

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : SCIENCES DE L'INGENIORAT
Département : GÉNIE MÉCANIQUE
Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIE
Filière : GENIE MECANIQUE
Spécialité : Fabrication mécanique et productique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Effets de la fatigue et du vieillissement en eau salée sur le comportement mécanique d'un composite aramide-époxy pour renforcer la coque d'une embarcation semi-rigide des gardes côtes

Présenté par : OUALI CHAIMA

Encadrant : MENAIL Younès Dr. Université badji mokhtar - Annaba

Jury de Soutenance :

BENGHERSALLAH MOHIEDDINE	Dr.	Univ-Badji Mokhtar Annaba	Président
MENAIL Younes	Dr.	Univ-Badji Mokhtar Annaba	Encadrant
DIB AMAR	Dr.	Univ-Badji Mokhtar Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements

Le remerciement infini avant tous est à Dieu le plus puissant qui m'a comblé des bienfaits de l'Islam et de la science et qui m'a donné la force et la volonté pour pouvoir finir ce mémoire de fin d'études.

*Je dois exprimer mes vifs remerciements à Monsieur **MENAIL YOUNES** Professeur à l'Université Badji Mokhtar Annaba et mon directeur de mémoire, pour la confiance, les précieux conseils et le partage de ces compétences scientifiques. . J'ai également apprécié la grande liberté qu'il m'a accordée dans la gestion de ce mémoire ainsi que sa passion pour la recherche et sa bonne humeur toujours présente.*

*Mes remerciements sont adressés également au président du jury Monsieur **BENGHERSALLAH MOHIEDDINE** d'avoir examiné ce travail et d'avoir présidé ce jury.*

*Je remercie aussi monsieur **DIB AMAR** pour sa participation au jury et ses critiques pertinentes.*

Merci à tous et à toutes.

Dédicace

Je dédie ce mémoire,

Particulièrement à mes chers parents,

A mon père,

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour,

l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous.

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.

Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis

pour mon éducation et ma formation.

Allah Yarhmek mon papa.

A ma très chère mère,

tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence,

Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

A toi ma sœur,

En témoignage de l'attachement,

de l'amour et de l'affection que je porte pour toi ma petite sœur.

Ma reconnaissance est également formulée envers

tous mes enseignants et Mes camarades.

Résumé

Les matériaux composites sont utilisés dans tous les domaines technologiques d'actualité de technologie tels que la mécanique, l'aéronautique et l'aérospatial pour fabriquer des pièces structurales ou vitales, du fait de leurs propriétés mécaniques, leur facilité de mise en forme et leur légèreté. De telles utilisations doivent nécessairement s'accompagner d'une bonne connaissance du comportement du matériau.

Ce travail a pour but d'abord de rechercher toute la littérature concernant les matériaux composites à savoir notamment leurs composants de base avec leurs caractéristiques, leurs modes de fabrication ainsi que leurs domaines d'utilisation.

Nous avons réalisé une éprouvette en matériaux composites fibres d'aramide, l'essai mécanique (traction) a été réalisé au sein du département de métallurgie au bloc E.

Et enfin le suivi par microscopie électronique a été réalisé au sein de l'Ecole Nationale Supérieure de Mines et Métallurgie ENSMM d'Annaba.

Les essais de traction ont été réalisés sur une machine de traction universelle avec une vitesse de 1 mm/min et les essais de dureté ont été menés sur une machine à essais Rockwell.

Les résultats de la microscopie électronique ont montré une morphologie très hétérogène avec des décohésions et des délaminages.

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction général

CHAPITRE I

Généralités sur les matériaux composites

I.1 Introduction.....	1
I.2 Définition	1
I.3 Les constituants	2
I.3.1 Les matrices.....	2
I.3.1.1 Résines thermodurcissables	3
I.3.1.2 Résines thermoplastiques	4
I.3.2 Le renfort	4
I.3.2.1 Architecture des renforts	5
I.3.2.2 Les caractéristiques mécaniques des fibres	11
I.3.2.3 Caractéristiques moyennes des fibres et renforts	12
I.3.3 Les charges et les additifs	12
I.3.3.1 Les charges	12
I.3.3.2 Les additifs	13
I.4 Mise en œuvre et architecture des matériaux composites	13
I.4.1 Moulage au contact	13
I.4.2 Moulage par projection de simultané	13
I.4.3 Moulage sous vide	14
I.4.4 Moulage par projection de résine	15
I.4.5 Moulage par centrifugation.....	15
I.5 Structure des matériaux composites.....	16
I.5.1 Les monocouches	16
I.5.2 Les stratifiés	17
I.5.3 Sandwichs	17
I.6 Les domaines d'utilisation	18
I.7 La loi de mélange pour les composites stratifiés	19

CHAPITRE II

La fibre d'aramide (de Kevlar)

II.1 Introduction	21
II.2 L'histoire d'aramide	22
II.3 Les caractéristiques des fibres aramides	23
II.4 Applications	23
II.4.1 Applications-fibre d'aramide	23
II.4.2 Applications-fibres d'aramide hybride	24
II.5. Avantages-inconvénients.....	24
II.6 Aramide dans les composites	25
II.7 Méthode de fabrication	26
II.7.1 Revêtement à la main.....	26
II.7.2 Infusion vide	26
II.7.3 RTM.....	27
II.7.4 RTM léger.....	28
II.8 Nouveau tissu de fibre d'aramide de Teijin donne protection contre la radiation	28
II.9 Etude du milieu.....	29

CHAPITRE III

Etude expérimentale du matériau (traction)

III.1 Introduction.....	30
III.2 Essai de traction.....	30
III.2.1 Objectif	30
III.2.2 Introduction	30
III.2.3 Les caractéristiques mécaniques	31
III.2.4 La machine de traction	32
III.2.5 Résultats des essais de traction.....	33
III.2.5.1 Les résultats de type aramide/époxy.....	33
III.2.5.2 Les résultats expérimentaux obtenus	34
III.3 Les modules de fibres et de la matrice	35

III.4 Discussion	36
III.4.1 Effet de la fatigue pure	37
III.4.2 Effet d'un vieillissement constant suivi d'une fatigue variable	37
III.4.3 Effet d'une fatigue constante suivi du vieillissement variable	40
III.5 La microscopie électronique	44
III.5.1 Préparation des coupes microscopique	44
III.5.2 Analyse des coupes microscopiques	44
III.5.3 Coupes longitudinales	47
III.5.4 Coupes transversales	49

Conclusion générale.

Références bibliographique.

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I.1 : Matériau composite.....	2
Figure I.2 : Types de matrice	3
Figure I.3 : Types de renfort	5
Figure I.4 : Renforts unidirectionnels (UD)	6
Figure I.5 : Renforts Toile ou taffetas	6
Figure I.6 : Renforts Sergé	7
Figure I.7 : Renforts Satin	7
Figure I.8 : Fibre de verre	8
Figure I.9 : Fibre d'aramide	9
Figure I.10 : Fibre de carbone	9
Figure I.11 : Principe du moulage au contact	13
Figure I.12 : Principe du moulage par projection simultanée.....	14
Figure I.13 : Principe de moulage par infusion	14
Figure I.14 : Principe de moulage par injection de résine	15
Figure I.15 : Principe de moulage par centrifugation.....	16
Figure I.16 : Composite monocouches	16
Figure I.17 : Plaque statifiée	17
Figure I.18 : Sandwichs	18
Figure I.19 : Composite sandwich	18
Figure I.20 : Modélisation par un système de ressorts des propriétés en traction d'un composite stratifié	20

CHAPITRE II

Figure II.1 : La fibre d'aramide	21
Figure II.2 : Fibre de Kevlar.....	22
Figure II.3 : La chimiste américaine Stéphanie Kwolek	22
Figure II.4 : Matériaux et techniques	25
Figure II.5 : L'infusion sous vide	27
Figure II.6 : RTM	27

CHAPITRE III

Figure III.1 : Principe d'un essai de traction	30
Figure III.2 : Courbe type de traction	31
Figure III.3 : Signification d'une courbe de traction	31
Figure III.4 : Courbe contrainte/deformations	32
Figure III.5 : Machine de traction	33
Figure III.6 : L'éprouvette en traction	33
Figure III.7 : L'éprouvette en fibre de kevlar	34
Figure III.8 : Fatigue après vieillissement de 0 heure	37
Figure III.9 : Fatigue après vieillissement de 100 heures	38
Figure III.10 : Fatigue après vieillissement de 500 heures	38
Figure III.11 : Fatigue après vieillissement de 1000 heures	39
Figure III.12 : Forces	39
Figure III.13 : Déplacement	39
Figure III.14 : Vieillissement après fatigue de 100 cycles	40
Figure III.15 : Vieillissement après fatigue de 500 cycles	40
Figure III.16 : Vieillissement après fatigue de 1000 cycles	41
Figure III.17 : Vieillissement après fatigue de 5000 cycles	41
Figure III.18 : Vieillissement après fatigue de 10000 cycles	42
Figure III.19 : Vieillissement après fatigue de 50000 cycles	42
Figure III.20 : Forces	43
Figure III.21 : Déplacements	43

Figure III.22 : Le microscope optique-Nikon-.....	44
Figure III.23 : L'éprouvette en aramide	45
Figure III.24 : Résultats de la microscopie électronique pour les éprouvettes en aramide.....	46
Figure III.25 : Microscopie optique, coupe longitudinale, (rupture de fibres et décohésion)	47
Figure III.26 : Microscopie optique, coupe longitudinale, (délaminage et rupture de fibres)	48
Figure III.27 : Microscopie optique, coupe transversale, (délaminage)	49
Figure III.28 : Microscopie optique, coupe transversale, (décohésion)	50

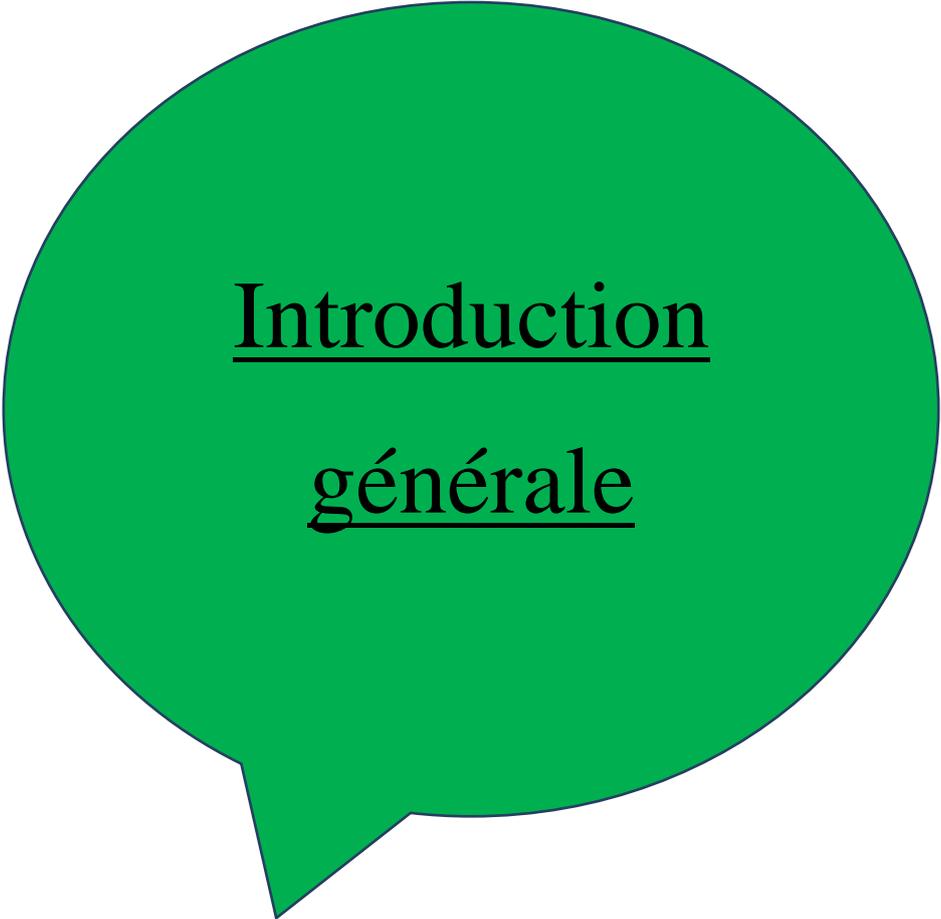
Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau I.1 : Caractéristiques des résines thermodurcissables.....	3
Tableau I.2 : Caractéristiques des résines thermoplastiques	4
Tableau I.3 : Caractéristiques mécaniques des fibres	11
Tableau I.4 : Caractéristiques moyennes des fibres et renforts	12

CHAPITRE III

Tableau III.1: Caractéristiques mécaniques de l'éprouvette	34
--	----



Introduction

générale

Introduction générale

Le développement de nouveaux matériaux est soumis aux besoins des utilisateurs (constructeurs). Ceux-ci veulent toujours des matériaux plus performants, plus économiques et qui durent plus longtemps. Les chercheurs sont le plus souvent amenés à optimiser les solutions déjà utilisées, mais dans certains cas, ils doivent complètement repenser le problème et envisager de "nouveaux matériaux".

En effet, on ne découvre plus de nouveaux matériaux, mais on crée plutôt des nouvelles associations de matériaux. L'un des résultats de cette association est l'aboutissement à un matériau composite, qui fait le sujet de notre étude.

Les fibres polyamides aromatiques (ou fibres « aramides ») sont des fibres polymères synthétiques à hautes performances connues pour leur utilisation dans les matériaux composites, les gilets pare-balles, les câbles et les cordages, ou les vêtements de protection contre le feu. Leurs excellentes propriétés mécaniques en traction (module élastique et résistance mécanique élevés, faible déformation), leur faible densité et leur bonne résistance chimique ont rendu leur emploi adapté à d'autres domaines comme les géotextiles pour des applications de renforcement des sols et les câbles à applications maritimes.

Il y a encore quelques années, les géotextiles à base de fibres polyesters notamment étaient largement utilisés pour le renforcement des sols alcalins. Cependant, leur dégradation prématurée dans ces environnements spécifiques a nécessité le développement de solutions alternatives, telles que les géotextiles à base de fibres aramides, employés depuis une dizaine d'années. De même, depuis une trentaine d'années, les fibres synthétiques, dont les fibres aramides, sont de plus en plus utilisées dans les câbles et cordages à applications maritimes. En effet, leur légèreté et leurs bonnes propriétés mécaniques spécifiques en traction, ont conduit au remplacement progressif des câbles en acier. Les fibres aramides sont ainsi employées pour des applications nécessitant des capacités de charge importantes, telles que le gréement des bateaux, l'amarrage de plateformes pétrolières ou les câbles d'instrumentation et de manutention en mer.

L'objectif de ce travail est de démontrer que le composite aramide-époxy est utilisable en construction navale, grâce à notre étude.

Chapitre I

**Généralité sur les
matériaux composites**

I.1 Introduction

Les matériaux composites sont des matériaux à hautes performances mécaniques, façonnables à volonté au gré du concepteur et donc doué d'un potentiel illimité.

Les matériaux composites se développent aujourd'hui dans pratiquement tous les domaines et sont à l'origine de formidables challenges dans diverses réalisations de haute technologie [1].

I.2 Définition

Un matériau composite est constitué de différentes phases nommées renforts et matrice. Lorsque le matériau composite est non endommagé, les renforts et la matrice sont parfaitement liés et il ne peut pas y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases.

Il est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément.

On distingue deux types de composites [1] [2] :

➤ Grande diffusion

Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont : Optimisation des coûts par diminution des prix de revient, sa composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes (sous forme de mat ou tissu) et la simplicité du principe des matériaux (moulage par contact, SMC et injection).

➤ Hautes performances

Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine d'aéronautique où le besoin d'une grande performance déduite des hautes valeurs ajoutées. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%.

Ces composites sont élaborés par les procédures suivantes :

- drapage autoclave, enroulement filamentaire, RTM.
- beaucoup de procédés encore manuels.

I.3 Les constituants

En général les constituants principaux d'un matériau composite sont :

- La matrice.
- Le renfort.
- Les charges et les additifs.

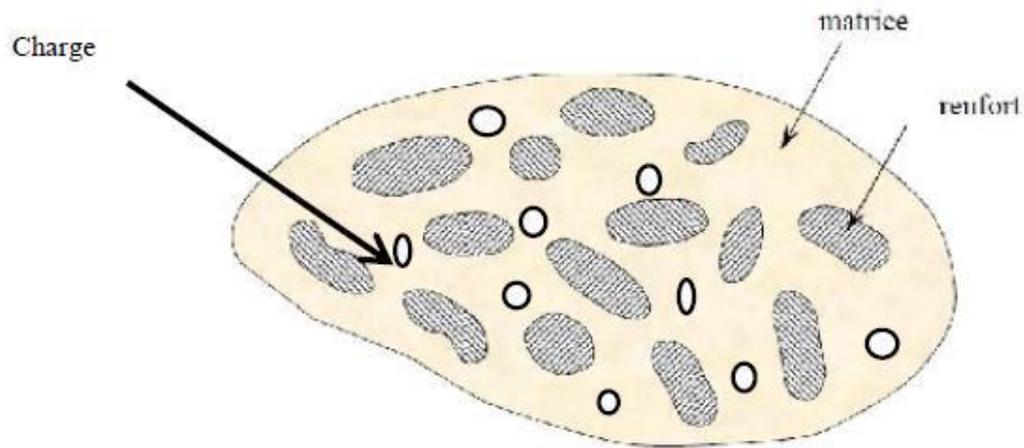


Figure I.1 Matériau composite [1]

I.3.1 Les matrices

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation.

Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2 200°C peuvent-êtres atteintes. La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la figure 1.1.

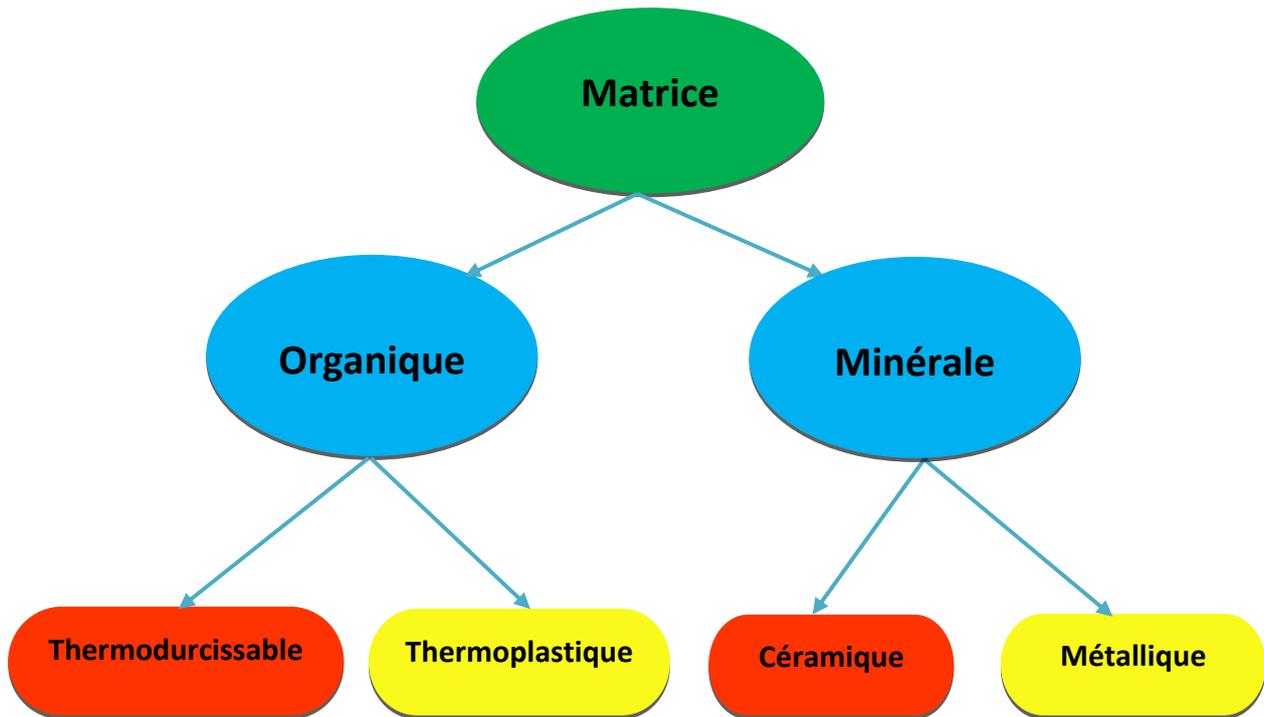


Figure I.2 Types de matrice

I.3.1.1 Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, amioplastes, furaniques) et les résines époxydes sont des résines thermodurcissables. Les exemples de résines thermodurcissables classiquement rencontrées sont 914, 5208, 70, LY556.

Les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible. Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau 1.1.

Tableau I.1 Caractéristiques des résines thermodurcissables

Résines	T _f (°C)	ρ (Kg/m ³)	ε _r ^R (%)	σ _r ^R (MPa)	σ _r ^R (MPa)	E(GPa)
Polyesters	60 à 100	1140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2.8 à 3.6
Phénoliques	120	1200	2.5	40	250	3 à 5
Epoxydes	290	1100 à 1500	2 à 5	60 à 80	250	3 à 5

Avec :

- T_f : Température de fléchissement sous charge.
- ρ : Masse volumique.
- ε_r^R : Allongement à la rupture.
- σ_r^R : Contrainte à la rupture en traction.
- σ_f^R : Contrainte à la rupture en flexion.
- E : Module d'élasticité en traction.

I.3.1.2 Résines thermoplastiques

Ce sont des polymères pouvant être alternativement ramollis par chauffage et durcis par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. Les résines thermoplastiques présentent l'aptitude à l'état ramolli, de se mouler aisément par plasticité [1].

De même que pour les résines thermodurcissables, les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible : ces dernières sont présentées dans le tableau 1.2.

Tableau I.2 Caractéristiques des résines thermoplastiques

Résines	T_f (°C)	ρ (kg/m ³)	ε_r^R (%)	σ_r^R (MPa)	σ_f^R (MPa)	E (GPa)
Polyamide	65 à 100	1140		60 à 85		1.2 à 2.5
Polypropylène	900	1200		20 à 35		1.1 à 1.4

I.3.2 Le renfort

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée.

Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes :

- Linéique (fils, mèches),
- Tissus surfaciques (tissus, mats),
- Multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus).

La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure 1.3 [3].

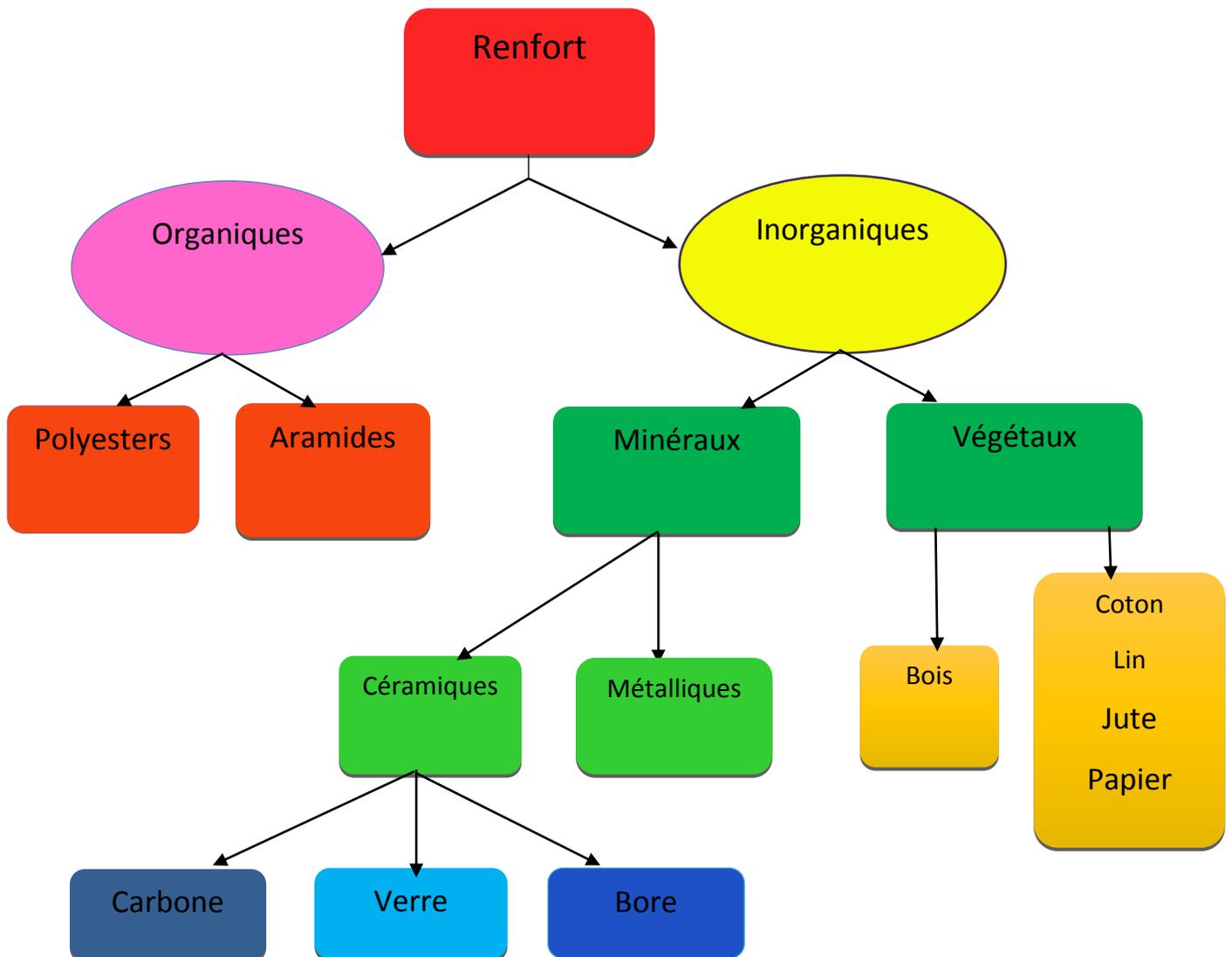


Figure I.3 Types de renfort [3]

I.3.2.1 Architecture des renforts

Il existe différentes géométries et textures de renforts :

➤ **Les unidirectionnels (UD)**

Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de déséquilibre très grand.

Les tissus se composent de fils de chaîne et de trames perpendiculaires entre eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise.

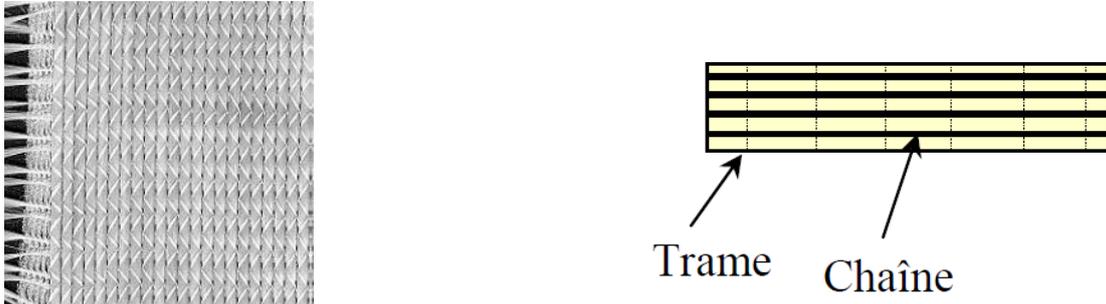


Figure I.4 Renforts unidirectionnels (UD)

➤ Toile ou taffetas

Chaque fil de chaîne passe dessus puis dessous chaque fil de trame, et réciproquement. Le tissu présente une bonne planéité et une relative rigidité, mais est peu déformable pour la mise en oeuvre.

Les nombreux entrecroisements successifs génèrent un embuvage important et réduisent les propriétés mécaniques.

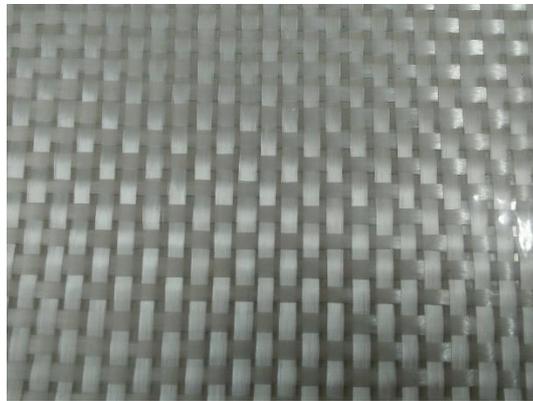


Figure I.5 Renforts Toile ou taffetas

➤ Sergé

Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs (n) fils de trame et chaque fil de trame flotte au-dessus de (m) fils de chaîne. Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils. Ci-dessous, un sergé 2/2.

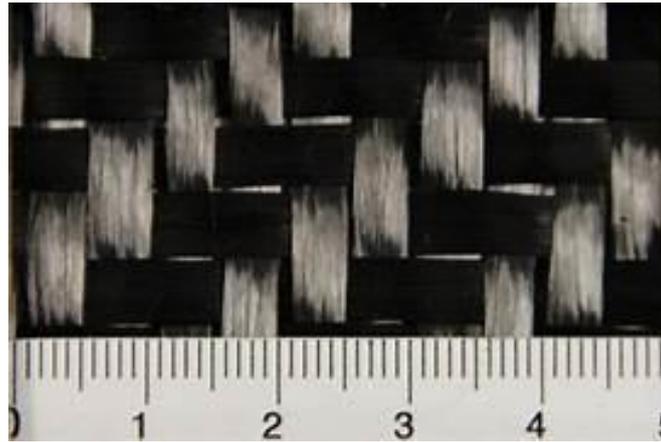


Figure I.6 Renforts Sergé

➤ **Satin**

Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs $(n-1)$ fils de trame et réciproquement. Ces tissus ont des aspects différents de chaque côté. Ces tissus sont assez souples et adaptés à la mise en forme de pièces à surfaces complexes. Ce type de tissu présente une forte masse spécifique.

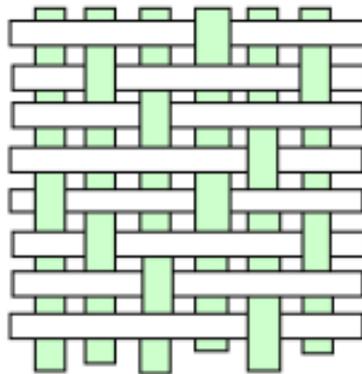


Figure I.7 Renforts Satin

❖ On distingue plusieurs natures de fibre :

a) **Fibre de verre**

Elle constitue le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore).

On distingue trois types de fibres [4] :

E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;

R : pour les composites hautes performances ;

D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).

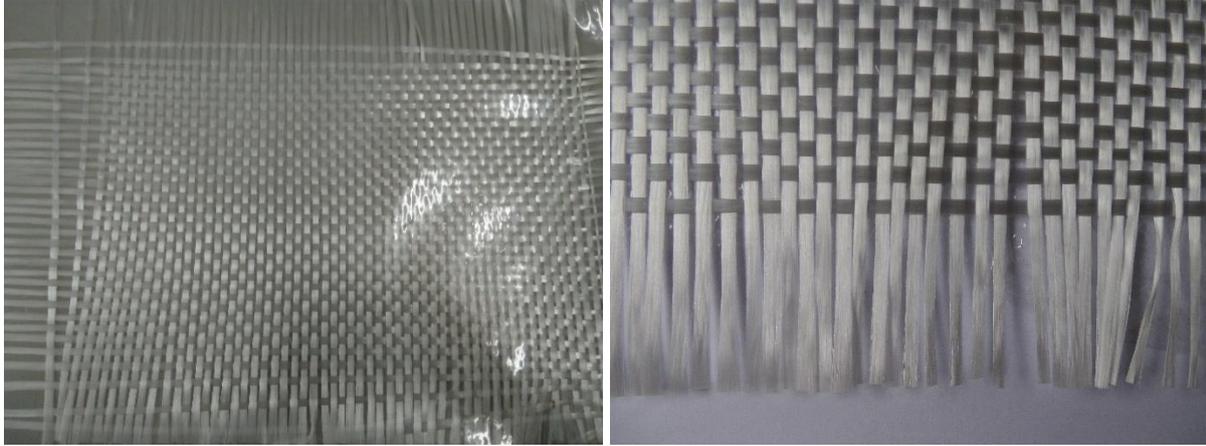


Figure I.8 Fibre de verre

b) Fibres d'aramides

Les fibres aramides ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbones mais leurs résistances à la compression est faible. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour y remédier, des ensimages des fibres peuvent être utilisé.

L'utilisation de composites à fibres hybrides permet également de remédier aux faiblesses des composites à fibres aramides. Des renforts hybrides de type verre-kevlar ou carbone-kevlar sont largement utilisés dans le domaine des loisirs (ski, raquette de tennis).

Quelques exemples de fibres aramides : KEVLAR (Dupont de Nemours, USA), TWARON (Akzo, Allemagne-Hollande), TECHNORA (Teijin, Japon).

Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes :

- La fibre bas module : utilisée pour les câbles et les gilets pare-balles.
- La fibre haute module : employée dans le renforcement pour les composites hautes performances.

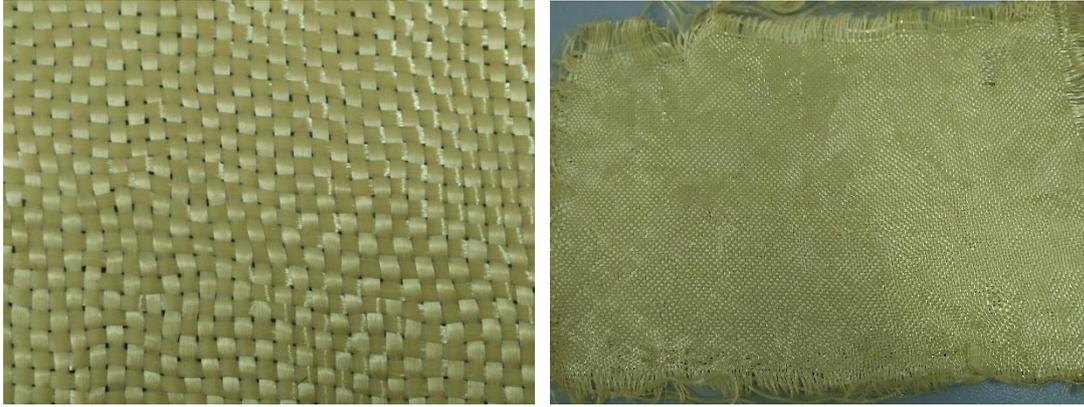


Figure I.9 Fibre d'aramide

c) Fibres de carbone

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur.

Actuellement, les fibres précurseur utilisées sont des fibres acryliques élaborées à partir du Polyacrylonitrile (PAN). Selon la température de combustion, la qualité des fibres de carbone finales dépend fortement des qualités du précurseur.

❖ On distingue deux types de fibres :

- Fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C ;
- Fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C.

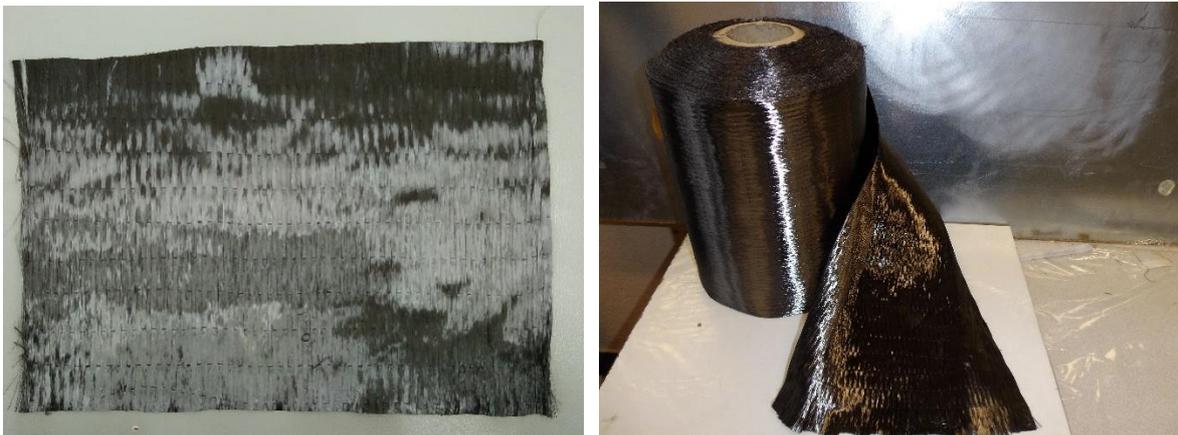


Figure I.10 Fibre de carbone

d) Fibres de bore

Fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène.



Figure I.11 Fibre de bore

e) Fibres céramiques

Les matériaux composites de type céramiques sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support.

Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée entre 500°C et 2 000°C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs d'avions.



Figure I.12 Fibre céramique

Quelques exemples de fibres céramiques :

- Fibres de Carbure de Silicium.
- Fibre de bore.
- Fibre de bore carbure de silicium.

I.3.2.2 Les caractéristiques mécaniques des fibres

Il existe différents types de fibres. Elles peuvent être scindées en deux groupes, les fibres à haut module et les fibres à haute résistance. Les fibres à haut module ont une résistance faible et celles à forte résistance ont un module faible.

Tableau I.3 Caractéristiques mécaniques des fibres

Fibre	Densité	Diamètre du filament (µm)	Charge de rupture en traction (MPa)	Charge de rupture en compression (MPa)	Allongement à la rupture (%)	Module d'élasticité (MPa)
Verre E	2.25	3-30	3400	1200	4.8	73000
Verre R	2.48	3-30	4400	1300	5.4	86000
Aramide bas module	1.45	12	3100	500	2	70000
Aramide haut module	1.45	12	3100	500	1	130000
Carbone haut module	1.8	8	2800	1800	0.5	200000
Bore	2.63	100-200	3500	3500	0.8	400000

I.3.2.3 Caractéristiques moyennes des fibres et renforts

Tableau I.4 Les caractéristiques moyennes des fibres et renforts

Renforts	Diamètre du filament (μm)	Masse volumique (kg.m^{-3})	Module d'élasticité longitudinal (Mpa)	Module de cisaillement (Mpa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique $^{\circ}\text{C}^{-1}$
	d	?	E	G	?	s_r	A	a
Verre E	16	2 600	74 000	30 000	0,25	2 500	3,5	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Verre R	10	2 500	86 000		0,2	3 200	4	$0,3 \cdot 10^{-3}$
Carbone HM	6,5	1 800	390 000	20 000	0,35	2 500	0,6	$0,08 \cdot 10^{-3}$
Carbone HR	7	1 750	230 000	50 000	0,3	3 200	1,3	$0,02 \cdot 10^{-3}$
Kevlar 49	12	1 450	130 000	12 000	0,4	2 900	2,3	$-0,2 \cdot 10^{-3}$
Bore	100	2 600	400 000			3 400	0,8	$0,4 \cdot 10^{-3}$
Silicate d'alumine	10	2 600	200 000			3 000	1,5	
Polyéthylène		960	100 000			3 000		

I.3.3 Les charges et les additifs

I.3.3.1 Les charges [1]

➤ Charges renforçantes

L'objet de l'incorporation de charges renforçantes est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine. Ces charges peuvent être classées suivant leur forme géométrique en :

- Charges sphériques.
- Charges non sphériques.

➤ Charges non renforçantes

Les charges non renforçantes ont pour rôle soit de diminuer le coût des résines en conservant les performances des résines, soit d'améliorer certaines propriétés des résines.

Parmi ces classes on trouve :

- Charges de faible coût.
- Charges ignifugeantes.
- Charges conductrices et antistatiques.

I.3.3.2 Les additifs

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme :

- Lubrifiants et agents de démoulage,
- Pigments et colorants,
- Agents anti-retrait,
- Agents anti-ultraviolets.

I.4 Mise en œuvre et architecture des matériaux composites

La plupart des méthodes de mise en œuvre consistent à élaborer les pièces en matériaux composites par couches successives comportant matrice et renfort [1].

I.4.1 Moulage au contact [4]

❖ Principe

Procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée.

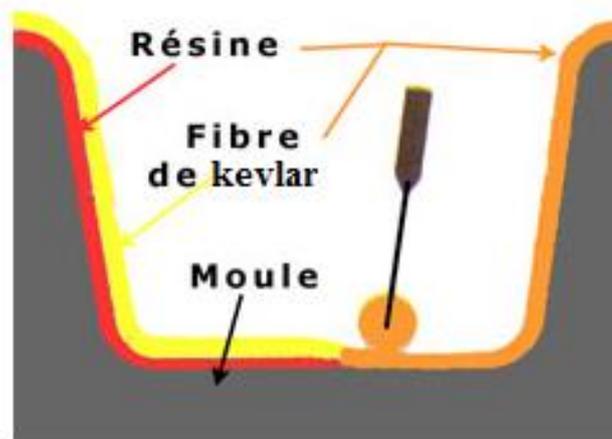


Figure I.11 Principe du moulage au contact [1]

I.4.2 Moulage par projection simultanée

❖ Principe [4]

Procédé manuel ou robotisé permettant la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables à température ambiante et sans pression. Les matières premières sont mises en œuvre à l'aide d'une machine dite "de projection" comprenant :

- Un dispositif de coupe - projection du renfort (fibre).
- Un ou deux pistolets projetant simultanément la résine.

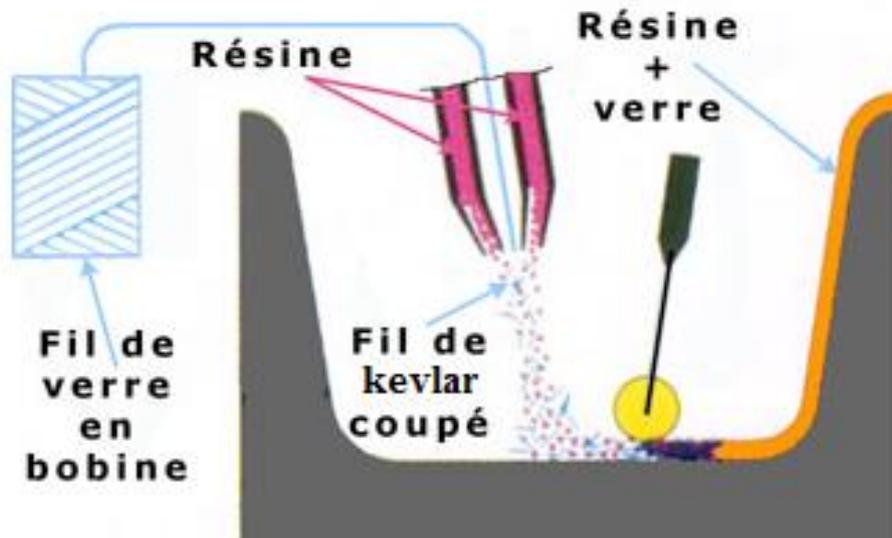


Figure I.12 Principe du moulage par projection simultanée

I.4.3 Moulage sous vide

❖ Principe [4]

Le moulage sous vide s'effectue entre moule et contre moule rigide, semi-rigide ou souple suivant la technologie de mise en œuvre.

Le renfort (mat, tissu, préforme) est placé à l'intérieur du moule ; la résine catalysée est versée sur le renfort. On utilise la pression qui s'exerce sur le moule lors de la mise sous vide pour répartir la résine et imprégner le renfort.

La résine peut également être injectée par l'aspiration consécutive au vide.

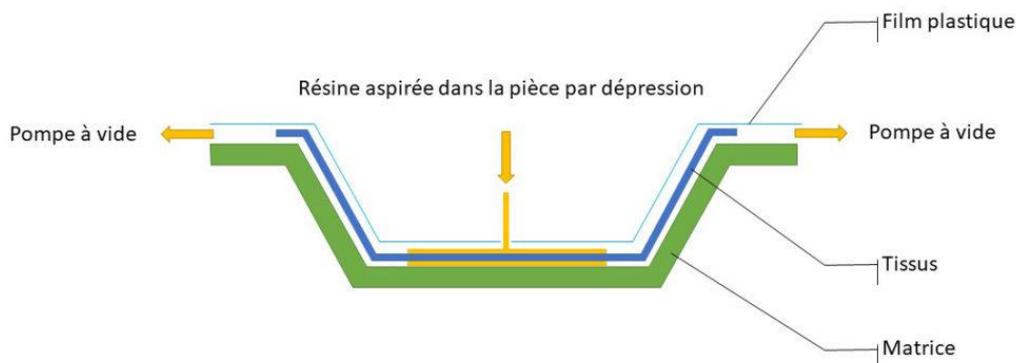


Figure I.13 Principe de moulage par infusion [1]

Avantages et inconvénients

+ Avantages :

- Taux de renfort pouvant atteindre 65 %.
- Bon compactage des tissus.
- Bonne imprégnation.

+ Inconvénients :

- Difficulté de mise en œuvre et de la gestion des paramètres.
- Matériel non réutilisable.

I.4.4 Moulage par projection de résine

❖ Principe

Le moulage par injection de résine RTM (Résine Transfert Molding). Une nappe de fibre (tissus, mats) est déposée dans un moule fermé étanche et la résine est injectée à basse pression.

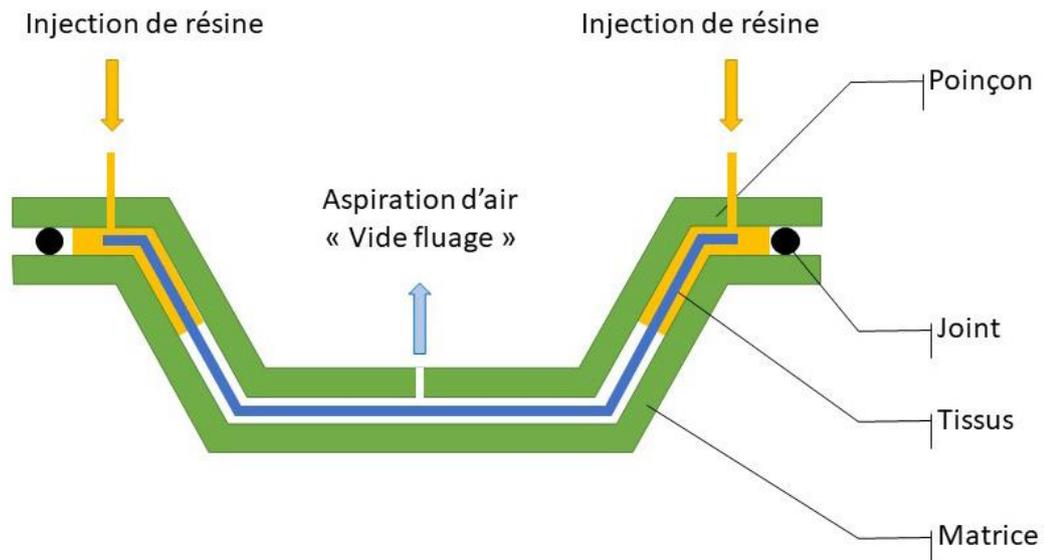


Figure I.14 Principe de moulage par injection de résine [1]

I.4.5 Moulage par centrifugation

❖ Principe [4]

Procédé de moulage limité aux enveloppes cylindriques. Le renfort (fibres longues coupées) et la résine sont déposés dans un moule cylindrique chauffé tournant à grande Vitesse [1].

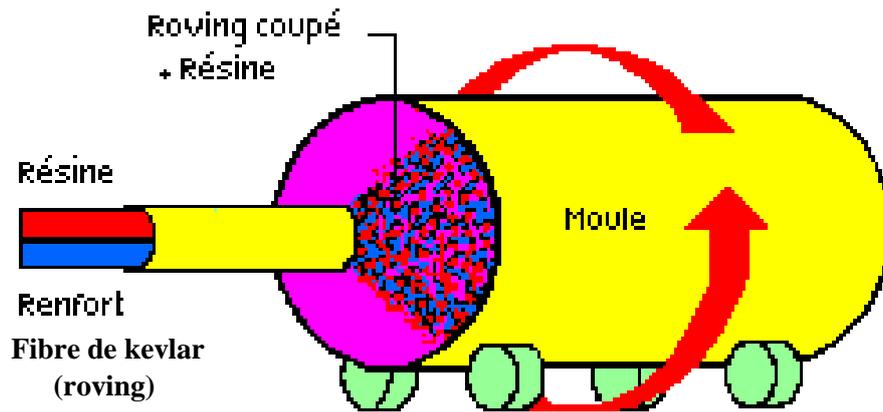


Figure I.15 Principe de moulage par centrifugation [1]

I.5 Structure des matériaux composites

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types :

- Les monocouches.
- Les stratifiés.
- Les sandwiches.

I.5.1 Les monocouches

Les monocouches sont les éléments de base des structures composites. Des fibres unidirectionnelles placées dans le plan médian sont emprisonnées dans une matrice polymère.

Ils sont caractérisés par le type de renfort utilisé : des fibres longues (unidirectionnelles ou non), courtes, sous forme de tissus, de rubans [5].

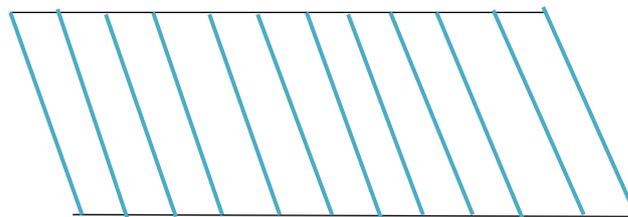


Figure I.16 Composite monocouches

I.5.2 Les stratifiés

On appelle stratifié un matériau composé d'un ensemble ordonné de couches d'orientation et d'épaisseur données, constituées de divers matériaux.

Une couche d'un stratifié est souvent appelée une strate. Le type de stratifié est défini généralement par sa séquence d'empilement, information qui fournit de manière synthétique l'orientation des diverses couches d'un stratifié.

L'avantage que présentent les composites stratifiés est de permettre de créer des matériaux aux propriétés mécaniques orientées de manière optimale afin de mieux répondre aux sollicitations de la structure [6].

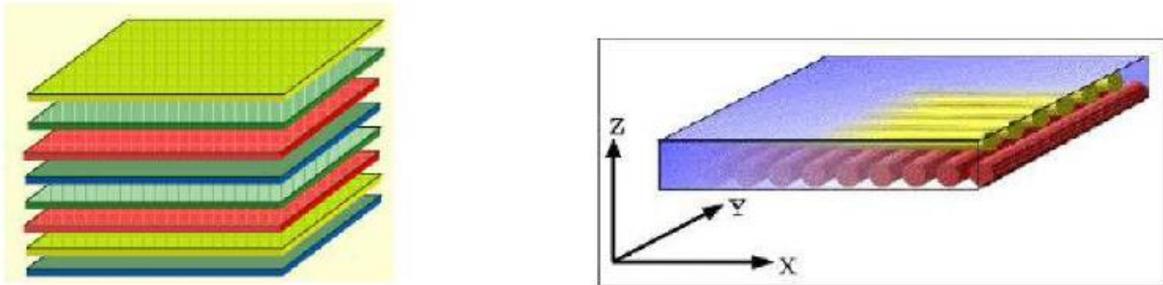


Figure I.17 Plaque stratifiée

I.5.3 Sandwichs

Les structures composites subissant des sollicitations de type flexion ou torsion sont généralement construites en matériaux sandwichs. Une structure sandwich est composée d'une âme et de deux peaux en matériaux composites.

L'assemblage est réalisé par collage à l'aide d'une résine compatible avec les matériaux en présence. Les âmes les plus utilisées sont de type nid d'abeilles, âme ondulée ou mousse. Les peaux sont généralement constituées de structures stratifiées. Une âme nid d'abeilles est présentée sur la figure 1.18.



Figure I.18 Sandwichs

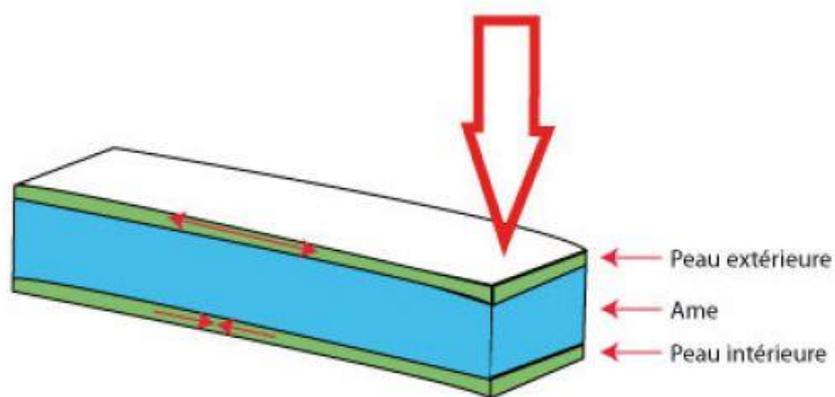


Figure I.19 Composite sandwich

I.6 Les domaines d'utilisation

Les matériaux composites de nos jours prennent une place prépondérante dans différents domaines :

- Électricité et électronique,
- Bâtiment et travaux publics,
- Transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux (notamment militaire),
- Santé (instrumentation médicale), [6].

I.7 La loi de mélange pour les composites stratifiés

Les déformations des matériaux homogènes et isotropiques peuvent être décrites assez simplement à l'aide des modules d'élasticité et des contraintes de déformation, qui sont les propriétés de base des matériaux bruts.

Dans le cas des composites, chaque élément joue un rôle différent et c'est l'association de ces propriétés qui confère au matériau final ses caractéristiques propres.

Bien que ces caractéristiques finales soient le résultat d'interactions complexes entre le renfort et la matrice, il est possible d'en donner une estimation simple à l'aide de la Loi des Mélanges [7] appliquée aux composites stratifiés :

$$\mathbf{Pc} = \rho c * \mathbf{V} c = \rho f * \mathbf{V} f + \rho m * \mathbf{V} m \quad \text{où } (\mathbf{V} f + \mathbf{V} m) = 1 \dots (1.1)$$

Avec :

- $\mathbf{V} f$ = fraction volumique de fibres.
- $\mathbf{V} m$ = fraction volumique de matrice.
- $\mathbf{P} c$ = poids estimé du composite.
- ρf = masse volumique de la fibre.
- ρm = masse volumique de la matrice.

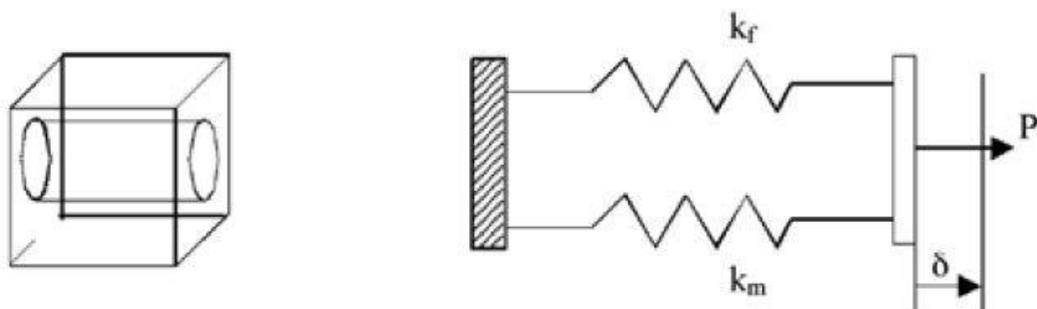
Il s'agit de valeurs théoriques, en réalité la présence de vides fait que $\mathbf{V} f + \mathbf{V} m \leq 1$. Par exemple, le module d'élasticité en traction peut être estimé en se basant sur les modules respectifs de la fibre et de la matrice.

Cette équation peut être modélisée par un système de ressorts associés en parallèle Figure 1.19.

$$\mathbf{E} c = \mathbf{E} f * \mathbf{V} f + \mathbf{E} m * \mathbf{V} m \dots (1.2)$$

Avec :

- $\mathbf{E} c$ = module d'élasticité en traction estimé du composite.
- $\mathbf{E} f$ = module d'élasticité en traction de la fibre.
- $\mathbf{E} m$ = module d'élasticité en traction de la matrice.
- $\mathbf{V} f$ = fraction volumique de fibres.
- $\mathbf{V} m$ = fraction volumique de matrice.

**Unité de volume matrice + fibres****Modélisation****Figure I.20** Modélisation par un système de ressorts des propriétés en traction d'un composite stratifié



Chapitre II

La fibre d'aramide (Kevlar)

II.1 Introduction

Fibre aramide, connu par beaucoup de monde avec le nom « Kevlar » (nom de marque de DuPont) appartient à une famille de produits synthétiques caractérisés par la force (environ cinq fois plus forte que l'acier sur un poids égal) et la résistance à la chaleur (environ plus de 500 degrés Celsius). Il est approprié aux diverses applications, telles que les composites, les balistiques, l'aérospatiale, l'automobile, les vêtements de protection contre la chaleur /rayonnement / chimiques, l'amiante substitut, les télécommunications (câbles de fibres optiques) et beaucoup d'autres.

Le terme « aramide » provient des mots "aromatiques" et "polyamide" et est un terme général à propos d'une fibre fabriquée dont la substance formant la fibre est une longue chaîne de polyamide synthétique et au moins 85% est de liaisons amide (-CO-NH-) rattachée directement à deux anneaux aromatiques (tels que définis par la US Federal Trade Commission.)



Figure II.1 La fibre d'aramide

Trois fabricants de fibres d'aramide partagent la plupart des marchés d'aramide dans le monde entier : DuPont aux États-Unis fait aramide par le nom de marque "Kevlar" et "Nomex". Teijin au Japon fait aramide par le nom de marque "Twaron" et "Technora". Dernière, Kolon Industries en Corée du Sud fait aramide par le nom de marque "Heracron".

Fibremax Ltd est un fiable processeur de fibre d'aramide Twaron et Kevlar et offres prêt tissus, pour la protection balistique et les composites, avec une capacité de livraison dans le monde entier [7].

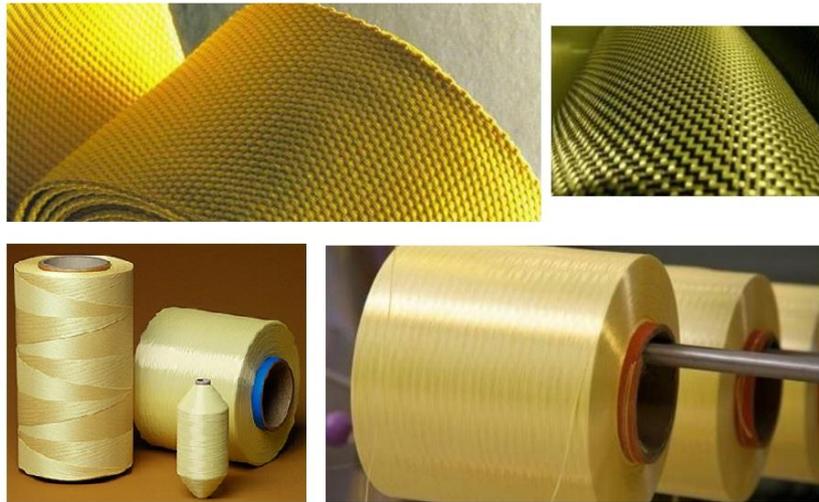


Figure II.2 Fibres de kevlar

II.2 L'histoire d'aramide

Le développement de polyamides aromatiques a changé radicalement à une meilleure direction après la découverte de lyotrope liquide cristallin aramide. Les premières applications commerciales de fibre d'aramide apparaissent dans les années 1960. Stéphanie Kwolek fait important travail tout en travaillant à DuPont en 1961.



Figure II.3 La chimiste américaine Stéphanie Kwolek

Il a fallu beaucoup de temps à comprendre comment faire quelque chose d'utile sur aramide (car il ne serait pas dissoudre à rien), mais enfin, la société a introduit la fibre para-aramide avec le nom de marque "Kevlar". Pour sa grande invention de Kevlar, Stephanie Kwolek a été introduite au Temple de la renommée de l'inventeur des États-Unis en Juillet 1995.

II.3 Les caractéristiques des fibres aramides

Pour résumer, les caractéristiques générales d'aramide sont :

- Haute résistance.
- Résistance à l'absorption.
- Résistance au solvant organique, bonne résistance chimique.
- Pas de conductivité.
- Pas de point de fusion.
- Faible inflammabilité.
- Excellente résistance à la coupure et à la chaleur.
- Sensible aux acides et au rayonnement ultraviolet.

II.4 Applications [7]

II.4.1 Applications – Fibres d'aramide

Les applications de fibre d'aramide sont divisées en deux catégories :

A) le renforcement des composites, qui peuvent être des articles de sport, des avions, des véhicules militaires et de nombreuses autres.

B) les tissus des vêtements tels que les vêtements de protection contre les incendies ou les gilets pare-balles. Plus élaboratrices utilisations de l'aramide sont :

- Diverses formes de matériaux composites.
- Toile à voile.
- Snowboards.
- Gants de protection, casques, armures de corps.
- Enroulement filamentaire des récipients sous pression.
- Vêtements résistants à la flamme et à la coupe.
- Remplacement d'amiante.
- Cordes et câbles.
- Systèmes des câbles de fibre optique.
- Enceintes des moteurs de Jet.
- Cordes de tennis et Bâtons de hockey.
- Roseaux instruments à vent.
- Renforcement des pneus et produits de caoutchouc.
- Renforcement de la planchette circuit.

Bien que chaque demande respecte ses propres exigences, presque toutes partagent les caractéristiques majeures d'aramide : haute résistance, haut module, haute ténacité, stabilité dimensionnalité thermique, faible fluage et un poids léger.

II.4.2 Applications – fibres d'aramide hybride

Les fibres d'aramide (Kevlar) peuvent être utilisés seuls pour renforcement, mais aussi combinés avec d'autres fibres. De cette façon, les propriétés des fibres composant sont renforcées par synergie.

Synergie est l'interaction de plusieurs éléments dans un système au but de produire un effet différent ou plus grand que la somme de leurs effets individuels [définition de wikipedia]. Autrement, lorsque deux ou plusieurs fibres sont combinés, le matériau résultant à tendance à garder les «bonnes» propriétés et à laisser les «mauvais».

Donc, les tissus hybrides tissés à de nombreux styles sont généralement un choix préféré des nombreux fabricants de matériaux composites et sont largement utilisés.

Les fibres d'aramide peuvent être tissés dans les tissus hybrides avec :

1) Fibre de carbone

Exemples :

- En plein tissage (CK170P).
- En twill tissage (CK210T2).

2) Fibre de verre

Exemples :

- En plein tissage (KG251P).
- En twill tissage (KG250T2).
- En multi-axials (KG376X).

3) D'autres combinaisons plus complexes (CKPG251P).

II.5 Avantages – inconvénients

Les avantages principaux d'aramide sont la haute résistance et le faible poids. Comme le graphite, l'aramide a un légèrement négatif axial coefficient de dilatation thermique qui signifie que les feuilles d'aramide peuvent devenir thermiquement stables aux dimensions. Il est très résistant à l'impact et aux dommages à l'abrasion contrairement au graphite. Il peut être imperméable lorsqu'il est combiné avec d'autres matériaux comme l'époxy.

Il peut être utilisé comme un composite de caoutchouc conservant sa souplesse. Le module de traction élevée et le faible allongement à la rupture combinée avec la très bonne résistance aux produits chimiques en font le bon choix pour les différentes parties structurelles composites dans diverses applications.

D'un autre côté, l'aramide présente quelques inconvénients. Les fibres absorbent l'humidité, de sorte que les composites d'aramide sont plus sensibles à l'environnement que le verre ou les composites de graphite. Pour cette raison, il faut être combiné avec des matériaux résistants à l'humidité, comme les systèmes « époxy ». Les propriétés de compression sont relativement pauvres aussi. Par conséquent, l'aramide n'est pas utilisé à la construction de ponts ou partout où ce genre de résistance est nécessaire. En outre, les fibres d'aramide sont difficiles à couper et à broyer sans équipement spécial (par exemple ciseaux spéciaux pour la coupe, forets spéciaux). Enfin, ils souffrent d'une corrosion et sont déclassés par la lumière UV. Pour cette raison, ils doivent être correctement recouverts.

II.6 Aramide dans les composites

Dans un monde où les composites légers et durables remplacent de plus en plus les matériaux classiques, les fibres d'aramide et de para-aramide jouent un rôle important. Elles sont essentielles à l'amplification des composites où la réduction de poids et une excellente tolérance aux dommages sont nécessaires.

De nombreux types de produits de composites sont renforcés par l'utilisation d'aramide à cause de la résistance, la rigidité et la stabilité dimensionnelle de feuilles qui en contiennent.

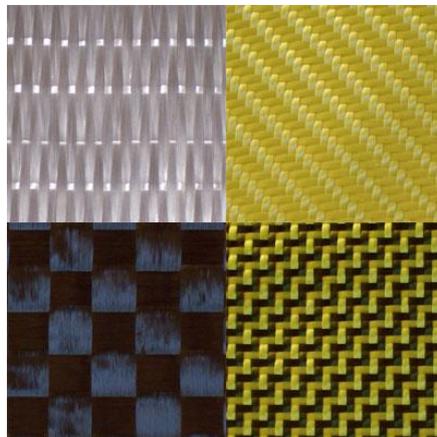


Figure II.4 Matériaux et techniques

Les fibres d'aramide (kevlar) sont compatibles ou peuvent être utilisés avec de nombreux types de systèmes de résine. Le meilleur choix de système de résine est l'époxy parce qu'elle adhère parfaitement bien à la surface des fibres. Ester de vinyle et polyester isophthalique peuvent également être utilisés. Orthophthalic polyester doit être évité car il ne fournit pas une adhérence suffisante à la fibre.

II.7 Méthodes de fabrication

II.7.1 Revêtement à la main

Le plus largement utilisé, c'est un processus simple mais efficace qui prend des investissements en capital relativement faible, mais aussi de coût de la main-d'œuvre élevé. "Ouvrtes" moules sont des outils qui reproduisent (ou dupliquent) d'un seul côté d'un produit, ou un composant. D'autre côté, un autre moule doit être utilisé, et un autre composant doit être fabriqué. Les deux composants sont collés dos à dos et le résultat est un produit avec deux "côtés " finis (et un joint entre eux).

La méthode «Lay-up » est effectuée avec les étapes suivantes : La gelée est une couche pigmenté qui est d'abord appliquée à la brosse ou au pistolet. Après revêtement de gelée, une fine couche de résine (généralement en polyester) et une fine couche de renfort sont placés sur eux, et sont utilisés à la main avec des pinceaux et des rouleaux, si la résine imprègne totalement le tissu. D'autres couches (habituellement mat de fibres coupées) suivent, jusqu'à ce que l'épaisseur et la force souhaitées soient atteintes.

Après traitement, le composant est sorti du moule (ou il est libéré) et coupé. Une post-cuisson à des températures élevées dans ou hors du moule peut également avoir lieu. Le moule est nettoyé, republié (si aucun multiple agent de libération est utilisé) et est retourné à utiliser. La qualité est relativement pauvre, principalement parce que le ratio élevé des résine / renfort est incorporé dans le produit fini (ratio supérieur des résine / renfort implique résistance peu élevée/ poids rapport).

II.7.2 Infusion vide

Similaire à l'ensachage de vide, avec la différence que le renforcement est mis sur le moule sec. Le moule et le renforcement sont scellés et le vide est tiré d'un côté.

Une fois que l'étanchéité est assurée la résine et le durcisseur sont mélangés et introduits dans le renforcement sec par la force d'aspiration de vide. Un "tissu d'écoulement" spécial et un réseau de "tube spirale" facilite la procédure et assure que la résine se déplace rapidement partout dans la cavité du moule, et entièrement imprègne toutes les couches ou renfort à sec.

Le résultat est une qualité aérospatiale, répétitif, avec teneur en résine très faible et de haute résistance.

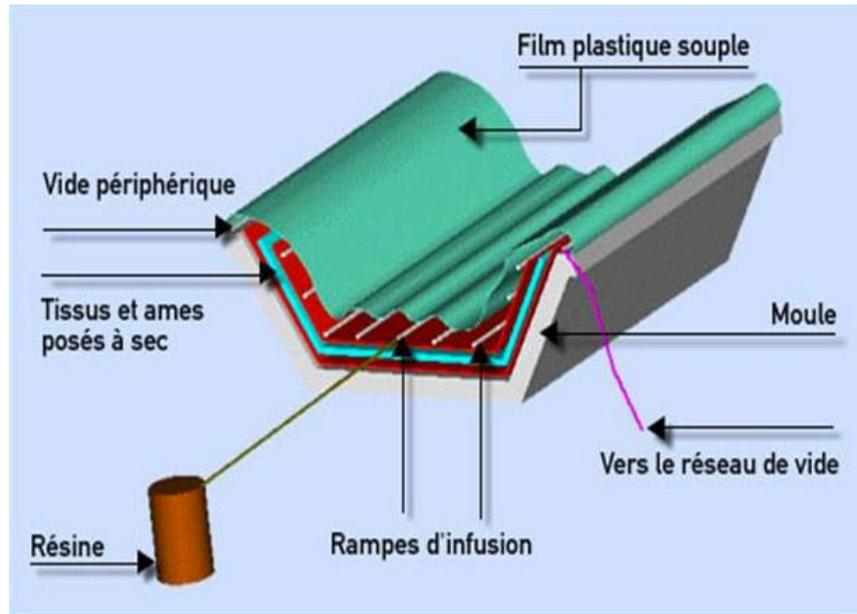


Figure II.5 L'infusion sous vide

II.7.3 RTM

Quelques fois appelé moulage par injection, ce processus intensif de capital emploie un accouplement (mâle et femelle) moule métallique qui est chauffé. L'armature est coupée avec précision et est placée dans la cavité du moule. Habituellement, au lieu de disposer les morceaux de tissu de renfort, un par un, une préforme est utilisé (différentes couches de renforcement sont pré-coupés et maintenus ensemble en particulier motif, selon la forme du moule, avec l'aide d'un «liant».

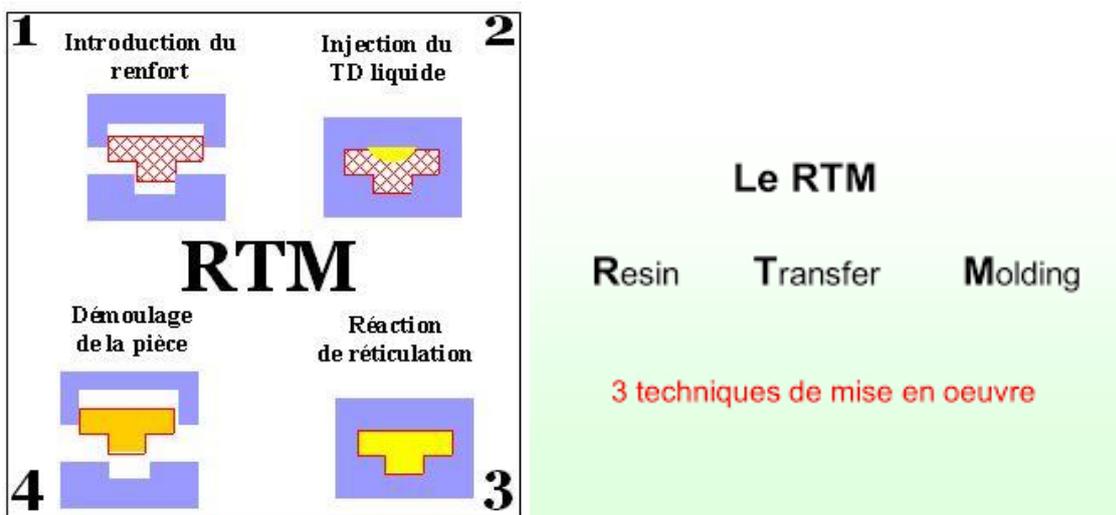


Figure II.6 RTM

De cette façon, le chargement du renfort dans le moule peut-être fait par un mouvement.) Après avoir chargé le renforcement les deux moules correspondants sont fermés hermétiquement et la résine catalysée est pressé à l'intérieur à travers les ouvertures judicieusement positionnées ou avec les injections "portes". L'air est expulsé par d'autres ouvertures judicieusement positionnées, les "vents", et le renforcement est saturé.

II.7.4 RTM léger

Ce processus est une conjonction de RTM et d'infusion de résine. Comme RTM, nous avons deux moules correspondants, mais ici, ils sont faits de matériaux composites. Habituellement, une partie supérieure est plus mince et plus souple que la partie inférieure.

Les deux moules sont fermés (ou scellés) hermétiquement par pression à vide, seul ou sous vide. Résine catalysée est pressée dans le moule. La pression d'injection est beaucoup plus faible que dans RTM, où des moules en métal sont utilisés. La chaleur peut être appliquée, mais en général, de plus, beaucoup plus faible que dans RTM.

Cependant, beaucoup plus gros composants peuvent être fabriqués avec le RTM léger, principalement parce que les moules composites peuvent être construits beaucoup plus grands.

II.8 Nouveau tissu de fibre d'aramide de Teijin donne protection contre la radiation

Teijin Limited a annoncé aujourd'hui son développement du tissu de fibres d'aramide qui protège les utilisateurs contre les rayons X et les rayons gamma. Dès mai, la société va fournir des échantillons à des clients sélectionnés pour faire des applications telles que les vêtements et les matériaux en tôle utilisés autour des niveaux élevés de rayonnement, y compris le domaine médical, des activités de reconstruction dans le nord du Japon, frappé par des catastrophes, et d'essai de rayonnement.

Le produit nouvellement développé, le tissu Technora qui offre de protection contre les rayonnements, est produit en mélangeant des particules de tungstène en seyant plus attentif à la radiation avec haute résistance et para-aramide Technora fibre qui est produit et vendu par Teijin [8].

Le nouveau produit offre les fonctionnalités « clés » suivantes :

- En raison de la résistance et du module de fibre de para-aramide supérieur, le produit est plus fort que le polyester et que les autres fibres malgré contenant des concentrations élevées du tungstène, un métal d' haute densité qui a la tendance à altérer les propriétés mécaniques de la fibre.
- Le niveau de protection contre les rayonnements correspond à la quantité de tungstène mélangé dans la fibre d'aramide.
- Produits en tissu offrent une excellente flexibilité et la maniabilité pour une utilisation de manière pas possible avec des plaques de plomb ou de béton.

II.9 Etude du milieu (vieillissement hydrolytique)

Les fibres aramides sont soumises à des contraintes environnementales différentes suivant le type d'application envisagé. Ainsi, pour une utilisation en extérieur, les fibres aramides peuvent-être exposées au rayonnement ultra-violet (UV). Différentes études ont montré que ces expositions affectaient les propriétés mécaniques [9]. En effet, les rayons UV induisent des mécanismes de formation de radicaux qui peuvent soit conduire à des scissions permanentes de chaînes, soit donner lieu à des recombinaisons développant des irrégularités au sein de la structure moléculaire.

Chapitre III

**Etude expérimentale
du matériau
(traction)**

III.1 Introduction

Lors de notre étude, nous avons réalisé un type d'essai qui est l'essai de traction.

III.2 Essai de traction [10]

III.2.1 Objectif

- Réaliser des essais de traction sur des éprouvettes composites.
- Exploiter les courbes de traction.

III.2.2 Introduction

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental (figure 3.1).

Un essai de traction est une expérience physique qui permet de mesurer le degré de résistance à la rupture d'un matériau quelconque. Cet essai ou expérience consiste à placer une éprouvette du matériau à étudier entre les mâchoires d'une machine de traction, qui tire sur elle jusqu'à sa rupture.

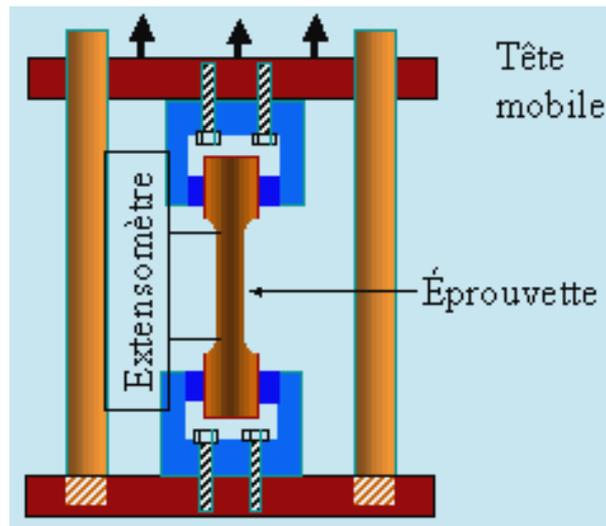


Figure III.1 Principe d'un essai de traction

On enregistre l'allongement et la force appliquée, que l'on convertit ensuite en déformation et en contrainte. On obtient alors le graphe suivant (figure 3.2).

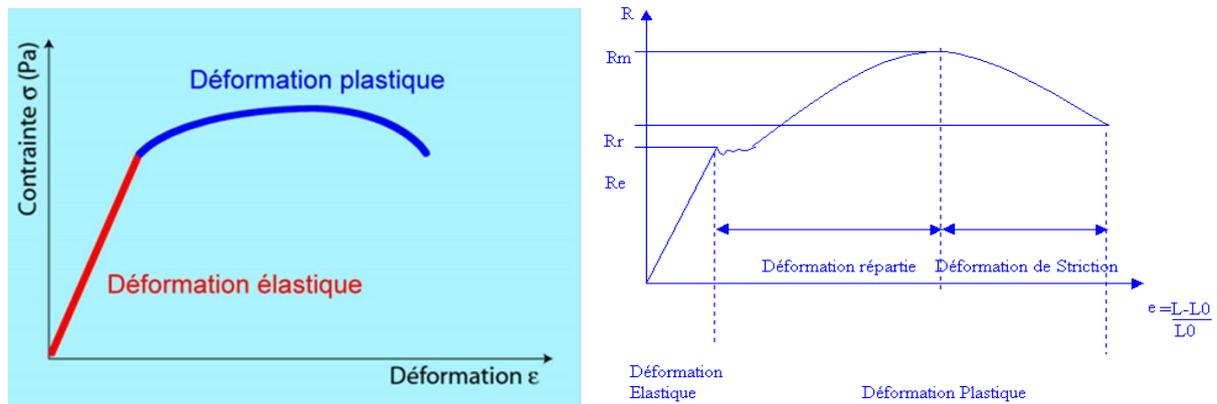


Figure III.2 Courbes types de traction

III.2.3 Les caractéristiques mécaniques

L'essai de traction donne plusieurs valeurs importantes :

- ❖ Le module de Young **E** ou module d'élasticité longitudinale.
- ❖ La limite élastique **Re** ou **σe** qui sert à caractériser un domaine conventionnel de réversibilité.
- ❖ La limite à la rupture (contrainte maximale) **Rm** ou **σm**.
- ❖ La résistance de la rupture **σr** ou **Rr**.
- ❖ L'allongement à la rupture **A**, qui mesure la capacité d'un matériau à s'allonger sous la charge avant sa rupture, propriété intéressante dans certaines applications.
- ❖ Le coefficient de Poisson, qui chiffre la variation de volume induite par la déformation des matériaux dans le domaine élastique.

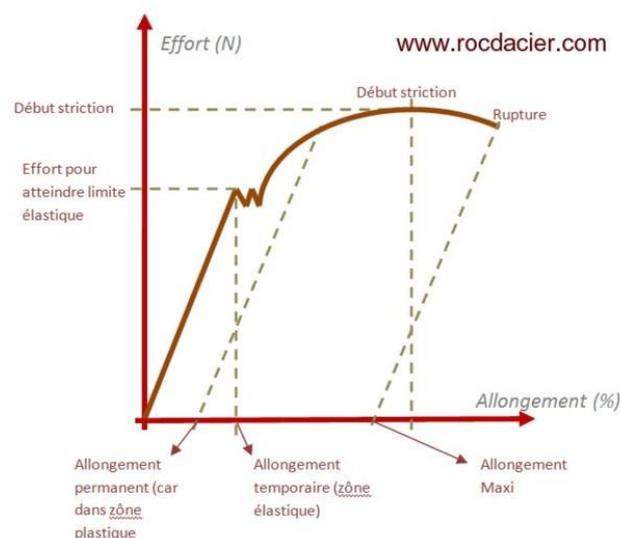


Figure III.3 Signification d'une courbe de traction

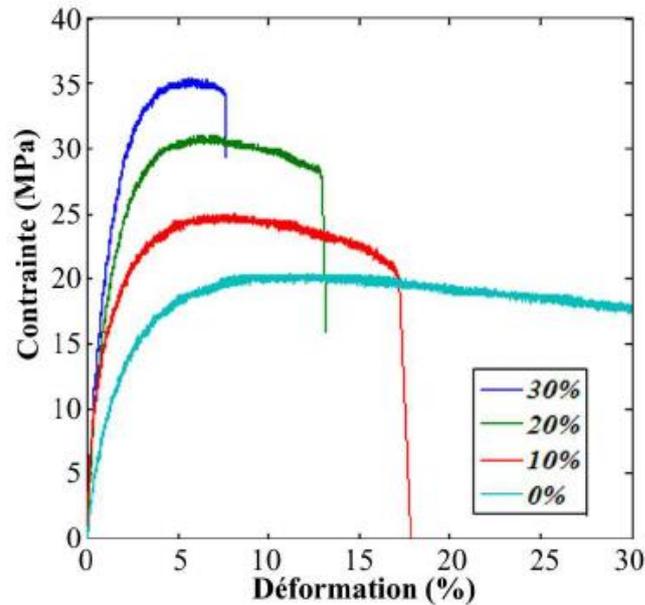


Figure III.4 Courbe contrainte/déformations

- ❖ Sur le graphe n°01 (figure 3.3), on étudie l'allongement de l'éprouvette en fonction de l'effort appliqué.
- ❖ Sur le graphe n°02 (figure 3.4), on fait apparaître les paramètres du matériau, à savoir le pourcentage d'allongement, en fonction de la contrainte qui est le rapport de l'effort de traction sur la section l'éprouvette.

La loi de Hooke : $\sigma = E * \epsilon$

Avec :

E (MPa) : Le module de Young ou module d'élasticité longitudinale.

$\epsilon = DL/L$ (sans unité) : L'allongement à la rupture.

$\sigma = F/S$ (MPa) : La contrainte de traction.

$F = L$ 'effort de traction.

$S = L$ a section de l'éprouvette.

III.2.4 La machine de traction

La machine de traction ZO50 est une machine de traction universelle à un seul poste de travail, c'est une machine à vis sans fin (figure 3.5). Elle est constituée des parties essentielles suivantes : la traverse sur colonnes et la partie électronique de commande. Elle est dotée d'extensomètre avec les deux palpeurs.

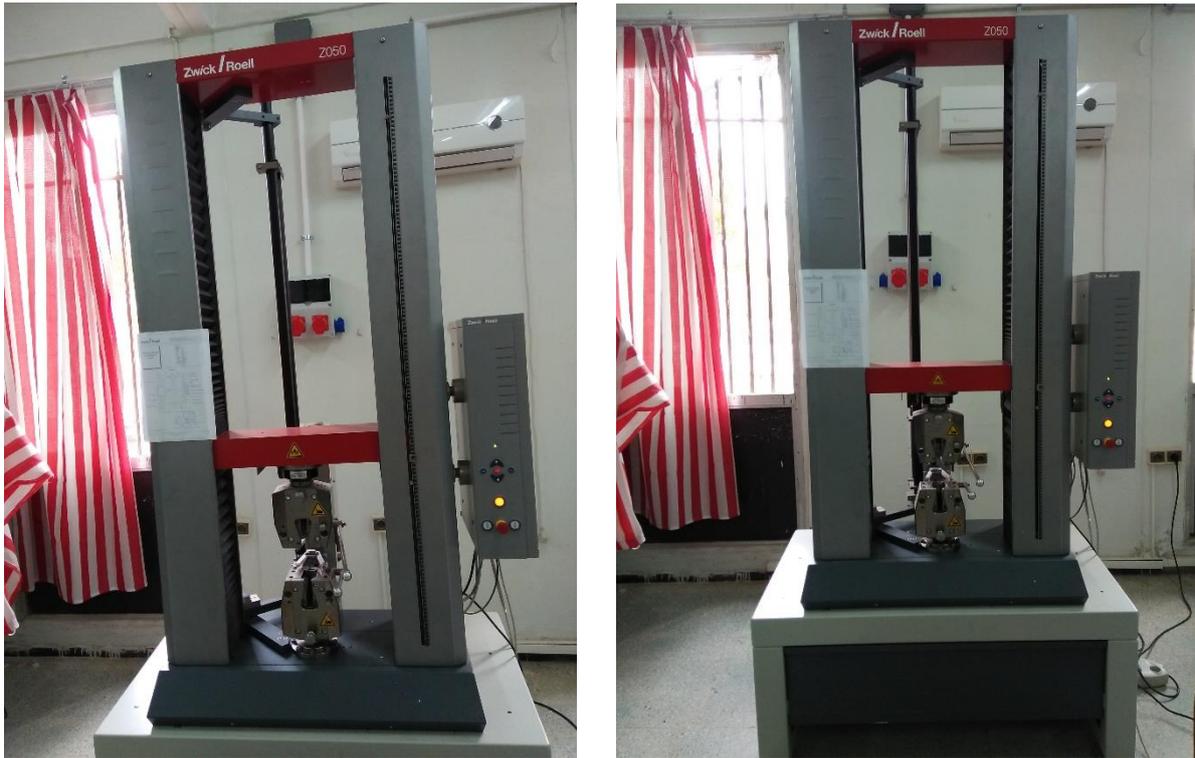


Figure III.5 Machine de traction

III.2.5 Résultats des essais de traction

III.2.5.1 Les résultats de type aramide/époxy

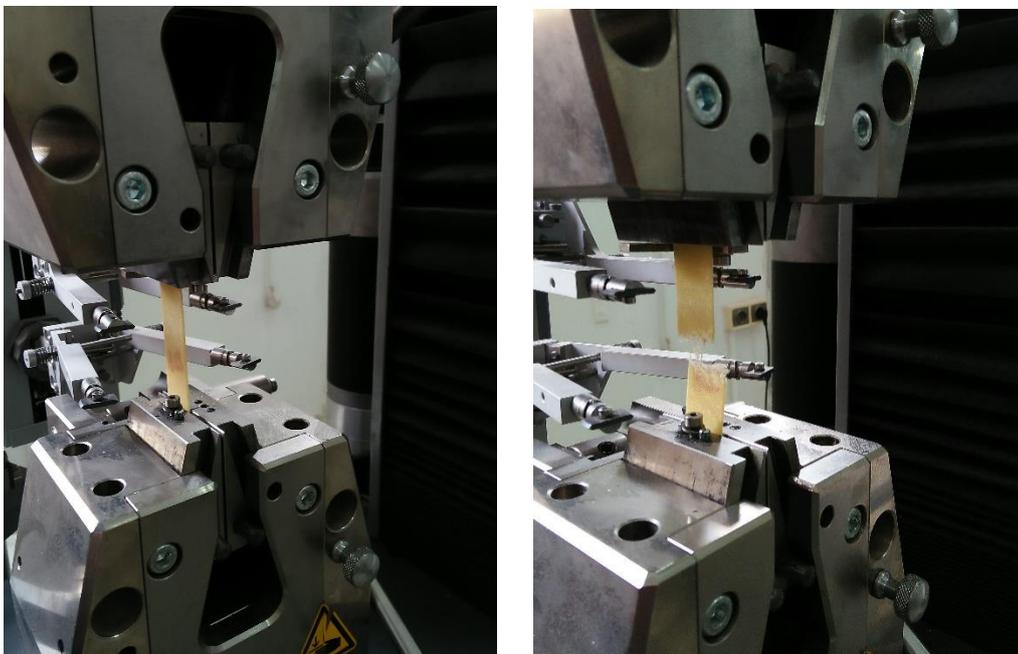


Figure III.6 L'éprouvette en traction



Figure III.7 L'éprouvette en fibre de kevlar

III.2.5.2 Résultats expérimentaux obtenus

Tableau 3.1 Caractéristiques mécaniques de l'éprouvette

Caractéristiques mécaniques	Masse surfacique (g/m ²)	Fibre (%)	Module longitudinal (GPa)	Module transversal (GPa)	Contrainte à la rupture (MPa)	Déformation à la rupture (%)
Kevlar Taffetas	170	42%	16.5	16.5	305	2.7%

III.3 Les modules de fibres et de la matrice

Pour les fibres :

Module de cisaillement :

$$G_f = \frac{E_f}{2(1 + \nu_f)} \dots \dots \dots (3.2)$$

Module de compressibilité :

$$Kf = \frac{Ef}{3(1 - 2Vf)} \dots \dots \dots (3.3)$$

Module de la compression latérale :

$$Kf = kf + \frac{Gf}{3} \dots \dots \dots (3.4)$$

Pour la matrice :

Module de cisaillement :

$$Gm = \frac{Em}{2(1 + Vm)} \dots \dots \dots (3.5)$$

Module de compression latérale :

$$km = \frac{Em}{3(1 - 2Vm)} \dots \dots \dots (3.6)$$

Module de compression latérale :

$$Km = km + \frac{Gm}{3} \dots \dots \dots (3.7)$$

i. Module d'élasticité longitudinal EL

Il est bien approché par cette relation :

$$EL = EfVf + Em(1 - Vf) \frac{4(1 - vf)(vf - vm)^2}{\frac{vf}{km} + \frac{1}{Gm} + \frac{1 - Vf}{kf}} \approx VfEf + Em(1 - Vf) \dots \dots \dots (3.8)$$

ii. Module d'élasticité transversal Et

$$Em = \frac{2}{\frac{1}{2KL} + \frac{1}{2Gmm'} + 2V^2Lm} \dots \dots \dots (3.9)$$

iii. Coefficient de poisson V_{LT}

$$v_{LM} = v_f V_f + v_m (1 - V_f) + \frac{v_m (1 - V_f) (v_f - v_m) \left(\frac{1}{K_m} - \frac{1}{K_f} \right)}{\frac{V_f}{K_m} + \frac{1}{G_m} + \frac{1 - V_f}{K_f}} \approx V_f V_f + V_m (1 - V_f) \quad (3.10)$$

iv. Module de cisaillement G_{LT}

$$G_{LM} = G_m \frac{G_f (1 + V_f) + G_m (1 - V_f)}{G_f (1 - V_f) + G_m (1 + V_f)} \dots \dots \dots (3.11)$$

v. Module de compression latéral K_L

$$K_L = K_m + \frac{V_f}{\frac{1}{K_f - K_m + \frac{(G_f - G_m)}{3}} + \frac{1 - V_f}{K_m + \frac{4}{3} G_m}} \dots \dots \dots (3.12)$$

vi. Module de cisaillement transversal G_{TT}

$$G_{mm'} = G_m \left[1 + \frac{V_f}{\frac{G_m}{G_f - G_m} + \frac{K_m + \frac{7}{2} G_m}{2 \left(K_m + \frac{8}{3} G_m \right)} (1 - V_f)} \right] \dots \dots \dots (3.13)$$

III.4 Discussion

L'interprétation des résultats de la fatigue et du vieillissement du composite aramide époxy est indispensable pour l'utilisation de ce matériau dans la construction navale. Un mauvais choix du matériau peut se révéler catastrophique pour la construction des embarcations et de ses usagers. A cet effet une bonne investigation s'avère plus que nécessaire et l'étude de l'impact de la fatigue et du vieillissement sera développée dans cette discussion.

Pour bien comprendre le comportement de ce matériau composite, nous allons analyser sa réaction à la fatigue pure puis à l'effet combiné de la fatigue et du vieillissement. Nous scindons cette analyse en trois parties: effet de la fatigue pure, effet d'une fatigue constante suivi du vieillissement variable et effet d'un vieillissement constant suivi d'une fatigue variable. Cette analyse par paliers de fatigues et de vieillissements nous permet de mettre en relief les effets de ces différents paramètres et de voir, lequel des deux est le plus influant.

III.4.1 Effet de la fatigue pure

L'analyse des courbes de la fatigue du matériau aramide-époxy, nous montre une similitude entre les effets des différents nombres de cycles de fatigue (**Figure III.8**). A cet effet nous pouvons conclure, que ce matériau résiste aussi bien à 100 cycles qu'à 50000 cycles et que cette fourchette de fatigue à la même influence sur ce dernier. Il s'avère indispensable d'utiliser une fatigue plus importante pour avoir une idée sur la résistance de ce matériau.

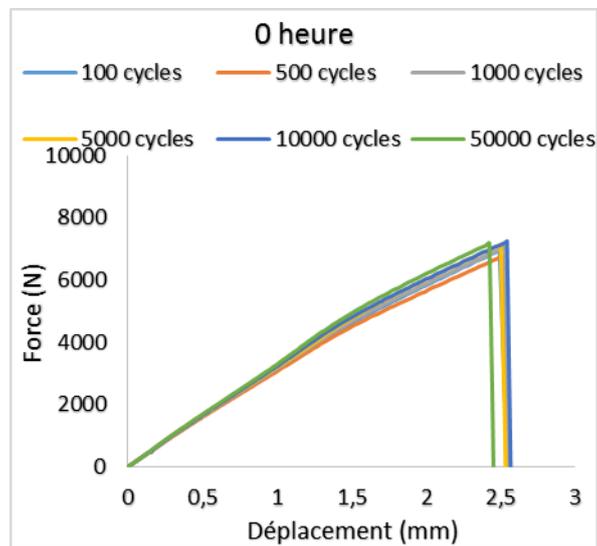


Figure III.8 Fatigue après vieillissement de 0 heure

III.4.2 Effet d'un vieillissement constant suivi d'une fatigue variable

Nous avons six paliers de fatigue (100, 500, 1000, 5000, 10000 et 50000 cycles). Nous allons comparer les effets des six paliers de fatigue sur les quatre paliers de vieillissement.

Nous commençons par un vieillissement de 100 heures (**Figure III.9**) en faisant varier la fatigue de 100 cycles à 50000 cycles. Nous constatons que les différentes courbes ont les mêmes allures et que les forces de rupture et les déplacements sont relativement identiques. Cela prouve que la fatigue dans la fourchette 100 à 50000 cycles sous un vieillissement de 100 heures à la même influence sur le matériau.

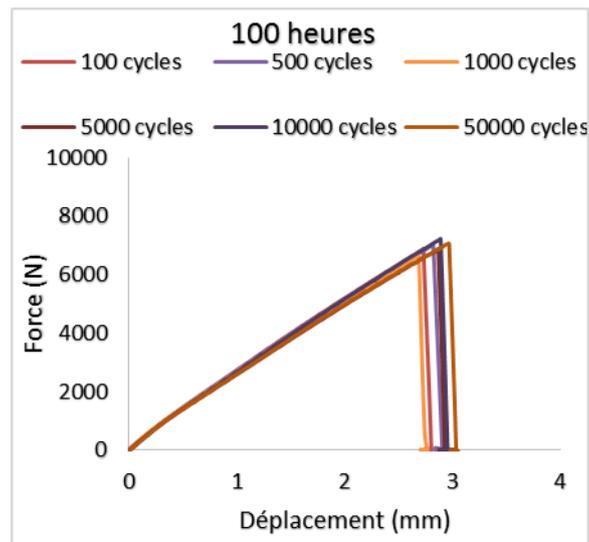


Figure III.9 Fatigue après vieillissement de 100 heures

Sous un vieillissement de 500 heures et sous la même fourchette de fatigue que précédemment (**Figure III.10**), le matériau gagne en résistance malgré le vieillissement. Cela prouve que la résine après avoir subi une fatigue et un vieillissement, au lieu de s'effondrer après le lessivage qu'elle a subi se régénère et renforce le matériau.

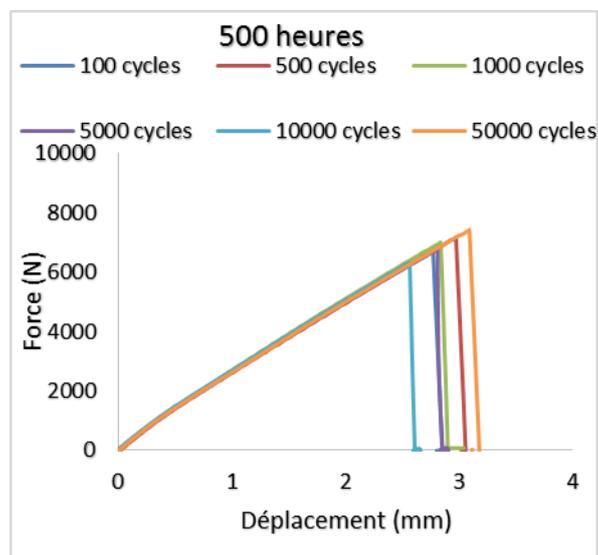


Figure III.10 Fatigue après vieillissement de 500 heures

A 1000 heures, le matériau se comporte presque comme précédemment. Le matériau gagne en résistance après une fatigue à 1000 cycles puis commence à régresser avec l'augmentation de la fatigue, tout en gardant une résistance suffisante jusqu'à la rupture (Figure III.11).

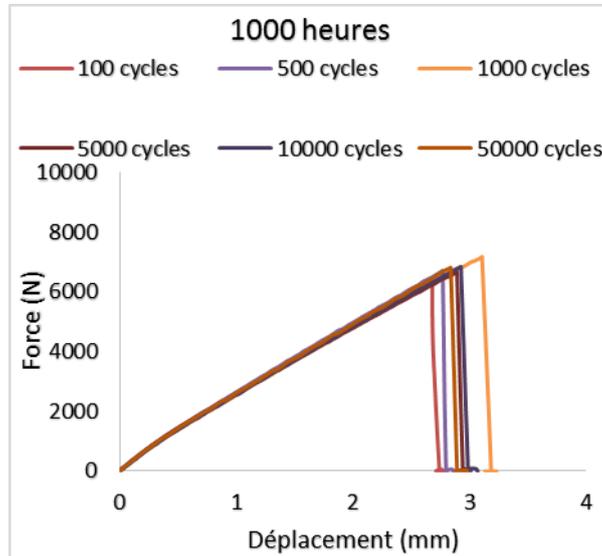


Figure III.11 Fatigue après vieillissement de 1000 heures

En conclusion et d'une manière générale, le matériau composite aramide époxy supporte bien la fatigue et le vieillissement. Les Figure III.12 et III.13 nous montrent bien que le matériau nécessite une force et un allongement plus important pour se rompre.

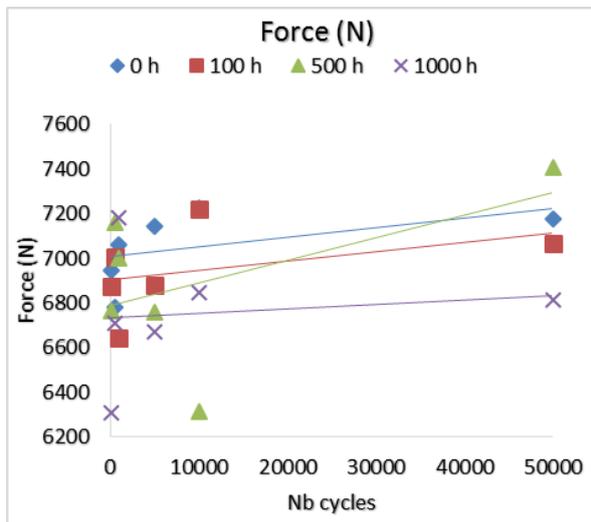


Figure III.12 Forces

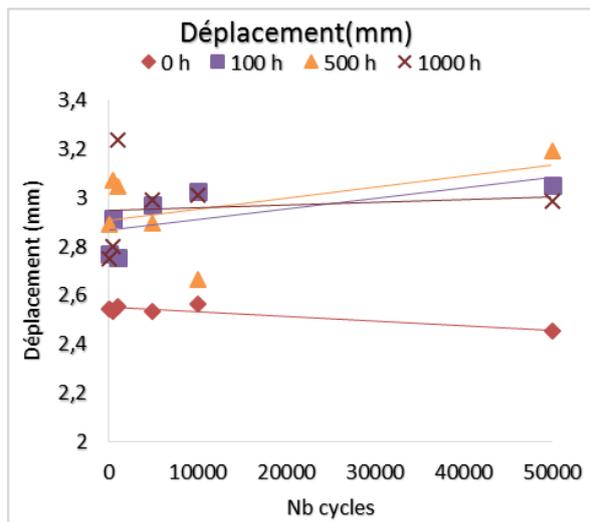


Figure III.13 Déplacements

III.4.3 Effet d'une fatigue constante suivi du vieillissement variable

Nous avons quatre paliers de vieillissement (0, 100, 500 et 1000 heures). Pour chaque nombre de cycle, nous allons faire varier la durée de vieillissement.

Nous commençons par 100 cycles de fatigue et déterminons l'effet du vieillissement. La figure III.14 nous montre une résistance à la rupture des éprouvettes vieilles relativement égale à celle de l'éprouvette n'ayant reçu aucune fatigue. Par contre nous remarquons un allongement à la rupture plus conséquent chez les éprouvettes vieilles.

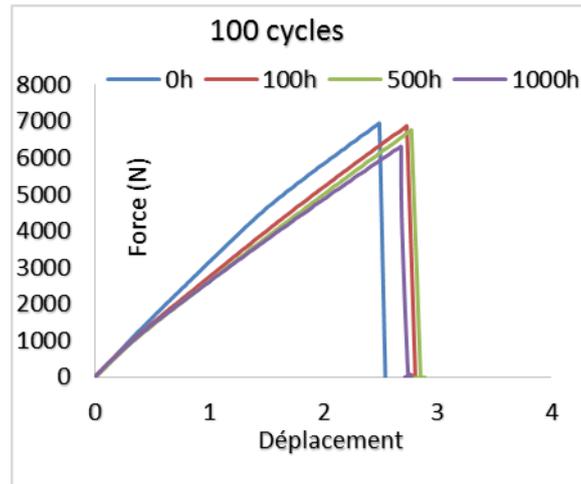


Figure III.14 Vieillissement après fatigue de 100 cycles

La figure III.15, quand à elle, après une fatigue à 500 cycles, elle nous montre des effets similaires que pour les 100 cycles. Après vieillissement, les éprouvettes gagnent relativement en résistance et en allongement. L'impact combiné de la fatigue et du vieillissement est positif sur le matériau.

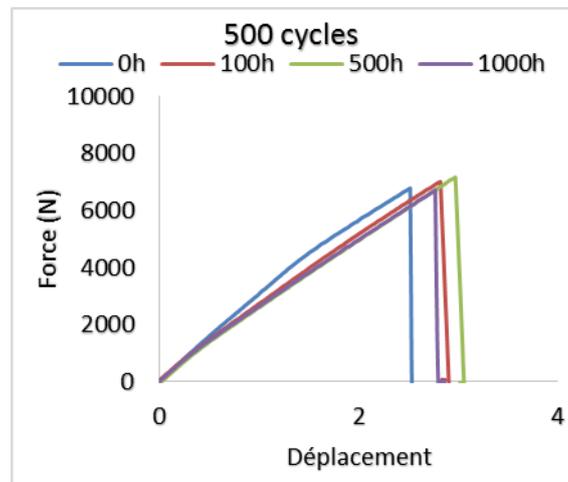


Figure III.15 Vieillissement après fatigue de 500 cycles

Les 1000 cycles de fatigue est le meilleur cas pour suivre le vieillissement du composite aramide-époxy en eau salée (fig. III.16). Les 100 h de vieillissement affaiblissent le matériau, puis progressivement il commence à prendre de la résistance, au point où à 1000h de vieillissement, il devient plus résistant que celui qui n'est exposé à aucun vieillissement. Même chose pour l'allongement, le matériau s'allonge plus avec la durée de vieillissement. Il gagne plus en plasticité. Nous pouvons dire que le matériau supporte bien le vieillissement en eau salée.

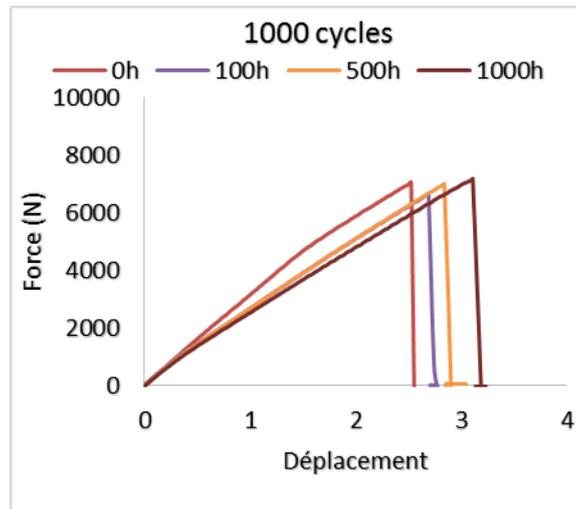


Figure III.16 Vieillissement après fatigue de 1000 cycles

Le comportement du matériau soumis à une fatigue de 5000 cycles est exactement à l'inverse du cas précédent (fig. III.17). Il commence à perdre progressivement de la résistance à partir de 100h de vieillissement jusqu'à 1000h. Par contre le matériau gagne en allongement. Dans ce cas de figure le vieillissement est néfaste pour le matériau à l'inverse du cas précédent.

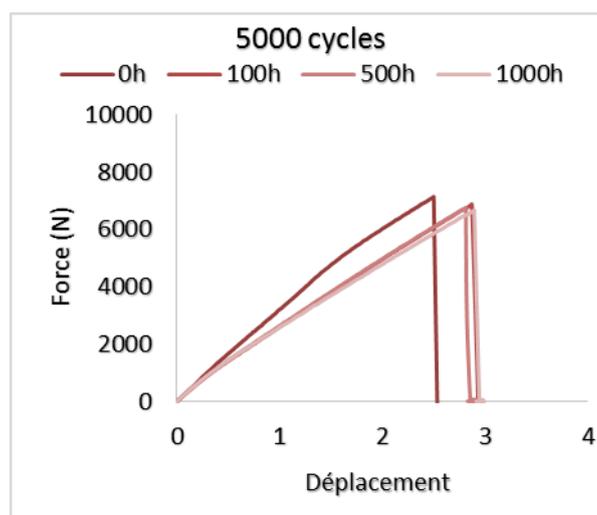


Figure III.17 Vieillissement après fatigue de 5000 cycles

Après une fatigue de 10000 cycles, soit le double du cas précédent (fig. III.18), le matériau ne va pas perdre en résistance après 100h de vieillissement, mais va gagner en allongement. Ce n'est qu'à 500h de vieillissement qu'il va perdre 15 % de sa résistance. Puis il va encore gagner en résistance.

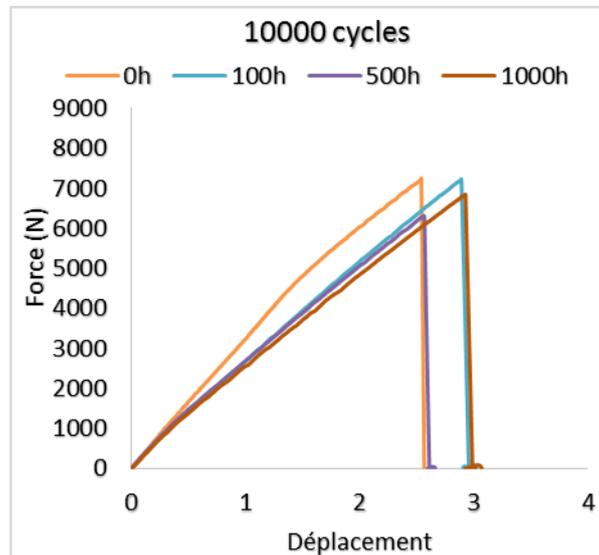


Figure III.18 Vieillissement après fatigue de 10000 cycles

Même à 50000 cycles de fatigue le matériau continu à résister (fig. III.19). Il perd légèrement de sa résistance après un vieillissement de 100h, mais se rattrape à 500h pour devenir plus résistant. Mais cette résistance va diminuer à partir de 1000h de vieillissement. Par contre il va gagner en allongement durant tous les cycles de vieillissement.

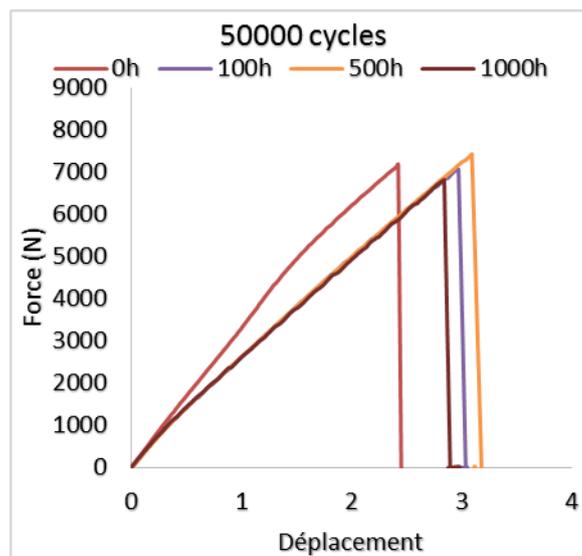


Figure III.19 Vieillissement après fatigue de 50000 cycles

Pour conclure nous nous référons aux figures III.20 et III.21, où nous pouvons voir le comportement du matériau en fonction de l'augmentation de la durée de vieillissement. D'une manière générale, nous constatons que le matériau perd de sa résistance, mais cette perte est minime et n'a pas d'incidence réelle sur l'intégrité du matériau. Par contre nous constatons une légère augmentation de l'allongement avec l'augmentation du vieillissement. Cela montre que la résine se régénère avec la durée de vieillissement et résiste bien à l'impact du milieu, qui est un bon signe pour le matériau.

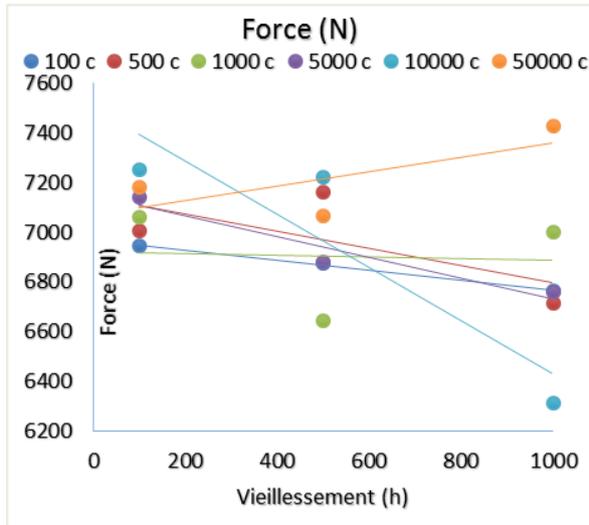


Figure III.20 Forces

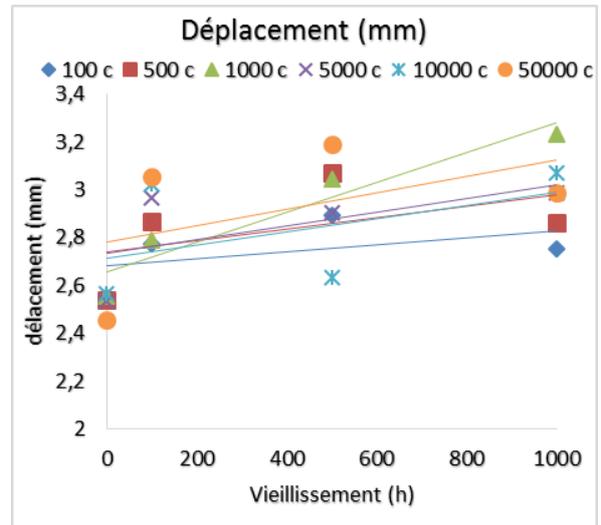


Figure III.21 Déplacements

Nous pouvons donc conclure que malgré la légère perte de résistance du matériau et la légère augmentation de l'allongement, le matériau composite aramide-époxy se comporte bien en milieu agressif et peut être utilisé en construction navale sans beaucoup d'aléas.

III.5 La microscopie électronique

L'observation microscopie a été effectuée au niveau de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines et Métallurgie d'Annaba (ENSMM), au moyen d'un microscope optique de type Nikon (ECLIPSELV100ND) et d'une caméra Nikon intégrée (DS-Fi2) et d'un logiciel (NIS élément).



Figure III.22 Le microscope optique –Nikon-

III.5.1 Préparation des coupes microscopiques

Pour observer la microstructure des composites, des coupes microscopiques peuvent être réalisées.

III.5.2 Analyse des coupes microscopiques

Au moyen de coupes microscopiques, on peut déterminer :

➤ **La présence ou non de porosités**

On peut d'ailleurs grâce à des algorithmes d'analyse d'images, mesurer le taux de porosité. Il faut pour cela que les fibres contrastent bien avec la matrice.

➤ **De possibles endommagements de la matrice ou des renforts**

Il peut s'agir de fissuration dans la matrice, ou même dans les fibres.

➤ **Des défauts ou décohésion d'interfaces fibres/matrices**

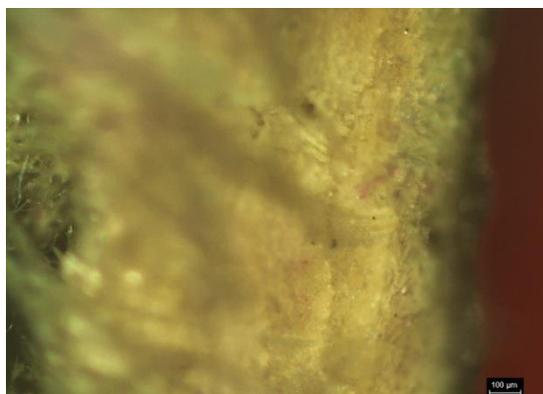
Afin d'affiner nos investigations et mieux comprendre les effets qu'a subi le matériau, nous avons fait appel à l'outil microscope optique. Il est sensé compléter les résultats obtenus par traction. Pour cela nous avons réalisé des photos pour mettre en relief les effets de la traction.

- Epreuve en aramide avant la microscopie :

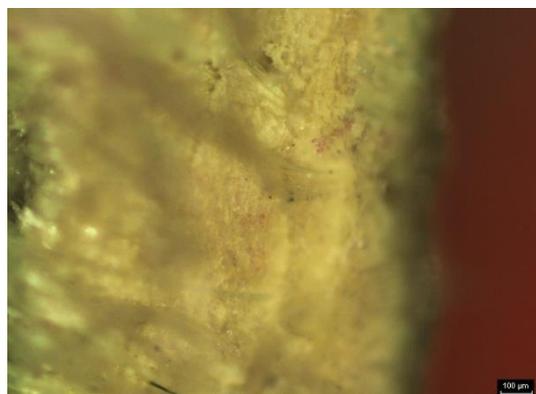


Figure III.23 L'éprouvette en aramide

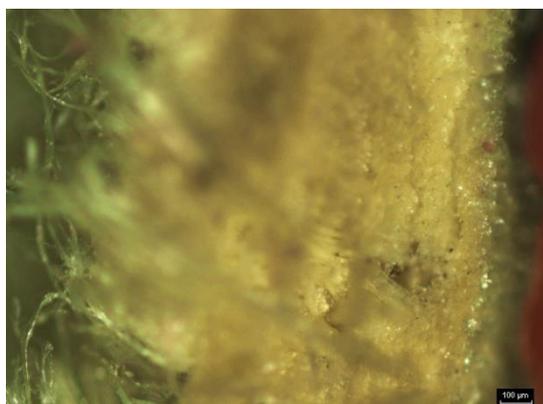
- L'éprouvette d'après la microscopie :



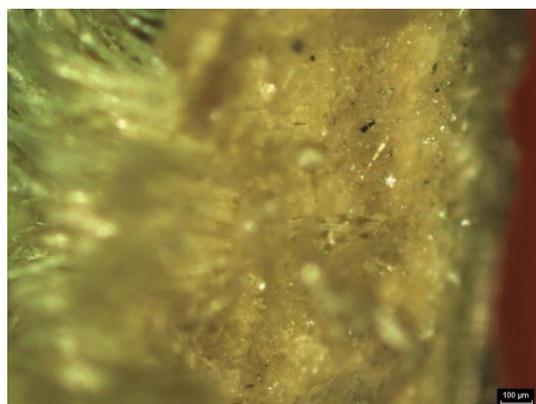
(a)



(b)



(c)



(d)

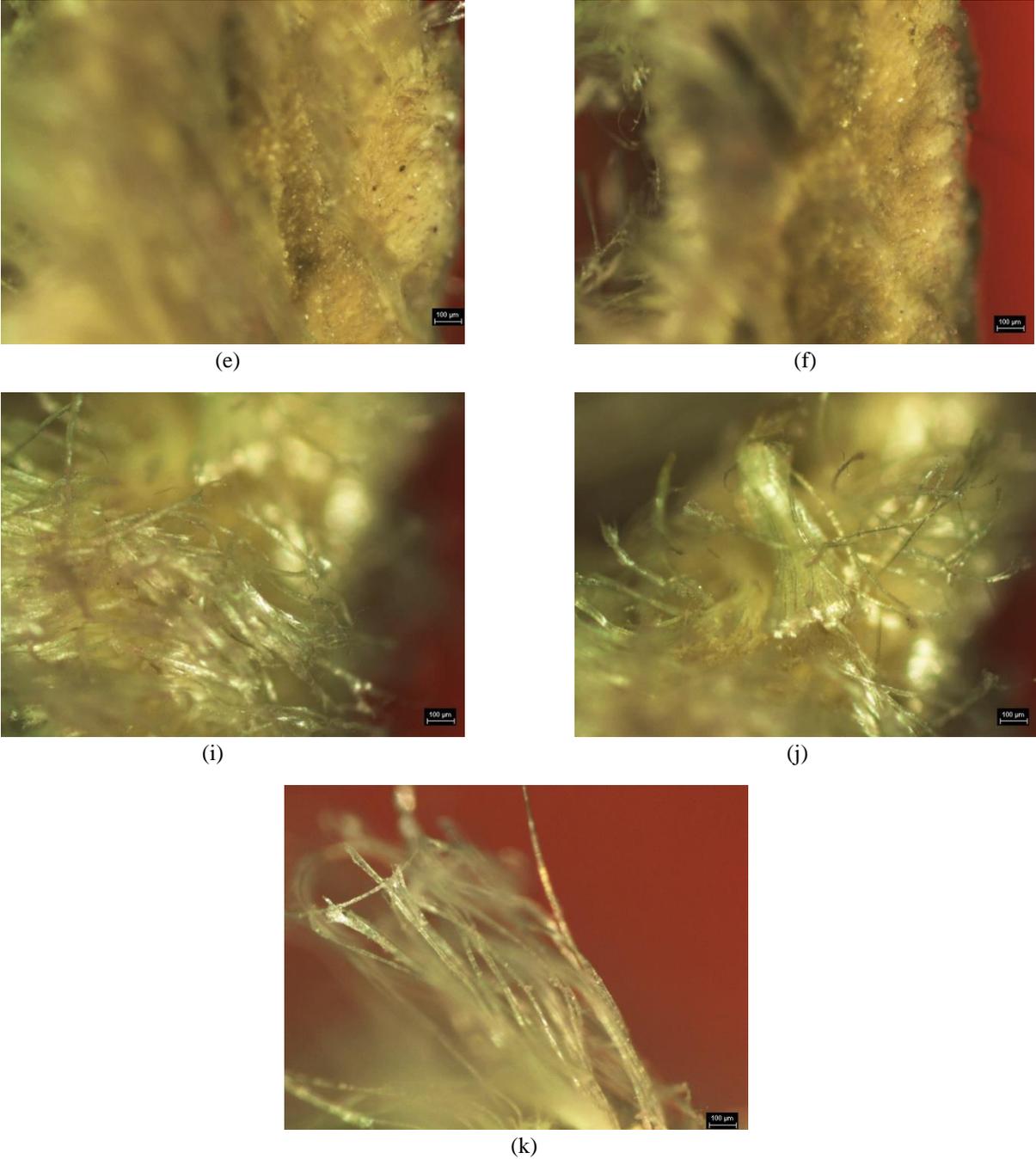


Figure III.24 Résultats de la microscopie optique pour les éprouvettes en aramide

III.5.3 Coupes longitudinales

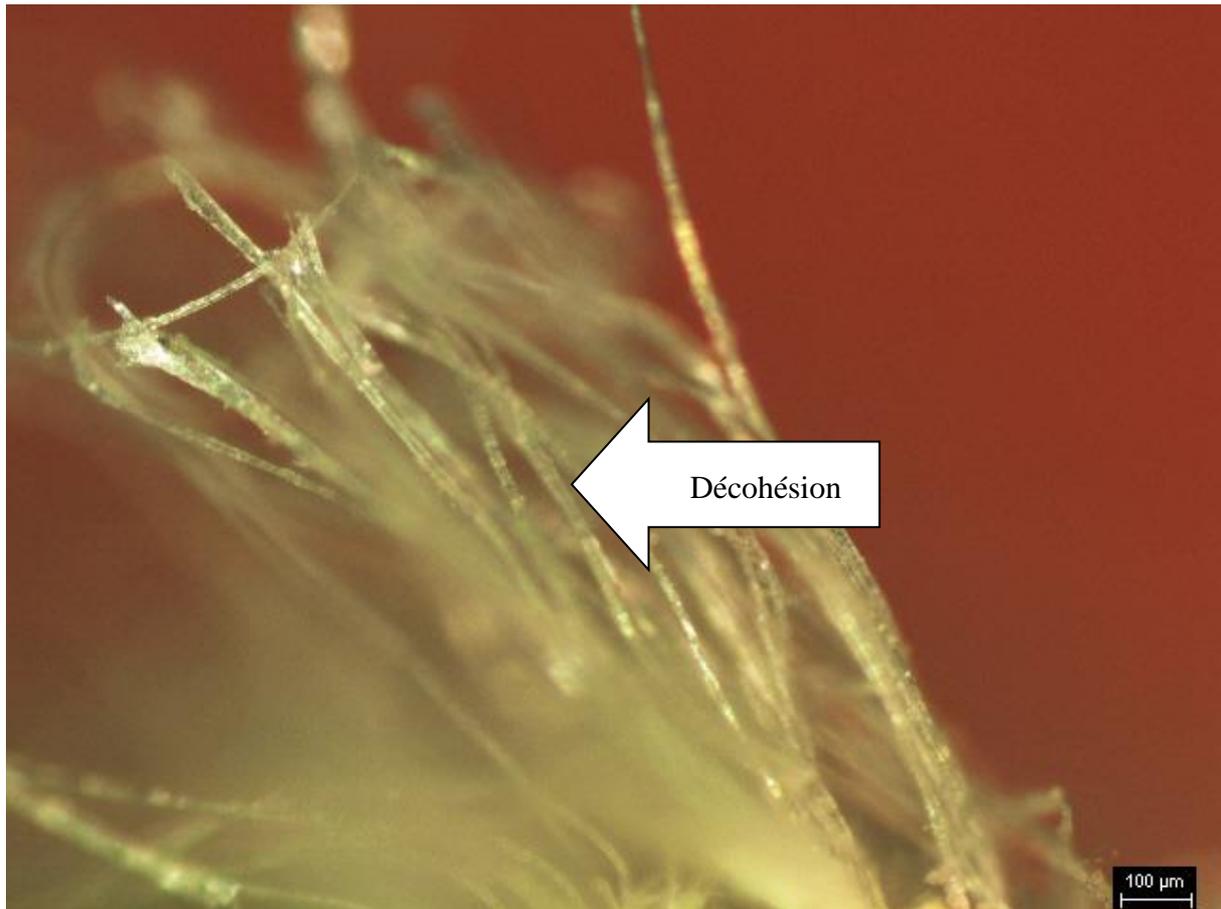


Figure III.25 Microscopie optique, coupe longitudinale, (rupture de fibres et décohésion)

Sur la figure III.25, nous constatons qu'il y a une décohésion très importante. Cette dernière apparaît suite à une rupture de fibres. Suite à un effort de traction longitudinal, les fibres sont soumises à des contraintes de plus en plus importantes, elles vont être délogées de leur matrice en engendrant des décohésions. A la limite de résistance, les fibres vont céder en se rompant et c'est la fin de vie du matériau.

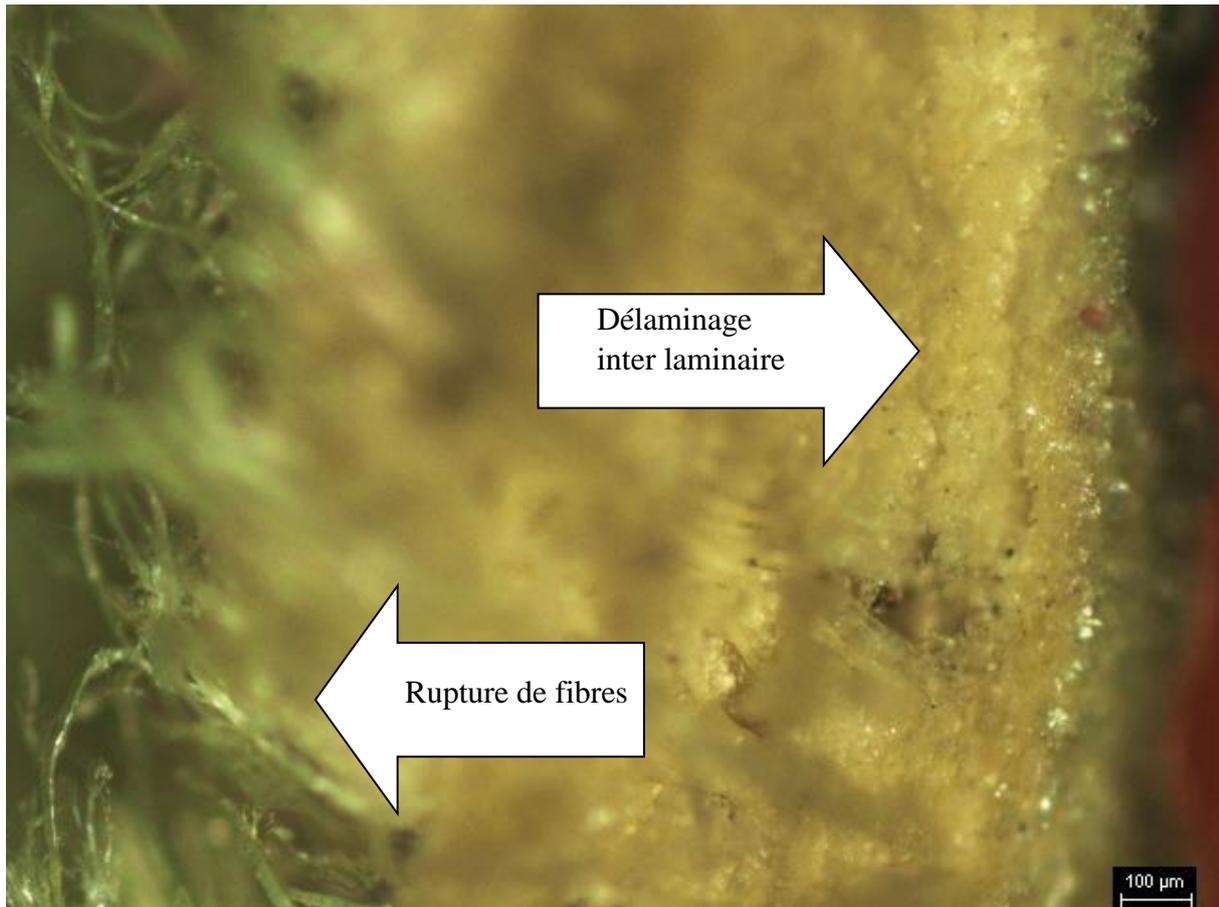


Figure III.26 Microscopie optique, coupe longitudinale, (délaminage et rupture de fibres)

Deux dégradations apparaissent sur la figure III.26, un délaminage inter laminaire et une rupture de fibre. Le délaminage apparaît au niveau de deux plis successifs en surface sur le côté droit de la figure (à noter que le matériau est fait de six plis). Cette dégradation a engendré un autre délaminage inter laminaire sur le pli extérieur, sur le point d'ouvrir une brèche au sein du matériau. D'un autre côté sur le plan gauche apparaît une rupture de fibres, suite à une décohésion.

III.5.4 Coupes transversales



Figure III.27 Microscopie optique, coupe transversale, (délaminage)

La figure III.27 fait apparaître un délaminage inter laminaire sur le côté droit. Ce délaminage est relié à un autre délaminage qui s'ouvre sur la face externe de l'éprouvette. Ces deux délaminages risquent de contribuer à l'arrachage d'un pan entier de l'éprouvette. Nous constatons en parallèle sur le côté gauche quelques fibres libres, qui sont dus à une décohesion. Ces différentes dégradations vont fragiliser le matériau et ainsi l'exposer aux aléas du milieu.

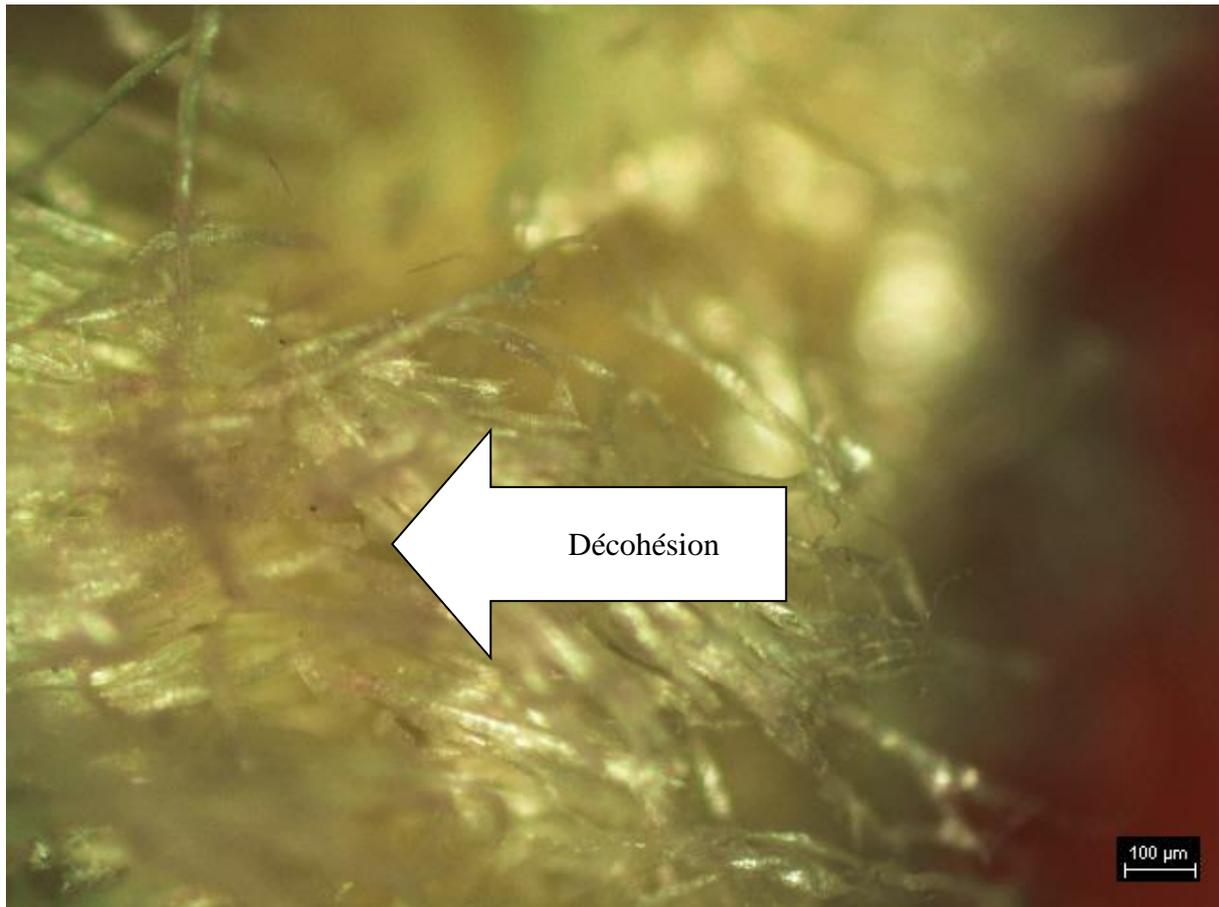


Figure III.28 Microscopie optique, coupe transversale, (décohésion)

La coupe longitudinale ainsi que la coupe transversale montrent une décohésion importante matérialisée par une rupture de fibres conséquente. La figure **III.28** montre une mèche de fibre d'aramide à l'état libre. L'aramide étant hydrophile, cette mise à nu des fibres va exposer le matériau au milieu qui va le fragiliser à son tour. La matrice ayant subi une décohésion, va contribuer à son tour à la dégradation du matériau. Le matériau ainsi affaibli va absorber l'humidité par le biais des fibres nues et par les empreintes laissées par les fibres qui vont drainer l'eau à l'intérieur du matériau.

Conclusion générale

Les matériaux composites sont très utilisés en construction navale. Les plus en usage sont les fibres de verre et les fibres de carbone. Les fibres d'aramide sont moins utilisées parce qu'elles sont sensibles à l'eau.

Notre étude portait justement sur les fibres d'aramide en eau salée, entrant dans le projet de convention entre l'université et le chantier naval de la marine. Notre objectif est de prouver que les fibres d'aramide peuvent être utilisées pour le renforcement des coques de bateaux utilisées par la marine nationale. A cet effet nous avons testé des éprouvettes en traction statique et en fatigue. Nous avons varié le nombre de cycles de fatigue et les durées de vieillissement en eau salée. Suite à quoi nous avons fait appel à la microscopie optique pour identifier les différents endommagements.

Après analyse des résultats des essais mécaniques et de la microscopie optique, nous avons trouvé des résultats probants, qui nous permettent de conclure que le composite aramide-époxy peut être utilisé pour renforcer les coques des bateaux de la marine nationale. Il est à savoir que ces fibres doivent être utilisées en matériau hybride avec des fibres de verres en couches externes, sachant que l'aramide est sensible à l'eau. Les résultats de la microscopie optique n'étant pas satisfaisants, il est nécessaire d'opter pour la microscopie électronique à balayage.

Ce travail n'aurait pas pu se faire sans la participation d'autres organismes que notre département, en l'occurrence le département de métallurgie pour l'essai de traction, l'école nationale supérieure de mines et métallurgie pour la microscopie. Il est souhaitable de faire des conventions avec ses organismes pour nous faciliter le travail et de nous permettre de faire usage de leurs équipements.

Références bibliographique

- [1] **Jean-M Berthelot** mécanique et analyse des structure 5^eédition 2012 Lavoisier Paris
IBBN : 978-2-7430-14507.
- [2] **Nadia bahlouli** « Cours Matériaux composites /DESS Mécanique avancée et stratégie industrielle » IOST-ULP.
- [3] **A. BOUDENNE**, "Etude expérimentale et théorique des propriétés thermo physiques d'matériaux composites à matrice polymère," Université PARIS XII, 2003.
- [4] **CARMA** « Glossaire des matériaux composites » Actualisation octobre 2006.
- [5] **L. Berreur, B. d. Maillard, and S. Nösperger**, L'industrie française des matériaux.
- [6] **JoelCugnoni**, « Identification par recalage modal et fréquentiel des propriétés constitutives de coques en matériaux composites », Thèse, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 2005.
- [7] Site web : www.fibermaxcomposites.com
- [8] <http://www.dupont.com/products-and-services/personal-protective-equipment/thermal-protective/press-releases/lion-new-apparel.html>
- [9] **Zhang H. Chen J., Hao X., Wang S., Feng X., Guo Y.** Effects of solar UV irradiation on the tensile properties and structure of PPD-T fiber. Polymer Degradation and Stability, 2006, 91 : 2761-2767.
- [10] **ALOUI DALILA** Mémoire de master : Caractérisation d'un TD fibres de verre et résine acrylique pour réalisation de prothèses pour handicapés 2015/2016