

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



École Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique de Skikda

Département de Technologie

Filière : Génie des procédés

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de professeur de
l'enseignement secondaire

Thème :

**Développement et caractérisation d'un matériau
composite biodégradable à base de résine époxy
renforcée par des fibres de Luffa**

Présenté par :

Encadré par : Pr Laidi BABOURI

- Selma FOUFOU
- Chayma LADASSI

Date de soutenance : 23 juin 2024

Heure : 12h00

Membres du jury

| Nom et Prénom | Grade | Université | Qualité |
|---------------------|-----------------------------------|-----------------|-------------------------|
| ZENIKHERI Fahima | Maître de Conférences Classe B | ENSET Skikda | Présidente du jury |
| BABOURI Laidi | Professeur | ENSET Skikda | Directeur de mémoire |
| JEDID Nabil | Maître-Assistant Classe A | ENSET Skikda | Examineur |
| DEHAS Ouided | Maître de Conférences Classe B | ENSET Skikda | Examinatrice |

Année Universitaire : 2023-2024

Je dédie ce modeste travail À :

- *Qui se sont toujours sacrifié pour me voir réussir ; Mes chers parents **Nouara MAMECHE** et **Aissa FOUFOU**, la source de ma force et de ma confiance en moi, sans qui je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui et sans qui je ne serais pas arrivé jusqu'ici.*
- *Mes chers frères : **Yassine** et **Anes** qui étaient toujours là pour moi.*
- *Mes grands-parents que dieu les garde dans son vaste paradis.*
- *Ma chère grande mère **Fatima** que dieu la procure santé et longue vie.*
- *Toute ma famille : Mes oncles spécialement **Ami Sebti**, mes tantes et mes cousines.*
- *Mon cher binôme et ma copine **Chayma** qui m'a aidé et supporté tout le temps, et toute sa famille, spécialement sa mère.*
- *Mes besties **Rayane** et **Wassima** pour leur présence dans toutes les étapes de mon chemin pendant cinq ans et leur soutien moral.*
- *Mes chères amies **Marwa, Lina, Hasna, Samar, Maysoune, Anfel, Aya, Nada, Ahlem, Nihel, Chaima, Yamina, Aya, Roudaina, Ikram**, sans oublier les membres du cycle coranique « **Nasamat Diḳr** », en particulier mon enseignante **Nada MESIKH**.*

Je dédie ce modeste travail :

- *À chérie du mon cœur, toi pour qui Dieu Tout-Puissant a placé le paradis sous tes pieds et t'a honorée dans Son Livre sacré : **ma chère mère.***
- *À toi aussi, dont la mémoire est impérissable, qui nous a quittés pour l'éternité, tu as été le meilleur exemple de père de famille et je ne t'ai jamais vu faillir à apporter le bonheur et la joie : **mon cher père.***
- *À celle pour qui les mots se précipitent pour exprimer leur essence, qui m'a enseigné et affronté tant de difficultés pour que j'en sois là aujourd'hui, dont l'océan de tendresse apaise mes soucis et mes douleurs, ma deuxième mère et ma nourrice : **ma chère tante Louiza.***
- *À mon pilier, ma moitié et mon soutien sans fin, mon cher époux : **Youssef.***
- *À ceux qui ont été pour moi comme un père et une mère : **mes grands-parents,** que Dieu les enveloppe de Sa vaste miséricorde.*
- *À celle sur qui je peux compter pour les moindres petites choses, ma petite et chère tante : **Karima.***
- *À mes frères et sœurs qui ont eu un impact profond en surmontant les obstacles et les difficultés : **Oussama, Hadjer, Assia, Yamina, Khadija et Meryam.***
- *À mes oncles qui étaient à mes côtés dans la joie et la peine : **Mohamed, Ahmed, Ali, Abdelghani et Abderrazak,***
- *À ma collègue dans ce travail : **Selma,** je lui adresse mes remerciements sincères pour son assiduité et son soutien, ainsi qu'à tous les membres de sa famille, en particulier ses parents.*
- *À mes deux amies qui ont été comme des sœurs pendant mon parcours universitaire : **Wassima et Rayane.***
- *À tous mes amis et connaissances chers à qui je porte tout mon amour, mon estime et mon respect.*
- *À tous mes chers professeurs qui ne m'ont jamais refusé leur aide.*

Remerciements

Ce mémoire est le fruit de notre travail à l'École Normale Supérieure d'Enseignement Technologique de Skikda.

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à Allah le Tout-Puissant, qui nous a guidés sur le bon chemin et nous a donné la force, le courage, la santé et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

*C'est avec une profonde gratitude que nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements à notre directeur de mémoire, Monsieur **Laidi BABOURI**, professeur émérite à l'École Normale Supérieure d'Enseignement Technologique de Skikda. Sa patience inébranlable, ses conseils d'une acuité remarquable et son soutien indéfectible ont constitué des piliers inestimables tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Nous lui sommes particulièrement redevables de nous avoir ouvert les portes de son bureau et d'avoir suivi l'évolution de ce travail avec une rigueur exemplaire, malgré ses multiples responsabilités administratives.*

Nous tenons à remercier chaleureusement les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail de recherche.

- *Madame le docteur **Fahima ZENIKHERI**, présidente du jury.*
- *Madame le docteur **Ouided DEHAS**, membre examinatrice.*
- *Monsieur **Nabil DJEDID**, membre examinateur.*

*Nous adressons notre plus profonde reconnaissance au **Dr Ouided DEHAS** et au **Dr Yasmina BISKRI** pour leurs interactions scientifiques enrichissantes qui ont grandement contribué à la compréhension des implications des résultats de notre recherche, ainsi que le docteur **Khair-Eddine KRAIM**, le docteur **Hassen BENDJEFAL** et le docteur **Hani BOUBEKRI**.*

*Aussi, nous tenons à remercier le département de Technologie pour nous avoir permis d'y mener une partie des travaux nécessaires à la réalisation de ce mémoire, en particulier le chef de département, Docteur **Salih RAHMOUNI**, et son équipe administrative.*

Nos remerciements vont également aux personnes suivantes pour leur contribution à ce projet :

- *Monsieur **Samir MEBROUK** et Monsieur **Amine KAMEL**,*
- *L'artisan **Nahoule** et Monsieur **Ismail**,*
- *L'équipe du laboratoire de chimie et thermodynamique d'ENSET Azzaba : Monsieur **Mohamed MESSIKH**, **Fares DJEBIHA** et Madame **Soumia QUASRI**.*
- *Les techniciens de laboratoire de K-Plast Tube-Sétif, **Ameur ADALA**, **Belkacem SGHIRI**, **Chouaib BELMAHDI** et **Adel HENOUZE**.*
- *Monsieur **Ahcen MAMECHE** pour son aide et assistance pour effectuer le test de résistance au choc au niveau de Polymed-Sonatrach-Skikda.*
- *Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce projet.*

Selma FOUFOU et Chayma LADASSI

يقدم هذا العمل تطوير وتشخيص مركبات من راتنجات الأيبوكسيد المعززة بألياف اللوفا. تم تحضير المركبات باستخدام تقنية صب التلامس، باستخدام محتوى ألياف اللوفا يصل إلى 15% بالوزن.

كان الهدف الرئيسي هو دراسة تأثير نسبة ألياف اللوفا على الخصائص الميكانيكية (المرونة، الشد، الصلابة) والخصائص الفيزيائية (الكثافة، المتانة) للمركبات الناتجة.

أظهرت النتائج أن دمج ألياف اللوفا في مصفوفة راتنج الإيبوكسيد أدى إلى تحسين كبير في الخصائص الميكانيكية للمركبات. زادت المرونة، وقوة الشد، والصلابة جميعها مع محتوى ألياف اللوفا. انخفضت كثافة المركبات مع محتوى ألياف اللوفا، مما منح المواد خفة متزايدة. كشف تحليل المتانة أن المركبات كانت مقاومة لمياه الصنبور والمبيض، ولكنها كانت حساسة للبيئات العدوانية مثل حمض الكبريتيك وهيدروكسيد الصوديوم.

الكلمات المفتاحية: مركب، راتنج إيبوكسيد، ألياف اللوفا، التعزيز، الخصائص الميكانيكية، الخصائص الفيزيائية، صب التلامس.

Résumé

Ce travail présente le développement et la caractérisation de composites à base de résine époxy renforcés par des fibres de luffa. Les composites ont été préparés par la technique de moulage par contact, en utilisant des teneurs en fibres de luffa allant jusqu'à 15 % en poids.

L'objectif principal était d'étudier l'influence du pourcentage de fibres de luffa sur les propriétés mécaniques (résilience, traction, dureté) et physiques (densité, durabilité) des composites obtenus.

Les résultats ont montré que l'incorporation de fibres de luffa dans la matrice de résine époxy conduisait à une amélioration significative des propriétés mécaniques des composites. La résilience, la résistance à la traction et la dureté ont toutes augmenté avec la teneur en fibres de luffa. La densité des composites a diminué avec la teneur en fibres de luffa, conférant aux matériaux une légèreté accrue. L'analyse de la durabilité a révélé que les composites étaient résistants à l'eau du robinet et à l'eau de javel, mais sensibles aux environnements agressifs tels que l'acide sulfurique et la soude caustique.

Mots-clés : Composite, résine époxy, fibres de luffa, renforcement, propriétés mécaniques, propriétés physiques, moulage par contact.

Abstract

This work presents the development and characterization of epoxy resin composites reinforced with luffa fibers. The composites were prepared by the contact molding technique, using luffa fiber contents of up to 15% by weight.

The main objective was to study the influence of the percentage of luffa fibers on the mechanical (resilience, tensile, hardness) and physical (density, durability) properties of the obtained composites.

The results showed that the incorporation of luffa fibers into the epoxy resin matrix led to a significant improvement in the mechanical properties of the composites. Resilience, tensile strength and hardness all increased with the luffa fiber content. The density of the composites decreased with the luffa fiber content, giving the materials increased lightness. Durability analysis revealed that the composites were resistant to tap water and bleach, but were sensitive to aggressive environments such as sulfuric acid and sodium hydroxide.

Keywords : Composite, epoxy resin, luffa fibers, reinforcement, mechanical properties, physical properties, contact molding.

Table de matières

| | |
|-----------------------------|----|
| Introduction générale | 01 |
| Références bibliographiques | 02 |

Chapitre I : Revue Bibliographique

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| 1. Matériaux composites | 03 |
| 1.1. Définition | 04 |
| 1.2. Caractéristiques | 04 |
| 1.3. Constituants des composites | 04 |
| 1.3.1. Matrice | 04 |
| 1.3.1.1. Les matrices organiques | 05 |
| 1.3.1.1.1. Les Thermoplastiques | 06 |
| 1.3.1.1.2. Les thermodurcissables | 06 |
| 1.3.1.2. Les matrices minérales | 07 |
| 1.3.1.2.1. Les matrices métalliques | 08 |
| 1.3.1.2.2. Les matrices céramiques | 09 |
| 1.3.2. Renfort | 10 |
| 1.3.2.1. Classifications | 11 |
| 1.3.2.1.1. Organique | 11 |
| 1.3.2.1.2. Minéraux | 11 |
| 1.3.2.1.2.1. Céramique | 12 |
| 1.3.2.1.2.2. Métallique | 12 |
| 1.3.2.2. Architecture | 12 |
| 1.3.2.2.1. Discontinue | 12 |
| 1.3.2.2.2. Continue | 12 |
| 1.3.2.2.2.1. Forme linéique | 12 |
| 1.3.2.2.2.2. Forme surfacique | 13 |
| 1.3.2.2.2.2.1. Mats | 13 |
| 1.3.2.2.2.2.2. Tissus et rubans | 13 |
| 1.3.2.2.2.2.2.1. Bidirectionnel | 14 |
| 1.3.2.2.2.2.2.2. Multidirectionnel | 15 |

Table de matières

| | |
|---|-----------|
| 1.3.2.3. Ensimage | 16 |
| 1.3.2.4. Interface renfort-matrice | 17 |
| 1.3.3. Additifs | 18 |
| 1.4. Types des composites | 18 |
| 1.5. Classification | 19 |
| 1.5.1. Selon le renfort | 19 |
| 1.5.1.1.1. Composite à particules | 19 |
| 1.5.1.1.2. Composite à fibres | 19 |
| 1.5.2. Selon la matrice | 20 |
| 1.5.2.1.1. Composite à matrice métallique | 20 |
| 1.5.2.1.2. Composite à matrice céramique | 20 |
| 1.5.2.1.3. Composite à matrice organique | 21 |
| 1.6. Architecture | 21 |
| 1.6.1. Monocouche | 21 |
| 1.6.2. Stratifiée | 22 |
| 1.6.3. Sandwich | 22 |
| 1.7. Procède de fabrication | 23 |
| 1.7.1. Moulage au contact | 23 |
| 1.7.2. Moulage par projection simultané | 25 |
| 1.7.3. Moulage sous vide | 26 |
| 1.7.4. Moulage par injection basse pression de résine RTM | 27 |
| 1.7.5. Moulage par injection de compound BMC | 28 |
| 1.7.6. Moulage par compression de mat pré imprégné SMC | 29 |
| 1.7.7. Moulage par enroulement filamentaire | 29 |
| 1.7.8. Moulage par centrifugation | 30 |
| 1.8. Domaine d'application | 30 |
| 1.9. Avantages et inconvénients | 32 |
| 2. Résine Epoxy | 33 |
| 2.1. Définition | 33 |
| 2.2. Aperçu sur la Synthèse des résines époxydes DGEBA | 33 |

Table de matières

| | |
|--|-----------|
| 2.3. Durcisseurs et réaction de durcissements | 34 |
| 2.4. Propriétés physiques et mécaniques des résines époxydes | 35 |
| 2.5. Avantages et Inconvénients | 36 |
| 2.6. Domaine d'application | 36 |
| 3. Luffa | 38 |
| 1.1.Luffa cylindrica (aegyptiaca) | 38 |
| 1.1.1. Croissance | 39 |
| 1.1.2. Architecture | 40 |
| 1.1.3. Composition chimique | 41 |
| 1.1.3.1. Cellulose | 42 |
| 1.1.3.2. Hémicellulose | 43 |
| 1.1.3.3. Lignine | 44 |
| 1.1.3.4. Cendre | 46 |
| 1.1.4. Méthodes de modification de la surface des fibres | 46 |
| 1.1.4.1. Traitement alcalin | 47 |
| 1.1.4.2. Traitement par le permanganate | 48 |
| 1.1.4.3. Traitement par le silane | 49 |
| 1.1.4.4. Traitement par l'acétylation | 50 |
| 1.1.5. Propriétés | 52 |
| 1.1.5.1. Physiques | 52 |
| 1.1.5.2. Mécaniques | 52 |
| 1.1.5.3. Chimiques | 52 |
| 1.1.5.4. Morphologique | 52 |
| 1.1.5.4.1. MEB | 52 |
| 1.1.5.4.2. MO | 53 |
| 1.1.6. Avantages et inconvénients | 54 |
| 1.1.7. Utilisations | 55 |
| 1.1.7.1. Domaine domestique | 55 |
| 1.1.7.2. Domaine pharmaceutique | 55 |
| 1.1.7.3. Domaine médicale et biologique | 56 |

Table de matières

| | |
|--|----|
| 1.1.7.4.Domaine de traitement des eaux | 56 |
| 1.1.7.5.Domaine industrielle | 57 |
| 1.2.Luffa acutangula (Pipangaille à côtes) | 57 |
| 1.3.Luffa cordifolia blume | 58 |
| 1.4.Luffa operculata cogn | 58 |
| 1.5.Luffa echinata roxb | 59 |
| Références bibliographiques | 60 |

Chapitre II : Matériaux, techniques et conditions expérimentales

| | |
|--|----|
| 1. Matériaux | 63 |
| 1.1.Matrice polymérique : Résine époxy | 64 |
| 1.2.Renfort : Fibre de luffa | 64 |
| 1.3.Fabrication des composites | 66 |
| 1.3.1.Calculs de formulation | 66 |
| 1.3.2.Elaboration des composites | 68 |
| 2. Techniques et conditions expérimentales | 70 |
| 2.1.Essais mécaniques | 70 |
| 2.1.1. Essaie de résistance au choc | 70 |
| 2.1.2. Essaie de traction | 70 |
| 2.1.3. Dureté | 72 |
| 2.2.Essais physiques (Densité) | 73 |
| 2.3.Essais chimiques (Evaluation de la durabilité) | 74 |

Chapitre III : Résultats et discussions

| | |
|---|----|
| 1. Essais mécaniques | 76 |
| 1.1.Résilience des bio-composites RE/fibres de Luffa au choc IZOD | 76 |
| 1.2.Propriétés en traction Essais | 76 |
| 1.3.Dureté shore des bio-composites RE/fibres de Luffa | 77 |
| 2. Essai physique (Densité) | 78 |
| 3. Essai chimique (Evaluation de la durabilité) | 79 |
| Conclusion générale. | 86 |
| Annexes | 87 |

Liste de figures

| Désignation | Page |
|---|------|
| Chapitre 01 : Revue bibliographique | |
| Figure 1.1 : Composition d'un matériau composite. | 04 |
| Figure 1.2 : Classification les différents types de la matrice. | 05 |
| Figure 1.3 : Classification de différents types de renfort. | 11 |
| Figure 1.4 : Armature unidirectionnelle. | 13 |
| Figure 1.5 : Les tissus et rubans. | 14 |
| Figure 1.6 : (a)Forme Toile ou taffetas, (b) Forme tissage sergé, (c) Forme tissage satin. | 15 |
| Figure 1.7 : Exemple de renfort multidirectionnel. | 16 |
| Figure 1.8 : (a) Pli unidirectionnel, (b) Composite stratifié, (c) Désignation d'une âme nid d'abeilles. | 23 |
| Figure 1.9 : Moulage au contact. | 25 |
| Figure 1.10 : Moulage par projection simultané. | 25 |
| Figure 1.11 : Moulage sous vide. | 27 |
| Figure 1.12 : Moulage par injection basse pression de résine. | 28 |
| Figure 1.13 : Moulage par compression de mat pré imprégné. | 29 |
| Figure 1.14 : Moulage par enroulement filamentaire. | 30 |
| Figure 1.15 : Moulage par centrifugation. | 30 |
| Figure 1.16 : Domaine d'application des matériaux composites. | 31 |
| Figure 1.17 : Formule chimique du groupe époxyde. | 33 |
| Figure 1.18 : Synthèse des résines à base de bisphénol A. | 33 |
| Figure 1.19 : Domaines d'application de la résine époxy. | 37 |
| Figure 1.20 : (a) Plant du luffa cylindrica, (b) feuilles du luffa cylindrica, (c) Fleurs du luffa cylindrica, (d) Fruit du luffa cylindrica, (e)Grains du luffa cylindrica. | 39 |
| Figure 1.21 : States de croissance du luffa cylindrique. | 40 |
| Figure 1.22 : Luffa mature et immature. | 40 |
| Figure 1.23 : Architecture du luffa cylindrique. | 41 |
| Figure 1.24 : Molécule de la cellulose (n répétitions du motif cellobiose). | 42 |
| Figure 1.25 : Structure d'un type de xyloglucane. | 43 |

Liste de figures

| | |
|--|----|
| Figure 1.26 : Les structures chimiques des alcools phénylpropénoïques. | 44 |
| Figure 1.27 : Structure typique de la lignine. | 45 |
| Figure 1.28 : Micrographie MEB des cordons luffa cylindrica à faible grossissement. | 53 |
| Figure 1.29 : Micrographie MEB des cordons luffa cylindrica à fort grossissement. | 53 |
| Figure 1.30 : Structure des cordons de luffa cylindrica. | 54 |
| Figure 1.31 : Utilisation domestique du luffa cylindrique. | 55 |
| Figure 1.32 : Utilisation pharmaceutique du luffa cylindrique. | 56 |
| Figure 1.33 : Utilisation des fibres luffa comme un renfort des matériaux composites. | 57 |
| Figure 1.34 : Luffa acutangula. | 58 |
| Figure 1.35 : Luffa cordifolia. | 58 |
| Figure 1.36 : Luffa operculata. | 59 |
| Figure 1.37 : Luffa echinata. | 59 |

Chapitre 02 : Matériaux, techniques et conditions expérimentales

| | |
|---|----|
| Figure 2.1 : Photographie de la résine et le durcisseur. | 64 |
| Figure 2.2 : Photographies des étapes de prétraitement. | 65 |
| Figure 2.3 : Photographies des étapes de traitement. | 66 |
| Figure 2.4 : Photographies du moule silicone. | 67 |
| Figure 2.5 : Photographie des quantités des renforts et les composites élaborées. | 69 |
| Figure 2.6 : (a) Photographie de la machine d'entaille ; (b) photographie de l'appareil de l'impact. | 70 |
| Figure 2.7 : Photographie de la machine ZWICK ROELL Z010. | 71 |
| Figure 2.8 : Photographie de l'échantillon dans la machine de traction. | 72 |
| Figure 2.9 : Photographies de l'appareil de dureté. | 72 |
| Figure 2.10 : Photographie de la balance de densité. | 74 |
| Figure 2.11 : photographies des échantillons dans différent solutions. | 75 |

Chapitre 03 : Résultats et discussion

| | |
|---|----|
| Figure 3.1 : Variations de la résilience des bio-composites résine époxy RE/ fibres de Luffa en fonction du taux de fibre. | 77 |
| Figure 3.2 : Variations du module de Young des bio-composites résine époxy (RE)/ Luffa en fonction du taux de fibre. | 78 |

Liste de figures

| | |
|---|----|
| Figure 3.3 : Variations de la dureté Shore des bio-composites résine époxy RE/ fibres de Luffa en fonction du taux de fibre. | 79 |
| Figure 3.4 : Variations de la densité des bio-composites résine époxy RE/ fibres de Luffa en fonction du taux de fibre. | 80 |
| Figure 3.5 : Le gain de masse des matériaux composites en fonction du taux de renfort en luffa après 42 jours d'immersion dans la solution d'acide sulfurique (H_2SO_4). | 81 |
| Figure 3.6 : Le gain de masse des matériaux composites en fonction du taux de renfort en luffa après 42 jours d'immersion dans l'eau de robinet. | 81 |
| Figure 3.7 : Le gain de masse des matériaux composites en fonction du taux de renfort en luffa après 42 jours d'immersion dans la solution de la soude (NaOH). | 82 |
| Figure 3.8 : Le gain de masse des matériaux composites en fonction du taux de renfort en luffa après 42 jours d'immersion dans l'eau de Javel. | 82 |
| Figure 3.9: Photographie microscopique des composites après 42 jours. | 83 |

Liste de tableaux

| Désignation | Page |
|---|------|
| Chapitre 01 : Revue bibliographique | |
| Tableau 1.1 : Avantages et inconvénients des thermoplastiques. | 06 |
| Tableau 1.2 : Propriétés de certains thermoplastiques courants. | 06 |
| Tableau 1.3 : Avantages et inconvénients des thermodurcissables. | 07 |
| Tableau 1.4 : Principales propriétés physiques des thermodurcissables. | 07 |
| Tableau 1.5 : Avantages et inconvénients des matériaux composites. | 32 |
| Tableau 1.6 : Avantages et inconvénients de la résine époxy. | 36 |
| Tableau 1.7 : Propriétés physique du luffa. | 52 |
| Tableau 1.8 : Propriétés mécanique du luffa. | 52 |
| Tableau 1.9 : Avantages et inconvénients des fibres végétales. | 54 |
| Chapitre 02 : Matériaux, techniques et conditions expérimentales | |
| Tableau 2.1 : Caractéristiques physico-chimiques de la matrice. | 63 |
| Tableau 2.2 : Désignation des composites élaborés. | 68 |
| Chapitre 03 : Résultats et discussion. | |
| Tableau 3.1 : Détails des observations enregistré. | 85 |

Liste des abréviations et symboles

| Symboles | Abréviations |
|---|--|
| a : Energie de rupture ou résilience (N). | ABS : Acrylonitrile Butadiene Styrenne. |
| A_n : Energie cinétique absorbée (joules). | ASTM : American Society for Testing and Materials. |
| α : Coefficient de dilatation thermique (C ⁻¹). | BMC : Moulage par injection de compound. |
| D : Densité du matériau (g/cm ³). | CEL : Composite Epoxy/ Luffa. |
| ΔL : Allongement final de l'éprouvette (mm). | CMC : Composite à matrice céramique. |
| e : Epaisseur du composite (mm). | CMM : Composite à matrice métallique. |
| E : Module d'Young (module d'élasticité) (MPa). | CMO : Composites à matrice organique. |
| ε : Déformation (%). | COV : Composé organique volatile. |
| ε : Porosité interne. | DGBA : DiGlycidyl Ether du Bisphénol A. |
| ε_e : Porosité externe. | HDPE : Polyéthylène Haut Densité. |
| ε_r : Déformation à la rupture (%). | ISO : International Organization for Standardization. |
| F_{max} : Force maximale appliquée avant rupture (N). | MEB : Microscopie électronique à balayage. |
| G : Gain de poids (%). | MO : Microscopie optique. |
| G : Module de cisaillement (MPa) | PET : Polyéthylène téréphalate. |
| h : Teneur en eau (%). | PMMA : Poly (méthacrylate de méthyle). |
| l : Largeur du moule (mm). | PP : Polypropylène. |
| L : Longueur du moule (mm). | PS : Polystyrène. |
| λ : Conductivité thermique (W / m.K). | PVC : Polychlorure de vinyle. |
| M : Masse de résine (g). | RE : Résine époxy. |
| m_i : Masse initiale de l'échantillon. | RTM : Moulage par injection basse pression de résine. |
| m_t : Masse de l'échantillon après immersion pendant la durée t. | SMC : Moulage par compression de mat pré imprégné. |
| | UV : Ultra-violet. |

Liste des abréviations et symboles

ρ : Densité (la masse volumique) (g/cm^3).

ρ_{app} : Densité apparente (g/cm^3).

ρ_l : Masse volumique du liquide d'immersion (g/cm^3).

ρ_r : Densité réelle (g/cm^3).

σ : Contrainte (résistance à la traction) (MPa).

S_0 : Section initiale de l'éprouvette (mm^2).

T_{max} : Plage de température de distorsion thermique ($^{\circ}\text{C}$).

T_g : Température de transition vitreuse.

V : Volume de résine (mm^3).

W_a : Masse de l'échantillon dans l'air (g).

W_b : Masse de l'échantillon immergé dans le liquide (g).

ν : Coefficient de Poisson.

***Introduction
générale***

Introduction générale

L'industrie des matériaux composites connaît une croissance fulgurante, stimulée par la recherche de solutions durables et performantes.

Les polymères, en raison de leur facilité de mise en œuvre, de leur productivité et de leur faible coût, constituent une base de choix pour ces matériaux. Cependant, l'utilisation de renforts synthétiques, tels que les fibres d'aramide, de carbone ou de verre, pose des problèmes environnementaux et de santé importante. En effet, ces matériaux ne sont pas biodégradables, ce qui entraîne l'accumulation de déchets solides et une pollution croissante [1].

Face à ce défi, les chercheurs se tournent vers les fibres naturelles comme alternative écologique et durable. Le *Luffa Cylindrica*, une éponge végétale abondante, économique, légère et non toxique, présente des propriétés mécaniques et de stockage d'énergie remarquables, ainsi que des capacités d'absorption des ondes sonores et de choc. Ces caractéristiques en font un candidat idéal pour le développement de composites verts [2].

Notre travail vise à élaborer et à caractériser un composite époxy/luffa traité à la soude. Ce choix s'explique par les propriétés remarquables de la résine époxy, notamment son faible retrait, son adhérence élevée, sa résistance mécanique et sa résistance chimique, qui font d'elle une matrice idéale pour les composites à haute performance [3].

Le mémoire est structuré en trois chapitres :

Chapitre 1 : Revue bibliographique

Ce chapitre présente une revue complète de la littérature sur les matériaux composites, en mettant l'accent sur les polymères, les renforts naturels et le *Luffa Cylindrica*. Il aborde également les propriétés et les applications des composites époxy/luffa.

Chapitre 2 : Matériaux, techniques et conditions expérimentales

Ce chapitre décrit en détail la méthodologie expérimentale utilisée pour l'élaboration et la caractérisation du composite époxy/luffa traité à la soude. Il présente les matériaux utilisés, les techniques de préparation et les méthodes de caractérisation.

Chapitre 3 : Résultats et discussion

Ce chapitre présente les résultats obtenus lors de la caractérisation du composite époxy/luffa traité à la soude. Les propriétés mécaniques, thermiques et morphologiques du composite sont analysées et discutées en détail.

Conclusion

Ce mémoire explore le potentiel du *Luffa Cylindrica* comme renfort naturel pour les composites époxy. Les résultats obtenus démontrent que le traitement à la soude améliore significativement les propriétés du composite, le rendant prometteur pour diverses applications dans les domaines de l'automobile, de la construction et de l'aéronautique.

Références bibliographiques

- [1] Vi Vi Do Thi Do Thi, « Matériaux composites à fibres naturelles / polymère biodégradables ou non », Université de Grenoble, Université des sciences naturelles d'Ho Chi Minh Ville, 20 juillet 2011.
- [2] E. Psarra et G. C. Papanicolaou, « Luffa Cylindrica as a durable biofiber reinforcement for epoxy systems », *Compos. Sci. Technol.*, vol. 203, p. 108597, févr. 2021, doi: 10.1016/j.compscitech.2020.108597.
- [3] C. Georgel, « Résines époxydes renforcées avec des fibres naturelles », Faculté des études supérieures de l'Université Laval, 2009.

Chapitre 01

Revue

bibliographique

Chapitre 1 : Revue bibliographique

Ce chapitre présente la recherche bibliographique menée dans le cadre de ce mémoire.

La recherche bibliographique a été effectuée en utilisant différentes sources d'information, notamment :

- **Bases de données bibliographiques** : Des bases de données spécialisées dans le domaine scientifique du mémoire ont été consultées, telles que Science Direct, Scopus, Google Scholar et Web of Science.
- **Revue scientifique** : Des revues scientifiques pertinentes ont été consultées, en se concentrant sur celles publiant des articles de recherche dans les domaines des matériaux composites, des résines époxy et du luffa.
- **Livres et chapitres de livres** : Des ouvrages spécialisés dans les domaines précités ont été consultés pour approfondir les connaissances sur les sujets abordés.
- **Sites web et conférences** : Des sites web d'institutions de recherche et d'organisations professionnelles ont été consultés, ainsi que les actes de conférences pertinentes.

Les mots clés de recherche suivante ont été utilisés pour identifier les sources d'information pertinentes :

- **Composites** : matériaux composites, renforts, matrice, propriétés mécaniques, applications.
 - **Résine époxy** : structure chimique, propriétés physiques et chimiques, applications, durcissement.
 - **Luffa** : structure végétale, propriétés mécaniques, applications, biodégradabilité.
-

1. Matériaux composites

1.1. Définition

Un matériau composite est une substance solide hétérogène formée par la combinaison d'au moins deux constituants de natures différentes et non miscibles (incapables de se mélanger uniformément). L'interface entre ces constituants joue un rôle crucial dans la détermination des propriétés physiques et mécaniques du composite.

Ces deux constituants sont désignés par le terme "phases". La première, continue, est appelée "matrice", tandis que la seconde, discontinue, est appelée "renfort" [1- 3] .

Les matériaux composites se distinguent par des propriétés souvent supérieures à celles de leurs constituants individuels. Ils peuvent présenter des caractéristiques remarquables qui dépassent celles des matériaux d'origine.

Exemples de matériaux composites courants :

- **Béton armé** : Renforcement en acier dans une matrice de béton.
- **Fibre de verre** : Fibres de verre dans une matrice polymère.
- **Composites en fibre de carbone** : Fibres de carbone dans une matrice de résine époxy.

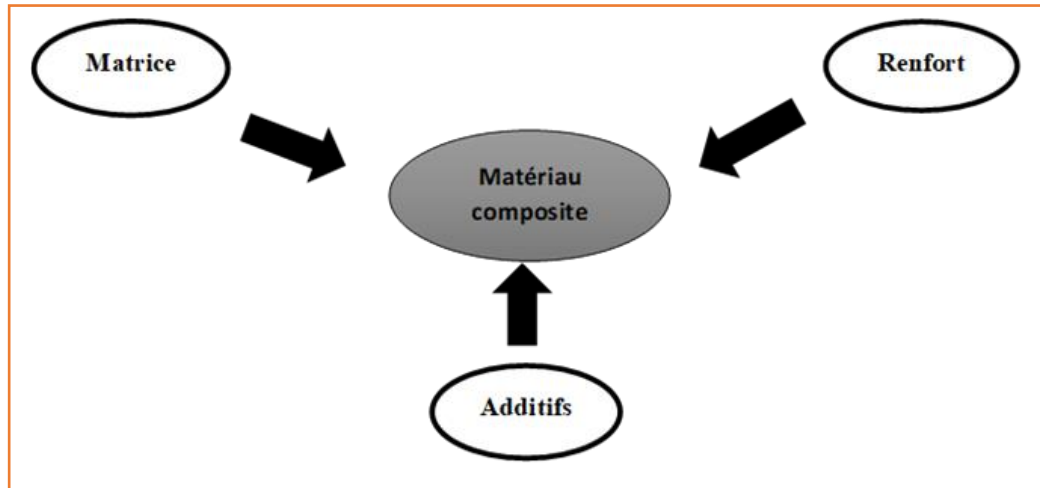


Figure 1.1 : Composition d'un matériau composite.

1.2. Caractéristiques

Les propriétés des matériaux composites dépendent de plusieurs facteurs :

- Nature et quantité des matériaux constitutifs.
- Géométrie et répartition du renfort.
- Interactions et interface matrice-renfort.

Les principales caractéristiques des matériaux composites sont :

- Gain de masse (légèreté).
- Résistance à la fatigue.
- Tenue aux impacts et au choc.
- Liberté de forme.
- Bonne résistance au vieillissement face à l'humidité, à la chaleur et à la corrosion.
- Sensibilité aux produits chimiques (selon la nature des constituants).
- Isolation électrique (certains types de composites).
- Anisotropie : les propriétés du matériau varient selon la direction de la force ou de la contrainte appliquée[4].

1.3. Constituants

1.3.1. Matrice

La matrice est le matériau qui englobe et maintient les fibres de renfort dans leur position et forme désirées, conférant ainsi la forme finale souhaitée au produit [2] .

Elle joue un rôle crucial dans la performance et la durabilité du matériau composite en remplissant plusieurs fonctions essentielles :

- **Maintien de la forme** : La matrice assure la cohésion interne du composite en maintenant les fibres de renfort dans leur disposition structurée. Cela permet au matériau de conserver sa forme et sa résistance mécanique sous charge.

Chapitre 1 : Revue bibliographique

- **Protection du renfort** : La matrice agit comme une barrière protectrice, isolant les fibres de renfort des environnements agressifs qui pourraient les dégrader. Elle prévient la corrosion, l'érosion et d'autres formes de détérioration, contribuant ainsi à la longévité du composite.
- **Finition de surface** : La matrice définit le fini de surface du composite, influençant sa texture, sa rugosité et son aspect esthétique. Elle peut être formulée pour obtenir des surfaces lisses et brillantes, rugueuses et antidérapantes, ou avec des propriétés spécifiques selon l'application prévue (par exemple, résistance aux rayures, propriétés d'isolation thermique) [3].

La classification des types de matrices est présentée sur la **Figure 1.2**.

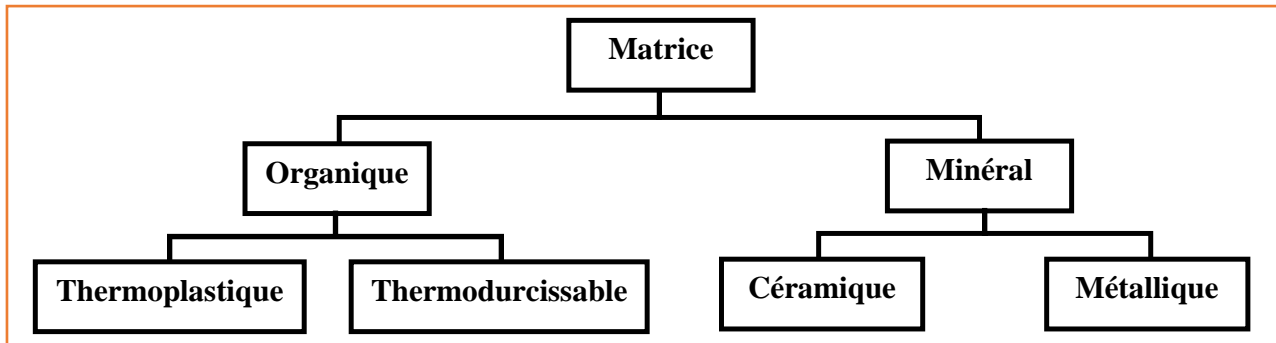


Figure 1.2 : Classification les différents types de la matrice.

1.3.1.1. Les matrices organiques

Dans les matériaux composites à matrice organique, la matrice est communément appelée "résine". Ces résines sont des polymères d'hydrocarbures saturés, classées en deux catégories distinctes : les thermoplastiques et les thermodurcissables. Chacune de ces catégories présente des propriétés mécaniques et de comportement unique.

Le choix d'une matrice organique pour la fabrication de composites est largement motivé par les propriétés spécifiques qu'elles confèrent au matériau final :

- **Faible densité** : Les matrices organiques contribuent à la légèreté des composites, ce qui est un avantage crucial dans de nombreuses applications, notamment dans le transport, l'aéronautique et le bâtiment.
- **Haute résistance** : Malgré leur faible densité, les composites à matrice organique peuvent présenter une résistance mécanique élevée, rivalisant ou surpassant même certains alliages métalliques.
- **Faible conductivité électrique et thermique** : Les propriétés isolantes des matrices organiques font des composites des matériaux de choix pour des applications électriques et thermiques, où la conduction de chaleur ou d'électricité est indésirable.
- **Résistance à la corrosion** : La nature inerte des matrices organiques offre une protection contre la corrosion, ce qui est particulièrement important dans les environnements agressifs ou humides [2].

Chapitre 1 : Revue bibliographique

Le choix entre une matrice thermoplastique ou thermodurcissable dépend des exigences spécifiques de l'application et des propriétés recherchées dans le matériau composite final.

1.3.1.1.1. Les Thermoplastiques

Les thermoplastiques sont des polymères constitués de longues chaînes moléculaires linéaires ou ramifiées obtenues par polyaddition. Ces structures peuvent être semi-cristallines ou amorphes. A température ambiante, les thermoplastiques sont durs et rigides. Lorsqu'ils sont chauffés au-dessus de leur température de transition vitreuse (T_g), ils deviennent malléables et moulables jusqu'à ce qu'ils refroidissent à nouveau. Au cours de ce processus, la structure chimique ne change pas et le processus de chauffage et de refroidissement peut être répété plusieurs fois. Cette transition réversible de l'état rigide à l'état plastique est une caractéristique clé des thermoplastiques[5].

Tableau 1.1 : Avantages et inconvénients des thermoplastique [4-5].

| Avantages | Inconvénients |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none">- Recyclables- Légers- Peu coûteux- Facile à manipuler- Bonne résistance à l'impact- Moins polluants | <ul style="list-style-type: none">- Point de fusion bas- Mauvaise résistance aux solvants organique et polaire- Faible résistance mécanique et chimique |

Tableau 1.2: Propriétés de certains thermoplastiques courants [2].

| Polymère | T_g (°C) | T_f (°C) | Température de thermoformage (°C) | Densité (g/cm ³) | Module d'élasticité (GPa) | Coefficient de dilatation thermique (10 ⁻⁶ /°C) |
|-------------|------------|------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------|--|
| PP | -5 | 165 | 150 - 195 | 0,92 | 30 | 1,2 |
| HDPE | -100 | 134 | 130 - 205 | 0,95 | 28 | 1,1 |
| PVC | 75 - 105 | 160 - 220 | 100 - 180 | 1,39 | 58 | 2,9 |
| PS | 90 - 100 | 240 | 130 - 155 | 1,05 | 55 | 3,2 |
| PET | 70 | 255 - 265 | 120 - 170 | 1,30 | 47 | 2,6 |
| ABS | 90 - 120 | 230 | 130 - 200 | 1,05 | 50 | 2,5 |
| PMMA | 100 | 270 | 150 - 190 | 1,18 | 72 - 80 | 3,3 |

1.3.1.1.2. Les thermodurcissables

Les thermodurcissables, également appelés polymères réticulés, sont des macromolécules tridimensionnelles rigides formées par une réaction de réticulation irréversible. Contrairement aux thermoplastiques, qui peuvent être fondus et remodelés, les thermodurcissables subissent une transformation chimique permanente lors de leur durcissement, les rendant **infusibles et insolubles**.

Chapitre 1 : Revue bibliographique

Cette structure tridimensionnelle dense confère aux thermodurcissables des propriétés mécaniques et thermiques supérieures aux thermoplastiques.

Les thermodurcissables peuvent être obtenus par deux procédés principaux :

- **Polycondensation ou polymérisation** : De petites molécules, appelées monomères, réagissent entre elles pour former des chaînes polymères plus longues. Ces chaînes s'entremêlent et se lient les unes aux autres, créant un réseau tridimensionnel.
- **Réticulation de macromolécules linéaires** : Des macromolécules linéaires préexistantes, souvent appelées prépolymères, sont reliées entre elles par des agents réticulant. Ces agents provoquent des réactions chimiques qui créent des liens permanents entre les chaînes, formant un réseau tridimensionnel.

La réaction de réticulation, déclenchée par la chaleur, un catalyseur ou les deux, transforme les matières premières liquides ou pulvérulentes en un matériau solide et rigide. Cette transformation irréversible est ce qui distingue les thermodurcissables des thermoplastiques [6].

Tableau 1.3 : Avantages et inconvénients des thermoplastique

| Avantages | Inconvénients |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Résistance chimique, thermique et mécanique élevée - Bonne adhésion aux renforts - Légèreté - Bonne résistance aux solvants et à l'humidité | <ul style="list-style-type: none"> - Cout plus élevé - Non recyclables |

Tableau 1.4 : Principales propriétés physiques des thermodurcissables [2].

| Résine | Densité (kg/m ³) | Module d'élasticité (MPa) | Module de cisaillement (MPa) | Coefficient de Poisson (ν) | Température de déviation thermique (°C) | Conductivité thermique (W/m°C) | Température de service (°C) |
|----------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|---|--------------------------------|-----------------------------|
| Epoxyde | 1200 | 4500 | 1600 | 0,4 | 130 | 0,2 | 90 - 200 |
| Phénolique | 1300 | 3000 | 1100 | 0,4 | 70 | 0,3 | 120 - 200 |
| Polyester | 1200 | 4000 | 1400 | 0,4 | 80 | 0,2 | 60 - 200 |
| Polycarbonate | 1200 | 2400 | - | 0,35 | 60 | - | 120 |
| Vinylester | 1150 | 3300 | - | - | 75 | - | > 100 |
| Silicone | 1100 | 2200 | - | 0,5 | 35 | - | 100 - 350 |
| Uréthane | 1100 | 700 - 7000 | - | - | 30 | - | 100 |

1.3.1.2. Les matrices minérales

Les matrices minérales sont des matériaux constitués principalement de composés inorganiques tels que le carbure de silicium (SiC), le carbone ou encore la céramique. Elles sont particulièrement appréciées pour leur capacité à résister à des températures élevées, dépassant souvent les 1000°C.

Cette propriété les rend idéales pour des applications dans des environnements thermiquement exigeants, comme dans les moteurs, les fours et les systèmes de freinage [7].

1.3.1.2.1. Les matrices métalliques

Les matrices métalliques sont composées de métaux purs ou d'alliages métalliques. Les métaux purs couramment utilisés comme matrices incluent le magnésium et le titane. Les alliages métalliques, quant à eux, combinent un métal principal avec d'autres éléments pour améliorer ses propriétés. Des exemples d'alliages métalliques utilisés comme matrices incluent l'aluminium et ses alliages ainsi que l'acier[2].

Les matrices métalliques présentent plusieurs avantages qui les rendent attrayantes pour une large gamme d'applications :

- **Excellente conductivité électrique et thermique :** Les métaux conduisent efficacement la chaleur et l'électricité, ce qui est crucial pour des applications telles que les dissipateurs thermiques et les composants électroniques.
- **Résistance accrue au vieillissement, au feu et à l'usure :** Les matrices métalliques, en particulier les alliages, offrent une meilleure résistance à la dégradation due à la chaleur, aux flammes et à la friction, prolongeant ainsi la durée de vie des composants.
- **Rigidité et résistance mécanique élevées :** Les métaux sont généralement plus rigides et résistants que les autres types de matrices, ce qui les rend idéaux pour des applications structurelles exigeantes.

Cependant, les matrices métalliques présentent également un inconvénient majeur :

- **Densité élevée :** Les métaux sont généralement plus denses que les autres types de matrices, ce qui peut limiter leur utilisation dans des applications où le poids est un facteur critique [2,7].

En raison de leurs propriétés uniques, les matrices métalliques trouvent un large éventail d'applications dans divers domaines, notamment :

- **Aéronautique et aérospatiale :** Les alliages d'aluminium et de titane sont couramment utilisés dans la construction d'avions et de vaisseaux spatiaux en raison de leur légèreté et de leur résistance.
- **Automobile :** Les matrices métalliques, en particulier l'acier, sont omniprésentes dans les automobiles, des carrosseries aux moteurs et aux transmissions.
- **Construction :** Les armatures en acier et les poutres en alliage d'aluminium constituent des éléments essentiels de la construction moderne, offrant solidité et durabilité aux structures.
- **Machines et équipements industriels :** Les matrices métalliques sont utilisées dans une large gamme de machines et d'équipements industriels, des moteurs électriques aux outils de coupe.

1.3.1.2.2. Les matrices céramiques

Les matrices céramiques sont des matériaux inorganiques rigides et cassants constitués de composés cristallins de composition et de structure variables. Elles sont généralement composées d'un ou plusieurs métaux combinés à un élément non métallique, le plus courant étant l'oxygène. Des exemples courants de matrices céramiques incluent l'alumine (Al_2O_3), la silice (SiO_2) et la magnésie (MgO) [8].

Les matrices céramiques présentent un ensemble unique de propriétés qui les rendent précieuses pour diverses applications :

- **Excellente résistance chimique** : Les matrices céramiques résistent à la corrosion et à l'attaque par une large gamme de produits chimiques, ce qui les rend idéales pour des environnements agressifs.
- **Point de fusion élevé et faible conductivité thermique** : Les matrices céramiques peuvent supporter des températures extrêmement élevées sans fondre et présentent une faible conductivité thermique, ce qui les rend idéales pour des applications impliquant des températures élevées et une isolation thermique.
- **Bonne résistance à la compression** : Les matrices céramiques ont une excellente résistance à la compression, ce qui signifie qu'elles peuvent supporter des charges importantes sans se déformer.
- **Haute rigidité et résistance aux températures élevées** : Les matrices céramiques sont généralement rigides et peuvent résister à des températures très élevées, les rendant idéales pour des applications structurelles exigeantes.

Les matrices céramiques sont souvent fabriquées avec une structure multicouche. Cela signifie que la matrice est constituée de plusieurs couches superposées, créant des interfaces et des déviations de fissures. Cette structure multicouche améliore la résistance à la fracture et la ténacité du matériau, le rendant plus résistant aux chocs et aux fissures [2].

En raison de leurs propriétés uniques, les matrices céramiques trouvent un large éventail d'applications dans divers domaines, notamment :

- **Aéronautique et aérospatiale** : Les matrices céramiques sont utilisées dans les composants de moteurs d'avion, les boucliers thermiques et les pièces structurelles en raison de leur résistance à la chaleur et à l'usure.
- **Industrie automobile** : Les matrices céramiques sont utilisées dans les systèmes de freinage, les pots catalytiques et les composants de moteur en raison de leur résistance à la chaleur, à l'usure et à la corrosion.

- **Industrie électronique** : Les matrices céramiques sont utilisées dans les circuits imprimés, les substrats de circuits intégrés et les boîtiers de composants électroniques en raison de leurs propriétés isolantes et de leur résistance à la chaleur.
- **Industrie médicale** : Les matrices céramiques sont utilisées dans les implants osseux, les prothèses articulaires et les outils chirurgicaux en raison de leur biocompatibilité, de leur résistance et de leur durabilité.

1.3.2. Renfort

Le renfort est un constituant crucial des matériaux composites, formant leur squelette et conférant leurs propriétés mécaniques supérieures. Il peut être d'origine naturelle ou artificielle et est sélectionné pour optimiser des propriétés spécifiques du composite, telles que la résistance à la traction, à la rupture et la dureté. En outre, le renfort peut améliorer certaines propriétés physiques, comme la résistance au feu et aux températures élevées, ainsi que des propriétés électriques ou chimiques [9].

Pour remplir efficacement sa fonction dans les composites, le matériau de renfort doit répondre à plusieurs exigences clés :

- **Propriétés mécaniques élevées** : Le renfort doit présenter une résistance à la traction, à la compression et au cisaillement élevées pour renforcer le composite et lui permettre de supporter des charges importantes.
- **Masse volumique faible** : Un renfort léger est crucial pour minimiser le poids global du composite, ce qui est particulièrement important dans des applications où le poids est un facteur critique, comme dans l'aéronautique et le transport.
- **Bonne compatibilité avec la matrice** : Le renfort et la matrice doivent adhérer correctement l'un à l'autre pour transférer efficacement les contraintes et assurer une cohésion optimale du composite.
- **Facilité de mise en œuvre** : Le matériau de renfort doit être facile à former et à intégrer dans la matrice pendant le processus de fabrication du composite.
- **Prix abordable** : Le coût du renfort doit être raisonnable pour rendre le composite économiquement viable pour les applications prévues [10].

Le choix du renfort approprié dépend des exigences spécifiques de l'application et des propriétés recherchées dans le composite final.

Il existe différents types de renforts utilisés dans les matériaux composites. La **figure 1.3** présente une classification de ces différents types de renfort.

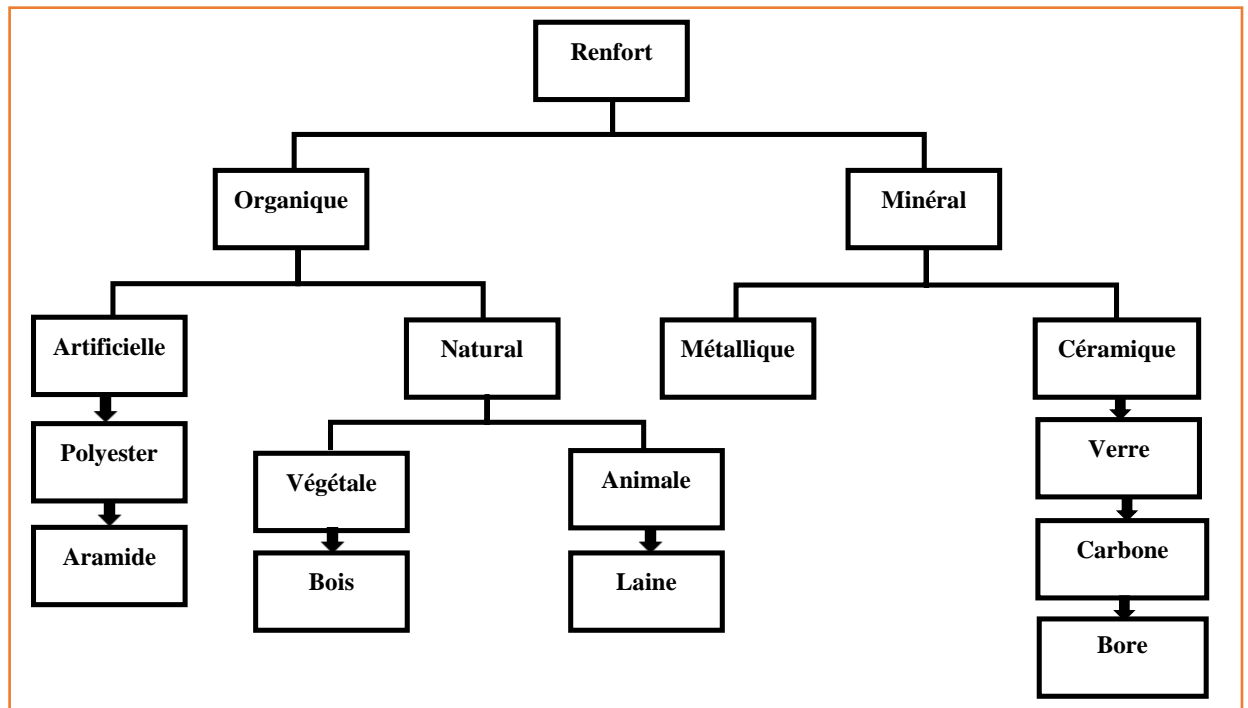


Figure 1.3 : Classification de différents types de renfort.

1.3.2.1. Classification

Les renforts jouent un rôle essentiel dans les matériaux composites en leur conférant une intégrité structurelle et en améliorant leurs propriétés mécaniques. En fonction de leur composition chimique et de leur origine, les renforts peuvent être classés en différentes catégories. Ce document présente une classification détaillée des renforts couramment utilisés dans les matériaux composites. Une classification simple des renforts peut être établie en fonction de leur origine :

1.3.2.1.1. Renforts organiques

Les renforts organiques sont appréciés pour leur légèreté, leur faible coût et leur flexibilité de conception. Parmi les exemples courants, on trouve :

- **Fibres d'aramide (Kevlar)** : Renforts offrant une excellente résistance aux chocs et une absorption d'énergie élevée, parfaits pour les équipements de protection.
- **Fibres naturelles** : Renforts renouvelables et biodégradables, tels que le lin, le chanvre et le bambou, gagnent en popularité pour leur durabilité.

1.3.2.1.2. Renforts minéraux

Les renforts minéraux se distinguent par leur haute résistance, leur stabilité à la température et leur stabilité dimensionnelle, on trouve :

1.3.2.1.2.1. Renforts céramiques

- **Fibres de verre** : Renforts économiques et polyvalents, offrant une bonne résistance à la corrosion et aux produits chimiques.
- **Fibres de carbone** : Renforts exceptionnellement résistants et légers, idéaux pour les applications hautes performance.

1.3.2.1.2.2. Renforts métalliques

- **Acier** : Alliage de fer et de carbone connu pour sa résistance et sa durabilité.
- **Aluminium** : Métal léger et résistant à la corrosion, idéal pour les applications où le poids est crucial.
- **Titane** : Métal léger et très résistant à la corrosion, utilisé dans des applications exigeant une résistance et une biocompatibilité élevées.

1.3.2.2. Architecture

1.3.2.2.1. Renfort en fibres discontinues

Les renforts en fibres discontinues sont constitués de fibres courtes ou de particules (charges sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écaillés ou de poudre) dispersées dans une matrice polymère. Ces renforts permettent d'améliorer certaines propriétés de la matrice, telles que la résistance à l'usure, les propriétés thermiques et le poids. La matrice reste l'élément de base du matériau composite, et le résultat est un " polymère renforcé " [11].

1.3.2.2.2. Renfort en fibres continues

Le renfort en fibres continues est constitué de fibres longues, généralement utilisées pour les composites haute performance (HP). Cette forme fibreuse offre une résistance à la rupture et un module d'élasticité souvent bien plus élevés que ceux du même matériau massif. La longueur des fibres peut être augmentée d'un facteur 10 000, ou, pour le même volume, la surface est multipliée par 100 dans le cas des fibres de verre. Ces renforts jouent un rôle crucial dans la tenue mécanique des composites et sont disposés au sein du matériau en fonction des propriétés recherchées. Pour créer une structure résistante adaptée aux contraintes mécaniques, il existe deux architectures de renfort principales[11].

1.3.2.2.2.1. Forme linéique (Les unidirectionnels (UD))

Les renforts en fibres continues unidirectionnels (UD) sont constitués de fibres longues et fines, généralement d'un diamètre de quelques microns (une dizaine), qui ne peuvent être utilisées individuellement. Pour une utilisation pratique, ces fibres sont regroupées en fils ou en mèches de différentes formes. La nomenclature générale des différentes formes linéaires est encore mal définie et est généralement dérivée de celle utilisée pour les fibres de verre.

Types de formes linéaires :

- **Fibre continue unitaire** : Généralement appelée filament ou monofilament, elle représente la fibre individuelle la plus fine.

- **Monofilaments regroupés** : Les monofilaments peuvent être regroupés en fils ou en mèches de différentes formes.
- **Fils** : Les fils peuvent être continus ou discontinus et sont caractérisés par leur masse linéique (titre), qui dépend du diamètre et du nombre de filaments.

Les unités de masse linéique sont :

- **Tex** : L'unité traditionnelle de masse linéique est le tex, qui correspond à la masse d'un fil de longueur égale à 100 mètres.
- **Kilogramme par mètre (kg/m)** : Il est important de noter que l'unité SI (Système international) recommandée pour la masse linéique est le kilogramme par mètre (kg/m). La conversion entre tex et kg/m est la suivante [10]:

$$1 \text{ tex} = 10^{-6} \text{ kg/m}$$

Eq.1.1

La **figure 1.4** représente une armature unidirectionnelle, où les fibres sont alignées dans une seule direction. Cette configuration offre une résistance mécanique élevée dans la direction des fibres, mais une faible résistance dans les directions perpendiculaires.

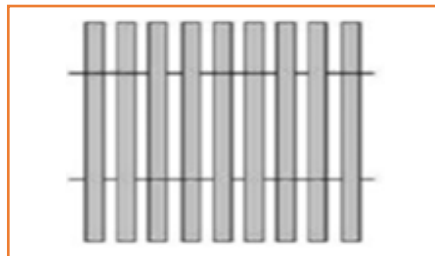


Figure 1.4 : Armature unidirectionnelle

1.3.2.2.2.2. Forme surfacique

Les fils peuvent être utilisés pour créer divers types de formes surfaciques, notamment des mats, des tissus et des rubans, principalement développés pour les fibres de verre.

1.3.2.2.2.2.1. Mats

Les mats sont des nappes de fils continus ou discontinus distribués aléatoirement dans un plan sans orientation préférentielle. Elles sont maintenues ensemble par un liant soluble ou non soluble dans les résines, selon la mise en œuvre. L'absence d'orientation préférentielle des fibres conduit à une isotropie des propriétés mécaniques de la natte dans son plan.

La principale différence entre les nattes à fils coupés et les nattes à fils continus réside essentiellement dans leurs propriétés de déformabilité. Les premières sont moins déformables, alors que les secondes permettent d'obtenir des formes embouties profondes en allongeant régulièrement la natte dans toutes les directions.

L'une des principales applications des nattes à fils continus est le moulage par compression, injection ou sous vide de pièces complexes, entre un moule et un contre-moule [10].

1.3.2.2.2.2.2. Tissus et rubans

Un tissu ou un ruban est un assemblage de fils, mèches, etc., réalisé sur un métier à tisser. Il est constitué de :

- **Chaîne** : Ensemble de fils parallèles disposés dans un plan et suivant la longueur du tissu.
- **Trame** : Ensemble de fils qui s'entrecroisent avec les fils de chaîne [10].

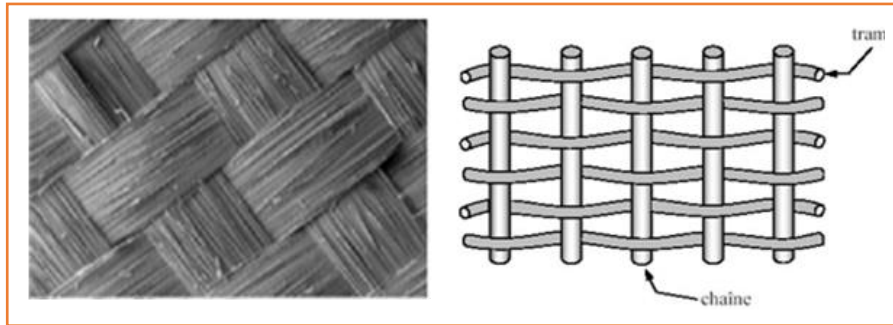


Figure 1.5 : Les tissus et rubans.

Il y a plusieurs types :

1.3.2.2.2.2.1. Renforts bidirectionnels

Les renforts bidirectionnels, également appelés tissus, sont des surfaces souples constituées d'un assemblage régulier de fils tissés ou torsadés. Ces fils s'entrecroisent selon deux directions perpendiculaires, appelées chaîne et trame. Les tissus présentent différentes armures, qui déterminent leur structure et leurs propriétés mécaniques.

- A. **Toile ou taffetas** : Cette armure est la plus simple. Chaque fil de chaîne passe alternativement dessus et dessous chaque fil de trame, et vice versa. Le produit obtenu est un tissu plat, relativement rigide et peu déformable. Il est caractérisé par un embuvage important, ce qui signifie qu'il absorbe beaucoup de résine.

La **figure 1.6-a** montré un exemple de tissu toile.

- B. **Sergé** : Dans le tissage sergé, chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs (n) fils de trame et chaque fil de trame flotte au-dessus de (m) fils de chaîne, où n et m sont des nombres entiers positifs. Ce type de tissage produit un tissu à la fois souple et dense, caractérisé par des diagonales apparentes à la surface. Les caractéristiques du sergé :

- ✓ **Souple et dense** : Le tissage sergé offre un bon compromis entre souplesse et densité, ce qui le rend adapté à une large gamme d'applications.
- ✓ **Diagonales apparentes** : Les diagonales apparentes à la surface du tissu sont une caractéristique distinctive du sergé. Ces diagonales sont créées par le décalage des fils de chaîne et de trame.
- ✓ **Propriétés mécaniques** : Les propriétés mécaniques du sergé, telles que la résistance à la traction et la résistance à la déchirure, dépendent de l'armure spécifique (n et m) et du type de fibres utilisées.

La **figure 1.6-b** montre un exemple de tissu sergé. Les diagonales apparentes à la surface du tissu sont clairement visibles.

- C. **Satin** : Dans le tissage satin, chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs ($n-1$) fils de trame et chaque fil de trame flotte au-dessus de plusieurs ($n-1$) fils de chaîne, où n est un nombre entier positif. Ce type de tissage produit un tissu avec une surface lisse et brillante d'un côté et une surface mate de l'autre. Les caractéristiques du satin sont :

- ✓ **Surface lisse et brillante** : Le tissage satin crée une surface lisse et brillante d'un côté du tissu, due aux longs flotteurs de fils. Cette surface est souvent appelée "endroit" du tissu.

- ✓ **Surface mate** : L'autre côté du tissu présente une surface mate, constituée des fils qui passent sous les flotteurs. Cette surface est souvent appelée "envers" du tissu.
- ✓ **Souplesse** : Le satin est un tissu relativement souple, ce qui le rend adapté à la confection de vêtements et d'articles décoratifs.
- ✓ **Mise en forme de pièces complexes** : Le satin est également utilisé pour la mise en forme de pièces à surfaces complexes, car sa souplesse lui permet de bien se draper.
- ✓ **Forte masse spécifique** : Le satin est généralement plus lourd que les autres types de tissus, car le tissage crée une structure plus dense.

La **figure 1.6-c** montre un exemple de tissu satin. La surface lisse et brillante d'un côté et la surface mate de l'autre sont clairement visibles [12].

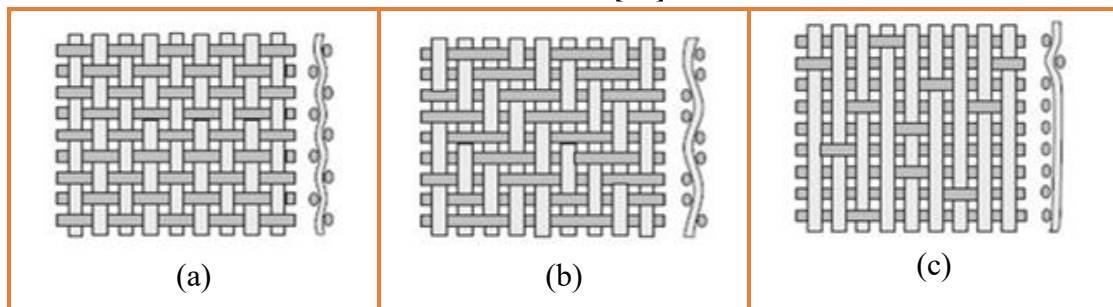


Figure 1.6 : (a) forme Toile ou taffetas, (b) forme tissage sergé, (c) forme tissage satin

1.3.2.2.2.2.2. Multidirectionnel

Les renforts multidirectionnels, également appelés composites 3D, sont des structures formées de fibres orientées dans plusieurs directions de l'espace. Ces renforts sont généralement constitués de plusieurs couches de fibres entrelacées ou empilées, qui sont ensuite liées par une matrice de résine. La disposition multidirectionnelle des fibres confère à ces composites une excellente résistance mécanique dans toutes les directions, tout en conservant une masse volumique relativement faible.

Les caractéristiques des renforts multidirectionnels sont :

- **Haute résistance mécanique** : La disposition multidirectionnelle des fibres permet aux renforts multidirectionnels de résister à des forces appliquées dans toutes les directions. Cela les rend idéaux pour des applications exigeant une haute performance mécanique, telles que la construction d'avions et de fusées.
- **Faible masse volumique** : Grâce à leur structure légère, les renforts multidirectionnels permettent de construire des pièces structurales solides tout en minimisant le poids global. Cela est particulièrement important pour les applications où le poids est un facteur critique, comme dans l'aéronautique et l'automobile.
- **Rigidité élevée** : Les renforts multidirectionnels conservent une excellente rigidité même sous des charges importantes. Cela les rend adaptés à des applications où la stabilité dimensionnelle est essentielle, comme dans les structures de machines et les composants d'éoliennes.
- **Faible risque de délaminage** : La structure multicouche des renforts multidirectionnels limite considérablement le risque de délaminage, c'est-à-dire la séparation des couches de fibres. Cela améliore la durabilité et la fiabilité des pièces fabriquées avec ces renforts.

Les renforts multidirectionnels sont largement utilisés dans une variété d'applications, notamment :

- **Aéronautique et aérospatiale** : Construction d'avions, de fusées, de satellites et d'autres structures aérospatiales.

- **Automobile** : Fabrication de pièces structurales pour les voitures, les camions et les motos.
- **Industrie marine** : Construction de bateaux, de yachts et d'autres structures marines.
- **Construction** : Renforcement de ponts, de bâtiments et d'autres structures civiles.
- **Industrie sportive** : Fabrication d'équipements sportifs tels que des skis, des snowboards et des bâtons de golf.

La **figure 1.7** montre un exemple de renfort multidirectionnel. Les fibres sont orientées dans plusieurs directions, créant une structure tridimensionnelle solide [12].



Figure 1.7 : Exemple de renfort multidirectionnel.

1.3.2.3. Ensimage

L'ensimage est un traitement superficiel appliqué aux renforts (généralement en fibres de verre, de carbone ou naturelles) utilisés dans les matériaux composites. Ce traitement joue un rôle crucial dans l'adhésion entre le renfort et la matrice (la résine), créant une interface solide et performante.

L'ensimage est une dispersion aqueuse composée de plusieurs agents essentiels :

- **Agent collant** : Cet agent assure la liaison chimique entre le renfort et la matrice, favorisant une adhésion forte et durable.
- **Agent pontant** : Ce composant optimise l'adhésion entre les fibres du renfort, améliorant la cohésion inter-filamentaire et la rigidité du fil.
- **Agents antistatiques** : Ces additifs éliminent les charges électrostatiques dues aux frottements, réduisant le risque de décharges électriques et facilitant la manipulation des renforts.

L'ensimage joue plusieurs rôles essentiels dans les composites :

- **Compatibilité fibre-matrice** : L'ensimage assure une compatibilité chimique entre le renfort et la matrice, permettant une meilleure dispersion de la résine et une liaison plus forte.
- **Cohésion inter-filamentaire** : L'agent pontant renforce la cohésion entre les fibres du renfort, augmentant la rigidité du fil et sa résistance aux contraintes mécaniques.
- **Protection contre l'abrasion** : L'ensimage protège les fibres contre l'abrasion générée pendant la mise en œuvre, réduisant les dommages et préservant l'intégrité du renfort.
- **Élimination des charges statiques** : Les agents antistatiques éliminent les charges électrostatiques dues aux frottements, prévenant les décharges électriques et facilitant la manipulation des renforts.
- **Amélioration du mouillage** : L'ensimage favorise le mouillage des fibres par la résine lors de l'imprégnation, optimisant la distribution de la matrice et les propriétés mécaniques du composite final.

La composition et les propriétés de l'ensimage sont spécifiques à la résine et au procédé de fabrication utilisés. Il est crucial de choisir l'ensimage adéquat pour garantir une adhésion optimale entre le renfort et la matrice et obtenir les performances souhaitées du composite [10].

1.3.2.4. Interface renfort-matrice

Dans les matériaux composites, l'interface renfort-matrice désigne la zone de contact entre le renfort (généralement des fibres) et la matrice (la résine). Cette interface joue un rôle crucial dans les propriétés mécaniques du composite final, car elle influence la transmission des charges entre le renfort et la matrice. Les caractéristiques de l'interface sont :

- **Épaisseur** : L'interface renfort-matrice est généralement très fine, avec une épaisseur allant de quelques nanomètres à quelques micromètres. Dans certains cas rares, elle peut être plus épaisse. Cette zone est parfois appelée interphase.
- **Propriétés** : Les propriétés de l'interface peuvent différer de celles du renfort et de la matrice. L'interphase peut présenter des propriétés mécaniques, chimiques et physiques uniques qui influencent le comportement du composite [13].

L'adhésion entre le renfort et la matrice est essentielle pour assurer une bonne transmission des charges et des contraintes. Cette adhésion résulte d'un processus complexe impliquant des interactions physiques et chimiques au niveau moléculaire.

- **Liaisons physiques** : Les liaisons physiques, telles que les forces de Van der Waals et les liaisons hydrogène, peuvent se former entre les molécules du renfort et de la matrice. Ces liaisons sont généralement plus faibles que les liaisons covalentes.
- **Liaisons covalentes** : Dans certains cas, des liaisons covalentes, plus fortes et plus durables, peuvent se former entre les atomes du renfort et de la matrice. Ce type de liaison implique un partage d'électrons entre les atomes.

Plusieurs facteurs peuvent influencer l'adhésion à l'interface renfort-matrice, notamment :

- **Mouillabilité** : La mouillabilité désigne la capacité de la matrice à se répandre et à adhérer à la surface du renfort. Une bonne mouillabilité est essentielle pour une forte adhésion.
- **Diffusion** : La diffusion des molécules de la matrice dans le renfort peut améliorer l'adhésion en créant des interactions intermoléculaires.
- **Adsorption** : L'adsorption des molécules de la matrice sur la surface du renfort peut également contribuer à l'adhésion.
- **Réactivité chimique** : La formation de liaisons covalentes entre les atomes du renfort et de la matrice dépend de la réactivité chimique des matériaux.
- **Facteurs mécaniques** : La tension de surface, la rugosité de la surface et les contraintes appliquées peuvent également influencer l'adhésion à l'interface [14].

L'interface renfort-matrice est un élément crucial dans les matériaux composites. Sa qualité et ses propriétés influencent directement les performances mécaniques du composite, telles que la résistance à la traction, la résistance à la compression, la rigidité et la ténacité. Une interface forte et bien définie est essentielle pour obtenir un composite optimal.

1.3.3. Additifs

Les additifs sont des substances ajoutées en petite quantité (généralement quelques % ou moins) aux matériaux composites pour améliorer leurs propriétés ou leur aspect. Ils jouent un rôle important dans la fabrication et l'utilisation des composites.

Les additifs pour composites se déclinent en une large variété, chacun ayant des fonctions spécifiques :

- **Lubrifiants et agents de démoulage** : Ces additifs facilitent le démoulage des pièces composites en réduisant la friction entre le moule et le matériau. Ils sont particulièrement importants pour les pièces complexes ou à parois fines.
- **Pigments et colorants** : Les pigments et colorants sont ajoutés pour donner aux composites une couleur ou une texture spécifique. Ils peuvent être utilisés à des fins esthétiques ou pour identifier différentes formulations de matériaux.
- **Agents anti-retrait** : Ces additifs réduisent le retrait du matériau lors de la polymérisation ou du durcissement, minimisant ainsi les déformations et les fissures. Ils sont particulièrement utiles pour les applications où une précision dimensionnelle élevée est requise.
- **Agents anti-UV** : Les agents anti-UV protègent les composites des rayons ultraviolets du soleil, qui peuvent dégrader le matériau et réduire sa durée de vie. Ils sont particulièrement importants pour les applications extérieures [1].

Les additifs jouent un rôle crucial dans l'industrie des composites en améliorant les propriétés et la performance des matériaux. Ils permettent de :

- **Faciliter la fabrication** : Les lubrifiants et agents de démoulage facilitent le démoulage des pièces, réduisant les défauts et les rebuts.
- **Améliorer l'apparence** : Les pigments et colorants permettent de personnaliser l'aspect des composites, les rendant plus attrayants pour diverses applications.
- **Contrôler les dimensions** : Les agents anti-retrait permettent de minimiser les déformations et les fissures, garantissant une précision dimensionnelle accrue.
- **Prolonger la durée de vie** : Les agents anti-UV protègent les composites des dommages causés par les rayons UV, augmentant leur durabilité et leur résistance aux intempéries.

Le choix des additifs appropriés pour un matériau composite donné dépend de plusieurs facteurs, tels que :

- **Propriétés souhaitées** : Les propriétés spécifiques que l'on souhaite conférer au composite, telles que la couleur, la texture, la résistance au retrait ou la protection UV.
- **Type de matrice et de renfort** : La compatibilité chimique entre les additifs et la matrice et le renfort est essentielle pour une performance optimale.
- **Méthode de fabrication** : Le type de procédé de fabrication utilisé peut influencer le choix des additifs et leur mode d'incorporation.

1.4. Types des matériaux composites

Les matériaux composites peuvent être classés en deux grandes catégories selon leur taux d'utilisation et leurs propriétés : les composites à grande diffusion et les composites hautes performances.

- **Composites à grande diffusion** :

- **Représentent 95% des composites utilisés** : Ces composites sont les plus courants et sont utilisés dans une large gamme d'applications.

- **Taux de renfort généralement inférieur à 30%** : La proportion de renfort dans ces composites est relativement faible.
 - **Combinaison de matériaux pour des propriétés optimisées** : Ils associent différents matériaux pour tirer parti de leurs propriétés individuelles, telles que la résistance, la rigidité et la légèreté.
 - **Applications larges et variées** : Les composites à grande diffusion sont utilisés dans des domaines tels que l'aérospatiale, l'automobile, la construction, l'emballage et les biens de consommation.
- **Composites hautes performances :**
- **Conçus pour des conditions exigeantes** : Ces composites sont développés pour répondre à des besoins spécifiques et à des environnements contraignants.
 - **Taux de renfort supérieur à 50%** : La proportion de renfort dans ces composites est élevée, ce qui leur confère des propriétés mécaniques exceptionnelles.
 - **Utilisation de matériaux avancés** : Les composites hautes performances intègrent souvent des fibres de carbone, des polymères renforcés et d'autres matériaux de pointe.
 - **Propriétés optimisées pour des applications spécifiques** : Ils sont conçus pour offrir une résistance élevée, une rigidité accrue, une légèreté remarquable et d'autres propriétés spécifiques selon les besoins de l'application.
 - **Applications critiques** : Les composites hautes performances sont utilisés dans des secteurs tels que l'aérospatiale, l'industrie militaire, l'automobile de sport, la recherche médicale et d'autres domaines où la performance et la fiabilité sont primordiales [4,6].

1.5. Classification des composites

Les matériaux composites sont classés en fonction de la nature du renfort et de la matrice. Cette classification permet de distinguer différents types de composites avec des propriétés et des applications spécifiques.

1.5.1. Classification selon le renfort

Le type de renfort utilisé dans un composite influence considérablement ses propriétés mécaniques et son comportement. On distingue trois grandes catégories de composites en fonction de la forme du renfort :

1.5.1.1. Composite à particules

Les composites à particules sont constitués de matériaux particuliers de petite taille, généralement de forme cubique, sphérique ou irrégulière, dispersés dans une matrice. Le renforcement particulaire confère au composite une résistance accrue grâce à la contrainte hydrostatique exercée par les particules dans la matrice. Les composites à particules sont principalement utilisés dans les matrices métalliques et céramiques. Ils permettent d'augmenter la rigidité de la matrice dans une certaine mesure. Les propriétés de la matrice et des particules influencent mutuellement leur comportement. A titre d'exemples de renforts particuliers : Oxydes métalliques, carbures, nitrures, argiles, etc [15].

1.5.1.2. Composite à fibres

Les composites à fibres se caractérisent par un rapport élevé entre la longueur et le diamètre des fibres utilisées comme renfort. Les fibres peuvent être organiques ou inorganiques. Les fibres organiques, telles que les fibres de verre et de polyester, ont généralement une faible densité et une faible

élasticité. Les fibres inorganiques, comme les fibres de carbone, de carbure de silicium et d'alumine, ont un module élevé et peuvent être élastiques. Les fibres augmentent considérablement la résistance à la traction du composite, particulièrement dans la direction d'orientation des fibres. Les composites à fibres sont largement utilisés dans divers domaines, notamment l'aérospatiale, l'automobile, la construction et les sports. A titre d'exemples de renforts fibreux: Fibre de verre, fibre de carbone, fibre d'aramide, bore, graphite, etc [15].

1.5.2. Classification selon la matrice

Les matériaux composites peuvent également être classés en fonction de la nature de la matrice utilisée. Cette classification permet de mettre en évidence les propriétés et les applications spécifiques de chaque type de composite.

1.5.2.1.Composite à matrice métallique (CMM)

- **Potentiel et adoption** : Les composites à matrice métallique (CMM) suscitent un grand intérêt de la part des chercheurs en raison de leurs propriétés prometteuses. Cependant, leur adoption dans des applications concrètes n'est pas encore aussi répandue que celle des composites à matrice polymère.
- **Propriétés** : Les CMM peuvent offrir une combinaison remarquable de résistance élevée, de ténacité accrue et de rigidité notable.
- **Matériaux de matrice** : Des métaux tels que le titane, le magnésium et certains alliages d'aluminium sont couramment utilisés comme matrices dans les CMM en raison de leur rapport résistance/poids favorable.
- **Renforcement** : L'incorporation de renforts, comme des fibres en céramique ou en carbone, peut améliorer encore davantage la rigidité et la résistance des matrices métalliques.
- **Avantages supplémentaires** : Les CMM présentent des avantages supplémentaires tels qu'une conductivité thermique et électrique élevée, ainsi qu'une résistance isotrope élevée (résistance similaire dans toutes les directions) [15].

1.5.2.2.Composite à matrice céramique (CMC)

- **Composition des céramiques** : Les céramiques sont constituées de composés inorganiques, généralement des oxydes métalliques, liés par des liaisons covalentes et ioniques, la liaison ionique étant prédominante.
- **Exemples de céramiques** : L'alumine, la zircone, le carbure de silicium, le nitrure de bore, etc. sont des exemples courants de matériaux céramiques utilisés dans les composites.
- **Résistance à la chaleur** : Les matrices céramiques peuvent supporter des températures extrêmement élevées, dépassant parfois 1500°C, ce qui les rend idéales pour des applications à haute température.
- **Résistance chimique** : Les céramiques sont généralement résistantes aux attaques chimiques, offrant une excellente protection contre la corrosion et la dégradation.
- **Fragilité** : Un inconvénient majeur des céramiques est leur fragilité inhérente. Elles ont tendance à se fracturer sous des charges de traction, limitant leur application dans certaines conditions.

- **Renforcement** : L'utilisation de renforts tels que des fibres de carbone ou de carbure de silicium peut améliorer la ténacité à la rupture et la résistance aux chocs thermiques des CMC [15].

1.5.2.3.Composite à matrice organique (CMO)

- **Nature des matrices organiques** : Les matrices organiques dans les CMO sont principalement constituées de polymères, qui peuvent être thermodurcissables ou thermoplastiques.
- **Avantages de la transformation** : Les polymères se présentent généralement sous forme liquide avant de durcir, ce qui les rend faciles à manipuler et à mouler dans des formes complexes.
- **Propriétés après durcissement** : Une fois durcis, les polymères deviennent rigides et présentent une résistance et une rigidité élevées. De plus, ils peuvent offrir une finition de surface esthétique.
- **Types de polymères** : Les résines époxy et polyester sont des exemples courants de thermodurcissables utilisés dans les CMO. Les thermoplastiques, bien que moins répandus, offrent une certaine flexibilité et une recyclabilité.
- **Comportement à haute température** : Les thermodurcissables ont tendance à se déformer à des températures élevées, limitant leur utilisation dans certains environnements.
- **Rôle des renforts** : Les renforts fibreux, tels que les fibres de verre ou de carbone, sont intégrés dans les matrices organiques pour conférer au composite une résistance élevée à la traction et à la compression [15].

1.6.Architecture des composites

Les matériaux composites présentent une diversité de structures, chacune offrant des propriétés et des performances spécifiques. Les trois principales architectures de composites sont les monocouches, les stratifiés et les structures sandwich.

1.6.1. Les monocouches

Les monocouches représentent la forme la plus simple de structure composite, constituées d'une seule couche de renfort dispersée dans une matrice. Les monocouches se distinguent par la forme du renfort utilisé :

- **Fibres longues (unidirectionnelles)** : Les fibres sont disposées parallèlement les unes aux autres, offrant une résistance élevée dans la direction d'alignement.
- **Fibres réparties aléatoirement** : Les fibres sont distribuées de manière chaotique dans la matrice, procurant une résistance isotrope (similaire dans toutes les directions).
- **Fibres courtes** : Les fibres courtes sont dispersées dans la matrice, apportant une amélioration de la rigidité et de la ténacité du composite [7].

1.6.2. Les stratifiées

Un stratifié est constitué de plusieurs couches de monocouches superposées, chacune ayant une orientation spécifique du renfort. Chaque couche d'un stratifié est appelée strate.

La séquence d'empilement définit l'ordre et l'orientation des différentes couches, déterminant les propriétés mécaniques du stratifié.

Les stratifiés permettent de créer des matériaux aux propriétés mécaniques anisotropes (variées selon les directions) optimisées pour répondre aux sollicitations spécifiques de la structure [11, 16].

1.6.3. Les sandwiches

Les structures sandwich sont conçues pour des applications soumises à des flexions et des torsions importantes.

Elles se composent de trois éléments principaux :

- **Âme** : L'âme est la partie centrale du sandwich, généralement constituée d'un matériau léger et poreux, comme des structures en nid d'abeilles, des âmes ondulées ou des mousses. Elle assure la résistance au cisaillement et à la compression hors plan.
- **Peaux** : Les peaux sont les deux couches extérieures du sandwich, généralement constituées de stratifiés composites. Elles supportent les efforts dans leur plan et contribuent à la rigidité globale de la structure.

Les peaux et l'âme sont assemblées par collage à l'aide d'une résine compatible avec les matériaux utilisés.

Les structures sandwich offrent une combinaison remarquable de rigidité, de légèreté et de résistance à la flexion et à la torsion, les rendant idéales pour des applications dans l'aéronautique, le transport et la construction.

Les matériaux composites peuvent être classés en trois types : Les monocouches, les stratifiées, les sandwiches [17].

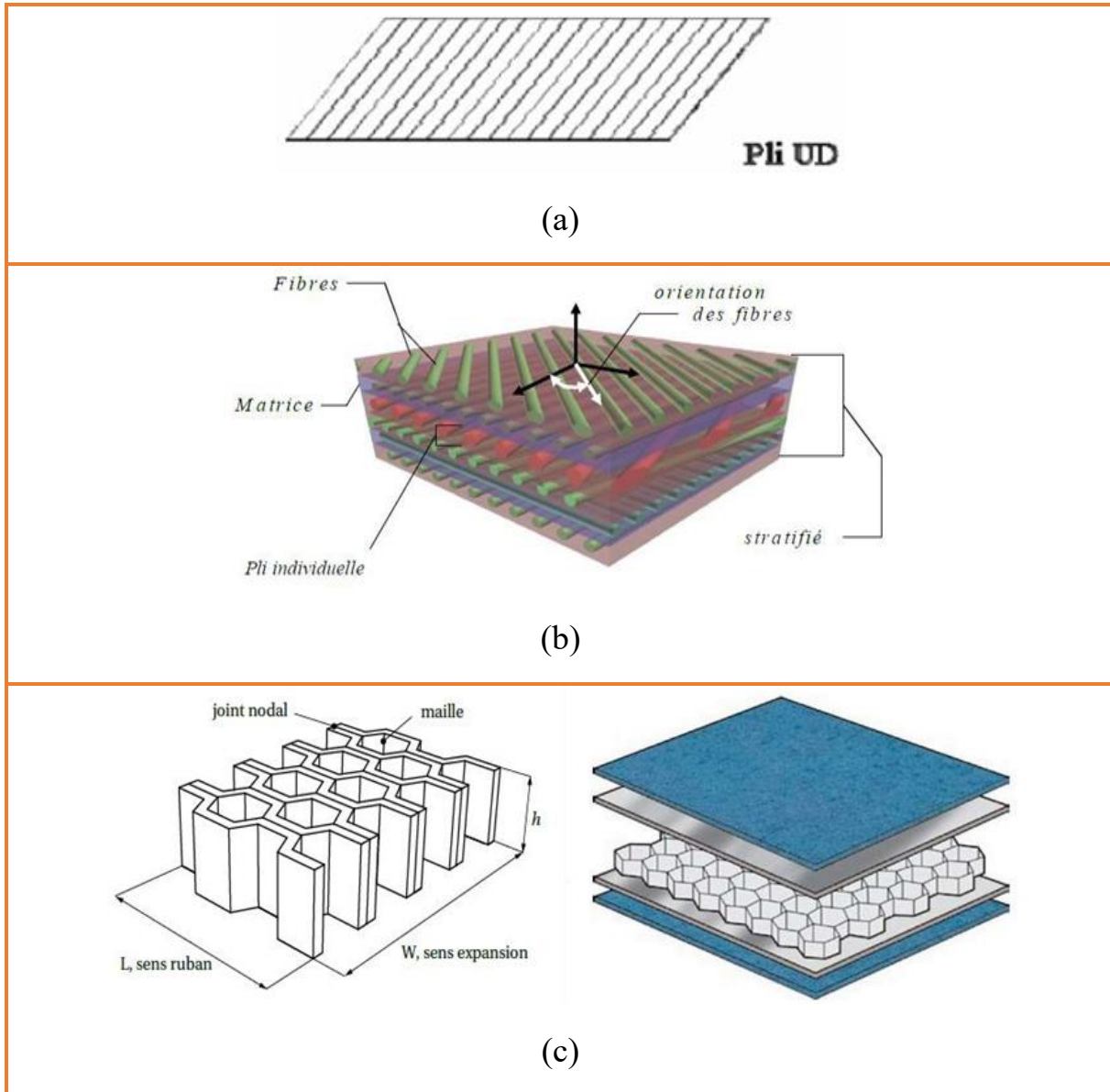


Figure 1.8 : (a) Pli unidirectionnel, (b) Composite stratifié, (c) Désignations d'une âme nid d'abeilles.

1.7. Procèdes de fabrication

La fabrication des matériaux composites implique généralement la construction par couches successives de matrice et de renfort. Ces couches sont ensuite consolidées pour former la pièce finale. Les procédés de fabrication spécifiques varient en fonction de la nature de la matrice et du renfort, ainsi que de la forme et des propriétés souhaitées de la pièce finale [16].

1.7.1. Moulage au contact

Le moulage au contact est une technique de fabrication manuelle de pièces en composites à base de résines thermodurcissables. Ce procédé se déroule à température ambiante et sans application de

Chapitre 1 : Revue bibliographique

pression. Les renforts sont disposés dans un moule ouvert et imprégnés de résine liquide préalablement accélérée et catalysée. La résine durcit ensuite, donnant forme à la pièce composite. Une fois durcie, la pièce est démoulée et les finitions nécessaires sont appliquées.

Le moulage au contact est couramment utilisé pour la fabrication de petites séries de pièces, généralement entre 1 et 1000 pièces par an. Il est particulièrement adapté à la production de pièces de grandes dimensions, complexes ou de formes non standard.

Les avantages de cette technique :

- **Flexibilité de conception** : Le moulage au contact offre une grande liberté de formes, permettant de réaliser des pièces complexes et géométriquement variées.
- **Absence de limite dimensionnelle** : La taille des pièces réalisables n'est pas limitée par la technique elle-même, permettant la fabrication de pièces de grandes dimensions.
- **Surface de qualité** : La surface de la pièce peut être lissée et gelcoatée pour obtenir un aspect esthétique et une meilleure résistance à la corrosion.
- **Propriétés mécaniques correctes** : Les pièces en composite obtenues par moulage au contact présentent des propriétés mécaniques moyennes à bonnes, suffisantes pour de nombreuses applications.
- **Investissement initial faible** : Le moulage au contact nécessite un investissement initial relativement faible en outillage, comparé à d'autres techniques de fabrication de composites.
- **Simplicité du moule** : Le moule utilisé dans le moulage au contact est généralement simple et peu coûteux, et peut être réalisé en interne.

Cette technique peut avoir quelques limites :

- **Finition nécessaire** : La pièce obtenue par moulage au contact nécessite généralement des opérations de finition, telles que le détourage, le perçage et le ponçage, pour obtenir la forme et l'aspect final souhaités.
- **Variabilité de la qualité** : La qualité de la pièce peut dépendre du savoir-faire de l'opérateur, ce qui peut engendrer une certaine variabilité dans les propriétés et l'aspect des pièces.
- **Cadence de production modérée** : La cadence de production par moule est relativement faible, limitant la production de grandes séries.
- **Espace de travail important** : Le moulage au contact nécessite un espace de travail important pour la manipulation des pièces et des moules.
- **Conditions de travail** : Le moulage au contact peut impliquer l'utilisation de produits chimiques et de résines, nécessitant des mesures de protection adéquates pour les opérateurs [11].

La figure 1.9 illustre le principe du moulage au contact. On y voit un moule ouvert dans lequel des renforts sont disposés, puis imprégnés de résine liquide. La résine durcit ensuite, donnant forme à la pièce composite.

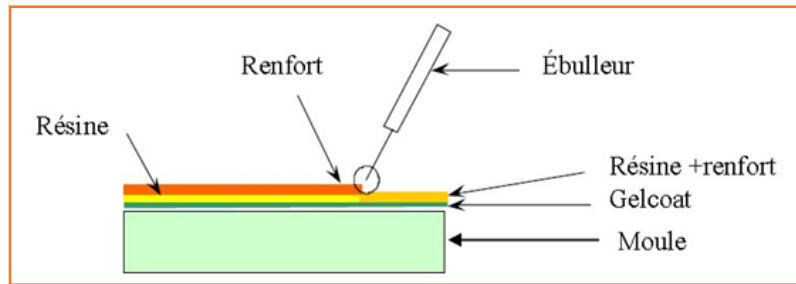


Figure 1.9 : Moulage au contact

1.7.2. Moulage par projection simultanée

Le moulage par projection simultanée est une technique de fabrication de pièces en composites à base de résines thermodurcissables. Ce procédé peut être mis en œuvre manuellement ou de manière robotisée. La projection simultanée du renfort et de la résine à température ambiante et sans application de pression permet de créer des pièces de formes variées.

Une machine de projection spécifique est utilisée pour projeter simultanément les éléments constitutifs du composite :

- **Dispositif de coupe :** Des fibres de renfort, généralement sous forme de roving (mèches continues), sont coupées à la longueur souhaitée.
- **Projection du renfort :** Les fibres coupées sont projetées sur la surface du moule.
- **Projection de la résine :** Un ou deux pistolets projettent simultanément la résine thermodurcissable pré-accélérée sur le moule et les fibres [11,16].

La figure 1.10 illustre le principe du moulage par projection simultanée. On y voit une machine de projection projetant simultanément les fibres de renfort et la résine sur la surface d'un moule. Des rouleaux permettent de compacter le mélange et des ébulleurs accélèrent le durcissement de la résine.

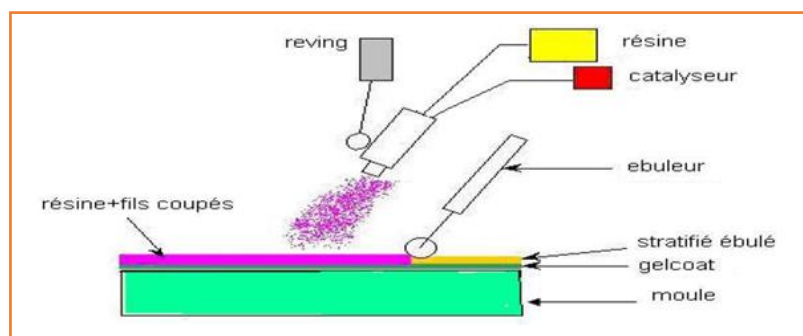


Figure 1.10 : Moulage par projection simultanée.

Le moulage par projection simultanée présente plusieurs avantages :

- **Grande liberté de formes :** La projection permet de réaliser des pièces de géométries complexes et variées.
- **Simplicité du processus :** La mise en œuvre est relativement simple et ne requiert pas de compétences particulières.
- **Investissement modéré :** Le coût des machines et des moules est relativement faible par rapport à d'autres techniques de fabrication de composites.

- **Flexibilité de production** : Le procédé peut être adapté à la production de pièces uniques ou de petites séries.

Malgré ses avantages, le moulage par projection simultanée présente certaines limites :

- **Propriétés mécaniques moyennes** : Les pièces obtenues par cette technique présentent généralement des propriétés mécaniques moyennes, inférieures à celles des composites obtenus par d'autres techniques.
- **Limites de finition** : La surface des pièces peut présenter des imperfections nécessitant des opérations de finition ultérieures.
- **Cadence de production** : La cadence de production est modérée, limitant la fabrication de grandes séries.
- **Risques liés à la projection** : La projection de fibres et de résine peut présenter des risques pour la santé des opérateurs, nécessitant des mesures de protection adéquates [11].

1.7.3. Moulage sous vide

Le moulage sous vide est une technique de fabrication de pièces en composites. Ce procédé se déroule dans un moule fermé, généralement constitué d'un moule et d'un contre-moule, semi-rigides ou souples selon les caractéristiques des pièces à réaliser [7].

Déroulement du processus :

1. **Mise en place du renfort** : Le renfort, sous forme de fibres ou de tissus, est disposé dans le moule.
2. **Versement de la résine** : La résine catalysée est versée sur le renfort, recouvrant l'ensemble de la surface.
3. **Mise en place du film plastique** : Un film plastique souple est placé sur le dessus du moule et de la résine, assurant une étanchéité parfaite à l'air.
4. **Création du vide** : Le vide est créé sous le film plastique à l'aide d'une pompe. Cette opération permet d'éliminer les bulles d'air présentes dans la résine et entre le renfort et le moule, favorisant une imprégnation optimale du renfort et une meilleure qualité de surface.
5. **Évacuation de l'excédent de résine** : Le vide créé permet également d'évacuer l'excédent de résine, qui est absorbé par un tissu de pompage placé sous le film plastique.
6. **Polymérisation** : La résine durcit ensuite par polymérisation, soit à température ambiante, soit dans une étuve ou un autoclave selon la nature de la résine et les propriétés souhaitées pour la pièce [11].

La figure 1.11 illustre le principe du moulage sous vide. On y voit un moule fermé contenant le renfort et la résine recouverts d'un film plastique. Une pompe crée le vide sous le film, permettant d'éliminer les bulles d'air et l'excédent de résine.

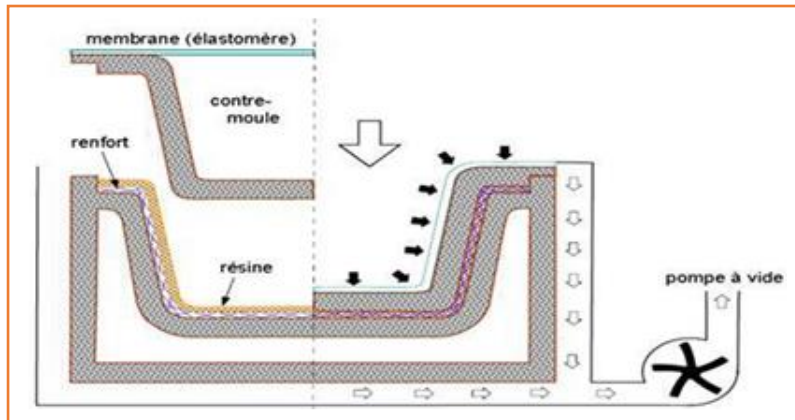


Figure 1.11 : Moulage sous vide.

Le moulage sous vide est couramment utilisé pour la fabrication de pièces en composites de petite et moyenne série, nécessitant une finition de surface de qualité des deux côtés. Cette technique est particulièrement adaptée à la production de pièces complexes ou de grandes dimensions.

Le moulage sous vide présente plusieurs avantages :

- **Haute qualité de surface** : Le vide permet d'obtenir une surface lisse et homogène des deux côtés de la pièce, sans bulles d'air ni imperfections.
- **Bonne imprégnation du renfort** : Le vide favorise une imprégnation optimale du renfort par la résine, améliorant les propriétés mécaniques de la pièce composite.
- **Polyvalence** : Le moulage sous vide peut être utilisé avec une large gamme de résines et de renforts.
- **Adaptabilité** : Cette technique s'adapte à la production de pièces de formes variées et de dimensions diverses.

Malgré ses avantages, le moulage sous vide présente quelques limites :

- **Investissement initial** : Le coût des moules et de l'équipement de vide peut être élevé.
- **Temps de cycle** : Le processus de moulage sous vide peut être relativement long, limitant la cadence de production.
- **Complexité du processus** : La mise en œuvre du moulage sous vide nécessite un certain savoir-faire et une expertise technique [16].

1.7.4. Moulage par injection basse pression de résine (RTM)

Le moulage par injection de résine liquide RTM (Resin Transfer Molding) est une technique de fabrication de pièces en composites. Ce procédé se déroule dans un moule fermé rigide composé d'un moule et d'un contre-moule.

Déroulement du processus :

1. **Mise en place du renfort** : Le renfort, sous forme de mats, préformes ou éventuellement de tissus, est disposé dans le moule selon la forme souhaitée de la pièce.

2. **Injection de la résine :** La résine thermodurcissable, préalablement accélérée et catalysée, est injectée sous une pression relativement basse (généralement entre 1,5 et 4 bars) à travers le renfort. L'injection se poursuit jusqu'à ce que le moule soit complètement rempli de résine.
3. **Durcissement de la résine:** La résine durcit ensuite par polymérisation, soit à température ambiante, soit sous l'apport d'une chaleur douce, selon la nature de la résine et les propriétés souhaitées pour la pièce [11].

La figure 1.12 illustre le principe du moulage par injection basse pression de résine (RTM). On y voit un moule fermé contenant le renfort et la résine injectée sous pression.

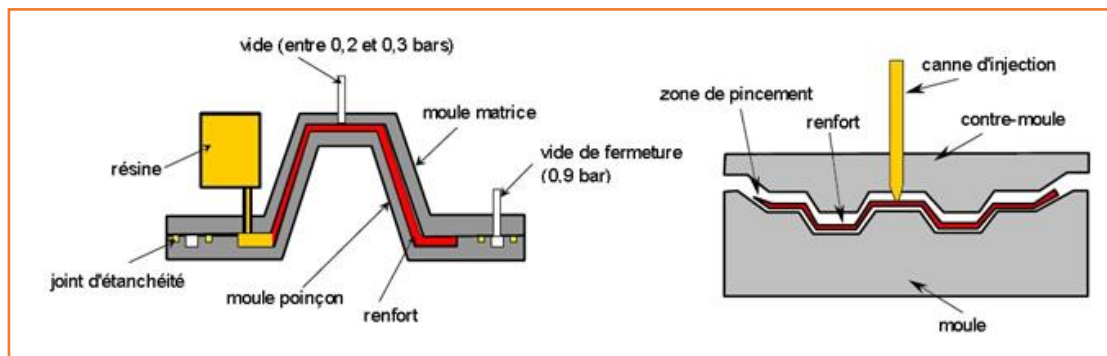


Figure 1.12 : Moulage par injection basse pression de résine.

1.7.5. Moulage par injection de compound BMC

Le moulage par injection de compound BMC (Bulk Molding Compound) est une technique de fabrication de pièces en composites. Le compound BMC est une masse à mouler prémélangée composée de résine, de charges, d'adjuvants et de fibres de verre coupées.

Déroulement du processus :

1. **Préparation du compound BMC :** Le compound BMC est préparé dans un malaxeur pour obtenir une masse homogène.
2. **Chauffage du compound BMC :** Le compound BMC est chauffé à une température généralement comprise entre 130 et 150 °C pour le rendre fluide et faciliter son injection.
3. **Injection du compound BMC :** Le compound BMC chauffé est injecté sous pression (entre 50 et 100 bars) dans un moule fermé en acier usiné.
4. **Remplissage du moule :** La pression d'injection force le compound BMC à s'écouler dans l'empreinte du moule, remplissant complètement la cavité.
5. **Durcissement de la résine:** La résine thermodurcissable contenue dans le compound BMC durcit rapidement par polymérisation, permettant un démoulage rapide des pièces [11].

1.7.6. Moulage par compression de mat pré imprégné SMC

Le moulage par compression de mat pré-imprégné SMC (Sheet Molding Compound) est une technique de fabrication de pièces en composites. Le mat pré-imprégné SMC est une nappe de fibres coupées ou continues imprégnée d'un mélange de résine polyester, de charges et d'adjuvants spécifiques.

Déroulement du processus :

1. **Découpe du mat pré-imprégné** : Le mat pré-imprégné est découpé en flans de dimensions adaptées à la forme de la pièce souhaitée.
2. **Mise en place du flan** : Le flan de mat pré-imprégné est placé dans un moule fermé en acier usiné.
3. **Chauffage du moule** : Le moule est chauffé à une température généralement comprise entre 140 et 160 °C pour ramollir la résine et faciliter la compression du matériau.
4. **Fermeture du moule** : Le contre-moule est pressé contre le flan de mat pré-imprégné sous une pression élevée (jusqu'à 1000 bars) pour compacter le matériau et éliminer les bulles d'air.
5. **Durcissement de la résine** : La résine thermodurcissable contenue dans le mat pré-imprégné durcit par polymérisation sous la pression et la chaleur, formant la pièce composite.
6. **Démoulage** : Une fois la résine durcie, le moule est ouvert et la pièce composite est démoulée [11].

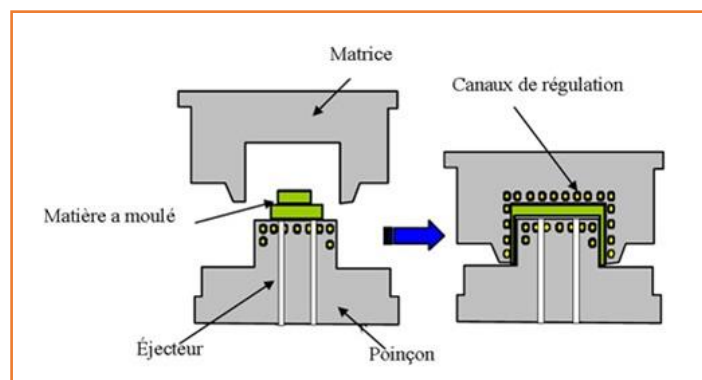


Figure 1.13 : Moulage par compression de mat pré-imprégné

1.7.7. Moulage par enroulement filamentaire

Le moulage par enroulement filamentaire est une technique de fabrication de pièces composites à base de fibres continues imprégnées de résine. Le renfort, généralement sous forme de ruban ou de mèche de fibres, est imprégné de résine catalysée et enroulé avec une tension contrôlée sur un mandrin rotatif. La résine polymérise ensuite, soit dans un four, soit dans un autoclave, pour former une pièce composite solide et rigide [7, 11].

Déroulement du processus :

1. **Préparation du renfort** : Le renfort, généralement sous forme de ruban ou de mèche de fibres, est débobiné et imprégné de résine catalysée.
2. **Mise en place du mandrin** : Le mandrin, généralement cylindrique ou circulaire, est fixé sur un tour rotatif.
3. **Enroulement du renfort** : Le renfort imprégné est enroulé sur le mandrin rotatif avec une tension contrôlée, en suivant un schéma de stratification défini.
4. **Polymérisation de la résine** : La résine catalysée polymérise par exothermie, soit dans un four à une température contrôlée, soit dans un autoclave sous pression.

5. **Démoulage** : Une fois la résine durcie, le mandrin est retiré, laissant la pièce composite formée.

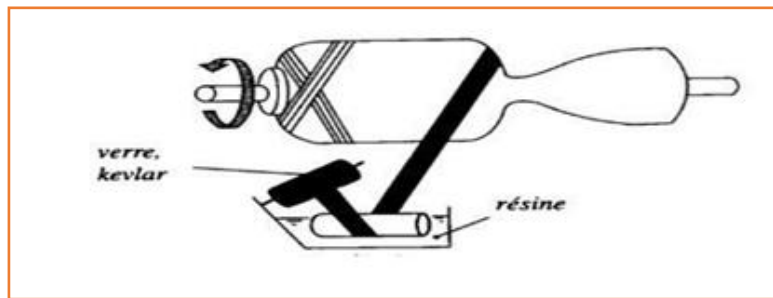


Figure 1.14 : Moulage par enroulement filamentaire

1.7.8. Moulage par centrifugation

Le moulage par centrifugation est une technique de fabrication de pièces composites à base de fibres longues coupées et de résine. Le procédé est particulièrement adapté à la production de pièces cylindriques, mais peut également être utilisé pour des formes plus complexes avec des surfaces courbes [16].

Déroulement du processus :

1. **Préparation du mélange** : Le renfort, sous forme de fibres longues coupées, est mélangé à la résine dans un état liquide ou pâteux.
2. **Versement dans le moule** : Le mélange de résine et de fibres est versé dans un moule cylindrique en rotation à grande vitesse.
3. **Force centrifuge** : La force centrifuge générée par la rotation du moule répartit uniformément le mélange de résine et de fibres le long des parois du moule.
4. **Durcissement de la résine** : La résine polymérise par exothermie, durcissant et formant la pièce composite.
5. **Démoulage** : Une fois la résine durcie, le moule est arrêté et la pièce composite est démoulée.

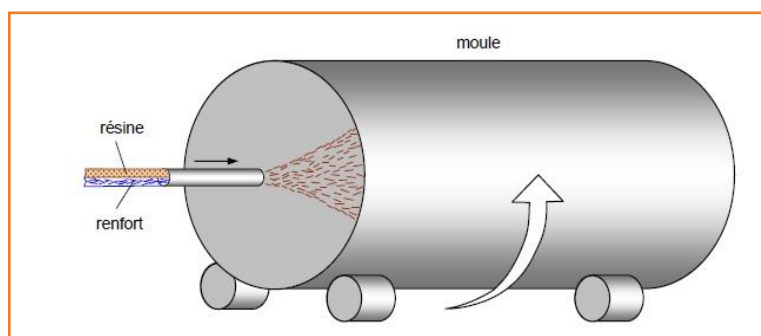


Figure 1.15 : Moulage par centrifugation

1.8. Domaine d'application

Les matériaux composites, grâce à leurs propriétés remarquables, ont conquis une place prépondérante dans de nombreux secteurs d'activités. Leur polyvalence les rend incontournables dans des domaines aussi variés que l'aéronautique, l'énergie, le transport, la construction et les loisirs.

Chapitre 1 : Revue bibliographique

1. **Aéronautique et spatial** : La légèreté, la résistance et la durabilité des composites sont des atouts majeurs pour la construction d'aéronefs et de satellites. On les retrouve dans les structures, les panneaux de fuselage, les pales d'hélices et les pièces de moteurs.
2. **Électricité** : Les composites sont utilisés dans la fabrication de pales d'éoliennes, de nacelles et de composants de transformateurs électriques, profitant de leur excellente résistance mécanique et de leurs propriétés isolantes.
3. **Transport** : Dans le domaine des transports, les composites optimisent les performances des véhicules terrestres, ferroviaires et maritimes. On les retrouve dans les carrosseries automobiles, les châssis de trains, les coques de bateaux et les composants de camions.
4. **Domaine militaire** : Les composites renforcent les structures des hélicoptères, des fusées et des avions militaires, leur conférant une résistance accrue aux impacts et aux environnements extrêmes.
5. **Canalisations** : Les canalisations en matériaux composites offrent une alternative durable et résistante aux canalisations en acier et en béton traditionnelles. Elles sont notamment utilisées pour le transport d'eau, de gaz et de produits chimiques.
6. **Construction navale** : Dans le domaine de la construction navale, les composites allègent les coques et les superstructures des bateaux, améliorant ainsi leurs performances et leur efficacité énergétique. On les retrouve également dans les planches de surf et autres équipements nautiques.
7. **Bâtiment** : Les matériaux composites trouvent leur place dans le BTP pour des applications telles que les renforcements de structures, les panneaux de façade, les menuiseries et les canalisations.
8. **Sports et loisirs** : Les articles de sports et de loisirs bénéficient largement des propriétés des composites. On les retrouve dans les skis, les snowboards, les cadres de vélos, les cannes à pêche et les équipements de protection individuelle [1].

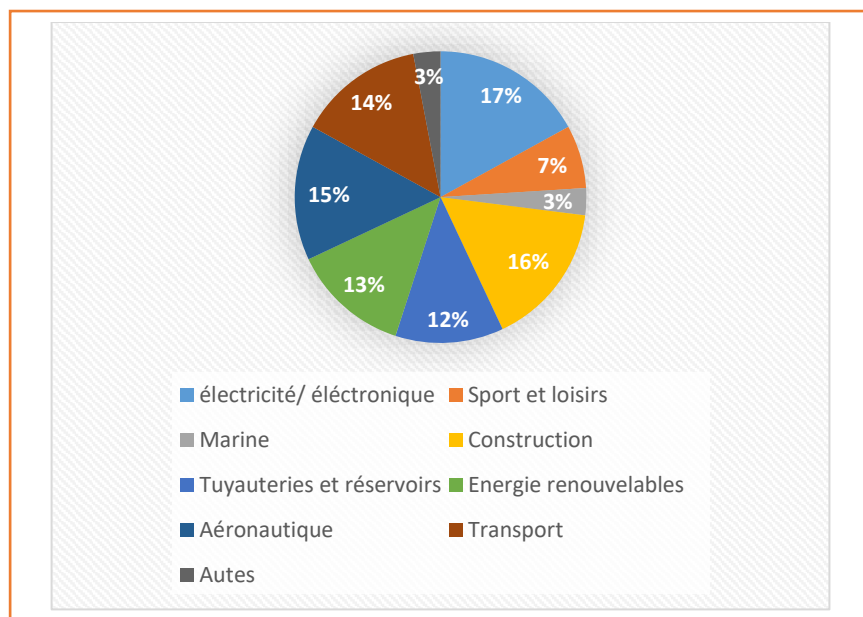


Figure 1.16 : Domaine d'application des matériaux composites.

1.9. Avantages et inconvénients

Tableau 1.5 : Avantages et inconvénients des matériaux composites [1].

| Avantages | Inconvénients |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none">- Légèreté- Résistance à la corrosion et à la fatigue- Insensibilité aux agents chimiques (graisses, liquides hydrauliques, peintures, solvants)- Grande flexibilité de formes- Possibilité d'intégrer des accessoires et fonctions- Réduction du bruit et des vibrations | <ul style="list-style-type: none">- Mauvaise isolation acoustique (faible amortissement des vibrations)- Propriétés de tenue au feu variables selon le type de matrice- Risque de flambement plus élevé comparé aux structures classiques- Coût de fabrication souvent élevé |

2. Résine Epoxy

2.1. Définition

Les **résines époxydes (RE)**, également appelées **résines époxy**, sont des polymères thermodurcissables obtenus par la polymérisation de monomères contenant au moins un groupe fonctionnel oxirane (ou groupe époxyde). Ces monomères, appelés **prépolymères**, ont généralement une faible masse moléculaire.

Le groupe époxyde, élément clé des résines époxydes, peut être représenté par la formule suivante [18- 19] :

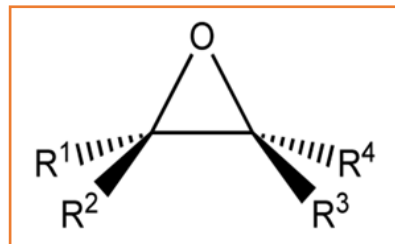


Figure 1.17 : Formula chimique du groupe époxyde

Le terme "époxy" peut désigner la résine elle-même avant durcissement, ou le matériau polymère durci après polymérisation [20].

2.2. Aperçu sur la Synthèse des résines époxydes DGEBA (DiGlycidyl Ether du Bisphénol A)

Les résines époxydes DGEBA (DiGlycidyl Ether du Bisphénol A) constituent la catégorie la plus importante des résines époxydes, représentant environ 95% de la production mondiale. Leur popularité s'explique par leur bonne balance de propriétés, notamment leur résistance mécanique, leur adhésion, leur résistance chimique et leur coût relativement bas.

La synthèse des résines époxydes DGEBA implique une réaction de polycondensation entre le bisphénol A (BPA) et l'épichlorhydrine (ECH) en présence d'un catalyseur basique, généralement de la soude caustique (NaOH). La réaction peut être schématisée comme suit [21- 22]:

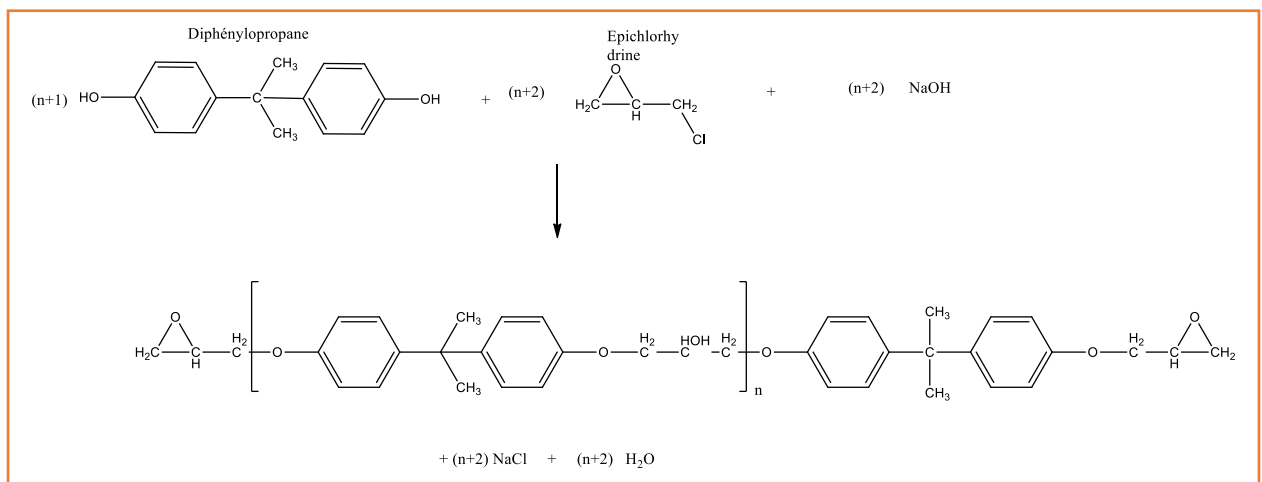


Figure 1.18 : Synthèse des résines à base de bisphénol A [22].

La soude caustique joue un double rôle dans la réaction de synthèse :

1. **Catalyseur** : La soude facilite l'ouverture du cycle époxyde de l'épichlorhydrine par le groupe hydroxyle du bisphénol A, permettant la formation de liaisons éther entre les deux monomères.
2. **Agent de déshydrohalogénéation** : La soude favorise la conversion de l'halohydrine en groupe époxy en éliminant une molécule d'eau et un ion chlorure.

La réaction de synthèse des résines époxydes DGEBA est une polycondensation, ce qui signifie que la formation de liaisons éther s'accompagne d'une élimination de petites molécules (eau et chlorure de sodium). Le degré de polymérisation (n) de la résine, qui correspond à la longueur de la chaîne polymère, dépend du rapport molaire entre le bisphénol A et l'épichlorhydrine.

- Si $0 < n < 1$: La résine est liquide.
- Si $1 < n < 1,5$: La résine est très visqueuse.
- Si $n > 1,5$: La résine est solide.

Le degré de polymérisation influence également les propriétés de la résine, telles que sa viscosité, son temps de gel et sa résistance mécanique.

Les groupes époxydes présents aux extrémités de la chaîne polymère sont responsables de la réactivité élevée des résines époxydes. Ces groupes peuvent réagir avec divers agents durcissants, tels que les amines, les thiols et les anhydrides, pour former un réseau polymère tridimensionnel dur et résistant.

Les groupes hydroxyle (OH) situés au milieu de la chaîne polymère peuvent également participer à des réactions secondaires, influençant ainsi les propriétés de la résine [21- 22].

2.3.Durcisseurs et réaction de durcissements

Les résines époxydes sont des polymères thermodurcissables qui ne durcissent qu'en présence d'un agent de réticulation, également appelé durcisseur. Ces agents de réticulation sont généralement des molécules plus petites et moins visqueuses que la résine elle-même. Ils permettent de transformer la résine liquide en un réseau polymère tridimensionnel solide et résistant.

Il existe une grande variété de durcisseurs pour les résines époxydes, chacun conférant des propriétés spécifiques au matériau durci. Les types de durcisseurs les plus courants incluent :

- **Amines (aliphatiques, cyclo-aliphatiques, aromatiques)** : Ces durcisseurs réagissent avec les groupes époxydes par une réaction de polyaddition, formant des liaisons amides. Ils offrent un bon compromis entre la vitesse de durcissement et les propriétés mécaniques.
- **Anhydrides** : Ces durcisseurs réagissent avec les groupes époxydes par une réaction de polyaddition, formant des liaisons ester. Ils procurent une haute résistance chimique et une bonne stabilité thermique.
- **Polyamides** : Ces durcisseurs réagissent avec les groupes époxydes par une réaction de polyaddition, formant des liaisons amide et imide. Ils offrent une excellente résistance mécanique et une bonne adhésion.
- **Phénols (composés phénoliques)** : Ces durcisseurs réagissent avec les groupes époxydes par une réaction de polycondensation, formant des liaisons phénoliques. Ils procurent une bonne résistance à la chaleur et aux produits chimiques [18 , 23].

La nature du durcisseur utilisé détermine le mécanisme de réticulation de la résine époxyde. Les trois mécanismes principaux sont :

- **Homo-polymérisation** : Ce mécanisme implique la réaction des groupes époxydes entre eux, catalysée par des acides ou des bases. Il est généralement utilisé pour les résines époxydes à base d'anhydrides.
- **Copolymérisation** : Ce mécanisme implique la réaction des groupes époxydes avec les groupes fonctionnels du durcisseur, tels que les amines ou les polyamides. Il est le mécanisme le plus commun pour les résines époxydes.
- **Polyaddition** : Ce mécanisme implique la réaction directe des groupes époxydes avec les groupes fonctionnels du durcisseur, sans l'intervention d'un élément tiers comme l'eau. Il est utilisé pour les résines époxydes à base de phénols.

La réaction chimique entre le durcisseur et les groupes époxydes entraîne l'ouverture du cycle époxyde et la formation de liaisons covalentes entre les chaînes polymères. Ces liaisons relient les chaînes entre elles, créant un réseau tridimensionnel solide et résistant [24].

Une résine époxyde durcie est donc composée de deux composants principaux :

- **Le prépolymère époxy** : C'est la résine elle-même avant le durcissement, constituée de chaînes polymères avec des groupes époxydes à leurs extrémités.
- **Le durcisseur (agent de réticulation)** : C'est l'agent qui réagit avec les groupes époxydes pour former le réseau tridimensionnel [25].

Dans de nombreux cas, il est souhaitable d'accélérer le processus de durcissement des résines époxydes. Pour cela, on peut ajouter des accélérateurs, tels que des amines tertiaires ou des sels métalliques. Ces accélérateurs augmentent la vitesse de la réaction de réticulation, permettant d'obtenir un matériau durci plus rapidement [21].

2.4. Propriétés physiques et mécaniques des résines époxydes

- **Masse volumique (ρ)** : 1,1 à 1,4 g/cm³ (1100 à 1400 kg/m³)
- **Module d'élasticité (E)** : 3 à 4,5 GPa
- **Module de cisaillement (G)** : 1600 MPa
- **Coefficient de Poisson (ν)** : 0,4
- **Conductivité thermique (λ)** : 0,13 W/(m·K)
- **Coefficient de dilatation thermique (α)** : $11 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- **Résistance à la traction (σ_{rupture})** : 0,2 à 0,6 MPa
- **Plage de température de distorsion thermique (T_{max})** : 90 à 200 °C. [2, 24]

Remarques :

- Les valeurs indiquées sont des valeurs moyennes et peuvent varier en fonction de la composition exacte de la résine époxyde et de ses additifs.
- Il est important de consulter les fiches techniques des fabricants pour obtenir des informations précises sur les propriétés d'une résine époxyde spécifique.

2.5. Avantages et Inconvénients

Le tableau ci-dessous résume les principaux avantages et inconvénients des résines époxy, en mettant en évidence leurs propriétés remarquables ainsi que les limitations à prendre en compte lors de leur utilisation.

Tableau 1.6 : Avantages et inconvénients de la résine époxy [1, 19, 21, 24, 26- 27].

| Avantages | Inconvénients |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - Faible adsorption. - Bonne accrochement sur les fibres. - Propriétés isolantes. - Résistance à la corrosion. - Résistance exceptionnelle aux divers agents chimiques. - Performances mécaniques très bonnes. - Bonne adhérence sur les surfaces (métalliques, plastiques ...) Facilité de mise en œuvre. - Auto extingüibilité. - Faible retrait pendant le durcissement cause une stabilité dimensionnelle. - Facilité de traitement. - Résistance à la chaleur. - Sécurité élevée. | <ul style="list-style-type: none"> - Prix élevé. - Sensibilité à l'humidité et aux UV. Sensibilité aux chocs (fissuration). Vieillesse sous température. - Temps de polymérisation long. - Nécessité de prendre des précautions lors de la mise en œuvre. |

2.6. Domaine d'application des résines époxydes

Les résines époxydes, aux propriétés remarquables, trouvent des applications dans une multitude de domaines industriels. Elles s'utilisent aussi bien comme matériau de surface que de structure, offrant une polyvalence appréciée dans divers secteurs.

Voici quelques exemples concrets de leur utilisation :

- **Domaine électrique et électronique :** Encapsulation de composants électroniques, fabrication de circuits imprimés, vernis isolants, etc.
- **Secteur de la construction :** Revêtement et protection de sols, murs, canalisations, etc.
- **Industries automobile, maritime et aérospatiale :** Protection contre la corrosion des surfaces extérieures des véhicules, fabrication de pièces structurales, etc.
- **Équipements de sport et loisirs :** Fabrication de skis, snowboards, cannes à pêche, etc.
- **Revêtements :** Revêtements anti-corrosion, émaillage d'appareils électroménagers, boîtes et contenants métalliques, peintures, vernis, etc.
- **Adhésifs :** Collage de métaux, plastiques, bois, verre, etc.
- **Opérations d'imprégnation :** Imprégnation de fibres textiles, bois, etc.
- **Fabrication de matériaux composites à base de fibres :** Renforcement de structures en béton, construction de bateaux, fabrication d'équipements sportifs, etc.

Chapitre 1 : Revue bibliographique

- **Matériaux d'encapsulation** : Encapsulation de composants électroniques sensibles, protection de pièces mécaniques, etc.
- **Systèmes biomédicaux** : Prothèses osseuses, implants dentaires, valves cardiaques, etc [19, 28- 29].

La figure 1.20 illustre de manière schématique la diversité des domaines d'application des résines époxydes [29].

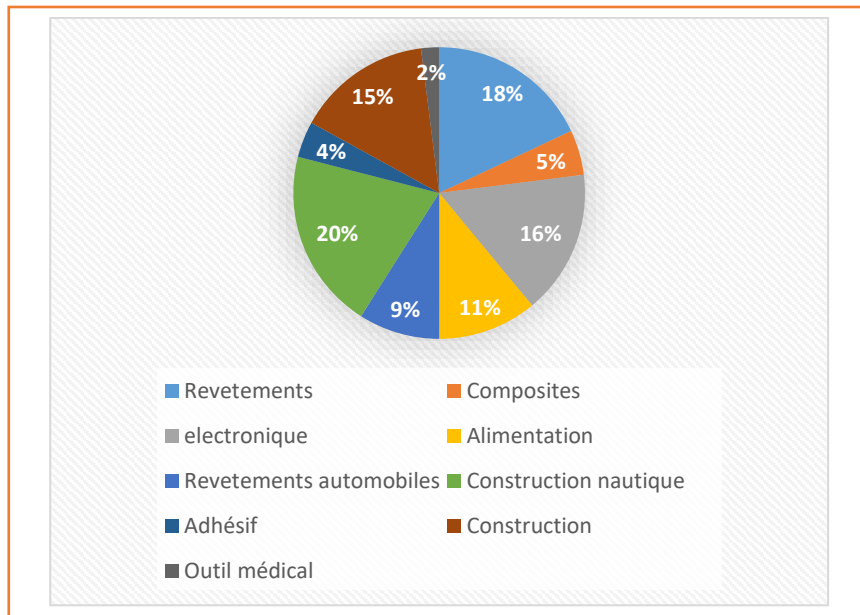


Figure 1.19 : Domaines d'application de la résine époxy.

3. Luffa

Luffa, également orthographié **loofah** dans un usage non technique, est une plante grimpante annuelle appartenant à la famille des Cucurbitacées, la même que celle des concombres et des courges. Elle est cultivée dans les régions tropicales et subtropicales.

Les espèces les plus connues de Luffa sont :

- **Luffa aegyptiaca / cylindrica (luffa lisse, luffa égyptien, loofa gourde)** : Cette espèce est la plus commune et la plus utilisée pour la fabrication d'éponges végétales. Elle produit de longs fruits cylindriques à la peau lisse.
- **Luffa acutangula (luffa incliné, luffa strié, courge végétale)** : Cette espèce se distingue par ses fruits anguleux et striés. Elle est consommée comme légume dans certains pays.
- **Luffa operculata (loofa sauvage, concombre éponge)** : Cette espèce est moins commune que les autres et produit des fruits plus petits et moins charnus.
- **Luffa cardifolia** : Cette espèce est caractérisée par ses feuilles en forme de cœur.
- **Luffa echinata** : Cette espèce se distingue par ses fruits couverts d'épines [30- 31].

3.1.Luffa cylindrica (aegyptiaca)

Luffa cylindrica (aegyptiaca), également connue sous le nom de luffa lisse ou luffa égyptien, est une plante grimpante annuelle largement cultivée dans les régions tropicales et subtropicales du monde. On la trouve notamment en Égypte, en Afrique du Nord, en Amérique du Sud, en Chine, au Japon, en Inde et en Turquie [30], [32].

Description :

- **La plante** : Herbacée et grimpante, Luffa cylindrica peut atteindre une hauteur d'environ 6 mètres et une largeur d'environ 80 centimètres. Ses tiges sont fines et robustes, permettant à la plante de s'accrocher aux supports (**figure 1.21-a**).
- **Les feuilles** : Ovale et cordées, les feuilles de Luffa cylindrica sont souvent plus larges que longues. Elles présentent une nervation palmée caractéristique et une bordure dentée (**figure 1.21-b**).
- **Les fleurs** : Les fleurs de Luffa cylindrica sont unisexuées, c'est-à-dire qu'il existe des fleurs mâles et des fleurs femelles distinctes. Elles sont toutes deux de couleur jaune vif et présentent une corolle à cinq pétales (**figure 1.21-c**).
- **Le fruit** : Le fruit de Luffa cylindrica est lisse, cylindrique et arrondi. Sa longueur varie généralement entre 30 et 40 centimètres, et son diamètre entre 10 et 15 centimètres. La chair du fruit est blanche à l'étape tendre et devient jaune à maturité. Il contient 50 à 60 graines (**figure 1.21-d**).
- **Les graines** : Les graines de Luffa cylindrica sont plates et lisses. Elles sont blanches si le fruit est jeune et noires si le fruit est mature. Leur longueur est d'environ 0,5 à 1 centimètre (**figure 1.21-e**).

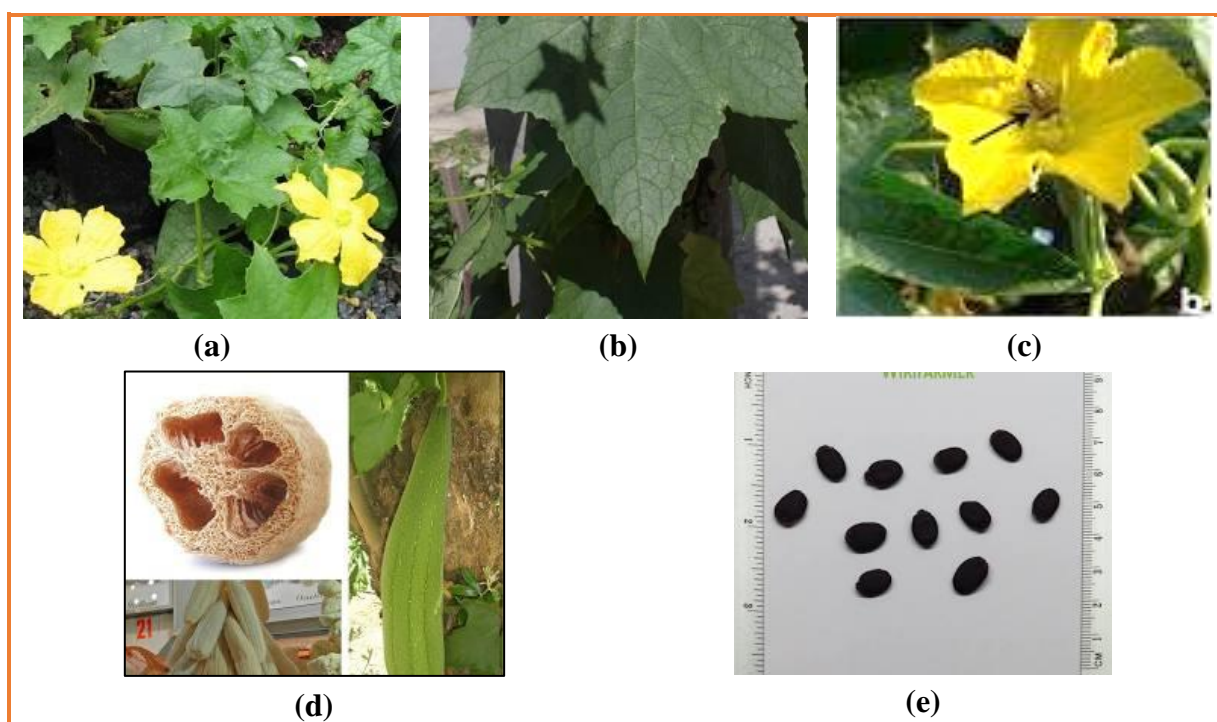


Figure 1.20 : (a) Plant du *Luffa cylindrica*, (b) Feuilles du *Luffa cylindrica*, (c) Fleurs du *Luffa cylindrica*, (d) Fruit du *Luffa cylindrica*, (e) Grains du *Luffa cylindrica*.

3.1.1. Croissance

Le *Luffa cylindrica* nécessite une saison de croissance longue et chaude pour arriver à maturité. Il est recommandé de semer les graines après que le sol s'est réchauffé au printemps, car cette plante préfère un emplacement ensoleillé et n'apprécie pas l'excès d'eau.

Conditions de croissance optimales :

- **Température :** Le *Luffa cylindrica* prospère dans des climats chauds, avec des températures idéales comprises entre 20 et 30 degrés Celsius. La culture en serre est conseillée dans les régions aux étés courts et frais.
- **Humidité :** Le *Luffa cylindrica* a besoin d'humidité régulière pour sa croissance, mais un sol détrempé peut favoriser les maladies des racines. Un arrosage profond et peu fréquent est préférable à un arrosage superficiel et régulier.
- **Sol :** Le *Luffa cylindrica* préfère un sol riche, bien drainé et légèrement acide, avec un pH compris entre 6 et 6,8.
- **Lumière :** Le *Luffa cylindrica* a besoin d'un emplacement ensoleillé pour se développer correctement.
- **Support :** Le *Luffa cylindrica* est une plante grimpante qui a besoin d'un support solide, comme un treillis ou une clôture, pour s'accrocher.

Étapes de croissance :

1. **Germination :** Les graines de *Luffa cylindrica* germent généralement en 7 à 10 jours dans des conditions favorables.

2. **Croissance végétative** : La plante pousse rapidement et peut atteindre sa hauteur maximale en quelques mois.
3. **Floraison** : Les fleurs de *Luffa cylindrica* apparaissent environ 60 à 70 jours après la germination.
4. **Fructification** : Les fruits se développent rapidement et atteignent leur maturité en 80 à 100 jours.
5. **Récolte** : Les fruits de *Luffa cylindrica* sont récoltés lorsqu'ils sont complètement mûrs et que leur peau devient jaune. [3, 30]

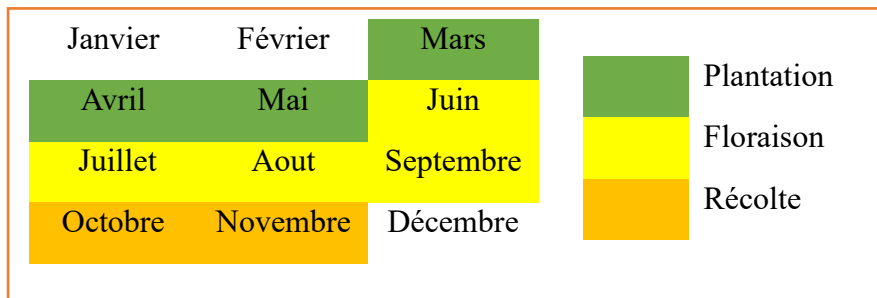


Figure 1.21 : States de croissance du luffa cylindrique.

3.1.2. Architecture

La structure du *Luffa cylindrica* est fascinante et présente plusieurs caractéristiques uniques.

Surface et maturation :

- La surface extérieure du *Luffa* est d'abord recouverte d'une peau verte.
- Lorsque la période de maturation des fibres à l'intérieur du fruit est terminée, cette peau commence à sécher.
- La structure fibreuse se développe ensuite sous cette couche extérieure séchée[32].



Figure 1.22 : Luffa mature et immature

Formation du réseau de fibres :

- Une fois séchées, les fibres du *Luffa* se regroupent pour former un réseau complexe dans plusieurs directions. Ce système vasculaire fibreux est responsable de la texture spongieuse caractéristique du *Luffa* [15, 30].
- La taille de ce réseau peut varier en fonction de la région de culture [32].

Structure microcellulaire :

- Les éponges de Luffa naturelles se distinguent par leur structure microcellulaire unique.
- Elles présentent des canaux micro-creux continus (macropores) d'un diamètre compris entre 10 et 20 μm .
- Ces macropores correspondent aux paquets vasculaires et forment un système hiérarchique multifonctionnel de pores.

Différentes parties :

- Le fruit du Luffa cylindrica se divise en plusieurs parties distinctes de l'intérieur vers l'extérieur :
 - **Noyau (ou filet)** : La partie centrale du fruit, constituée de fibres compactes.
 - **Paroi externe** : La couche fibreuse épaisse et résistante qui forme l'extérieur de l'éponge.
 - **Paroi interne** : La couche fibreuse plus fine et plus souple qui se trouve à l'intérieur de l'éponge.
- **Faisceaux vasculaires** : Des structures fibreuses qui relient la surface interne à la partie centrale (noyau) du fruit [33].

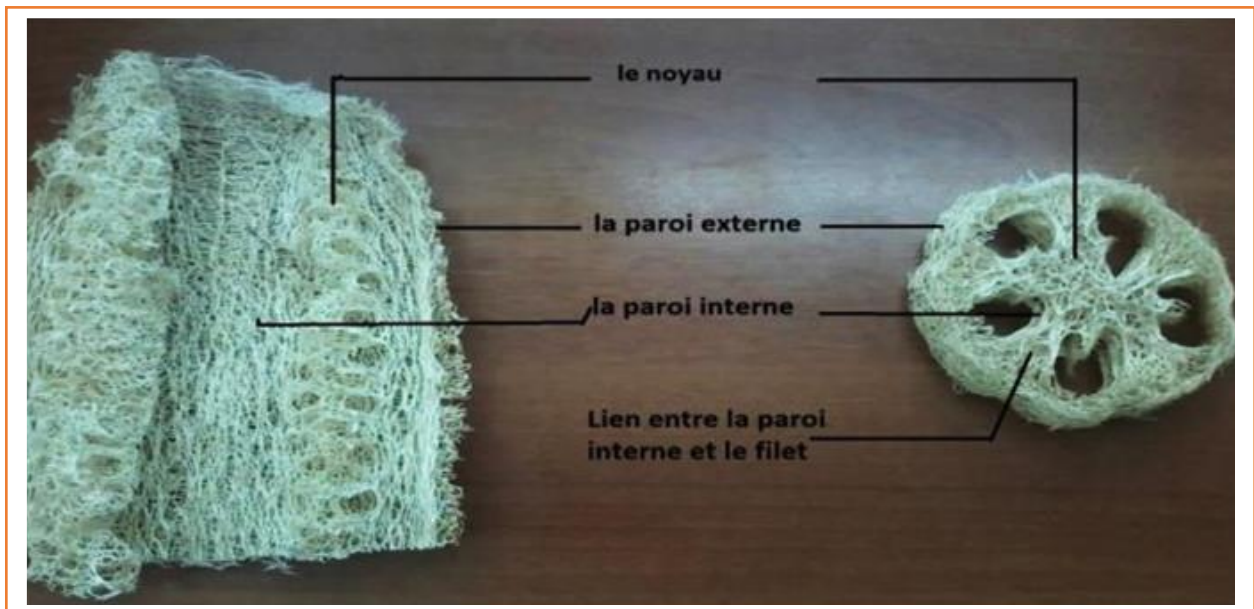


Figure 1.23 : Architecture du luffa cylindrique

3.1.3. Composition chimique

Le fruit du Luffa cylindrica, comme toutes les fibres végétales, est composé de trois constituants principaux : la cellulose, la lignine et l'hémicellulose. C'est pourquoi il est classé comme matériau lignocellulosique [30].

Les proportions de ces constituants sont les suivantes :

- **Cellulose** : $63 \pm 2,5 \%$
- **Lignine** : $11,69 \pm 1,2 \%$
- **Hémicellulose** : $20,88 \pm 1,4 \%$

Chapitre 1 : Revue bibliographique

Outre ces constituants principaux, le *Luffa cylindrica* contient également une petite quantité de cendres ($0,4 \pm 0,1 \%$), formées de matériaux inorganiques [34].

Il est important de noter que ces pourcentages peuvent varier en fonction de divers facteurs, tels que :

- **L'origine de la plante** : La composition chimique du *Luffa* peut différer selon l'espèce et la variété de la plante.
- **Les conditions de croissance** : Les facteurs environnementaux tels que le climat, le sol et l'irrigation peuvent influencer la composition du fruit.
- **Le stade de maturation** : La composition chimique du *Luffa* peut évoluer au cours de sa maturation.
- **Les pratiques agricoles** : L'utilisation d'engrais et de pesticides peut également avoir un impact sur la composition du fruit [32].

Comprendre la composition chimique du *Luffa cylindrica* est important pour plusieurs raisons :

- **Développement de nouveaux produits** : La connaissance des constituants du *Luffa* permet d'explorer son potentiel pour la fabrication de nouveaux matériaux et produits.
- **Amélioration des propriétés** : Identifier les facteurs qui influencent la composition du *Luffa* peut aider à optimiser ses propriétés pour des applications spécifiques.
- **Contrôle de la qualité** : La composition chimique du *Luffa* peut servir de critère pour évaluer la qualité du fruit et de ses dérivés.

3.1.3.1. Cellulose

La cellulose est un polymère naturel (polysaccharide) essentiel à la structure du *Luffa cylindrica*. Elle est constituée d'unités répétitives de β -D-glucopyranose de formule $C_6H_{10}O_5$, liées entre elles par des liaisons glycosidiques 1,4 en position C1 et C4. La cellobiose constitue le motif récurrent de la cellulose, et son degré de polymérisation est d'environ 10 000, pouvant varier selon l'espèce végétale.[2], [30]

Les groupes hydroxyle (-OH) présents sur les unités de glucose jouent un rôle crucial dans les modifications des fibres de *Luffa*. Leur réactivité élevée permet d'optimiser les processus de modification de ces fibres naturelles [35].

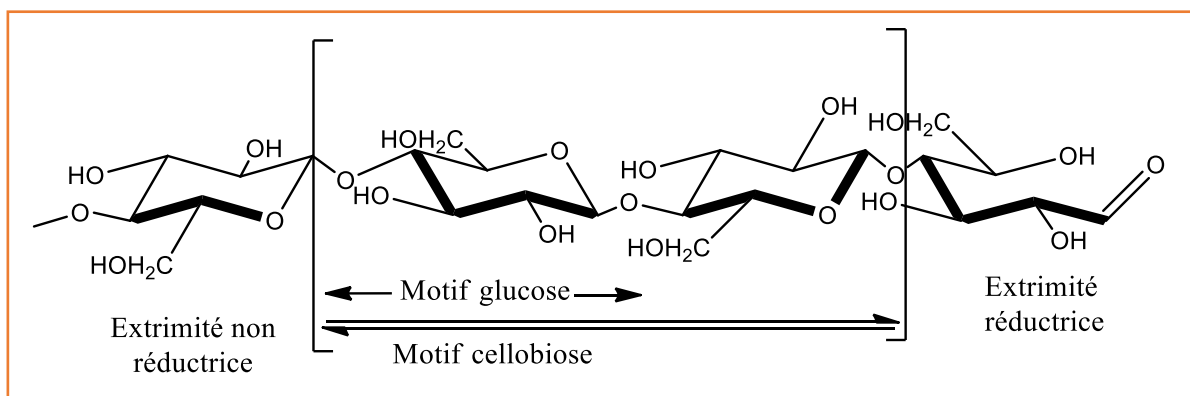


Figure 1.24: Molécule de la cellulose (n répétitions du motif cellobiose)

Il existe deux types principaux de cellulose :

- **Cellulose naturelle (Cellulose I)** : Obtenue directement à partir des plantes, elle présente une structure cristalline.

- **Cellulose régénérée (Cellulose II):** Obtenue après dissolution de la cellulose naturelle dans des solvants spécifiques, elle présente une structure non cristalline [2].

La cellulose du *Luffa cylindrica* possède plusieurs propriétés remarquables :

- **Biodégradable et renouvelable :** Elle contribue à la durabilité du matériau.
- **Faible coût :** Elle rend le *Luffa* accessible à tous.
- **Faible densité :** Elle confère au *Luffa* sa légèreté.
- **Hydrophile :** Elle confère au *Luffa* sa capacité d'absorption, propriété essentielle pour son utilisation comme éponge [30].

Outre son rôle d'absorbant, la cellulose du *Luffa cylindrica* assure également sa résistance, sa rigidité et sa stabilité structurelle. Elle confère ainsi au fruit la solidité nécessaire pour supporter sa croissance et pour résister aux contraintes environnementales [35].

La cellulose du *Luffa cylindrica* est résistante aux alcalis forts (jusqu'à 17,5% en poids), mais elle est facilement hydrolysée par les acides en sucres hydrosolubles. Elle est également relativement résistante aux agents oxydants [2].

Comprendre les propriétés de la cellulose du *Luffa cylindrica* est essentiel pour son utilisation optimale dans divers domaines. Sa résistance, sa biodégradabilité et son faible coût font d'elle un matériau prometteur pour la fabrication d'une large gamme de produits.

3.1.3.2. Hémicellulose

L'hémicellulose est un autre polysaccharide important dans la structure du *Luffa cylindrica*. Il s'agit du deuxième polysaccharide le plus abondant après la cellulose dans les parois cellulaires des plantes. L'hémicellulose présente plusieurs caractéristiques distinctives :

- **Structure hétérogène :** Elle est composée de plusieurs sucres différents, tels que le glucose, l'acide glucuronique, le mannose, l'arabinose et la xylose. Cette diversité de sucres confère à l'hémicellulose une structure hétérogène.
- **Chaînes ramifiées :** Les chaînes de sucres dans l'hémicellulose sont fortement ramifiées, ce qui donne à la molécule une structure complexe et tridimensionnelle.
- **Degré de polymérisation variable :** Le degré de polymérisation de l'hémicellulose, c'est-à-dire le nombre d'unités de sucre qui composent sa chaîne principale, varie généralement entre 200 et 300. Ce degré de polymérisation peut également varier selon l'espèce végétale [2, 35].

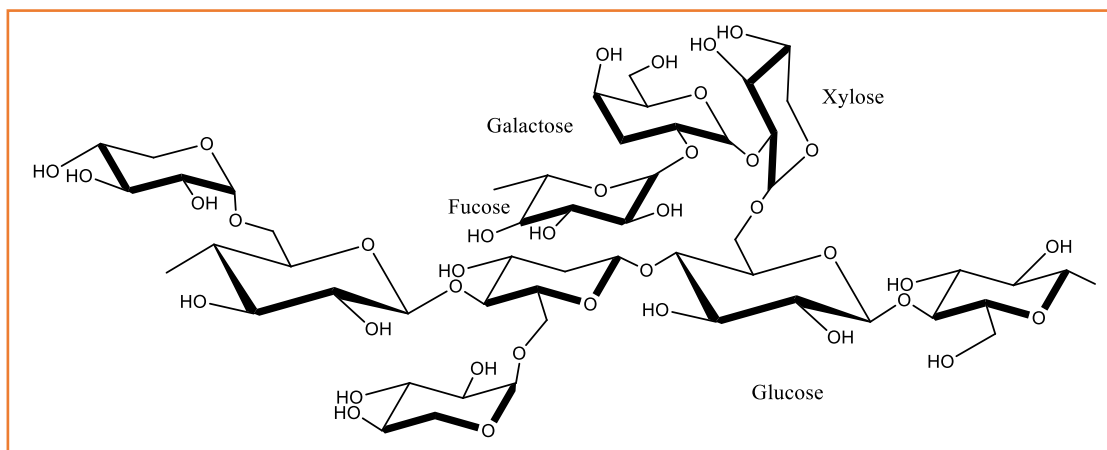


Figure 1.25 : Structure d'un type de xyloglucane

Chapitre 1 : Revue bibliographique

Les xyloglucanes constituent une classe d'hémicelluloses particulièrement étudiée. Ces molécules sont composées d'une chaîne principale de glucose à laquelle sont liées de courtes chaînes latérales de xylose, galactose et fucose.

L'hémicellulose joue un rôle crucial dans la structure du *Luffa cylindrica* en remplissant plusieurs fonctions importantes :

- **Matrice de support** : L'hémicellulose se lie étroitement à la surface des microfibrilles de cellulose, formant une matrice de support qui renforce la paroi cellulaire et lui confère sa rigidité.
- **Liaison entre les microfibrilles** : L'hémicellulose agit comme un pont entre les microfibrilles de cellulose, contribuant à l'intégrité et à la cohésion de la paroi cellulaire.
- **Hydrophilicité** : L'hémicellulose est un matériau très hydrophile, ce qui signifie qu'elle attire et retient l'eau. Cette propriété joue un rôle important dans la capacité d'absorption du *Luffa cylindrica*.

Propriétés chimiques de l'hémicellulose :

- **Solubilité** : L'hémicellulose est insoluble en eau froide, mais elle est soluble en milieu alcalin.
- **Hydrolyse** : L'hémicellulose est facilement hydrolysable par les acides, ce qui signifie qu'elle peut être décomposée en ses sucres constitutifs [2].

Comprendre les propriétés de l'hémicellulose du *Luffa cylindrica* est essentiel pour son utilisation optimale dans divers domaines. Sa capacité à lier les microfibrilles de cellulose et à absorber l'eau la rend précieuse pour la fabrication de matériaux biodégradables et écologiques.

3.1.3.3. Lignine

La lignine est un polymère d'hydrocarbures complexe et crucial dans la structure du *Luffa cylindrica*. Elle se distingue par sa structure tridimensionnelle et irrégulière, hautement polymérisée et ramifiée [2, 35].

La lignine est formée par la polymérisation radicalaire de trois alcools phénylpropénoïques :

- **Alcool coumarylique**
- **Alcool coniférylique**
- **Alcool sinapylique**

Ces alcools proviennent de la voie métabolique des shikimates et apportent des constituants aliphatiques et aromatiques à la structure de la lignine [2].

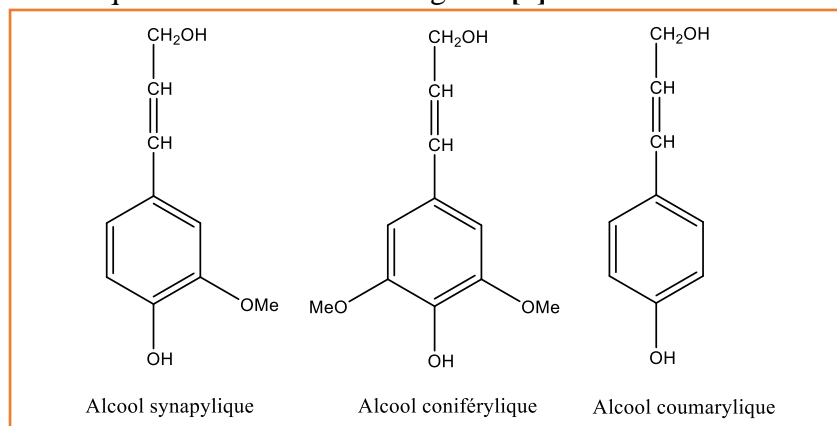


Figure 1.26 : Les structures chimiques des alcools phénylpropénoïques.

Chapitre 1 : Revue bibliographique

Les propriétés de la lignine sont :

- **Insolubilité** : La lignine est insoluble dans la plupart des solvants, ce qui la rend difficile à étudier et à modifier chimiquement.
- **Résistance à la décomposition** : Elle ne peut pas être décomposée en unités monomères, ce qui lui confère une grande stabilité et une résistance à la biodégradation.

La lignine joue un rôle essentiel dans le *Luffa cylindrica* en assurant plusieurs fonctions importantes :

- **Rigidité et dureté** : Elle renforce la paroi cellulaire et lui confère sa rigidité et sa dureté, contribuant ainsi à la solidité et à la résistance structurelle du fruit.
- **Limitation de l'élasticité** : La lignine réduit l'élasticité du *Luffa*, ce qui lui permet de maintenir sa forme et de résister aux déformations.
- **Barrière protectrice** : Elle agit comme une barrière morphologique contre les agents pathogènes, les parasites et les agressions extérieures, contribuant ainsi à la protection naturelle du fruit [2].

La structure de la lignine est complexe et varie en fonction de l'espèce végétale. Elle est généralement représentée par un réseau tridimensionnel de motifs phénylpropénoïques liés par des liaisons covalentes fortes.

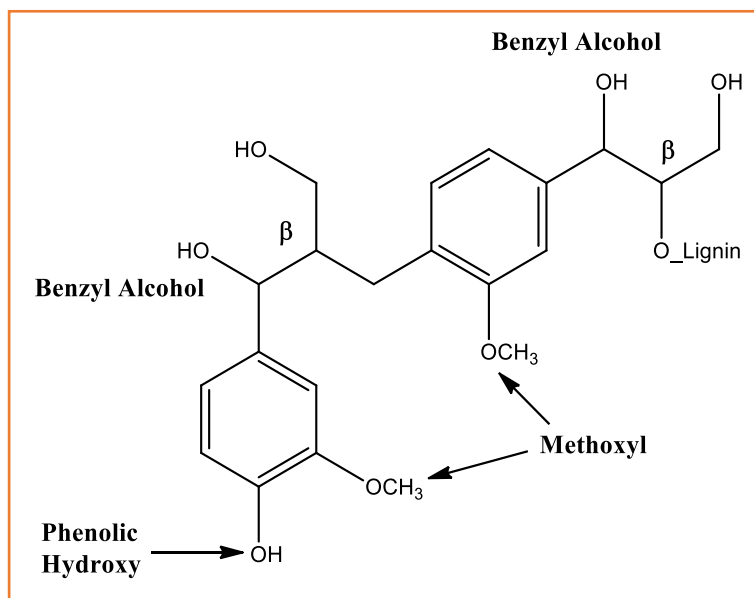


Figure 1.27 : Structure typique de la lignine.

Comprendre les propriétés et le rôle de la lignine dans le *Luffa cylindrica* est important pour plusieurs raisons :

- **Développement de nouveaux matériaux** : La lignine est une ressource naturelle abondante et renouvelable qui peut être utilisée pour la fabrication de matériaux biodégradables et écologiques.
- **Amélioration des propriétés du *Luffa*** : Une meilleure compréhension de la lignine pourrait permettre de modifier les propriétés du *Luffa cylindrica* pour des applications spécifiques.

- **Protection des végétaux :** La lignine joue un rôle crucial dans la défense des plantes contre les agressions extérieures. Comprendre son fonctionnement pourrait aider à développer de nouvelles stratégies de protection des cultures.

3.1.3.4. Cendre

Les cendres du *Luffa cylindrica* correspondent à la fraction minérale restante après combustion de la matière organique du fruit. Elles sont composées d'éléments inorganiques, principalement des sels minéraux, présents naturellement dans la structure fibreuse du *Luffa*.

Les cendres du *Luffa cylindrica* sont riches en divers éléments minéraux, dont les plus abondants sont généralement :

- **Calcium (Ca)**
- **Potassium (K)**
- **Magnésium (Mg)**
- **Phosphore (P)**
- **Silicium (Si) [36].**

La teneur en cendres et la composition exacte en éléments minéraux peuvent varier en fonction de divers facteurs, tels que :

- **L'origine géographique de la plante :** Les conditions de sol et le climat peuvent influencer la composition minérale du *Luffa*.
- **Les pratiques agricoles :** L'utilisation d'engrais et d'amendements peut modifier le profil minéral du fruit.
- **Les parties du fruit analysées :** La teneur en cendres peut différer entre l'écorce, la paroi interne et le noyau du *Luffa*.

Les cendres du *Luffa cylindrica* peuvent être obtenues expérimentalement en suivant une procédure rigoureuse :

1. **Préparation de l'échantillon :** Broyer finement une quantité définie de fibres de *Luffa* sèches.
2. **Incinération contrôlée :** Placer l'échantillon broyé dans un creuset et le chauffer dans un four à haute température (environ 550°C) dans des conditions contrôlées d'oxydation.
3. **Récupération des cendres :** Laisser refroidir le creuset et récupérer les résidus minéraux restants, qui constituent les cendres du *Luffa*.

Importance des cendres :

- **Évaluation de la qualité :** La teneur en cendres peut servir d'indicateur de la qualité du *Luffa*, car elle reflète la richesse du fruit en minéraux.
- **Compréhension de la composition :** L'analyse des cendres permet d'identifier et de quantifier les éléments minéraux présents dans le *Luffa*.
- **Applications potentielles :** Les cendres de *Luffa* pourraient avoir des applications potentielles dans divers domaines, comme l'agriculture ou l'industrie.

3.1.4. Méthodes de modification de la surface des fibres

Les fibres végétales, et plus particulièrement celles du *Luffa cylindrica*, peuvent subir différents traitements chimiques de surface afin de modifier leurs propriétés et performances. Ces traitements agissent principalement sur la cellulose, le constituant majoritaire des parois cellulaires des fibres.

Les traitements chimiques peuvent induire des modifications significatives des propriétés mécaniques des fibres de *Luffa cylindrica*, selon le type de traitement spécifique utilisé. Ces modifications peuvent inclure :

- **Diminution des propriétés de traction** : La résistance à la traction peut être réduite en raison du retrait et de la dégradation des chaînes de cellulose pendant le traitement chimique.
- **Augmentation de l'allongement** : Dans certains cas, les fibres traitées chimiquement peuvent présenter une plus grande capacité d'allongement avant rupture.
- **Nettoyage de la surface des fibres** : Les traitements chimiques peuvent éliminer les impuretés et les contaminants présents à la surface des fibres, améliorant ainsi leur apparence et leur compatibilité avec d'autres matériaux.
- **Modification de la composition chimique** : La structure chimique de la surface des fibres peut être modifiée par des réactions chimiques, ce qui peut influencer leurs propriétés de surface et leur interaction avec d'autres substances.
- **Réduction de l'absorption d'eau** : Certains traitements chimiques peuvent rendre les fibres de *Luffa cylindrica* hydrophobes, réduisant ainsi leur capacité à absorber l'eau.
- **Amélioration de la rigidité des fibres** : La rigidité des fibres peut être augmentée par certains traitements chimiques, ce qui peut les rendre plus rigides et résistantes à la déformation[1].

Il est important de noter que les effets des traitements chimiques sur les fibres du *Luffa cylindrica* peuvent varier en fonction de plusieurs facteurs, tels que :

- **Le type de traitement chimique utilisé** : Différents réactifs chimiques et conditions de traitement peuvent produire des effets distincts sur les propriétés des fibres.
- **Les caractéristiques des fibres** : La composition chimique, la structure et la morphologie des fibres de *Luffa cylindrica* peuvent influencer leur réponse aux traitements chimiques.
- **Les conditions d'application du traitement** : La concentration des réactifs, la durée du traitement et la température peuvent affecter l'efficacité et les résultats du traitement.

Le choix du traitement chimique le plus approprié pour les fibres de *Luffa cylindrica* dépend des propriétés spécifiques que l'on souhaite modifier et de l'application finale prévue pour les fibres traitées. Une analyse approfondie des caractéristiques des fibres et des exigences de l'application est essentielle pour sélectionner le traitement adéquat.

3.1.4.1. Traitement alcalin

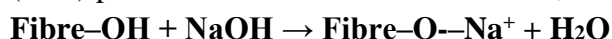
Le traitement alcalin, également connu sous le nom de mercerisation, est l'une des méthodes de modification de la surface des fibres les plus couramment utilisées pour le *Luffa cylindrica*. Il consiste à exposer les fibres à une solution aqueuse concentrée de base forte, généralement de l'hydroxyde de sodium (NaOH). Cette interaction provoque des changements significatifs dans la structure et les propriétés des fibres.

Définition de la mercerisation selon ASTM D 1965 :

"Le processus de soumettre une fibre végétale à une interaction avec une solution aqueuse assez concentrée d'une base forte, pour produire un grand gonflement avec des changements résultants dans la structure fine, la dimension, la morphologie et les propriétés mécaniques."

Mécanisme de la mercerisation :

L'ajout d'hydroxyde de sodium (NaOH) à la fibre végétale favorise l'ionisation des groupes hydroxyle (-OH) présents sur les chaînes de cellulose, selon la réaction suivante :



Cette ionisation entraîne une série de modifications importantes dans les fibres de *Luffa cylindrica* :

Effets de la mercerisation sur les fibres de *Luffa cylindrica* :

- **Augmentation de la brillance** : La mercerisation provoque la décomposition des faisceaux de fibres composites en fibres plus petites, ce qui augmente la surface réfléchissante et confère aux fibres un aspect plus brillant.
- **Réduction du diamètre des fibres** : Le gonflement induit par la mercerisation entraîne une diminution du diamètre des fibres, augmentant ainsi leur rapport d'aspect. Cette modification de la morphologie crée une topographie de surface rugueuse, favorisant une meilleure adhésion entre les fibres et la matrice dans les composites.
- **Augmentation du nombre de sites réactifs** : L'ionisation des groupes hydroxyle et la modification de la structure des fibres augmentent le nombre de sites réactifs disponibles, facilitant le mouillage et la pénétration de réactifs dans les traitements ultérieurs.
- **Élimination des constituants indésirables** : La mercerisation peut éliminer des composants non cellulosiques tels que la lignine et l'hémicellulose. Ces composants, de structure amorphe, contribuent à la diminution de la résistance à la traction des fibres. Leur élimination améliore les propriétés mécaniques des fibres.
- **Augmentation de l'indice de cristallinité** : La mercerisation favorise l'élimination des matériaux amorphes, ce qui permet un meilleur tassement et un arrangement plus ordonné des chaînes de cellulose dans la structure cristalline des fibres. Cette augmentation de la cristallinité améliore les propriétés mécaniques, notamment la résistance, la rigidité et le module de Young d'élasticité.
- **Diminution de l'angle en spirale** : La mercerisation induit une diminution de l'angle en spirale des microfibrilles de cellulose. Cette modification de l'orientation des chaînes cellulosiques contribue à l'amélioration des propriétés mécaniques, en particulier la résistance et la rigidité des fibres.

La mercerisation est une technique importante pour modifier les propriétés des fibres de *Luffa cylindrica* et les rendre plus adaptées à diverses applications. Les effets bénéfiques de la mercerisation sur la brillance, le diamètre des fibres, la réactivité, l'élimination des impuretés, la cristallinité et l'orientation des chaînes cellulosiques permettent d'améliorer les propriétés mécaniques des fibres et leur compatibilité avec d'autres matériaux [1].

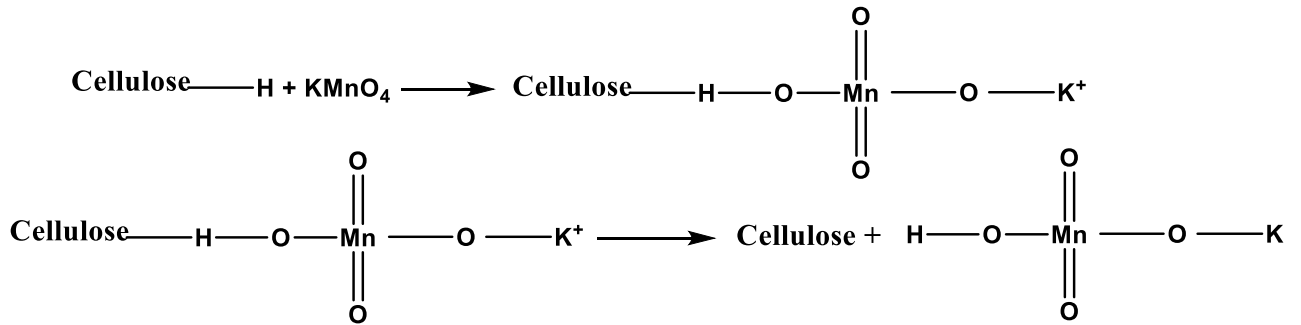
3.1.4.2. Traitement par le permanganate

Le traitement au permanganate est une méthode de modification de la surface des fibres de *Luffa cylindrica* qui implique l'utilisation de permanganate de potassium (KMnO_4). Ce composé contient le groupe permanganate (MnO_4^-), un oxydant puissant capable d'induire des réactions chimiques sur la surface des fibres.

Le traitement au permanganate se déroule en plusieurs étapes :

1. **Formation de radicaux cellulosiques** : Le permanganate (MnO_4^-) oxyde les groupes hydroxyle ($-\text{OH}$) présents sur les chaînes de cellulose des fibres, générant des radicaux cellulosiques ($-\text{O}\cdot$).

2. **Formation d'ions MnO_3^-** : Le permanganate se réduit en ions MnO_3^- , qui sont des agents oxydants forts.
3. **Copolymérisation par greffage** : Les radicaux cellulosiques créés à l'étape 1 réagissent avec les monomères présents dans la matrice, initiant une copolymérisation par greffage. Cette réaction permet de lier chimiquement les fibres à la matrice, créant un "verrouillage mécanique" entre les deux matériaux.



Le traitement au permanganate des fibres de *Luffa cylindrica* présente plusieurs avantages :

- **Amélioration de l'adhésion fibre-matrice** : Le "verrouillage mécanique" créé par la copolymérisation par greffage renforce l'adhésion entre les fibres et la matrice, améliorant la cohésion et la résistance au cisaillement des composites.
- **Augmentation des propriétés mécaniques** : L'amélioration de l'adhésion fibre-matrice se traduit par une augmentation des propriétés mécaniques des composites, telles que la résistance à la traction, la rigidité et le module de Young.
- **Augmentation de la rugosité de la surface** : Le traitement au permanganate peut rendre la surface des fibres plus rugueuse, ce qui peut améliorer l'adhésion entre les fibres et d'autres matériaux.

La plupart des traitements au permanganate des fibres de *Luffa cylindrica* utilisent une solution de permanganate de potassium ($KMnO_4$) dans l'acétone à différentes concentrations. La durée de trempage des fibres dans la solution varie généralement de 1 à 3 minutes. Un prétraitement alcalin est souvent effectué avant le traitement au permanganate pour améliorer la réactivité des fibres.

Le traitement au permanganate est une technique efficace pour modifier la surface des fibres de *Luffa cylindrica* et améliorer leurs propriétés d'adhésion et mécaniques. Cette technique présente un intérêt particulier pour la fabrication de composites renforcés de fibres végétales, où une forte adhésion entre les fibres et la matrice est essentielle pour des performances optimales [1].

3.1.4.3. Traitement par le silane

Le traitement au silane est une méthode de modification de la surface des fibres de *Luffa cylindrica* qui utilise des agents de couplage à base de silane pour améliorer l'adhésion entre les fibres et la matrice polymère. Les silanes sont des composés organosilicés de formule générale SiR'_4 , où R' représente un groupe alkyle ou aryle.

Le traitement au silane se déroule en plusieurs étapes :

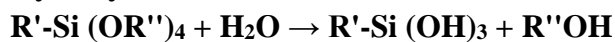
1. **Hydrolyse** : En présence d'humidité, les groupes alcoxy hydrolysables du silane se transforment en silanols ($-SiOH$).

2. **Condensation** : Les silanols réagissent ensuite avec les groupes hydroxyle (-OH) présents sur la surface des fibres de *Luffa cylindrica*, formant des liaisons covalentes stables. Ces liaisons chimisorbent les agents de couplage à la paroi cellulaire des fibres.
3. **Formation de liaisons covalentes** : Les liaisons covalentes formées entre les silanols et les groupes hydroxyle des fibres réduisent le nombre de groupes hydroxyle libres à l'interface fibre-matrice.

Réactions chimiques :

Les schémas de réaction suivants illustrent le mécanisme du traitement au silane :

Hydrolyse du silane :



Condensation entre le silanol et le groupe hydroxyle de la fibre :



Le traitement au silane des fibres de *Luffa cylindrica* présente plusieurs avantages :

- **Amélioration de la compatibilité** : Le traitement au silane augmente la compatibilité chimique entre les fibres naturelles et la matrice polymère, réduisant les tensions interfaciales et améliorant l'homogénéité du composite.
- **Augmentation de l'adhésion** : Les liaisons covalentes formées entre les agents de couplage et les fibres renforcent l'adhésion fibre-matrice, ce qui se traduit par une meilleure cohésion et une résistance accrue au cisaillement des composites.
- **Amélioration des propriétés mécaniques** : L'amélioration de l'adhésion fibre-matrice induite par le traitement au silane entraîne une augmentation des propriétés mécaniques des composites, telles que la résistance à la traction, la rigidité et le module de Young.
- **Amélioration de la stabilité thermique** : Le traitement au silane peut également améliorer la stabilité thermique des composites en réduisant la dégradation des fibres à haute température.

L'absorption du silane par les fibres de *Luffa cylindrica* dépend de plusieurs facteurs :

- **Température** : Une température plus élevée favorise l'hydrolyse et la condensation du silane, augmentant ainsi son absorption par les fibres.
- **PH** : Un pH légèrement acide (environ 4-5) est optimal pour l'hydrolyse et la condensation du silane.
- **Temps d'hydrolyse** : Un temps d'hydrolyse plus long permet une conversion plus complète du silane en silanols, ce qui augmente son absorption par les fibres.

Le traitement au silane est une technique efficace pour améliorer l'adhésion et les propriétés mécaniques des composites renforcés de fibres de *Luffa cylindrica*. Cette technique est particulièrement importante pour les applications où une forte performance mécanique et une bonne résistance à la dégradation sont requises [1].

3.1.4.4. Traitement par l'acétylation

Le traitement par acétylation est une méthode de modification de la surface des fibres de *Luffa cylindrica* qui consiste à les exposer à de l'anhydride acétique. Cette réaction chimique modifie la

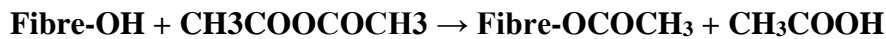
structure de la cellulose, le principal constituant de la paroi cellulaire des fibres, en remplaçant les groupes hydroxyle (-OH) par des groupes acétyle (-COCH₃).

Mécanisme du traitement par acétylation :

La réaction d'acétylation se déroule en plusieurs étapes :

1. **Formation d'ions acétylium:** L'anhydride acétique (CH₃CO.COCH₃) se dissocie en présence d'un catalyseur acide, généralement l'acide sulfurique (H₂SO₄), pour former des ions acétylium (CH₃CO⁺).
2. **Attaque des groupes hydroxyle :** Les ions acétylium réagissent avec les groupes hydroxyle (-OH) présents sur les chaînes de cellulose des fibres, formant des esters acétyliques (-COCH₃).
3. **Modification de la structure de la cellulose :** La substitution des groupes hydroxyle par des groupes acétyle modifie la structure de la cellulose, la rendant plus hydrophobe et moins cristalline.

L'équation suivante illustre la réaction d'acétylation entre l'anhydride acétique et les fibres de *Luffa cylindrica* :



Le traitement par acétylation des fibres de *Luffa cylindrica* présente plusieurs avantages :

- **Réduction de l'hydrophilie :** La substitution des groupes hydroxyle par des groupes acétyle rend les fibres moins hydrophiles, ce qui peut améliorer leur résistance à l'eau et à l'humidité.
- **Amélioration de l'adhésion fibre-matrice :** La réduction de l'hydrophilie des fibres peut améliorer leur adhésion à des matrices polymères hydrophobes, augmentant la cohésion et la résistance au cisaillement des composites.
- **Augmentation de la stabilité dimensionnelle :** Le traitement par acétylation peut réduire le gonflement des fibres en présence d'humidité, améliorant la stabilité dimensionnelle des composites.
- **Amélioration de la stabilité thermique :** L'acétylation peut augmenter la stabilité thermique des fibres et des composites en retardant la dégradation thermique.

Le traitement par acétylation est une technique efficace pour modifier les propriétés des fibres de *Luffa cylindrica* et les rendre plus adaptées à diverses applications. Cette technique est particulièrement intéressante pour la fabrication de composites renforcés de fibres végétales destinés à des environnements humides ou à des applications nécessitant une bonne stabilité dimensionnelle et thermique [1].

3.1.5. Propriétés

Les tableaux 1.5 et 1.6 présentent respectivement les propriétés physiques et mécaniques du *Luffa cylindrica*. Ces propriétés sont déterminantes pour la sélection et l'utilisation de ce matériau dans divers domaines d'application, tels que la construction, l'emballage et l'absorption des liquides.

3.1.5.1. Physiques

Tableau 1.7 : Propriétés physique du luffa [37].

| Propriété | Valeur | Unité |
|------------------------------------|--------|-------------------|
| Teneur en eau (h) | 7.01 | % |
| Densité réelle (ρ_r) | 1.5 | g/cm ³ |
| Densité apparente (ρ_{app}) | 0.75 | g/cm ³ |
| Porosité interne (ϵ) | 0.21 | - |
| Porosité externe (ϵ_e) | 0.77 | - |

3.1.5.2. Mécaniques

Tableau 1.8 : Propriétés mécanique du luffa [38].

| Propriété | Valeur | Unité |
|---|--------|-------|
| Résistance à la traction (σ) | 202.3 | MPa |
| Module de Young (E) | 4.5 | GPa |
| Allongement à la rupture (ϵ_r) | 2.5 | % |

3.1.5.3. Chimiques

Le Luffa cylindrica, comme la plupart des fibres végétales, présente des propriétés chimiques spécifiques qui déterminent son comportement vis-à-vis de divers agents chimiques.

Comportement vis-à-vis des acides :

- **Acides forts (HCl, H₃PO₄ concentrés) :** Détruisent les fibres de Luffa à température ambiante en raison d'une attaque hydrolytique sévère de la cellulose.
- **Acide nitrique moins concentré :** Transforme la cellulose en nitrocellulose, un matériau explosif, via une réaction de nitration.

Comportement vis-à-vis des bases :

- **Soude (NaOH) :** Permet de purifier la cellulose en éliminant les autres constituants présents dans les fibres, tels que la lignine et les hémicelluloses. Cette purification améliore les propriétés mécaniques et la réactivité des fibres.

Comportement vis-à-vis des oxydants :

- **Oxydants à basse concentration (NaClO, H₂O₂, EDTA) :** Détruisent les colorants naturels présents dans les fibres et éliminent partiellement la lignine.
- **Oxydants à des concentrations élevées :** Dégradent les parois cellulaires des fibres de Luffa cylindrica, entraînant une perte de résistance et une fragilisation du matériau [30, 37].

3.1.5.4. Morphologique

3.1.5.4.1. MEB

Analyse des différentes parties de la fibre de Luffa cylindrica :

- **Faible grossissement :**
 - La micrographie MEB (**Figure 1.29**) révèle une texture constituée de cordons plus ou moins consolidés les uns aux autres, certains étant complètement libres.

- Cette observation met en évidence la structure fibreuse et la porosité du matériau [2].

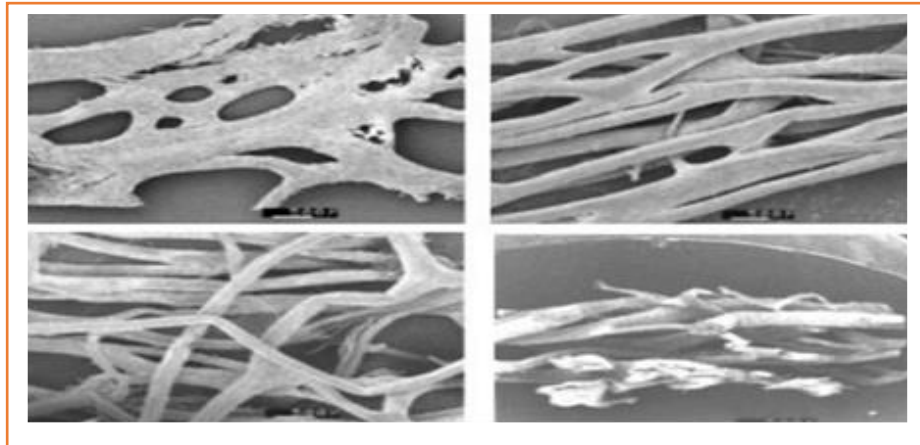


Figure 1.28 : Micrographie MEB des cordons luffa cylindrica à faible grossissement

- **Fort grossissement :**

- La micrographie MEB (**Figure 1.30**) montre la section transversale des cordons et l'organisation fibreuse de leur structure (b).
- On peut observer que les fibres sont creuses et ponctuées (a).
- Cette observation confirme la nature poreuse et la structure complexe des fibres de *Luffa cylindrica* [2].

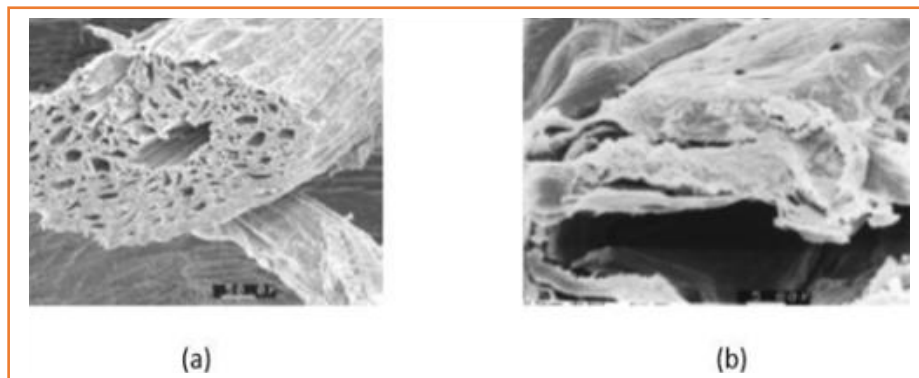


Figure 1.29 : Micrographie MEB des cordons luffa cylindrica à fort grossissement

3.1.5.4.2. MO

L'analyse par microscopie optique permet de distinguer les aspects suivants :

- Les fibres ont une forme cylindrique avec une longueur moyenne de 0,9 mm.
- La section circulaire de la fibre a un diamètre moyen allant de 8 à 30 μm [2].

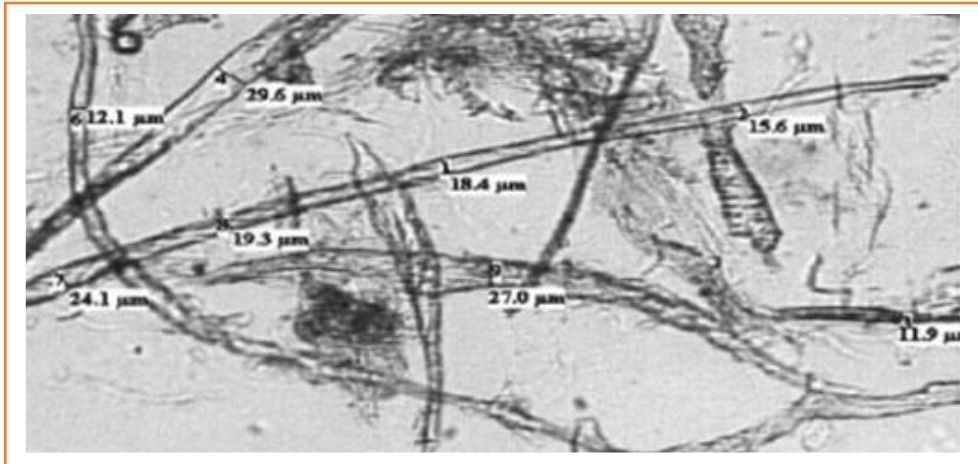


Figure 1.30 : Structure des cordons de luffa cylindrica.

3.1.6. Avantages et inconvénients

Le tableau 1.7 présente une synthèse des avantages et des inconvénients des fibres végétales. Ces propriétés doivent être soigneusement considérées lors du choix des fibres végétales pour une application particulière.

Tableau 1.9: Avantages et inconvénients des fibres végétales [1,38].

| Avantages | Inconvénients |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Résistantes - Douces et souples - Faible poids - Bonne isolation thermique et acoustique - Durabilité - Ressource naturelle abondante et renouvelable - Biodégradable - Fonctionnelles - Qualités d'absorption exceptionnelles - Insolubles dans de nombreux solvants - Non toxiques - Peu coûteuses - Facilité de transformation - Découpage et usinage faciles - Propriétés mécaniques spécifiques importantes - Demande peu d'énergie pour être produite - Non abrasives | <ul style="list-style-type: none"> - Fort comportement hydrophile - Faible stabilité dimensionnelle - Faible stabilité thermique - Variations de qualité (dépend des conditions de croissance) |

3.1.7. Utilisations

3.1.7.1. Domaine domestique

Le *Luffa cylindrica* trouve de nombreuses utilisations dans le domaine domestique, tirant parti de ses propriétés uniques :

- **Jeunes fruits verts** : Les jeunes fruits verts peuvent être consommés crus comme des légumes, préparés de manière similaire à la courge, ou coupés en fines tranches et consommés comme des concombres.
- **Fruits mûres et secs** : Après avoir retiré la peau, la chair et les graines, les fruits mûres et secs du *Luffa cylindrica* sont transformés en éponges polyvalentes. Leur texture fibreuse et poreuse les rend idéales pour :
 - **Éponges de douche** : Le *Luffa* offre un gommage doux et exfoliant pour la peau.
 - **Éponges de nettoyage** : Leur capacité d'absorption et leur résistance permettent de nettoyer efficacement la vaisselle, les vitres et autres surfaces.

Matériels d'emballage et paniers : Grâce à son élasticité et sa résistance, le *Luffa cylindrica* peut être utilisé pour fabriquer des emballages et des paniers durables et écologiques. Les jeunes fruits verts sont employés comme légume cru préparés comme la courge ou consommés comme des concombres.

Les fruits mûres et secs, après l'arrachement de leur peau, de la chair et des graines, ils sont utilisés comme éponge de douche, éponge de nettoyage de vaisselle, de vitre ou de verre. Grâce à son élasticité, le *Luffa* peut aussi être employé dans les matériels d'emballage et les paniers [30].



Figure 1.31 : Utilisation domestique du luffa cylindrique

3.1.7.2. Domaine pharmaceutique

Le *Luffa cylindrica* trouve également des applications prometteuses dans le domaine pharmaceutique, en raison de ses propriétés phytochimiques et de ses effets potentiels sur la santé.

Utilisations traditionnelles :

- **Médecine traditionnelle brésilienne** : Les feuilles fraîches du *Luffa cylindrica* sont utilisées sous forme d'emplâtre pour traiter les furoncles, les rhinites, les sinusites, les aménorrhées et l'hydropisie.

Études cliniques :

- **Sinusite aiguë** : En 1999, des études cliniques ont été menées pour évaluer l'efficacité d'une préparation homéopathique à base de *Luffa cylindrica* (associée à d'autres composants) dans le traitement de la sinusite aiguë [30].



Figure 1.32 : Utilisation pharmaceutique du luffa cylindrique

3.1.7.3. Domaine médicale et biologique

Le *Luffa cylindrica* possède des propriétés médicinales et biologiques prometteuses qui font l'objet de recherches scientifiques.

Propriétés phytochimiques :

- **Tonifiante, émétique et diurétique** : La plante favorise la circulation sanguine, l'élimination des toxines et la digestion.
- **Anthelminthique, carminative et laxative** : Elle combat les parasites intestinaux, favorise la digestion et soulage la constipation.
- **Dépurative, émolliente et expectorante** : Elle purifie le sang, adoucit la peau et facilite l'expectoration des mucosités.
- **Galactagogue** : Elle stimule la production de lait maternel.

Applications thérapeutiques :

- **Affections respiratoires** : Asthme, bronchite chronique, affections pulmonaires
- **Maladies de la peau** : Rhumatismes, maux de dos, hémorragies internes, hémorroïdes, acné, psoriasis
- **Autres** : Fièvre, syphilis, tumeurs, splénomégalie, lèpre, hydropisie, néphrite, ictère putride

Utilisation des fibres :

- **Exfoliation de la peau** : Les fibres du fruit sec servent d'éponge abrasive pour éliminer les cellules mortes et favoriser la circulation sanguine, contribuant ainsi à la douceur de la peau et au soulagement des rhumatismes et de l'arthrite.

Partie exploitée :

La partie fibreuse interne du fruit est la principale partie utilisée à des fins médicinales en raison de ses propriétés purgatives [30].

3.1.7.4. Domaine de traitement des eaux

Le *Luffa cylindrica* présente des propriétés d'adsorption remarquables qui le rendent utile dans le domaine du traitement des eaux.

Applications :

- **Élimination des polluants organiques** : Le Luffa peut adsorber efficacement des contaminants organiques tels que les phénols synthétiques et les colorants présents dans les eaux usées et les solutions aqueuses.
- **Adsorption des métaux lourds** : Les fibres de Luffa ont démontré une capacité d'adsorption des métaux lourds comme le cuivre (Cu^{2+}) des eaux industrielles, contribuant ainsi à réduire leur impact environnemental [39].

3.1.7.5. Domaine industrielle

Les fibres de Luffa cylindrica suscitent un intérêt croissant dans le domaine industriel en raison de leurs propriétés uniques et de leur potentiel de durabilité.

Applications :

- **Matériaux composites à matrice résineuse** : Les fibres de Luffa peuvent être utilisées comme renfort dans les matériaux composites à base de résine, remplaçant partiellement ou totalement les fibres synthétiques. Ces matériaux composites présentent des propriétés mécaniques intéressantes et une empreinte carbone réduite, les rendant attractifs pour diverses applications industrielles [39].

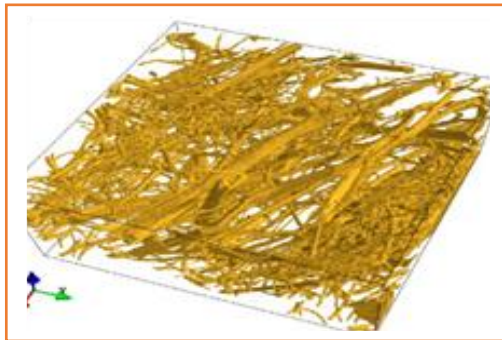


Figure 1.33 : Utilisation des fibres de luffa comme un renfort des matériaux composites.

3.2. Luffa acutangula (Pipangaille à côtes)

- **Origine** : Asie (Chine, Inde)
- **Histoire** : Cultivée depuis l'Antiquité
- **Distribution** : Asie et Afrique (régions de savane)
- **Fruits jeunes** : Commercialisés sous le nom de "gombo de Chine"
- **Fruits adultes** : Amers, contiennent des graines non ailées
- **Utilisations médicinales (pharmacopée asiatique)** :
 - Graines et racines : Purgatif et vomitif
 - Liges : Diurétique et traitement de la jaunisse [30].



Figure 1.34: *Luffa acutangula*

3.3. *Luffa cordifolia* blume (Luffa à feuilles cordées)

- **Synonyme** : *Thladiantha cordifolia* (Blume) Cogniaux
- **Origine** : Forêts tempérées d'Asie
- **Distribution** : Inde, Népal, Birmanie, Thaïlande, Laos, Vietnam et Chine [30].

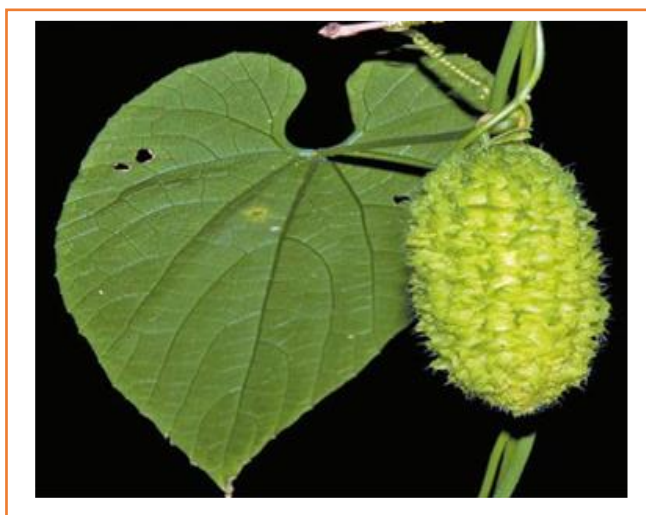


Figure 1.35 : *Luffa cordifolia*

3.4. *Luffa operculata* cogn

- **Synonyme** : *Luffa Purgans* Mart
- **Origine** : Amérique du Sud (Brésil) - région tropicale
- **Caractéristiques** :
 - Tige angulaire pouvant atteindre 3 mètres de haut
 - Feuilles larges en forme de rein ou de cœur (3 à 5 lobes), 10 à 12 cm de long
 - Fleurs jaune pâle monoïques
 - Fruits de la taille d'une prune, pointus, grisâtres, avec des nervures longitudinales et de nombreux petits piquants
 - Partie interne plumeuse avec un réseau de fibres fines et des graines aplaties brun clair

- **Utilisation** : Pharmacopée traditionnelle [30].



Figure 1.36 : Luffa operculata

3.5.Luffa echinata roxb

- **Origine** : Asie
- **Propriété** : Contient de la sylimarine
- **Études** : Études en Inde sur ses propriétés hépto-protectrices [30].



Figure 1.37 : Luffa echinata

Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous avons approfondi l'étude des matériaux composites, de la résine époxy et de l'éponge de luffa. Nous avons examiné leurs caractéristiques ainsi que leurs diverses applications dans les domaines de l'industrie et de l'environnement, en nous appuyant sur plusieurs sources littéraires pour obtenir une compréhension globale de ces matériaux.

Références bibliographique

- [1] E. Fathi, H. Boudjellale, S. Ben aissa, « Élaboration et caractérisation d'un matériau composite à base d'une résine thermodurcissables renforcé par la sciure de bois », Université Mohamed Boudiaf – M'sila, 2020.
- [2] H. Merghid et N. Boudjemline, « Contribution à l'étude de la dégradation d'un composite : Luffa/thermodurci », Ecole Nationale Polytechnique, 2018.
- [3] T. Amrouche, C. Ammeur, « Elaboration et caractérisation d'un composite à base de polyéthylène chargé d'une fibre végétale », Université A. MIRA – BEJAIA, 2020.
- [4] T. Moumene, « Les composites », Université Ibn Khaldoun- Tiaret.
- [5] Y. Chaker, « Les Polymeres », Centre Universitaire Tissemsilt, 2020.
- [6] M. Ben Nejma, « Sciences des Matériaux Plastiques », Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Jendouba.
- [7] K. Hacini, « Etude du compoetement mécanique en flexion 3 points d'un matériau composite par les éléments finis », Université Badji Mokhtar-ANNABA, 2009.
- [8] M. Benkebiche et Z. Gacem, « Élaboration et caractérisation d'un matériau composite à base d'amidon renforcé par la montmorillonite », Université Ibn Khaldoun – TIARET, 2019.
- [9] A. Bouchekrit, S. Benbabaali, « Elaboration et caractérisation de composites renforcés par des fibres ligno-cellulosiques » Ecole Nationale Polytechnique, 2020.
- [10] F. Belhadjfa Ahmed, « Etude de la diffusion d'un matériau composite " résine époxy" », Université des sciences et de la technologie d'ORAN "Mohamed Boudiaf", 2016.
- [11] W. Toumi, « Optimisation de la configuration des tubes en matériaux composites sous pression », Université Mohamed Khider de Biskra, 2019.
- [12] S. Deghboudj, « Matériaux Composites », Université Larbi Tebessi de Tébessa, 2021, <https://www.researchgate.net/publication/356289155>.
- [13] B. P. Revol, « Caractérisation de l'interface dans des composites polyamides-6 - viscose haute ténacité obtenus par injection réactive » Ecole doctorale Physique et Chimie-Physique (ED 182), 2017.
- [14] M. Ragoubi, « Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne », Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie des Ressources Procédés Produits et Environnement, 2010.
- [15] A. K. Patel, « Mechanical Properties of Luffa Cylindrica and Coconut Coir Reinforced Epoxy Hybrid Composite », *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 9, n° 11, p. 54-65, nov. 2021, doi: 10.22214/ijraset.2021.38759.
- [16] N. Metrane, « Contribution à l'étude du comportement d'un matériau composite à base de fibres de carbone pour la réalisation de prothèses orthopédiques (ONAAPH Annaba) » Université Badji Mokhtar-ANNABA, 2019.

Chapitre 1 : Revue bibliographique

- [17] S. Mohammadi, « Matériaux et Ouvrages de Génie Civil », Université Akli Mohand Oualhadje de Bouira, 2014.
- [18] L. De Halleux, « Analyse des propriétés physico-chimiques de résines époxy biosourcées » École polytechnique de Louvain, 2018.
- [19] F.-L. Jin, X. Li, et S.-J. Park, « Synthesis and application of epoxy resins: A review », *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 29, p. 1-11, 2015.
- [20] « Epoxy: Definition, Properties, Types, and Classes ». Consulté le: 23 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.xometry.com/resources/materials/what-is-epoxy/>
- [21] P. Bardonnnet, « Résines époxydes (EP) - Composants et propriétés », *Plast. Compos.*, août 1992, doi: 10.51257/a-v1-a3465.
- [22] C. Barrere et F. Dal Maso, « Résines époxy réticulées par des polyamines : structure et propriétés », *Rev. Inst. Fr. Pétrole*, vol. 52, n° 3, p. 317-335, mai 1997, doi: 10.2516/ogst:1997043.
- [23] W. R. Ashcroft, « Curing agents for epoxy resins », B. Ellis (ed.), *Chemistry and Technology of Epoxy Resins* © Chapman & Hall 1993.
- [24] C. Bentrach et A. Hassanine, « Etude des propriétés mécaniques et dynamique de composite époxy_fibre », Université Mohamed Khider de Biskra, 2022 .
- [25] O. O. Daramola et O. S. Akintayo, « MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY MATRIX COMPOSITES REINFORCED WITH GREEN SILICA PARTICLES », *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering Tome XV [2017] – Fascicule 4 [November]*, <https://www.researchgate.net/publication/327551546>.
- [26] R. Ouadday, « Étude des structures sandwichs verre/époxy de grandes épaisseurs utilisées comme extension d'avant directrices de turbines hydroélectriques », École Polytechnique de Montréal, 2013, <https://publications.polymtl.ca/1180/>.
- [27] A. Korichi et W. Tiaiba, « Amélioration et élaboration d'un matériau composite à base d'une matrice thermodurcissable (iso et ortho polyester insaturé) renforcé par les déchets de MAGHREB PIPE "M'sila" », UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2019.
- [28] S. Fetouaki, A. Elharfi, et L. Belkebir, « Synthèse d'une nouvelle résine époxyde à base du 2, 2'-dihydroxydiphényle », *Eur. Polym. J.*, vol. 38, n° 4, p. 787-793, 2002.
- [29] N. Kessouri et F.Z. Kenane, « Développement et application d'une peinture époxydique monocouche anticorrosion à faible teneur en COV », Université A. M. OULHADJ - Bouira, 2016.
- [30] S. Boumad, « VALORISATION DE LA LUFFA BRUTE ET MODIFIÉE DANS LA RÉTENTION DES COLORANTS ORGANIQUES » UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA 1, 2015.
- [31] D. Pani et P. Mishra, « Tribological Behavior of Sponge Gourd Based Hybrid Reinforced Polymer Composite », *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*. ISSN 2250-3234 Volume 8, Number 1 (2018), pp. 89-96 © Research India Publications <http://www.ripublication.com>.

Chapitre 1 : Revue bibliographique

- [32] H. Koruk et G. Genc, « Acoustic and mechanical properties of luffa fiber-reinforced biocomposites », in *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, Elsevier, 2019, p. 325-341. doi: 10.1016/B978-0-08-102292-4.00017-5.
- [33] A. Zampieri *et al.*, « Biotemplating of Luffa cylindrica sponges to self-supporting hierarchical zeolite macrostructures for bio-inspired structured catalytic reactors », *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 26, n° 1, p. 130-135, janv. 2006, doi: 10.1016/j.msec.2005.08.036.
- [34] M. N. Shamsudin et N. A. Ahmad, « The Effectiveness of Natural Luffa Sponge as a Rainwater Filter », vol. 3, n° 1, 2022.
- [35] C. Hamida et D. Chenikher, « Optimisation des facteurs influents le processus d'adsorption de l'Amoxicilline sur les fibres de luffa cylindrica : Application du plan factoriel complet », Ecole normale supérieure d'Enseignement technologique, 2022.
- [36] « Elaboration et caractérisation d'un matériau composite à base d'une matrice biodégradable renforcée par la fibre de bois issue des déchets de menuiseries », UNIVERSITE A. MIRA DE BEJAIA, 2016.
- [37] H. Cherifi, S. Hanini, et F. Bentahar, « Adsorption of phenol from wastewater using vegetal cords as a new adsorbent », *Desalination*, vol. 244, n° 1-3, p. 177-187, août 2009, doi: 10.1016/j.desal.2008.05.022.
- [38] Z. L. Falek, F.Z. Abid et M. Belarbi, « Modélisation du processus d'adsorption de l'Atorvastatine par les fibres de Luffa Cylindrica traitées par le Chlorure de Fer et la Soude : Application du Plan de Box-Behnken » Ecole normale supérieure d'Enseignement technologique, 2023.
- [39] E. Psarra et G. C. Papanicolaou, « Luffa Cylindrica as a durable biofiber reinforcement for epoxy systems », *Compos. Sci. Technol.*, vol. 203, p. 108597, févr. 2021, doi: 10.1016/j.compscitech.2020.108597.

Chapitre 02

*Matériaux,
techniques et
conditions
expérimentales*

Ce chapitre présente les matériaux utilisés dans le cadre de cette étude, les techniques expérimentales mises en œuvre pour leur caractérisation et la fabrication des composites, ainsi que les conditions expérimentales employées pour les essais mécaniques et de vieillissement.

1. Matériaux

1.1. Matrice polymérique

La matrice utilisée est une résine polymérique époxyde, de type Drylex, de marque allemande, fournie par la société DRYLEX New Generation Solutions. Elle est accompagnée d'un durcisseur spécifique. Le rapport de mélange résine/durcisseur est de **2:1**. La résine présente un **temps de séchage court** d'environ 12 heures et une **brillance acceptable**. Ses propriétés physico-chimiques sont résumées dans le tableau ci-après :

Tableau 2.1 : Caractéristiques physico-chimiques de la matrice

| Caractéristique | Valeur | Unité |
|--|---------------------|-------------------|
| Couleur | Transparente | - |
| Forme | Liquide visqueuse | - |
| Densité | 1,12 | g/cm ³ |
| Viscosité à 25°C | 1850 | mPa·s |
| Méthode d'application | Moulage par contact | - |
| Module de traction | 3 | GPa |
| Résistance à la traction | 0,0561 | GPa |
| Elongation | 6 | % |
| Module de flexion | 2,7 | GPa |
| Résistance à la flexion | 0,0817 | GPa |
| Résistance à la compression | 0,0854 | GPa |
| Tg ultime | 48,3 | °C |
| Dureté Shore D | 70 - 80 | - |
| Rapport de mélange résine/durcisseur | 2:1 | - |
| Teneur en carbone d'origine biologique | 17 | % |
| Teneur en COV | 9 | g/L |

Il est important de souligner que les informations concernant les différentes caractéristiques mentionnées ci-dessus proviennent de la fiche de données de sécurité (FDS) figurant sur le flacon de stockage.



Figure 2.1 : Photographie de la résine et le durcisseur.

1.2. Le renfort

Le renfort utilisé pour l'élaboration de notre composite est constitué de fibres obtenues à partir de la plante de **luffa cylindrique** (*Luffa cylindrica*), fournie par un herboriste à Azzaba. La plante de luffa d'origine de la région de Collo/Skikda se caractérise par une longueur **variable entre 30 et 35 cm**.

Les fibres extraites de la plante ont été obtenues après une série d'opérations de traitement, à savoir :

1.2.1. Prétraitement

A cette étape, les éponges de Luffa ont été purifiées des impuretés et de la poussière en suivant les étapes suivantes :

1. **Secouage** : Les éponges de Luffa ont été secouées vigoureusement à la main et à l'aide d'un séchoir à air pulsé pour éliminer la poussière superficielle. [Figure 2.2-a]
2. **Trempage** : Les éponges de Luffa ont été immergées dans l'eau pendant trois jours pour ramollir les impuretés et faciliter leur élimination. [Figure 2.2-b]
3. **Lavage** : Les éponges de Luffa ont ensuite été retirées de l'eau et lavées soigneusement à l'aide d'une brosse douce pour éliminer les impuretés restantes. [Figure 2.2-c]
4. **Séchage** : Les éponges de Luffa lavées ont été séchées à l'air libre ou au soleil jusqu'à obtention d'un taux d'humidité adéquat. [Figure 2.2-d]
5. **Découpe** :
 - a. **Dénoyautage** : Les éponges de Luffa ont été découpées verticalement en bandes pour retirer les graines et le noyau interne, ne conservant que la paroi externe. [Figure 2.2-e]
 - b. **Fragmentation** : Les bandes obtenues ont ensuite été découpées en petits morceaux d'environ 2,5 cm de longueur pour faciliter le traitement ultérieur. [Figure 2.2-f]

Remarque : Cette description détaillée des étapes de purification des éponges de Luffa met en lumière le processus minutieux mis en œuvre pour éliminer les contaminants et préparer efficacement les éponges en vue de leur utilisation ultérieure.

Cette figure présente des photographies illustrant les différentes étapes du prétraitement des éponges de Luffa.

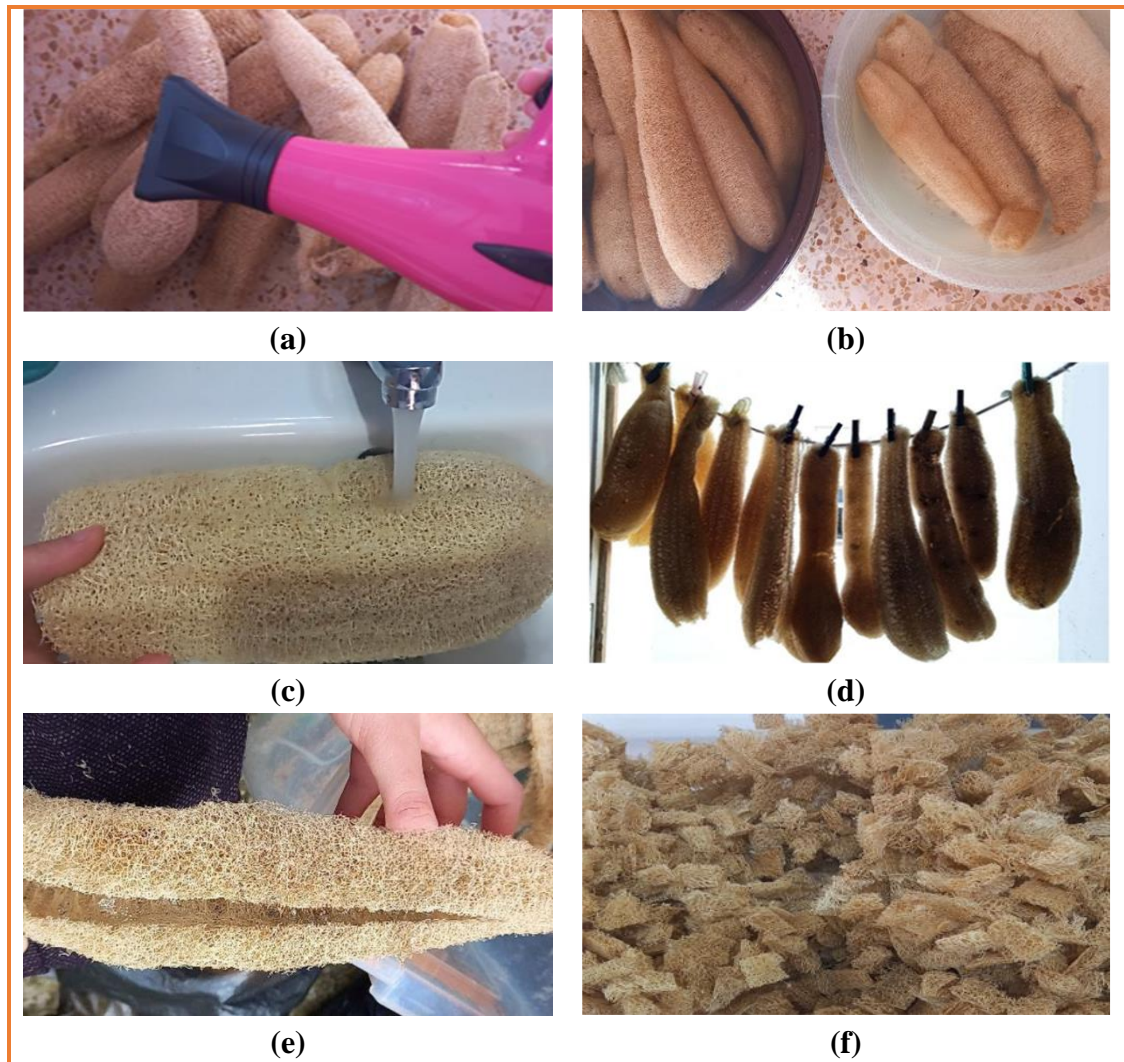


Figure 2.2 : Photographies des étapes de prétraitement.

1.2.2. Traitement

Après le prétraitement initial, les morceaux d'éponge de Luffa ont été soumis à un traitement approfondi en plusieurs étapes afin de modifier leurs propriétés et les rendre plus adaptés à une utilisation dans les matériaux composites.

1. Dégraissage alcalin :

Les morceaux d'éponge de Luffa ont été trempés dans une solution de soude à 2% pendant une heure et demie [Figure 2.3-a]. Ce traitement permet de dissoudre les cires et résines naturelles présentes dans les fibres, augmentant ainsi leur surface spécifique et leur accessibilité aux réactifs chimiques.

2. Neutralisation et lavage :

a. **Lavage à l'eau distillée :** Après le trempage dans la solution de soude, les fibres ont été rincées abondamment à l'eau distillée pour éliminer l'excès de soude.

b. **Lavage à l'acide acétique dilué** : Les fibres ont ensuite été lavées avec de l'acide acétique dilué dans de l'eau distillée [Figure 2.3-b]. Ce lavage neutralise l'alcalinité de la solution de soude et élimine les résidus de soude présents sur les fibres.

3. **Rinçage final** : Les fibres ont ensuite été rincées abondamment à l'eau distillée pour éliminer tout résidu d'acide acétique.
4. **Séchage** : Les fibres lavées ont été séchées dans une étuve à 80°C pendant 4 heures [Figure 2.3-c]. Ce séchage permet d'éliminer l'excès d'eau et de préparer les fibres pour le broyage.
5. **Broyage** : Les fibres séchées ont été broyées en très fines particules à l'aide d'un broyeur équipé de 16 lames fonctionnant à 3000 tours/minute. Ce broyage augmente la surface spécifique des fibres et facilite leur dispersion dans les matrices composites.
6. **Tamisage** : Les fibres broyées ont été tamisées à l'aide d'un tamis d'un diamètre inférieur à 1 mm pour éliminer les particules plus grosses et obtenir une poudre de fibres de Luffa fine et homogène [Figure 2.3-d]. Le tamisage permet d'obtenir une poudre de taille homogène, essentielle pour une distribution uniforme des fibres dans les composites.

Remarque : Cette description détaillée des étapes de traitement met en évidence les procédés minutieux mis en œuvre pour modifier la surface et la structure des fibres de Luffa, les rendant ainsi plus adaptées à une utilisation dans les matériaux composites.

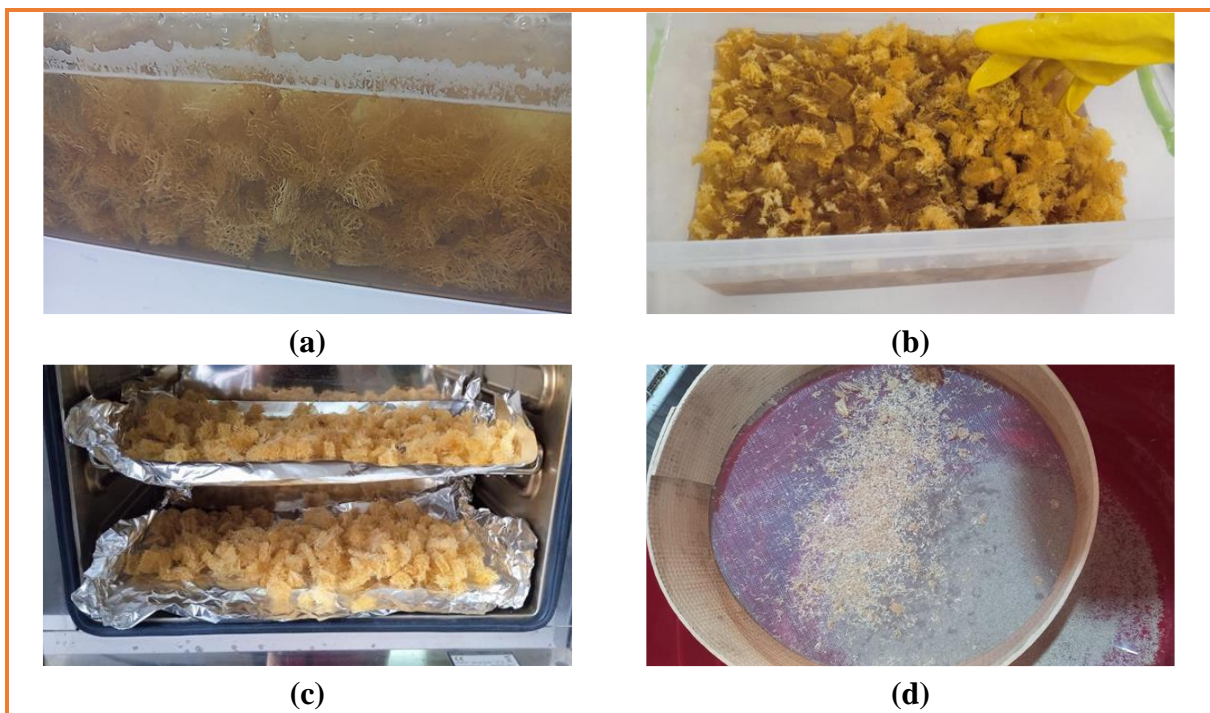


Figure 2.3 : Photographies des étapes de traitement.

1.3.Fabrication des composites

1.3.1. Calculs de formulation

Les composites ont été élaborés dans un moule en silicone [Figure 2.4]. Les différents calculs de formulations des constituants du composite à élaborer sont :

A. Volume de la résine

Le volume de résine nécessaire à la fabrication du composite peut être calculé à l'aide de la formule suivante :

$$V = L \times l \times e \quad \text{Eq.2.1}$$

Où :

- **V** est le volume de résine en millimètres cubes (mm^3)
- **L** est la longueur du moule en millimètres (mm)
- **l** est la largeur du moule en millimètres (mm)
- **e** est l'épaisseur du composite en millimètres (mm)

En substituant les valeurs données dans la formule, on obtient :

$$V = 200 \times 170 \times 5 = 170000 \text{ mm}^3$$

Par conséquent, 170 000 mm^3 de résine sont nécessaires pour fabriquer le composite.

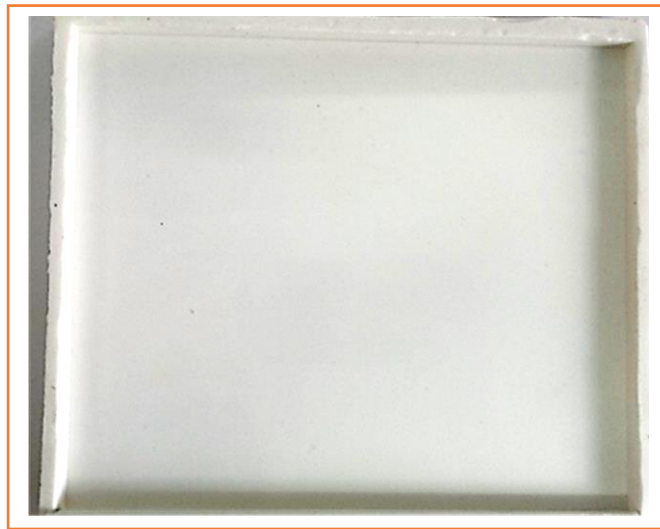


Figure 2.4 : Photographie du moule silicone.

B. Masse de résine

La masse de résine nécessaire à la fabrication du composite peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$m = \rho \times V \quad \text{Eq. 2.2}$$

Où :

- **V** est le volume de résine en millimètres cubes (mm^3)
- **ρ** est la densité de la résine (g/cm^3)

En substituant les valeurs données dans la formule, on obtient :

$$m = 1.12 \times 170000 \times 10^{-3} = 190.4 \text{ g}$$

Préparation de la résine

La résine est un mélange d'époxy et de son durcisseur dans un rapport de 2:1.

Par conséquent, on pèse :

- **63,4 g de durcisseur** (2/3 de la masse de résine)
- **126,9 g d'époxy** (1/3 de la masse de résine)

1.3.2. Elaboration des composites

La fabrication des composites par moulage au contact s'effectue selon les étapes suivantes :

1. Préparation de la résine

- Peser 126,9 g d'époxy et 63,4 g de durcisseur à l'aide d'une balance.
- Mélanger lentement les deux composants pendant 2 minutes dans un récipient en plastique à l'aide d'un mélangeur électronique.

2. Incorporation du renfort

- Ajouter le renfort au mélange de résine et continuer à mélanger pendant 5 minutes supplémentaires.

3. Moulage et dégazage

- Verser le mélange de résine et de renfort dans le moule en silicone.
- Dégazer le mélange en utilisant une technique appropriée (par exemple, vibration, chambre à vide) pour éliminer les bulles d'air.

4. Gélification et durcissement

- Laisser sécher le mélange à l'air libre dans un endroit sec et ventilé pendant le temps recommandé par le fabricant de la résine.
- Placer les plaques dans une étuve à 60°C pendant 3 heures pour finaliser le durcissement.

Le tableau suivant représente la désignation des composites avec le taux pcr correspond aux chaque échantillons est sa quantité massique.

Tableau 2.2 : Désignation des composites élaborés.

| Désignation | Taux de Charge (PCR) | Masse de Renfort (g) |
|-------------|----------------------|----------------------|
| CEL0 | – | – |
| CEL1 | 2,5 | 4,8 |
| CEL2 | 5 | 9,5 |
| CEL3 | 7,5 | 14,3 |
| CEL4 | 10 | 19 |
| CEL5 | 12,5 | 23,8 |
| CEL6 | 15 | 28,6 |

Note : CEL : Composite époxy/ luffa.

La figure 2.5 présente une photographie illustrant les différentes quantités des renforts pour chaque taux de renfort et les composites élaborées.

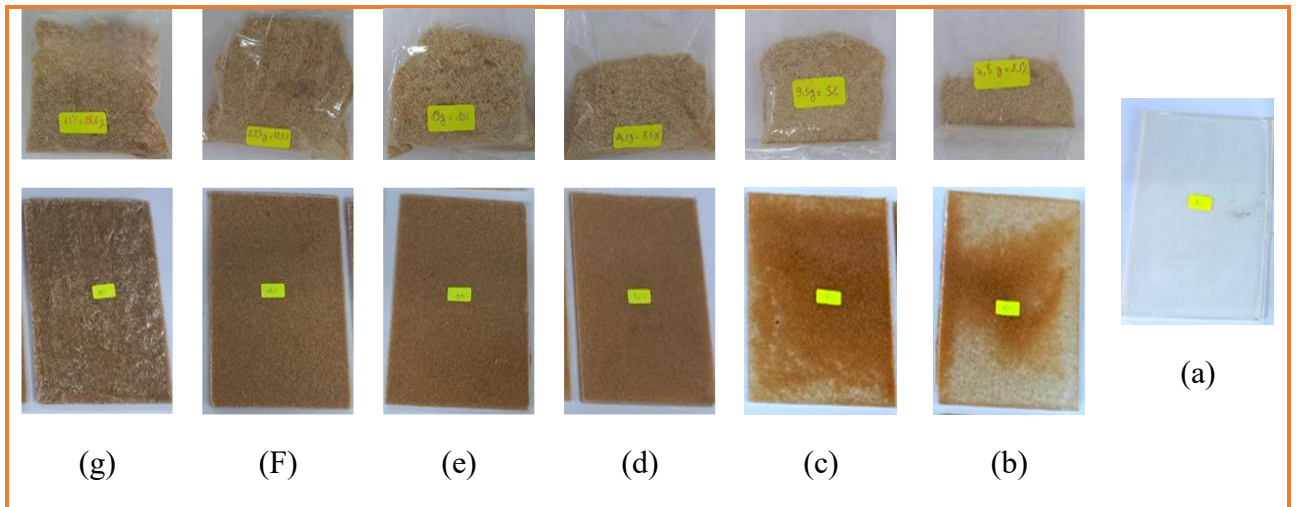


Figure 2.5 : Photographie des quantités des renforts et les composites élaborées.

(a) : CL0, (b) :CL1, (c) : CL2, (d) : CL3, (e) :CL4 , (f) :CL5, (g) : CL6

2. Techniques expérimentales

2.1. Essais mécaniques

2.1.1. Résistance au choc IZOD

Pour cet essai, des éprouvettes ont été découpées selon la norme ASTM D-256 avec une longueur de 6,5 cm et une largeur de 1 cm.

Avant le choc, une entaille en V d'une profondeur de 2,5 mm doit être réalisée sur toutes les éprouvettes, à l'aide d'une machine spéciale représentée sur la **figure 2.6-a**.

Le choc est appliqué au centre de l'éprouvette par un pendule de 1 joule, générant une sollicitation mécanique à grande vitesse. [**Figure 2.6-b**]

L'énergie de rupture ou résilience (a) est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$a = \frac{A_n}{e.L} \quad \text{Eq.2.3}$$

Où :

- **An** : Energie cinétique absorbée par l'éprouvette au moment du choc, affichée sur l'écran en joules.
- **L** : Largeur de l'éprouvette.
- **e** : Epaisseur de l'éprouvette.



Figure 2.6 : (a) photographie de la machine d'entaille ; (b) photographie de l'appareil de l'impact.

2.1.2. Traction

Afin de caractériser les propriétés mécaniques des biocomposites élaborés, notamment le module d'Young, et les contraintes à la rupture, des essais de traction ont été réalisés sur des éprouvettes rectangulaires de dimensions normalisées (10 cm de longueur et 1 cm de largeur). Ces éprouvettes ont été fixées entre les mors supérieur et inférieur d'un tensiomètre à une vitesse de déplacement de 2 mm/min.

Les essais de traction ont été effectués à température ambiante sur une machine pilotée par ordinateur, elle représenté sur la **figure 2.7**.

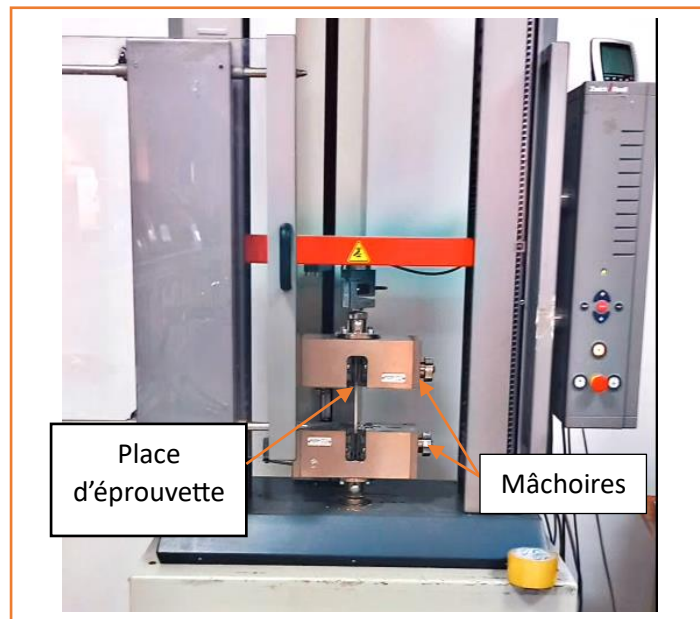


Figure 2.7 : photographie de la machine ZWICK ROELL Z010.

Calcul des propriétés mécaniques

○ Module d'Young (E)

Le module d'Young, ou module de traction, représente la rigidité du matériau en traction. Il est défini comme la pente de la partie linéaire de la courbe contrainte-déformation (généralement la zone élastique). Le module d'Young (E) est calculé à partir de la loi de HOOKE :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Eq.2.4}$$

Où :

- E est le module d'Young (en MPa)
- σ est la contrainte (en MPa)
- ε est la déformation (%)

○ Contrainte à la rupture (σ_r)

La contrainte à la rupture représente la charge maximale par unité de surface que l'éprouvette peut supporter avant de rompre. Elle est calculée à partir de l'équation suivante :

$$\sigma_r = \frac{F_{max}}{S_0} \quad \text{Eq.2.5}$$

Où :

- σ_r est la contrainte à la rupture (en MPa)
- F_{max} est la force maximale appliquée avant rupture (en N)
- S_0 est la section initiale de l'éprouvette (en mm²)

○ Déformation à la rupture (ε_r)

La déformation à la rupture représente l'allongement maximal que l'éprouvette peut subir avant de rompre. Elle est exprimée en pourcentage (%) et calculée à partir de l'équation suivante :

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \quad \text{Eq.2.6}$$

Où :

- ϵ_r est la déformation à la rupture (%)
- ΔL est l'allongement final de l'éprouvette (en mm)
- L_0 est la longueur initiale de l'éprouvette (en mm)

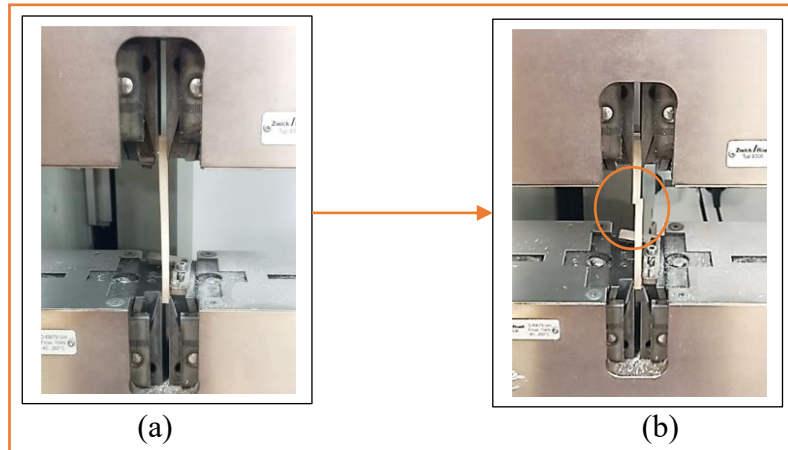


Figure 2.8 : photographie de l'échantillon dans la machine de traction.
(a) : avant, (b) : après

2.1.3. Dureté shore :

Cet essai permet de mesurer la résistance d'un matériau à la pénétration en utilisant le duromètre. La profondeur de pénétration varie en sens inverse de la dureté. Le déplacement du pénétreur est lu sur une échelle de mesure, graduée de 0 à 100, où 0 représente les matériaux les plus souples et 100 les matériaux les plus durs.

Composants du duromètre :

- L'aiguille (Indenter).
- Le ressort (Spring).
- L'échelle de lecteur (Dial or Digital Readout).
- La base de support (Base).

L'appareil de ce test représenté sur la **figure 2.9**.

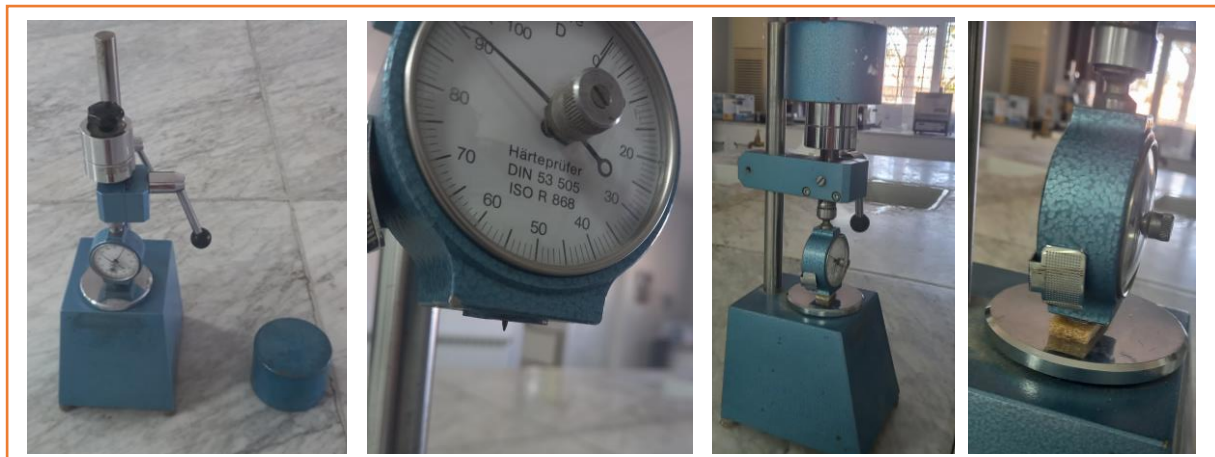


Figure 2.9 : photographies de l'appareil de dureté.

2.2.Essai physique (Densité)

La mesure de la densité (d) des fragments de résine et de composites a été réalisée par pycnométrie, à l'aide d'une balance conforme à la norme ISO 1183-1 (méthode A) et conçue pour les matériaux ayant une densité supérieure à 1 g/cm³. La procédure suivie est décrite ci-dessous :

1. Préparation du pycnomètre : Nettoyer et sécher soigneusement le pycnomètre.
2. Tare de la balance : Tarer la balance pour éliminer la masse du pycnomètre vide.
3. Prélèvement d'un échantillon : Prélever un fragment de résine ou de composite d'une masse comprise entre 1 et 5 grammes.
4. Pesée de l'échantillon dans l'air : Placer l'échantillon sur la coupelle de la balance et enregistrer sa masse (W_a) dans l'air.
5. Tare de la balance et immersion de l'échantillon : Tarer la balance à nouveau, puis immerger complètement l'échantillon dans le liquide d'immersion (eau distillée dans ce cas).
6. Enregistrement de la masse volumique : Relever la masse volumique (W_b) de l'échantillon immergé dans le liquide.

La densité (d) du matériau est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$d = \frac{W_a \times \rho_l}{W_a - W_b} + 0.0012 \quad \text{Eq.2.7}$$

Où :

- **d** est la densité du matériau (en g/cm³)
- **W_a** est la masse de l'échantillon dans l'air (en g)
- **W_b** est la masse de l'échantillon immergé dans le liquide (en g)
- **ρ_l** est la masse volumique du liquide d'immersion (en g/cm³) (1 g/cm³ pour l'eau distillée)

Remarques :

- La valeur 0,0012 g/cm³ correspond à la masse volumique de l'air dans des conditions normales de température et de pression.
- Il est important de s'assurer que l'échantillon est complètement immergé dans le liquide d'immersion pour obtenir des résultats précis.
- Il est également important de répéter la mesure plusieurs fois pour obtenir une moyenne plus fiable.



Figure 2.10 : Photographie de la balance de densité.

2.3. Essais chimiques (Evaluation de durabilité des composites)

Cet essai vise à évaluer l'adsorption des liquides par des composites et leur sensibilité à la dégradation chimique. Quatre échantillons de chaque pourcentage de renfort sont immergés dans quatre solutions différentes (eau du robinet, solution acide, solution basique, eau de Javel) pendant des durées variables (7, 14, 21, 28, 35 et 42 jours). Le gain de poids des échantillons est mesuré à chaque période d'immersion et utilisé pour calculer le pourcentage de gain de poids. Les résultats permettent d'identifier les solutions et les durées d'immersion qui affectent le plus l'adsorption et la dégradation des composites.

Matériels utilisés :

- Composites avec différents pourcentages de renfort.
- Quatre solutions : eau du robinet, solution acide, solution basique, eau de Javel.
- Bêchers.
- Balance.
- pH-mètre.
- Microscope.

Méthodologie :

1. Préparation des échantillons :

- Prélever quatre échantillons identiques pour chaque pourcentage de matériau.
- Noter la masse initiale (m_i) de chaque échantillon.

2. Immersion des échantillons :

- Plonger les échantillons dans des béchers séparés contenant les solutions suivantes :
 - Eau du robinet
 - Eau de Javel
 - Solution basique

- Solution acide
 - Noter le pH de chaque solution.
- 3. **Vieillessement :**
 - Laisser les échantillons immergés dans les solutions pendant des durées spécifiques : 7, 14, 21, 28, 35 et 42 jours.
- 4. **Pesée des échantillons :**
 - Après chaque période de vieillissement, retirer les échantillons de leurs solutions respectives et les sécher soigneusement.
 - Noter la masse finale (m_t) de chaque échantillon.
- 5. **Observation à l'œil nu et par Microscope :**
 - Après 42 jours, mettre les échantillons de vieillissement sous le microscope.
 - Prendre une photographie des échantillons placés dans différentes solutions et une autre photographie des échantillons témoins.

Calcul du gain de poids :

Le pourcentage de gain de poids des échantillons (G) est calculé pour chaque durée de vieillissement (t) en utilisant la formule suivante :

$$G = \frac{m_t - m_i}{m_i} \times 100 \quad \text{Eq.2.9}$$

Où :

- m_i : Masse initiale de l'échantillon.
- m_t : Masse de l'échantillon après immersion pendant la durée t .

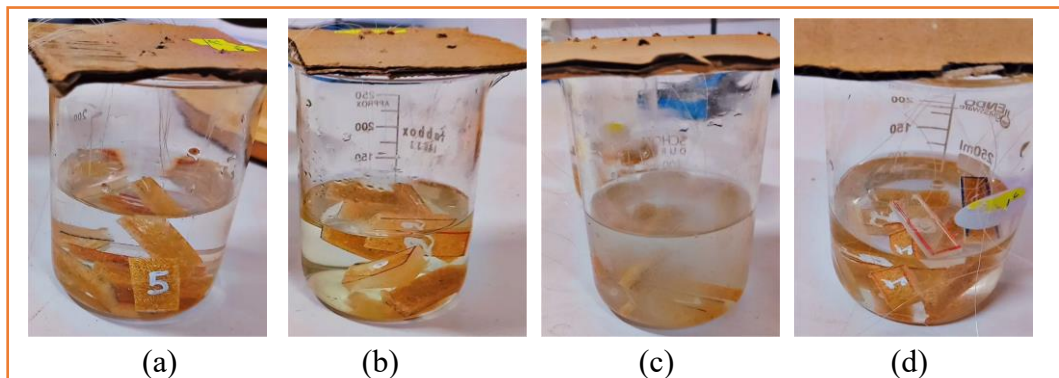


Figure 2.11 : photographies des échantillons dans différentes solutions.

- (a) Eau de robinet (pH=8.09) ; (b) Eau de javel BREF (pH=12.79) ; (c) Solution basique NaOH (pH=13.92) ; (d) Solution acide H_2SO_4 (pH= 0.16)

Conclusion

Ce chapitre a été dédié à la présentation détaillée des méthodes de caractérisation physico-chimique et mécanique des fibres élémentaires. Les différents appareils et protocoles d'essais utilisés pour analyser les propriétés des fibres ont été décrits de manière approfondie.

La deuxième partie de ce travail s'est concentrée sur la fabrication des plaques composites et la préparation des éprouvettes destinées aux différents essais statiques et dynamiques. L'ensemble des dispositifs expérimentaux mis en œuvre pour réaliser ces essais a été présenté en détail.

Chapitre 03

Résultats et discussions

Ce chapitre présente les résultats des techniques expérimentales mises en œuvre et l'interprétation.

1. Essais mécaniques

Les propriétés mécaniques (traction, choc et dureté Shore) des composites RE/Fibres de Luffa ont été déterminées en fonction du taux.

1.1. Résilience des bio-composites RE/fibres de Luffa au choc IZOD

Les variations de cette résistance en fonction du taux de fibre sont illustrées **la figure 3.1**.

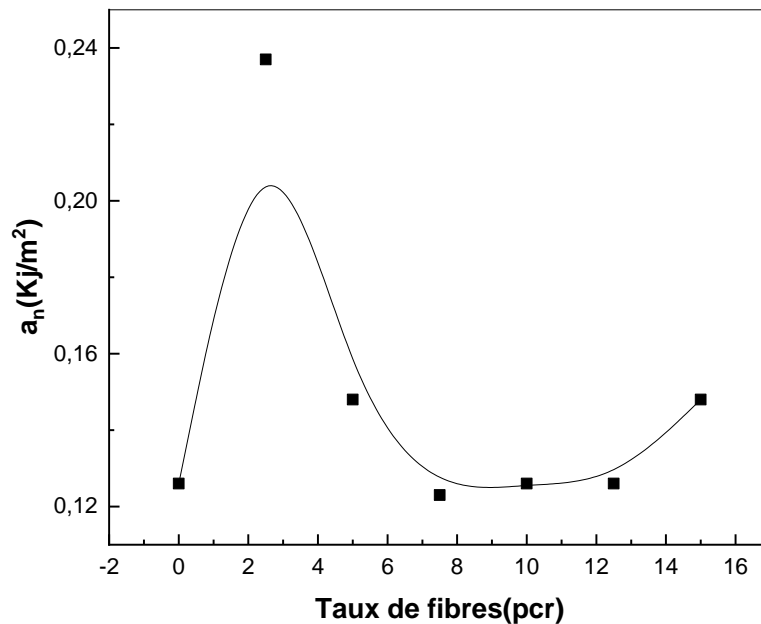


Figure 3.1 : Variations de la résilience des bio-composites résine époxy RE/ fibres de Luffa en fonction du taux de fibre.

La courbe présente une forme en S caractéristique, indiquant une augmentation progressive de la résilience des biocomposites jusqu'à un taux de fibre de 2,5 pcr, suivie d'une saturation. En effet, le traitement de surface améliore l'adhésion entre le renfort et la matrice, favorisant le contact à l'interface entre les deux composants du matériau, ce qui se traduit par une augmentation de la résilience jusqu'à un certain point. Cependant, au-delà de 2,5 pcr, la tendance s'inverse en raison de la prédominance de phénomènes à l'interface, tels que la formation d'agrégats et un manque d'adhésion, dus à la forte concentration de fibres naturelles et à la faible capacité de la résine à se diffuser au sein des fibres.

1.2. Propriétés en traction

Les variations des propriétés en traction, en particulier le module de Young des biocomposites résine époxy (RE) renforcés de fibres de Luffa en fonction du taux de fibres, sont illustrées par **la figure 3.2**.

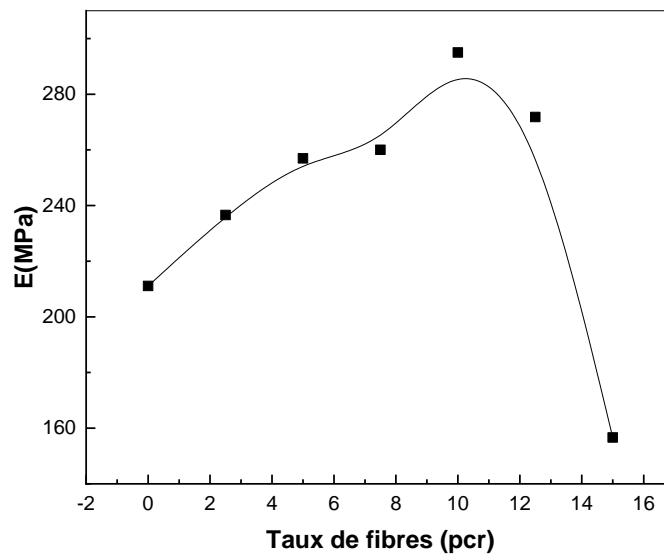


Figure 3.2 : Variations du module de Young des bio-composites résine époxy (RE)/ Luffa en fonction du taux de fibre.

Comme le montre la **figure 3.2**, qui présente les variations du module de Young en fonction du taux de fibres, on observe une augmentation de ce module par rapport à la matrice pure jusqu'à un taux de fibres de 10 pcr, suivie d'une diminution pour les biocomposites RE/fibres de Luffa.

Cette augmentation initiale est attribuée au traitement de surface des fibres par le NaOH, qui améliore l'adhésion entre les fibres et la matrice. Cependant, lorsque le taux de fibres augmente, la formation d'agrégats devient plus probable, ce qui nuit à la continuité de la matrice et crée des points faibles favorisant une rupture fragile. L'augmentation de la résistance à la traction est néanmoins attribuée à la rigidification du matériau due à l'incorporation des fibres. D'après la littérature, la mauvaise qualité d'adhésion entre les fibres naturelles et la matrice époxy pourrait être due à la différence de leurs comportements hydrophiles, les fibres étant hydrophiles et la matrice hydrophobe.

1.3.Dureté Shore des bio-composites RE/fibres de Luffa

La **figure 3.3** présente les variations de la dureté Shore en fonction du taux de fibres.

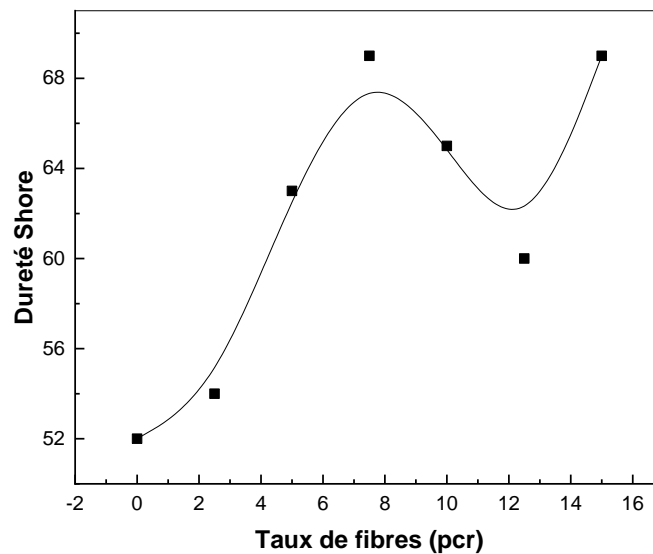


Figure 3.3 : Variations de la dureté Shore des bio-composites résine époxy RE/ fibres de Luffa en fonction du taux de fibre.

Une augmentation significative de la dureté est observée pour les biocomposites RE/fibres de Luffa renforcés avec le taux de fibres de 7,5 pcr, après on noter une diminution de la dureté.

Cette augmentation de la dureté peut être attribuée à l'élimination des vides et des groupes hydroxyles de la surface des fibres de Luffa lors du traitement de surface au NaOH. Cette modification chimique induit un changement structurel à la surface du luffa, la rendant plus rugueuse et augmentant par conséquent la dureté du composite.

2. Essais physiques

Les propriétés physique (densité) des composites ER/Luffa ont été déterminées en fonction de taux de la charge.

Les variations de la densité des bio-composites RE/fibres de Luffa en fonction du taux de fibre sont reportées dans **la figure 3.4.**

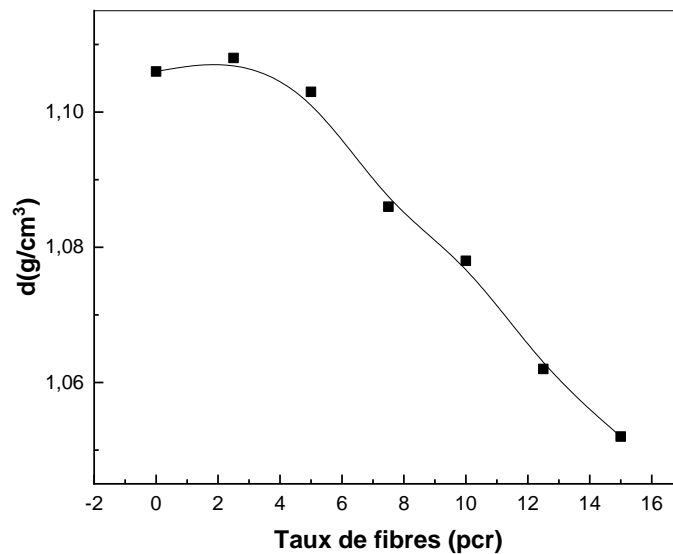


Figure 3.4 : Variations de la densité des bio-composites résine époxy RE/ fibres de Luffa en fonction du taux de fibre.

La faible densité de la fibre de Luffa a induit de variations sur la densité de la résine. Ainsi, en augmentant le taux de fibres de 2.5, 5, 7.5 ,10,12.5 et 15 pcr, les densités des bio-composites renforcée avec des fibres de Luffa traité ont été de 1.108 ;1.1029 ; 1.0868 ;1.0785 ; 1.0624 et 1,0526, respectivement. Ceci constitue un avantage en faveur du bio-composite RE/fibres de Luffa, étant donné que la légèreté est aussi un atout très recherché après la promotion des performances d'un matériau.

3. Essais chimiques (Evaluation de la durabilité)

Cette étude vise à évaluer la durabilité des composites à base de matrice époxyde renforcée par la fibre de luffa dans différents environnements agressifs. Des échantillons de composites ont été immergés dans des solutions d'acide sulfurique (H_2SO_4), d'eau du robinet, d'hydroxyde de sodium (NaOH) et d'eau de Javel pendant une période de 42 jours. La variation de masse et l'état de surface des composites ont été analysés pour évaluer leur résistance à la dégradation dans ces environnements. Les résultats obtenus permettront de mieux comprendre le comportement de ces composites et de fournir des informations précieuses pour leur utilisation dans des applications exigeantes.

Les résultats du suivi de la durabilité des composites élaborés à différents taux de luffa (0-15%), dans les différents milieux pendant 42 jours sont illustrés sur **la figure 3.5**.

- H₂SO₄

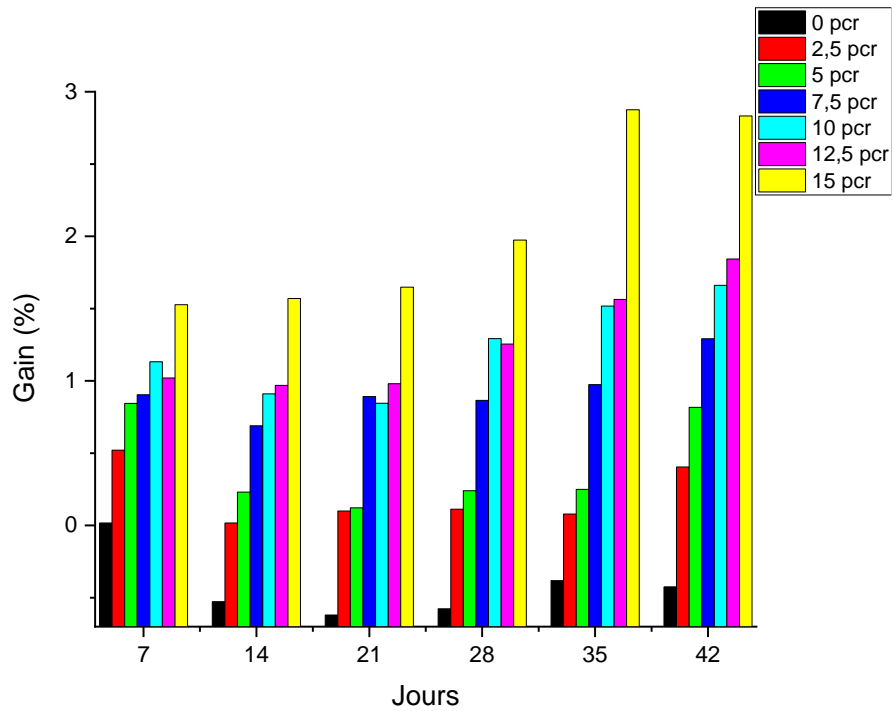


Figure 3.5 : Le gain de masse des matériaux composites en fonction du taux de renfort en luffa après 42 jours d'immersion dans la solution d'acide sulfurique (H₂SO₄).

- Eau de robinet

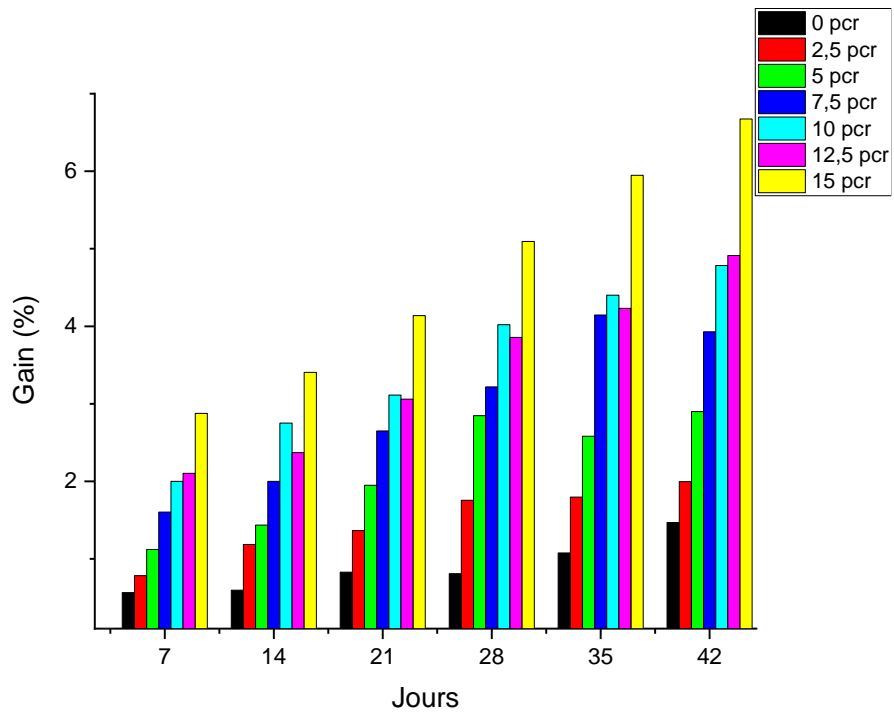


Figure 3.6 : Le gain de masse des matériaux composites en fonction du taux de renfort en luffa après 42 jours d'immersion dans l'eau de robinet.

- NaOH

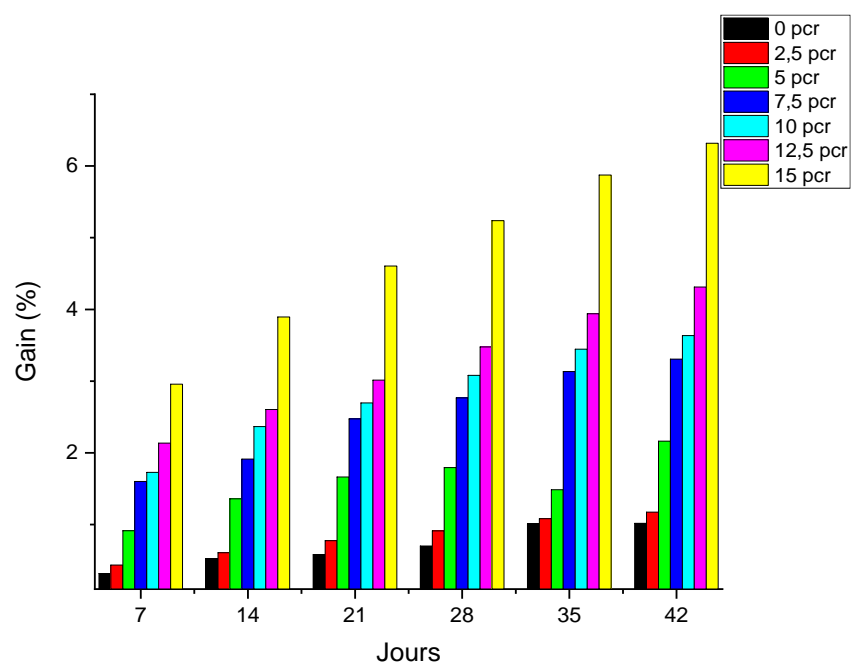


Figure 3.7 : Le gain de masse des matériaux composites en fonction du taux de renfort en luffa après 42 jours d'immersion dans la solution de la soude (NaOH).

- Eau de javel

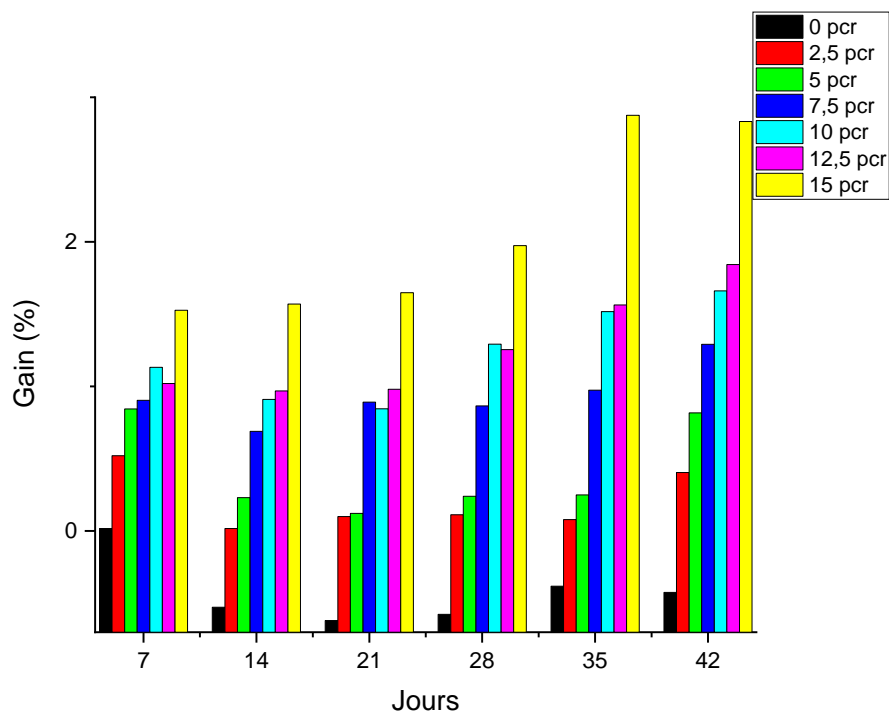


Figure 3.8 : Le gain de masse des matériaux composites en fonction du taux de renfort en luffa après 42 jours d'immersion dans l'eau de Javel.

Chapitre 3 : Résultats et discussion

L'analyse des résultats enregistrés fait ressortir les informations suivantes :

- **Effet du taux de renfort en luffa :**

Le gain de masse des matériaux composites augmente généralement avec le taux de renfort en luffa. Cela suggère que les fibres de luffa sont plus sensibles à la dégradation dans les environnements agressifs que la matrice époxy. Plus la teneur en luffa est élevée, plus la surface exposée aux solutions corrosives est grande, ce qui entraîne une absorption de masse plus importante.

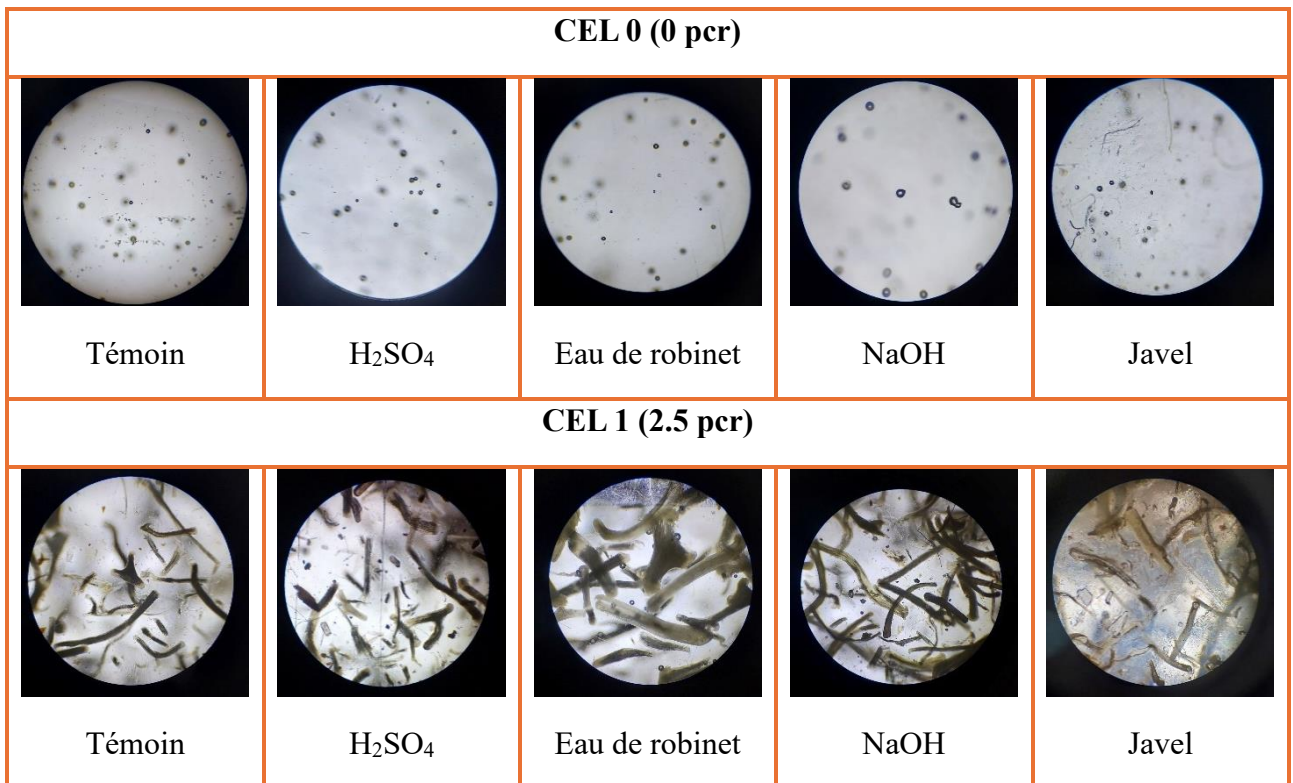
- **Influence du milieu d'immersion :**

Le gain de masse des composites varie considérablement en fonction du milieu d'immersion. Le gain de masse le plus élevé est observé dans l'acide sulfurique (H_2SO_4), suivi par la soude caustique (NaOH), l'eau du robinet et l'eau de Javel. Cette tendance reflète les degrés variables d'agressivité des solutions. L'acide sulfurique, étant un acide fort, provoque la dégradation la plus sévère des fibres de luffa, ce qui entraîne l'absorption de masse la plus élevée. La soude caustique, une base forte, induit également une dégradation importante, tandis que l'eau du robinet et l'eau de Javel ont un effet moins prononcé.

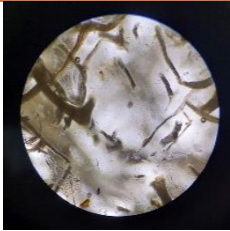
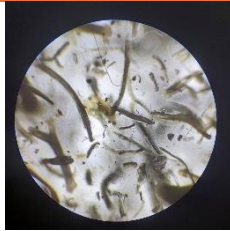

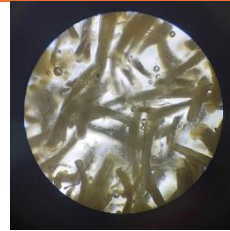






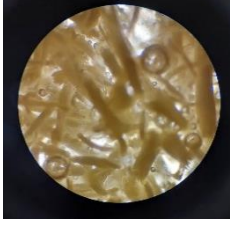

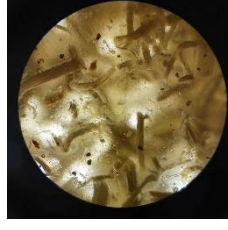

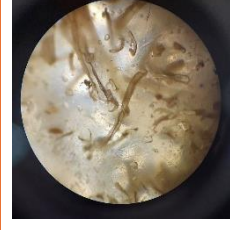




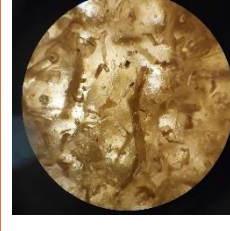
- **Réponses spécifiques aux matériaux :**

L'interaction entre les fibres de luffa et la matrice peut influencer la réponse du matériau à différents environnements.

En outre, pour pouvoir récolter des informations complémentaires sur la dégradation (fissures, de pores ou d'autres défauts de la surface) de ces composites, une analyse de la surface des différents composites après immersion pendant 42 jours dans les différents milieux a été observée par le microscope, les images enregistrées sont schématisées sur la **figure 3.6**.



Chapitre 3 : Résultats et discussion

| CEL 2 (5 pcr) | | | | |
|---|---|---|--|---|
|  |  |  |  |  |
| Témoins | H ₂ SO ₄ | Eau de robinet | NaOH | Javel |
| CEL 3 (7.5 pcr) | | | | |
|  |  |  |  |  |
| Témoins | H ₂ SO ₄ | Eau de robinet | NaOH | Javel |
| CEL 4 (10 pcr) | | | | |
|  |  |  |  |  |
| Témoins | H ₂ SO ₄ | Eau de robinet | NaOH | Javel |
| CEL 5 (12.5 pcr) | | | | |
|  |  |  |  |  |
| Témoins | H ₂ SO ₄ | Eau de robinet | NaOH | Javel |

Chapitre 3 : Résultats et discussion

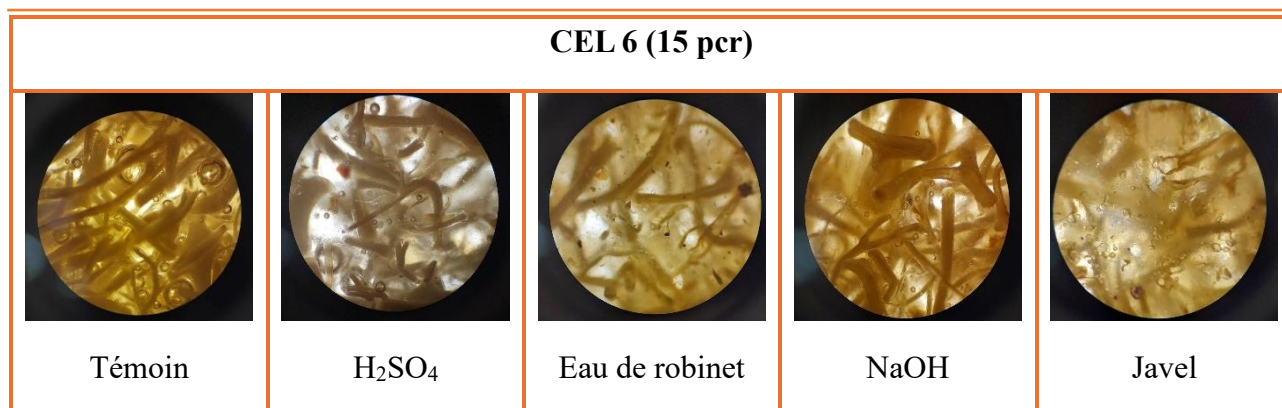


Figure 3.9: Photographie microscopique des composites après 42 jours.

Les résultats du tableau indiquent que la durabilité des composites à matrice époxy renforcés par des fibres de luffa est significativement affectée par le taux de renfort en luffa et le milieu d'immersion. Les degrés variables de dégradation observés dans différentes solutions soulignent l'importance de considérer l'environnement d'application spécifique lors de la sélection de ces composites.

Tableau 3.1 : Détail des observations enregistrés.

| Composite | H ₂ SO ₄ | Eau du robinet | NaOH | Javel |
|-------------------------|---|--|---|---|
| CEL 0 (0 pcr) | Légères fissures et pores | Surface relativement intacte | Gonflement des fibres de luffa, fissures et pores occasionnels | Légère érosion, quelques pores dispersés |
| CEL 1 (2.5 pcr) | Fissures plus évidentes, érosion des fibres | Microfissures, gonflement des fibres de luffa | Gonflement et fissures plus prononcés | Érosion et porosité plus importantes |
| CEL 2 (5 pcr) | Fissures et érosion étendues des fibres | Fissures plus fréquentes, gonflement des fibres de luffa plus prononcé | Gonflement, fissures et érosion plus sévères | Érosion substantielle, porosité, dommages aux fibres |
| CEL 3 (7.5 pcr) | Surface fortement fissurée et érodée, dommages importants aux fibres | Fissures et gonflement des fibres de luffa étendus | Gonflement, fissures et érosion sévères | Surface fortement érodée, nombreux pores, dommages aux fibres |
| CEL 4 (10 pcr) | Surface fortement fissurée, érodée et délamérée, dommages importants aux fibres | Fissures et gonflement des fibres de luffa à leur maximum | Gonflement, fissures et érosion extrêmes | Surface fortement érodée, nombreux pores, délaminations, dommages aux fibres |
| CEL 5 (12.5 pcr) | Surface fortement fissurée, érodée et délamérée, dommages importants aux fibres | Fissures et gonflement des fibres de luffa très sévères | Gonflement, fissures et érosion extrêmes | Surface fortement érodée, nombreux pores, délaminations, dommages aux fibres |
| CEL 6 (15 pcr) | Surface légèrement moins fissurée et érodée que CEL 4 et CEL 5 | Fissures et gonflement des fibres de luffa très sévères | Gonflement, fissures et érosion extrêmes, mais légèrement moins importants que CEL 4 et CEL 5 | Surface légèrement moins érodée que CEL 4 et CEL 5, mais avec de nombreux pores, délaminations et dommages aux fibres |

Chapitre 3 : Résultats et discussion

L'analyse des images enregistrés fait ressortir les observations suivantes :

- Les micrographies révèlent des degrés variables de dégradation de la surface des différents composites et milieux d'immersion.
- L'ampleur de la dégradation semble être influencée à la fois par le taux de renfort en luffa et le milieu d'immersion.
- Des taux de renfort en luffa plus élevés conduisent généralement à des défauts de surface plus prononcés.
- Les environnements agressifs, en particulier l'acide sulfurique (H_2SO_4) et la soude caustique (NaOH), provoquent des dommages de surface plus sévères que l'eau du robinet et l'eau de Javel.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé les résultats obtenus des tests mécaniques et physiques, qui étaient les suivants :

Dans ce chapitre, nous avons analysé les résultats des tests mécaniques et physiques des composites à base de résine époxy et de fibres de luffa. L'ajout de fibres de luffa améliore la résilience, la rigidité et la dureté des composites. La densité diminue avec l'augmentation du taux de fibres, rendant les composites plus légers. Cependant, des taux de renfort élevés peuvent entraîner des défauts de surface, surtout dans des environnements agressifs. En résumé, les composites montrent des propriétés mécaniques et physiques prometteuses pour des applications structurelles.

***Conclusion
générale***

Conclusion générale

Ce travail a exploré le potentiel prometteur des composites à base de résine époxy et de fibres de luffa comme matériaux innovants pour des applications structurelles. L'alliance de la résine époxy, reconnue pour sa tenue mécanique exceptionnelle et sa résistance à long terme, avec les fibres de luffa, issues d'une ressource naturelle abondante et éco-responsable, ouvre la voie à une nouvelle génération de matériaux aux propriétés remarquables.

L'étude a permis de dégager les conclusions majeures suivantes :

1. Maîtrise approfondie des concepts fondamentaux :

Une revue bibliographique exhaustive a permis de cerner les concepts clés liés aux composites, à la résine époxy et à la fibre de luffa, établissant une base solide pour l'investigation.

2. Expertise des outils et techniques d'analyse :

Les normes pertinentes, la procédure expérimentale détaillée et le matériel utilisé ont été maîtrisés, permettant une identification précise des matériaux constitutifs, une élaboration rigoureuse des composites et une caractérisation approfondie de leurs propriétés.

3. Propriétés remarquables des composites à base de résine époxy et de fibres de luffa :

3.1 Performances mécaniques optimisées :

- **Résilience :** L'ajout de 2,5 % en poids de fibres de luffa maximise l'énergie de rupture à 0,273 kJ/m², conférant au composite une capacité accrue à absorber les chocs.
- **Traction :** Le module de Young, indicateur de la rigidité, atteint un maximum de 295 MPa pour 10 % en poids de fibres de luffa, démontrant une excellente rigidité. Au-delà, un compromis optimal entre rigidité et ductilité est observé.
- **Dureté :** La dureté Shore D suit une tendance similaire au module de Young, atteignant un maximum de 69 pour 7,5 % en poids de fibres de luffa. Cette valeur se stabilise pour des teneurs plus élevées, indiquant une saturation de l'effet de renforcement.

3.2 Propriétés physiques avantageuses :

3.2.1. Densité : La densité diminue avec le taux de renfort en fibres de luffa, conférant aux composites une légèreté appréciable pour des applications structurelles.

3.2.2. Durabilité : L'analyse des images microscopiques révèle des degrés variables de dégradation de la surface des composites en fonction du taux de renfort et du milieu d'immersion. Des environnements agressifs comme l'acide sulfurique et la soude caustique provoquent des dommages plus importants que l'eau du robinet et l'eau de Javel. Des taux de renfort en luffa plus élevés semblent conduire à des défauts de surface plus prononcés.

Annexes

Annexes

Annexe 1 : Données de la résilience des composites RE/Luffa.

| Taux | L'énergie absorbée (Joule) | a (KJ/m ²) |
|-----------------|----------------------------|------------------------|
| 0 pcr | 0.041 | 0.126 |
| 2.5 pcr | 0.077 | 0.237 |
| 5 pcr | 0.048 | 0.148 |
| 7.5 pcr | 0.040 | 0.123 |
| 10 pcr | 0.041 | 0.126 |
| 12.5 pcr | 0.041 | 0.126 |
| 15 pcr | 0.048 | 0.148 |

Annexe 2 : Données de test de traction.

| Taux | σ (MPa) | ε (%) | E (MPa) |
|----------------|----------------|-------------------|---------|
| 0 pcr | 38 | 18 | 211.1 |
| 2.5 pcr | 28.4 | 12 | 236.6 |
| 5 pcr | 20.3 | 7.9 | 256.96 |
| 7.5 pcr | 28.6 | 11 | 260 |
| 10 pcr | 35.4 | 12 | 295 |
| 12 pcr | 29.9 | 11 | 271.81 |
| 15 pcr | 18.8 | 12 | 156.66 |

Annexe 3 : les données de test de densité.

| Taux | La moyenne : d (g/cm ³) |
|-----------------|-------------------------------------|
| 0 pcr | 1.1064 |
| 2.5 pcr | 1.1080 |
| 5 pcr | 1.1029 |
| 7.5 pcr | 1.0868 |
| 10 pcr | 1.0785 |
| 12.5 pcr | 1.0624 |
| 15 pcr | 1.0526 |

Annexes

Annexe 4 : Données de test de dureté.

| Taux | Dureté |
|-----------------|--------|
| 0 pcr | 52 |
| 2.5 pcr | 54 |
| 5 pcr | 63 |
| 7.5 pcr | 69 |
| 10 pcr | 65 |
| 12.5 pcr | 60 |
| 15 pcr | 69 |

Annexe 5 : Données de durabilité du composite pour 0 pcr.

| | Acide fort(H ₂ SO ₄) PH=0.16 | | | Eau de robinet PH=8.09 | | | Base fort (NaOH) PH=13.92 | | | Eau de J'avale PH=12.79 | | |
|-------------------|--|----------------|--------------|---------------------------|----------------|--------------|------------------------------|----------------|--------------|----------------------------|----------------|---------------|
| | m _i | m _t | G (%) | m _i | m _t | G (%) | m _i | m _t | G (%) | m _i | m _t | G (%) |
| 1 ^{er} J | 1.9977 | 1.9977 | 0 | 2.0151 | 2.0151 | 0 | 1,8122 | 1,8122 | 0 | 1,8557 | 1,8557 | 0 |
| 7 | 1.9977 | 2.0625 | 3.243 | 2.0151 | 2.0265 | 0.565 | 1,8122 | 1,8179 | 0,314 | 1,8557 | 1,8559 | 0,017 |
| 14 | 1.9977 | 2.0834 | 4.289 | 2.0151 | 2.0271 | 0.595 | 1,8122 | 1,8217 | 0,524 | 1,8557 | 1,8479 | -0.527 |
| 21 | 1.9977 | 2.1053 | 5.386 | 2.0151 | 2.0318 | 0.828 | 1,8122 | 1,8227 | 0,579 | 1,8557 | 1,8462 | -0.619 |
| 28 | 1.9977 | 2.1231 | 6.277 | 2.0151 | 2.0314 | 0.808 | 1,8122 | 1,8249 | 0,700 | 1,8557 | 1,8450 | -0.576 |
| 35 | 1.9977 | 2,1443 | 7,33 | 2.0151 | 2,0368 | 1,076 | 1,8122 | 1,8305 | 1,009 | 1,8557 | 1,8486 | -0.382 |
| 42 | 1.9977 | 2.1609 | 8.169 | 2.0151 | 2.0447 | 1.468 | 1,8122 | 1.8306 | 1.015 | 1,8557 | 1.8478 | -0.425 |

Annexe 6 : Données de durabilité du composite pour 2,5 pcr.

| | Acide fort(H ₂ SO ₄) PH=0.16 | | | Eau de robinet PH=8.09 | | | Base fort (NaOH) PH=13.92 | | | Eau de J'avale PH=12.79 | | |
|-------------------|--|----------------|--------------|---------------------------|----------------|---------------|------------------------------|----------------|----------------|----------------------------|----------------|----------------|
| | m _i | m _t | G | m _i | m _t | G | m _i | m _t | G | m _i | m _t | G |
| 1 ^{er} J | 1,9450 | 1,9450 | 0 | 2,2093 | 2,2093 | 0 | 2,2595 | 2,2595 | 0 | 2,3958 | 2,3985 | 0 |
| 7 | 1,9450 | 1,9875 | 2,185 | 2,2093 | 2,2266 | 0,783 | 2,2595 | 2,2693 | 0,433 | 2,3958 | 2,4083 | 0,521 |
| 14 | 1,9450 | 1,9995 | 2,802 | 2,2093 | 2,2355 | 1,185 | 2,2595 | 2,2732 | 0,606 | 2,3958 | 2,3962 | 0.01669 |
| 21 | 1,9450 | 2,0165 | 3,676 | 2,2093 | 2,2395 | 1,366 | 2,2595 | 2,2770 | 0,774 | 2,3958 | 2,3982 | 0.10017 |
| 28 | 1,9450 | 2,0307 | 4,406 | 2,2093 | 2,2481 | 1,756 | 2,2595 | 2,2801 | 0,911 | 2,3958 | 2,3985 | 0.11269 |
| 35 | 1,9450 | 2,0469 | 5.239 | 2,2093 | 2,2491 | 1.7969 | 2,2595 | 2,2839 | 1.07988 | 2,3958 | 2,3977 | 0.0793 |
| 42 | 1,9450 | 2.0613 | 5.979 | 2,2093 | 2.2534 | 1.996 | 2,2595 | 2.2860 | 1.1728 | 2,3958 | 2.4055 | 0.40487 |

Annexes

Annexe 7 : Données de durabilité du composite pour 5 pcr.

| | Acide fort(H ₂ SO ₄) PH=0.16 | | | Eau de robinet PH=8.09 | | | Base fort (NaOH) PH=13.92 | | | Eau de J'avale PH=12.79 | | |
|-------------------|--|----------------|--------------|---------------------------|----------------|--------------|------------------------------|----------------|--------------|----------------------------|----------------|---------------|
| | m _i | m _t | G (%) | m _i | m _t | G (%) | m _i | m _t | G (%) | m _i | m _t | G (%) |
| 1 ^{er} J | 2,5811 | 2,5811 | 0 | 2,1036 | 2,1036 | 0 | 2,5197 | 2,5197 | 0 | 2,1185 | 2,1185 | 0 |
| 7 | 2,5811 | 2,6661 | 3,293 | 2,1036 | 2,1272 | 1,121 | 2,5197 | 2,5427 | 0,912 | 2,1185 | 2,1364 | 0,844 |
| 14 | 2,5811 | 2,6974 | 4,505 | 2,1036 | 2,1338 | 1,435 | 2,5197 | 2,5539 | 1,357 | 2,1185 | 2,1234 | 0,231 |
| 21 | 2,5811 | 2,7325 | 5,865 | 2,1036 | 2,1446 | 1,949 | 2,5197 | 2,5616 | 1,662 | 2,1185 | 2,1211 | 0,122 |
| 28 | 2,5811 | 2,7625 | 7,028 | 2,1036 | 2,1635 | 2,847 | 2,5197 | 2,5649 | 1,793 | 2,1185 | 2,1236 | 0,240 |
| 35 | 2,5811 | 2,7958 | 8,318 | 2,1036 | 2,1579 | 2,581 | 2,5197 | 2,5571 | 1,484 | 2,1185 | 2,1238 | 0,250 |
| 42 | 2,5811 | 2,8204 | 9,271 | 2,1036 | 2,1646 | 2,899 | 2,5197 | 2,5742 | 2,162 | 2,1185 | 2,1358 | 0,8166 |

Annexe 8 : Données de durabilité du composite pour 7,5 pcr.

| | Acide fort(H ₂ SO ₄) PH=0.16 | | | Eau de robinet PH=8.09 | | | Base fort (NaOH) PH=13.92 | | | Eau de J'avale PH=12.79 | | |
|-------------------|--|----------------|---------------|---------------------------|----------------|--------------|------------------------------|----------------|--------------|----------------------------|----------------|---------------|
| | m _i | m _t | G (%) | m _i | m _t | G (%) | m _i | m _t | G (%) | m _i | m _t | G (%) |
| 1 ^{er} J | 2,1427 | 2,1427 | 0 | 2,1251 | 2,1251 | 0 | 2,4256 | 2,4256 | 0 | 2,2774 | 2,2774 | 0 |
| 7 | 2,1427 | 2,2316 | 4,148 | 2,1251 | 2,1592 | 1,604 | 2,4256 | 2,4644 | 1,599 | 2,2774 | 2,2980 | 0,904 |
| 14 | 2,1427 | 2,2642 | 5,670 | 2,1251 | 2,1676 | 1,999 | 2,4256 | 2,4720 | 1,912 | 2,2774 | 2,2931 | 0,689 |
| 21 | 2,1427 | 2,2979 | 7,243 | 2,1251 | 2,1814 | 2,649 | 2,4256 | 2,4856 | 2,473 | 2,2774 | 2,2977 | 0,891 |
| 28 | 2,1427 | 2,3331 | 8,885 | 2,1251 | 2,1935 | 3,218 | 2,4256 | 2,4927 | 2,766 | 2,2774 | 2,2971 | 0,865 |
| 35 | 2,1427 | 2,3642 | 10,33 | 2,1251 | 2,2132 | 4,145 | 2,4256 | 2,5016 | 3,133 | 2,2774 | 2,2996 | 0,974 |
| 42 | 2,1427 | 2,3928 | 11,672 | 2,1251 | 2,2086 | 3,929 | 2,4256 | 2,5058 | 3,306 | 2,2774 | 2,3068 | 1,2909 |

Annexe 9 : Données de durabilité du composite pour 10 pcr.

| | Acide fort(H ₂ SO ₄) PH=0.16 | | | Eau de robinet PH=8.09 | | | Base fort (NaOH) PH=13.92 | | | Eau de J'avale PH=12.79 | | |
|-------------------|--|----------------|---------------|---------------------------|----------------|--------------|------------------------------|----------------|--------------|----------------------------|----------------|--------------|
| | m _i | m _t | G (%) | m _i | m _t | G (%) | m _i | m _t | G (%) | m _i | m _t | G (%) |
| 1 ^{er} J | 2,1417 | 2,1417 | 0 | 2,4098 | 2,4098 | 0 | 2,1824 | 2,1824 | 0 | 2,3052 | 2,3052 | 0 |
| 7 | 2,1417 | 2,2420 | 4,683 | 2,4098 | 2,4580 | 2,000 | 2,1824 | 2,2201 | 1,727 | 2,3052 | 2,3313 | 1,132 |
| 14 | 2,1417 | 2,2750 | 6,224 | 2,4098 | 2,4761 | 2,751 | 2,1824 | 2,2340 | 2,364 | 2,3052 | 2,3262 | 0,910 |
| 21 | 2,1417 | 2,3134 | 8,059 | 2,4098 | 2,4848 | 3,112 | 2,1824 | 2,2412 | 2,694 | 2,3052 | 2,3247 | 0,845 |
| 28 | 2,1417 | 2,3525 | 9,842 | 2,4098 | 2,5067 | 4,021 | 2,1824 | 2,2496 | 3,079 | 2,3052 | 2,3350 | 1,292 |
| 35 | 2,1417 | 2,3891 | 11,551 | 2,4098 | 2,5159 | 4,402 | 2,1824 | 2,2576 | 3,445 | 2,3052 | 2,3402 | 1,518 |
| 42 | 2,1417 | 2,4200 | 12,994 | 2,4098 | 2,5251 | 4,784 | 2,1824 | 2,2617 | 3,633 | 2,3052 | 2,3435 | 1,661 |

Annexes

Annexe 10 : Données de durabilité du composite pour 12,5 pcr.

| | Acide fort(H ₂ SO ₄) PH=0.16 | | | Eau de robinet PH=8.09 | | | Base fort (NaOH) PH=13.92 | | | Eau de J'avale PH=12.79 | | |
|-------------------|--|----------------|---------------|---------------------------|----------------|--------------|------------------------------|----------------|--------------|----------------------------|----------------|--------------|
| | m _i | m _t | G (%) | m _i | m _t | G (%) | m _i | m _t | G (%) | m _i | m _t | G (%) |
| 1 ^{er} J | 2,7013 | 2,7013 | 0 | 2,1334 | 2,1334 | 0 | 2,6042 | 2,6042 | 0 | 2,7236 | 2,7236 | 0 |
| 7 | 2,7013 | 2,8305 | 4,782 | 2,1334 | 2,1783 | 2,104 | 2,6042 | 2,6598 | 2,135 | 2,7236 | 2,7514 | 1,020 |
| 14 | 2,7013 | 2,8743 | 6,404 | 2,1334 | 2,1840 | 2,371 | 2,6042 | 2,6720 | 2,603 | 2,7236 | 2,7500 | 0,969 |
| 21 | 2,7013 | 2,9226 | 8,192 | 2,1334 | 2,1987 | 3,060 | 2,6042 | 2,6827 | 3,014 | 2,7236 | 2,7503 | 0,980 |
| 28 | 2,7013 | 2,9714 | 9,998 | 2,1334 | 2,2157 | 3,857 | 2,6042 | 2,6947 | 3,475 | 2,7236 | 2,7578 | 1,255 |
| 35 | 2,7013 | 3,0175 | 11,705 | 2,1334 | 2,2237 | 4,232 | 2,6042 | 2,7068 | 3,939 | 2,7236 | 2,7662 | 1,564 |
| 42 | 2,7013 | 3,0574 | 13,182 | 2,1334 | 2,2382 | 4,912 | 2,6042 | 2,7165 | 4,312 | 2,7236 | 2,7738 | 1,843 |

Annexe11 : Données de durabilité du composite pour 15 pcr.

| | Acide fort(H ₂ SO ₄) PH=0.16 | | | Eau de robinet PH=8.09 | | | Base fort (NaOH) PH=13.92 | | | Eau de J'avale PH=12.79 | | |
|-------------------|--|----------------|---------------|---------------------------|----------------|--------------|------------------------------|----------------|--------------|----------------------------|----------------|--------------|
| | m _i | m _t | G (%) | m _i | m _t | G (%) | m _i | m _t | G (%) | m _i | m _t | G (%) |
| 1 ^{er} J | 2,2860 | 2,2860 | 0 | 2,0783 | 2,0783 | 0 | 2,1671 | 2,1671 | 0 | 2,3300 | 2,3300 | 0 |
| 7 | 2,2860 | 2,4374 | 6,622 | 2,0783 | 2,1381 | 2,877 | 2,1671 | 2,2312 | 2,957 | 2,3300 | 2,3656 | 1,527 |
| 14 | 2,2860 | 2,4911 | 8,972 | 2,0783 | 2,1491 | 3,406 | 2,1671 | 2,2515 | 3,894 | 2,3300 | 2,3666 | 1,570 |
| 21 | 2,2860 | 2,5461 | 11,377 | 2,0783 | 2,1643 | 4,137 | 2,1671 | 2,2669 | 4,605 | 2,3300 | 2,3684 | 1,648 |
| 28 | 2,2860 | 2,6013 | 13,792 | 2,0783 | 2,1842 | 5,095 | 2,1671 | 2,2806 | 5,237 | 2,3300 | 2,3760 | 1,974 |
| 35 | 2,2860 | 2,6472 | 15,80 | 2,0783 | 2,2019 | 5,947 | 2,1671 | 2,2944 | 5,874 | 2,3300 | 2,3970 | 2,875 |
| 42 | 2,2860 | 2,6877 | 17,572 | 2,0783 | 2,2170 | 6,673 | 2,1671 | 2,3040 | 6,317 | 2,3300 | 2,3960 | 2,832 |

