

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme Master
Académique

Spécialité Génie MECANIQUE
Option Énergétique

Thème :
Élaboration et étude d'un nouveau composite
à fibres d'origine animale et à matrice
organique

Présenté par :

M^{elle} DJEFEL Dihia

Devant le jury:

President : Mr HMDDAD H.

Promoteur : Mr. MAKHLOUF Said.

MC a l'UMMTO

Examineurs: Mr BOUTOUDJ MS

Mr BAHTANI A.

Année universitaire 2010/2011

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers Monsieur S. MAKHLOUF maitre de conference de m'avoir bien orienté durant toute la période de ce mémoire. Je lui suis très reconnaissante d'avoir su partager ses connaissances, ses compétences et de m'avoir offert une telle disponibilité.

J'exprime mes remerciements les plus sincères pour Messieurs M. MAMOU " Laboratoire construction MMTO", et K. SAIDANI. "Laboratoire mecanique MMTO", H. ACHER "ENIEM", A. SAIFI "Laboratoire chimie MMTO et M^{lle} A. HALLEME "Laboratoire thermodynamiques" pour leurs aides aimablement servies.

Je tiens à remercier tous les membres de laboratoire de recherche "Composites" de Boumerdes dont j'ai pratiqué la partie expérimentale, pour leurs soutiens, entre autre, Messieurs BEZZAZI, Ch.ARIBI et K.AIT HACENE.

DÉDICACES

Je rends grâce à dieu de m'avoir donné le courage et la volonté ainsi que la conscience d'avoir pu terminer mes études.

A ma chère et tendre mère

A celle qui a tout souffert, sans me faire souffrir, qu'elle trouve dans ce mémoire le témoignage de ma reconnaissance et de mon affection pour tous les sacrifices, l'extrême amour et la bonté qu'elle m'a offert pour me voir réussir.

A mon cher père

A l'homme que je dois ma réussite, mon bonheur, et tout le respect ;
Qu'il trouve ici l'expression de mon affection et une récompense des sacrifices consentis pour moi

A mes sœurs

A qui je souhaite toutes les réussites et le bien être.

A mon frère

En témoignage de mon profond amour et respect, a qui je souhaite le succès et le bonheur.

A mes nièces

Laetitia et Zazi.

Que dieu les protègent et leur préserve le bonheur et la santé

A mes amis

A tous mes ami(e)s, tous ceux que j'aime, tous ceux qui m'aiment et tous ceux qui me sont chers.

A la mémoire de ma grand mère

Merci pour ton courage et pour tes sacrifices. Tu nous manque.

"Le vrai point d'honneur n'est pas d'être toujours dans le vrai. Il est d'oser, de proposer des idées neuves, et ensuite de les vérifier"

Pierre Gilles-De Gennes, Prix Nobel de physique en 1991, (1932-2007)

Chapitre I : Généralités sur les composites et l'isolation thermique

Tableau I.1: Exemples de matériaux composites, pris au sens large.....	6
Tableau I.2: Caractéristiques essentielles des matrices thermoplastiques.....	8
Tableau I.3: Les grandes familles de charges et leurs propriétés.....	16

Chapitre II : Matériaux de base

Tableaux II.1: avantages et inconvénients de résines polyesters insaturés.....	32
Tableau II.2: Différents monomères utilisés comme solvants pour le polyester insaturé.....	37
Tableau II.3: Résistance chimique des résines polyesters.....	41
Tableau II.4: Propriétés mécaniques des principales résines de stratification.....	41
Tableau II.5: Masse des plumes générées par la production du poulet de chair et des pondeuses à l'échelle national durant l'année 2008/2009.....	43.44
Tableau II.6: Production par année de poulet de chair, de poule pondeuse et de dinde.....	44
Tableau II.7: Masse des plumes générées par la production du poulet de chair, des poules pondeuses et de dinde dans la wilaya de Tizi Ouzou.....	45
Tableau II.8: Les propriétés physiques des plumes.....	52
Tableau II.9: Les propriétés mécaniques des barbes de plumes de dindes comparées à celles de poulets et de laine.....	53
Tableau II.10 : Teneur de la plume en azote, soufre et cendre (minéraux).....	62
Tableau II.11: Composition en acides aminés ($\mu\text{mole/g}$) des différentes parties de la plume.....	62.63

Chapitre III : Matériels et méthodes

Tableau III.1: Caractéristiques de la résine RESIMER 55 E-1323 (fiche technique).....	64
Tableau III.2: Les caractéristiques du catalyseur P MEC 50.....	64

Tableau III.3: Masses des fibres seules et fibres avec paraffine.....	67
Tableau III.4: Masse volumique des différents échantillons de la plume de dinde.....	80

Chapitre IV : Résultats et discussion

Tableau IV.1: Les propriétés mécaniques en traction de la résine seule et des différents composites.....	85
Tableau IV.2 : Les propriétés mécaniques en flexion trois points de la résine seule et des différents composites.....	90
Tableau IV.3: Les propriétés mécaniques en flexion trois points pour le même pourcentage en fibres des différents composites.....	93
Tableau IV.4 : la conductivité thermique des plaques de résine seule et des plaques composites a différents pourcentages.....	97

Chapitre I : Généralités sur les composites et l'isolation thermique

Figure I.1: Matériau composite.....	4
Figure I.2: Motif d'une résine phénolique.....	9
Figure I.3: Différents types de renforts.....	10
Figure I.4: Classements des fibres.....	11
Figure I.5: Mat de verre.....	12
Figure I.6: Chaîne et trame d'un tissu.....	12
Figure I.7: Les différents armures et tissus.....	13
Figure I.8: Tissage cylindrique et conique.....	13
Figure I.9: Tissus multidirectionnels.....	14
Figure I.10: Schéma représentatif des différentes techniques de mise en œuvre.....	18
Figure I.11: Les étapes de formage d'un composite par la méthode de moulage.....	18
Figure I.12: Traction simple, force et allongement.....	21
Figure I.13: Courbe contrainte-déformation de deux matériaux avec des rigidités et des ductilités différentes.....	22
Figure I.14: Courbe contrainte-déformation.....	22
Figure I.15: Dispositif d'essai et dimensions de flexion trois points.....	23
Figure I.16: Courbe de contrainte /déformation. a) matériau ductile ; b) matériau fragile....	24
Figure I.17: Figure de l'effort et du moment fléchissant.....	25
Figure I.18.a : Principe de la plaque chaude gardée.....	29
Figure I.18.b: Mini-plaque chaude avec un fluxmètre.....	29
Figure I.19: Dispositif expérimental du fil chaud.....	30

Chapitre II : Matériaux de base

Figure II.1: Réactions d'obtention des résines de polyesters insaturés.....	32
Figure II.2 : Cycle de polymérisation d'une résine polyester.....	36
Figure II.3: Temps de gel d'une résine polyester pré-accélérée.....	36
Figure II.4: Réaction de polymérisation à froid : courbe de montée en température.....	38
Figure II.5: Réaction de polymérisation à chaud : courbe de montée en température.....	38
Figure II.6 : Schéma de principe de copolymérisation des résines polyester à base de Styène.....	38
Figure II.7: Processus de réticulation d'une résine thermodurcissable.....	39
Figure II.8: Structure de Peroxyde de méthyl éthyl cétone «PMEC».....	39
Figure II.9: Différents types de plumes.....	47
Figure II.10 : Structure détaillé d'une plume.....	48
Figure II.11 : Photo obtenue par SEM montrant les structures tertiaires des plumes (les barbules) qui sont attachées aux barbes.....	49
Figure II.12 : coupe transversale d'une barbe obtenue par ESM.....	50
Figure II.13: Surface des barbes présentant une structure fibrillaire dépourvue d'écailles obtenue par ESM.....	50
Figure II.14: Fil tisse d'un mélange de barbes et de coton.....	51
Figure II.15 : Image ESM des barbes de plume et du coton	51
Figure II.16: Formule chimique générale des acides aminés.....	54
Figure II.17 : Les 20 acides aminés[Le nom de chaque acide aminé peut être abrégé selon un code à trois lettres ou à une lettre.....	55
Figure II.18 : Structure de la keratine alpha.....	57

Figure II.19 : Différents niveaux de description d'une protéine : primaire (1), secondaire (2) (exemple d'une hélice α), tertiaire (3) et quaternaire (4)	58
Figure II.20 : Schéma d'une fibre de laine.....	59
Figure II.21 : Les macrofibrilles de kératine avec les pigments de mélanine qui déterminent la couleur du cheveu.....	60
Figure II.22: La kératine β de la plume	62
Figure II.23: Formule chimique d'une cystéine	63

Chapitre III : Matériels et méthodes

Figure III.1: Présentation des plumes avant et après traitements	65
Figure III.2: a) Images des autres fibres utilisées	66
Figure III.3: Image montrant la procédure de l'expérience.....	66
Figure III.4: Photo du moule en verre	68
Figure III.5: Image des éprouvettes utilisées a) Eprouvette de traction b) éprouvette de flexion.....	69
Figure III.6: Images de la plaque témoin et des différentes plaques composites	69/70
Figure III.7: Image du MEB.....	71
Figure III.8: Représentation schématique des interactions faisceau -surface d'échantillon ...	72
Figure III.9: Schéma du microscope électronique à balayage.....	73
Figure III.10: Images de la machine de traction et de l'éprouvette sur banc d'essai	74
Figure III.11: Images de la machine de flexion et de l'éprouvette sur banc d'essai	75
Figure III.12: Photo du CTmètre	78
Figure III.13: Pycnomètre (25 ml).....	78
Figure III.14: Schéma de l'expérience	79
Figure III.15: Image des échantillons testes	80

Chapitre IV : Résultats et discussion

Figure IV.1 : Plume de dinde observée au MO (Gx40) montrant les barbes.....	81
Figure IV.2 : Rachis de plume de dinde portant des barbes.....	81
Figures IV.3 : Photos des Observation au MEBE de la morphologie des fibres de dinde a) barbes +barbules b) barbe+barbules + barbicelles.....	82
Figure IV.4: Courbe contrainte/déplacement de la résine seule.....	83
Figure IV.5 : Courbes charges/déplacement a)1% b) 3% c)5% d) 7%	83/ 84/85
Figure IV.6 : Les propriétés en traction de la résine seule et des différents composites a) évolution du module de Young b) évolution de la contrainte à la rupture c) évolution de la déformation.....	86
Figure IV.7: Courbe charge/déplacement en flexion trois points de la résine seule.....	87
Figure IV.8: Courbes charge/déplacement des composites à différents pourcentages de fibres a) 1% de fibres b)3% de fibres c)5% de fibres d) 7% de fibres.....	88/89
Figure IV.9: Les propriétés en flexion trois points de la résine seule et des différents composites : a) évolution du module de Young b) évolution de la contrainte a la rupture c) évolution de la déformation.....	91
Figure IV.10: Courbes charge/déplacement: a) 3% de fibres b) 3% de fibres synthétiques c) 3% de fibres paraffines.....	92/93
Figure IV.11: Comparaison à 3% de fibres des différents composites: a)histogramme des contraintes maximales b) histogramme des déformations c) histogramme de module d'Young.....	94
Figure IV.12: Photos des faciès de rupture en flexion et traction obtenus au MEBE.....	96

Figure IV.13: Conductivité de la résine seule et des composites à différents pourcentages...98

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les composites et l'isolation thermique	
I.1. Matériaux composites	4
I.2. Définition	4
I.3. Propriétés des matériaux composites	4
I.4. Classification des matériaux composites	5
I.4.1. Classement suivant la morphologie	5
I.4.2. Classement suivant la nature des constituants	5
I.5. La constitution des matériaux composites	6
I.5.1. Les Matrices.....	7
I.5.1.1. Les résines thermoplastiques	7
I.5.1.2. Les résines thermodurcissables	8
I.5.1.3. Les résines thermostables	9
I.5.2. Les renforts	10
I.5.2.1. Les fibres	11
I.5.2.2. Diverses formes de renforts	11
I.5.3. Interface matrice–renfort dans un matériau composite.....	14
I.5.4. Ensimage.....	15
I.5.5. Les différentes propriétés affectées par les charges.....	15
I.6. Procèdes de mise en œuvre	17
I.7. Comportement mécaniques des composites	20
I.7.1. Traction	21
I.7.2. Flexion trois points	23
I.8. Isolation thermique	26
I.8.1. Isolants naturels.....	26

I.8.2. L'inertie thermique	27
I.8.3. Conductivité thermique.....	27
I.8.3.1. Méthodes de mesure de la conductivité thermique.....	27

Chapitre II : Matériaux de base

II.1. Polyester insaturé.....	31
II.2. Généralités	31
II.3. Elaboration des polyesters insaturés.....	32
II.4. Les principaux types de résines polyesters insaturés.....	33
II.5. Copolymérisation des résines de polyesters insaturées	35
II.5.1. Systems de durcissement	37
II.6. Constituants du système catalytique.....	38
II.6.1. Initiateurs (catalyseurs).....	39
II.6.2. Accélérateurs de copolymérisation.....	39
II.6.3. Inhibiteurs	40
II.7. Principales caractéristiques des matrices polyesters	40
II.8. Le renfort	42
II.9. Estimation des volumes de déchets	42
II.10. Définition d'une plume.....	45
II.11. couleurs des plumes.....	45
II.12. Types de plumes	46
II.13. La structure des plumes	47
II.14. Propriétés des plumes	49
II.14.1. Effets de la température et de l'humidité.....	51
II.14.2. Propriétés physiques des plumes	52

II.14.3. Les propriétés mécaniques.....	53
II.14.4. Les propriétés chimiques des plumes	54
II.14.4.1. Les acides aminés	54
II.14.4.2. Les protéines.....	55
II.14.4.2.1. Les protéines fibreuses	56
II.14.4.3. La kératine	56
II.14.4.4. Type de kératine	56
II.14.4.5. La kératine dans la fibre de laine.....	58
II.14.4.6. La kératine et les cheveux	59
II.14.4.7. Les cornes.....	60
II.14.4.8. La kératine des plumes	61
II.15.1. Composition chimique de la kératine des plumes	62
II.14.4.9. Composition en acides amines de la kératine des plumes	62
II.14.10. Rôle de la cystéine dans la constitution de la kératine	63

Chapitre III : Matériels et méthodes

III.1. Présentation des matériaux.....	64
III.2. Constituants.....	64
III.3. Traitement des fibres.....	65
III.3.1. Préparation des fibres de dinde avec paraffine.....	66
III.4. Conception et fabrication du moule	67
III.5. Elaboration des matériaux	68
III.6. Techniques d'analyse	71
III.6.1. La microscopie électronique à balayage (MEB)	71
III.6.2.1. Les constituants du MEB	72
III.6.2.2. Système de fixation	73
III.7. Techniques de caractérisations mécaniques et thermiques	74
III.7.1. Essais de traction.....	74
III.7.2. Essais de flexion	75

III.7.3. CT mètre.....	75
III.7.3.1. Description de l'appareil	75
III.7.3.2. Méthode d'essai.....	
III.8. Technique de caractérisation physique	78
III.8.1. Détermination de la masse volumique à l'aide d'un pycnomètre	78
III.8.2. Masse volumique des substances solides	78

Chapitre IV : Resultats et discussion

IV.1. Observation au microscope optique et MEB	81
IV.1.1. Observation au microscope optique de la plume de dinde.....	81
IV.1.2. L'observation au MEB.....	82
IV.2. Essais mécaniques.....	82
IV.2.1.Traction	82
IV.2.1.1. Caractéristiques mécaniques de la résine seule et des composites à différents pourcentage de fibres	85
IV.2.2. Flexion trois points.....	87
IV.2.2.1.Caractéristiques mécaniques de la résine seule et des composites à différents pourcentage de fibres	89
IV.2.2.2.Comparaison du même pourcentage de fibres	91
IV.2.2.3.Caractéristiques mécaniques	93
IV.2. 3. Observation au MEBE de la section à la rupture des différentes éprouvettes	95
IV.3.Les caractéristiques thermiques	97
<i>Conclusion generale.....</i>	100

Dans un contexte de valorisation d'un déchet keratinique et du développement des matériaux composites, l'objectif de la présente étude est d'utiliser un renfort d'origine animale (fibres de plumes de dindes).

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

- ✓ D'une part, on cherche à valoriser une ressource locale disponible en grande quantité, les composites en fibres naturelles ouvrant de nouveaux débouchés aux sous produits agricoles;
- ✓ D'autre part, on cherche à développer des matériaux et des technologies prenant en compte les impacts sur l'environnement. Les fibres naturelles sont des matériaux de qualité qui se fabriquent et se recyclent naturellement sur terre depuis des millions d'années (matériaux biodégradables et renouvelables par culture).

C'est dans cet esprit que nous envisageons de remplacer les fibres minérales telles que les fibres de verre ou d'amiante, onéreuses et sources de problèmes environnementaux, par des fibres naturelles, aussi bien pour faire des économies, mais également parce que ces matières premières renouvelables présentent des avantages écologiques.

Les plumes sont composées à plus de 90 % en protéines, représentées essentiellement par la kératine qui est une protéine fibreuse, caractérisée par sa haute stabilité mécanique et sa résistance aux enzymes protéolytiques communes [1].

L'abattage de volailles et l'industrie textile, génèrent des quantités considérables de déchets keratiniques et industriels, cruciaux pour l'environnement. Les plumes sont disponibles en abondance dans la nature sans aucune ou peu de voies de valorisation. Elles ne dépendent pas de ressources fossiles et peuvent être facilement utilisées.

Parallèlement à cela, les politiques environnementales et économiques actuelles incitent au recyclage et à l'utilisation des déchets [2, 3]. En effet, il n'est pas rare d'entendre parler de deuxième vie pour les matières ou les déchets.

Parmi les thèmes de recherche développés sur l'utilisation de ces plumes, nous pouvons citer:

- L'amélioration de l'utilisation agronomique des plumes par compostage.

- L'utilisation comme engrais azotés puisque ces plumes contiennent environ 15% d'azote [4].
- Cette richesse en protéines (azote) peut être utilisée pour la production de farines animales.
- L'utilisation des fibres dans le secteur de l'industrie du textile (pouvant constituer une certaine alternative de remplacement des fibres naturelles et synthétiques, dont la production mondiale avoisine les 67 millions de tonnes entre les fibres de laine et de soie, dont le coût est relativement élevé) [5].
- La production d'acides aminés par hydrolyse chimique de la kératine [6].
- Stabilisation du bois détrompé par traitement avec la kératine des plumes hydrolysée [7].
- Ainsi que la filtration des eaux usées et retentions des métaux lourds [8].
- La structure des plumes permet à ces dernières, d'être utilisées comme isolants à caractère écologique, souvent délaissés au profit des isolants traditionnels tels que les polystyrènes et autres laines minérales. Aujourd'hui, différents producteurs proposent ces produits sur le marché permettant ainsi de les intégrer dans la conception des constructions.
- L'usage des fibres de plumes dans la fabrication de bio-composites pouvant être utilisées dans divers domaines: renforcement du thermosable tel le polyester.

Notre travail consiste justement à élaborer un nouveau composite à base de fibres de plumes de dindes comme renfort et le polyester insaturé comme matrice et, d'étudier l'influence du renfort fibreux naturel sur les caractéristiques mécaniques et thermiques du composite. Le choix de la matrice est dicté par sa disponibilité et son faible coût, d'autres matrices peuvent être utilisées.

Ce travail a été structuré de la manière suivante:

Le premier chapitre revient en détails, d'un point de vue théorique, sur quelques généralités sur les matériaux composites et l'isolation thermique.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des matériaux utilisés dans le cadre de cette étude, à savoir les fibres kératiniques.

L'élaboration du composite et sa caractérisation seront abordés dans un troisième chapitre.

Enfin, un quatrième chapitre fera l'objet de l'interprétation des résultats obtenus lors des essais mécaniques et des observations microscopiques.

Notre travail s'achèvera par une conclusion générale et quelques perspectives.

On définit les civilisations par les matériaux qui ont permis aux hommes de construire les matériaux, âge de la pierre, âge du bronze, âge de l'acier, âge de l'aluminium. A l'aube du XXIème siècle, c'est le début de l'ère des matériaux composites [9].

Les matériaux composites sont vieux comme le monde. Il y a plusieurs millénaires, les artisans de l'Egypte ancienne augmentaient les propriétés mécaniques des briques par une adjonction de paille courte à l'argile fraîche. On peut citer également l'adjonction de ballots de papyrus dans une matrice de bitume qui améliore la qualité des canoës. La combinaison de deux phases caractérisées par des propriétés complémentaires se retrouve dans la nature, l'os (mélange complexe de collagène et de phosphate de calcium) [9].

I.1. Matériaux composites

I.2.Définition

Un matériau composite peut être défini comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. Les matériaux ainsi obtenus sont très hétérogènes et souvent anisotropes. La nature de la matrice et du renfort, la forme et la proportion du renfort, la qualité de l'interface et le procédé de production utilisé sont autant de paramètres qui peuvent influencer les propriétés du matériau composite [10].

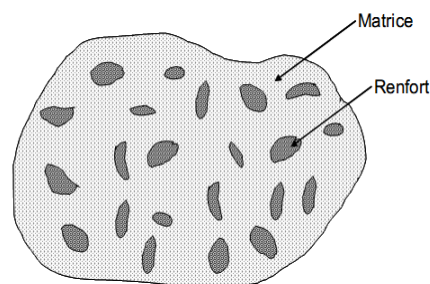


Figure I.1: Matériau composite [11].

I.3. Propriétés des matériaux composites [12]

- a) Les propriétés de matériau composite résultent de :
 - les propriétés des composants.
 - la distribution géométrique.
 - leurs interactions.
- b) La distribution d'un MC est spécifiée par :

- Nature des composants et propriétés intrinsèques;
 - Géométrie des renforts;
 - Nature de l'interface matrice-renfort.
- c) la géométrie du renfort est caractérisée par:
- la forme;
 - la taille;
 - la concentration;
 - l'orientation.

Les composites ne cessent de progresser dans les performances que dans les caractéristiques spécifiques adaptées à l'usage prévu.

I.4. Classification des matériaux composites

Les composites peuvent être classés suivant la forme des composants ou suivant leurs natures.

I.4.1. Classement suivant la morphologie

D'après la forme suivant laquelle se présente le renfort ou la matrice, on peut classer les composites en : [9, 13]

- ✓ composites à particules;
- ✓ composites à fibres courtes;
- ✓ composites à fibres longues, stratifiés;
- ✓ composites alvéolaires ou squelettes;
- ✓ lamifiés.

I.4.2. Classement suivant la nature des constituants

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés suivant des composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale. Divers renforts sont associés à ces matrices [9, 13].

Le tableau ci-dessous regroupe les principaux domaines d'application de ces composites selon les différentes matrices et leurs constituants.

Tableau. I.1: Exemples de matériaux composites, pris au sens large [11].

<i>Composites</i>	<i>Constituants</i>	<i>Domaines d'application</i>
<i>1. Composites à matrices organiques</i>		
Papier, carton	Résine/ charges/fibres cellulosiques	Imprimerie, emballage, etc
Panneaux de particules	Résine/ copeaux de bois	Menuiserie
Panneaux de fibres	Résine/ fibres de bois	Bâtiment
Toiles enduites	Résine souples/ tissus	Sports, bâtiment
Matériaux d'étanchéité	Elastomères/ bitume/textiles	Toiture, terrasse, etc..
Pneumatiques	Caoutchouc/ toile / acier	Automobile
Stratifiés	Résine / charges/ fibres de verre de carbone, etc....	Domaines multiples
Plastiques renforcés	Résine/ micro sphères	
<i>2. Composites à matrice minérale</i>		
Béton	Ciment/ sable / granulats	Génie civil
Composite carbone-carbone	Carbone / fibres de carbone	Aviation, espace, sports, biomédecine, etc...
Composite céramique	Céramique/ fibres de céramique	Pièces thermo-mécaniques
<i>3. Composites à matrice métallique</i>	Aluminium / fibres de bore Aluminium / fibres de carbone	Espace
<i>4. Sandwiches</i>	Métaux, stratifiés, etc..	
Peaux	Mousses, nids d'abeilles, balsa,	Domaines multiples
Ames	plastiques renforcés, etc..	

I.5. La constitution des matériaux composites

En général les constituants principaux d'un matériau composite sont: la matrice, le renfort et l'interface. Dans certains cas des charges et des additifs peuvent être utilisés.

- Le renfort est une sorte de squelette, qui assure la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité). Il est en général de nature filamenteuse mais il pourrait être de nature particulaire.
- La matrice est composée d'une résine thermodurcissable ou thermoplastique. Elle lie les renforts, les protège contre les agressions extérieures et donne la forme au produit réalisé.
- L'interface assure la compatibilité renfort-matrice, transfère les efforts de la matrice au renfort et doit être adaptée aux propriétés visées à l'aide d'un ensimage.
- Les "charges" qui sont des ajouts appropriés servent à diminuer les coûts, elles confèrent aussi aux matériaux des propriétés particulières ou complémentaires.

- Les additifs spécifiques peuvent être soit catalyseur, soit accélérateur de polymérisation, soit colorant ou encore agent de décollage.

I.5.1. Les Matrices

Les matrices ont essentiellement pour rôle de transférer les contraintes apportées sur le matériau aux fibres, de les protéger contre les agressions extérieures et donnent la forme du matériau. Elles doivent être en outre assez déformables et présenter une certaine compatibilité avec le renfort. Ainsi, pour pouvoir apporter aux matériaux composites des propriétés mécaniques élevées, elles doivent posséder des masses volumiques faibles. Il existe plusieurs types de résines classées en deux grandes familles: les thermoplastiques et les thermodurcissables. Une nouvelle classe de résines, ayant les propriétés des deux précédentes familles, a vu le jour, il s'agit des thermostables.

I.5.1.1. Les résines thermoplastiques

Les thermoplastiques sont constitués de macromolécules linéaires qui peuvent devenir mobiles entre elles lorsqu'on élève la température [14].

Ils possèdent la propriété de pouvoir être mises en forme plusieurs fois par chauffages et refroidissements successifs. Ces résines peuvent donc être récupérées et facilement recyclées [11].

Les matrices les plus courantes sont le poly (chlorure de vinyle) qui est utilisé dans la fabrication des tuyauteries, le poly (acétate de vinyle) que l'on trouve dans les colles et adhésifs, le polyéthylène dont on se sert pour fabriquer les jouets, les bouteilles de shampoing ou les sacs de supermarchés, le polypropylène pour les boîtes alimentaires ou les revêtements de sols, le polystyrène qui intervient dans la composition des contenants alimentaires, de la vaisselle jetable, des jouets ou des vitres, le polyamide et polycarbonate...etc.

Les matrices thermoplastiques possèdent de faibles propriétés mécaniques. Leur renforcement (le plus souvent par des fibres courtes) confère une meilleure résistance mécanique, une bonne stabilité dimensionnelle, ainsi qu'un accroissement de la tenue en température [15].

Le Tableau (I.2) recense les principales matrices thermoplastiques utilisées, ainsi que leurs principales caractéristiques.

Tableau I.2: Caractéristiques essentielles des matrices thermoplastiques [15].

	Résistance à la traction (kg/m ²)	Allongement (%)	Module de traction. (Pa)	Résistance à la compression (kg/m ²)	Résistance à la flexion (kg/m ²)	Vitesse de combustion (m/s)	Température de fléchissement (°C)	Absorption d'eau (%)	Effet des solvants
PE BD	11-63	50-800	550-2200		85-125	0.083-0.087	32-49	<0,02	++
PE HD	55-100	20-1000	2400-7100	40-65		0.083-0.087	43-54	<0,01	++
PP	77-100	200-700	6300-8900	100-145	110-145	Lent	52-60	<0,01	++
PAV	90-160	2-40		145-230	180-290	Auto extinguable		0,15-0,75	Cétones et Esters
PVC	27-63	200-450	13800-23700	16-30		Lent		0,15-0,75	Cétones et Esters
PS	90-215	1-2,5	15800-23700	210-290	160-250	Lent	105° max.	0,03-0,01	Hydrocarbures aromatiques
PMMA	125-225	2-10	13800-19000	200-375	215-340	Incombustible	68-100	0,1-0,4	Cétones
Nylon 6,6	160-215	60-300	6900-16400	120-220		Auto extinguable	65-105	1,5	++
Acétate de cellulose	34-160	6-70	2800-23700	35-645	35-285	Auto extinguable	45-90	1,7-7	Solvants ordinaires

I .5.1.2. Les résines thermodurcissables

Un polymère thermodurcissable est constitué d'un réseau tridimensionnel de macromolécules. Leur mise en œuvre se fait par réaction chimique [16].

Les thermodurcissables durcissent de façon définitive lors de leur synthèse. La transformation est donc irréversible. Ce sont les matrices les plus utilisées dans la production de matériaux composites.

Les composants de base de cette résine peuvent être liquides, en poudre, plus ou moins fine, ou en pâte.

a) Les résines polyester insaturé

Ce sont de très loin les matrices les plus utilisées dans l'application composite. Ce type de matrice possède de grandes affinités avec la fibre de verre et sont faciles à mettre en

œuvre. Elles possèdent aussi une bonne tenue à la température (150 à 200 °C) ainsi qu'aux agents chimiques. Par contre leur stockage s'avère difficile du fait d'une mauvaise tenue à l'humidité et du risque d'inflammabilité [15].

b) Les résines phénoliques

Les résines phénoliques sont obtenues par polycondensation d'un phénol et d'un aldéhyde en milieu alcalin. Après réaction, un réseau tridimensionnel s'est formé, constitué par des ponts méthylènes.

Le motif d'une résine phénol-formol est donné dans la figure I-2.

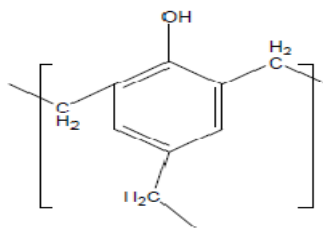


Figure I.2: Motif d'une résine phénolique [17].

c) Les résines époxy.

Elles sont préférentiellement utilisées pour les composites hautes performances. Elles possèdent d'excellentes propriétés mécaniques, thermiques (130 à 180°C) et un bon comportement chimique.

Par contre elles sont sensibles à l'humidité ainsi qu'aux rayons UV et ont un coût encore très élevé.

I .5.1.3. Les résines thermostables

Les résines thermostables se distinguent essentiellement des autres résines par leurs performances thermiques, puisque dans ces résines nous retrouvons les deux grandes familles des résines thermoplastiques et thermodurcissables.

Les résines thermostables sont développées surtout dans les domaines de l'aviation et de l'espace, où les laboratoires cherchent à mettre au point de nouvelles résines.

Parmi les résines thermostables, nous citons: les résines polyamides [11]. Pour des applications soumises à de fortes contraintes thermiques, on choisira préférentiellement les polyamides qui combinent une grande résistance mécanique au fluage à une excellente tenue

en température (-200 à +260°C) et à un bon comportement vis à vis de l'oxydation. Toutefois, la mise en œuvre de ces résines reste très difficile et leurs coûts très élevés.

I.5.2. Les renforts

Le but des renforts dans les matériaux composites est essentiellement d'accroître leurs propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc.) et d'améliorer des propriétés physiques, tels les comportements au feu et à l'abrasion, la tenue en température (conservation des caractéristiques mécaniques à haute température) ou les propriétés thermiques.

Outre les propriétés mécaniques élevées qu'ils procurent, les caractéristiques recherchées dans les renforts sont une masse volumique faible, une compatibilité avec les matrices et une facilité de mise en œuvre.

Les renforts peuvent provenir d'origines diverses (animale, végétale, synthétique...etc.). Parmi ces renforts que contient un matériau composite, on distingue les fibres (les plus souvent employées), les particules (comme SiC, TiC, Al₂O₃...), les billes pleines ou creuses, les fibrilles, les écailles, les whiskers...etc. Ce renfort est un élément nécessaire à la constitution du composite [12].

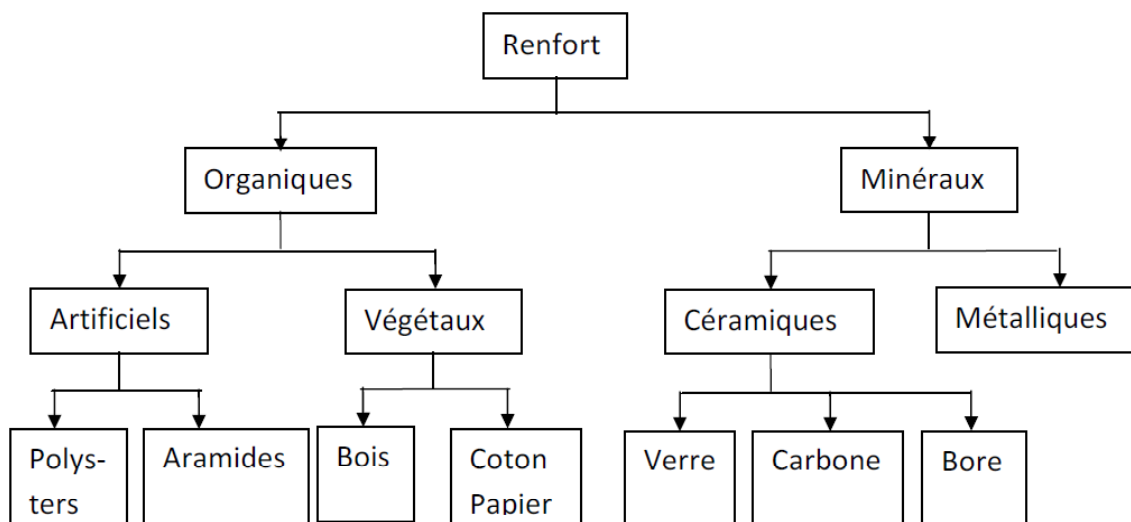


Figure I.3: Différents types de renforts.

I.5.2.1. Les fibres

Une fibre de renforcement est un matériau sous forme d'un filament fin possédant une bonne résistance à la rupture et un module d'élasticité élevé, c'est-à-dire que la longueur d'une fibre peut être étirée jusqu'à 10 000 fois sa longueur initiale [18].

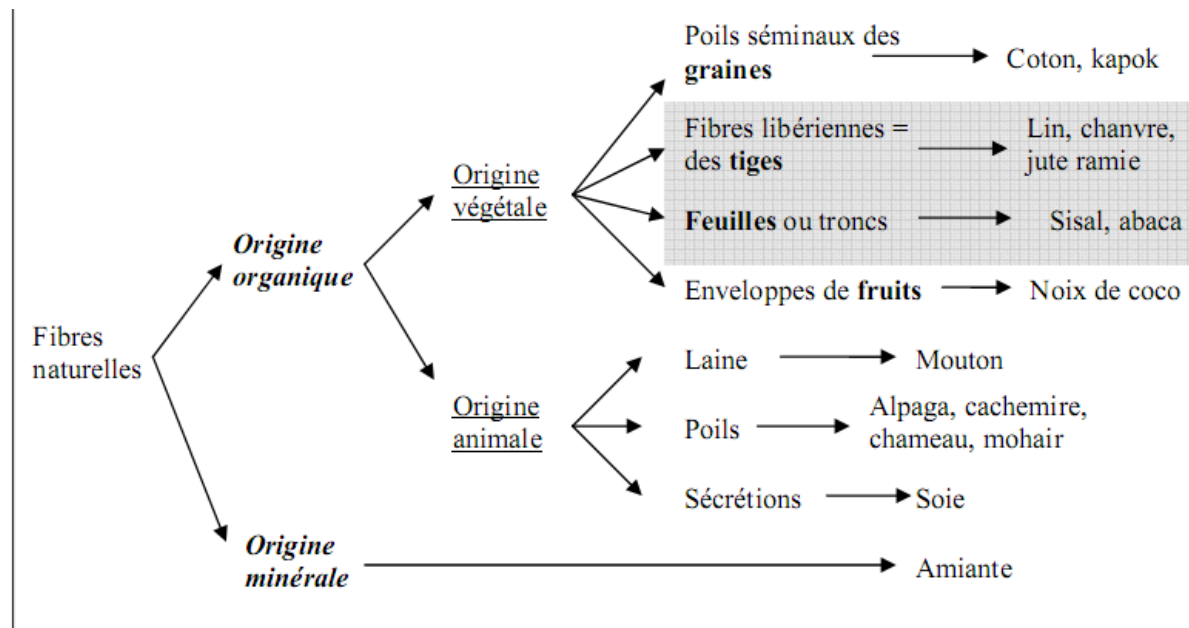


Figure I.4: Classements des fibres [19]

I.5.2.2. Diverses formes de renforts

Les structures composites sont anisotropes. La plupart des renforts travaillent bien en traction, mais offrent de moins bonnes performances en compression et cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée [20].

Il existe différentes géométries et textures de renforts:

a) forme linéique

Dans ces matériaux, les fibres sont toutes alignées dans une même direction. Elles présentent d'excellentes propriétés mécaniques dans la direction des fibres. Cette structure anisotrope, présente peu d'intérêt pratique.

b) La forme surfacique

Les fils peuvent être réunis pour réaliser les différentes formes surfaciques suivantes:

➤ Les mats

Sont des agglomérats de fibres continues ou discontinues qui sont assemblées entre elles, sans orientation particulière, par un liant. L'absence d'orientation préférentielle des fibres conduit à une isotropie des propriétés mécaniques du mat dans son plan.

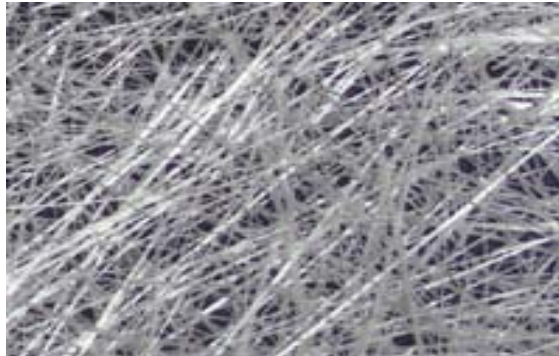


Figure I.5: Mat de verre

➤ **Tissus et rubans**

Ensemble de fils, stratifils ou mèches réalisées sur un métier à tisser composé de chaînes (ensemble de fils parallèles dans le sens de la longueur) et des fils de trames (ensemble de fils s'entrecroisent perpendiculairement aux fils de chaînes dans le sens de la largeur).

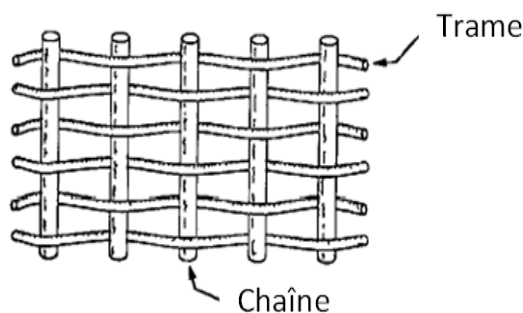


Figure I.6: Chaîne et trame d'un tissu.

➤ **Tresse**

C'est un tissage cylindrique ou conique avec des entrecroisements réguliers des fils, les fils s'entrecroisent en hélice.

Le diamètre de la tresse est lié ou pas de l'hélice par conséquent à l'angle que font les fils entre eux (Voir figure I.8).

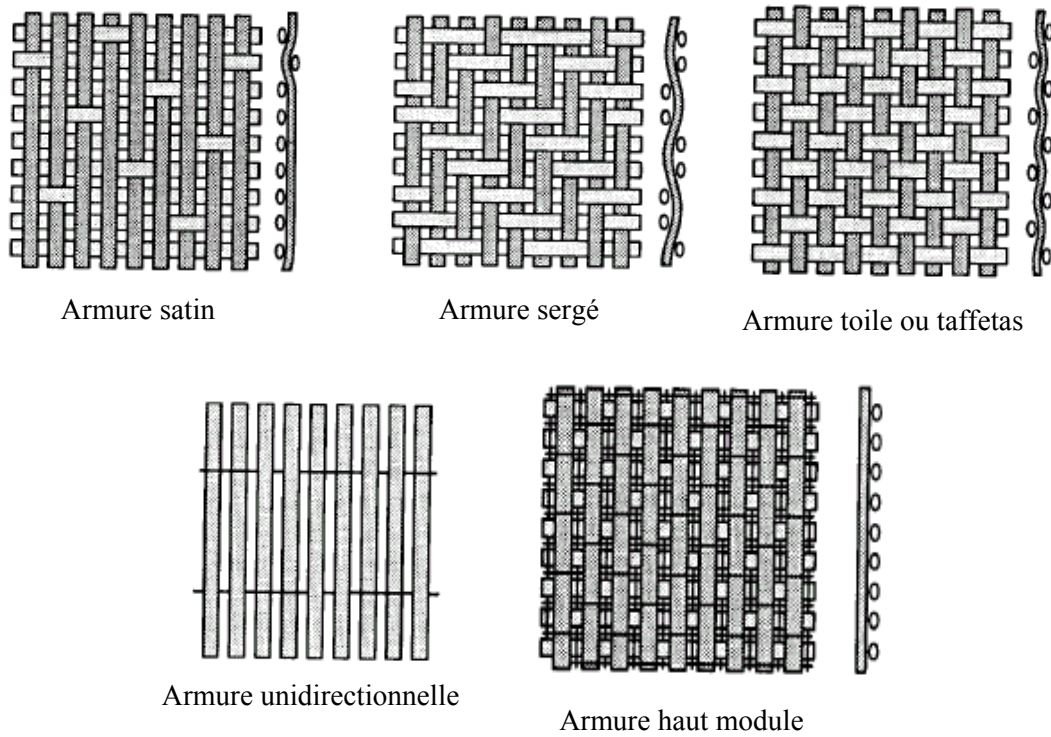


Figure I.7 : Les différentes armures et tissus [11].

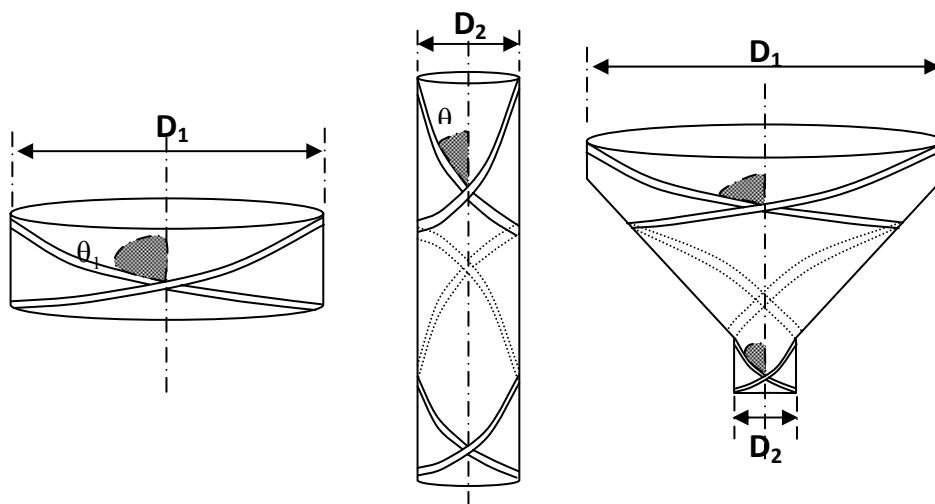


Figure I.8: Tissage cylindrique et conique [11].

➤ Tissus multidirectionnels

Les fibres sont tissées dans plusieurs directions, ce qui permet d'obtenir des tissus très denses et épais mais par conséquent peu souples.

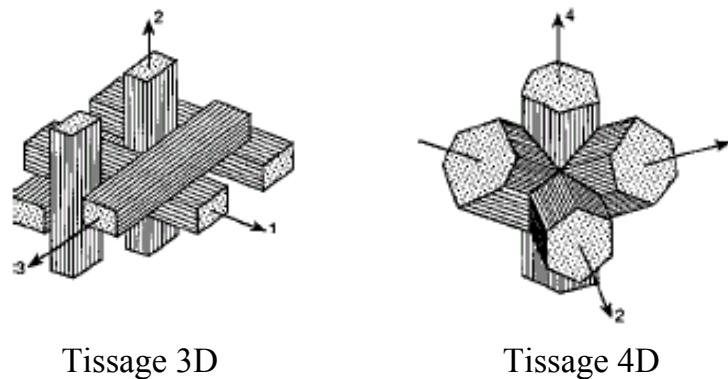


Figure I.9: Tissus multidirectionnels [11].

I.5.3. Interface matrice–renfort dans un matériau composite

Il est naturel de penser que les performances des matériaux composites sont fonction des propriétés des constituants de base rentrant dans leur composition. Cependant, ceux-ci n'existeraient pas si les fibres et la matrice ne pouvaient s'associer.

L'interface est le siège de cette association et constitue une véritable région stratégique capable d'assurer notamment le transfert des charges de la matrice aux renforts.

Les caractéristiques de l'interface dépendent quant à elles de la qualité de la liaison fibre/matrice, ce qui fait appel à la notion d'adhésion.

Par définition, l'adhésion est le phénomène qui crée l'adhérence. L'adhérence est l'état d'une chose qui colle, qui tient à une autre.

Pratiquement, l'adhésion peut s'expliquer par la physico-chimie tandis que l'adhérence se mesure par des tests [21].

La difficulté réside souvent à trouver des corrélations entre adhésion et adhérence. Dans la suite de ce paragraphe, les principaux facteurs de l'adhésion sont présentés ainsi que des tests permettant de mesurer les propriétés d'adhérence entre fibre et matrice.

Rumpf et Schubert (1974) ont répertorié les différentes liaisons entre les particules solides:

- ✓ L'enchevêtrement mécanique, ou accrochage mécanique de la matrice dans les pores ou les aspérités de la charge. Ce phénomène dépend de la forme et de la rugosité de la surface des particules.
- ✓ Les liaisons de types Van der Waals, hydrogène, électrostatiques, magnétiques, qui ne peuvent se produire que pour de faibles distances inter particulaires [10].

I.5.4. Ensimage

L'ensimage est une opération de lubrification réalisée en sortie de filière sur les fils de base. Le filament est revêtu d'une pellicule d'ensimage constituée, en général, d'une dispersion aqueuse de divers composés chimiques présentant chacun une fonction bien définie.

Cet ensimage est ensuite enlevé et remplacé par l'ensimage définitif à base de silane pour accrochage.

La contrainte appliquée sur la matrice est transmise à la fibre par l'intermédiaire de l'interface. Ses propriétés ont donc une influence importante sur les propriétés du composite.

L'interface joue un rôle primordial dans la résistance à la propagation des fissures [22].

I.5.5. Les différentes propriétés affectées par les charges

Le Tableau (1.7) récapitule les grandes familles de propriétés ainsi que le type de charges à utiliser pour obtenir la propriété désirée.

La multiplicité des matériaux pouvant être mis en œuvre en tant que charges dans les matériaux composites est grande et permet de modifier un grand nombre de propriétés.

Les polymères biodégradables peuvent également être utilisés comme charges dans les matériaux composites à matrice non dégradable. Ils permettent, tout comme les autres charges, d'agir sur les propriétés d'usage des matrices. Après utilisation, la présence d'une charge dégradable bien dispersée dans le composite facilite le recyclage de celui-ci. En effet, sous l'effet d'activités microbiennes, la charge se dégrade et la matrice se retrouve sous forme de fragments fins et est donc plus simple à réutiliser en l'état qu'un composite à charge non dégradable qui nécessite une étape préalable de fragmentation pour réduire la taille de l'objet à recycler.

Tableau I.3: Les grandes familles de charges et leurs propriétés.

Propriétés recherchées	Types de propriétés	Types de charges
Mécaniques	Résistance à l'abrasion	Carbure de silicium, oxyde d'aluminium, silice, métaux
	Force à l'impact	Fer, aluminium, fibres, particules d'élastomères
	Module de flexion	Carbonate de calcium, sulfate de calcium
	Résistance à la compression ou à la flexion	Silice, alumine, fer, aluminium, carbure de silicium
	Résistance à la traction	Fibres, métaux
Electriques	Résistance électrique	Alumine, silice, talc, mica
	Conductivité électrique	Or, argent, cuivre, électrolyte, aluminium, graphite
Physico-chimiques	Résistance à la corrosion	Zinc
Nucléaire	Boucliers antiradiations	Plomb, carbure de bore
Thermiques	Transfert de chaleur	Aluminium, alumine, béryllium, silice, or, argent
	Réduction de chaleur	Fer, aluminium, silice

Le polymère biodégradable le plus utilisé comme charge est l'amidon. En effet, il présente l'avantage d'être disponible en quantité abondante, renouvelable, bon marché et il possède une bonne stabilité thermique.

L'amidon a été incorporé à des plastiques conventionnels avec l'objectif de conférer un certain niveau de biodégradabilité aux composites résultants. Les premiers travaux sont attribués à Griffin (1974) qui a incorporé de l'amidon dans du polyéthylène basse densité. Différents travaux ont été menés par la suite sur ces constituants (Danjaji et coll., 2001, Abdul Khalil et coll., 2001, Willett, 1995, Szymanowski et coll, 2005). L'amidon a également été associé à d'autres polymères synthétiques comme l'alcool polyvinylique (Siddaramaiah et coll, 2004, Zou et coll. 2007), le poly (acétate de vinyle) (Vargha et Truter, 2005), le polystyrène (Kiatkamjornwong et coll., 1999), etc...

Willett (1994) a indiqué que le module d'Young élevé de l'amidon de maïs (15 GPa contre quelques GPa pour les polymères synthétiques) en faisait un excellent candidat comme renfort.

Néanmoins, plusieurs auteurs ont observé une réduction des propriétés mécaniques de composites constitués de polymères synthétiques et d'amidon par rapport à la matrice seule (Albertsson et Karlsson, 1995, Danjaji et coll., 2001).

En effet, l'amidon est hydrophile contrairement à la majorité des polymères synthétiques qui sont hydrophobes. Cela engendre alors une faible interaction à l'interface amidon–matrice, conduisant à une perte des propriétés mécaniques en raison d'un faible degré d'adhésion. C'est pourquoi on modifie chimiquement la surface des particules d'amidon, ce qui favorise la compatibilité entre la charge et la matrice (Takagi et coll., 1994, Zou et coll., 2007) et améliore ainsi les propriétés mécaniques.

En outre, cette modification chimique rend souvent l'amidon plus hydrophobe, ce qui confère une meilleure stabilité des matériaux composites à l'eau (Abdul Khali et coll., 2001).

D'autres matériaux biodégradables ont été retenus comme charge de matériaux composites. Nous citerons par exemple les fibres ou les nanocristaux de cellulose (Laka et coll., 2003, Felix et coll., 1993) également utilisés pour améliorer les propriétés mécaniques des polymères synthétiques.

Enfin, outre l'aspect environnemental et la modification des propriétés des composites, un autre intérêt d'utiliser les charges dégradables dans les matériaux composites réside dans la réduction de la consommation de polymères issus du pétrole.

I.6. Procèdes de mise en œuvre [12]

Trois opérations sont indispensables:

- ✓ Imprégnation du renfort par le système résineux.
- ✓ Mise en forme à la géométrie de la pièce.
- ✓ Durcissement du système:
 - soit par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables,
 - soit par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.

Il existe différentes techniques mais la plus utilisée est par moulage:

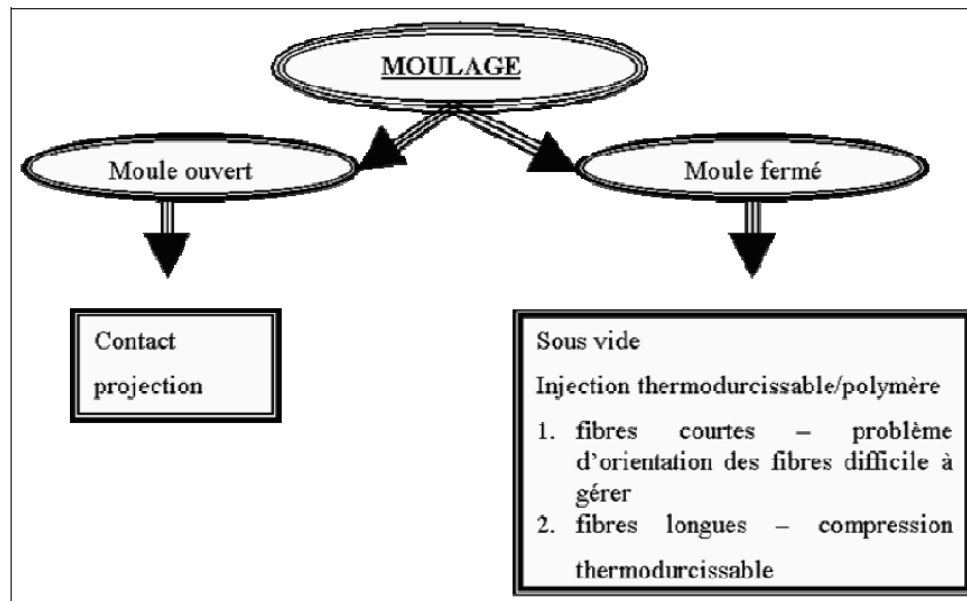


Figure I.10: Schéma représentatif des différentes techniques de mise en œuvre.

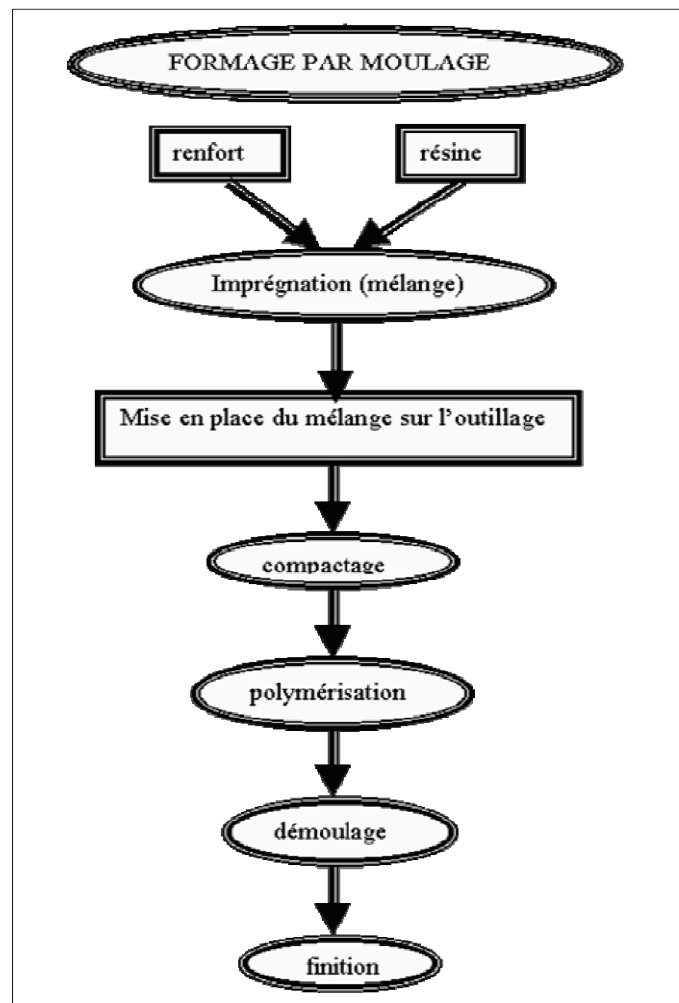


Figure I.11: Les étapes de formage d'un composite par la méthode de moulage.

Les procédés les plus importants sont:

1. Moulage au contact

Technologie de réalisation de pièces prototypes ou de simulation. Le principe consiste à imprégner manuellement les renforts disposés dans un moule. C'est peu onéreux et des pièces de formes quelconques peuvent être réalisées mais à cadence très faible.

2. Moulage par projection simultanée

Technologie similaire mais les fibres coupées sont projetées au pistolet.

3. Injection thermodurcissable BMC (Bulk Molding Compound ou pré imprégné en vrac).

Procédé discontinu haute pression (100 bars). Alimentation et dosage du Compound, Injection-pression, maintien et polymérisation, puis éjection.

Les avantages sont: réalisation de grandes séries, faible coût matière, peu de finition, temps de cycle.

Les limites sont: le taux et la longueur des renforts et les propriétés mécaniques du composite obtenu.

4. Compression thermodurcissable SMC (Sheet Molding Compound ou pré imprégnés en feuilles). Le principe consiste à déposer des feuilles de pré imprégnées dans un contre moule chauffé, de comprimer le matériau avec un moule chauffé, polymérisation puis éjection de la pièce.

Avantages: coût de matière, propriétés mécaniques et thermiques.

Les limites sont l'aspect, le dimensionnement des presses et la finition.

5. Pultrusion

Utilisation pour les composites hautes performances industrielles. Le principe est: tirage, mise en forme et polymérisation de fibres continues imprégnées.

Les avantages sont la production en continu, possibilité de réaliser des sections très complexes, et d'avoir un taux de renfort élevé.

Les limites sont la lenteur du procédé, uniquement des profilés droits à section constante.

6. Enroulement filamentaire (ou bobinage):

Technologie pour les HP. Le principe consiste en un enroulement sous tension sur un mandrin tournant autour de son axe de fibres continues préalablement imprégnées d'un liant.

Les avantages sont la disposition optimale des renforts, les très bonnes propriétés mécaniques, possibilité de réaliser des pièces de grandes dimensions avec des surfaces internes lisses.

Les limites sont que les formes sont uniquement convexes et les investissements importants.

I.7. Comportement mécaniques des composites

Afin de caractériser le comportement mécanique d'un ou de plusieurs matériaux soumis à des forces extérieures qui engendrent des contraintes et des déformations, on a recours à un certain nombre d'essais mécaniques.

Ces essais mécaniques doivent mettre en jeu des états de contrainte simples et connus, d'interprétation facile et non équivoque. De plus ils doivent être reproductibles. C'est pourquoi des organismes nationaux et internationaux normalisent ces essais (AFNOR, ISO, CEN) [23].

La normalisation des essais porte sur:

- la géométrie de l'éprouvette (une éprouvette est une pièce de dimensions normalisées utilisée lors d'essais mécaniques visant à déterminer le comportement du matériau soumis à différents efforts mécaniques comme la traction, la torsion, la flexion...etc.).
- la préparation de cette éprouvette,
- les machines d'essai et leur étalonnage,
- les techniques expérimentales mises en œuvre,
- le dépouillement et la présentation des données.

On peut distinguer:

- **Les essais peu liés au temps** (dans lesquels la déformation provoquée est peu liée à la durée d'application de la force):
 - **L'essai de traction**, de compression ou de flexion, détermine l'aptitude à la déformation d'un matériau soumis à un effort progressif.
 - **L'essai de dureté** fournit des renseignements sur la résistance à la pénétration d'une pièce dure soumise à un effort constant
 - **L'essai de résilience** caractérise la résistance au choc.
- **Les essais fortement liés au temps** (dans lesquels la déformation provoquée dépend de la durée d'application de la force):
 - **L'essai de fatigue** étudie le comportement du matériau vis à vis de sollicitations alternées bien inférieures à la contrainte nécessaire pour le rompre.
 - **L'essai de fluage** mesure la déformation, en fonction du temps, du matériau sous charge constante.

Dans ce qui suit, nous porterons l'accent sur l'essai de traction et de flexion.

I.7.1. Traction

Il s'agit d'un des essais les plus pratiques qui permet de déterminer des caractéristiques mécaniques fondamentales des matériaux: limite d'élasticité σ_e , charge de rupture σ_r , le module de Young E , le coefficient de poisson ainsi la contrainte maximale de traction $\sigma_{t_{\max}}$ [24].

L'essai de traction est effectué en utilisant des éprouvettes normalisées, elles sont soumises à une extension progressive dans le sens de:

- la longueur des fibres (traction longitudinale).
- perpendiculaire aux fibres (traction transversale).
- l'angle de 45° par rapport la direction des fibres (traction hors axes).

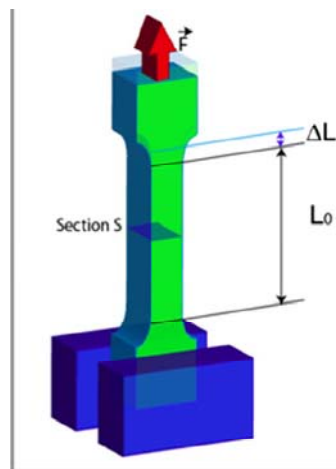


Figure I.12: Traction simple, force et allongement.

La contrainte normale est donnée par:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (\text{I.1})$$

La déformation est donnée par:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{I.2})$$

Le module d'Young est ensuite donné par l'expression suivante:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{I.3})$$

On peut également définir certaines caractéristiques déterminées par l'essai de traction:

- **la rigidité:** c'est fonction de l'énergie des liaisons entre les atomes ou les molécules constituant le matériau. On mesure la rigidité principalement par le module d'YOUNG. Plus ce module est élevé, plus le matériau est rigide.

- **la résistance:** elle caractérise la contrainte maximale qu'un matériau supporte avant de rompre. Cette résistance est fonction de l'intensité des liaisons mais également de la forme des pièces ou de ses défauts.
- **la ductilité:** elle correspond à la capacité d'un matériau à se déformer de façon permanente avant de rompre. Plus l'allongement à la rupture est élevé, plus le matériau est considéré comme ductile. A l'opposé, lorsque la déformation permanente est très réduite ou nulle, on parle d'un matériau fragile. Un matériau fragile peut présenter une résistance très élevée.

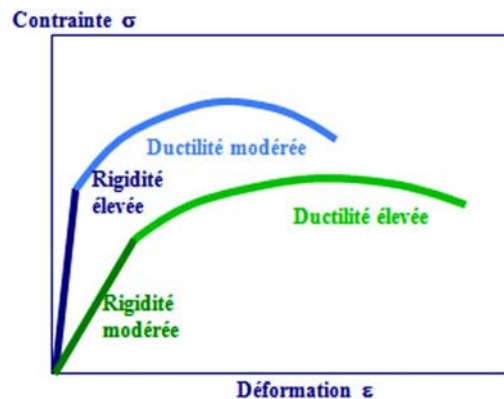


Figure I.13: Courbe contrainte-déformation de deux matériaux avec des rigidités et des ductilités différentes.

- **la ténacité** représente la quantité d'énergie absorbée à la rupture par un matériau. Elle caractérise la résistance à la propagation brutale de fissures. Sa valeur est égale à l'aire de la surface sous la courbe contrainte-déformation. Cette caractéristique est importante pour les céramiques.

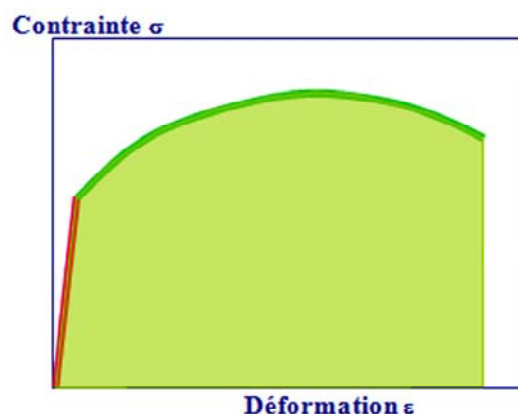


Figure I.14: Courbe contrainte-déformation. Ténacité = surface sous la courbe

I.7.2. Flexion trois points

Comme l'essai de compression, l'essai de flexion ne permet généralement pas d'atteindre la rupture des matériaux ductiles. L'essai de flexion est surtout adapté aux matériaux fragiles. Cet essai se caractérise par la simplicité du montage de l'éprouvette et sa géométrie simple (peu ou pas d'usinage). Lors du test, la partie supérieure est en compression et la partie inférieure en traction.

L'essai de flexion 3 points avec l'inconvénient de positionner l'appui au niveau de la zone de rupture est une limitation de ce système à trois points ou l'appui central peut endommager l'éprouvette et fausser ainsi les résultats en entraînant une rupture précoce de celle-ci.

Une barrette du matériau à tester est placée sur deux appuis et l'on applique au centre de la barrette une force croissante jusqu'à rupture.

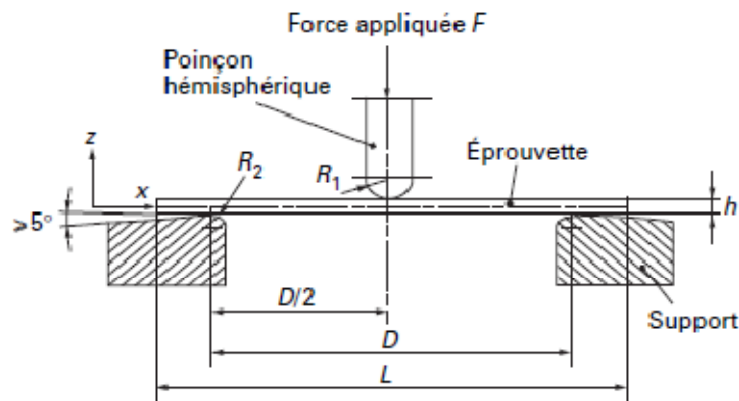


Figure I.15: Dispositif d'essai et dimensions de flexion trois points.

Avec :

- F**: charge appliquée;
- R_1** : rayon de cylindre de la panne;
- R_2** : rayon des cylindres d'appuis;
- L**: longueur totale de l'éprouvette;
- D**: longueur entre appuis;
- h**: hauteur de la poutre;
- b**: largeur de la poutre.

L'essai de flexion trois points permet de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau. Lors du test, la partie supérieure est en compression et la partie inférieure en traction.

Expérimentalement, on enregistre la courbe force-flèche à partir de laquelle il est possible de

calculer la contrainte à la rupture σ_r (ou une contrainte pour un effort P_r particulier) et le module d'Young en flexion E_f . Les contraintes et déformations ont pour valeur:

$$\sigma = 3 F \cdot L / (2 b \cdot h^2) \quad (I.4)$$

$$\varepsilon = 6 h \cdot Y / L^2 \quad (I.5)$$

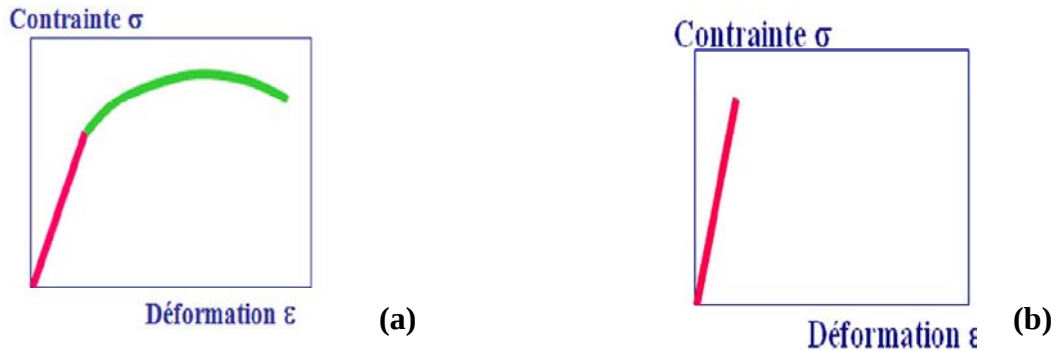


Figure I.16: Courbe de contrainte /déformation. **a)** matériau ductile ; **b)** matériau fragile.

Par raison de symétrie, les réactions aux appuis sont:

$$R_a = R_b = \frac{F}{2}$$

- Effort tranchant (T):

$$\text{Pour } 0 \leq x \leq L/2 \quad T = F/2$$

$$\text{Pour } L/2 \leq x \leq L \quad T = -F/2$$

- Moment fléchissant (Mf):

$$Mf = \int_0^x T dx \quad (I.6)$$

$$\text{Pour } 0 \leq x \leq L/2 : Mf = R_a \cdot x = \frac{F}{2} \cdot x \Rightarrow \begin{cases} x = 0 : Mf = 0 \\ x = \frac{F}{2} : Mf = \frac{FL}{4} \end{cases}$$

$$\text{Pour } L/2 \leq x \leq L : Mf = \frac{F}{2} \cdot x - F(x - \frac{L}{2}) = \frac{F}{2} \cdot (x - L) \Rightarrow \begin{cases} x = \frac{L}{2} \Rightarrow Mf = \frac{FL}{4} \\ x = L \Rightarrow Mf = 0 \end{cases}$$

Le moment fléchissant est maximal au milieu de l'éprouvette ($x = L/2$).

$$M_{\max} = \frac{FL}{4}$$

Le diagramme ci-dessous schématise l'effort tranchant et le moment fléchissant.

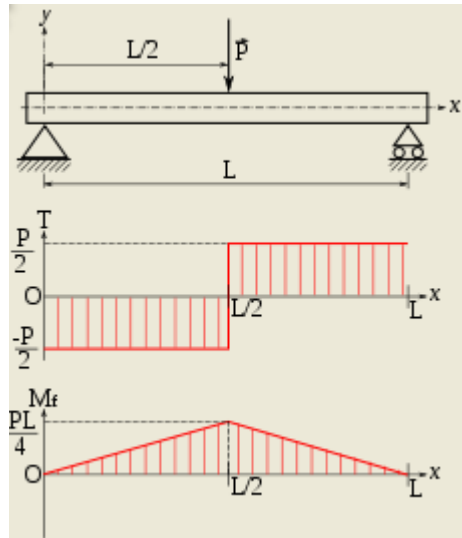


Figure I.17: Figure de l'effort et du moment fléchissant.

La flèche de la poutre s'exprime par la relation suivante:

$$Y(x) = \frac{1}{E.I} \left(\frac{F}{12} x^3 - \frac{F.L^2}{16} x \right) \quad (\text{I.7})$$

Avec :

$$I = I_{xx} = \frac{b.h^3}{12}$$

Où

- I: Moment quadratique de la section droite de la poutre par rapport au plan (x,z);
- E: module de flexion de la poutre;
- E.I: Rigidité de la poutre.

La flèche maximale est donnée pour $x = \frac{L}{2}$

$$Y_{max} = \frac{FL^3}{48EI} \quad (\text{I.8})$$

De cette relation, on peut déterminer l'expression du module d'Young qui est:

$$E = \frac{P.F}{48 Y_c.I} = \frac{F.L^3}{4b.h^3.Y_c} \quad (\text{I.9})$$

Y_c : La flèche au centre (la flèche maximale).

Si l'éprouvette est en matériau homogène isotrope, on peut calculer au milieu de l'éprouvette la variation de la contrainte normale de traction-compression suivant l'épaisseur par la relation suivante :

$$\sigma = \frac{M_f}{I} \cdot Y \quad (\text{I.10})$$

Avec: $M_f = \frac{F}{2} \cdot x$

L'expression (I.10) pour $x = \frac{L}{2}$ sera: $\sigma = \frac{3FL}{bh^3} \cdot Y$

La valeur maximale de la contrainte normale σ_M est déterminée pour $Y = \pm \frac{h}{2}$ (fibres extrêmes de la poutre) (figure...) :

$$\sigma_M = \pm \frac{3PL}{2bh^2} \quad (\text{I.11})$$

De l'expression (I.8, I.9), on obtient l'expression de la déformation:

$$\varepsilon_{max} = \frac{6Y \cdot h}{L^2} \quad (\text{I.12})$$

I.8. Isolation thermique

L'isolation thermique dans le bâtiment permet à la fois de réduire la consommation d'énergie de chauffage et/ou de climatisation et d'accroître le confort. Mais ce n'est pas tout : l'isolation est également bénéfique pour l'environnement car, en réduisant les consommations, elle permet de préserver les ressources énergétiques et de limiter les émissions de gaz à effet de serre.

Ainsi, l'isolation thermique est intéressante en termes de protection de l'environnement, de confort et des économies.

1.8.1. Isolants naturels

On parle souvent d'isolant naturel ou d'isolant écologique ou encore d'isolant vert pour évoquer les matériaux d'isolation non polluants et par opposition aux isolants modernes issus de la pétrochimie. Les isolants conventionnels, eux, proviennent d'une matière première fossile, le pétrole. Un isolant naturel est issu de matériaux renouvelables, éventuellement disponibles localement et recyclables. Le lin, le chanvre, le coton sont des plantes cultivées. Les isolants naturels se déclinent en de multiples formes : en panneaux, rouleaux ou flocons en vrac (déposés ou insufflés).

Il existe 3 groupes d'isolants thermiques :

- les isolants de synthèse (à base de produits pétroliers) : polystyrène, polyuréthane
- les isolants en fibres minérales : laine de roche, laine de verre, perlite, ...
- les isolants en fibres végétales ou animales : liège, laine de lin, ouate de cellulose, feutre de bois, chanvre, laine de coco, laine de mouton, plumes.

Pour la plupart, les isolants d'origine végétale ou animale sont très efficaces. Certains isolants sont issus de matériaux recyclés, comme le verre cellulaire.

I.8.2. L'inertie thermique

L'enveloppe du bâtiment n'étant pas une simple « bouteille thermos » réduisant les déperditions, n'oublions pas 2 autres paramètres de confort :

L'inertie – en fait la capacité thermique – du matériau, qui est sa capacité à accumuler des calories. Plus la valeur est élevée, meilleur est le matériau du point de vue du confort thermique. Pour la plupart, les isolants d'origine végétale ou animale sont très efficaces.

I.8.3. Conductivité thermique

I.8.3.1. Méthodes de mesure de la conductivité thermique

Des avancées importantes sont apparues récemment dans le domaine des techniques expérimentales de mesure de la conductivité thermique. Pour accéder à cette mesure, il est généralement nécessaire de recourir à des techniques d'excitation, fondées sur la méthodologie suivante. Une des faces (parfois tout l'échantillon) de l'échantillon à étudier est soumise à un flux thermique d'une durée dépendant de la nature du milieu étudié. Un suivi de l'évolution de la température en fonction du temps permet alors de déduire la conductivité thermique. La relation liant la variation de la température et l'évolution du temps dépend du modèle thermique utilisé pour identifier cette dernière [25].

Le choix d'une méthode de mesures de la conductivité thermique dépend de certains paramètres. En effet, lorsque le choix de la combinaison matériau-précision se pose de manière précise, de nombreux paramètres sont à prendre en compte:

- Le type de produit : milieu granulaire, milieu semi-infini.
- Le type de régime thermique car il peut être stationnaire, transitoire, ou quasi établi.
- Le type de forme géométrique du milieu (2D, 3D, axisymétrique, ...)
- Les dimensions et les rapports de dimensions.
- La simplicité de la méthode.

- Les tolérances (ou précisions) de certains paramètres.

Une distinction entre différentes méthodes s'appuie sur la définition du régime thermique temporel du milieu. Ainsi nous pouvons faire référence à deux classes:

Les mesures stationnaires, et non stationnaires.

1. Les méthodes en régime stationnaire

Ces méthodes sont conçues pour mesurer les conductivités thermiques des milieux isolants [26]. Elles consistent à supposer le milieu en équilibre thermique, et soumis à un flux stationnaire en fonction du temps. Le principe de mesure repose sur l'exploitation des mesures de la température en divers points du milieu, ainsi en s'appuyant sur la loi de Fourier et les conditions aux limites nous pouvons déterminer les grandeurs physiques du milieu.

Dans la littérature, on peut citer certaines méthodes: la méthode de la plaque chaude gardée, la méthode de la barre, la méthode des boîtes, et la méthode du flux radial.

➤ Méthode de la plaque chaude gardée [27].

C'est une expérience en régime permanent (ISO 8302) où l'on impose à un échantillon plan un flux de chaleur unidirectionnel, et on mesure la différence de température aux bornes de l'échantillon. Cette méthode repose sur l'utilisation d'une plaque de faible épaisseur par rapport aux dimensions traverses de l'échantillon. Le dispositif expérimental est schématisé sur la figure I.18.a.

Le modèle et la méthode d'identification sont élémentaires puisque basés sur le transfert unidirectionnel en régime permanent tel que :

$$T_1 - T_2 = R \cdot \Phi$$

Où : $R = \frac{e}{\lambda S}$

Cette technique est particulièrement adaptée à la détermination de la conductivité thermique de matériaux isolants.

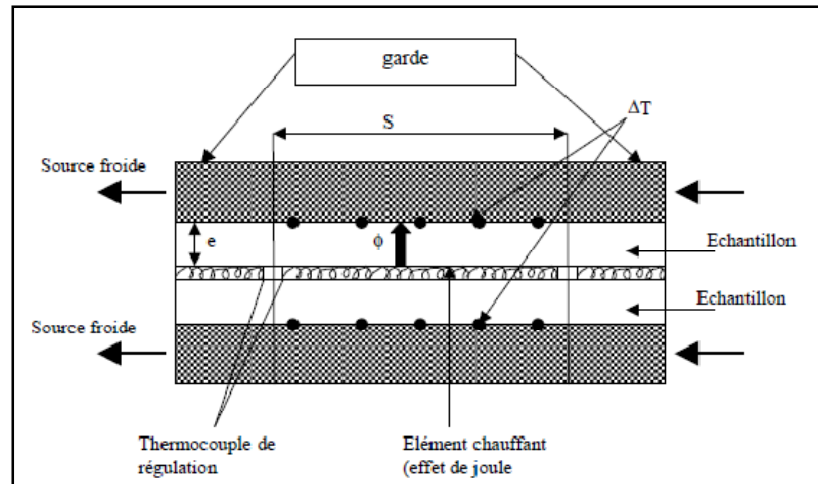


Figure I.18.a : Principe de la plaque chaude gardée

Une autre extension de cette méthode a été développée, et qui fait appel à l'utilisation de mesures du flux unidirectionnel par deux fluxmètres. La figure montre en exemple des mesures du flux traversant l'échantillon donné par la moyenne du flux entrant et sortant.

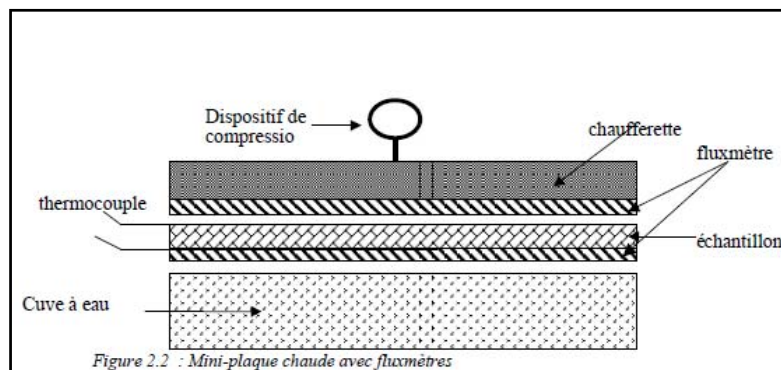


Figure I.18.b: Mini-plaque chaude avec un fluxmètre

2. Les méthodes non stationnaires

Le champ de leur application est très vaste, grâce à plusieurs avantages: mesures directes des paramètres thermophysiques du milieu, la durée d'excitation thermique est courte, et elles sont faciles à mettre en œuvre. Les mesures de la conductivité thermique par les méthodes dites non stationnaires consistent à exploiter des signaux de températures répartis dans un milieu en régime transitoire. Le principe de mesure s'appuie sur un modèle développé à partir de l'équation de conservation de l'énergie qui permet de trouver une relation directe entre les paramètres d'entrée et les grandeurs mesurées.

De nombreuses méthodes non stationnaires ont vu le jour pour les mesures de la conductivité thermique, nous pouvons citer: la méthode fil chaud, à plan chaud, à ruban chaud, à pastille chaude, et Hot Disk.

➤ Méthode du fil chaud [28]

Sa rapidité, sa facilité de mise en œuvre, et son coût peu élevé, en font d'elle la méthode de caractérisation la plus connue et la plus utilisée par le monde industriel.

Le principe expérimental est particulièrement simple: on place un fil métallique entre deux blocs du matériau à étudier pour les matériaux solides et dans une enceinte fermée pour les gaz et les liquides. Le fil est relié à une alimentation électrique qui lui fournit un échelon de puissance.

La mesure consiste à relever au cours du temps soit l'élévation de température, soit la variation de résistance électrique, du fil.

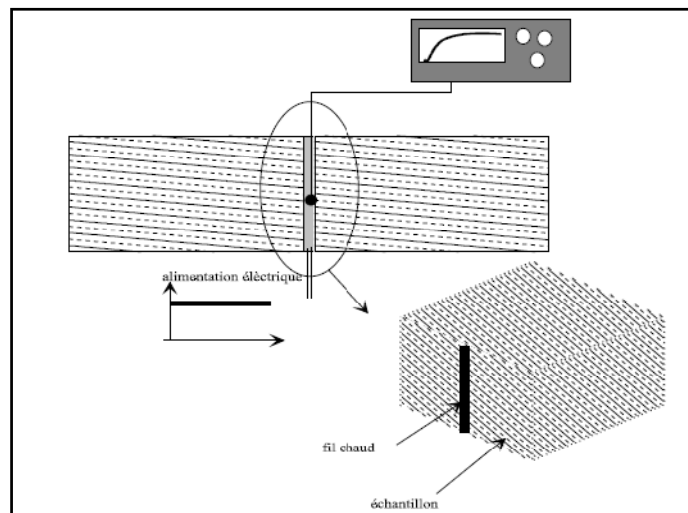


Figure I.19: Dispositif expérimental du fil chaud

Dans le cadre d'une modélisation simple du phénomène, on considère un fil infiniment long produisant une densité source de chaleur radiale, appliquée à l'instant initial.

On suppose que l'énergie est dissipée uniquement par conduction. L'échantillon est de dimensions infinies et ses propriétés thermophysiques sont constantes. L'équation de la chaleur en coordonnées cylindriques s'écrit:

$$\left(\frac{\partial T(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} = \frac{1}{a} \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} \right)$$

Les performances des composites dépendent de toute évidence des matériaux de base mais aussi de leur capacité à s'associer à ce qui fait appel à la notion d'interface fibre/matrice. Ce chapitre présente successivement la matrice et le renfort. La première partie de ce chapitre est donc dédiée aux polyesters insaturés. De nombreuses thèses ont déjà traité des résines polyesters de façon très complète, ici on se limitera à rappeler les généralités sur cette résine ainsi que ses caractéristiques essentielles. La deuxième partie de ce chapitre traite des fibres de plumes qui constituent le renfort de nos éprouvettes. Cette partie commence par une estimation des déchets de plumes, par la suite nous nous sommes intéressés à la morphologie de la plume, sa composition chimique, sa structure moléculaire en kératine et nous compléterons avec quelques études récentes sur ces différentes propriétés et le rôle de ses constituants (en particulier la kératine) organiques.

II.1. Polyester insaturé

II.2. Généralités

Une résine polyester insaturé est utilisée dans le cadre de ce travail. Ce type de résine appartient à la classe des polymères thermodurcissables.

Les polyesters insaturés sont d'un usage relativement ancien (1950), essentiellement dans le bâtiment (moulage au contact). Ils ont connu un renouveau important à partir de 1980, en particulier au niveau des formulations et de la fiabilité des procédés grâce au développement de technologies industrielles de moulage par injection et par compression dans l'industrie automobile [29].

Ce sont actuellement, de loin, les matières plastiques les plus utilisées dans les matériaux composites renforcés. Elles rentrent dans la fabrication de **95%** des composites thermodurcis renforcés.

Les formulations des résines de polyesters sont nombreuses afin de répondre à des besoins très variés. Pour la mise en œuvre, elles doivent posséder une viscosité adaptée et une compatibilité suffisante (mouillabilité) pour bien imprégner les renforts. Ces paramètres sont des propriétés physiques qui dépendent directement de la composition et de la structure chimique de la résine (masse moléculaire, fonctionnalité chimique...etc.). Autrement dit, les formulations doivent être adaptées au type de procédé de transformation, à la complexité de la pièce à mouler et au temps de cycle désiré [30].

Le tableau ci-dessous regroupe quelques avantages et inconvénients de la résine polyester insaturé.

Tableaux II.1: Avantages et inconvénients de résines polyesters insaturés.

Avantages	Inconvénients
Bonne accroche sur fibres de verre	Inflammabilité (mauvaise tenue au feu, fumée)
Durcissement assez rapide sans élimination de produits secondaires	Exothermie élevée (microfissures néfastes)
Bonne résistance chimique	Retrait au moulage important (6 à 15 %)
Mise en œuvre facile	Résistance à la fatigue assez faible
Tenue en température (> 150 °C)	Durée de conservation en pot limitée
Prix réduit	Émission de styrène

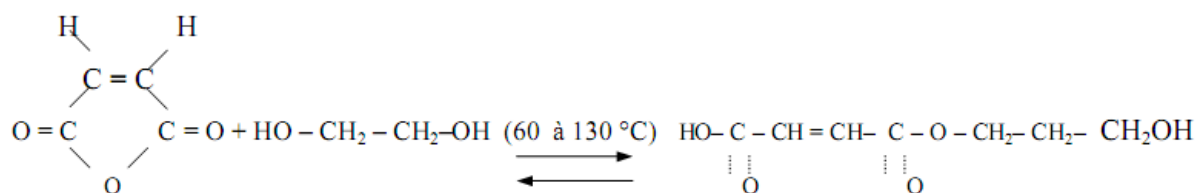
II.3. Elaboration des polyesters insaturés

Les résines polyesters insaturés sont obtenues en faisant réagir, en général, des polyacides ou anhydrides d'acide dont l'un au moins est insaturé avec un diol ou un mélange de diols [10]. On fabrique d'abord un polyester insaturé proprement dit, par estérification-condensation de diols (Figure II.1). On dilue ensuite ce polyester dans un monomère, on se trouve alors en possession d'une résine de polyester insaturé.

L'utilisation finale de la résine s'effectue par polymérisation [31].

Leur synthèse se fait en deux étapes:

- Première étape: estérification.



- Deuxième étape: polycondensation.

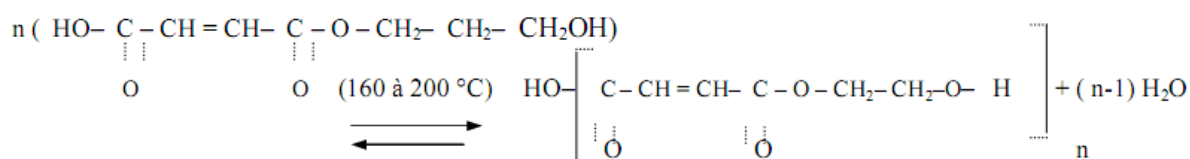


Figure II.1 : Réaction d'obtention des résines de polyesters insaturés [29].

Par le terme résine polyester, on désigne en fait la dissolution du pré polymère polyester insaturé dans un solvant copolymérisable, le plus utilisé étant le styrène. C'est sous cette forme liquide que les résines polyesters sont livrées aux transformateurs. Après addition de différents adjuvants, charges et renforts, divers procédés de transformation provoquent, sous l'action d'un système catalytique approprié, la copolymérisation finale de la résine en un objet thermodurci.

II.4. Les principaux types de résines polyesters insaturés [32]

Il existe plusieurs types de résines polyesters insaturés, la différence entre elles réside dans le procédé de leur obtention, leurs constituants et leurs caractéristiques mécaniques (G. CHRETIEN) [33].

a) Résines orthophtaliques

Ce sont des résines d'usage général basées sur un mélange d'anhydrides phtaliques (saturés) et d'anhydrides maléiques (insaturés) estérifiés par du propylène glycol. L'association d'anhydrides saturés et d'anhydrides insaturés permet de contrôler le degré de réticulation lors du durcissement. Par conséquent, la rigidité de la résine qui résulte de ce mélange peut être contrôlée par le rapport molaire maléique/phtalique qui peut varier de 2 pour 1 à 1 pour 2.

Les résines semi-rigides sont utilisées pour l'industrie nautique, les piscines, les réservoirs d'eau, le bâtiment...etc.

Les résines rigides sont utilisées dans les préimprégnés et les vernis.

Quelques avantages de ces résines:

- prix avantageux,
- réseau de distribution bien organisé, facile à obtenir,
- manipulation et mise en œuvre simples, facile à mélanger (Pâte BPO accélérée aux amines ou Durcisseur PMEC accéléré au cobalt),
- temps de durcissement court (durée de vie entre 15 min et 1 heure, en fonction du type de résine et du durcisseur)
- retrait de la résine pure 7 à 9 % en volume (environ 2 % dans chaque direction: les fibres ont une action anti-retrait dans le stratifié).

b) Résines isophtaliques

Les résines UP isophtaliques utilisent des acides isophtaliques (contrairement aux acides orthophtaliques dans le cas des UP orthophtaliques). Il en résulte des résines plus chères que les résines UP ortho mais de qualité supérieure.

Les résines UP isophtaliques ont une bonne résistance mécanique, chimique et thermique que les résines ortho.

Quelques avantages :

- résistance mécanique plus élevée,
- meilleure résistance à l'eau,
- résistance élevée aux rayons UV,
- manipulation aisée, facile à mélanger (accélérateur au cobalt/ durcisseur P MEC),
- très bon rapport qualité/prix,
- retrait moindre comparé à la résine orthophtalique.

c) Résines au méthylméthacrylate

Dans ces résines, une partie du styrène est remplacé par du méthylméthacrylate. Ces résines sont formulées pour être résistantes aux conditions climatiques et absorber les rayons UV sans jaunissement. Par conséquent, ces résines sont utilisées comme gel coat et dans les applications externes. Notons que plus le taux de méthylméthacrylate augmente, plus la couleur du stratifié tend vers la transparence.

d) Résines téréphtaliques

Elles présentent, par rapport aux résines isophtaliques, les avantages suivants:

- tenue chimique supérieure à température élevée;
- meilleur comportement à l'égard des produits pétroliers.

e) Résines au comportement au feu amélioré

- **Résines de type ATCP** (anhydride tétrachlorophtalique): résines colorées, présentent un mauvais comportement aux UV (jaunissement important des stratifiés);
- **Résines de type HET**: elles sont utilisées, en particulier, pour la fabrication de plaques ondulées translucides;
- **Résines de type diol chloré ou bromé**: présentent à la fois d'excellentes caractéristiques de comportement au feu et de bonnes propriétés de résistance aux agents chimiques.

f) Résines bas retrait ou low profile

Les résines polyesters insaturés (UP) sont connues pour avoir un taux de retrait élevé après durcissement. Ce haut taux de retrait est considéré comme un inconvénient pour la fabrication de certaines pièces composites, notamment dans l'industrie automobile. Afin de réduire le retrait des UP, on leur rajoute des polymères thermoplastiques qui sont partiellement solubles dans le styrène comme le polystyrène ou le PMMA.

g) Résines assouplissantes :

Afin d'obtenir des résines plus flexibles que peuvent le permettre les résines orthophtaliques du cas précédent, on remplace l'anhydride orthophtalique par des acides adipiques. D'autre part, on remplace le polypropylène glycol par du dipropylène glycol, ce qui apporte plus de flexibilité.

II.5. Copolymérisation des résines de polyesters insaturées

Les producteurs de résines fournissent aux transformateurs des systèmes liquides. Le transformateur, en utilisant des procédés de transformation variés, fait de ces liquides des objets solides en provoquant la copolymérisation radicalaire du monomère (en général le styrène) avec les doubles liaisons du prépolymère; il en résulte une structure tridimensionnelle de chaînes polyesters liées par des petites chaînes polystyrène (3 à 5 motifs en général) [34]. La réaction de copolymérisation est déclenchée par un système catalytique, dont le choix, fonction du procédé utilisé (rôle de la température), est l'une des bases de la technicité de ces produits.

Les résines polyesters sont des polyesters insaturés en solution dans un monomère qui agit au moment de la copolymérisation comme agent de réticulation.

La figure ci-dessous illustre le cycle de polymérisation d'une résine polyester insaturé.

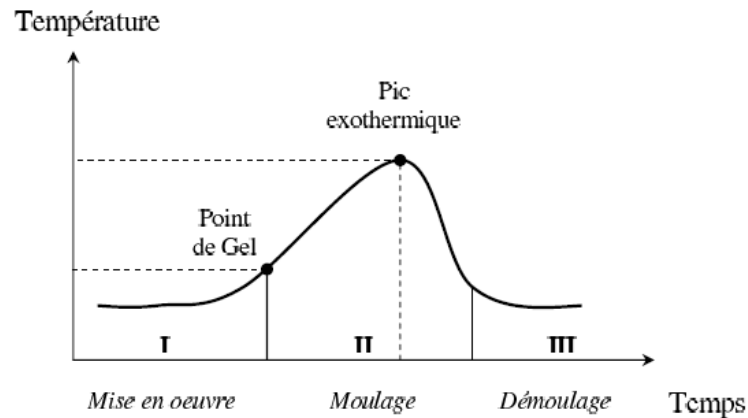


Figure II.2: Cycle de polymérisation d'une résine polyester.

Quant à la figure (II.3), elle représente le temps de gel de polyester insaturé.

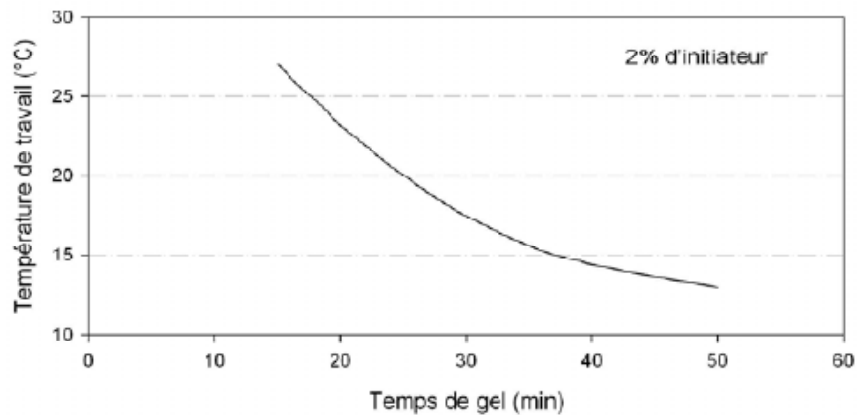


Figure II.3: Temps de gel d'une résine polyester pré-accélérée [30].

Le styrène est le diluant réactif le plus couramment employé en raison de sa bonne compatibilité et de sa réactivité avec les prépolymères, de sa température d'ébullition relativement élevée et de son coût attractif. Le taux optimal du styrène varie de 30 à 45 % en masse.

Les polyesters insaturés sont inhibés par de l'hydroquinone ou un produit voisin avant la dilution par le styrène ou un autre monomère pour éviter une prise en gel prématurée.

Tableau II.2: Différents monomères utilisés comme solvants pour le polyester insaturé.

Monomère	Particularité
Styrène	Le plus utilisé, point éclair* de 310 °C, mélange avec l'air explosif . Bas prix et performances moyennes.
Méthacrylate de méthyle	Améliore la transparence du stratifié et la résistance au vieillissement.
Acétate de vinyle	Utilisé dans la stratification sur polystyrène expansé, car le styrène monomère dissout le polystyrène expansé.
Phtalate de diallyle	Faible volatilité. Tenue thermique. Utilisé dans les préimprégnés et la pultrusion.
Vinyltoluène	Diminution du retrait, utilisé pour les compounds.
Chlorostyrène	Résistance au feu
Cyanurate de tri-allyle	Très haute résistance à la température (240°C)

* Le point éclair "flash point" est la plus basse température à laquelle une flamme peut allumer la vapeur s'émanant d'un liquide volatil.

II.5.1. Systems de durcissement

a. Copolymérisation à froid

Le durcissement des résines polyesters insaturées s'effectue selon un mécanisme radicalaire activé par la formation de radicaux. Une résine polyester insaturé passe successivement de l'état liquide visqueux à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible (Figure II.4). Le durcissement sera d'autant plus rapide ou, si l'on préfère, le temps nécessaire dans le moule sera d'autant plus court que la courbe de température en fonction du temps se rapprochera davantage de la verticale [31].

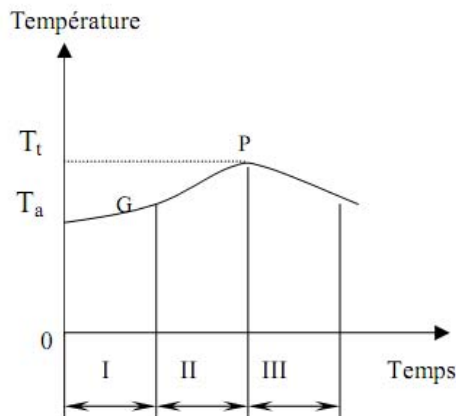
Pour finir la réaction et obtenir une réticulation optimale, il est nécessaire d'effectuer une post-cuisson. Toutefois, les caractéristiques indiquées sur les fiches techniques des fournisseurs de résines correspondent souvent à une réticulation complète. Choisir une matrice en fonction des caractéristiques d'une fiche technique n'est alors valable que si le procédé industriel utilisé permet d'atteindre un taux de réticulation équivalent [30].

b. Copolymérisation à chaud

La réaction de durcissement à chaud dépend des mêmes paramètres qu'à froid: réactivité de la résine, nature et dosage d'initiateur, forme de l'objet fabriqué, en particulier

épaisseur, et bien entendu, elle dépend de la température du moule ou de l'enceinte à laquelle la résine est portée [30].

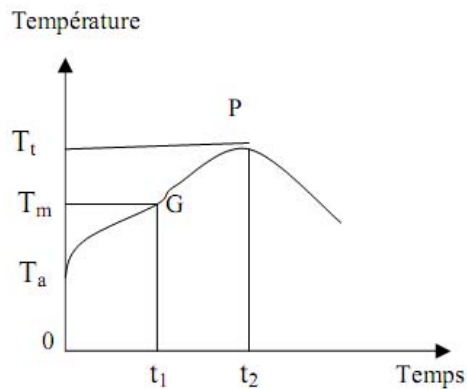
Comparativement au durcissement à froid, le point de gel et le pic exothermique sont généralement atteints plus rapidement pendant le durcissement à chaud et le pic est également plus élevé, d'où la possibilité d'avoir des cadences plus rapides par le procédé à chaud.



I - mise en oeuvre et débullage
II - moulage
III - démoulage et post cuisson

Ta : température ambiante
Tt : température du pic exothermique
G : point de gel
P : Pic exothermique

Figure II.4: Réaction de polymérisation à froid [31].



Ta : température ambiante
Tm : température du moule ou de l'enceinte
Tt : température du pic exothermique
G : point de gel
P : Pic exothermique

Figure II.5: Réaction de polymérisation à chaud [31].

II.6. Constituants du système catalytique

Le système catalytique est généralement constitué de trois éléments (initiateurs, inhibiteurs et accélérateurs) qui vont permettre d'ajuster le temps de gélification et de polymérisation en fonction de la taille de la pièce à mouler à la température de moulage souhaitée (polyester).

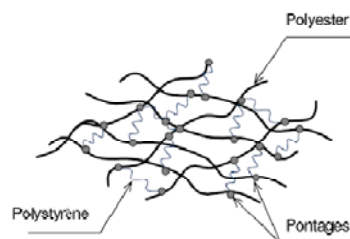


Figure II.6: Schéma de principe de copolymérisation des résines polyester à base de styrène.

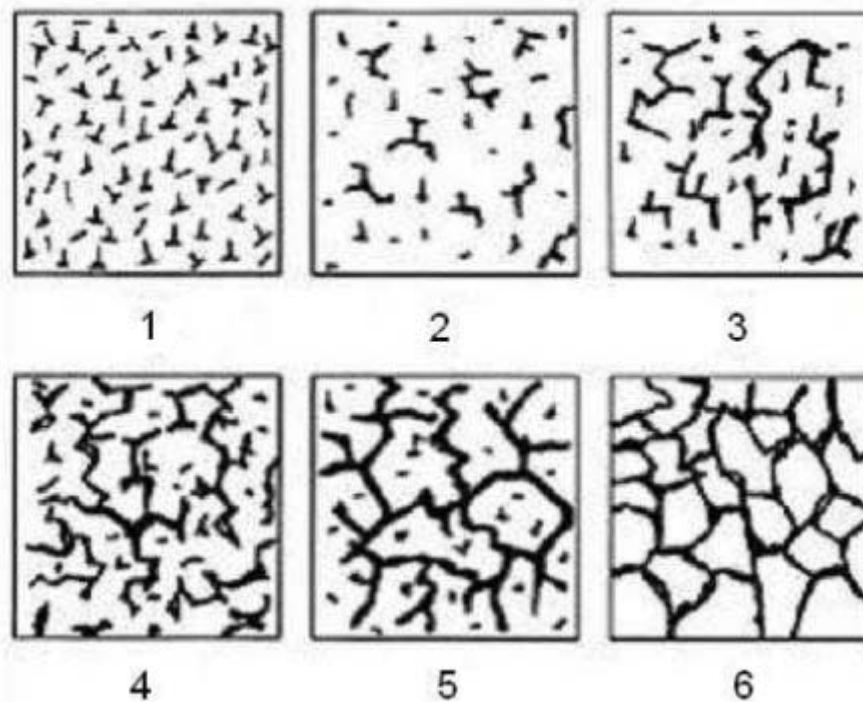


Figure II.7: Processus de réticulation d'une résine thermodurcissable.

II.6.1. Initiateurs (catalyseurs)

Un catalyseur est un corps qui favorise une réaction sans paraître, ni participer et que l'on retrouve intact à la fin de l'expérience. Le catalyseur initie la réticulation des chaînes de polyesters insaturés et des monomères réactifs en les faisant passer de l'état liquide à l'état solide, ce sont des peroxydes organiques.

Le plus utilisé est le Peroxyde de méthyl éthyl cétone «PMEC» [31].

Il est employé pour le travail au contact, sa formule est la suivante:

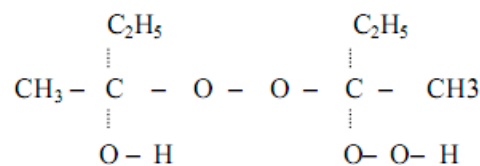


Figure II.8: Structure de Peroxyde de méthyl éthyl cétone «PMEC»

II.6.2. Accélérateurs de copolymérisation

À température ambiante, la vitesse de décomposition des catalyseurs est faible, quelle que soit la réactivité de la résine polyester insaturé utilisée. Lors de la mise en œuvre à froid,

aux environs de 20°C, il est nécessaire d'accélérer la décomposition chimique du peroxyde par voie chimique.

L'accélérateur est utilisé en fonction de sa compatibilité avec l'initiateur.

Les plus courants sont:

- accélérateur, hydroperoxydes: naphténate ou octoate de cobalt;
- accélérateur, peroxydes: les amines tertiaires aromatiques (diméthylaniline).

Les accélérateurs: utilisés en très faible proportion dans la résine (0.05 à 0.5%).

II.6.3. Inhibiteurs

L'inhibiteur est en général introduit lors de la synthèse de la résine, il s'agit le plus souvent d'hydroquinone. Il retarde le début de la copolymérisation et permet, par exemple, une meilleure imprégnation des renforts en raison de son effet retardataire.

L'inhibiteur permet aussi de conserver la résine liquide pendant environ 6 mois [30].

L'inhibiteur est partiellement introduit au début de la polycondensation dans le réacteur, et partiellement dans le mélangeur, avec le monomère à un taux de l'ordre de 50 à 100 p.p.m. Il évite, à cette étape, des effets de prise en masse.

II.7. Principales caractéristiques des matrices polyesters

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

a) Propriétés électriques

Les résines polyesters sont d'excellents isolants électriques. Les polyesters armés de fibres de verre possèdent:

- ✓ un faible facteur de perte;
- ✓ une résistance diélectrique élevée.

b) Résistance aux agents chimiques

Les résines polyester comportent deux aspects chimiquement faibles du point de vue de leur structure: les fonctions ester hydrolysables et les ponts styréniques sensibles aux oxydants et aux solvants. Le Tableau (II.3) regroupe les agents pour lesquels les résines sont résistantes et attaquées. L'hydrolyse est un facteur non négligeable pour les composites

polyesters à usage marin. C'est pourquoi, ils sont généralement protégés par une couche de gel-coat formulé spécialement pour résister à l'environnement marin (résine polyester chargée faisant intervenir des glycols NPG par exemple) [30].

Tableau II.3: Résistance chimique des résines polyesters.

Résistent	Sont attaqués
- acides jusqu'à une concentration de 20 %	- alcalis (saponification)
- sels	- acides réducteurs
- alcools	- cétones
- hydrocarbures à température ambiante	- solvants halogénés

Les résines polyesters résistent en général bien aux acides, à l'eau, aux hydrocarbures aliphatiques. Elles résistent mal aux bases, aux cétones et aux esters.

c) Propriétés mécaniques

Les résines polyester présentent de bonnes propriétés mécaniques surtout en termes de rigidité (module d'Young). En revanche, leur contrainte et allongement à rupture restent inférieurs à ceux des résines époxyde et vinylester (Tableau II-4). Au niveau macroscopique, les résines de stratification sont considérées comme isotropes. Leur comportement dépend de la température. Elles passent de l'état vitreux à l'état caoutchouteux avec une augmentation de température. Ce passage s'effectue dans une certaine plage et une température de transition vitreuse T_g est définie. Comme tous les polymères, les thermodurcissables ont aussi des propriétés mécaniques qui évoluent en fonction de la vitesse de sollicitation (comportement visqueux). Cependant, pour des sollicitations statiques à température ambiante, le comportement mécanique des résines réticulées est modélisable par une loi élasto-plastique.

Tableau II.4: Propriétés mécaniques des principales résines de stratification [30].

Résine	Module d'Young (GPa)	Contrainte de rupture (MPa)	Allongement à rupture (%)
Polyester orthophthalique	3,0 – 4,0	40 – 50	1,5 – 2,2
Vinylester	2,5 – 3,0	60	3,0 – 4,0
Epoxy	2,7 – 3,1	50 – 60	2,5 – 4,0

d) Résistance à la fatigue

Elle est médiocre (adhérence médiocre sur les fibres de renfort, allongement à la rupture trop faible pour suivre les variations des fibres).

e) Dilatation thermique et retrait

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

Cela se traduit par une compression radiale des fibres de renforts.

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

Lors du cycle de durcissement, on a d'abord échauffement de la masse, d'où une dilatation de la résine polyester, puis refroidissement. De plus, il faut superposer à ce 1^{er} phénomène, le phénomène de retrait.

Pour la résine polyester, la dilatation thermique est de $5 \text{ à } 20 \cdot 10^{-5} \cdot \text{K}^{-1}$, et le retrait de la résine est de 5 à 10% à 20°C.

Il faut donc veiller à diminuer l'amplitude des traitements thermiques que subit le mélange résine et fibres lors de la polymérisation afin de réduire les dilatations différentielles et les contraintes qui en résultent.

II.8. Le renfort

Cette seconde partie est consacrée au renfort (fibres de plume) utilisé dans ce travail comme nous l'avons déjà précisé.

II.9. Estimation des volumes de déchets

Les poulets de chair sont des poulets élevés pour leur viande. Le nombre total de poulets de chair dans le monde est estimé à plus de 20 milliards en 2000, dont presque 25% aux Etats-Unis, 14% dans l'UE et un peu moins de 19 % en Chine. La viande de poulet coûtant est moins chère que les autres viandes, elle a vu une augmentation rapide de sa part de marché.

Plus de 4,4 milliards de poulets de chair sont produits chaque année dans l'Union Européenne (UE). La production intensive de viande de poulet est une industrie

internationale, et deux ou trois sociétés fournissent environ 90 % des poulets reproducteurs du monde.

La production avicole à l'échelle nationale et régionale ainsi que l'estimation de leurs déchets de plumes générées sont données dans les tableaux ci-dessous.

Les tableaux (II.5) (II.6) et(II.7) représentent les estimations de ce déchet en Algérie et dans la wilaya de Tizi-Ouzou en particulier.

Tableau II.5: Masse des plumes générées par la production du poulet de chair et des pondeuses à l'échelle national durant l'année 2008/2009.

Wilaya	Poids de plumes générées par la production de poulets de chair (Kg)	Poids de plumes générées par la production de poule pondeuse (Kg)
Chlef	93518	896
Tipaza	93682	2173
Ain Defla	275000	1087
Alger	956447	1523
Blida	122211	2075
Médéa	165418	1599
Boumerdes	313156	4400
Tizi Ouzou	292384	1997
Buira	155555	5391
Bejaia	204907	4892
Tlemcen	198600	2500
Ain Temouchent	66824	559
Sidi bel Abbes	9978	200
Oran	106916	637
Mascara	200787	3798
Mostaganem	100329	2974
Relizane	183269	2309
Jijel	37244	298
Mila	199798	1271
Skikda	67680	594
Constantine	70569	403
Annaba	85340	845
Guelma	48378	770
El Taref	13160	57
Souk Ahras	41202	216
Bordj Bou Arreridj	152100	5568
Stif	29238	6609
Batna	291807	9223
Oum el Bouaghi	107864	978
Khenchla	20316	301
Tébessa	46589	433
Laghouat	12453	125
Djelfa	42133	479

Msila	19933	826
Naama	5667	/
El Bayadh	2340	/
Saida	2573	132
Tiaret	81571	74
Tissemsilt	38731	114
Biskra	25538	883
El Ouad	14320	600
Ouargla	2300	/
Ghardaia	240	3
Bechar	23069	9
Tindouf	1793	115
Adrar	11500	/
Tamanrasset	3449	/
Illizi	/	/
Total	4 039 684	69940

Source : Direction des services agricoles de la wilaya de Tizi Ouzou.

Tableau II.6: Production par année de poulet de chair, de poule pondeuse et de dinde.

Année	Effectifs de poulet de chair	Effectifs de poules pondeuses	Effectifs de dindes
2004/2005	3 389 000	350 000	-
2005/2006	3 712 500	482 000	-
2006/2007	4 434 992	530 000	-
2007/2008	4 935 200	493 000	-
2008/2009	6 818 860	531 378	14 000
2009/2010	5 500 932	/	69 694

D'après le tableau ci-dessus, nous remarquons une nette évolution des effectifs de poulets de chair et une relative à l'évolution assez timide d'effectifs de poules pondeuses avec une légère baisse en 2007/2008. L'effectif de dindes paraît modeste par rapport à celui des poulets de chair et poules pondeuses.

Le tableau (II.7) regroupe la masse des plumes générées par la production du poulet de chair, des poules pondeuses et des dindes dans la wilaya de Tizi Ouzou.

Tableau II.7: Masse des plumes générées par la production du poulet de chair, des poules pondeuses et de dinde dans la wilaya de Tizi Ouzou.

Années	Masse des plumes de poulet de chair générées (Kg)	Masse des plumes de poules pondeuses générées (Kg)	Masse des plumes de dindes générées (Kg)
2004/2005	135 560	14 000	-
2005/2006	148 500	19280	-
2006/2007	177 400	21280	-
2007/2008	197 408	19720	-
2008/2009	272 754	21255	350
2009/2010	1 100 186	1 100 186	13 939

L'analyse des données du tableau ci dessus montre une évolution croissante de quantités de plumes par an, ce qui justifie leur valorisation. Ces plumes, provenant de l'abattage de volaille sont constituées de matière riche en protéines de nature kératinique. Leur décomposition dans la nature en aérobie provoque des dégagements de gaz nocifs et des odeurs nauséabondes. Ce qui peut causer de sérieux problèmes de pollution à l'environnement. Il est alors intéressant de rechercher une synergie technique et écologique pour une meilleure valorisation de ces déchets.

II.10. Définition d'une plume

Les oiseaux sont les seuls êtres à avoir des plumes. Tout à la fois légères, souples et robustes, les plumes sont d'une conception ingénieuse. Elle est bien sûr indispensable au vol, mais elle remplit aussi d'autres fonctions importantes comme celle de maintenir la température interne de l'oiseau.

II.11. Couleurs des plumes

Chez les oiseaux, la couleur des plumes est donnée par une combinaison de couleurs pigmentaires et/ou de couleurs dites de structure.

La couleur pigmentaire comme son nom l'indique est due à des pigments, la mélanine principalement mais aussi des caroténoïdes. La couleur de structure ou couleur physique est donnée par des propriétés physiques de la plume qui modifient la lumière incidente (par la

présence de structures particulières comme des cylindres de kératine par exemple présentes sur les barbes et les barbules des plumes) [35].

II.12.Types de plumes

On trouve plusieurs types de plumes, les principales étant les plumes de contour, de couverture, les semi-plumes et le duvet.

Les plumes de couverture ou pennes sont les plumes visibles, elles donnent la forme aux ailes et au corps de l'animal. L'axe de ces plumes, la hampe, est divisé en une portion portant des vexilles, le rachis, et une portion nue et creuse, le calamus dont l'extrémité proximale est implantée dans le follicule. Les vexilles sont un ensemble de réseaux de barbes. Les barbes forment un angle de 45° avec le rachis, elles se trouvent toutes dans le même plan. De ces barbes partent des barbules. Chez les plumes de contour les barbules d'une barbe s'agrippent aux barbules de la barbe voisine par un système de crochets. Les barbes et les barbules forment ainsi une hampe aplatie, lisse et imperméable. En lissant ses plumes l'oiseau reforme les liens entre les barbules.

Les plumes de contour regroupent: les rémiges sur les ailes (avec les rémiges primaires au nombre de 10 portées par la main et les rémiges secondaires également au nombre de 10 portées par l'avant-bras), les 12 rectrices de la queue, les plumes de couverture (petites plumes à la base des rémiges, des rectrices et autour du canal auriculaire externe) et les plumes couvrant le corps de l'oiseau.

Les semi-plumes ont un aspect pelucheux. Leur rachis est plus long que la plus longue de leur barbe. Elles n'ont pas de barbules. On les trouve en périphérie des ptérylies (plages particulièrement riches en follicules).

Les plumes du duvet ou plumules présentent quant à elles un rachis plus court que la plus longue de ces barbes, ce rachis est même parfois inexistant. Les barbules des plumules sont dépourvues de crochets et se répartissent dans plusieurs plans.

Le duvet est caché sous les plumes de contour. Il intervient dans la régulation thermique et l'imperméabilité du plumage.

Chez les psittacidés, notamment chez les cacatoès, on trouve un duvet modifié dit poudreux. Ce sont de petites plumes à croissance continue, dont l'extrémité se réduit en poudre ressemblant à du talc. La fonction exacte de cette poudre de particules kératine d'environ $1\mu\text{m}$ de diamètre est inconnue, mais elle aurait un rôle important dans l'entretien du plumage.

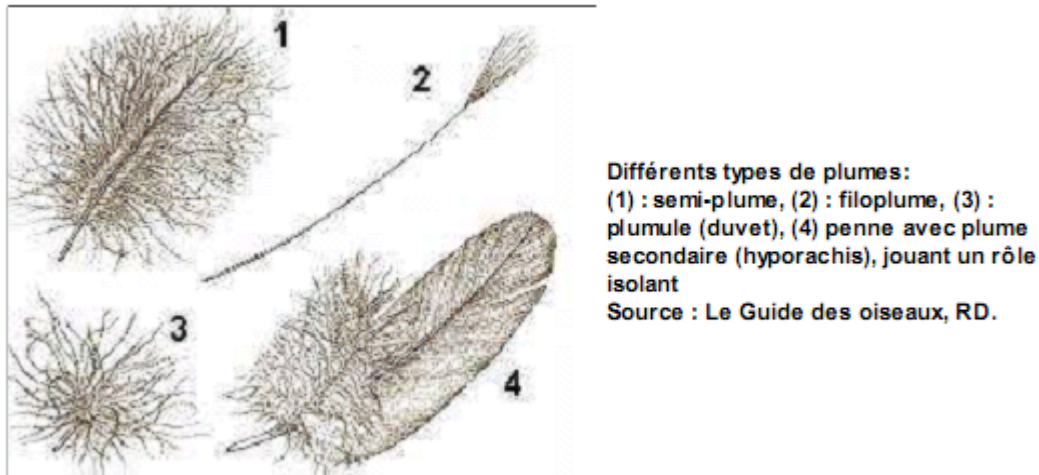


Figure II.9: Différents types de plumes (D'après www.ornithomedia.com).[36]

On trouve ensuite d'autres types de plumes ayant une importance qualitative. Les filoplumes ont un axe long avec une touffe de barbes à l'extrémité (Figure II-8). On trouve au niveau de leur follicule des terminaisons nerveuses. Elles ont un rôle dans l'information sensorielle pour l'orientation des plumes de contour.

D'autres plumes à rôle sensoriel sont présentes au bord des paupières, des narines et du bec, ces plumes ne sont formées que d'un rachis.

II.13. La structure des plumes

La plume est principalement composée de 3 parties distinctes:

- L'axe central de la plume, appelé rachis qui constitue la structure primaire.
- Les barbes, attachées au rachis constituent la structure secondaire.
- Les barbules attachées aux barbares (de manière similaire aux barbes attachées au rachis) constituent la structure tertiaire.

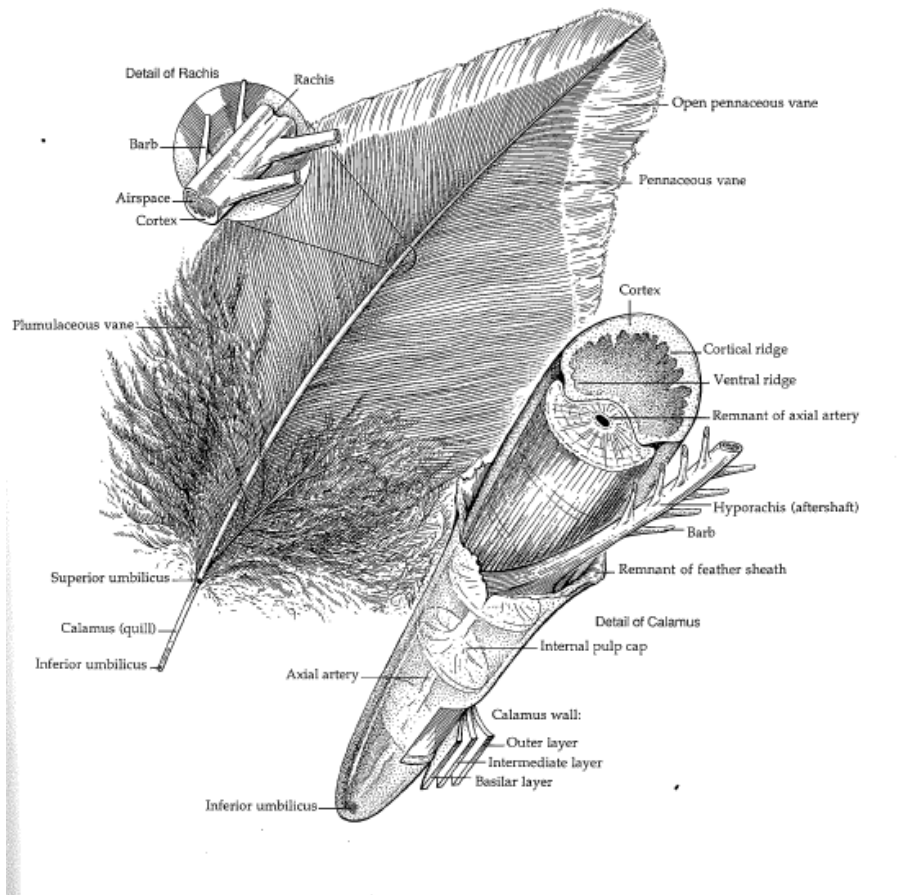


Figure II.10: Structure détaillé d'une plume.

L'axe central de la plume (le rachis) est un cylindre distal plein creuse d'un sillon ventral et terminé à la base par le calamus, présente deux séries latérales de barbes dont l'arrangement rappelle un peigne. Chaque barbe porte à son tour une série de petites structures disposées de la même manière, les barbules. Ces éléments sont maintenus ensemble grâce à une myriade de minuscules crochets qui agrafent les barbules entre elles.

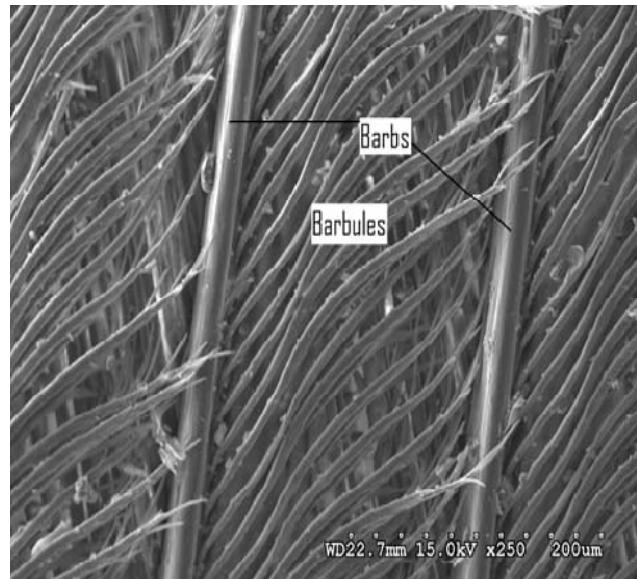


Figure II.11: Image ESEM montrant les structures tertiaires des plumes (les barbules) qui sont attachées aux barbes.

La plume provient d'une papille dermique comme le follicule d'un cheveu chez l'homme. L'ancienne plume doit d'abord tomber pour qu'une petite hampe, semblable à une paille, se mette à pousser. A l'intérieur de ce minuscule tuyau, les barbes et les barbules sont enroulés en spirale. La partie supérieure de la hampe se fend peu à peu, permettant à la plume de se déplier et de prendre forme progressivement.

II.14. Propriétés des plumes

Les plumes de dinde ont une structure et des propriétés uniques absentes dans n'importe quelle autre fibre naturelle ou synthétique.

Leur compressibilité, leur excellente élasticité, leur capacité d'amortir et d'atténuer le son, leur rétention de chaleur ainsi que leur faible densité de 0.8g/cm^3 , comparée à celle de fibres de cellulose ($1,5\text{ g/cm}^3$) et celle de la laine $1,3\text{ g/cm}^3$, font d'elles un excellent renfort pour les matériaux composites [37].

Bien qu'elles ne puissent pas être traitées comme les fibres protéiniques comme la laine ou la soie à cause de la complexité de leur structure, la structure secondaire représentée par les barbes a des propriétés lui permettant d'être très intéressante pour une utilisation comme fibre protéinique naturelle [5].

Ces barbes ont une longueur, une résistance et une flexibilité qui leur permettent d'être utilisées comme fibres naturelles protéiques. De plus, elles ont une coupe transversale unique

qui ne caractérise aucune autre fibre naturelle (laine ou soie). Les barbes sont en forme de nid d'abeilles avec des cellules creuses (cavités) sur une coupe transversale [38].



Figure II.12: Coupe transversale d'une barbe obtenue par ESM [5].

Ces cavités sont efficaces dans l'isolation thermique ou phonique, ce qui permet aux barbes d'être utilisées pour des applications comme composites dans le domaine de l'automobile pour absorber le son. La structure en nid d'abeilles procure une résistance élevée à la compressibilité. La présence de cette structure permet aux barbes d'avoir un poids léger combiné à leur capacité isolante. Sur une coupe longitudinale, les barbes ont une surface fibrillaire mais sont dépourvues d'écailles présentes au niveau de la laine [5].

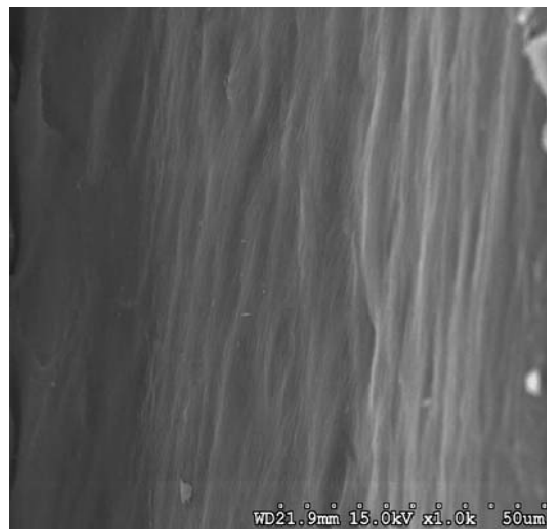


Figure II.13: Surface des barbes présentant une structure fibrillaire dépourvue d'écailles obtenue par ESM.

La présence des barbules attachées aux barbes, permet de fournir une interaction unique avec d'autres fibres lorsque les barbes sont utilisées pour produire des fils hybrides. Les barbules peuvent aussi s'enchevêtrer avec d'autres fibres et améliorer les propriétés mécaniques des composites fibreux. Les barbes sont plus flexibles que le rachis et peuvent être tissées entre

elles, ce qui confère aux fils une bonne cohésion et une durabilité élevée aux tissus fabriqués avec ce matériau [5].



Figure II.14: Fil tissé d'un mélange de barbes et de coton.

La figure ci-dessus montre un fil produit d'un mélange d'environ 70% de coton et 30% fibres de plumes de poulets. Les barbes sont entrelacées et tissées avec les fibres de coton. L'interaction structurelle des barbes, barbules et crochets avec d'autres fibres mélangées, procure un meilleur enchevêtrement et une bonne cohésion des fils.

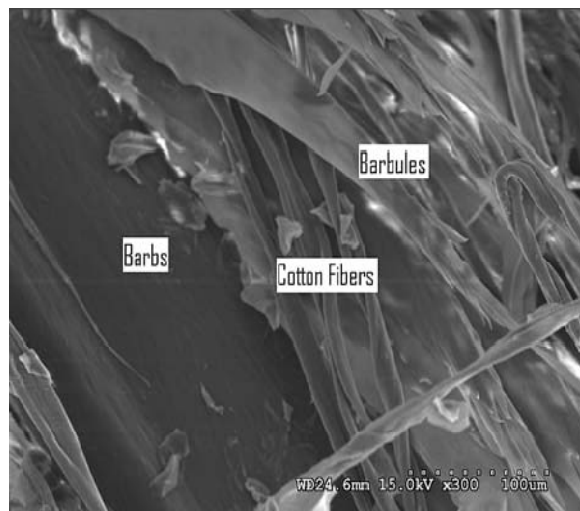


Figure II.15: Image ESM des barbes de plume et du cotton.

II.14.1. Effets de la température et de l'humidité

L'humidité affectera considérablement les plumes. Au-dessous d'une humidité relative de 35%, les plumes dessèchent rapidement. Elles deviennent tout à fait sèches et fragiles, et les bavures interrompent à la plus légère pression. Dans une ambiance à humidité élevée et

prolongée, l'hydrolyse acide est accélérée et même les basses quantités d'acide se trouvant dans la plume causeront une décomposition de la plume.

La chaleur agit en tant que catalyseur dans beaucoup de réactions chimiques. Les températures élevées décomposent les plumes. En général, la température ambiante et les fluctuations quotidiennes ont moins d'effets négatifs sur les plumes que les changements saisonniers de l'humidité. On recommande de garder l'humidité et la température constantes aussi longtemps que possible.

II.14.2. Propriétés physiques des plumes

Certaines propriétés physiques sont reportées sur le tableau ci-dessous.

Tableau II.8: Les propriétés physiques des plumes.

COMPOSITION	70 à 80% de plumes de volailles lavées, traitées à chaud pour être débarrassées des allergènes. Laine de mouton (5 à 10%) et fibres textiles de liage (10 à 20%)
Utilisation	Polyvalente
Densité ⁽¹⁾	20 à 30%
Conductivité thermique ⁽²⁾	0.033 à 0.042
Comportement au feu ⁽³⁾	Difficilement inflammable
Perméabilité à la vapeur d'eau	Hydrophile (sans que cela nuise à son pouvoir isolant)
Prédateurs	Non consommable, possibilité de nidification
Spécificités	Valorisation des sous-produits agricoles, hautes performances thermiques constantes quelque soit le taux d'humidité. Energie grise ⁽⁴⁾ : 55 Kwh/m ³
Performances isolante	Très bonne
Avantage	Abondante et facilement disponible
Inconvénient	Traitement contre les acariens ou autres.

¹⁾ Densités données à titre indicatif, pouvant varier suivant les fabricants et les mises en œuvre.

²⁾ Coefficient lambda donne à titre indicatif. Plus le coefficient est grand, plus le matériau est conducteur. Plus il est petit, plus le matériau est isolant.

³⁾ Selon les classements en vigueur.

⁴⁾ L'énergie grise correspond à l'énergie de fabrication du produit et à son transport jusqu'au lieu de construction.

II.14.3. Les propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des barbes de plumes de dindes ont été comparées à celles de poulets et de laine [5]

Tableau II.9: Les propriétés mécaniques des barbes de plumes de dindes comparées à celles de poulets et de laine.

Fibres	Finesse (denier)	Longueur (cm)	Résistance (g/den)	Gain d'humidité (%)	Allongement
Barbes de plumes de dindes (pennes)	142	5.2	0.83	-	7.96
Barbes de plumes de dindes (duvet)	55.2	4.1	0.36	-	16.42
Barbes de plumes de poulets	76	1.5–4.5	1.44±0.46	9.7	7.7 ± 0.85
laine	11	4.5–11.5	1.2–1.8	16	30–40

Les plumes de dindes ont des barbes d'une longueur en moyenne qui est de 5.2 cm et qui varie selon leur localisation le long du rachis. Cette longueur est plus grande comparativement à celle retrouvée dans les plumes de poulets et plus petite par rapport à celle de la laine ou du coton.

La finesse moyenne des barbes de plumes de dindes est similaire à la finesse des barbes de plumes de poulets, et plus grosse que celle de la laine.

La résistance des barbes de plumes de dindes est plus faible que celle des barbes de plumes de poulet et de laine.

Les fibres de toutes ces plumes ont un allongement plus court que celui de la laine.

Bien que les barbes de plumes de dindes soient plus épaisses que la laine, leur résistance et leur allongement, indiquent leurs propriétés mécaniques similaires à celles de la laine.

Cependant, la structure unique des barbes de plumes de dindes et leur faible densité, font d'elles des matériaux préférés pour plusieurs applications. Mélanger des fibres de faible densité à d'autres fibres naturelles à densité relativement élevée, crée des interactions leur conférant des propriétés mécaniques uniques.

II.14.4. Les propriétés chimiques

Afin de bien comprendre les propriétés chimiques du renfort utilisé dans le cadre de cette étude, nous sommes nous intéressés à sa composition en termes d'acides aminés de la kératine.

II.14.4.1. Les acides aminés

➤ Structure des acides aminés

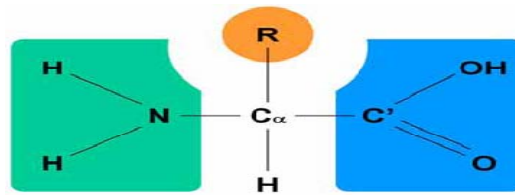


Figure II.16: Formule chimique générale des acides aminés

Un acide aminé est un composé organique contenant un groupement amine (NH₂) et un groupement acide carboxylique (COOH). Les acides aminés sont les unités de base de construction des protéines. Ils forment soit des chaînes courtes d'acides aminés appelés peptides (si la chaîne est inférieure à 50 acides aminés), soit des chaînes longues appelées polypeptides ou des protéines (si la chaîne est supérieure à 50 acides aminés). Ces polymères sont linéaires et non ramifiés.

Les 22 acides aminés les plus connus et leur fonction sont données dans la figure ci-dessous.

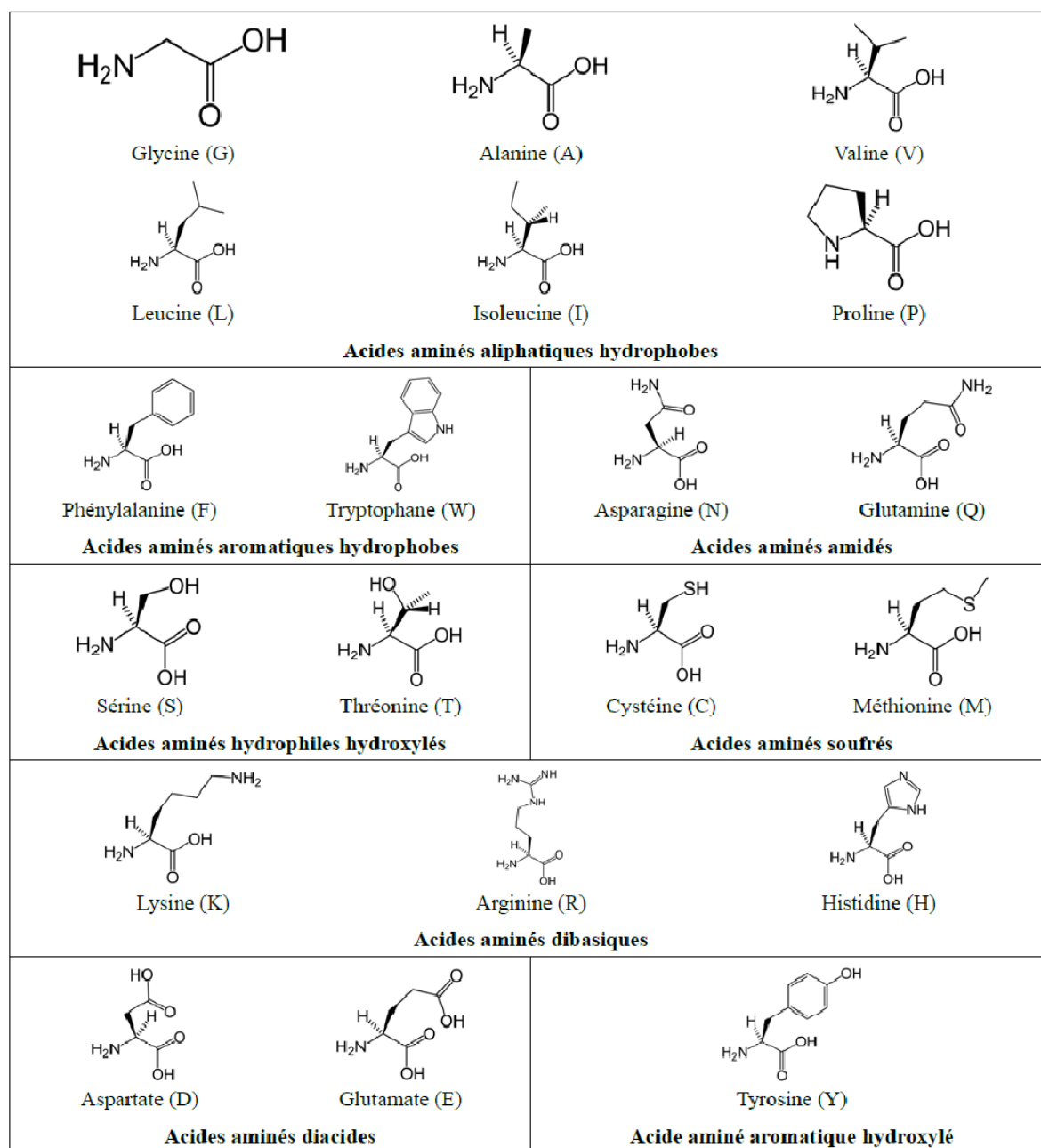


Figure II.17: Les 20 acides aminés (Le nom de chaque acide aminé peut être abrégé selon un code à trois lettres ou à une lettre).

II.14.4.2. Les protéines

Une protéine est une macromolécule biologique qui peut être composée d'une ou de plusieurs chaînes d'acides aminés (qui ne sont pas ramifiées mais bien associées) et en générale, elle comporte plus de 100 acides aminés. Elle représente 50% du poids d'une cellule et l'azote représente 16% de sa masse.

Selon leurs compositions, il existe les holoprotéines qui sont composées que d'acides amines, des hétéroprotéines possédant une partie prosthétique (non protéique telle que l'hème de l'hémoglobine).

De plus, selon leurs formes, il existe des protéines fibreuses ou scléroprotéines.

II.14.4.2.1. Les protéines fibreuses

Les protéines fibreuses sont appelées protéines structurales car elles constituent le principal matériau de construction chez les Vertébrés. Elles sont linéaires, insolubles dans l'eau et d'une grande stabilité (support mécanique aux tissus et résistance à la traction).

Les principales protéines fibreuses sont le collagène, la kératine, le fibrinogène et les protéines musculaires [39].

II.14.4.3. La kératine

La kératine est une protéine, synthétisée et utilisée par de nombreux êtres vivants comme éléments de structure, et également l'exemple-type de protéine fibreuse.

Chargée de protéger l'organisme contre l'environnement extérieur, la kératine est totalement insoluble dans l'eau. Ses nombreuses liaisons disulfures en font une protéine extrêmement stable, capable de résister à l'action des enzymes protéolytiques [39].

II.14.4.4. Type de kératine

Il y a deux types de kératines : l'alpha-kératine, ou α -kératine, présente chez les mammifères notamment, dont l'humain, et la beta-kératine, ou β -kératine, que l'on retrouve chez les reptiles et les oiseaux. Ces deux types de kératines ne présentent clairement pas d'homologie de séquence [40].

1- La beta-kératine

Notée β -kératine, est un énantiomère de l'alpha-kératine. Elle est, par sa structure, plus rigide que cette dernière. On ne trouve cette kératine que chez les reptiles et donc également les oiseaux. La beta-kératine imprègne la stratum corneum de la peau des reptiles, la rendant imperméable et résistante aux attaques de l'extérieur, la beta-kératine est plus résistante que l'alpha-kératine [40].

2- L'alpha-kératine

Les α -kératines recouvrent l'épiderme et forment les ongles des primates, les griffes des autres animaux, et les cheveux, ces derniers sont très riches en hélice α .

Ce sont de longs segments de 311-314 acides aminés en hélice α entourés d'extrémités N- et C- terminales non hélicoïdales. La structure primaire des régions en hélice est constituée de répétition de sept résidus (a-b-c-d-e-f-g) n, où a et d sont polaires (favorise les interactions entre plusieurs chaînes). Il n'y a pas de proline mais une grande richesse en cystéine. Ces protéines sont rigides, offrent une grande résistance à l'étirement.

Les acides stabilisant l'hélice α sont la leucine, la phénylalanine et le tryptophane grâce à leurs interactions hydrophobes.

Les acides aminés déstabilisant l'hélice α sont les diacides et les dibasiques à cause de leurs charges ainsi que la valine, l'isoleucine et la thréonine qui sont substituées en bêta. Il y a également la proline qui va carrément entraîner une rupture de l'hélice à cause de sa chaîne latérale cyclisée.

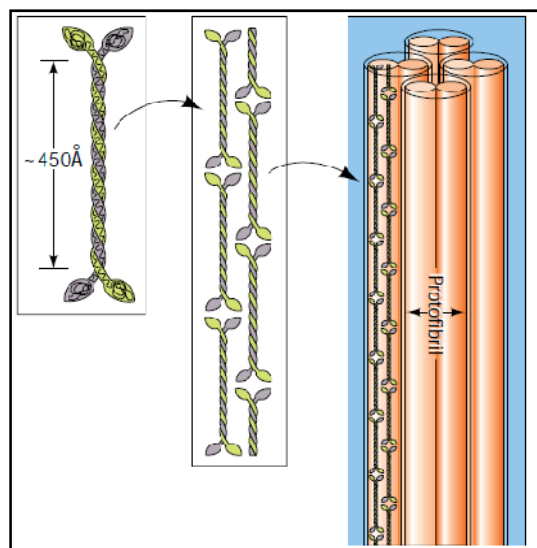


Figure II.18: Structure de la keratine alpha [41].

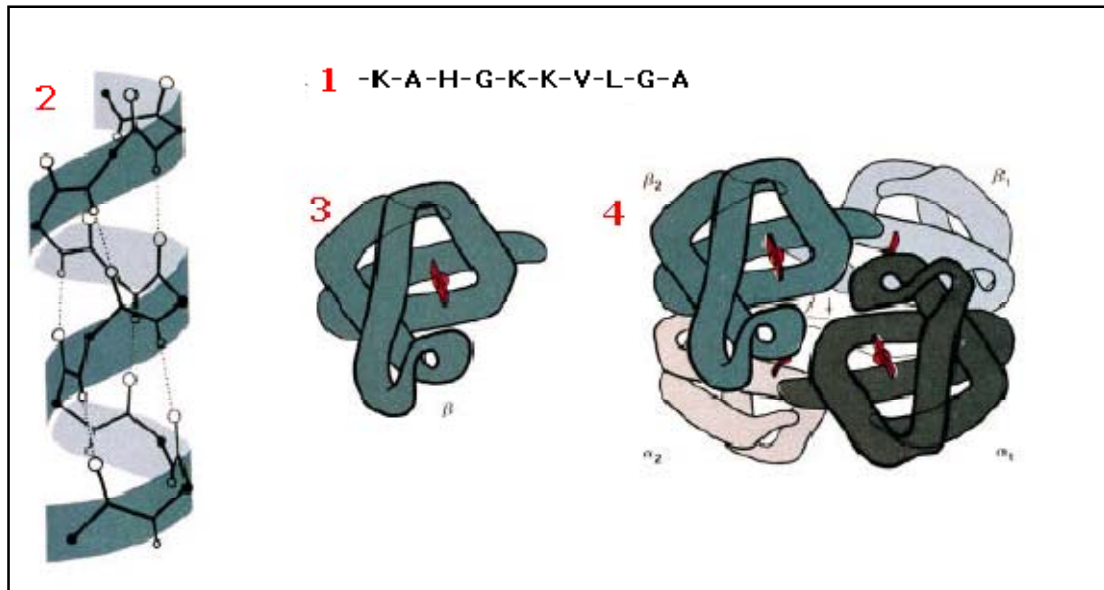


Figure II.19: Différents niveaux de description d'une protéine : primaire (1), secondaire (2) (exemple d'une hélice α), tertiaire (3) et quaternaire (4).

II.14.4.5. La kératine dans la fibre de laine

La structure protéique étant liée à la composition en acides aminés, nombreuses sont les études qui s'intéressent à leur identification et au séquençage des protéines. Ainsi, selon les publications, sont identifiés pour une fibre de laine, 17 ou 18 des 20 acides aminés naturels, formant plus de 170 protéines différentes réparties de façon non uniforme tout au long de la fibre et dont, à ce jour, seules 28 ont été séquencées [42] [43] [44][45] [46].

De façon plus globale, trois principales classes de protéines sont identifiées : les protéines riches en élément S, c'est-à-dire riche en résidus méthionines (Met) et cystéines (Cys), les protéines pauvres en élément S et les protéines riches en acides aminés glycine (Gly) et tyrosine (Tyr) [47]. Celles-ci sont présentes dans les différentes composantes structurales des fibres.

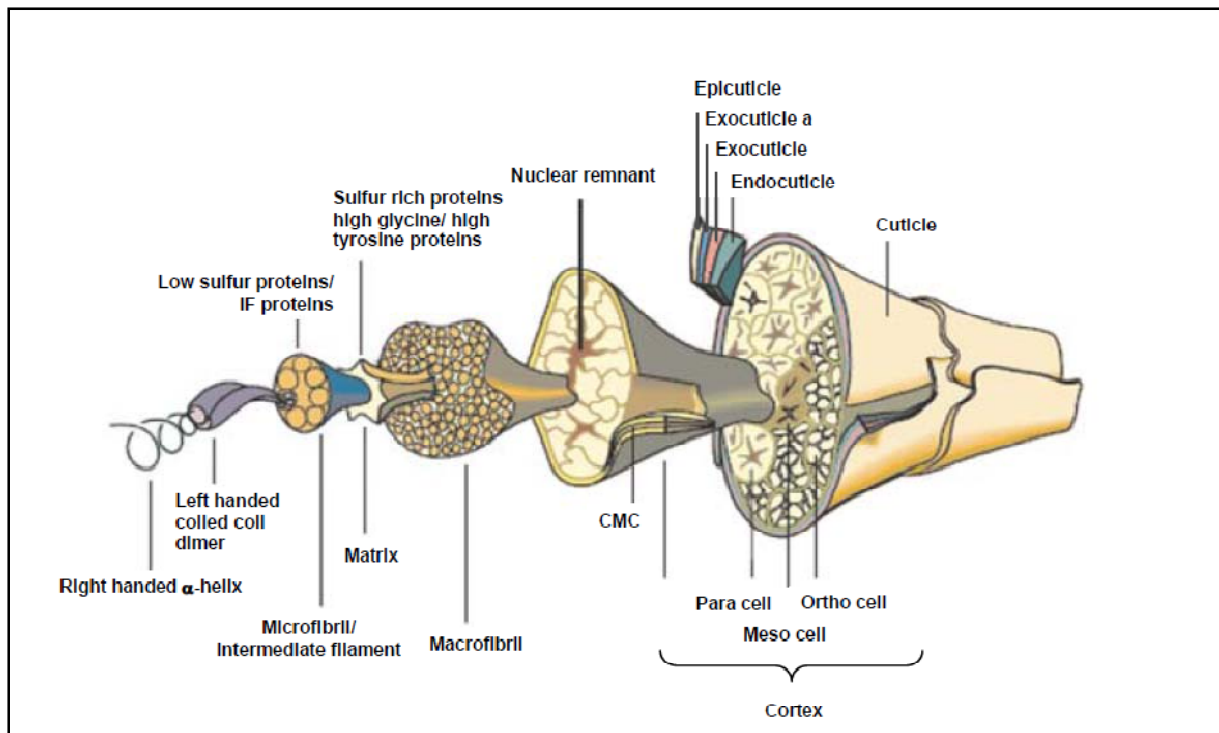


Figure II.20: Schéma d'une fibre de laine.

D'un diamètre d'environ 20 mm, la fibre est composée de deux types de cellules, les cellules de la cuticule, ayant la forme d'écailles se chevauchant les unes les autres, qui entourent le cortex composé de cellules fibreuses [48].

II.14.4.6. La kératine et les cheveux

Le cheveu est constitué à 95% de kératine, le reste étant essentiellement des graisses. Il y a aussi un peu de colorants.

La kératine peut présenter des zones non hélicoïdales (kératine étirée) mais c'est moins fréquent. Dans le cheveu on a :

- des protofibrilles : quelques brins de kératine en hélices, les hélices étant liées les unes aux autres et torsadées (comme une corde). .
- des ensembles de protofibrilles agglomérées et torsadées formant des microfibrilles "parallèles".
- ces microfibrilles sont enserrées dans une enveloppe externe, formée d'écailles de kératine, cette kératine est très rigide car les molécules sont tenues entre elles par des ponts disulfures très solides.

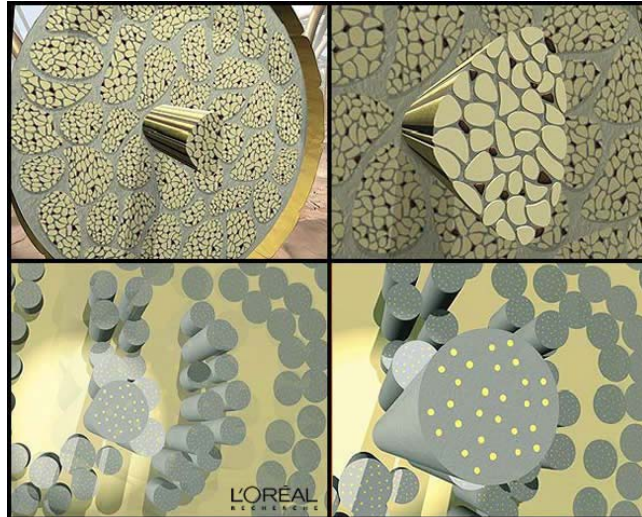


Figure II.21: Les macrofibrilles de kératine avec les pigments de mélanine qui déterminent la couleur du cheveu. Les macrofibrilles sont elles-mêmes composées d'un agglomérat de microfibrilles. Chaque microfibrille apparaît comme un arrangement d'éléments enroulés en torsade, les protofibrilles [l'Oréal].

➤ Propriétés

La chevelure comporte 120 000 à 170 000 cheveux d'environ 80 μm de diamètre

- grande résistance mécanique : un cheveu supporte une masse de 5 à 10 g.
- cheveu un peu élastique : les molécules de kératine sont un peu étirables car les molécules peuvent glisser un peu les unes sur les autres et la forme de départ est reprise quand la tension cesse.
- cheveu hygroscopique : peut absorber jusqu'à 30% de sa masse d'eau. Les molécules d'eau s'insèrent entre les molécules de kératine, et une partie des liaisons est coupée. L'évaporation de cette eau à chaud provoque la formation de liaisons un peu différentes de celles qui étaient au départ : c'est le "brushing".
- le cheveu peut aussi absorber des molécules non polaires comme les graisses qui se lient aux parties non polaires de la kératine (chaînes hydrocarbonées) [49].

II.14.4.7. Les cornes

Les kératines, constituants principaux de l'écaille et la corne, sont synthétisées par l'épiderme dans sa couche interne. Les cellules migrent graduellement à partir de cette couche jusqu'à la couche cornée dont la partie supérieure est formée par ces mêmes cellules mortes. Les kératines sont constituées de deux types de protéines. Les premières ont une structure

filamenteuse. Leur élément de base est constitué de deux polypeptides formant chacun une structure compacte avec une conformation en hélice α . Ces deux hélices s'enroulent l'une sur l'autre pour former une superhélice, stabilisée par des liaisons covalentes (ponts disulfures), formant des résidus cystines. La rigidité de ces protéines est due à la présence des ponts disulfures. Les cornes font partie de la classe des kératines dures [50].

C'est une protéine d'une structure moléculaire bien fermée, stabilisée par des ponts disulfures, interaction hydrophobes et liaisons hydrogène. Grâce à cette structure elle est insoluble et résistante à la dégradation par les enzymes protéolytiques.

Elle représente plus de 90% du poids total des plumes, la majorité de cette kératine est sous forme de feuillets β empaqués dans une chaîne polypeptidique avec un taux élevé de ponts disulfures entre les résidus cystéine [51], et constituée de 4,2 à 7,6% de cystéine [52] ; [53];[54].

Le reste est représenté par la kératine α sous forme de chaînes polypeptidiques étroitement associées en paires d'hélice α [55].

II.14.4.8. La kératine des plumes

La structure particulière de la kératine des plumes lui confère une stabilité mécanique élevée (Parry DAD et North ACT, 1998)[56]. Elle est composée d'un pourcentage élevé d'acides lysine, méthionine et tryptophane (Grazziotin A et al. 2005).[57]

Elle est constituée dans sa structure de 40% de groupements chimiques hydrophiles et 60% hydrophobes.

La structure de la kératine α contient des liaisons hydrogènes intra moléculaires entre l'amide et les groupements carbonyles dans le polypeptide. La kératine α contient des liaisons hydrogènes inter chaînes entre l'amide et les groupements carbonyles. Les hélices peuvent se compacter pour former des cristaux. La structure semi-cristalline des fibres de kératine aboutit à la formation d'un polymère.

La distance entre deux hélices α est de 0,3nm [40].

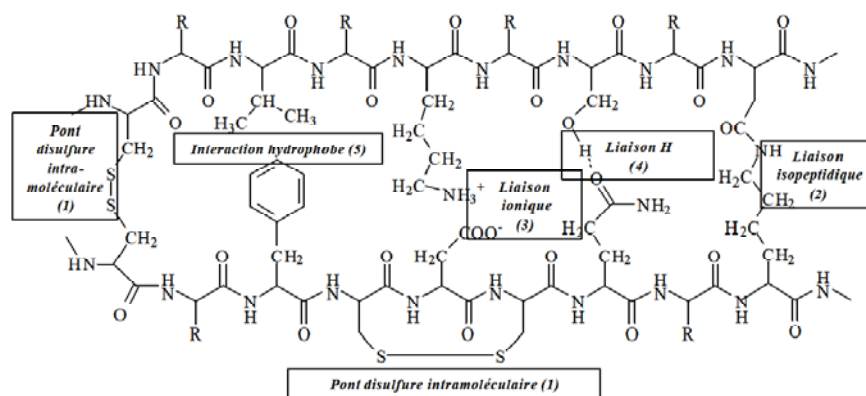


Figure II.22: La keratine β de la plume [58].

II.15.1. Composition chimique de la kératine des plumes

Le tableau suivant représente la teneur en azote, soufre et cendre des différentes parties de la plume.

Tableau II.10: Teneur de la plume en azote, soufre et cendre (minéraux).

	N %	Soufre (S) %	Cendre (%)
Rachis	16,62	2,47	0,87
Calamus	16,40	2,32	0,8
Barbe	16,28	2,85	0,86
Medulla	16,36	2,40	0,77

II.14.4.9. Composition en acides amines de la kératine des plumes

Les acides amines, dont est constituée la kératine des différentes parties de la plume, sont représentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.11: Composition en acides amines ($\mu\text{mole/g}$) des différentes parties de la plume [59].

Acides amines	Rachis	Calamus	Barbes	Medulla
Ala	840	729	446	655
Arg	370	371	384	389
Asp	547	534	519	537
Cystine	39	23	36	24
Cysteine	722	686	732	670
Glu	671	698	686	684

Gly	1326	1171	970	1156
His	23	20	17	24
Ile	308	280	383	313
Leu	802	664	605	720
Lys	62	52	71	65
Met	8	13	15	18
Phe	301	319	296	330
Pro	948	885	1056	891
Ser	1365	1299	1236	1363
Thr	401	345	437	366
Try	72	77	22	75
Tyr	139	143	118	147
Val	756	673	705	684

II.14.10. Rôle de la cystéine dans la constitution de la kératine

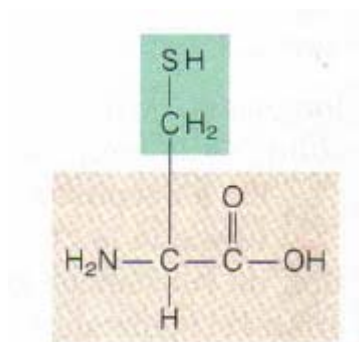


Figure II.23: Formule chimique d'une cystéine.

Dans des conditions oxydantes, une cystéine forme fréquemment un pont disulfure avec une autre cystéine (réaction d'oxydoréduction) pour donner un dimère appelé cystine. Les cystéines contribuent à maintenir et assurer une cohésion de la structure tridimensionnelle de la chaîne polypeptidique de la kératine [60].

Ce chapitre est constitué de deux parties, la première partie présente les constituants de matériau composite et son mode d'élaboration. Quant à la deuxième partie, elle expose les techniques expérimentales de caractérisation utilisées telles que les essais mécaniques et thermiques, la technique de caractérisation physique et les techniques d'analyse au MEB.

III.1. Présentation des matériaux

III.2. Constituants

La résine polyester insaturé utilisée est de marque (RESIMER 55 E-1323) fabriquée par l'entreprise EUROMERE, à base d'acide orthophtalique. Cette résine est catalysée à l'aide d'une solution de peroxyde (durcisseur), nommée P MEC50 à raison de 2% en masse.

Le durcisseur est une solution à 50% de masse de peroxyde de méthylethylcétone dans le diméthylphtalate titrant 9% à 9,2% d'oxygène actif. Cette résine est utilisée dans la fabrication des barques et chalutiers de pêche principalement, mais aussi dans la fabrication des bibelots décoratifs et la réparation des pare-chocs d'automobiles.

Les caractéristiques de la résine utilisée avec son durcisseur sont représentées dans les tableaux (III-1) et (III-2) ci-dessous.

Tableau III.1: Caractéristiques de la résine RESIMER 55 E-1323 (fiche technique).

Caractéristiques avant ajout de Catalyseur		Caractéristiques après ajout de Catalyseur	
Densité	1.11	Retrait en volume	6.5 %
Teneur en styrène	30%	Resistance rupture de flexion	90 MPa
Viscosité à 28 C	500 cPo environ	Module d'élasticité en flexion	3.1 GPa
Indice thixotropie	1.8 à 2		
Couleur	Bleue		

Tableau III-2 : les caractéristiques du catalyseur P MEC 50.

Caractéristiques du catalyseur	
Densité à 20 C	Environ 1.14 g/cm ³
Oxygène actif	9.0-9.2 (% massique)
Température de stockage	25C max
Couleur	Claire
Stockage	6 mois

Nous avons utilisé comme renfort, des fibres de plumes de dinde. Les plumes ont été récupérées auprès d'abattoir de volailles de Bordj M'nail.

III.3. Traitement des fibres

Après un lavage au détergent, un rinçage à l'eau en abondance et un séchage à l'air libre de ces plumes, nous avons séparé les barbes du rachis à l'aide d'une paire de ciseaux. Les barbes récupérées ont ensuite subi un traitement mécanique par cardage afin de séparer les barbes qui sont liées par les barbules pour obtenir des fibres. Enfin ces fibres ont été coupées en plus courtes avec une longueur moyenne de 5 mm. La figure ci-dessous montre les différentes étapes du traitement mécanique subi par les plumes.



a) Les plumes après lavage



b) fibres de plumes



c) les fibres après cardage

Figure III.1: Présentation des plumes avant et après traitement.

Dans ce travail, nous avons utilisé d'autres renforts comme les fibres synthétiques et les fibres imbibées de paraffine.

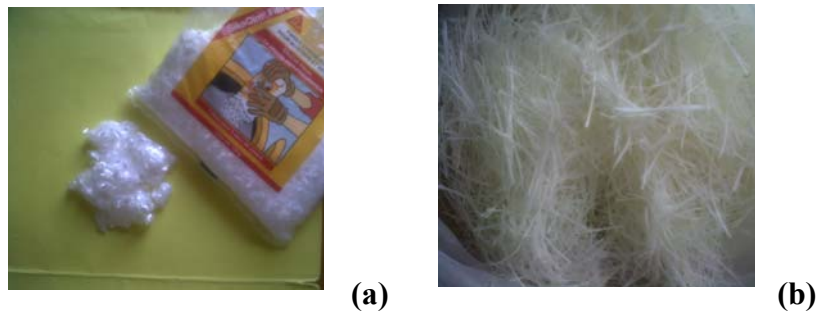


Figure III.2: Images des autres fibres utilisées **a)** fibres synthétiques **b)** fibres avec paraffine.

III.3.1. Préparation des fibres de dinde avec paraffine

La paraffine est un matériau à changement de phase



Figure III.3 : Image montrant la procédure de l'expérience.

Les fibres paraffines sont préparées comme suit:

- Verser la paraffine dans un buccale.
- Chauffer la paraffine sur une résistance
- Verser les fibres, préalablement pesées (m_0), sur la paraffine en fusion mélanger le tout et laisser ces fibres au moins deux heures de temps pour une bonne imprégnation de la paraffine dans la structure poreuse des fibres (contrôler).
- Verser le mélange fibres-paraffine dans une passoire et récupérer la paraffine liquide sur un plateau.
- Reverser les fibres pour fusion de paraffine en surface

- Refaire l'opération au moins trois fois pour s'assurer que la paraffine de surface soit enlevée

Précautions à prendre: ne laisser aucune fibre dans la paraffine

-Peser les fibres imbibées de paraffine (m)

$$m_{pa} = m - m_0$$

Avec : m_{pa} est la masse de la paraffine absorbée par les fibres.

Tableau III.3: Masses des fibres seules et fibres avec paraffine.

	m_0 (g)	m (g)
Premier essai	15,10	37,56
Deuxième essai	15,32	40.16
Total	30,42	77,72

D'après les résultats du tableau ci-dessus, nous avons obtenu un pourcentage de 60,85 % de paraffine imprégnée dans la structure poreuse des fibres.

III.4. Conception et fabrication du moule

A fin de réaliser nos matériaux, nous avons élaboré un moule en verre. Le moule est constitué de deux plaques de dimensions (320x320x4 mm³) chacune et de quatre barrettes de dimensions de (320x10x4 mm³) délimitant la plaque composite de dimensions (300x300x mm³).

Le choix de la dimension du moule est porté sur les besoins des essais de conductivité réalisés sur un CT mètre dont la dimension des plaques est fixée a 300x300 mm².

Des feuilles plastiques sont appliquées sur les plaques en verre à fin de faciliter le démoulage des plaques composites.



Figure III.4: Image représentant le moule en verre.

III.5. Elaboration des matériaux

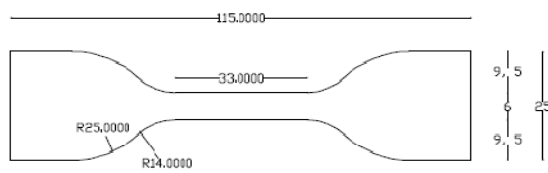
Les composites ont été élaborés au laboratoire de recherche LMSE de notre université. Ils se présentent sous forme de plaques de dimensions (300x300x4 mm³) mises en œuvre par la technique de moulage par contact.

Le mélange résine/durcisseur est effectué en respectant les proportions inscrites sur la fiche technique du produit (EUROMER).

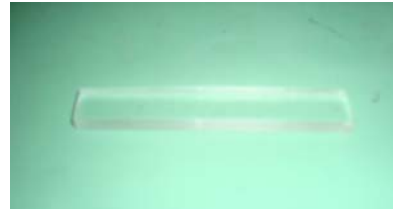
La préparation de la plaque en résine seule est faite comme suit: après avoir calculé le volume nécessaire au remplissage du volume total du moule, on ajoute à la résine la quantité qu'il faut du durcisseur et on mélange bien à l'aide d'un agitateur de type Ika-Werk à vitesse de rotation réglable et hélice en acier inox, le mélange est versé dans le moule préalablement préparé.

La plaque supérieure du moule y est déposée soigneusement et pressée à l'aide d'une masse déposée sur cette dernière. Après 24 h les plaques sont démoulées selon la norme et laissées 8 h à l'étuve à 40 °C avant de les découper.

A partir de ces plaques, les éprouvettes utilisées pour les essais mécaniques sont usinées en forme d'haltères pour la traction et en forme parallélépipédique pour la flexion aux cotés désirées selon la norme () à l'aide d'une fraiseuse à commande numérique. Afin de limiter les échauffements liés à l'usinage, des vitesses d'avance et des profondeurs de passe modérées sont adoptées. Ce protocole permet d'obtenir des éprouvettes présentant un très bon aspect de surface, paramètre déterminant pour réaliser des essais mécaniques corrects.



a)



b)

Figure III.5: Images des éprouvettes d'essais a) éprouvette de traction b) éprouvette de flexion.

Le composite est préparé comme suit: après calcul de la masse totale du composite, on en déduit les masses de la résine et du renfort à mélanger.

Dans un premier temps, nous avons utilisé comme renfort des fibres courtes de dimension 5 mm en moyenne, puis nous avons utilisé des fibres avec leur longueur initiale comme composite. Les plaques composites ont été élaborées dans les mêmes conditions que le témoin.



Figure III.6: a) Image de la plaque témoin **Figure III.6:** b) Image de la plaque composite avec 1% de fibres (% w/w).



Figure III.6: c) Image de la plaque composite avec 3% de fibres (% w/w)



Figure III.6: d) Image de la plaque avec 5% de fibres (% w/w)



Figure III.6:e) Image de la plaque composite avec 7% de fibres (% w/w)



Figure III.6: f) Image de la plaque avec 3% de fibres synthétiques (% w/w)



Figure III.6: g) Image de plaque composite avec 3% de fibres paraffinées.

III.6. Techniques d'analyse

III.6.1. La microscopie électronique à balayage (MEB)

Nous avons opté pour le MEB afin d'approfondir l'observation des différentes parties de la plume de dinde pour mieux décrire sa morphologie à l'échelle microscopique.

Cette étude nous a permis d'identifier les structures primaire, secondaire et tertiaire qui composent la plume. Le MEB nous a permis aussi d'observer la surface de rupture de notre composite après les essais mécaniques.



Figure III.7: Image du MEB.

Le microscope électronique à balayage du laboratoire est de type PHILLIPS ESEM XL 30. La microscopie électronique est une technique basée sur le principe des interactions électrons-matière, capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon. Un faisceau d'électron focalisé est dévié à travers des lentilles électromagnétiques, balaie la surface de l'échantillon à analyser qui, en réponse, réémet différents types d'émissions.

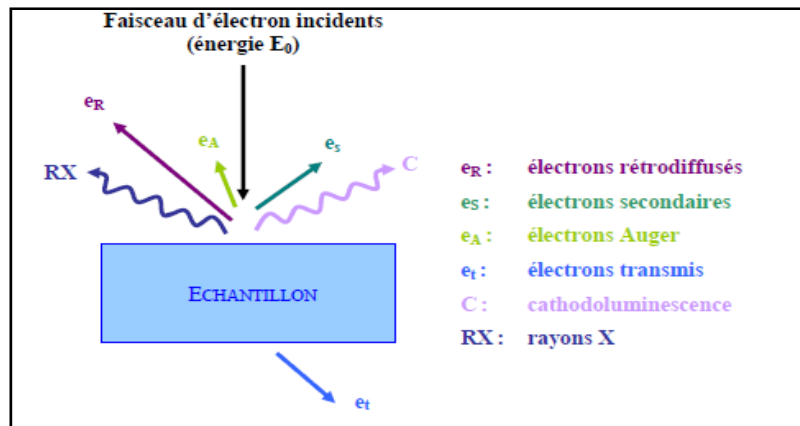


Figure III.8: Représentation schématique des interactions faisceau -surface d'échantillon

Chaque type d'électron est recueilli sélectivement puis analysé par différents détecteurs qui permettent de reconstruire une image en trois dimensions de la surface.

II.6.2.1. Les constituants du MEB

Le microscope électronique à balayage se compose :

1. d'un système optique décomposé en :
 - ✓ une source d'électrons composée d'un filament en tungstène,
 - ✓ un faisceau électronique,
 - ✓ un système de lentilles de focalisation et de condensation,
 - ✓ un contrôle électronique pour déplacer le faisceau afin de faciliter l'alignement ou afin d'élaborer l'image,
 - ✓ un système de balayage pour contrôler le grossissement
2. d'un système de visualisation et d'enregistrement des images produites comportant :
 - ✓ un détecteur des électrons rétrodiffusés et d'électrons secondaires qui repère le signal généré par l'interaction du faisceau d'électrons et l'échantillon, puis l'amplifie en le convertissant en signal électrique,
 - ✓ un système informatique.
3. d'une pompe à vide munie d'un capteur permettant de faire le vide plus ou moins poussé car les électrons ne se déplacent librement que dans le vide.
4. d'un support d'échantillons.

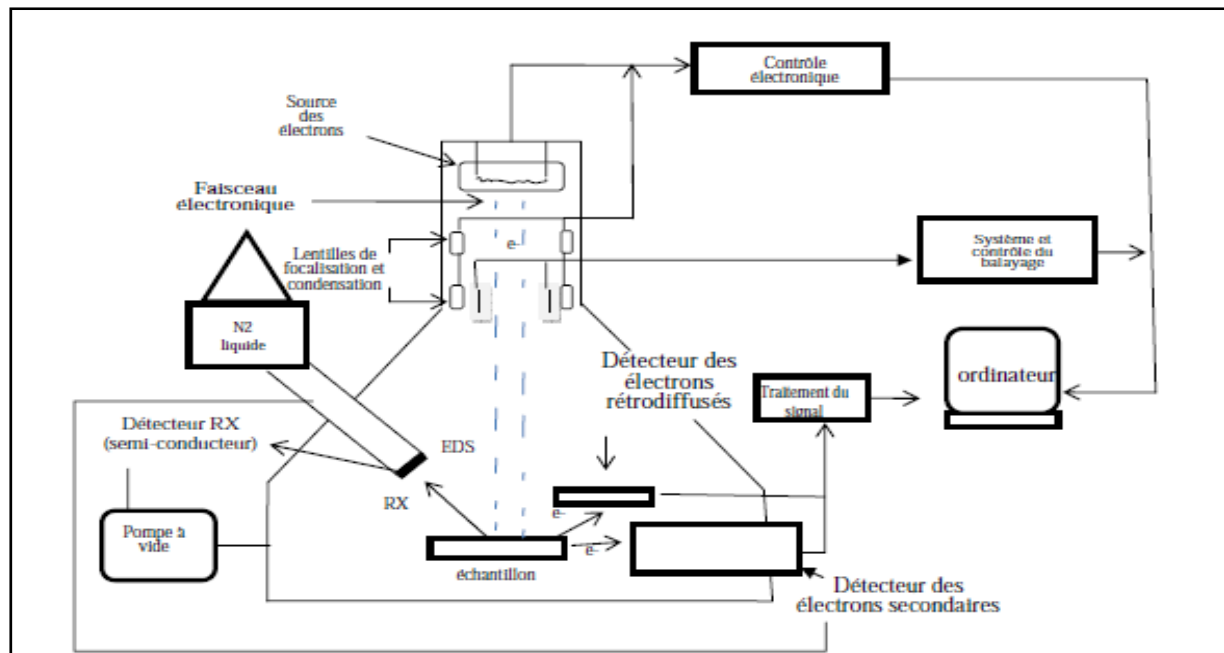


Figure III.9: Schéma du microscope électronique à balayage.

II.6.2.2. Système de fixation

Une fois préparé correctement, l'échantillon doit être introduit dans la chambre objet du microscope et fixé sur un support adéquat.

La nature du support à la manière de le fixer sur ce support dépend à la fois de la nature de l'échantillon (échantillon massif, échantillon mince, poudre ou poussières ...) et du type d'observation et/ou d'analyse [62].

Dans le cas d'une observation topographique d'un échantillon massif, ces derniers sont dispersés sur un porte échantillon à l'aide d'une laque conductrice (laque à l'argent ou au carbone) ou éventuellement d'un ruban adhésif double face [62] (Jackey Ruste, 2007)

Ces plots sont placés sur le support d'un métalliseur.

Les atomes s'ionisent alors et se déposent à la surface de l'échantillon. L'épaisseur de la couche d'or déposée dépend du temps de dépôt mais ne dépasse pas 10 Å. La chambre du métalliseur est ensuite ramenée à pression atmosphérique puis les échantillons sont introduits dans la chambre du microscope. Selon le type d'échantillon à analyser, les conditions opératoires peuvent changer.

En général, une distance de travail entre le bas du canon et l'échantillon comprise entre 10 et 12 mm est retenue. Une tension d'accélération des électrons variant entre 10 et 15 kV est généralement admise, de même qu'un courant de sonde compris entre 50 et 150 A.

Les résultats de notre étude seront développés dans le chapitre résultats et discussion.

Selon le type d'échantillon à analyser, les conditions opératoires peuvent changer. En général, une distance de travail entre le bas du canon et l'échantillon comprise entre 10 et 12 mm est retenue.

Une tension d'accélération des électrons variant entre 10 et 15 kV est généralement admise, de même qu'un courant de sonde compris entre 50 et 150 A. Les résultats de notre étude seront développés dans le chapitre résultats et discussion.

III.7. Techniques de caractérisations mécaniques et thermiques

III.7.1. Essais de traction

Les essais mécaniques, menés sur les différents types d'éprouvettes, sont réalisés à température ambiante sur une machine de Zwick/Roell, au niveau du laboratoire de recherche des composites (Université de Boumerdes). La machine utilisée est de type (**ZWIK 250**), cette dernière est constituée de deux compartiments traction et flexion, elle est commandée automatiquement par un micro-ordinateur ou manuellement par la boîte de commande située sur la colonne droite de la machine.



Figure III.10: Images de la machine de traction et de l'éprouvette sur banc d'essai.

III.7.2. Essais de flexion

Les essais de flexion sont effectués sur une machine universelle Zwick de type Z250/SN5A dotée d'un capteur de force de 2,5 KN. Celle-ci est reliée à une chaîne d'acquisition qui permet l'enregistrement simultané de la force et du déplacement.

De même, la machine est pilotée par un ordinateur (Logiciel TestXpert V9.0) (figure 3.1). Cinq éprouvettes au moins sont testées pour chaque type de sollicitation avec une vitesse d'essai de 2 mm/mn.

Les résultats obtenus, sur cette machine universelle ('Zwick' de type Z250/SN5A) présentent un avantage considérable pouvant nous permettre d'avoir un champ d'application assez vaste dans différents types de domaines.



Figure III.11: photos de la machine de flexion et de l'éprouvette sur banc d'essai.

III.7.3. CT mètre

III.7.3.1. Description de l'appareil

Une armoire à charnière en fibres de verre abrite les composants principaux de l'ensemble. La section de base de l'armoire contient le débitmètre thermique et la plaque froide installée sur quatre ressorts. Cet ensemble est refroidit à l'aide d'eau à température stable de manière à ce que la plaque soit sensiblement isothermique.

Le débitmètre thermique donne une sortie en mV, proportionnellement à la différence de température sur ses deux surfaces.

Le couvercle de l'armoire abrite la plaque chaude chauffée électriquement. Elle est contrôlée de manière électronique à une température de consigne et l'entrée de température est indiquée par un voyant rouge clignotant. La plaque est levée et abaissée par le mécanisme à poigne à vis situé en haut de l'armoire.

Un indicateur à cadran permet de déterminer la hauteur de spécimen testé le mouvement de la plaque chaude permet d'utiliser des spécimens d'une épaisseur jusqu'à 75 mm. La plaque chaude est protégée par un interrupteur de haute température (70 °C).

Une isolation en mousse entoure l'ensemble de débitmètre thermique. Une isolation similaire se trouve sur le couvercle, ainsi qu'un espace d'air stagnant autour de l'ensemble de la plaque chaude, pour empêcher la perte de chaleur.

III.7.3.2. Méthode d'essai

Les matériaux de construction et d'isolation les plus courants peuvent être testés dans le TCU 100, dans la mesure où une épaisseur adéquate est utilisée de manière à ce que la résistance thermique (R) soit entre 0,1 et 1,4 m²k/w.

En général, plus le matériau utilisé est isolant, plus le spécimen devrait être mince, sinon la durée du test sera longue à cause du temps nécessaire pour obtenir des conditions de régime permanent.

Pour les spécimens d'une résistance inconnue ou d'une faible résistance thermique (soit <0,8 m²k/w) les feuilles de caoutchouc ou silicone fournies doivent être placées de chaque côté du spécimen et les constantes appropriées utilisées pour déterminer la valeur de λ .

Le but des feuilles de caoutchouc est d'éliminer les espaces d'air éventuels entre le spécimen et la plaque chaude et la plaque froide, et elle devrait par conséquent être utilisée pour tout spécimen qui n'a pas de surface lisse. La plage réglable de T1 est de 0 à 70 °C. La plage réglable de T3 est de 0 à 40 °C.

Cependant, ce ne sont que les plages qui peuvent être saisies dans le contrôleur, les valeurs réelles que l'on peut obtenir dépendront des conditions ambiantes et de l'utilisation ou non du refroidisseur ou de l'eau de secteur.

On dit que les conditions de régime permanent sont obtenues lorsque 5 lectures consécutives à cet intervalle donnent des valeurs de résistance thermique d'une stabilité de 1% sans changer

à chaque fois dans le même sens (P.A. HILTON LTD, HEAT TECHNOLOGY DIVISION, TCU 100, NOV 94).

Equation donnant la conductivité thermique

$$\lambda = Is * \left[(K1 + (K2 * T)) + ((K3 + (K4 * T)) * HFM) + ((K5 + (K7 * T)) * HFM^2) \right] / dT$$

- Calibration constants – without silicone Rubber Mats

K1= -12.7377

K4= 0.0459

K2= 0.2364

K5= 0.0567

K3= 3.3452

K6= -0.0007

- Calibration constants with silicone Rubber Mats

K1= -30.7912

K4= =0.0055

K2= 0.6087

K5= 0.0132

K3= 6.53776

K6= 0.0004

Avec :

λ est la conductivité thermique (w/m k)

Is est l'épaisseur moyenne des plaques composites (m)

T1 est la température de la plaque chaude.

T2 est la température de la plaque froide.

T3 est la température de réfrigérant.

T4= HFM (Heat Flownmeter Reading) sortie debimetre en (mv)

dt= T1-T2 est la différence de température ($^{\circ}\text{C}$)

$\underline{T}$ = T1+T2/2 est la température moyenne ($^{\circ}\text{C}$)



Figure III.12: Photo du CTmetre.

III.8. Technique de caractérisation physique

III.8.1. Détermination de la masse volumique à l'aide d'un pycnomètre

Un pycnomètre en verre (25 ml) a été utilisé afin de déterminer la masse volumique des différentes parties de la plume de dinde (rachis, calamus, fibres). La balance de précision fournit les mesures de masses en g.



Figure III.13: Pycnomètre (25 ml).

III.8.2. Masse volumique des substances solides

a) Manipulation

Le pycnomètre est rempli d'eau distillée ou de l'éthanol, jusqu'au repère r. Ensuite, il doit être pesé pour déterminer sa masse m_1 .

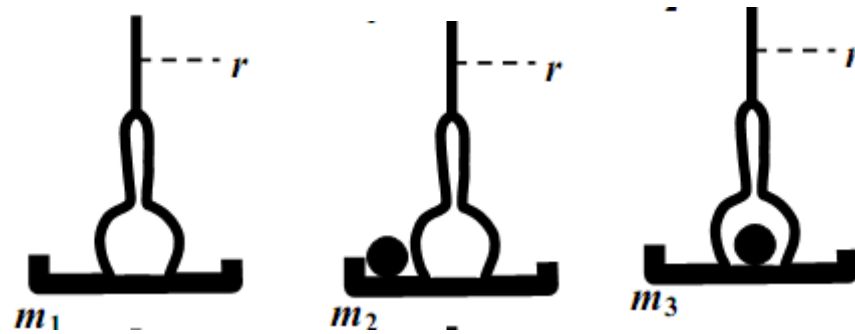


Figure III.14: Schéma de l'expérience.

Pour chaque échantillon solide pour lequel on cherche la masse volumique, on procède aux deux pesées m_2 et m_3 schématisées ci-contre. Dans chaque cas, le pycnomètre doit contenir de l'eau distillée jusqu'au repère r .

Toutes les manipulations doivent être faites avec soin. En cours d'opération, il faut éliminer les bulles d'air, compléter, si nécessaire le volume d'eau et ne pas laisser de gouttes d'eau au-dessus du repère. Après chaque remplissage, il faut bien essuyer le pycnomètre.

La masse volumique du corps solide s'écrit:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{m_2 - m_3} \times \rho_{\text{liq}}$$

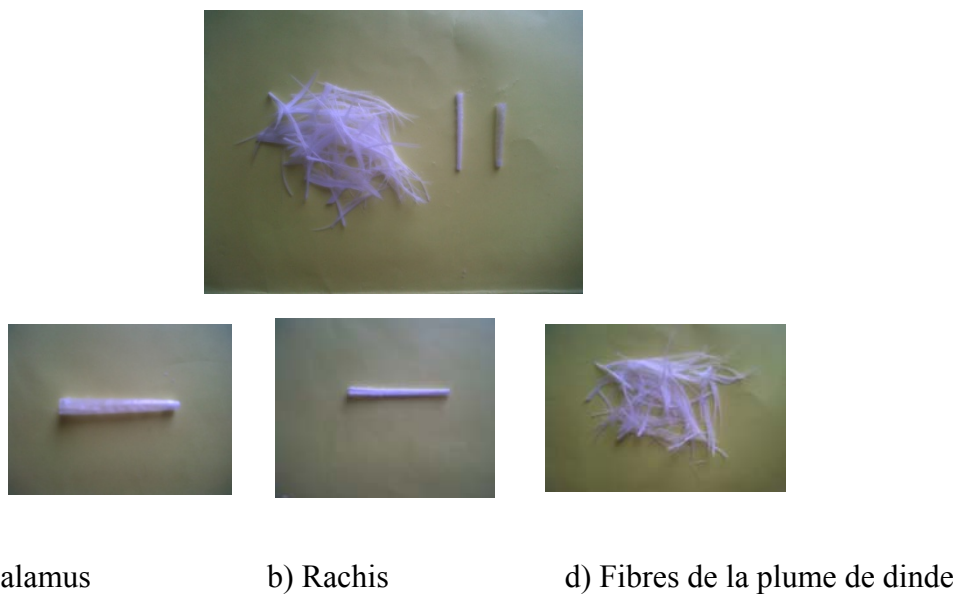
Avec :

m_1 : la masse de pycnomètre rempli du liquide

m_2 : masse de pycnomètre rempli du liquide + la masse de l'échantillon

m_3 : masse de pycnomètre rempli du liquide + la masse de l'échantillon émerger

et ρ_{liq} : masse volumique de l'eau ou de l'éthanol (0,79 g/cm³ est la masse volumique de l'éthanol)

**Figure III.15:** Images des échantillons testés

Les résultats obtenus de cette expérience sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.4: Masse volumique des différents échantillons de la plume de dinde

plume \ échantillon	Rachis	Calamus	fibre
Plume 1	0,30898	1.26612	1,1376
Plume 2	0,30311	1,15809	0,7900
Plume 3	0,26289	0,98988	0,7900
Plume 4	0,25987	1,23323	0,9875
Plume 5	0,24682	0,98922	0,9085
Moyenne de la masse volumique	0,276334	1,127308	
	0,28	1,13	0,92

IV.1. Observation au microscope optique et MEB

Avant tout, il est intéressant de remarquer que les caractéristiques des fibres sont fonction de leur nature mais aussi de leur microstructure. C'est pourquoi nous avons analysé la plume de dinde sous microscope optique puis, nous avons observé les différentes parties de cette plume au MEB.

IV.1.1. Observation au microscope optique de la plume de dinde

Grace a cette observation, nous avons constaté la manière avec laquelle les barbes tissées et s'accrochent les unes aux autres. Du rachis, qui constitue la structure primaire, partent les barbes qui constituent la structure secondaire.



Figure IV.1 : Plume de dinde observée au MO (Gx40) montrant les barbes.

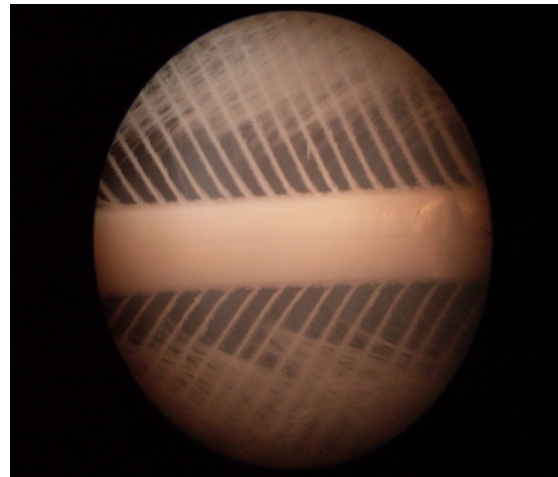


Figure IV.2 : Rachis de plume de dinde portant des barbes.

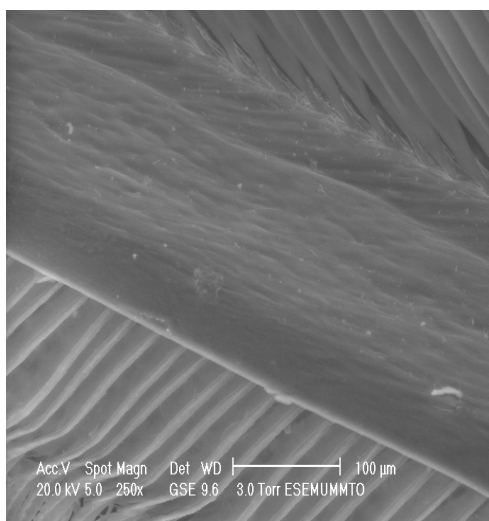
La plume est constituée d'un rachis qui est un cylindre distal plein, creuse d'un sillon ventral et porte un vexille que l'on peut distinguer en externe et en interne, de chaque côté du rachis. A ce niveau d'échelle, on remarque que les barbes sont très droites, toutes parallèles les unes aux autres et avec une mêmes distance qui les sépare.

Les vexilles sont formés d'un réseau de barbes (structure secondaire) d'où partent des barbules (structure tertiaire) d'une manière similaire aux barbes liées au rachis assurant ainsi souplesse et résistance aux plumes.

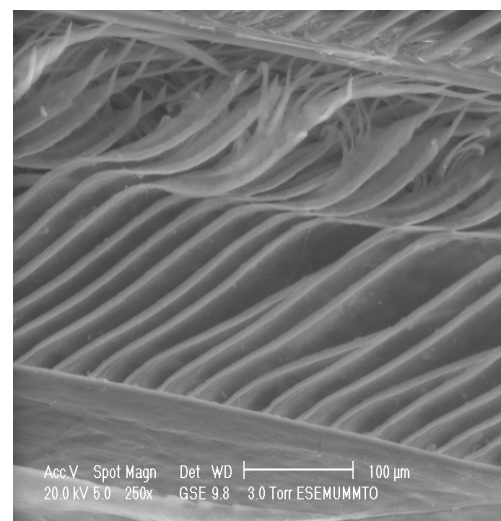
IV.1.2. L'observation au MEB

L'observation au microscope optique ne suffit pas pour se faire une idée exacte des plumes. Nous avons par conséquent voulu observer de plus près, à une échelle encore plus rapproché (échelle microscopique) pour avoir une idée plus précise de la morphologie de ces plumes de dinde.

La première observation a été faite sur la plume de dinde afin d'identifier les différentes structures de la plume. Par la suite, nous avons observé la section après rupture des différentes éprouvettes.



(a)



(b)

Figures IV.3: Photos des Observation au MEBE de la morphologie des fibres de dinde a) barbes +barbules b) barbe+barbules + barbicelles.

L'image a) montre que les barbes (structure secondaire) sont plus épaisses que les barbules. En plus des barbes et barbules qui constitue respectivement les structures primaires et secondaires, les barbicelles (b) ou crochets sont observés aux extrémités des barbules et constituent alors les structures tertiaires de la plume.

IV.2. Essais mécaniques

IV.2.1.Traction

Le comportement en traction des éprouvettes constituées de résine seule est représenté par la figure (IV.4) suivante:

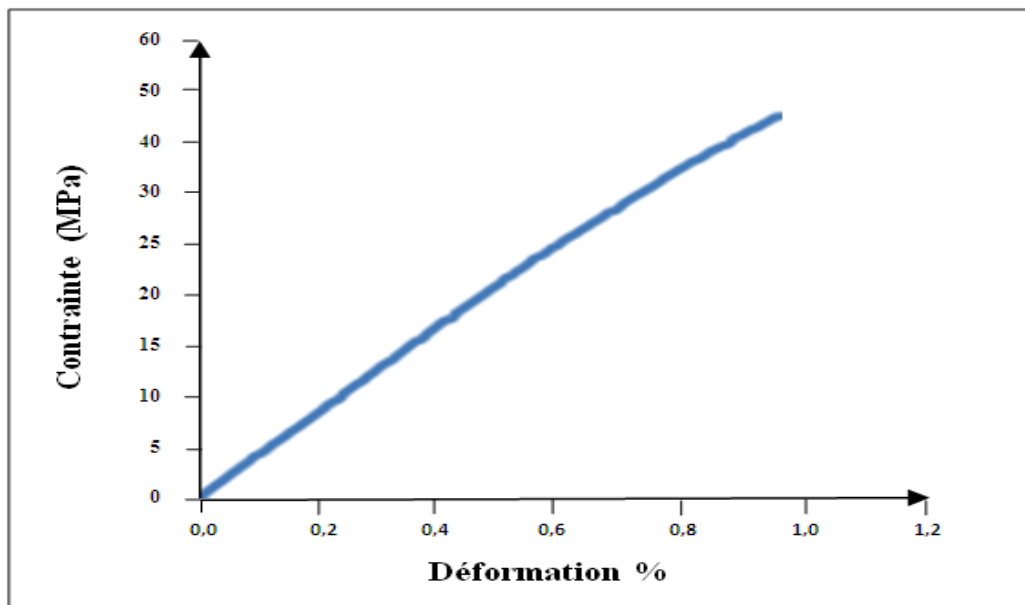


Figure IV.4: Courbe contrainte/déplacement de la résine seule.

Nous constatons que la courbe contrainte-déformation de la résine de la figure (IV.4) a une évolution traduisant un comportement quasi-linéaire et une rupture fragile, une certaine non-linéarité est enregistrée en fin de chargement.

Quant aux composites, les courbes contrainte/déformation des éprouvettes pour différents pourcentages de fibres sont illustrées dans la figure (IV.5) :

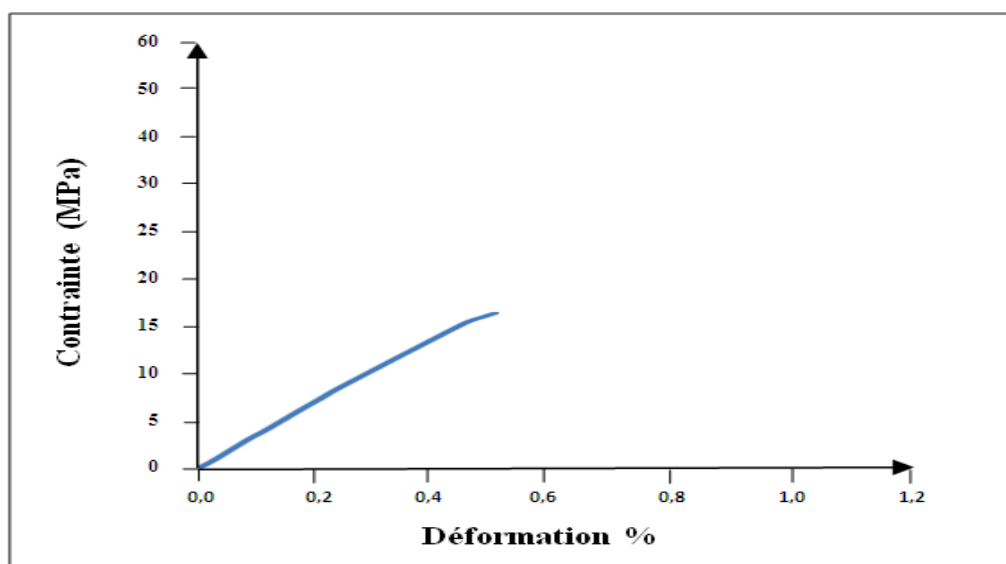


Figure IV.5 : a) Courbe charge/déplacement du composite à 1% de fibres.

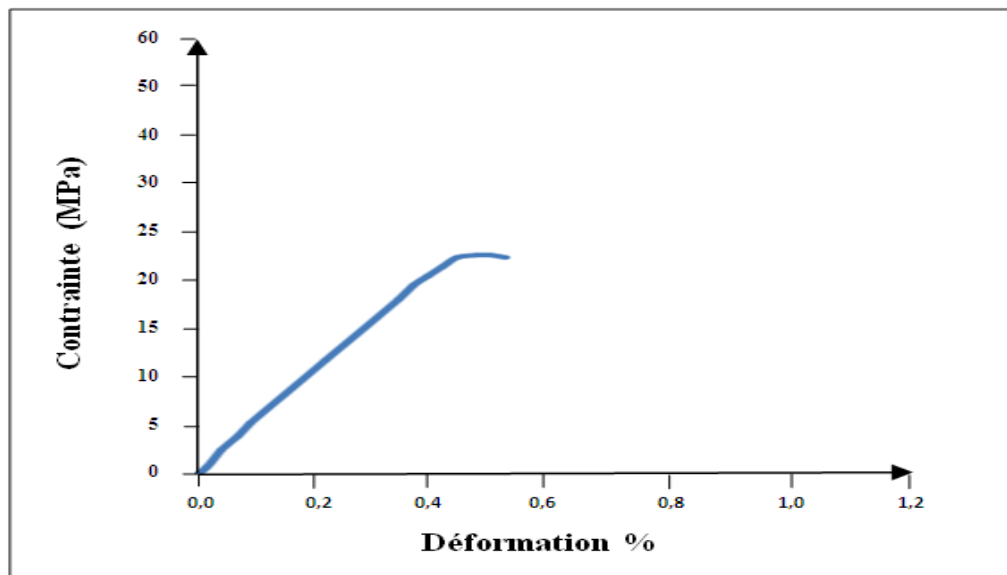


Figure IV.5: b) Courbe charge/déplacement du composite a 3% de fibres.

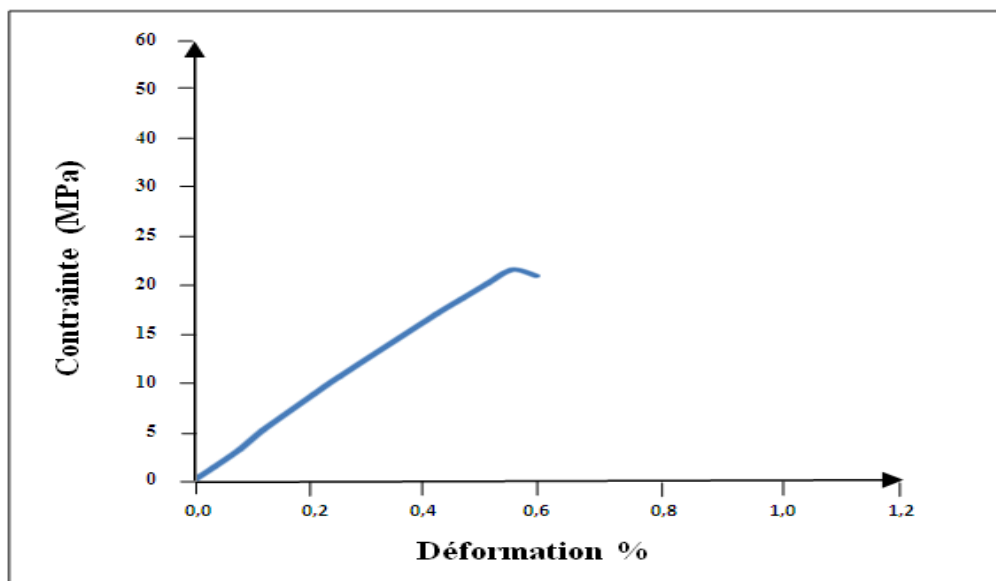


Figure IV.5: c) Courbe charge/déplacement du composite a 5% de fibres.

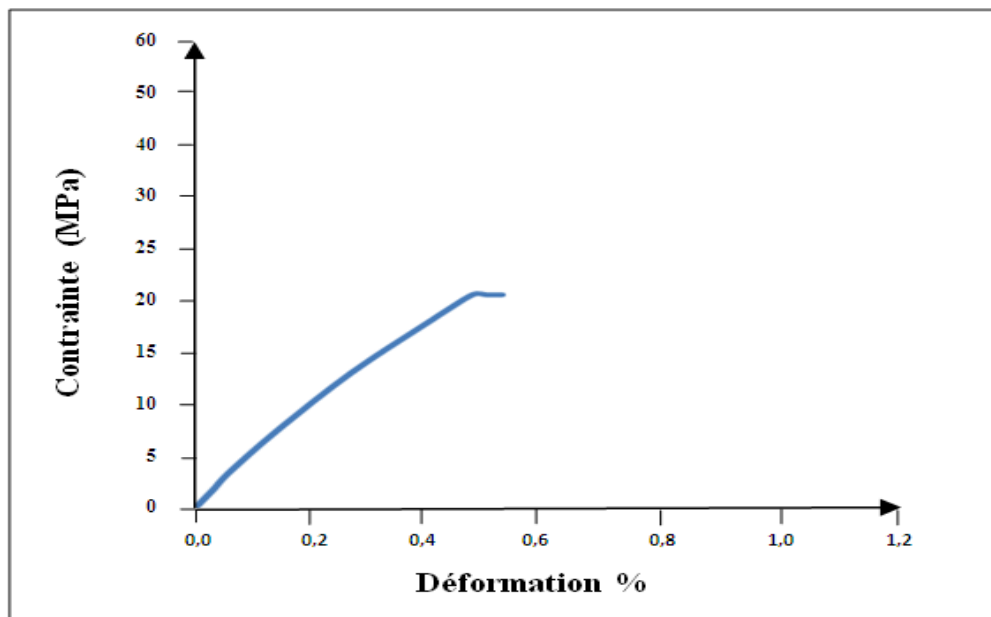


Figure IV.5: d) Courbe charge/déplacement du composite à 7% de fibres.

IV.2.1.1. Caractéristiques mécaniques de la résine seule et des composites à différents pourcentage de fibres

Les résultats des propriétés mécaniques en traction de la résine seule et des différents composites sont résumés dans le tableau (IV.1).

Tableau IV.1: Les propriétés mécaniques en traction de la résine seule et des différents composites.

	0% (témoin)	1%	3%	5%	7%
h [mm]	3,8	3,85	3,58	3,84	3,84
b [mm]	6,1	6,13	6,12	6,1	6,13
P [N]	1050,3	382,3	403	520	499
σ_r [MPa]	45,31	16,2	18,39	22,2	21,2
ϵ_r [mm]	0,94	0,489	0,536	0,594	0,519
E [GPa]	5,00	3,4	4,89	4,5	4,16

Sur la base de ces résultats, nous avons pu illustrer les différentes propriétés mécaniques de la résine seule et des différents composites dans la figure (IV.6) qui représentent respectivement la contrainte à la rupture, la déformation et le module d'élasticité en fonction du pourcentage de fibres.

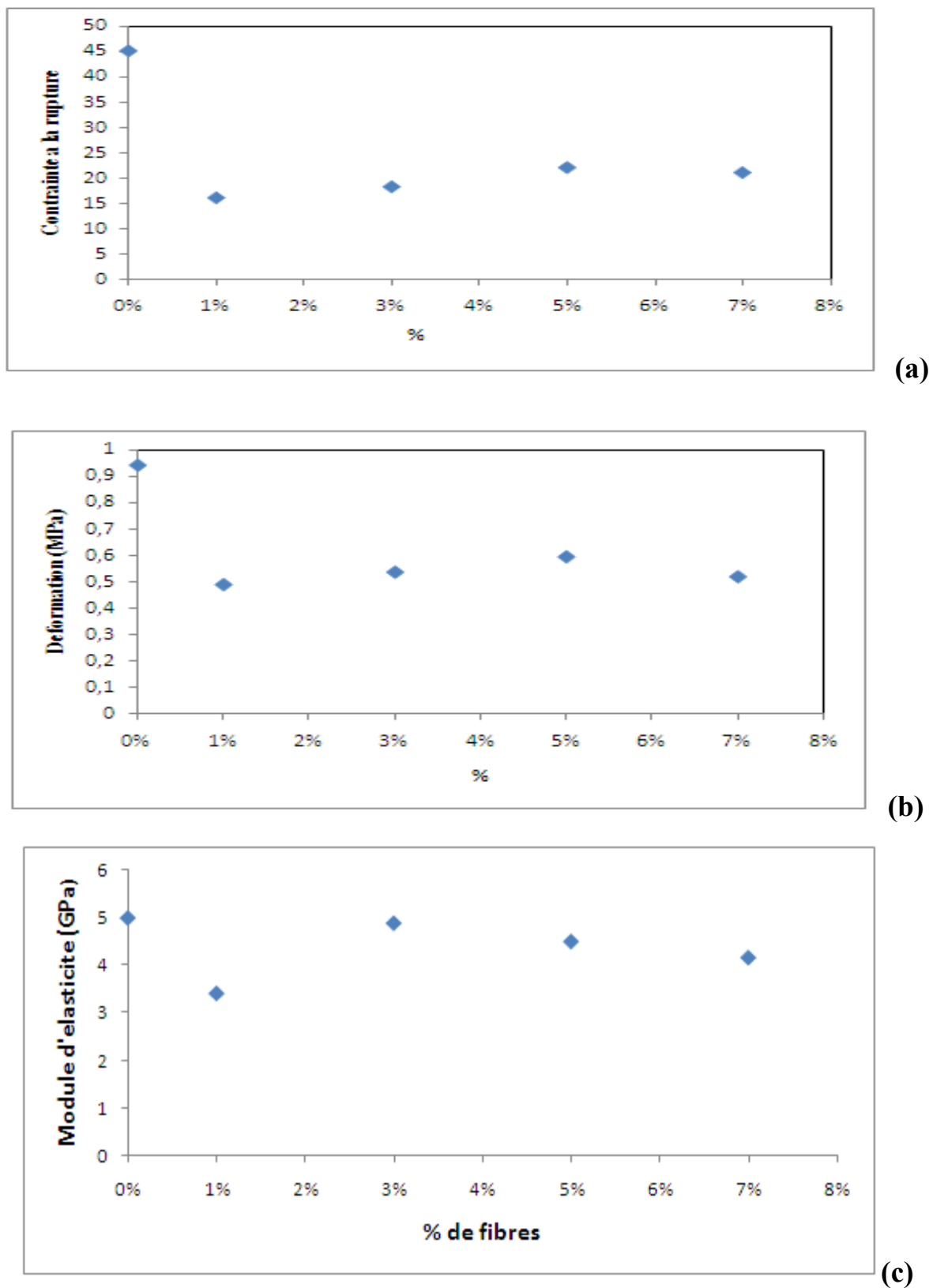


Figure IV.6: Les propriétés en traction de la résine seule et des différents composites **a)** évolution du module de Young **b)** évolution de la contrainte à la rupture **c)** évolution de la déformation.

IV.2.2. Flexion trois points

Le résultat de la flexion trois points sur la résine seule est illustré par la courbe de la charge/déplacement de la figure (IV.7). Cette figure montre que l'allure de la courbe charge/déplacement présente un comportement linéaire.

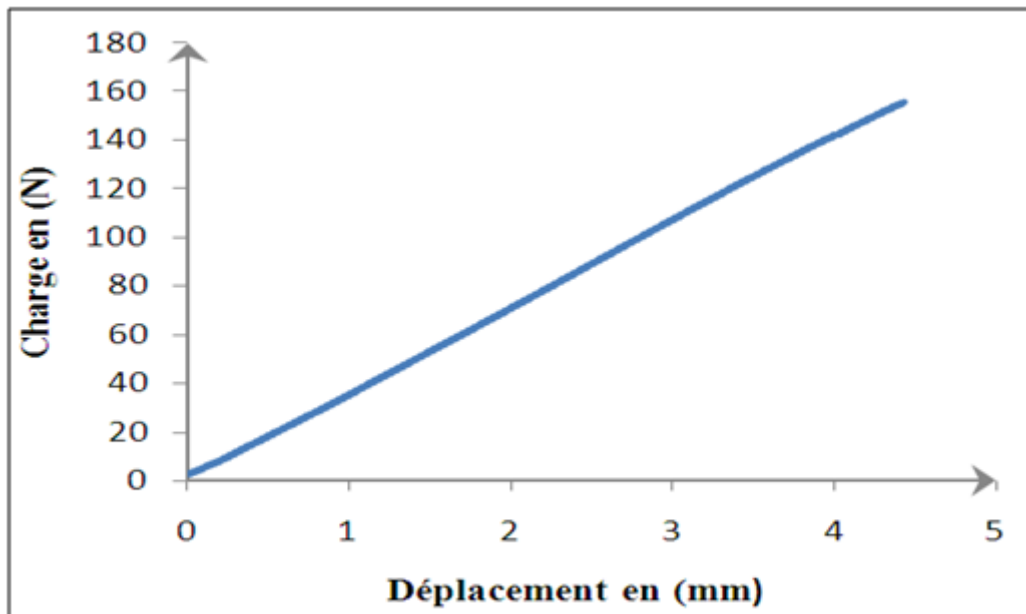


Figure IV.7: Courbe charge/déplacement en flexion trois points de la résine seule.

Pour les composites, le comportement en flexion trois points pour les différents pourcentages (1%, 3%, 5% et 7%), est illustré par les courbes charge/déplacement de la figures (IV.7). L'allure des courbes de charge/déplacement présente une forte similitude entre le comportement des différents composites. Nous constatons une sorte de fragilisation du matériau traduite par l'absence de la partie non linéaire avant rupture. La charge maximale enregistrée pour l'ensemble des cas correspond à un déplacement d'environ 2.56 mm.

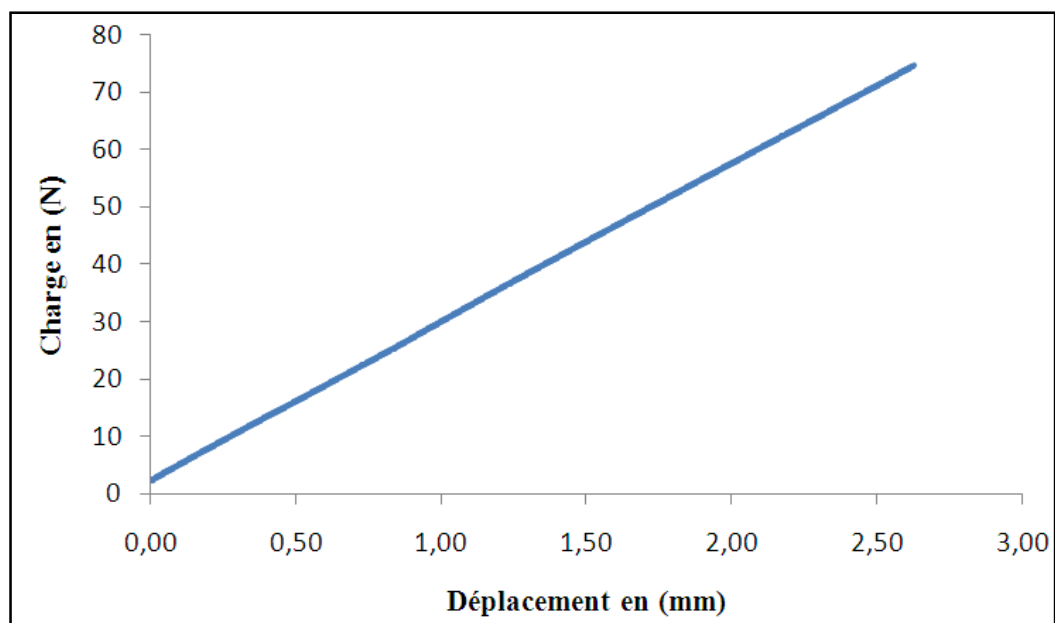


Figure IV.8: a) Courbes charge/déplacement du composite a 1% de fibres.

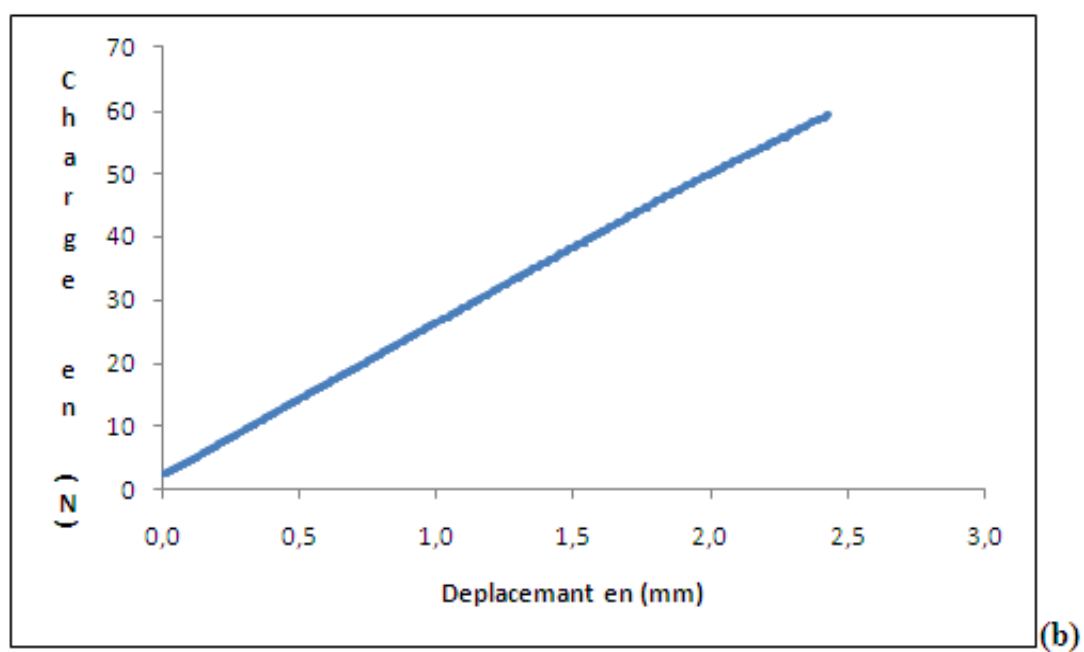


Figure IV.8: b) Courbes charge/déplacement du composite a 3% de fibres.

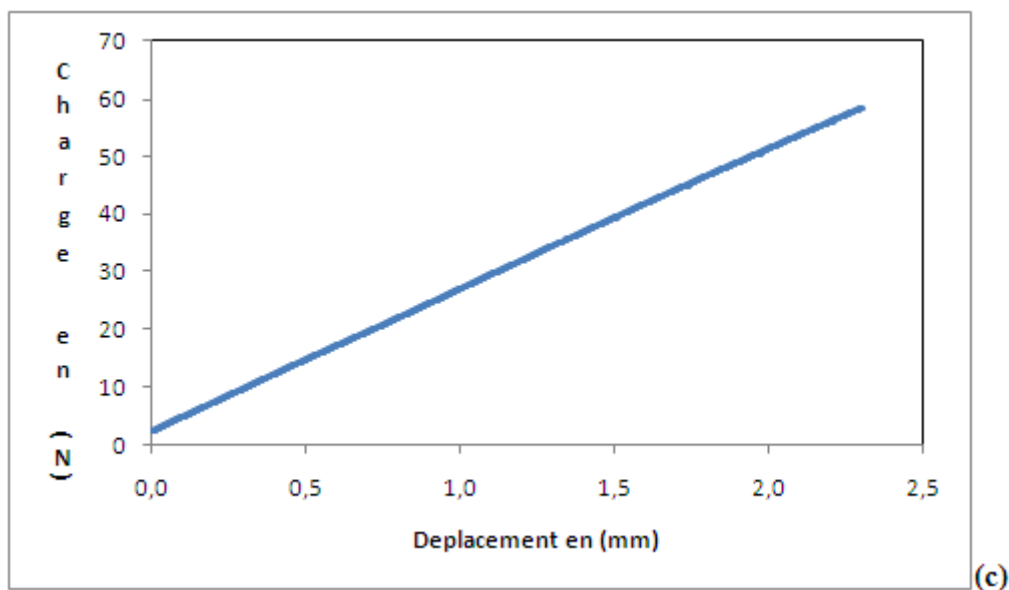


Figure IV.8: c) Courbes charge/déplacement du composite à 5% de fibres.

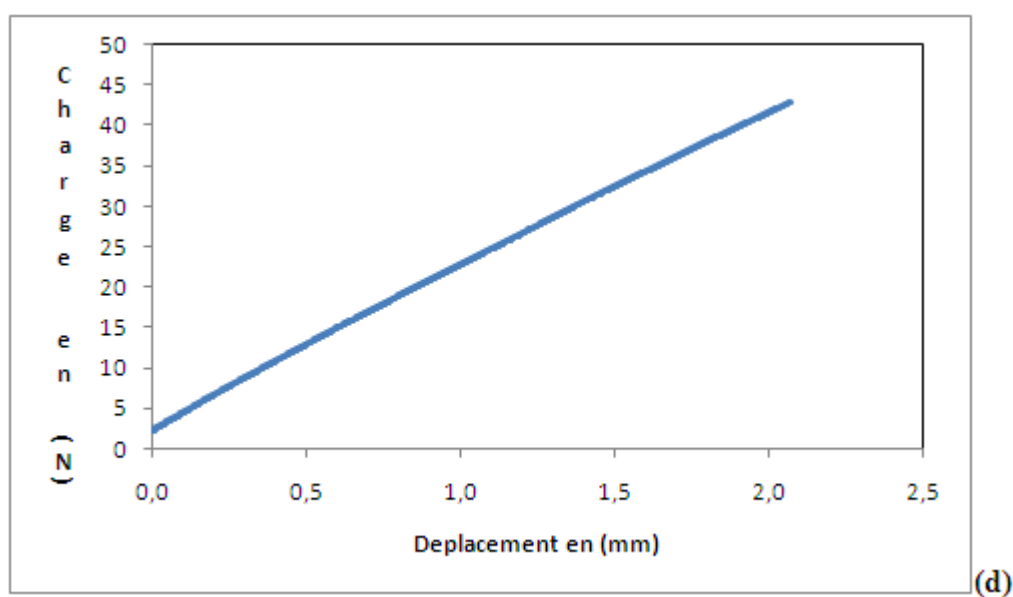


Figure IV.8: d) Courbes charge/déplacement du composite à 7% de fibres.

IV.2.2.1. Caractéristiques mécaniques de la résine seule et des composites à différents pourcentage de fibres

Les résultats des propriétés mécaniques de flexion de la résine seule et des différents composites sont résumés dans le tableau (IV.2).

Tableau IV.2 : Les propriétés mécaniques en flexion trois points de la résine seule et des différents composites.

	0% (témoin)	1%	3%	5%	7%
h [mm]	3,53	3,66	3,76	3,88	3,84
b [mm]	10,11	10,05	10,08	10,23	10,04
P [N]	153,0	72,9	58,3	57,2	42,9
Y [mm]	4,49	2,56	2,38	2,25	2,07
σ_r [MPa]	109,30	48,73	36,82	33,43	26,08
ϵ_r	0,0264	0,0156	0,0149	0,0145	0,0132
E [MPa]	4137,74	3120,84	2468,66	2297,40	1968,58

Les résultats du tableau (IV.2) sont illustrés dans la figure (IV.9).

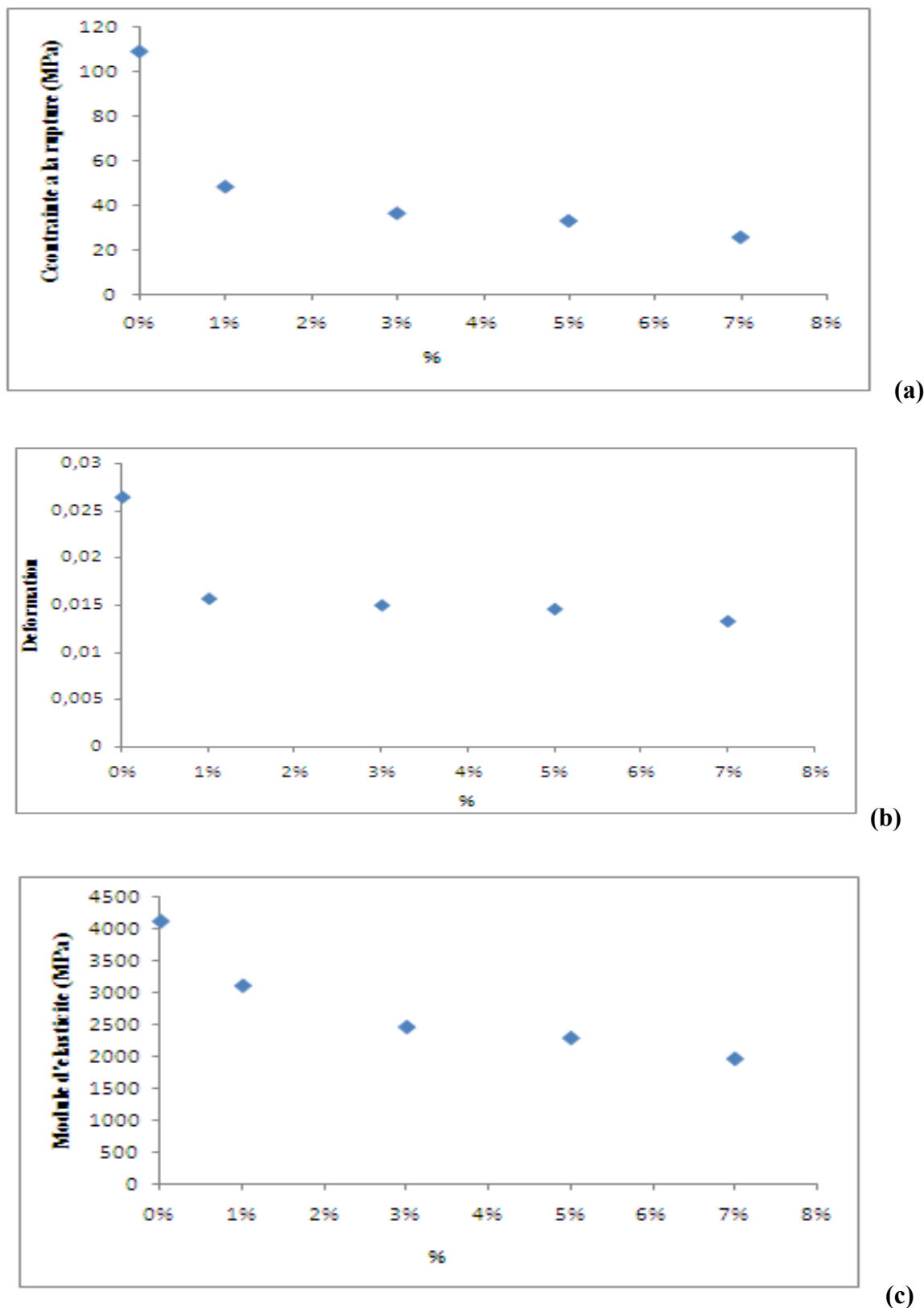


Figure IV.9: Les propriétés en flexion trois points de la résine seule et des différents composites : **a)** évolution du module de Young **b)** évolution de la contrainte à la rupture **c)** évolution de la déformation.

IV.2.2.2. Comparaison du même pourcentage de fibres

On remarque une similitude de l'allure de ces trois courbes charge/déplacement.

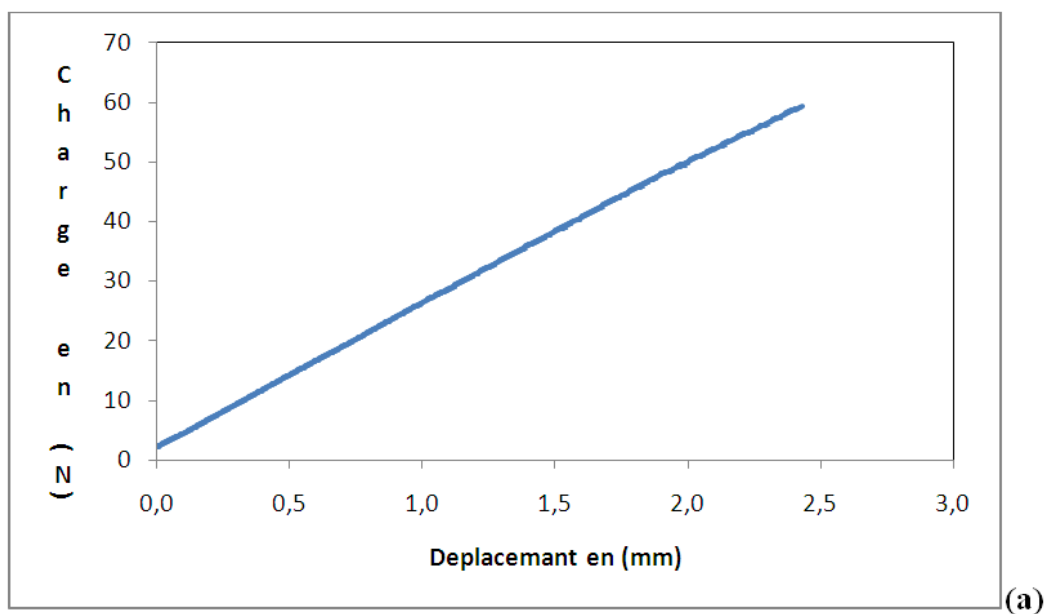


Figure IV.10: a) Courbe charge/déplacement avec 3% de fibres.

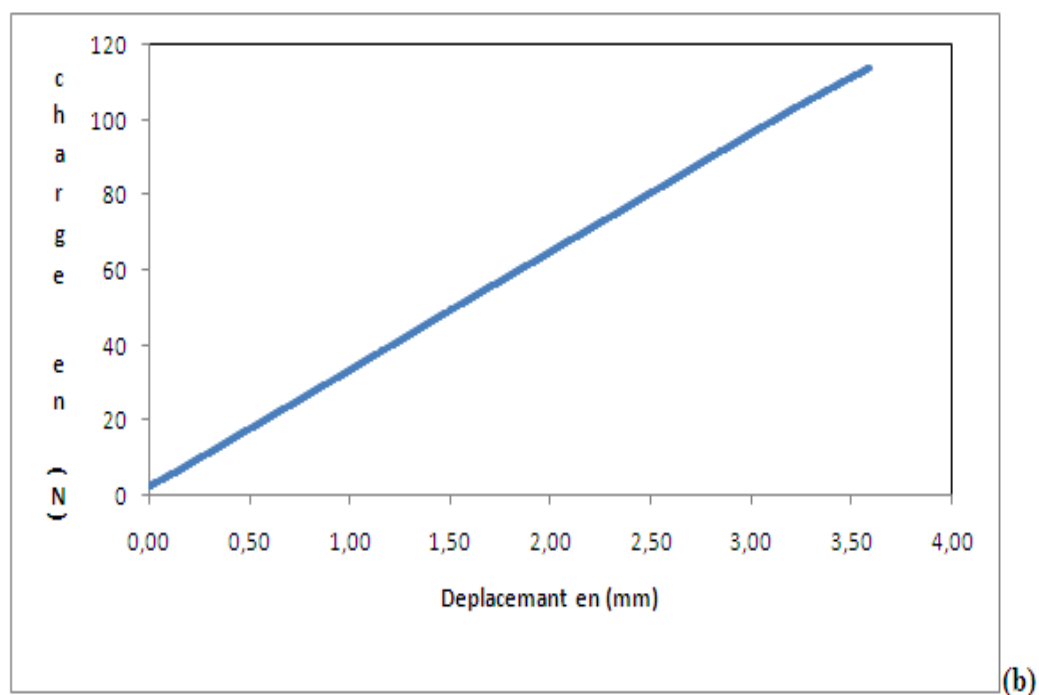


Figure IV.10: b) Courbe charge/déplacement avec 3% de fibres synthétiques.

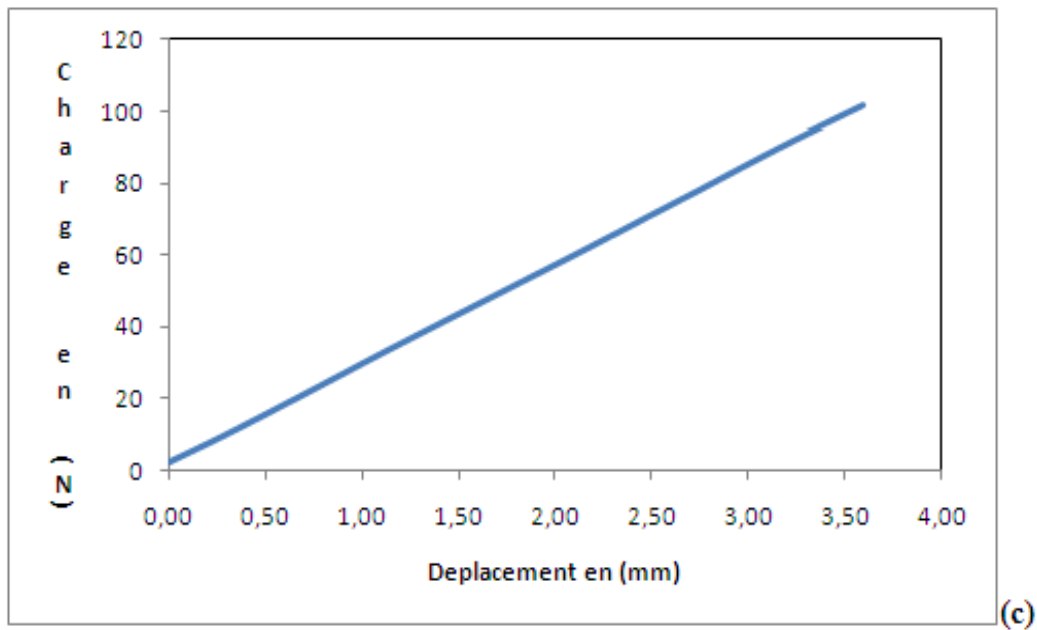


Figure IV.10: c) Courbe charge/déplacement avec 3% de fibres paraffinées.

IV.2.2.3.Caractéristiques mécaniques

Tableau IV.3: Les propriétés mécaniques en flexion trois points pour le même pourcentage en fibres des différents composites.

	3%	3% fs	3% fp
h (mm)	3,76	3,6	3,61
b (mm)	10,08	10,14	11,07
P (N)	58,3	112	99,3
Y (mm)	2,38	3,69	3,51
σ_r (MPa)	36,82	76,70	61,95
ϵ_r	0,0149	0,02214	0,0211
E (MPa)	2468,66	3464,49	2933,37

Avec :

fs : fibres synthétiques.

fp : fibres paraffinées.

Tableau (IV.3) enregistre de meilleures propriétés mécaniques du composite avec 3% de fibres synthétiques par rapport à celles enregistrées pour les composites 3% de fibres naturelles et 3% de fibres paraffinées. Une amélioration est remarquée pour les fibres paraffinées par rapport aux fibres naturelles.

Les résultats des différentes propriétés mécaniques sont illustrés par les histogrammes ci-dessous. Ces derniers nous permettent de mieux comparer les caractéristiques mécaniques précédentes.

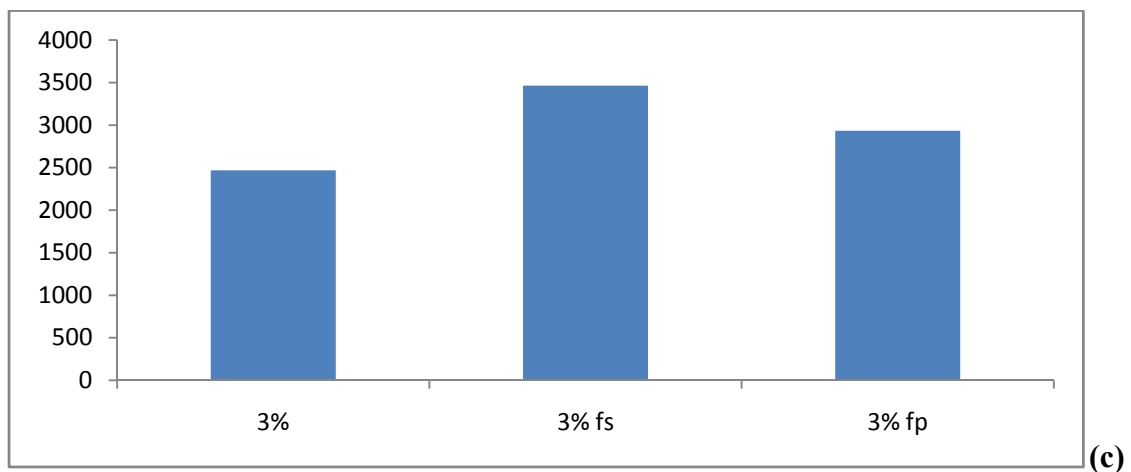
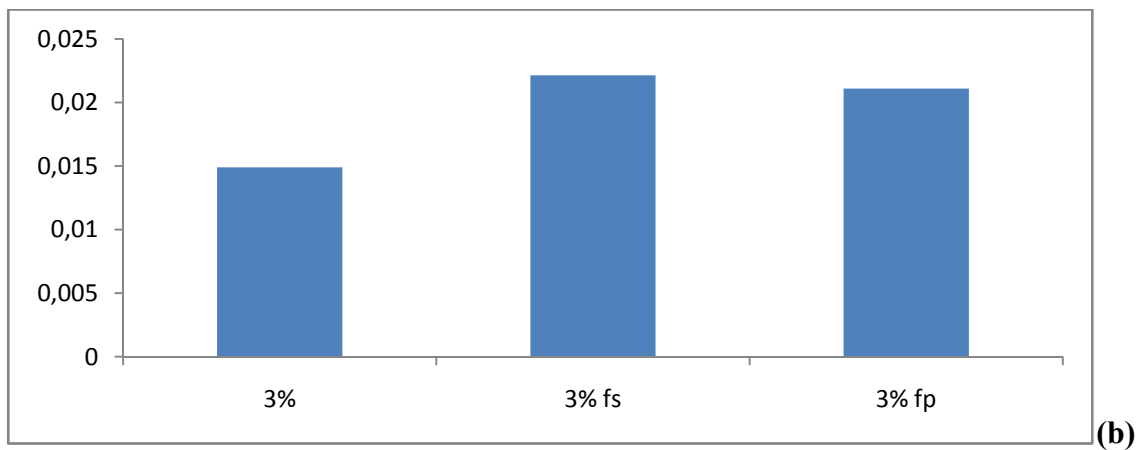
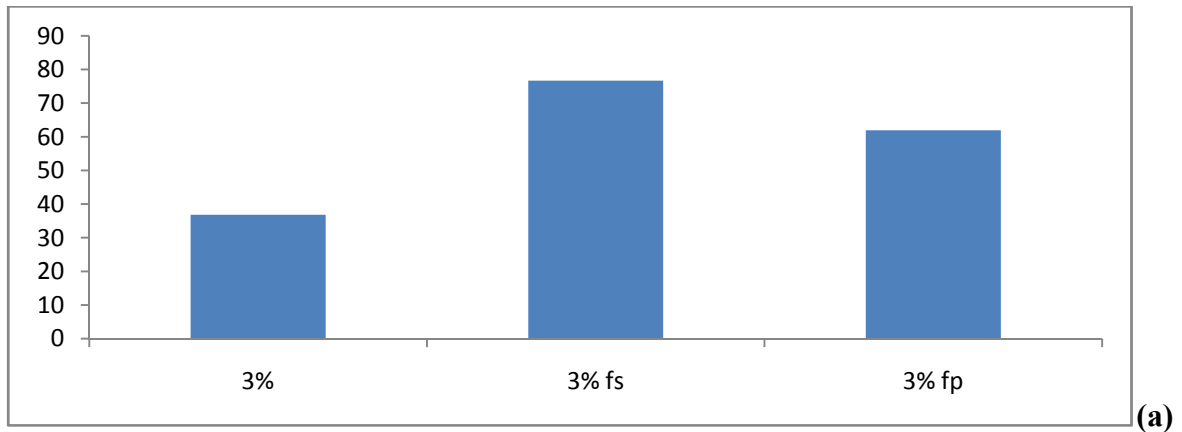


Figure IV.11: Comparaison à 3% de fibres des différents composites: a) histogramme des contraintes maximales b) histogramme des déformations c) histogramme de module d'Young.

IV.2. 3. Observation au MEBE de la section à la rupture des différentes éprouvettes

D'après les résultats précédents on remarque une diminution des différentes propriétés mécaniques en traction et en flexion des composites par rapport à celles de la résine seule. Ceci nous a poussé à différencier les mécanismes d'endommagements. L'analyse au MEB des faciès de ruptures des différentes éprouvettes testées en traction et en flexion nous a permis de faire une idée sur les mauvais résultats obtenus.

D'après les micrographies obtenues on constate :

- La rupture matricielle fragile
- la décohésion interfaciale
- la non participation de quelques fibres à la rupture

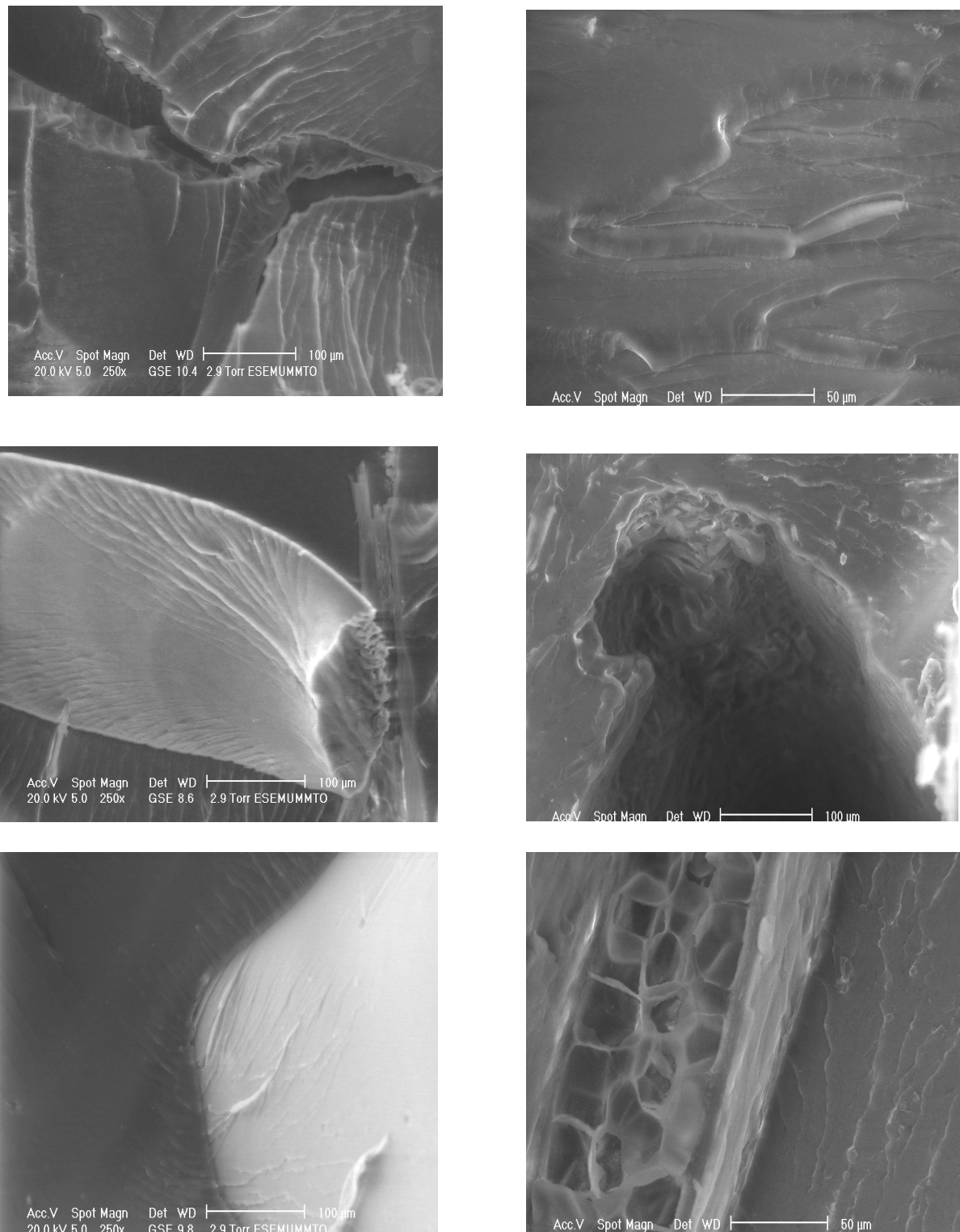


Figure IV.12: Photos des faciès de rupture en flexion et traction obtenus au MEB .

L'analyse des photos obtenues, nous permet de conclure que l'utilisation des fibres de plume de dinde comme renfort dans les composites est. une modification de la surface des fibres en vue d'amélioration de cohésion fibre matrice est envisageable.

IV.3.Les caractéristiques thermiques

Les résultats de la conductivité thermique

Le tableau (IV.4) ci-dessous regroupe les résultats de la conductivité thermique des différents composites obtenus par la méthode du CTmètre.

Avec : $T_1=36^{\circ}\text{C}$, $T_2=10^{\circ}\text{C}$.

Tableau IV.4 : La conductivité thermique des plaques de résine seule et des plaques composites a différents pourcentages.

Composite	T2 ($^{\circ}\text{C}$)	L, en (m)	λ en (w/mk)
Témoin	18.1	0.004	0.1049
1% de fibres	18	0,004	0,1034
3% de fibres	18.1	0.004	0,103
5% de fibres	17.9	0.004	0.1020
7% de fibres	18.1	0.004	0.1017
3% de fibres synthétique	18.1	0.004	0.1076
3% de fibres paraffinées	17.9	0.004	0.1057

Une diminution de la conductivité thermique en fonction du pourcentage de fibres est enregistrée. Cette amélioration de la conductivité thermique reste légère puisque l'intervalle de la conductivité se situe entre [0,1049 et 0,1017] pour les pourcentages allant de 0% à 7% de fibres, ce qui peut être expliqué par l'approche de la conductivité thermique du renfort (fibres de plumes de dindes) de celle de la résine polyester.

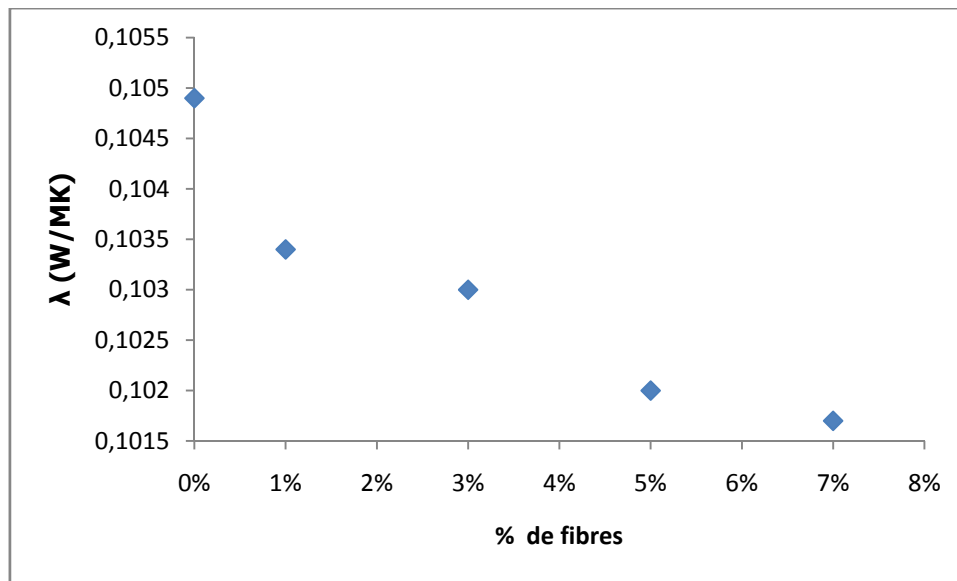


Figure IV.13 : Conductivité de la résine seule et des composites à différents pourcentages.

Les travaux que nous avons menés en vue de synthétiser un nouveau composite à renfort d'origine animale (fibres de plumes de dinde), en remplacement des fibres minérales nous ont permis de comprendre l'influence de la nature des fibres sur les caractéristiques thermiques et mécaniques des matériaux composites élaborés.

Pour cela, nous avons utilisé les fibres de plumes de dindes comme fibres de renfort courtes. D'autres fibres ont été préalablement imprégnées de paraffine dans le but d'augmenter leurs caractéristiques mécaniques et surtout leur inertie thermique. Nous avons à titre de comparaison utilisé également des fibres synthétiques.

Pour avoir une approche à l'échelle microscopique de la morphologie de la plume de dinde, des observations au microscope optique et au MEBE (Microscope électronique à balayage environnemental) ont été effectuées. Ces observations révèlent les caractéristiques morphologiques de la plume de dinde qui sont représentées par des unités distinctes. Ainsi on peut distinguer le rachis qui est la partie centrale de la plume constituant la structure primaire. De ce squelette assez rigide partent les barbes qui constituent la structure secondaire de la plume jouant le rôle de protection. En fin, ces barbes sont reliées entre elles par réseau de fines barbules qui constituent la structure tertiaire. C'est précisément ce réseau compact bien ordonné sous forme de voile qui rend la plume étanche à l'eau et à l'air (d'où son aspect isolant).

Par la suite, nous avons démontré à travers l'étude que les caractéristiques mécaniques des composites restent inférieures à celles de la résine seule. L'analyse des résultats des essais mécaniques en statique nous a conduits aux conclusions suivantes:

- L'ajout des fibres dans la matrice polyester n'améliore pas les propriétés mécaniques pour des raisons que l'on peut énumérer ici: i) les fibres utilisées sont courtes (5 mm) et ne travaillent pas en traction, ii) la faible adhérence des fibres avec la résine réduit les paramètres mécaniques du composite, iii) l'orientation aléatoire des fibres ont moins d'effets qu'une orientation directionnelle dans le sens de la contrainte de traction.
- En flexion trois points, la contrainte à la rupture est relativement faible avec l'ajout des fibres. L'ajout des fibres n'améliore pas les paramètres mécaniques, bien au contraire cela fragilise encore plus le matériau composite.

Un traitement chimique de surface des fibres peut s'avérer utile afin d'améliorer l'adhérence des fibres avec la matrice.

Concernant les caractéristiques thermiques, en particulier la conductivité thermique, il y a une légère diminution de celle-ci avec le pourcentage de fibres. Le composite est légèrement plus isolant que la matrice seule. Ceci peut s'expliquer par le fait que la matrice et le renfort ont une conductivité thermique sensiblement proche.

L'ajout des fibres imprégnées d'un MCP est justifié par le fait d'améliorer la chaleur spécifique du matériau composite et ceci dans le but d'augmenter l'inertie thermique de celui-ci.

Références bibliographiques

- [1] **Gessese A, Hatti-Kaul R, Gashe B A, Mattiasson B** (2003). Novel alkaline protease from alkaliphilic bacteria grown on chicken feather, *Enzyme Microb Teechnol* 32: 519-524.
- [2] **Miquel, G.** (1998) Recyclage et valorisation des déchets ménagers - Rapport 415 (98- 99) du Sénat - Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques; <http://www.senat.fr/rap/o98-415/o98-415.html>.
- [3] **Internet**, (1998). La ministre de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement présente en Conseil des ministres les nouvelles orientations de la politique déchets favorisant la réduction à la source et la valorisation; [http://www.environnement.gouv.fr/actua/cominfos/dosdir/DIRPPR/dechet\(campagne\)/sommaire.htm](http://www.environnement.gouv.fr/actua/cominfos/dosdir/DIRPPR/dechet(campagne)/sommaire.htm).
- [4] **Ichida JM, Krizova L, Le Fevre CA, Keener HM, Elwell DL, Burt EH Jr** (2001). Bacterial inoculums enhances keratin degradation and biofilm formation in poultry compost. *J.Microbio Methodes* 47: 199-208.
- [5] **Narendra Reddy, Yiqi Yang**, (2007). Structure and Properties of Chicken Feather Barbes as Naturel Protein Fibers. *J Polym Environ* 15: 81-87.
- [6] **Rene Moletta** (2006). Gestion des problems environnementaux dans les industries agroalimentaires. 2eme edition Lavoisier. 38-39, 476-478, 502p.
- [7] **Rie Endo Kaeko Kamei, Ikuho Iida, Yutaka Kahahara**, (2008). Dimentional stabiliy of waterlogged wood treated with hydrolyzed feather keratin. *Journal of Archaeological Science* 35: 1240-1246.
- [8] **Sameer AL-Asheh, Fawzi Banat, Deaya' AL-Rousan**, (2003). Beneficial reuse of chicken feathers in removal of heavy metals from wastewater. *Journal of Cleaner Production* 11: 321-326.
- [9] **M.GEIER ,D.DUEDAL**, (1985). «Guide pratique des matériaux composites», TEC & DOC (Lavoisier),Paris, 349P.

Références bibliographiques

- [10] **SEYNI Abdoulaye**, (11 décembre 2008). These de doctorat, Propriétés physico-chimiques et d'usage de matériaux composites à charge dégradable produits par co-broyage, L'institut National Polytechnique de Toulouse,.
- [11] **J.M. Berthelot**, matériaux composites, (1996). Comportement mécanique et analyse des structures , Masson 2^e édition (1996).
- [12] **BAHLOULI Nadia**, Cours Matériaux Composites / DESS Mécanique avancée et stratégie industrielle.
- [13] **W.KURZ, J. P. MERCIER, G.ZAMBELLI** ,(1995). «Traité des matériaux: Introduction à la science des matériaux», Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 404P.
- [14] pabiot technique de l'ingénieur
- [15] **ZAPATA-MASSOT Céline**, (21 décembre 2004). These de doctorat, synthese de matériaux composites par co-broyage en voie seche. caracterisation des proprietes physico-chimiques et d'usages des matériaux, l'institut national polytechnique de toulouse.
- [16] **A. DESSARTHE, H. GUYOT, M. CARAYOL**, (1994). «Techniques de fabrication de pièces mécaniques en plastiques ou composites», Centre Technique des Industries Mécaniques (CTIM), Paris, 226P.
- [17] (**Thomas DEVANNE**).
- [18] **Bathias C**, (2005). - Matériaux composites.- Paris : Dunod, 419p.
- [19] **C. Baley**. Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. Techniques de l'Ingénieur. Ref. AM. 5 130)
- [20] **H. OSMANI**, (1989). «Rupture des composites céramique–céramique à fibres», thèse de doctorat, INSAd Lyon, 226p.
- [21] **E. Darque-Ceretti**, (2001). Adhésion - Adhérence, Cycle de cours de l'ENSMP, Cemef, in Yves Perrot th de doctorat.
- [22] **BORHANE KECHAOU**, (19 Juin 2003). These de doctorat,CORRELATION entre proprietes dielectriques et mecaniques de composites a matrice epoxyde renforcee par des fibres de verres, l'ecole centrale de lyon et de la faculte des sciences de sfax.
- [23] **P. MILLET, P. WEISS**, (2009-2010). Propriétés physiques des matériaux dentaires, Université Médicale Virtuelle Francophone.
- [24] **Patricia Krawckaz**. Essais mécanique des plastiques, caractéristiques instantanées, Article AM3 510, Technique d'ingénieur.

Références bibliographiques

- [25] **MOHAMED FILALI**, (2006). These de doctorat, Conductivité thermique apparente des milieux granulaires soumis à des contraintes mécaniques : modélisation et mesures, l'institut national polytechnique de Toulouse.
- [26] **E.Coment**, (2001). Contribution a la mise au point de techniques de mesures de propriétés thermophysiques par sondes à chocs, thèse de doctorat école supérieur d'arts et métiers.
- [27] **B.Martin, J.F.Durastanti, B.Peureux**, (1994). Méthode d'identification de la conductivité thermique des matériaux isolants, Entropie, vol 147, pp 47-52.
- [28] **Slimane MELKA**, (1996). Etude theorique et experimentale des transferts thermiques dans les milieux poreux granulaires pour l'isolation thermique, These de doctorat, Ecole des mines de Paris.
- [29] **Pierre CANARD**, Mise à jour du texte rédigé en 1985 pour ce traité par Gilbert CHRÉTIEN et Alain ZALMANSKI, Polyesters insaturés, technique de l'ingenieur, A3 445.
- [30] **Yves Perrot**, (Novembre 2006). These de doctorat. Influence des propriétés de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites verre/polyester utilisés en construction navale de plaisance - Cas des résines polyester limitant les émissions de styrène, L'Université de Bretagne Sud U.F.R Sciences et Sciences de l'Ingénieur.
- [31] **D. GAY** «Matériaux composites», HERMES, Paris, 1997, 672P.
- [32] **Seghar Siad**. Mémoire de magister. Influence des paramètres d'élaboration et du vieillissement thermique sur les caractéristiques mécaniques des nanocomposites a matrice polymère.
- [33] **G. CHRETIEN**, (1986).Polyester insaturés. Matériaux composites à matrice organique, Paris, Technique et documentation (Lavoisier), pp. 65- 106.
- [34] **B.L. GRUNDEN**, (1993). Cure characterization of an unsaturated polyester resin using near-infrared, fluorescence and UV/visible reflection spectroscopies, B.S. Mat. Eng,university of Cincinnati.
- [35] **Melanie, Marie-Anne CHAMPION**, Le cacatoes rosablin, Eolophus roseicapillus, en captivité. Biologie, maintien en captivité, élevage, pathologie principale. Ecole Nationale de Vétérinaire de toulouse. 75-77p.
- [36] www.ornithomedia.com
- [37] **Barone J.R, Schmidt W.F**, (2005), Polyethylene reinforced with keratin fibers obtained from chicken feathers. Composites. Science and Technology 65: 173-181.

Références bibliographiques

- [38] **Cao J, Billows CA**, (1999). Crystallinity determination of native and stretched wool by X-ray diffraction. *Polymer International* 48: 1027-1033.
- [39] **Said BARADDA**, (2009). Journées des 5 et 6 Mai. PLP Biotechnologies, Lycee Simone WEIL. Academie de MONTPELLIER, Academie de DIJON. Biochimie appliquee dans les filieres SBSSA. Les proteines : rtructure, proprietes et applications technologiques.
- [40] **Alibardi L**, (2003). Adaptation to the land : The skin of reptiles in comparaison to that of amphibians and endotherm amniotes. *J. Exp. Zool. Part. B. Mol.Dev. Evol.* 298, 12-41.
- [41] Proteins: three-dimensional structure, Section 6-1. Secondary Structure
- [42] **Rigby B.J**, (1960). The structure of the wool fibre. *International journal of sheep and wool science* 7 : 247-251.
- [43] **Bradbury J.H**, (1973). Rhe structure and chemistry of keratin fibers. *Advances in protein chemistry* 27: 111-211.
- [44] **Dowling L.M**, Sparrow L.G (1991). Sequences of wool keratin proteins: the CSIRO connection, *TIBS* 67: 115-118.
- [45] **Rippon J.A**, (1992). The structure of wool ‘ Wool Dyeing, Society of dyers and colourists, D.M. Lewis Ed. 85-90p.
- [46] **Plowman J.E**, (2007). The proteomics of keratin proteins, *Journal of Chromatography B* 849.
- [47] **Fraser R.D.B, Gillespie J.M**, (1976). Zool structure qnd biosynthesis . *Nature* 261: 650-654.
- [48] **Frederique Salpin**, (2008). Laine et Colorants : fixation, quantification et vieillissement. Etude par spectrometrie Raman. Universite et Pierre et Marie Curie. 10-16, 103-107p.
- [49] (Olympiades 2004 . Conference de la chimie en Champagne- Ardenne.
- [50] **Celine PARIS**, (2004). Methodologies spectroscopiques pour l’etude de materiaux : objets du patrimoine de la fin du 19eme au debut du 20eme siecle. Universite Pierre et Marie Curie. 13-18, 88-99p.
- [51] **Rammani P, Singh R, Gupta R**, (2005). Keratinolytic potentiel of *Bacillus licheniformis* RG1 : structural and biochemical mechanism of feather degradation. *Can J Microbiol* 51 : 191- 196.
- [52] **Arai KM, Takahashi R, Yokote Y, Akahane K**, (1983). Amino-acid sequence of feather keratin from fowl. *Eur J Biochem* 132: 501-507.

Références bibliographiques

- [53] **Szabo L, Benedek A, Szabo ML, Barabas G**, (2000). Feather degradation with a thermotolerant *Streptomyces graminofaciens* strain. *World J Microbiol Biotechnol* 16: 252-255.
- [54] **Takahashi K, Yamamoto H, Yokote Y, Hattori M**, (2004). Thermal behavior of fowl feather keratin. *Biosci Biotechnol Biochem* 68: 1875-1881.
- [55] **Bertsh A, Coello N**, (2005). Abiotechnological process for treatment and recycling poultry feathers as a feed ingredient. *Biores Technol* 96: 1703-1708.
- [56] **Coward-Kelly** (2006). Lime treatment of keratinous materials for the generation of highly digestible animal feed: 2. Animal hair. *Bioresour Technol* 97: 1344-1352.
- [57] **Prry DAD**, North ACT, (1998). Hard α -keratin intermediate filament chains: substructure of the C-terminal domains of type I and type II chains. *J Struct Biol* 122: 67-75.
- [58] **Barone JR, Schmidt WF, Liebner CEF**, (2005). Termally processed keratin films. *J Appl Polym Sci* 97: 1644-1651.
- [59] **Audrey Bouchard et Kim Guerin-Gagnon**, (2003). Je te plumerai. Expo-journal, rapport interne, programme des sciences de la nature, Cegep de Saint-Felicien, Saint-Felicien. 1-12p.
- [60] **Rawn J.D**, (1989). Acides amines et structure primaire des proteines. *Traite de biochimie*, Eds. Universitaires. 5-59p.

Résumé

Les matériaux composites ont de tout temps été utilisés tant dans l'industrie que dans le bâtiment. L'ajout des fibres d'origine minérale ou synthétique est justifié par l'amélioration des caractéristiques mécaniques mais les inconvénients sont tout autant des facteurs limitant le recours à ces fibres. Ainsi si pour les aspects mécaniques, l'ajout des fibres d'amiante est justifié en raison de leur meilleure adhérence à la matrice du fait de leur état de surface rugueux, leur caractère cancérigène les place dans la catégorie fibres dangereuses pour la santé humaine. Elles sont à l'heure actuelle pointées du doigt et leur utilisation interdite du marché. Chercher une alternative à ces fibres, c'est le pari que les chercheurs en sciences des matériaux se sont fixés. L'objet de notre travail consiste à proposer des nouveaux matériaux à base de fibres de volaille. L'objectif visé ici est double. Cela consiste à d'une part à recycler ces fibres de volaille, disponibles en abondance dans la nature, qui restent jusqu'à présent non valorisées et d'autre part utiliser des fibres assez résistantes aux attaques et surtout écologiques et non cancérigènes. Pour assurer et garantir leur durée de vie dans le matériau il est toutefois recommandé de les protéger contre les attaques de l'humidité ou de parasites kératophages, d'où la nécessité de les traiter chimiquement. Dans cette étude, il a été question de mettre au point des composites à base de résine organique en polyester non saturé dans laquelle sont introduites des fibres de volaille. Des essais mécaniques ont été réalisés en traction et flexion trois points afin de déterminer leur propriétés mécaniques en fonction du pourcentage de fibres. Toutefois, des plaques de forme parallélépipédique ont été réalisées pour la détermination de la conductivité thermique. Enfin la structure microporeuse des fibres peut servir de support pour un matériau à forte chaleur massique qui pourra être utilisé pour le stockage de la chaleur dans ces nouveaux matériaux. Un essai à 3% de fibres chargées de paraffine a été fait et les résultats obtenus sont probants. Cette étude demande néanmoins à être approfondie de façon à cerner toutes les difficultés de mise en œuvre de ces composites qui seront certainement les matériaux de demain.

Mots clés :

Composites, Polyester insaturé, Fibres de plume de dinde, Inertie thermique, Conductivité thermique, Propriétés mécaniques.