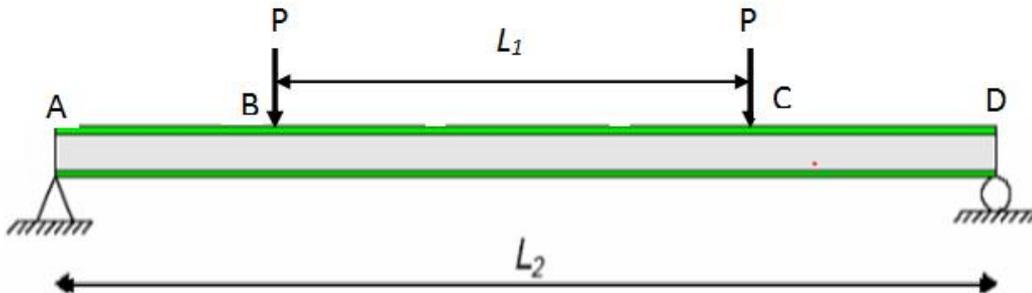


Figure 3.14 : Flexion 4 points

Dans le cas de chargement d'une poutre en deux points (figure 3.14),

- le moment fléchissant s'écrit :

$$M = \frac{P(L_2 - L_1)}{2} \quad \text{pour } B < x < C \quad (3.21)$$

Où L_1 : distance entre les appuis intérieurs (BC) ;

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwiches.

L_2 : la distance entre les appuis extérieurs (AD)

- L'effort tranchant T :

$$T = 0 \quad \text{pour } B < x < C$$

$$T = -P \quad \text{pour } A < x < B$$

$$T = P \quad \text{pour } C < x < D$$

- Les contraintes de traction ou de compression dans les peaux sont alors :

$$\delta_f = \pm \frac{M}{t_f d} \quad (3.22)$$

- La contrainte maximale entre les appuis intérieurs s'écrit :

$$\delta_{fmax} = \frac{P(L_2 - L_1)}{2t_f b d} \quad (3.23)$$

La contrainte de cisaillement maximale dans l'âme est donnée par la formule suivante :

$$\tau_{cmax} = \frac{P}{2bd} \quad (3.24)$$

Le déplacement mesuré pour une poutre sandwich aux points de chargement ($\frac{L_2}{2}$)

et $(L_2 - L_1)/2$ est la somme d'une contribution classique due à la flexion w_1

et d'une contribution due à cisaillement de l'âme w_2 de sorte que $w_t = w_1 + w_2$ avec :

- Au point $L_2/2$:
$$w_1 = \frac{11PL_2^3}{768D} \quad (3.25)$$

$$w_2 = \frac{PL_2}{8S} \quad (3.26)$$

- Au point de chargement $(L_2 - L_1)/2$:

$$w_1 = \frac{P(L_2 - L_1)^2(L_2 + 2L_1)}{48D} \quad (3.27)$$

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwiches.

$$W_2 = \frac{P(L_2 - L_1)}{4S} \quad (3.28)$$

$$W_t = W_1 + W_2 = \frac{P(L_2 - L_1)^2 (P(L_2 + 2L_1))}{48D} + \frac{P(L_2 - L_1)}{4S} \quad (3.29)$$

Avec

S: est la rigidité en cisaillement; et pour un sandwich de peau fines et d'âme de faible module d'élasticité, est calculée par la relation :

$$S = G_c \frac{bd^2}{t_c} \quad (3.30)$$

Où :

G_c : module de cisaillement de matériau âme ;

b : largeur du sandwich.

3.2.2.2 Comportement des structures sandwiches en fatigue

Le phénomène de fatigue est rencontré fréquemment dans de nombreux domaines industriels qui mettent en jeu des sollicitations cycliques.

Ce phénomène se caractérise par la rupture du matériau après application d'un grand nombre de sollicitation dont l'amplitude est inférieure à la résistance à la rupture statique du matériau.

Pour les matériaux composites, en particulier les composites sandwiches, le phénomène de fatigue reste peu maîtriser ce qui limite leur utilisation.

Au cours des ces dernières années, les travaux effectués dans la littérature ont montré que le phénomène de fatigue dépend de plusieurs paramètres (nature de sollicitation, chargement, fréquence de sollicitation, etc)

Des travaux expérimentaux récents ont été effectués sur des composites sandwiches dont les peaux en fibres de verre et l'âme en mousses ou nid d'abeille [47, 50, 51,1]

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwiches.

Les essais de fatigue peuvent être effectués en flexion, en compression, en traction, en torsion ou en cisaillement. Ces essais peuvent être de faible sollicitations mais à des fréquences élevées (fatigue-vibration) et aussi à faibles fréquences mais à forte sollicitations (la fatigue plastique ou olygocyclique).

Les différents types de formes d'onde de chargement sont sinusoïdale, triangulaire, carré et aléatoire.

Il ya généralement deux types de sollicitation : force imposée et déplacement imposé.

- ▶ Force imposée : l'essai est piloté en force : l'amplitude et la fréquence de ce signal reste constante pendant l'essai et dans ce cas, c'est la déformation qui varie. Si sous l'application de la force, le champ des contraintes dans l'éprouvettes est homogène, alors le mode de l'essai est à « contrainte imposée » (la contrainte est identique à chaque point de l'éprouvette).
- ▶ Déplacement imposé : le signal de sollicitation appliquée à l'éprouvette est un signal de déplacement avec une amplitude et une fréquence constante.

La force nécessaire pour créer ce déplacement évolue au cours de l'essai. Si le champ de déformation dans l'éprouvette est homogène, le mode de l'essai est alors à « déformation imposée » est identique en chaque points de l'éprouvette.

3.3 Elaboration des plaques sandwiches

Les plaques sandwiches ont été élaborées au sein de l'URMPE.

Différentes plaques sandwiches sont élaborées. Elles sont constituées du liège aggloméré blanc d'épaisseur de 10 mm pour l'âme, et pour les peaux, nous avons utilisé des nappes en fibre naturelles (fibres de lin, de jute et de sisal).

Les plaques du liège sont découpées aux dimensions 300x300mm (NF T 57-105).

Pour les peaux, les nappes utilisées sont considérées unidirectionnelles (sens chaîne).

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwichs.

Les caractéristiques principales de la résine INJ812 utilisée dans l'élaboration des sandwichs sont données dans le chapitre 2 (§ 2.4).

3.3.1 Fabrication des plaques par la méthode d'infusion (sous vide) en "one shoot"

L'élaboration est effectuée en une seule étape par la méthode d'infusion en « One shoot ». Le principe de la méthode de fabrication des plaques sandwichs est identique à celle utilisée pour les plaques stratifiées que nous avons vu dans le deuxième chapitre (§ 2.4). Cette technique est limitée par la viscosité de la résine et le début de la réticulation, ainsi que par la forme et la perméabilité du renfort.

Le mécanisme de l'infusion (sous vide) consiste à remplacer progressivement le vide par la résine.

Une fois la résine traverse toute la plaque, cette dernière reste sous dépression de pompe sous vide pendant 8 heures jusqu'à vitrification complète de la matrice, après démoulage de la plaque, elle est mise dans une étuve à 80°C pendant 8 heures afin d'améliorer le taux de réticulation.

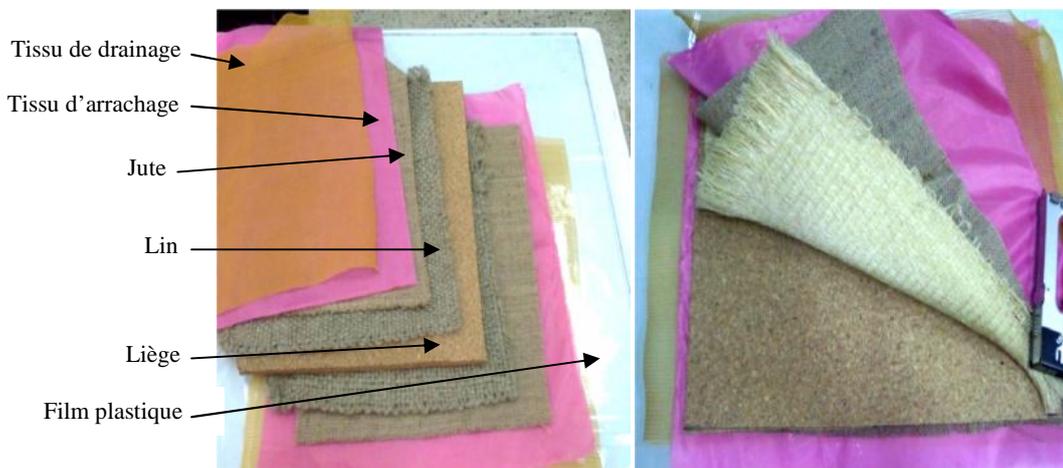


Figure 3.15 : Disposition des éléments constitutifs de la plaque et les tissus d'élaboration.

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwichs.

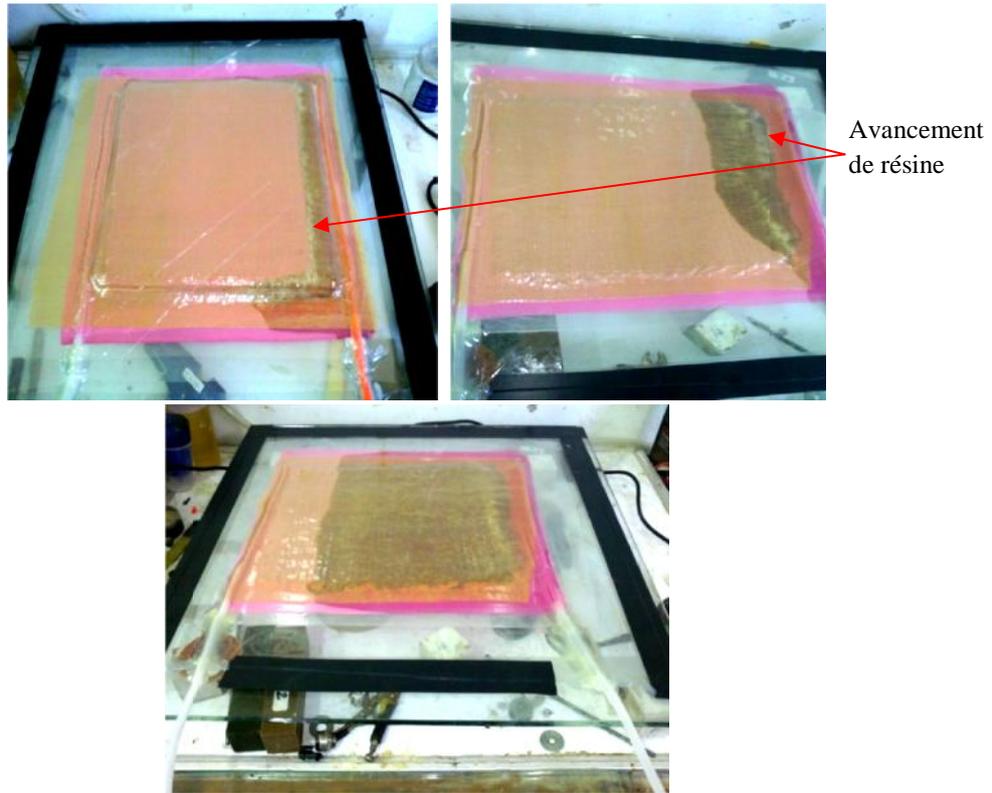


Figure 3.16 : Avancement de résine à travers la plaque sandwich.

La découpe des échantillons des sandwichs est effectuée à l'aide d'une scie circulaire.



Figure 3.17 : Éprouvettes des essais : (1) jute, (2) lin, (3) sisal.

Le tableau suivant donne la classification et l'appellation des différents types des sandwichs.

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwichs.

Tableau 3.1 : classification et appellation des sandwichs en fonction des types des renforts.

| Peau | liège | Sandwich |
|-------------------|--------------|-----------------|
| Jute/epoxy | C260 – 10 | SD-J |
| Sisal/ epoxy | C260 – 10 | SD-S |
| Lin/ epoxy | C260 – 10 | SD-L |
| Jute-sisal/ epoxy | C260 – 10 | SD-J/S |
| Jute-lin/ epoxy | C260 – 10 | SD-J/L |

3.4 Procédures expérimentales

La caractérisation mécanique des sandwichs que nous allons réaliser dans cette partie de l'étude est basée dans un premier temps sur des essais statiques de type flexion 3 et 4 points suivant la norme AFNOR NF T54-606(1987) pour déterminer la rigidité en flexion, la rigidité en cisaillement ainsi que le module de cisaillement de l'âme du sandwich. Des essais de cisaillement sont aussi effectués afin de comparer le module de cisaillement par deux méthodes de calcul (NF T54-606 et NF EN12090). Des essais de compression perpendiculaire sont effectués dans le but de clarifier le comportement du liège (âme de sandwich). Ensuite des essais dynamiques de flexion 3 et 4 points à nombre de cycles donné, sont réalisés pour étudier le comportement des sandwichs en fatigue cyclique. Les éprouvettes ayant subis des essais de fatigue sont testées en statique (flexion 3 et 4 points) afin d'évaluer les propriétés et les contraintes résiduelles des composites sandwichs après fatigue.

En fin, et pour enrichir le travail, des analyses hygrothermiques (séchage en étuve, pouvoir d'absorption) sont effectuées sur les différents types des sandwichs.

3.5 Caractérisation mécanique en statique des sandwichs

La caractérisation des échantillons sandwichs est effectuée à travers des essais de flexion 3 et 4 points suivant la norme AFNOR NF T54-606 (1987).

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwiches.

Cette caractérisation permet de déterminer :

- ✓ La rigidité en flexion de la structure sandwich «D »;
- ✓ La rigidité en cisaillement de la structure sandwich « N »;
- ✓ Le module de cisaillement de l'âme de structure sandwich « G_a ».

3.5.1 Essai de flexion trois points

Les essais de flexion 3 points sont effectués sur une machine universelle de type Zwick/Rolle ZO10 au niveau de l'unité de recherche UR-MPE (Figure 3.18), dotée d'un capteur de force de capacité 10 kN. Cette machine est pilotée par ordinateur à l'aide du logiciel TextXpert 12.0 qui enregistre la courbe (force – déplacement). La vitesse d'avance est de 2mm/mn.

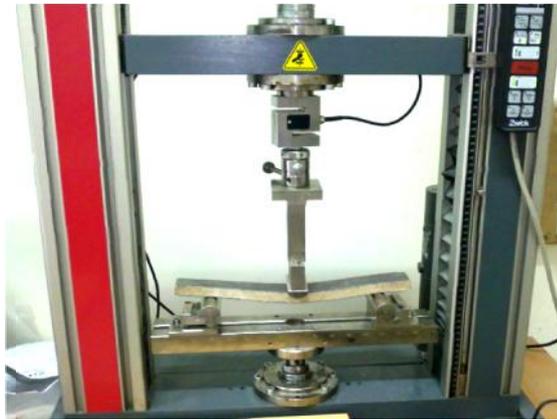


Figure 3.18 : Essai de flexion 3 points.

La figure 3.19 donne l'évolution de la force appliquée en fonction de déplacement pour les différents types des sandwiches. Cette évolution se déroule principalement en trois phases :

- ✓ la première phase correspond à une augmentation linéaire de la force appliquée avec le déplacement ;
- ✓ la deuxième phase de comportement non linéaire dans laquelle la charge maximale est atteinte ;

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwichs.

- ✓ la troisième et la dernière phase où l'on observe une diminution de force appliquée jusqu'à la rupture des certaines éprouvette.

On observe que les sandwichs dont les peaux composées de deux nappes de différente nature (jute-sisal, jute-lin) donnent des charges maximales supérieures par rapport à ceux des sandwichs dont les peaux constituées d'une seule nappe de renfort.

Parmi les trois types des renforts utilisés, le SD-S donne la charge à la rupture la plus faible (environ 416N) par rapport aux deux autres échantillons (jute et lin). La combinaison de sisal et le jute donne un sandwich qui peut supporter une charge maximale de 743N pour un allongement de 15mm. Pour le SD-L, la charge maximale atteinte est de 579N c'est-à-dire 39% plus grande à celle de SD-S, par conséquent, le SD-J/L possède la charge à la rupture la plus grande (environ 985N pour un allongement de 16mm).

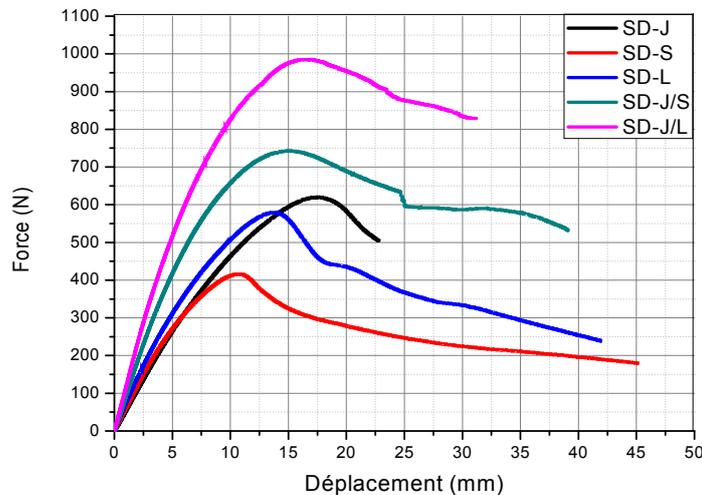


Figure 3.19 : Courbes (force-déplacement) en flexion 3 points des différents types des sandwichs.

3.5.1.1 Analyse des modes de rupture en flexion trois points

D'après les observations des éprouvettes des sandwichs testés (figure 3.20),

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwiches.

deux modes de rupture ont été observés : une rupture totale de l'éprouvette et une rupture par indentation de la peau supérieure.

On note que la rupture totale des éprouvettes ne s'est produite que dans les sandwiches constitués du renfort en jute (SD-J, SD-J/S et SD-J/L). La rupture de ces derniers se fait par une rupture sur le long de la semelle inférieure, puis elle se propage à l'intérieur de l'âme, ensuite l'éprouvette se casse en deux parties sous l'effet de la charge appliquée en son milieu (figures 3.20(a),(d) et (e)).

Pour les deux autres sandwiches SD-S et SD-L, on observe une rupture par indentation importante de la peau supérieure au point d'appui central (figures 3.20(b) et (c)). Dans ces deux cas, le renfort en sisal (ou en lin) seul a permis la compression de la peau supérieure qui, en se déformant, a créé un chargement localisé sur l'âme en liège, et la traction de la peau inférieure sans qu'il y a une rupture.



(a)

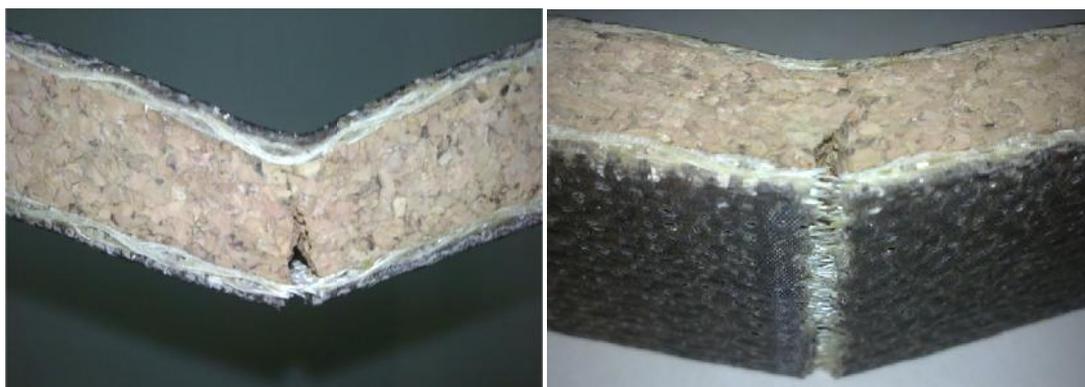


(b)

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwichs.



(c)



(d)



(e)

Figure 3.20: Modes de rupture en essai de flexion trois points des différents sandwichs.

Le tableau 3.2 donne les différentes valeurs obtenues à partir de l'essai de flexion 3 point. (NF T54-606)

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwichs.

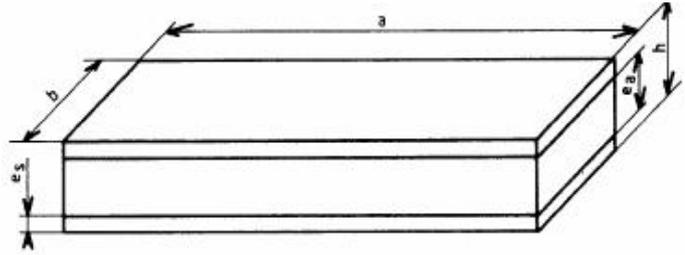


Figure 3.21 : Représentation d'un sandwich
(deux peaux et une âme).

d_1 : Distance entre appuis (mm) ;

P_1 : Charge maximale (N) ;

W_1 : Allongement à la charge maximale (mm) ;

σ_1 : Contrainte (MPa).

Tableau 3.2 : Résultats de l'essai de flexion trois points pour les différents sandwichs.

| Sandwich | h(mm) | e_a (mm) | e_s (mm) | b(mm) | d_1 (mm) | P_1 (N) | W_1 (mm) | σ_1 (MPa) |
|---------------|-------|------------|------------|-------|------------|-----------|------------|------------------|
| SD-J | 13.09 | 10 | 2.07 | 41.15 | 250 | 620 | 14.5 | 39.4 |
| SD-S | 13.87 | 10 | 1.65 | 42.64 | 250 | 479 | 10.23 | - |
| SD-L | 15.43 | 10 | 2.47 | 43.25 | 250 | 579 | 13.7 | - |
| SD-J/S | 16.31 | 10 | 2.51 | 42.4 | 250 | 743 | 15.1 | 33 |
| SD-J/L | 17 | 10 | 2.87 | 42.86 | 250 | 985 | 16.9 | 37.04 |

3.5.2 Essai de flexion quatre points

Les essais de flexion quatre points sont effectués sur la machine utilisée pour les essais de flexion trois points. Nous avons gardé les mêmes conditions expérimentales.

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwiches.



Figure 3.22 : Essai de flexion quatre points.

La figure 3.23 représente la courbe (charge- déplacement) des sandwiches. On note des comportements déjà reportés lors de l'essai de flexion trois points. Le SD-S présente toujours la charge la plus faible dans la série des sandwiches testés, cette charge est de 922 N. Pour le SD-L, la charge maximale est de 1030N c'est-à-dire une augmentation de 11% seulement par rapport à la charge maximale atteinte par le SD-S, mais pour le SD-J/L supporte une charge maximale de 38% plus grande par rapport à celle de SD-J/S.

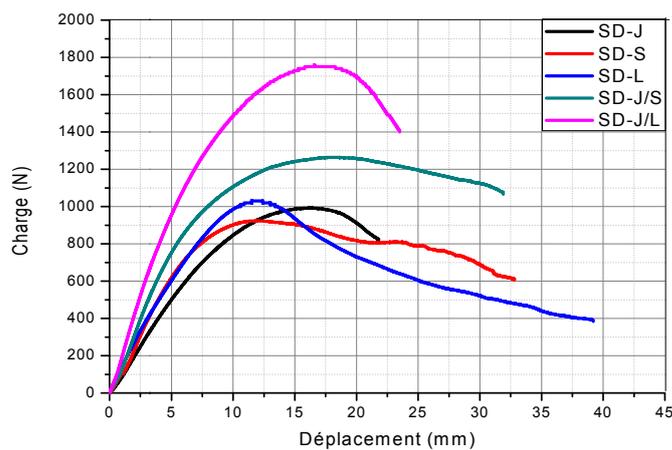


Figure 3.23 : Courbes (force-déplacement) en flexion 4 points des différents types des sandwiches.

3.5.2.1 Modes de rupture en flexion quatre points

Dans l'essai de flexion quatre points, la rupture totale de l'éprouvette ne manifeste que dans le cas de SD-J (figure 3.24(a)). La rupture débute par une fissuration de la semelle supérieure, et avec l'augmentation de la charge, la rupture se propage en parallèle de l'interface peau supérieure/âme ce qui entraîne l'arrachement des particules du liège (absence de délaminage à l'interface peau/âme). La charge atteinte sa limite supérieure produisant ainsi la rupture de liège avec un angle de 45°. Lorsque l'âme est endommagée, la rupture continue sa propagation dans les particules du liège près de l'interface âme/peau inférieure.

Le 2^{ème} mode de rupture observé pour tout le reste des échantillons est la rupture par cisaillement de l'âme.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figure 3.24 : Modes de rupture en flexion quatre points des différents sandwichs.

Les résultats de l'essai de flexion quatre points sont présentés dans le tableau 3.3 (selon la norme NF T54-606).

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwiches.

Tableau 3.3 : Résultats de l'essai de flexion quatre points pour les différents sandwiches.

| Sandwich | h(mm) | e _a (mm) | e _s (mm) | b(mm) | d ₂ (mm) | P ₂ (N) | W ₂ (mm) | σ ₂ (MPa) | τ ₂ (MPa) |
|---------------|-------|---------------------|---------------------|-------|---------------------|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| SD-J | 12.09 | 10 | 2.1 | 40.92 | 250 | 991 | 16.6 | 32.63 | 1.09 |
| SD-S | 13.73 | 10 | 1.7 | 43.2 | 250 | 924 | 11.9 | - | 0.9 |
| SD-L | 15.54 | 10 | 2.36 | 43.39 | 250 | 1030 | 12.4 | - | 0.92 |
| SD-J/S | 16.52 | 10 | 2.58 | 42.03 | 250 | 1263 | 18.64 | - | 1.13 |
| SD-J/L | 17.53 | 10 | 3.05 | 42.51 | 250 | 1750 | 18.2 | - | 1.49 |

3.5.2.2 Détermination des propriétés mécaniques

La norme NF T54-606 permet, à partir des résultats obtenus des essais de flexion trois et quatre points sur les sandwiches, de définir :

- ✓ Le module de rigidité en flexion D ;
- ✓ Le module de rigidité en cisaillement N ;
- ✓ Le module de cisaillement de l'âme G_a.

Le tableau 3.4 récapitule les différentes valeurs des propriétés mécaniques des sandwiches testés.

Tableau 3.4 : Propriétés mécaniques déduites des essais de flexion trois et quatre points des sandwiches.

| sandwich | h (mm) | e _a (mm) | B (mm) | d ₁ (mm) | P ₁ (N) | W ₁ (mm) | d ₂ (mm) | P ₂ (N) | W ₂ (mm) |
|---------------|-----------|------------------------|-----------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| SD-J | 12,09 | 10 | 40.92 | 250 | 310 | 6,02 | 250 | 495,5 | 4,95 |
| SD-S | 13,73 | 10 | 43.2 | 250 | 239,5 | 3,56 | 250 | 462 | 3,61 |
| SD-L | 15,54 | 10 | 43.39 | 250 | 289,5 | 4,57 | 250 | 515 | 4,12 |
| SD-J/S | 16,52 | 10 | 42.03 | 250 | 371,5 | 4,32 | 250 | 631,95 | 4,02 |
| SD-J/L | 17,53 | 10 | 42.51 | 250 | 492 | 4,71 | 250 | 875 | 4,47 |

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwiches.

| sandwiche | D(Nmm ²) | N(N) | G _a (N/mm ²) |
|-----------|----------------------|---------|-------------------------------------|
| SD-J | 217802420,15 | 3486,79 | 6,98 |
| SD-S | 159902427,98 | 4871,94 | 8,01 |
| SD-L | 569989604,33 | 4107,85 | 5,80 |
| SD-J/S | 111582399,17 | 7174,65 | 9,61 |
| SD-J/L | 189558379,43 | 7955,79 | 9,87 |

3.5.3 Essais de cisaillement

Dans une structure sandwich, le comportement en cisaillement de l'âme est déterminant, puisque l'âme a pour fonction de transmettre par cisaillement les contraintes de traction-compression entre les deux peaux.

Les modules de cisaillement de l'âme et les contraintes en cisaillement de l'âme des structures sandwiches sont calculés suivant la norme NF T54-606. Dans ce point d'étude, on va déterminer ces modules et ces contraintes par la norme NF EN12090, cette méthode est déjà appliquée dans le chapitre 2 (§2.7.1).

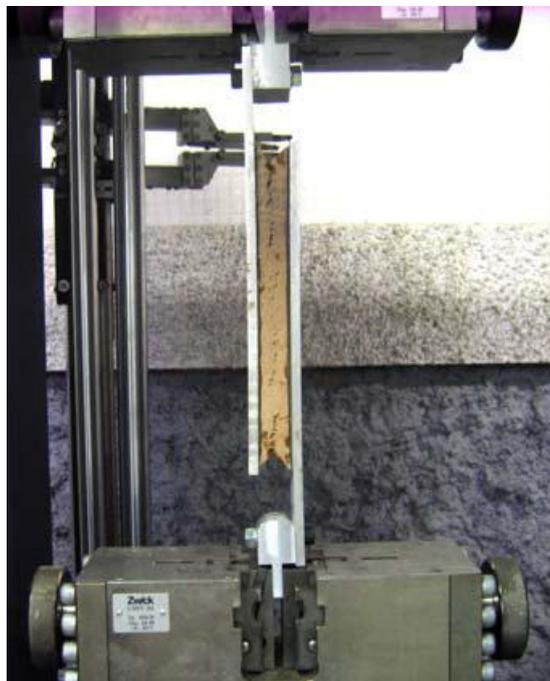


Figure 3.25 : Essai de cisaillement.

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwiches.

La figure 3.26 montre les courbes (charge-déplacement) en cisaillement. On note que les échantillons testés du liège avec résine présentent un comportement linéaire identique (partie élastique). Dépassant la limite élastique, la charge croît de façon non linéaire jusqu'à la rupture, cette charge dépasse les 1600N (pour des déplacements au voisinage de 2mm), une augmentation de plus de 70% par rapport à la charge à la rupture du liège sans résine.

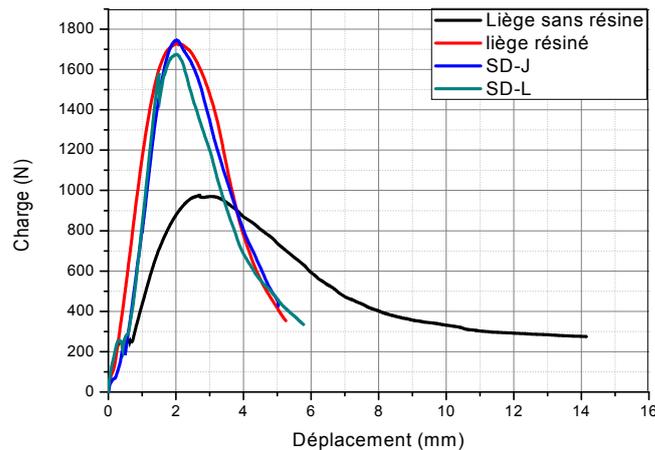


Figure 3.26 : Comportement en cisaillement (liège sans et avec résine).

Le tableau 3.5 donne les valeurs du module de cisaillement ainsi les contraintes à la rupture pour les différents types de liège (liège sans résine et liège en âme de SDJ) calculées par deux méthodes : cisaillement pur (NF EN12090) et cisaillement par flexion (NF T54-606).

D'après les résultats obtenus, on remarque que :

- ✓ Les lièges contenant de la résine présentent des modules de cisaillement plus importants, soit 85% plus grand que le module de cisaillement de liège sans résine. Cette augmentation est due à la présence de résine occupant le vide entre les granulés du liège aggloméré, ce qui le rend plus dur et plus fragile ;

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwichs.

- ✓ Un écart faible est enregistré pour les modules de cisaillement déterminés par les deux normes, par contre, les valeurs de la contrainte sont similaires pour le SD-J.

Tableau 3.5 : Valeurs obtenues par deux méthodes de calcul des modules et contraintes en cisaillement du liège sans et avec résine (seul et âme de SD-J).

| Type de liège | Module de cisaillement G(MPa) | | Contrainte en cisaillement τ (MPa) | |
|-------------------|-------------------------------|------------|---|------------|
| | NF EN12090 | NF T54-606 | NF EN12090 | NF T54-606 |
| Liège sans résine | 5.12 | - | 0.6 | - |
| Liège avec résine | 9.5 | - | 1.07 | - |
| SD-J | 9.9 | 6.98 | 1.09 | 1.09 |

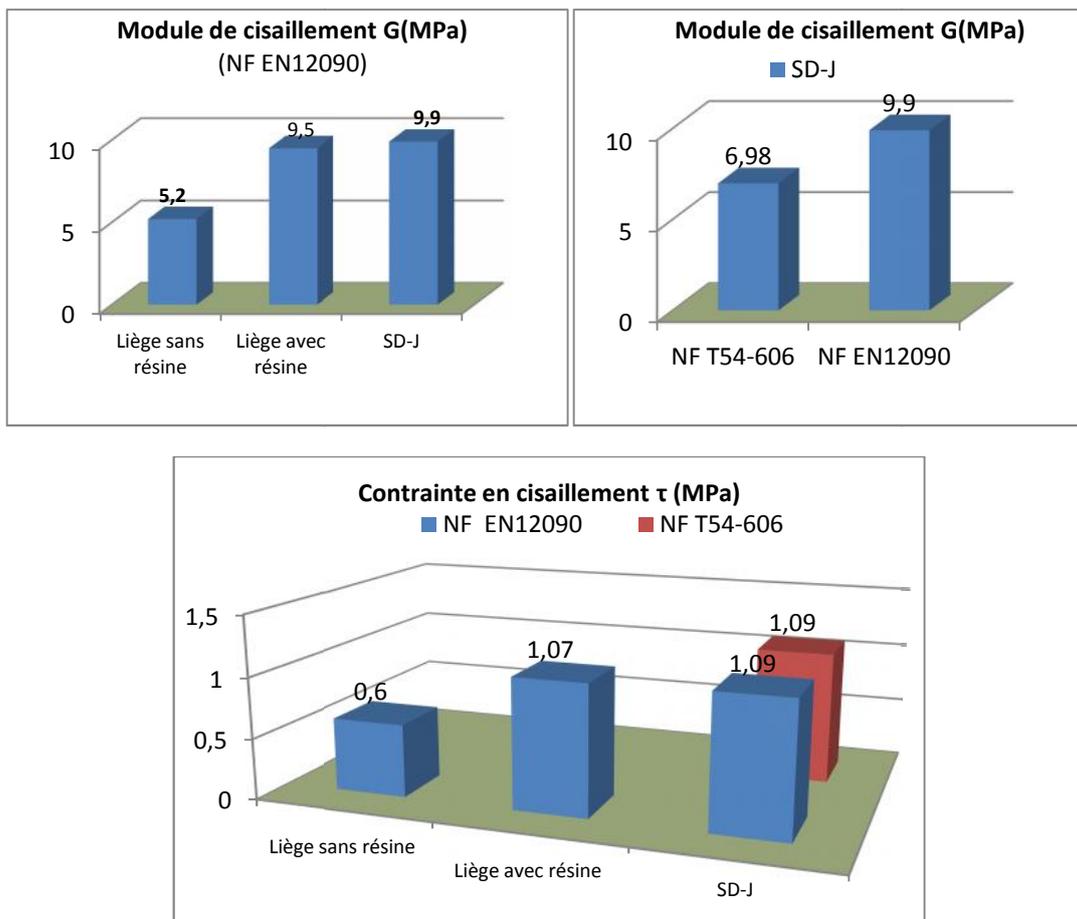


Figure 3.27 : Histogrammes comparatifs des valeurs de module de cisaillement G et contrainte en cisaillement des différents types du liège.

3.5.4 Essais de compression perpendiculaire

La rigidité en flexion d'un matériau sandwich dépend de la distance entre les peaux, et lors de l'application des charges, cette distance doit être maintenue pour conserver une bonne rigidité en flexion. Par ailleurs, sous l'effet de la charge localisée, le matériau sandwich est soumis à des poinçonnements localisés. Ainsi le comportement en compression dans l'épaisseur des panneaux joue un rôle important pour conserver au matériau sandwich de bonnes propriétés pour les charges élevées.

L'essai de compression perpendiculaire est réalisé suivant la norme NF T54-602 pour l'identification du comportement et des caractéristiques mécaniques (modules d'élasticité apparents, taux de relaxation,....ect).

L'essai est effectué sur des éprouvettes à base carrée de section 50x50 mm. Ces dernières sont placées entre deux plateaux parallèles d'une machine universelle type Zwick 250 de capacité 250 kN avec un pilotage et acquisition des données par ordinateur à l'aide du logiciel TextXpert 9.0 la vitesse d'essai est de 3mm/mn.

Le comportement en compression du liège dans les structures sandwiches est reporté par la figure 3.28. Cette figure donne les courbes (contrainte-déformation).

On observe un comportement qui se déroule en 3 étapes : d'abord un comportement élastique linéaire pour des petites déformations ne dépassent pas 5% pour toutes les les structures sandwiches. Par la suite, la progression de la contrainte est quasi-constante jusqu'à une déformation qui avoisine 25% pour les SD-S, SD-L et SD-J/S, et 15% pour les structures SD-J et SD-J/L. Cette progression constante de la contrainte s'explique par l'effondrement des granulés du liège aggloméré. En fin, une reprise de la rigidité (l'effondrement complet des granulés) du structure qui conduit à une augmentation prononcée de la contrainte pour atteindre des valeurs maximale de l'ordre de 100MPa.

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwiches.

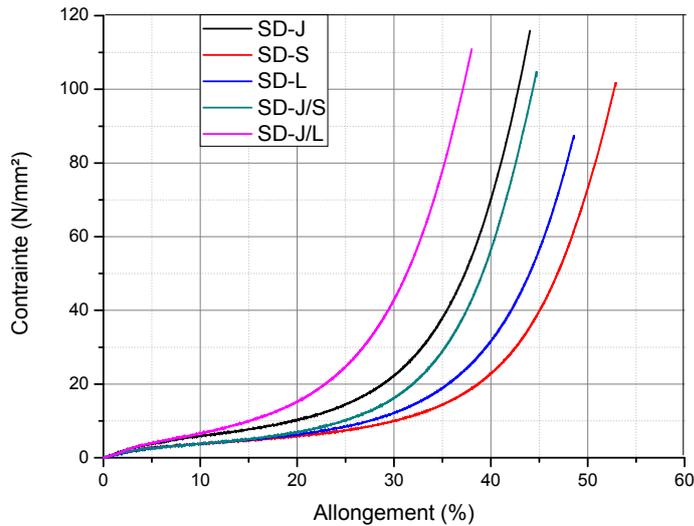


Figure 3.28: Comportement en compression perpendiculaire des structures sandwiches.

Nous avons reporté dans le tableau 3.6 les caractéristiques mécaniques déduites de l'essai de compression perpendiculaire effectuée sur les différentes structures sandwiches. Ce tableau donne les valeurs du module d'élasticité apparent E_a , la déformation maximale ϵ_{max} et la contrainte à 10% de déformation.

Tableau 3.6 : Caractéristiques mécaniques en compression perpendiculaire des sandwiches.

| Sandwich | Contrainte à =10%, ϵ_{10} (MPa) | Déformation maximale ϵ_{max} (%) | Module d'élasticité apparent E_a (MPa) |
|---------------|---|--|---|
| SD-J | 5.89 | 42.82 | 95 |
| SD-S | 3.78 | 52.7 | 68.3 |
| SD-L | 3.78 | 48.58 | 58.8 |
| SD-J/S | 3.78 | 44.43 | 60.1 |
| SD-J/L | 6.59 | 38.69 | 71.4 |

3.6. Caractérisation mécanique en fatigue des sandwiches

Les essais de fatigue ont été menés en flexion trois et quatre points, limités à 10^4 cycles en deux fois pour chaque face (c -à-d. on applique 10^4 cycles sur la face 1, puis 10^4 sur la face 2 et on refait cet essai pour la 2^{ème} fois sur la face 1 et ensuite sur la face 2), avec un déplacement imposé égale à 6 mm (choisi dans la partie élastique linéaire des essais statiques (flexion 3 et 4 points)).

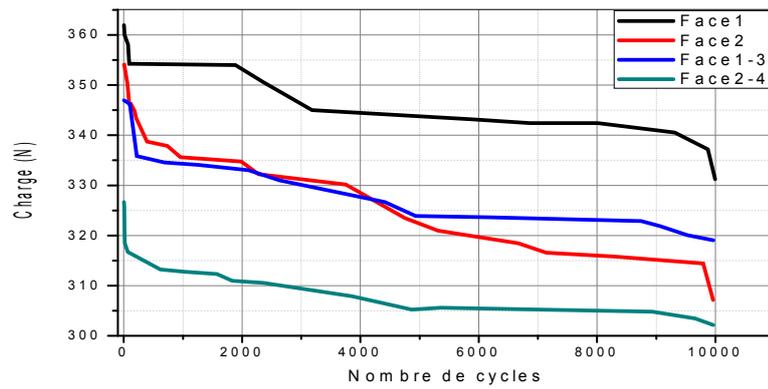
Ces tests sont réalisés au niveau de l'unité de recherche UR-MPE. La machine utilisée pour les essais est une machine universelle Zwick 250 munie d'une cellule de charge de 250 kN.

3.6.1 Essai de fatigue en flexion trois points

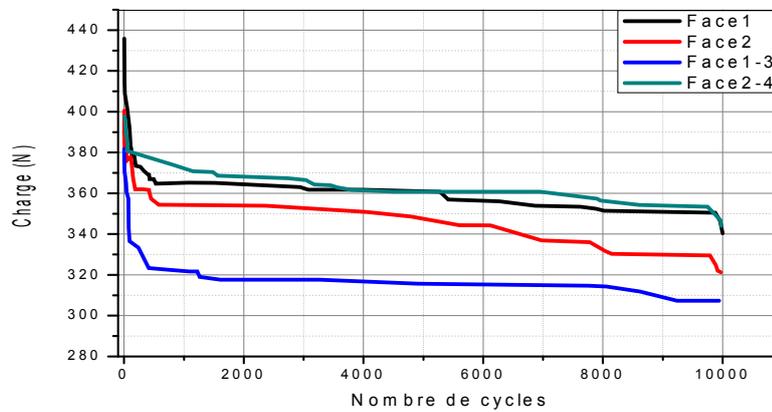
La figure 3.29 donne les résultats des essais de fatigue par flexion trois points des structures sandwiches. Elle présente l'évolution de la charge maximale en fonction du nombre de cycles de fatigue de chaque face de l'éprouvette. La perte de charge de premier cycle jusqu'à le dernier cycle se déroule en deux phases : dans un premier temps, se manifeste par une diminution brutale dès les premiers cycles ; la diminution devient très lente dans la deuxième phase avec absence de rupture des éprouvettes. Ce comportement est commun pour tous les types des sandwiches. Nous constatons bien clairement la diminution de la charge maximale F_{0max} entre la face (1) et la face (2-4) de même éprouvette pour toutes les structures sandwiches. Cette diminution est de 10% et 12% pour les sandwiches SD-J et SD-S respectivement, ce qui résulte la diminution de 11% de la charge maximale entre la face (1) et la face (2-4) de SD-J/S. Pour les deux autres sandwichs, elle est de 17% et 16% pour le SD-L et le SD-J/L respectivement.

Note : la face (1-3) : c -à-d l'application de la charge sur la face (1) pour la 2^{ème} fois. Même chose pour la face (2-4).

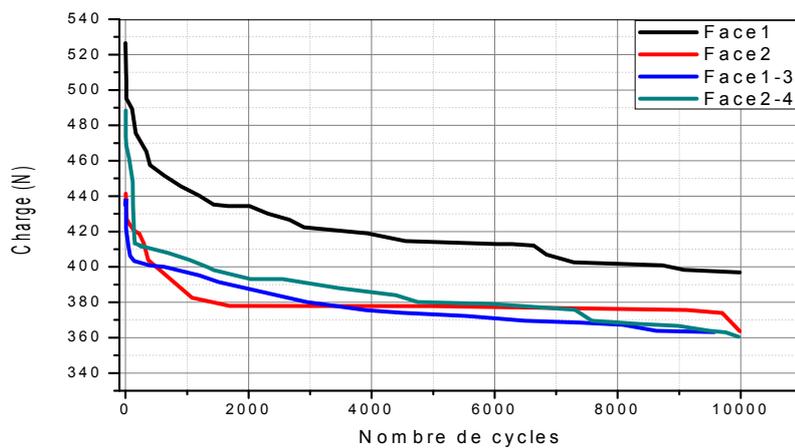
Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwichs.



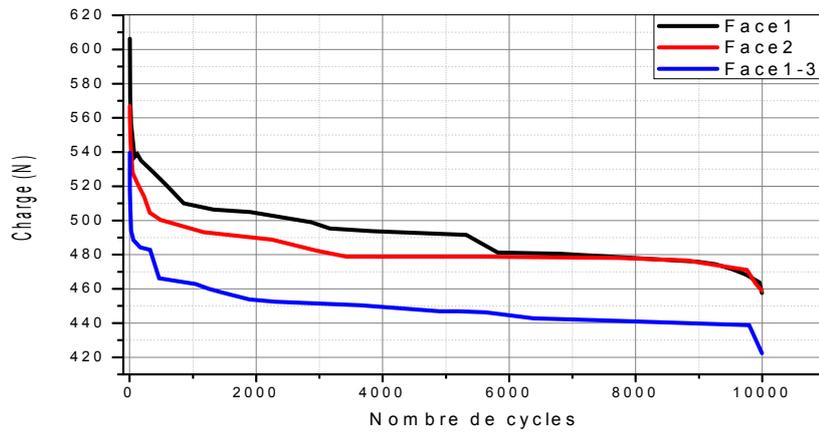
(a) SD-J



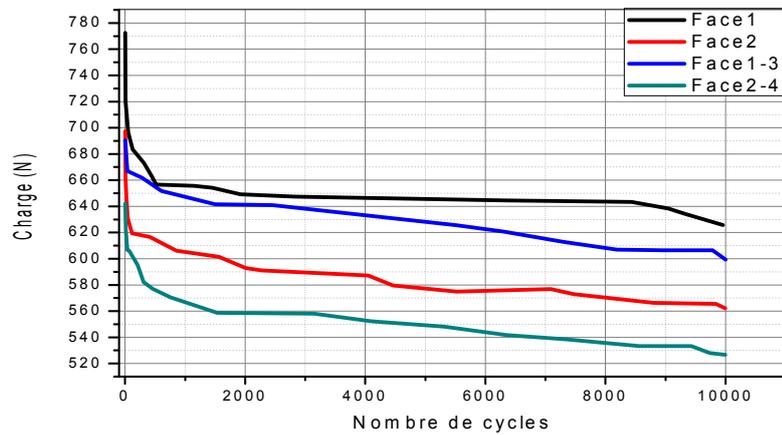
(b) SD-S



(c) SD-L



(d) SD-J/S



(e) SD-J/L

Figure 3.29 : Évolution de la charge F en fonction du nombre de cycles des différents sandwichs en essai de fatigue par flexion trois points.

Après les essais de fatigue, les éprouvettes subissent des essais statiques (flexion trois points) pour reconnaître le comportement et les contraintes résiduelles des sandwichs constitués de matériaux naturels.

La figure 3.30 présente les courbes (charge – déplacement). On note une rupture totale d'éprouvette de SD-J produite lorsque la charge maximale atteinte ; mais pour

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwiches.

les sandwiches SD-S, SD-L et SD-J/S, les contraintes résiduelles sont toujours présentes et les déplacements dépassent 35mm pour ces sandwiches.

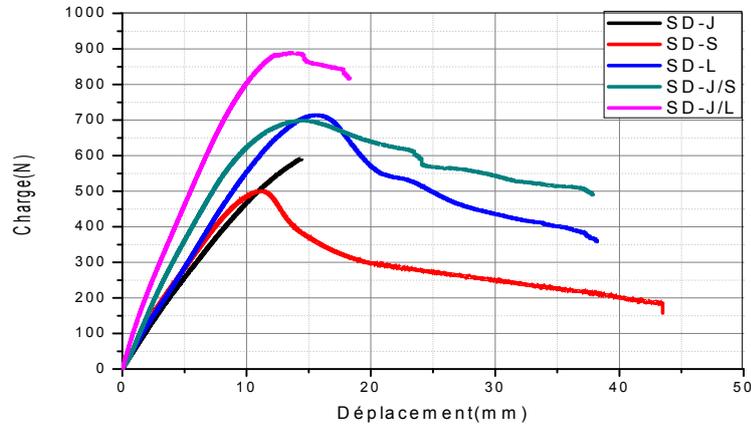


Figure 3.30 : Courbes (charge-déplacement) en essai de flexion trois points des sandwichs ayant subi des essais de fatigue.

La figure 3.31 confirme les résultats précédents. On observe que les éprouvettes de SD-J se cassent complètement en deux parties (figure 3.31-a), tandis que les parties des autres éprouvettes restent liées entre eux par la semelle supérieure.

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwiches.

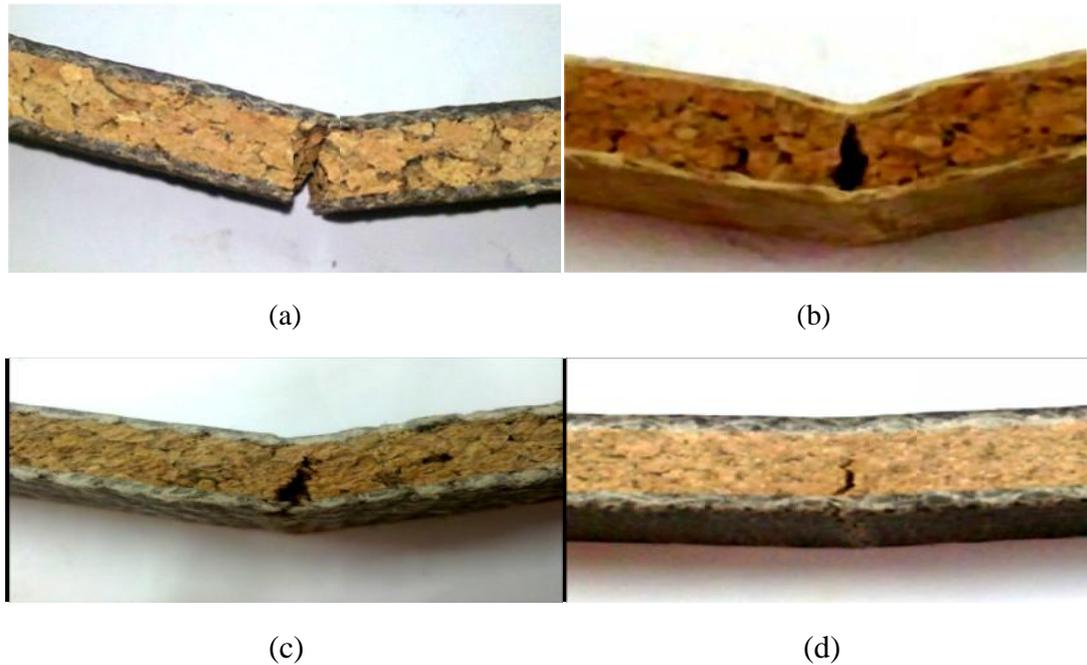


Figure 3.31 : Modes de rupture en essais statiques (flexion trois points) des éprouvettes ayant subis des essais de fatigue.

Le tableau 3.7 illustre les résultats obtenus par des essais statiques exercés sur les éprouvettes déjà passées par des essais de fatigue. D'après ces résultats et par comparaison à ceux obtenus par des essais statiques sur des sandwichs sains, on note que la charge maximale diminue de 5%, 6% et 10% pour les sandwichs SD-J, SD-J/S et SD-J/L respectivement. Par contre, on remarque une augmentation de la charge maximale de 4% et 23% pour les sandwichs SD-S et SD-L respectivement (figure 3.32).

Tableau 3.7 : Résultats de l'essai de flexion trois points des éprouvettes ayant subis des essais de fatigue.

| Sandwich | h(mm) | e _a (mm) | e _s (mm) | b(mm) | d ₁ (mm) | P ₁ (N) | W ₁ (mm) | σ ₁ (MPa) |
|----------|-------|---------------------|---------------------|-------|---------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| SD-J | 13,39 | 10 | 2,04 | 40,35 | 250 | 591 | 14.4 | 38,37 |
| SD-S | 13,76 | 10 | 1,83 | 43,08 | 250 | 500 | 11.12 | 33,36 |
| SD-L | 15,26 | 10 | 2,52 | 43,28 | 250 | 714 | 15.4 | 32,39 |
| SD-J/S | 16,38 | 10 | 2,39 | 42,11 | 250 | 698 | 13.8 | 32,86 |
| SD-J/L | 17,06 | 10 | 2,83 | 42,82 | 250 | 889 | 13.9 | 33,88 |

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwichs.

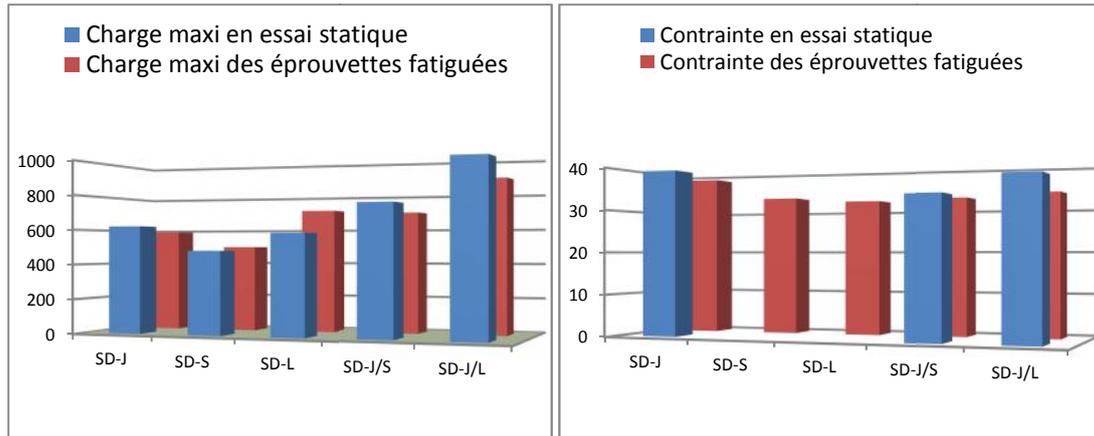
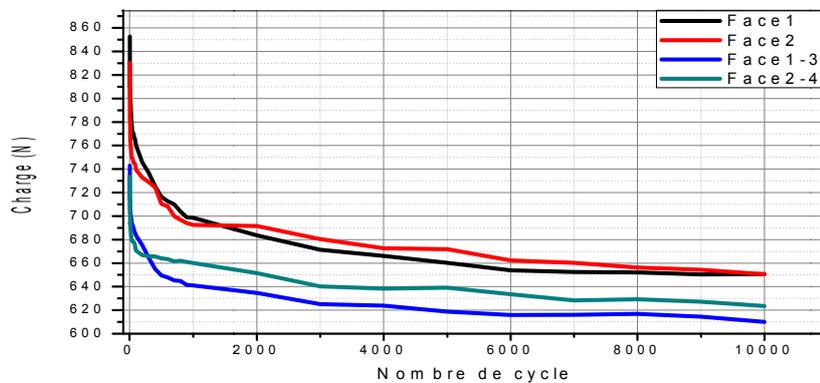


Figure 3.32 : Histogrammes comparatifs des valeurs des charges maximales (essai de flexion trois points) et des contraintes des éprouvettes saines et des éprouvettes ayant subi des essais de fatigue.

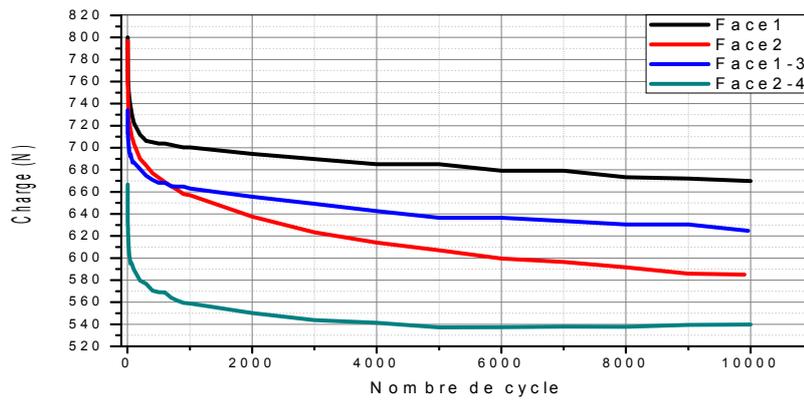
3.6.2 Essai de fatigue par flexion quatre points

La figure 3.33 montre les résultats des essais de fatigue par flexion quatre points des sandwichs. Elle donne les courbes (charge – nombre de cycles). Le comportement des sandwichs est similaire au comportement obtenu par les essais de fatigue par flexion trois points : une diminution brutale de la charge maximale dès les premiers cycles, par la suite devient lente jusqu'à le dernier cycle sans qu'il y a une rupture des éprouvettes. La diminution de la charge maximale F_{0max} du premier cycle de l'essai sur la face (1) de l'éprouvette varie de 11% à 29% par rapport à la charge maximale du premier cycle sur la face (2-4).

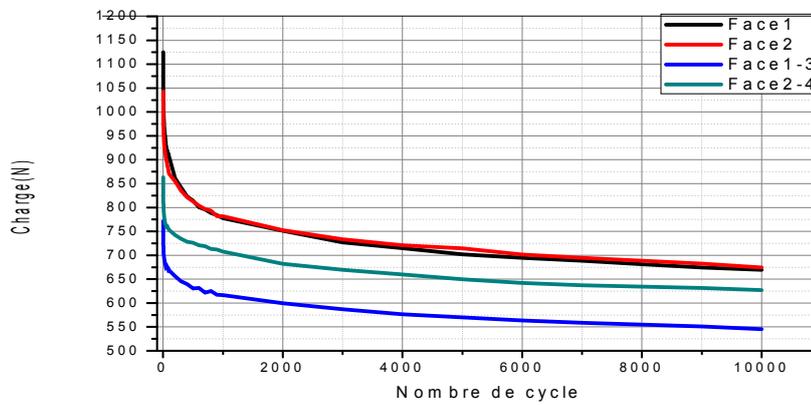


(a) SD-J

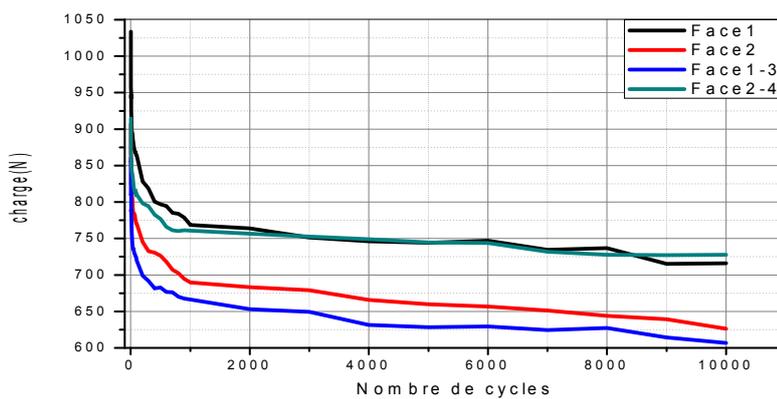
Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwichs.



(b) SD-S

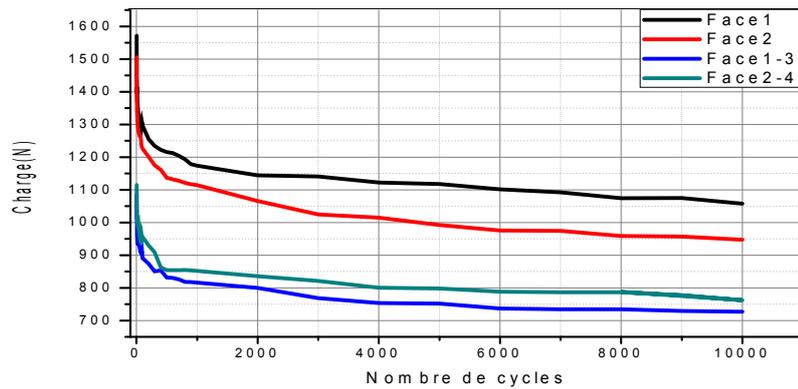


(c) SD-L



(d) SD-J/S

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwichs.



(e) SD-J/L

Figure 3.33 : Évolution de la charge F en fonction de nombre de cycles des différents sandwichs en flexion quatre points.

Le même comportement est obtenu par les essais statiques (flexion quatre points) sur les éprouvettes ayant subi des essais de fatigue (figure 3.34).

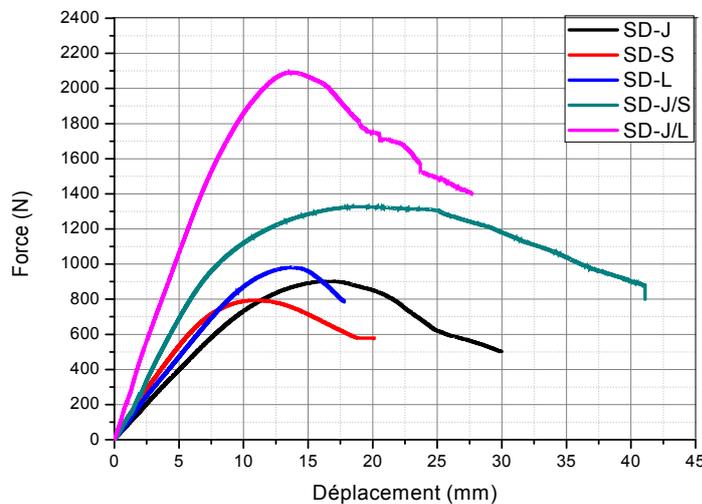


Figure 3.34 : Courbes (charge-déplacement) en essai de flexion quatre points des sandwichs ayant subi des essais de fatigue.

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwichs.

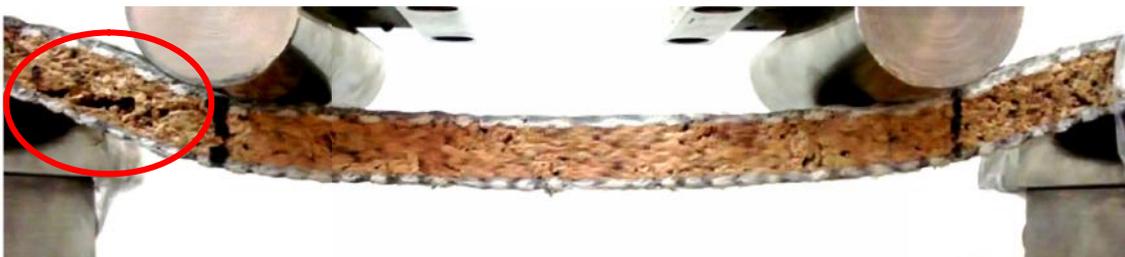
La rupture des semelles est observée dans les sandwichs SD-J et SD-J/L (figure 3.35-a et 3. 35-e). Pour les autres sandwichs, la rupture est produite par le cisaillement de l'âme (figure 3.35-b, 3.35-c et 3.35-d).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figure 3. 35 : Modes de rupture en essais statiques (flexion 4 points) des éprouvettes ayant subis des essais de fatigue.

Le tableau 3.8 représente les résultats des essais statiques après fatigue des sandwichs. Pour le sandwich SD-J, la diminution de la charge maximale est de 9% par rapport aux éprouvettes saines. Cette diminution est de 14% et 5% pour les sandwichs SD-S et SD-L respectivement. Mais on note une augmentation de la charge de 5% pour le SD-J/S et 19% pour le SD-J/L.

Tableau 3.8 : Résultats de l'essai de flexion quatre points.

| Sandwich | h(mm) | e _a (mm) | e _s (mm) | b(mm) | d ₂ (mm) | P ₂ (N) | W ₂ (mm) | σ ₂ (MPa) | τ ₂ (MPa) |
|---------------|-------|---------------------|---------------------|-------|---------------------|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| SD-J | 13,1 | 10 | 2,04 | 41,02 | 250 | 902 | 17 | 29,16 | 0,95 |
| SD-S | 13,81 | 10 | 1,83 | 42,86 | 250 | 793 | 10.6 | - | 0,77 |
| SD-L | 15,43 | 10 | 2,52 | 43,56 | 250 | 980 | 13.6 | - | 0,88 |
| SD-J/S | 14,04 | 10 | 2,39 | 42,23 | 250 | 1326 | 19.84 | - | 1,30 |
| SD-J/L | 17,05 | 10 | 2,83 | 42,4 | 250 | 2091 | 13.69 | 40,27 | 1,82 |

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwichs.

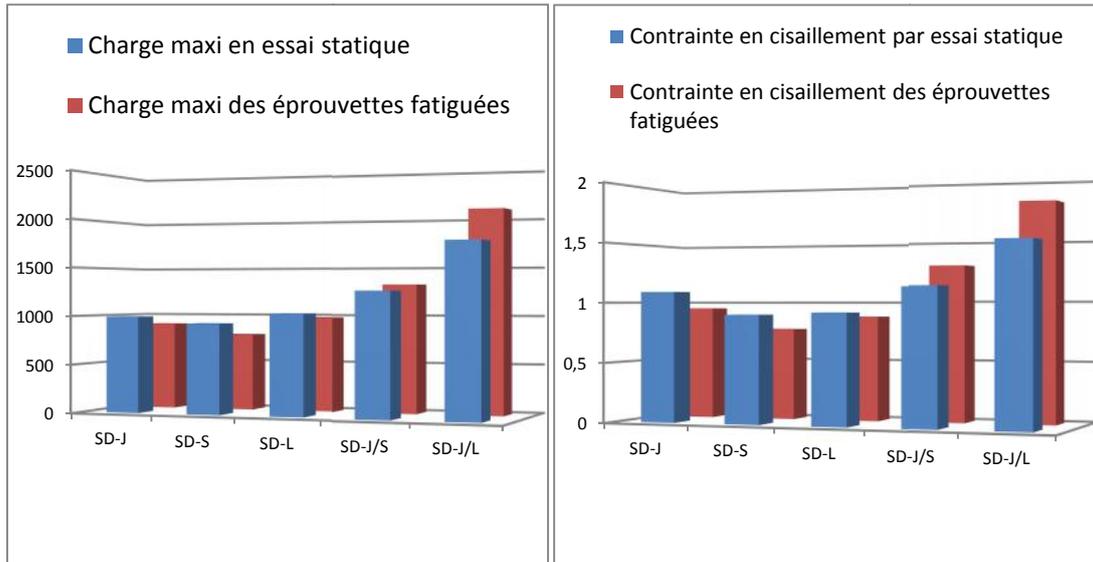


Figure 3. 36: Histogrammes comparatifs des valeurs des charges maximales (essai de flexion quatre points) et des contraintes en cisaillement des éprouvettes saines et des éprouvettes ayant subi des essais de fatigue.

3.7 Analyse hygrothermique

L'analyse hygrothermique des sandwichs de différents types des renforts naturels est effectuée suivant deux volets distincts :

- ✓ Le premier volet concerne l'étude de l'influence de la température et du temps de chauffe sur la masse des sandwichs ;
- ✓ Le second volet concerne l'analyse du pouvoir d'absorption d'eau des différents sandwichs pour une durée de 24 heures selon la norme NF EN 1609.

3.7.1 Chauffage des sandwichs en étuve

3.7.1.1 Méthode d'essai

L'analyse de la variation de la masse du sandwich en fonction du temps pour une température de 100°C en étuve pour une durée de 24 heures est effectuée.

Les échantillons des sandwichs testés se caractérisent par les démentions 250x250 mm. Ces derniers sont pesés avant l'introduction en étuve ; par la suite, des

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwichs.

pesées sont effectuées chaque heure pendant 24 heures pour quantifier la perte de masse.

3.7.1.2 Analyse de la variation de la masse après séchage en étuve pendant 24 heures

La figure 3.37 regroupe les variations des masses des différents sandwichs en fonction du temps de séchage dans une étuve de température de 100°C. La totalité de la perte de masse est observée dans les 7 premières heures et tous les sandwichs perdent 4% des ses masses, sauf le SD-L qui perd 3% de sa masse. De 7 heures jusqu'à 24 heures, la perte de masse devient lente et n'est pas identique pour tous les sandwichs. On remarque que les sandwichs SD-L et SD-J/L perdent 0.9% et 1% respectivement, ces pourcentages sont élevées par rapport aux autres sandwichs (0.5% pour SD-J et SD-S et 0.8% pour SD-J/S). Cela peut être expliqué par l'existence du renfort en lin qui absorbe l'humidité ambiant par rapport aux autres renforts (jute et sisal).

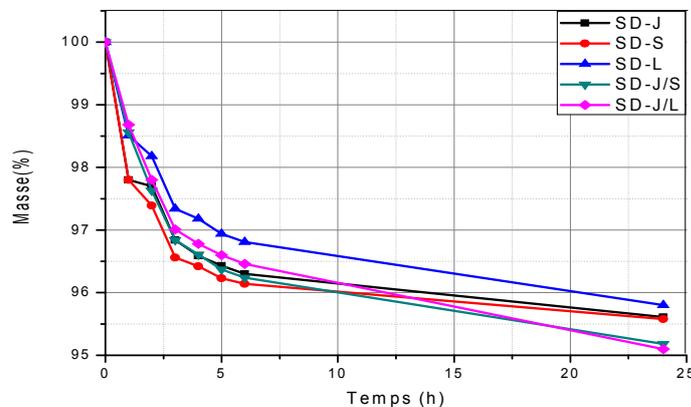


Figure 3.37 : Variation des masses des sandwichs en fonction du temps de séchage à 100°C.

3.7.2 Pouvoir d'absorption d'eau des sandwichs

L'analyse de pouvoir d'absorption d'eau en immersion partielle est effectuée sur les différents types des sandwichs à l'aide de la norme AFNOR NF 1609 (1997).

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwiches.

Cette norme supposée simuler l'absorption d'eau provoquée par la pluie pendant 24 heures.

3.7.2.1 Méthode d'essai

Les essais consistent à peser les échantillons avant de les mettre en contact avec l'eau. Les échantillons de dimensions 200x200 mm sont immergés dans l'eau à mi-épaisseur et maintenues par un point pour ne pas flotter, pendant 24 heures. Après 24 heures, les éprouvettes sont retirées de l'eau et placées à 45° dans un support pour être égouttées pendant 10 minutes, en suite les échantillons sont pesés.

Le pouvoir d'absorption d'eau des ces échantillons est donné par l'équation :

$$W_p = \frac{m_{24} - m_0}{A_p}$$

Avec :

W_p : pouvoir d'absorption d'eau (kg/m²) ;

m_0 : masse initiale (kg) ;

m_{24} : masse après 24 heures (kg) ;

A_p : Aire de l'éprouvette (m²).

3.7.2.2 Analyse des résultats de l'essai de pouvoir d'absorption

La figure 3.38 montre le pouvoir d'absorption des différents sandwiches immergés partialement dans l'eau. Nous remarquons que le SD-J/L possède un pouvoir d'absorption de 0.43kg/m², tandis que les sandwiches SD-S, SD-L et SD-J/S possèdent un pouvoir d'absorption de 0.37 kg/m², soit 14% moins important que le SD-J/L. pour le SD-J, il est de 0.2kg/m² c'est-à-dire 53% plus faible que le SD-J/L. En général, le pouvoir d'absorption d'eau des sandwiches ne dépasse pas 0.5kg/m², cela s'explique par la faible épaisseur de l'âme en liège (10 mm) et la pénétration de résine dans l'âme à travers les peaux. La présence de résine dans le liège empêche l'eau de pénétrer à l'intérieur de l'âme. La variabilité des résultats due à l'existence du renfort de lin qui augmente le pouvoir d'absorption d'eau.

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwichs.

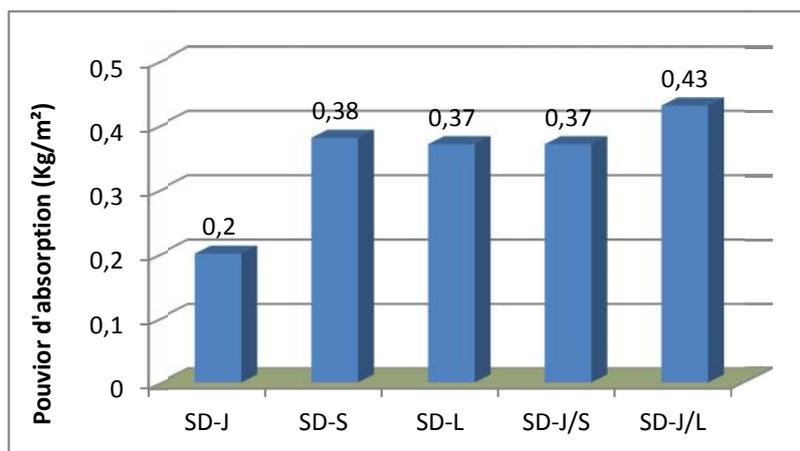


Figure 3.38 : Pouvoir d'absorption d'eau en immersion partielle des sandwichs.

Chapitre 3 : Élaboration, caractérisation mécanique et analyse hygrothermique des matériaux sandwichs.

3.8 Conclusion

Suite à la prise de conscience écologique de ces dernières années, l'utilisation des matériaux naturels d'origine végétale dans l'industrie s'est intensifiée pour remplacer les matériaux existants dans la fabrication des matériaux composites, surtout de type sandwichs.

Dans ce chapitre, nous avons étudié des matériaux sandwichs à base des renforts naturels végétaux (jute, lin et sisal) et âme en matériau naturel liège aggloméré, afin de déterminer leurs caractéristiques mécaniques essentielles.

L'élaboration des structures sandwichs réalisée à partir de la méthode d'infusion en « one shoot ».

La caractérisation mécanique des ces structures est effectuée en deux parties :

- Une caractérisation en statique par des essais de flexion 3 et 4 points ; les résultats obtenus sont compétitifs aux sandwichs en fibres de carbone et nid d'abeille en âme. Dans ces essais, on a enregistré deux (2) modes de rupture : rupture totale des sandwichs (pour les sandwichs en jute et les sandwichs constitués de deux types du renfort : (jute-sisal et jute-lin), et rupture par cisaillement de l'âme surtout dans les essais de flexion 4 points.
- Une caractérisation en fatigue par flexion 3 et 4 points pour un nombre de cycles limité. Après les essais de fatigue, les éprouvettes munies des essais statiques (flexion 3 et 4 points) pour quantifier les contraintes résiduelles après les cycles de fatigue ; une variabilité des résultats est observée.

Des essais de cisaillement et de compression sont réalisés pour une caractérisation mécanique complète des structures sandwichs.

Les analyses hygrothermiques sont effectuées afin de voir le comportement de ces matériaux sous l'action des conditions climatiques.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire avait pour objectif l'étude du comportement en statique et en fatigue des structures sandwichs constitués des matériaux naturels : âme en liège aggloméré blanc de moyenne densité (260kg/m^3) et peaux en fibres naturelles végétales (jute, sisal et lin). La résine utilisée dans l'élaboration des structures sandwichs est de nature époxyde (MEDAPOXY INJECT 812).

Peu de travaux sont intéressés à ce type de matériaux.

Le premier chapitre bibliographique a permis de faire le point sur les connaissances dans le domaine des matériaux composites et le domaine des renforts naturels d'origine végétale.

Le deuxième chapitre est consacré à la caractérisation mécanique et hygrothermique des matériaux constituant les structures sandwichs (renforts, stratifiés et le liège). Cette caractérisation nous a permis de déterminer les propriétés intrinsèques de ces matériaux.

Les essais de traction, effectués sur les mèches des différents renforts, donnent un comportement mécanique différent d'un renfort à l'autre. Les mèches en fibres de lin donnent les meilleurs résultats que celles en fibres de sisal ou en fibres de jute (les mèches en lin ont donné des charges à la rupture de 95% et 300% plus importantes que les mèches en sisal et en jute respectivement).

Les stratifiés renfort/époxy sont élaborés par la méthode d'infusion. Les essais mécaniques effectués sur ces stratifiés sont de type traction et flexion trois points. Ces essais montrent certaines variabilités liées en grande partie à la nature du renfort ; Pour l'essai de traction, le module de Young varie de 2.7GPa à 14.7 GPa (le module de Young de stratifié fibre de verre/époxyINJ812 est de 1.9 GPa[53]) . Nous avons enregistré, lors de l'analyse ATG, des pertes de masse variant de 2% à 6.2%.

Des essais de cisaillement sont effectués sur le liège, le module de cisaillement est de 5.12 MPa (une valeur comparable à celle trouvée par Reis et al (4.85MPa) [52]).

Dans le chapitre 3, une série d'essais statiques et de fatigue ont été réalisés sur les sandwichs constitués des matériaux naturels et élaborés par la méthode d'infusion en « one shoot ».

Les essais statiques effectués sont de type flexion trois et quatre point, ont donné un comportement commun pour tous les types des sandwichs avec des modes de rupture différents (rupture totale de l'éprouvette et par indentation de la peau supérieure dans le cas de flexion trois points ; rupture par cisaillement de l'âme dans le cas de flexion quatre points). Les meilleurs résultats sont enregistrés par le renfort en fibres de lin (seul ou combiné avec le jute).

Les essais de flexion ont permis aussi de calculer le module de cisaillement de l'âme selon la norme NF T54-606. L'essai de cisaillement a permis de calculer ce module selon la norme NF EN 12090. Le module de cisaillement de sandwich SD-J est de 9.9MPa (NF EN12090) et de 6.98MPa (NF T54-606) ; mais la contrainte en cisaillement déterminée par les deux normes est la même, elle est de 1.9MPa.

Les essais de fatigue par flexion trois et quatre points que nous avons exercés sur les sandwichs sont limités à 10^4 cycles pour chaque face de l'éprouvette, ce test est répété deux fois alternativement sur chaque face. On a enregistré un comportement similaire pour les différents sandwichs ; La perte de charge de premier cycle jusqu'à le dernier cycle se déroule en deux phases : dans un premier temps, se manifeste par une diminution brutale dès les premiers cycles ; la diminution devient très lente dans la deuxième phase avec absence de rupture des éprouvettes.

Après les essais de fatigues, les éprouvettes sont subies des essais statiques (flexion trois et quatre points) afin de déterminer les contraintes résiduelles après fatigue des sandwichs constitués de matériaux naturels. Certains éprouvettes ayant subis des essais de fatigue ont donné des contraintes supérieures aux celles obtenues par des éprouvettes saines ; cela dû aux défauts lors de l'élaboration des sandwichs (c-à-d les nappes des renforts ne sont pas superposées parfaitement parallèle entre eux) et des défauts lors de découpage des éprouvettes.

Conclusion générale

L'analyse hygrothermique a montré l'influence de la température et du temps de chauffe sur la masse du sandwich. Cette analyse a montré aussi l'influence de type de renfort sur le pouvoir d'absorption d'eau en immersion partielle.

D'après les essais réalisés, on constate la bonne compatibilité entre les renforts naturels, le liège aggloméré et la résine INJECT812.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **C.A.H.Swadogo**, Comportement en fatigue des composites monolithiques et sandwichs : détection et suivi de l'endommagement par techniques non destructives. 2009, Thèse de doctorat, université de Lille 1, p22.
- [2] **J.J BARRAU**, Structures en matériaux composites, Éditions Techniques de l'Ingénieur, bm5080, 2004, p3.8.
- [3] **J.C RIGAL, A.NEGRIER**, Présentation des matériaux composites, Éditions Techniques de l'Ingénieur, a7790, 2013, p8.
- [4] **Y.Perrot**, Influence des propriétés de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites, thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud, 2006.
- [5] **L.CARAMARO**, Fibres et fils à usage technique, Éditions Techniques de l'Ingénieur, n2510, 2005, p12.
- [6] **D.GAY**, Matériau composites, lavoisier 2005, p663.
- [7] **P. BOISSE**, Mise en forme des renforts fibreux de composites, Éditions Techniques de l'Ingénieur, am3734, 2004, p2.
- [8] **P.PARNEIX**, Les matériaux composites en construction navale militaire, Éditions Techniques de l'Ingénieur, am5660, 2000, p2-7.
- [9] **H.BEWA**, Evaluation de la disponibilité et de l'accessibilité de fibres végétales à usages matériaux en France, ADEME, France, 2011.
- [10] **C. Baley**, Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. Techniques de l'Ingénieur, am 5130, 2004. p1-12.
- [11] **C. Baley, Y. Grohens, I. Pillin**, Etat de l'art sur les matériaux composites biodégradables, Revue des composites et des matériaux composites avancés, vol.14, p135-166, 2004.
- [12] **K. Van de Velde and P. Kiekens**, Thermoplastic pultrusion of natural fibre reinforced Composites, Composite Structures, 54(2-3), p355-360, 2001.

Références bibliographiques

- [13] **M.J.A. Van den Oever, H.L. Bos, and M. Van Kemenade**, Influence of the physical structure of flax fibres on the mechanical properties of flax fibre reinforced polypropylene composites, *Applied Composite Material*, vol. 7, p387-402, 2000.
- [14] **N. Defroidt and al**, Assessment of the tensile properties of coir, bamboo and jute fibre, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, p588-595, 2010.
- [15] **M. Jacob and K. T. Thomas, S.and Varughese**, Mechanical properties of sisal/oil palm hybrid fiber reinforced natural rubber composites, *Composites Science and Technology*, p955-965, June 2004.
- [16] **Y. Li, Y.W. Mai, and L. Ye**, Sisal fibre and its composites: a review of recent developments, *Composites Science and Technology*, p2037-2055, August 2000.
- [17] **Rafael Masdeu de Pedro**, Étude de préformes en fibre de lin, Université de Madrid, juin 2010.
- [18] **Ernst & Young**, Étude de marché des nouvelles utilisations des fibres végétales, ADEME, décembre 2005.
- [19] **J. Vallade**, Structure et développement de la plante. Morphogénèse et biologie de la reproduction des angiospermes, Dunod, Paris, 1999.
- [20] **K. Persson**, Micromechanical modelling of wood and fibre properties, PhD thesis, Department of Mechanics and Materials - Lund University, 2000.
- [21] **J.P. Thiery**, Mise en évidence des polysaccharides sur coupes fines en microscopie électronique, *J. Microsc.*, p987, 1967.
- [22] **V. Bossuyt**, Étude de la structure et des propriétés mécaniques de la fibre de lin, PhD thesis, Lille, 1941.
- [23] **C.T. Brett and K.W. Wamdron**, Physiology and biochemistry of plant cell walls, Chapman et Hall, 1996.

Références bibliographiques

- [24] **T. Nilsson** and **P.J. Gustafsson**, Influence of dislocation and plasticity on the tensile behaviour of flax and hemp fibres. *Composites: Part A*, p1722-1728, 2007.
- [25] Products Laboratory Forest, An interactive java program for determining microfibril angle from x-ray diffraction data, *TechLine*, p1-2, 2005.
- [26] **H. Lichtenegger**, **A. Reiterer**, **S.E. stanzl Tschegg**, and **P. Fratzl**, Variation of cellulose microfibril angles in softwoods and hardwoods - a possible strategy of mechanical Optimization, *Journal of structural biology*, p257-269, 1999.
- [27] **A. Chakravarty** and **J.W.S Hearle**, Observations of the tensile properties of ultimate cells of some plant fibres, *Journal of the textile institute*, p 651-656, 1967.
- [28] **H. H. Wang** and **al**, An improved fibril angle measurement method for wood fibres, *Wood Science and Technology*, p493-503, 2001.
- [29] **P. S. Mukherjee** and **K. G. Satyanarayana**, Structure and properties of some vegetable Fibres, *Journal of Materials Science*, p51-56, 1986.
- [30] **H.P. Stout** and **J.A. Jenkins**, Comparative strengths of some bast and leaf fibres, *Annales Textiles Belges*, p231-251, 1955.
- [31] **S.K. Batra**, *Handbook of fiber chemistry - Other long vegetable fibers*. M. Lewin and E.M. Pearce, 1998.
- [32] **Richard N'Tenga**, *Modélisation multi-échelle et caractérisation de l'anisotropie élastique de fibres végétales pour le renforcement de matériaux composites*, PhD thesis, Université Blaise Pascal de clermont ferrand - Université de Yaoundé, 2007.
- [33] **K. Goda** and **al**, Improvement of plant based natural fibers for toughening green composites-effect of load application during mercerization of ramie fibers, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, p2213-2220, December 2006.
- [34] **A. K. Bledzki** and **J. Gassan**, Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*, p221-274, May 1999.

Références bibliographiques

- [35] **R.M. Rowell, J.S. Han, and J.S Rowell**, Characterization and factors effecting fiber Properties, Natural Polymers and Agrofibers Bases Composites, p 115-134, 2000.
- [36] **Marianne Le Troedec and al**, Influence of various chemical treatments on the composition and structure of hemp fibres. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, p514-522, March 2008.
- [37] **D. ZENKERT** ,The handbook of sandwich construction. EMAS Publishing, UK 1997.
- [38] **B. Castanie**, contribution à l'étude des structures sandwichs dissymétrique, thèse de doctorat, ENSAE France, 2000.
- [39] **D. Zinkert**, An introduction to the sandwich construction. Emas publishing .UK. 1995.
- [40] **K.A.Olsson**, Sandwich construction design and experience. Proceeding of fourth international conference on sandwich construction, Stockholm1998, E-MAS Publishing.
- [41] **C.LAINE**),, Étude mécanique et expérimental du comportement Mécanique de plaques et coques sandwiches : Développement d'un élément Non linéaire Grandes déformations et applications au flambement de coques en constructions Navale. Thèse de doctorat, Université Joseph Four ver. Grenoble1. (1998
- [42] **HUYBRETCHS**, Dimensioning of wound sandwich tramway carriage. Proceeding of the fourth international conference on sandwich construction, Stockholm 1998, E-MAS Publishing.
- [43] **D. GAY** , Matériaux composite. Edition HERMES, 1998.
- [44] **C. BINÉTRUY**, Structures sandwiches, Éditions Techniques de l'Ingénieur, Paris – France , 2008, P8.
- [45] **C. BINÉTRUY**, Structures sandwiches, Éditions Techniques de l'Ingénieur, am5141, 2008, p2.
- [46] **T. Triantafillou, L J. Gibson**, Instrumented impact testing of aramide-reinforced composite materials, Instrumented impact testing of plastics and composites materials, ASTM STP936,Eds, American society of testing & materials, Philadelphia, PP219-235,1987.

Références bibliographiques

- [47] **J.E. ARBAOUI**, étude comparative et caractérisations mécaniques des structures sandwichs multicouches, Thèse de doctorat, Université de METZ, 2009.
- [48] **H. Allen**, Analysis and design of structural sandwich panels, Vol.51, Pergamon press Oxford, 1969.
- [49] **Frostig et al.** “High order theory for sandwich Beam Behavior with Transversely Flexible Core”, Journal of engineering Mechanics, Vol 118, P 1026, 1992.
- [50] **A.Elmahi, M.Khawar Farooq, S.Sahraoui, A.Bezazi**, Modeling of the flexural behavior of sandwich composite materials under cyclic fatigue; Materials and Design Vol 25 PP 199-208, 2004.
- [51] **M.Assarar**, Etude expérimentale et modélisation du comportement dynamique des composites stratifiés et sandwichs, thèse de doctorat, Université de MAINE, 2007.
- [52] **L. Reis, A. Silva**, Mechanical behavior of sandwich structures using natural cork agglomerated as core materials, Journal of sandwich structures and materials, Online June 5, 2009.
- [53] **C. ARIBI**, Étude comparative du comportement des différents matériaux composites (différentes matrices), mémoire de magistère, université de Boumerdes, 2012, p89.

Annexes

MEDAPOXY INJECT 812

Résine époxy sans solvant
pour injection

DESCRIPTION

Le **MEDAPOXY INJECT 812** est une résine époxy sans solvant destinée à la réparation des fissures dans le béton par injection.

Le **MEDAPOXY INJECT 812** est livré sous forme de kit pré dosé à 2 composants :

Élément A : Résine

Élément B : Durcisseur

PROPRIÉTÉS

- Excellente adhérence sur supports béton et mortier
- Sans retrait au durcissement
- Très bonnes résistances mécaniques et chimiques

CARACTÉRISTIQUES

- Rapport pondéral (A / B) : 2/1
- Densité (ISO758) : 1,1± 0,1
- Viscosité (CF4 /20°C) (NFT30 014) : 17 sec(±2)
- DPU (NFP18 810) : 30 mn à 20 °C
- Rc_c (20°C / 65%HR) (NF P18-872) >70 Mpa
- RL_c (20°C / 65%HR) (NFP18-872) >57 Mpa
- Adhérence sur béton (NFP18 894) >3 Mpa
(Rupture dans le béton)

MODE D'EMPLOI

Conditions d'utilisation :

Ne pas appliquer lorsque la température ambiante ou celle du support est inférieure à 10°C ou supérieure à 35°C.

Préparation du support (NFP74-203/ DTU 59-3)

Les supports doivent avoir au moins 28 jours d'âge. Ils doivent être secs, propres et débarrassés des parties non adhérentes. Nettoyer soigneusement et dépoussiérer les fissures à traiter.

Mélange :

- Procéder au mélange des deux composants une fois que la préparation des supports soit terminée.
- Préparer que la quantité de mélange pouvant être utilisée durant ce temps.
- Il est très important de bien remuer les deux éléments

constituant le **MEDAPOXY INJECT 812** jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène.

- Verser l'**élément B** (durcisseur) dans l'**élément A** (résine).
- Vider complètement les récipients afin de respecter le rapport du mélange.
- Remuer pendant 3 minutes avec un agitateur électrique à faible vitesse de rotation. Raclez plusieurs fois les parois du récipient afin d'assurer une dispersion totale.

Application :

Un matériel spécialement conçu pour l'injection de résines époxy est indispensable (machine d'injection). La mise en oeuvre du **MEDAPOXY INJECT 812** dépend du type d'appareil disponible et de la méthode d'injection.

CONSOMMATION

En fonction du volume de la fissure et de la porosité du support.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Livré en kit de 9 kg

Élément A: 6 kg

Élément B: 3 kg

Le produit se conserve une année à l'abri de la chaleur et de l'humidité dans son emballage d'origine fermé hermétiquement.

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Les résines époxydiques peuvent irriter la peau et les muqueuses. En conséquence, il est conseillé de porter des gants, des lunettes et un masque de protection lors de l'utilisation.

En cas de contact avec les yeux, laver à grande eau et consulter un médecin.

Nettoyer les outils après l'application à l'aide d'un diluant époxy (**MEDILUPOX**).

Se référer à la Fiche de Données Sécurité, disponible sur www.granitex-dz.com

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Annexe B : Fiche technique de liège aggloméré

| |
|---|
| <p>E.P.E TALEZA - LIEGE COLLO Spa au Capital de 510.325.000 Dinars FILIALE DE E A G R Adresse : BP 84 Route de Taléza COLLO WILAYA DE SKIKDA TEL : 213 (038) 71. 72. 14 & 038.71.67.47 FAX : 213 (038) 71. 68 . 02</p> |
|---|

FICHE TECHNIQUE

Liège aggloméré blanc Moyenne densité :

- DENSITE :280 kg/M3 +/- 20
- GRANULEES : 1/2 - 2/3 - 3/5 et 5/12
- COLLE : Polyuréthane Alimentaire
- RESISTANCE SOUS CHARGE STATIQUE :
- COMPRESSION :22 %
- RECUPERATION :89 %
- TENSION DE RUPTURE A LA TRACTION : 6 DAN/CM 2
- ELASTICITE : ALLONGEMENT A LA RUPTURE :5 %
- COMPORTEMENT AUX RAYONS SOLAIRES : léger jaunissement après une Année d'exposition au soleil
- RESISTANCE AUX ACIDES(Après 1 heure l'acide chlorique concentré fumant a 100 E/P 2° / 1019 G/M) aucune désagrégation de l'aggloméré
- RESISTANCE A L'EAU BOUILLANTE DURANT 3 H : aucune désagrégation
- EFFET D'ISOLATION :Isolation thermique et phonique
- RESISTANCE AU FEU :Brûle difficilement
- DIMENSIONS :300 x 300 – 500 x 500 – 450 x 450 – 1000 x 500
Epaisseurs : selon demande
- STABILITE DIMENSIONNELLE : Bonne stabilité
- VARIETESGamme variée
- **DECORATIF HAUTE GAMME :**
 - Densité :400 KG / M3
 - Dimensions :300 x 300 x 3 MM

Tension de rupture a la traction = 8 DAN / M2