

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**  
**UNIVERSITE MOULOU D MAMMERRI DE TIZI-OUZOU**  
**Faculté du Génie de la Construction**  
**Département de Génie Mécanique**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE**

**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
MASTER ACADEMIQUE EN GENIE MECANIQUE**

**OPTION : Science des Matériaux**

**THEME:**

**Effet du vieillissement sur le comportement mécanique des  
composites stratifiés verre/polyester**

**Présenté par:**

Kaci Ouiza

**Proposé et dirigé par :**

Madame Mansouri

**Promotion : 2016/2017**

## Remerciement

---

*Avant tout je remercie Dieu le tous puissant de m'avoir donné le courage et la patience de mener à bien ce travail.*

*J'adresse mes remerciements et l'expression de ma vive gratitude à Madame Mansouri pour avoir proposé, dirigé et suivi constamment l'évolution de ce mémoire de fin d'étude.*

*Je remercie vivement tous les membres du jury qui ont accepté d'examiner mon travail.*

*Je veux aussi remercier chaleureusement le personnel de la bibliothèque de Génie Mécanique sans oublier le personnel du Laboratoire de Génie Mécanique.*

*Je remercie **mes parents et ma sœur** pour m'avoir transmis des valeurs telles que la ténacité, grâce auxquelles j'ai pu mener ce travail à son aboutissement.*

*Mes remerciements les plus profonds s'adressent à mon fiancé Amar pour tous ces sacrifices et sa disponibilité et m'avoir toujours aidé à la réalisation de mes projets et pour son soutien sans faille.*

*Je tiens à remercier aussi tous les enseignants(es) du département de génie mécanique.*



*Aussi loin que tu sois ...*

*Ton image remplit mon existence ...*

*Ta mémoire inaugure mes dédicaces .....*

*Chère Petit frère....*

*Que dieux t'accorde clémence et te garde dans son vaste paradis.*

## Dédicaces

*Tant de fois j'ai pensé à vous offrir quelques choses en signe de reconnaissances pour tout ce que vous avez consenti que pour me voir réussir, cette fois c'est l'occasion.*

*A toi ma très chère mère ; En témoignage de ma profonde gratitude et de mon incontestable reconnaissance, pour tous les sacrifices que tu me contente, toute la confiance que tu m'accorde et tout l'amour dont tu m'entoure.*

*A toi mon très cher père ; Tu es le meilleur père dans ce monde, grâce à ton encouragement, ta confiance et ton soutien moral et matériel et pour ton amour infini en exprimant mes gratitudes, mon profond amour et ma passion.*

*A toi ma petite sœur adorée ; tu es une perle rare, de ton cœur tendre la clarté étincelé, c'est avec ton soutien et ton encouragement que j'ai pu arriver.*

*A toi mon chère AMAR ; sans toi je n'aurai pas pu résister, par ton existence tu ma honoré et par ta générosité tu ma entouré et de l'univers de tes conseils j'ai trop bénéficié.*

*A vous mes beaux parents ; pour toute votre compréhension et votre soutien et vos conseils et votre générosité sans limites.*

*A vous mes beau frères ; et à vous tous les amis de mon frères ;qui êtes des vrai frères pour moi et à tous ceux que j'aime et qui m'aime.*

*Que dieu vous protège et vous garde pour moi.*

# SOMMERE

---

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale .....1

Chapitre I : présentation des matériaux composites

I.1. Introduction. .... 3

I.2. Définition de base .....3

I.3. Définition du matériau composite .....4

I.4. Constituant du matériau composite. ....4

I.4.1. Les fibres de renfort. ....5

I.4.1.1. Fibre de verre .....6

I.4.1.2. Fibre de carbone .....6

I.4.1.3. Fibres d'aramide.....7

I.4.1.4. Les fibres métalliques ou céramiques .....7

I.4.1.5. Les microbilles .....7

I.4.1.6. Les renforts minéraux .....8

I.4.2. Les matrices .....8

I.4.2.1. Résines thermodurcissables .....8

I.4.2.2. Résines thermoplastiques ..... 10

I.5. L'interphase. .... 11

I.6. Charges et additifs. .... 12

I.7. Classification des matériaux composites. .... 12

I.7.1. Classification suivant la forme des constituants ..... 12

I.7.2. Classification suivant la nature des constituants ..... 14

I.8. Architecture des composites..... 14

I.8.1. Les structures en sandwiches. .... 14

I.8.2. Les stratifiés ..... 16

I.8.2.1. Désignation d'un stratifié. .... 17

I.8.2.2. Définition du code de description ..... 18

I.8.2.3. Stratifiés typiques ..... 18

# SOMMERE

---

I.8.2.4.Stratifiés symétriques.....	19
I.8.2.5.Stratifiés hybrides.....	20
I.8.3.Réalisation des stratifiés.....	20
I.9.Procédés de mise en œuvre.....	21
I.9.1.Moulages sans pression .	22
I.9.2. Moulage au contact	22
I.9.3 Moulage par projection simultanée	23
I.9.4 Moulage sous vide	23
I.9.5 Moulage par compression.....	24
I.9.6 Moulage par compression à chaud.	25
I.9.7 Technologies RTM ( <i>Resin Transfer Molding</i> ).	25
I.10 les principes raisons de l'utilisation des matériaux	26
I.11 Domaines d'application des matériaux composites	26
I.11.1. Les composites dans l'industrie automobile	26
I.11.2. Les composites dans l'aérospatiale	27
Conclusion.	28

## Chapitre II : Comportement mécanique des matériaux composites

II.1 Introduction.....	29
II.2 Les essais mécaniques	29
II.2.1 Essais mécaniques sur les composites	29
II.2.1.1Essais statiques	29
II.2.1.2 Essais dynamiques	33
II.3 les principales lois de comportement des composites	34
II.3.1 Etat de contraintes et de déformations dans un solide.	34
II.3.2. Tenseur des contraintes.....	34
II.3.3. Tenseur des déformations.....	35
II.3.4. Equations de Compatibilité.....	35
II.3.5. Matrice de Rigidité.	35
II.3.6.Matrice de souplesse (ou de complaisance)	36
II.3.7 .Matériaux Anisotropes.	36
II.3.7.1.Matériau orthotrope.	36

# SOMMERE

---

II.3.8 Matériaux Isotropes. ....	37
II.4. Théories classiques des composites. ....	38
II.4.1. Les relations entre les contraintes et les déformations ....	38
II.4.2. Les liaisons entre les efforts résultants et les déformations . ....	40
II.4.3. Critère de la déformation maximale ....	41
II.4.4. la matrice de rigidité en flexion et torsion. ....	42
II.5. Les caractéristiques du mélange renfort-matrice. ....	42
II.6. Calcul des caractéristiques mécaniques de composite . ....	43
II.6.1. Module d' Young longitudinal. ....	43
II.6.2. Module d' young transversal . ....	44
II.6.4. Coefficient de poisson ....	47
Conclusion. ....	48
Chapitre III : Endommagement et vieillissement des matériaux composites	
III.1. Introduction. ....	49
III.2. Endommagement des composites. ....	49
III.2.1. Les différentes échelles d'observation de l'endommagement ....	49
III.2.2. Les mécanismes d'endommagement . ....	50
III.2.3. Fissurations des composites stratifiés . ....	51
III.2.4. Délaminage. ....	52
III.2.5. La ruine du stratifié. ....	53
III.3. Influence de l'environnement sur les matériaux composites . ....	53
III.3.1. Vieillissement des matériaux composites à matrice polymères en présence d'un fluide. ....	53
III.3.1.1.1. Vieillissement physique. ....	53
III.3.1.1.2. Vieillissement chimique ....	54
III.4. Comportement des structures composites exposées à un fluide . ....	57
III.4.1. Diffusion Fickienne. ....	57
III.4.2 Diffusion non Fickienne . ....	58
Conclusion ....	59

# SOMMERE

---

## Chapitre IV : PARTIE EXPERIMENTAL

IV.1 Introduction. ....	60
IV.2 Matériaux de l'étude .....	60
IV. 2.1 Constituants des matériaux. ....	60
IV.2.2 Procédé de mise en œuvre des matériaux .....	61
IV.3 présentation des matériaux. ....	61
IV.3.1 Découpage des éprouvettes. ....	61
IV.4 Essais physico-chimiques. ....	62
IV.4.1 Essai de perte au feu (calcination) . ....	63
IV.4.1.1 Matériel utilisé .....	63
IV.4.1.2. Principe de l'essai. ....	63
IV.4.1.3 Déroulement de l'essai. ....	63
IV.4.1.4 Calcul théorique. ....	64
IV.5.2. Machine de flexion. ....	66
IV.5.3. Résultats des essais de flexion trois points . ....	67
IV.4.2 Essai de vieillissement dans différents milieux .....	65
IV.5 Essais mécaniques .....	65
IV.5.1 Essai statique en flexion trois points .....	66
IV.5.2. Machine de flexion .....	66
IV.5.3. Résultats des essais de flexion trois points .....	66
IV.6. Analyse et comparaison des résultats de flexion trois points .....	76
Conclusion .....	81
Conclusion générale .....	82
ANNEXES .....	83

# SOMMERE

---

## Liste des figures

---

<b>Figure I.1</b> : Les constituants des matériaux composites. ....	4
<b>Figure I.2</b> : Classification des types de renforts .....	5
<b>Figure I.3</b> : Les différentes formes des fibres .....	5
<b>Figure I.4</b> : Différents types des fibres de verre. ....	6
<b>Figure I.5</b> : fibres de carbone.....	6
<b>Figure I.6</b> : fibres d'aramide .....	7
<b>Figure I.7</b> : Principaux Familles de Matrices.. ....	8
<b>Figure I.8</b> : concept d interfaces et d interphases. ....	11
<b>Figure I.9</b> : Différents composites.....	12
<b>Figure I.10</b> : Architecture d'un composite sandwich .....	14
<b>Figure I.11</b> : Sandwich nid d'abeille.....	15
<b>Figure I.12</b> : Les nids d'abeille.....	15
<b>Figure I.13</b> : Sandwich carbone/mousse. ....	15
<b>Figure I.14</b> : sandwich à âme creuse.....	15
<b>Figure I.15</b> : composite sandwich a Renforts3D et renfort avant et après imprégnation.....	15
<b>Figure I.16</b> : La constitution d'un plie (monocouche) dans un composite stratifié.. ....	16
<b>Figure I.17</b> : empilement des plis dans un stratifiés.....	16
<b>Figure I.18</b> : Désignation d'un stratifié [(0/90) <sub>2</sub> ]. ....	17
<b>Figure I.19</b> : Quelques exemples d'empilement. ....	17
<b>Figure I.20</b> : Les stratifiés typiques. ....	18
<b>Figure I.21</b> : différents types des stratifiés obtenues.. ....	20
<b>Figure I.22</b> : Procédé du moulage au contact.. ....	21
<b>Figure I.23</b> : Moulage par projection simultanée.....	22
<b>Figure I.24</b> : Différents domaines d'utilisation des matériaux composites. ....	26
<b>Figure II.1</b> : Géométrie de l'essai de flexion trois points .....	29

## Liste des figures

---

<b>Figure. II .2:</b> Courbe de contrainte-déformation : 1) matériau fragile; 2) matériau ductile. ....	30
<b>Figure II.3 :</b> Représentation des contraintes internes d'une éprouvette sollicitée en flexion trois points. ....	31
<b>Figure II.4 :</b> un stratifié est soumis à un essai de flexion à quatre points .....	31
<b>Figure II.5:</b> Mouton pendule de Charpy. ....	32
<b>Figure II.6. :</b> coordonnées d'un stratifié orienté par un angle $\theta_k$ .....	36
<b>Figure II.7 :</b> schéma simplifié d'une traction longitudinale. ....	41
<b>Figure II.8 :</b> schématisation par couches d'un composite unidirectionnel.. ....	42
<b>Figure II.9:</b> Schéma par couches d'un essai cisaillement longitudinal.....	44
<b>Figure II.10:</b> Schéma par couches d'une traction. ....	45
<b>Figure III.1:</b> Phénoménologie des endommagements.....	48
<b>Figure III.2 :</b> Rupture de fibre. ....	48
<b>Figure III.3 :</b> Rupture de la matrice .....	49
<b>Figure III.4:</b> Décohésion fibre-matrice. ....	49
<b>Figure III.5 :</b> Différentes types de fissuration au sein d'un composite stratifié. ....	50
<b>Figure III.6.</b> Schématisation de la pénétration d'un solvant à l'intérieur d'un système polymère. ....	52
<b>Figure III.7.</b> Processus de coupure statistique des squelettes macromoléculaires. ....	53
<b>Figure III.8.</b> Modèle schématique du processus d'osmose.....	53
<b>Figure III.9.</b> Influence de la masse molaire en nombre $M_n$ du polymère sur la vitesse d'hydrolyse d'une résine thermosable (polyester) renforcée de fibre de verre .....	54
<b>Figure III.10 :</b> Courbe de vieillissement « échelle semi –logarithmique » .....	54
<b>Figure III.11 :</b> Courbe d'absorption Fickienne. ....	55
<b>Figure III.12 :</b> Courbes schématiques représentatives de quatre catégories de cinétiques d'absorption d'eau non fickienne. ....	56

## Liste des Tableaux

<b>Tableau I.1 :</b> Caractéristiques des polyesters insaturés.....	9
<b>Tableau I.2 :</b> caractéristiques de résine Epoxyde.....	10
<b>Tableau I.3 :</b> Différentes charges et additifs.....	12
<b>Tableau IV.1 :</b> Différents lots d'éprouvettes d'essais .....	61
<b>Tableau IV.2 :</b> Résultats des essais de perte au feu pour lot 2.....	64
<b>Tableau IV.3:</b> résultats du calcule théorique .....	64
<b>Tableau IV.4 :</b> Caractéristiques mécaniques du « lot 1» non vieillis en flexion .....	67
<b>Tableau IV.5 :</b> Caractéristiques mécaniques du « lot 2(sens A)» non vieillis en flexion.....	67
<b>Tableau IV.6 :</b> Caractéristiques mécaniques du « lot 2(sens B)» non vieillis en flexion.....	68
<b>Tableau IV.7 :</b> Caractéristiques mécaniques du « lot 3(sens A)» non vieillis en flexion.....	68
<b>Tableau IV.8:</b> Caractéristiques mécaniques du « lot 3(sens B)» non vieillis en flexion.....	69
<b>Tableau IV.9:</b> Caractéristiques mécaniques du « lot 4(sens A)» non vieillis en flexion.....	69
<b>Tableau IV.10:</b> Caractéristiques mécaniques du « lot 4(sens B)» non vieillis en flexion.....	70
<b>Tableau IV.11:</b> Caractéristiques mécaniques du « lot 5(sens A)» non vieillis en flexion.....	70
<b>Tableau IV.12:</b> Caractéristiques mécaniques du « lot 5(sens B)» non vieillis en flexion.....	71
<b>Tableau IV.13:</b> Caractéristiques mécaniques du « lot2 vieilli 1 mois dans l'eau de mer» en flexion.....	71
<b>Tableau IV.14:</b> Caractéristiques mécaniques du « lot2vieilli 1 mois dans l'eau distillée» en flexion.....	72
<b>Tableau IV.15:</b> Caractéristiques mécaniques du « lot2 vieilli 2 mois dans l'eau de mer» en flexion.....	72

<b>Tableau IV.16:</b> Caractéristiques mécaniques du « lot2 vieilli 2 mois dans l'eau distillée» en flexion.....	73
<b>Tableau IV.17:</b> Caractéristiques mécaniques du « lot1 vieilli2 mois dans l'eau de mer» en flexion.....	73
<b>Tableau IV.18:</b> Caractéristiques mécaniques du « lot2 vieilli 3 mois dans l'eau de mer» en flexion.....	74
<b>Tableau IV.19:</b> Caractéristiques mécaniques du « lot2 vieilli 3 mois dans l'eau distillée» en flexion.....	74
<b>Tableau IV.20:</b> Caractéristiques mécaniques du « lot1 vieilli 3 mois dans l'eau de mer» en flexion. ....	75
<b>Tableau IV.21:</b> Caractéristiques mécaniques du « lot1 vieilli 3 mois dans l'eau distillée» en flexion.....	75

## Introduction générale

Les pièces en matériaux composites à matrice polymère occupent une place grandissante dans notre univers quotidien qu'il s'agit de la construction automobile, navale ou aéronautique...leur pénétration dans ces secteurs est dû aux nombreux avantages qu'ils présentent, à savoir, la légèreté, le coût, la résistance, la facilité de mise en œuvre... Ainsi, ils permettent de répondre à des besoins parfois contradictoires que les matériaux classiques ne peuvent satisfaire.

Cependant, l'utilisation de ces matériaux est assujettie à la connaissance de leur comportement mécanique, aussi bien en statique qu'en dynamique. Dans la majorité des cas, la demande industrielle se borne à essayer de connaître la durée de vie d'une structure sous un spectre de sollicitation (mécanique et environnement) représentatif au mieux du fonctionnement en service.

L'objectif de ce travail consiste à analyser le comportement mécanique d'un composite stratifié constitué de 04 plis de tissus de fibres de verre/résine polyester insaturé, utilisé dans la fabrication des bateaux de pêche et de plaisance. Et en axant sur l'influence du vieillissement à différents milieux sur les caractéristiques d'usage de matériau. Le matériau d'étude provient de l'entreprise ISELMAN (spécialisée dans la fabrication des bateaux de pêche et de plaisance). Il s'agit de définir certaines propriétés mécaniques (le module de apparent, la résistance élastique, la résistance à la rupture) et d'observer leurs évolutions.

Afin de mener à bien notre travail, nous l'avons organisé en deux parties, une partie théorique consacrée à la recherche bibliographique et une partie expérimentale. Après une introduction générale sur le sujet, vient la première partie composée de trois chapitres, dans le premier nous présenterons les matériaux composites à matrice polymère, leurs constitutions ainsi que leurs modes d'élaboration ainsi que les différents types de stratifiés et leurs désignation, dans le second chapitre nous le débiterons par une présentation des essais mécaniques, puis nous rappellerons les principales lois régissant la mécanique des milieux continus et les théories classique du calculs des composites, Dans le chapitre trois, nous avons mis l'accent sur différents mécanismes d'endommagement des composites en outre nous abordons l'aspect théorique du vieillissement des matériaux composites à matrice polymère dans un, environnement hygrothermique.

Dans la partie expérimentale, nous présentons les différents matériaux composites en matrice polyester insaturé renforcé par des fibres de verre de différentes densités (le mat 300, le mat 450 et le taffetas 800) Après avoir expliqué le mode d'élaboration et les conditions de vieillissement retenues pour la présente étude ainsi que les différents essais effectués, nous présenterons les résultats obtenus et une discussion de ces derniers sera donnée. En

## Introduction générale

conclusion nous résumons l'ensemble des résultats trouvés, nous mettons en exergue les points les plus originaux, nous dégagons quelques perspectives à entreprendre pour compléter notre étude.

### I.1.Introduction :

Aujourd'hui nous enregistrons une progression spectaculaire de l'emploi des matériaux composites. Il ne s'agit ni d'un hasard ni d'une mode ; mais d'un judicieux développement soutenu par les intérêts techniques et économiques qu'apporte l'utilisation rationnelle de ces produits nouveaux. Le principal intérêt de l'utilisation des composites provient de ses excellentes caractéristiques spécifiques. Ces matériaux sont pris en raison de leur grande rigidité par rapport au poids et à la résistance avec le poids) de même pour certaines de leurs propriétés mécaniques comme la résistance à la corrosion. De plus, l'utilisation des matériaux composites peut être avantageuse par rapport aux matériaux traditionnels, car elle permet la conception de structures aux propriétés globales qui répondent mieux aux besoins particuliers. Un grand intérêt est tourné vers les composites stratifiés qui peuvent justifier leurs applications technologiques. En effet, les propriétés globales d'une structure stratifiée dépendent du design de celle-ci. C'est-à-dire, elles dépendent de l'épaisseur, de l'orientation et du matériau de chaque pli ainsi que de la séquence d'empilement de ces plis.

On distingue deux grandes familles de composites : composites de grande diffusion (GD), composites de haute performance (HP).[1]

- **Composites de grande diffusion :**

Les plus courants, proviennent essentiellement du couple fibre de verre /polyester, ou verre E / techno-polymère. Ils représentent actuellement les plus gros volumes d'emploi avec un bon compromis performance/cout voisin du cout du matériau de base.

- **Composites de haute performance :**

Encore, peu développés, ils sont issus surtout des associations de fibres longues de verre R, carbone ou aramide (kavelar) avec des résines époxydes, et des taux élevés de renforts supérieures à 50%.

Leurs propriétés, en particulier la résistance mécanique est supérieure à celle de matériaux conventionnels.

### I.2 Définitions de base :

- ❖ **Homogène** : mêmes propriétés en tout point de matériau.
- ❖ **Hétérogène** : propriétés qui varient d'un point à l'autre.
- ❖ **Isotrope** : même propriétés dans toutes les directions.
- ❖ **Orthotrope** : propriétés symétriques par rapport à deux plans de symétrie.
- ❖ **Anisotrope** : propriétés différentes selon les directions envisagées.

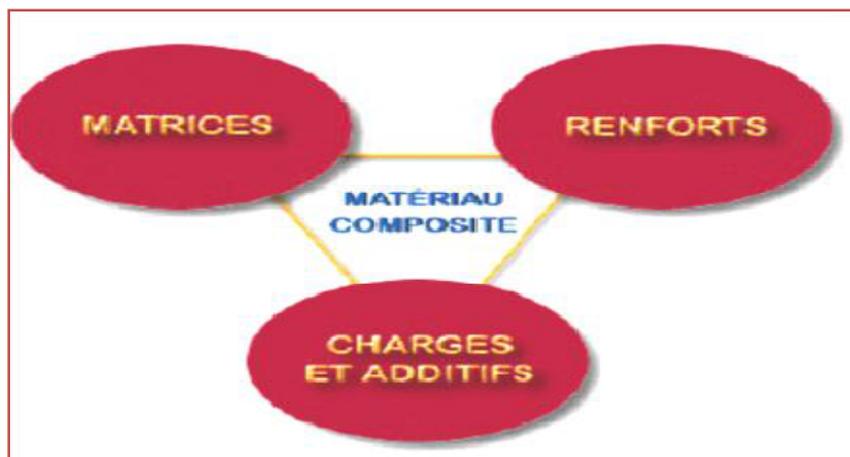
### I.3 Définition du matériau composite :

Le composite est l'assemblage d'au moins de deux matériaux ou plusieurs matériaux non miscibles à structure différente, dont les qualités individuelles se combinent et se complètent en donnant un matériau hétérogène et fortement anisotrope dont les performances globales sont améliorées. Les composites sont le plus souvent constitués d'une matrice dans laquelle on a dispersé de façon contrôlée des renforts; L'interface assure la compatibilité des constituants et la parfaite cohésion entre les renforts et la matrice. [1]

### I.4 Constituants du matériau composite :

Un composite est un système formé d'un nombre relativement important de constituants. Il est le plus souvent constitué de :

- La matrice
- Le renfort
- Charge et additifs



**Figure I.1 :** Les constituants des matériaux composites.

#### I.4.1 Les fibres de renfort :

Armature ou squelette, qui assure la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité), c'est-à-dire des propriétés mécaniques nettement meilleures. Souvent de nature filamentaire (des fibres organiques ou inorganiques).

Ils peuvent se présenter sous de nombreuses formes : fibres courtes ou fibres continues (tissus ou textures multidirectionnelles) en fonction de l'application envisagée. Les fibres possèdent généralement une bonne résistance à la traction mais une résistance à la compression faible.

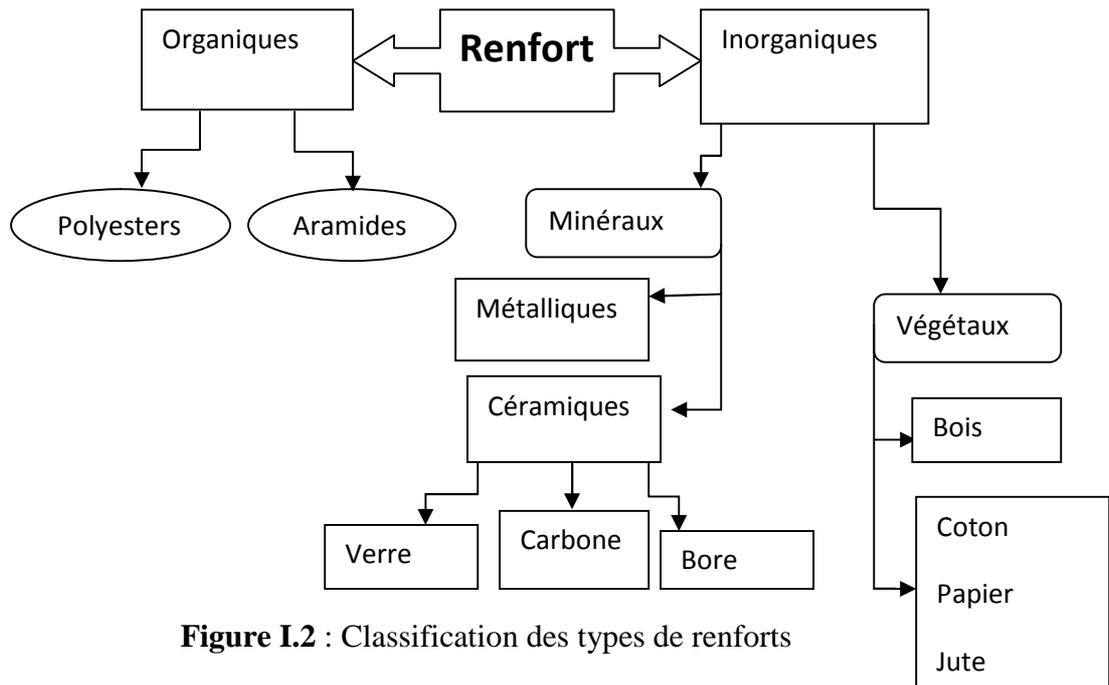


Figure I.2 : Classification des types de renforts

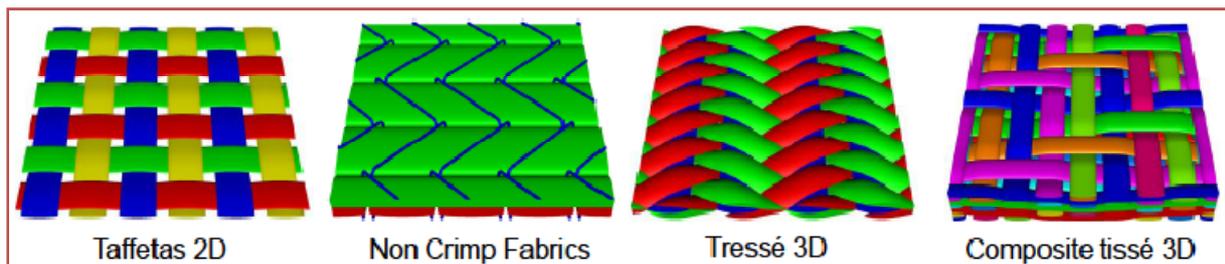


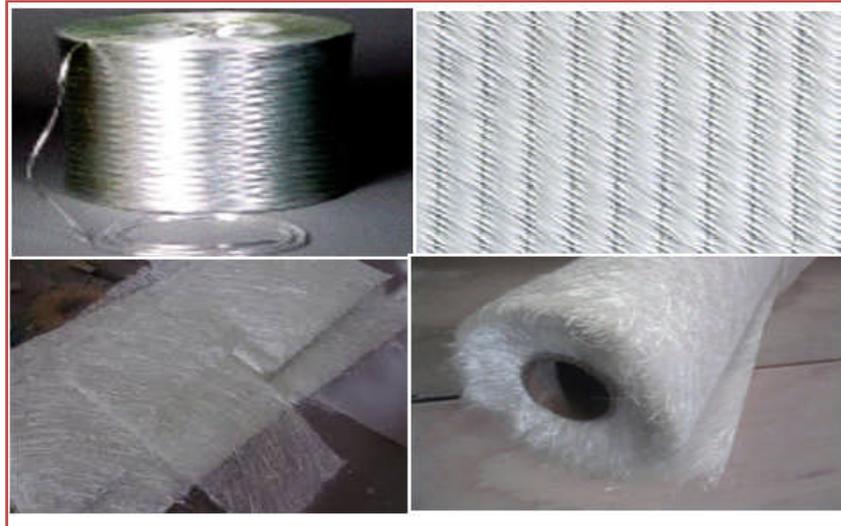
Figure I.3 : Les différentes formes des fibres

Parmi les différents types de renforts, on peut citer :

#### I.4.1. 1 Fibres de verre :

Sont les plus anciennes et les moins chères des fibres du marché, et celles dont on réalise le plus fort tonnage. Elles sont fabriquées par extrusion du verre au travers d'une filière percée de trous de 1 à 2mm de diamètre, puis étirées jusqu'à obtenir des diamètres de 5 à 15mm, enduites et bobinée.

Il existe différentes variétés (E, R, S) selon la proportion de chaque composant (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO). [1]



**Figure I.4 :** Différents types des fibres de verre.

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

R : pour les composites hautes performances ;

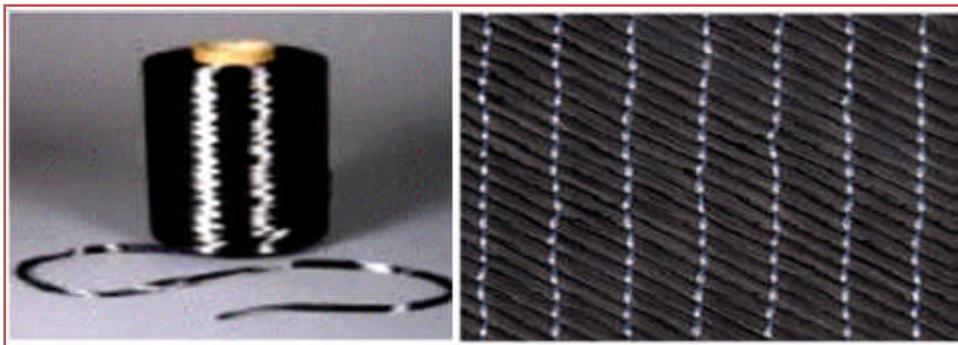
S : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).

Les meilleures propriétés étant obtenues pour les plus fortes proportions de silice (verre S, 65%)

#### **I.4.1.2. Fibres de carbone :**

Doivent leurs propriétés à la très forte anisotropie des cristallites de graphite qui les composent. Elles sont fabriquées à partir de fibres de polymère (par exemple polyacrylonitrile) préalablement tissées, et carbonisées sous tension en plusieurs étapes, oxydation (100 à 200 C°), puis pyrolyse (1500-2500 C°). On distingue deux types de fibres de carbone :

- 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



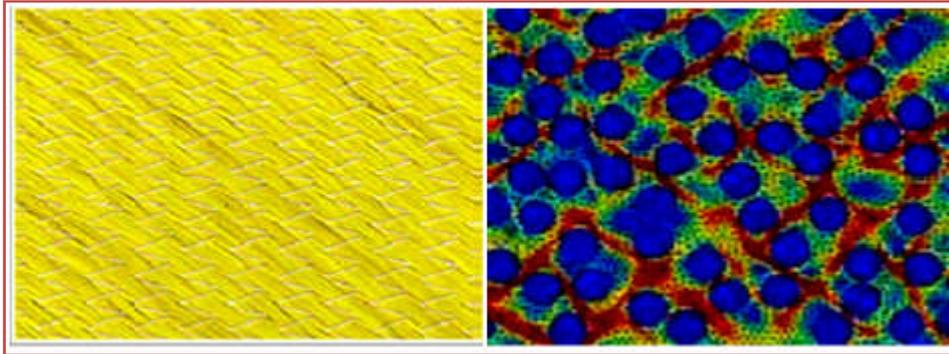
**Figure I.5 :** fibres de carbone.

**I.4.1.3. Fibre d'aramide :**

Souvent appelée KEVLARde prix élevé (20 euros/kg), la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes :

Les fibres à bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles ;

La fibre haute module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances.



**Figure I.6 :** Fibres d'aramide

**I.4.1.4. Les fibres métalliques ou céramiques :**

Sont les plus chères, en raison de leur difficulté de fabrication. Les fibres de bore sont obtenues par réduction à 1100°C de chlorure de bore, qui se dépose sur un fil de tungstène de 10 à 15mm de diamètre.

**I.4.1.5. Les microbilles :**

Pleines ou creuses peuvent être produites en verre, carbone ou polystyrène. Elles ont des diamètres compris entre 10 et 15 mm ; le taux volumique de charge peut atteindre 50%. Le composite résultant a des propriétés mécaniques isotropes.

**I.4.1.6. Les renforts minéraux :**

Les principaux renforts minéraux sont le mica et l'amiante. L'un et l'autre sont des composés naturels dont les propriétés ne permettent pas d'atteindre les résistances obtenues avec les fibres. Le mica se présente sous forme de paillettes, dont l'intérêt est d'offrir un renforcement bidirectionnel. L'amiante (mélange d'oxydes de magnésium, de silice et d'eau, comportant également du sodium, du fer,...) se présente sous forme de fibrilles de 20nm, dont il est possible de détacher des fibres de plusieurs centimètres. Son caractère cancérigène a maintenant conduit à un abandon complet.

### I.4.2. Les matrices :

Par définition, c'est un polymère ou une résine organique a pour rôle de lier les fibres de renforts, répartir les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit. Il existe différents types de résines (figure I-8) on utilise actuellement surtout des résines thermodurcissables (TD) que l'on associe à des fibres longues, mais l'emploi de polymères thermoplastiques (TP) renforcés de fibres courtes se développe fortement.

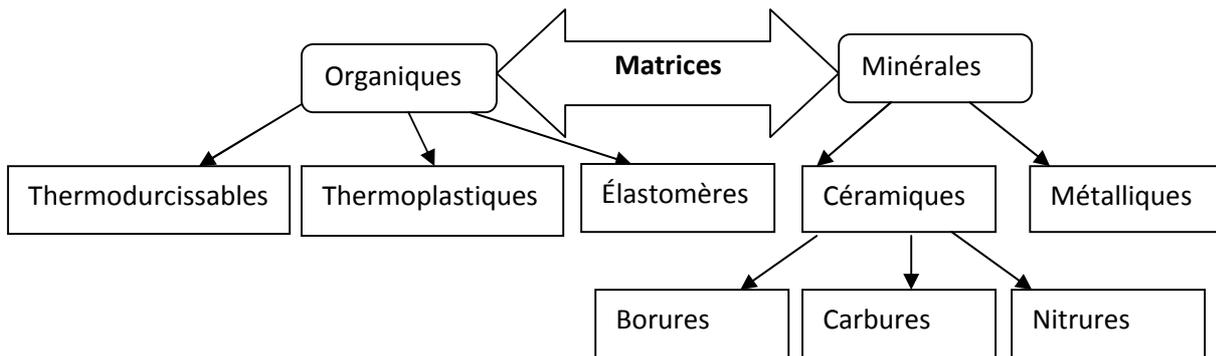


Figure I.7 : Principaux Familles de Matrices.

Il existe plusieurs types de résines classées en deux grandes familles : les thermoplastiques et les thermodurcissables pouvant servir de matrice aux matériaux composites.

Les définitions de ces deux grandes familles utilisées sont les suivantes :

#### I.4.2.1 Résines thermodurcissables :

En règle générale, les matrices thermodurcissables possèdent une faible résistance mécanique au choc et une faible tenue en température. La résine la plus utilisée dans l'industrie aérospatiale est l'époxyde. Elle possède une combinaison d'avantage quasiment imbattable, facilité de manipulation, flexibilité de traitement, de bonnes propriétés mécaniques, et un prix acceptable.

Leur application est cependant limitée à une température maximale comprise entre 80°C et 120°C.

Lorsqu'une résine thermodurcissable est soumise à une élévation de température, il se crée des réactions chimiques au cours desquelles des liaisons covalentes sont formées entre les chaînes de molécules résultant en un réseau tridimensionnel. Le polymère final se présente sous la forme d'un corps solide et infusible. La polymérisation étant irréversible, ce matériau peut être mis en forme qu'une seule fois au moment de sa fabrication. On peut citer :

### 1) Polyesters insaturés :

C'est la résine la plus utilisée dans l'application composite de grande distribution.

Une résine de polyester insaturé contenant un monomère (généralement le styrène) est réticulée à température ambiante par addition d'un catalyseur de type peroxyde organique et d'un accélérateur. Elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible.

Avantages	Inconvénients
Bonne accroche sur fibres de verre	Inflammabilité (sauf résines chlorées)
Translucidité ; Prix réduit	Tenue vapeur et eau bouillante
Bonne résistance chimique	Retrait important (6 à 15 %)
Mise en œuvre facile	Durée de conservation en pot limitée
Tenue en température (> 150 °C)	Emission de styrène

**Tableau I.1 :** Caractéristiques des polyesters insaturés

2) **Vinylesters** : On peut la considérer comme une variante des polyesters produite à partir d'acides acryliques. Elles possèdent une bonne résistance à la fatigue et un excellent comportement à la corrosion, mais demeure combustible.

3) **Phénoliques** : Elles sont issues de la polycondensation du phénol et du formol et se caractérisent par une bonne tenue au feu, sans fumée. Elles restent fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à colorer et à mettre en œuvre.

4) **Epoxydes** : Elles résultent de la polyaddition de l'épichlorhydrine sur un polyalcool et constitue la résine type des composites hautes performances HP. On distingue deux classes de résines en fonction : du durcissement à chaud ou à froid ; et de la tenue en température (120-130 °C, ou 180-200 °C). Leurs caractéristiques sont résumées dans le tableau I.3

Avantages	Inconvénients
Tenue mécanique, thermique, chimique et fatigue	Prix élevé
Faible retrait (1 à 2 %)	Sensibilité à l'humidité et aux UV
Excellente adhérence sur fibres	Vieillessement sous température
Autoextinguibilité	Sensibilité aux chocs
	Temps de polymérisation

**Tableau I. 2 :** caractéristiques de résine Epoxyde.

5) **Polyimides** : Ces résines sont surtout utilisées dans les composites HP, lorsque l'on cherche une bonne stabilité sous hautes températures ( $> 250\text{ °C}$ ). Elles restent toutefois très onéreuses et difficiles à mettre en œuvre.

6) **Bismaléimides** : Matrices très peu utilisées en Europe. Elles offrent une bonne tenue à la fois au choc et en température, mais restent difficiles à mettre en œuvre.

#### I.4.2.2 Résines thermoplastiques :

En général, les matrices thermoplastiques possèdent des avantages sur les résines thermodurcissables telles qu'une ténacité améliorée, une déformation à rupture élevée et une faible absorption d'humidité. De plus, elles ont une durée de stockage illimitée. Cependant, les thermoplastiques amorphes présentent des problèmes de résistance aux solvants organiques. La résine la plus utilisée dans les domaines de transports et aéronautique est la résine époxy.

Les matrices thermoplastiques peuvent être divisées en deux classes selon leurs structures moléculaires : la structure semi-cristalline et la structure amorphe. Ces matrices sont caractérisées par la capacité d'être alternativement ramollies par chauffage au-dessus de la température de fusion ou de ramollissement et durcies par refroidissement. Dans ce cas, la modification de forme et le recyclage du composite sont envisageables. Les principales matrices TP utilisées (possédant tous une tenue en température supérieure à  $100\text{ °C}$ ) sont les suivantes :

- Polyamide (PA)** : tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures ;
- Polytéréphtalate** : éthylénique et butylénique (PET, PBT) : bonne rigidité, bonne ténacité;
- Polycarbonate (PC)** : tenue au choc;
- Polysulfure de phénylène (PPS)** : résistance à l'hydrolyse;
- Polyoxyméthylène (POM)** : bonne tenue à la fatigue;
- Polysulfures (PSU et PPS)** : bonne stabilité chimique et à l'hydrolyse, peu de fluage, tenue au chaud.
- Polypropylène (PP)** : peu onéreux et assez stable en température, mais combustible.

De plus en plus, on utilise des thermoplastiques thermostables (tenue en température  $> 200\text{ °C}$  et bonnes propriétés mécaniques), en particulier les suivants :

- Polyamide-imide (PAI).**
- Polyéther-imide (PEI).**
- Polyéther-sulfone (PES).**

**-Polyéther-éther-cétone (PEEK).**

**1.5 Entre le renfort et la matrice:**

En plus de ces deux constituants de base, il existe : une interface (interphase) qui assure la compatibilité renfort-matrice, en transmettant les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif. Des produits chimiques (adjuvants) entrent aussi dans la composition du composite, l'interphase etc. ... qui peuvent jouer sur le comportement mécanique, mais n'interviennent pratiquement jamais dans le calcul de structure composite.

**1.5 L'interphase :**

L'interphase des composites est constituée de la surface de contact (interface) fibre/matrice ainsi que de la région d'un volume fini prolongée dans la matrice. Elle peut être considérée comme un constituant du composite car elle possède des propriétés chimiques, physiques, et mécaniques différentes de celles de la fibre et de la matrice. L'interphase assure la liaison fibre/matrice et permet le transfert des contraintes de l'une à l'autre sans déplacement relatif. Cependant, l'hypothèse que l'interphase n'a pas d'épaisseur est souvent faite pour faciliter l'analyse micromécanique des composites, et de plus les interfaces ont la propriété de dévier les fissures : lorsqu'une fissure se propage dans la matrice et atteint l'interface, elle ne traverse généralement pas cette dernière et les renforts ne seront donc pas endommagés, en effet l'interface joue donc le rôle de fusible et rend les composites plus ductiles et plus tenaces, c'est-à-dire plus résistants à la rupture, que leurs constituants élémentaires.[3]



Figure 1.8 : concept d'interfaces et d'interphases

**1.6 Charges et additifs:**

Charges	Additifs
-Graphite - Silice -Quartz -Talc -Mika - Poudre métallique -Carbonate de calcium	-Durcisseur -Catalyseur -anti U.V. -Pigment Ignifugeant -Lubrifiant -Fongicide

Tableau I.1 : Différentes charges et additifs

Les charges et additifs sont incorporés dans un matériau composite pour :[2]

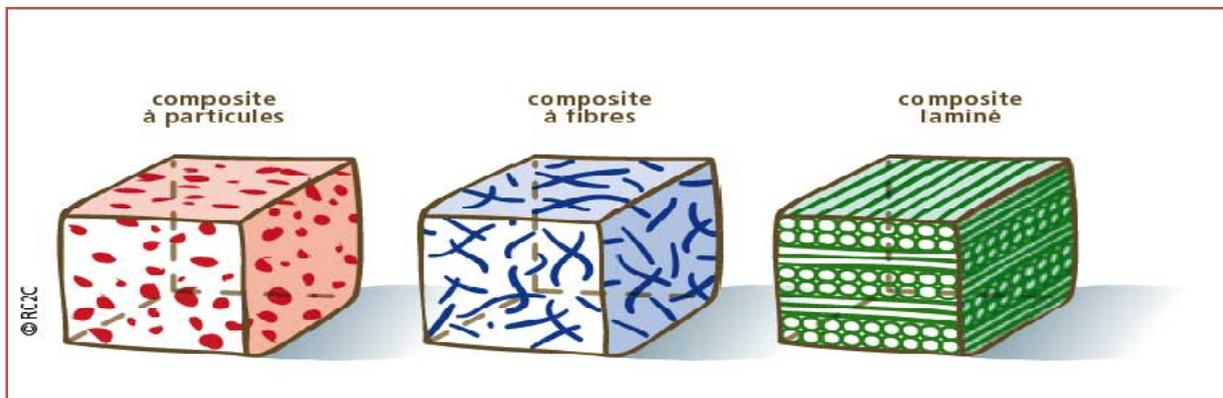
- Modifier la couleur ;
- Modifier sensiblement les propriétés mécanique, électrique ou thermique ;
- Réduire le coût ;
- Résister au feu ;
- Diminuer le retrait ;
- Faciliter le démoulage ;
- Améliorer la résistance au vieillissement ;
- Modifier la densité du matériau.

### I.7 Classification des matériaux composites :

Les matériaux peuvent être classés suivant la forme des composants ou suivant la nature des composants.[4]

#### I.7.1 Classification suivant la forme des constituants :

En fonction de la forme des constituants ; les composites sont classés en deux grandes classes : les matériaux composites à particules et les matériaux composites à fibres :



**Figure I.9 :** Différents composites

#### a) Composites à fibres :

Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibre. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes, etc. l'arrangement des fibres, leurs orientation permettent de moduler à la carte les propriétés mécaniques des matériaux composites, pour

obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes dans un plan. Le concepteur possède donc là un type de matériau dont il peut modifier et moduler à volonte les comportements mécaniques et physiques en jouant sur :[4]

- La proportion des constituants,
- L'orientation des fibres,
- Suivant le cahier des charges imposées.

#### **b) Composites à particules :**

Un matériau composite est un composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension privilégiée. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait. Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utiliser comme charges pour réduire le cout du matériau, sans en diminuer les caractéristiques. Le choix de l'association matrice-particules dépend des propriétés souhaitées. Par exemple, des inclusions de plomb dans des alliages de cuivre augmenteront leur facilité d'usinage. Les cermets sont également des exemples de composites métal-céramique à particules, adaptés à des utilisations à températures élevées. Egaleme nt, des particules d'élastomère peuvent être incorporées dans des matrices polymères fragiles, de manière à améliorer leurs propriétés à la rupture et au choc, par diminution de la sensibilité à la fissuration. Ainsi, les composites à particules recouvrent un domaine étendu dont le développement s'accroît sans cesse.

#### **I.7.2 Classification 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. Seul certains couples d'association ont actuellement un usage industriel, d'autres faisant l'objet d'un développement dans les laboratoires de recherche. Parmi ces composites nous pouvons citer :

##### **a) Composites à matrice organique (CMO) (résine, charges), avec :**

- Des fibres minérales : verre, carbone.....
- Des fibres organique : kavelar, polyamides.....
- Des fibres métalliques : bore, aluminium.....

b) **Composites à matrices métallique (CMM)** (alliage légers et ultralégers d'aluminium, de magnésium, de titane), avec :

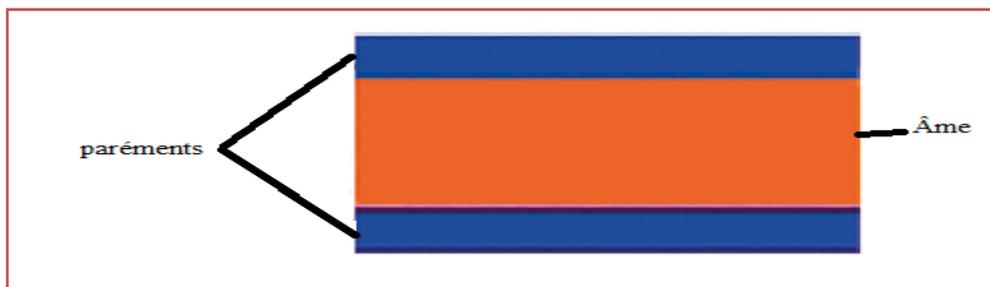
- Des fibres minérales : carbone, carbure de silicium(SiC),
- Des fibres métalliques : bore,
- Des fibres métallo-minérales : fibres de bore revêtues de carbure de silicium

c) **Composites à matrice minérale (CMC)** (céramique), avec :

- Des fibres métalliques : bore,
- Des particules métalliques : cermets,
- Des particules minérales : carbures, nitrures...

## I.8 Architecture des composites :

**1.8.1 Les structures sandwich :** on appelle pièce à structure sandwich toute pièce stratifiée composée d'une âme comprise entre deux parements (deux feuilles de peaux).[5]



**Figure 1.10 :** Architecture d'un composite sandwich

Les structures sandwich ont la particularité de pouvoir à la fois rigidité et alléger une structure tout en lui apportant de nouvelles propriétés. Comme par exemple, une isolation phonique ou thermique selon le matériau d'âme choisi. Les principaux avantages de ces structures sont :

- la légèreté (économie de poids à résistance égale),
- très grande rigidité,
- grande résistance en flexion,
- isolation thermique.

Une âme est un élément renforçant utilisé pour la réalisation de structure sandwich. Elle a pour rôle de maintenir l'écartement entre deux peaux afin de donner une rigidité à l'ensemble de la structure. Le choix d'une âme sandwich est principalement dicté par les propriétés

mécaniques et thermiques imposées par le cahier des charges. Les âmes utilisées pour la fabrication de structures sandwich peuvent être de différentes natures en fonction du cahier des charges de la pièce. Pour les sandwichs de structure qui répondent à des sollicitations mécaniques importantes, on utilise généralement des âmes en nid d'abeille.

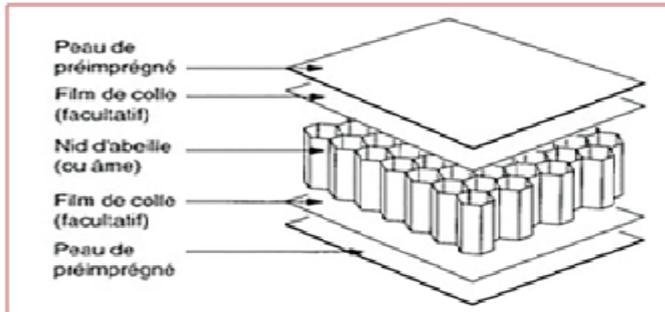


Figure I.11 : Sandwich nid d'abeille

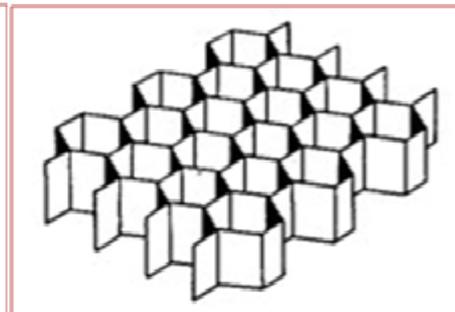


Figure I.12 : Les nids d'abeille

Les âmes en mousse sont plutôt réservées pour la réalisation de structures sandwich isolantes

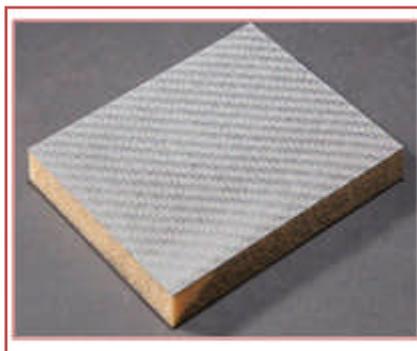


Figure I.13 : Sandwich carbone/mousse



figure I.14: sandwich à âme creuse

Les structures 3D sont obtenues soit par tressage, soit par l'utilisation de renforts tissés en trois dimensions.

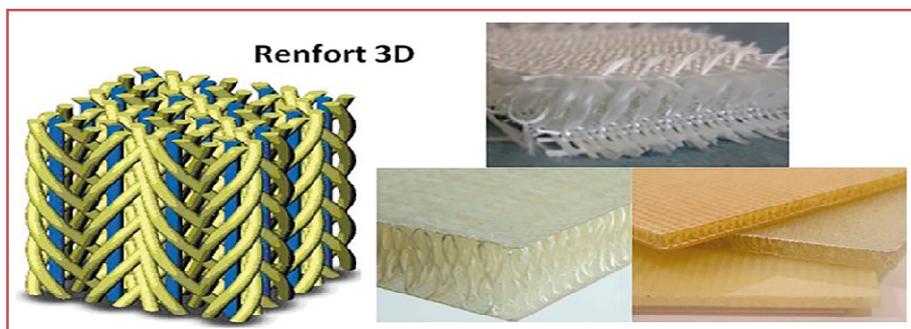
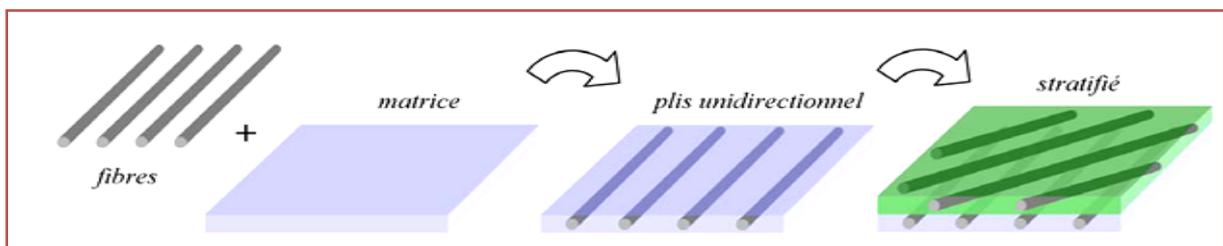


Figure I.15 : composite sandwich a Renforts3D et renfort avant et après imprégnation

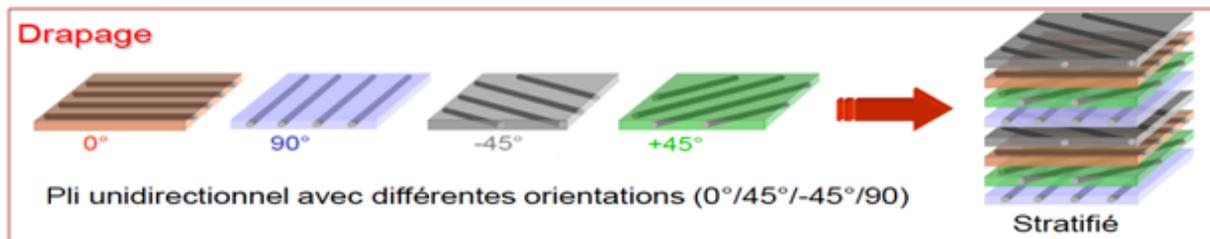
### I.8.2 Les stratifiés :

Ils sont obtenus par empilement de couches, généralement à renfort unidirectionnel ou tissu, disposées selon différentes orientations. Les stratifiés sont utilisés, comme matériaux structuraux, à chaque fois qu'on a d'un côté, la nécessité d'excellentes performances mécaniques en termes de résistance, rigidité, comportement à la fissuration, et de l'autre, l'exigence de limiter le poids. Ces matériaux doivent être conçus selon la nécessité et aujourd'hui, avec la technologie appropriée, de fabriquer des stratifiés avec une disposition continûment variable des fibres, en direction et quantité ; Les principaux secteurs d'utilisation sont donc l'aéronautique, l'électricité et le sport.[6]



**Figure I.16 :** La constitution d'un pli (monocouche) dans un composite stratifié.

L'empilement de plusieurs plis de différentes orientations qui sont collés ensemble forment un stratifié.



**Figure 1.17 :** empilement des plis dans un stratifiés

#### I.8.2.1 Désignation d'un stratifié :

On désigne les stratifiés par l'orientation des fibres de chaque pli par rapport à un repère global arbitraire (x,y,z) l'axe x correspondant le plus souvent à la direction du chargement. Un pli orienté à 0° présente des fibres dirigées selon l'axe x et un pli orienté à 90° des fibres selon y. Un stratifié quelconque de N plis est ainsi désigné par des orientations de ses plis dans le sens des Z croissants. Pour condenser l'écriture, on note sous forme d'indice le nombre de plis adjacents de même orientation ainsi que le nombre de répétitions d'une même séquence de plis. L'indice "s" correspond à un stratifié symétrique pour lequel on ne renseigne que la

moitié de l'empilement de la surface au plan de symétrie miroir. La Figure I- 19 présente l'exemple d'un empilement  $(0^\circ / 90^\circ)$ . [7]

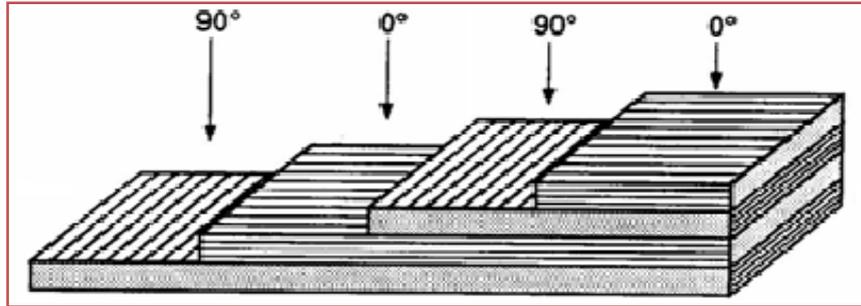


Figure I.18 : Désignation d'un stratifié  $[(0/90)_2]$

**I.8.2.2 Définition du code de description :**

Chaque pli est noté par l'angle (en degré) entre la direction longitudinale des fibres et l'axe x. Des plis adjacents sont séparés par une barre oblique (/) si leurs angles ont de différentes valeurs absolues. La séquence d'empilement commence à partir du premier pli supérieur et se termine au dernier pli. Un indice est utilisé afin d'indiquer le nombre de plis adjacents possédant la même orientation. [8]

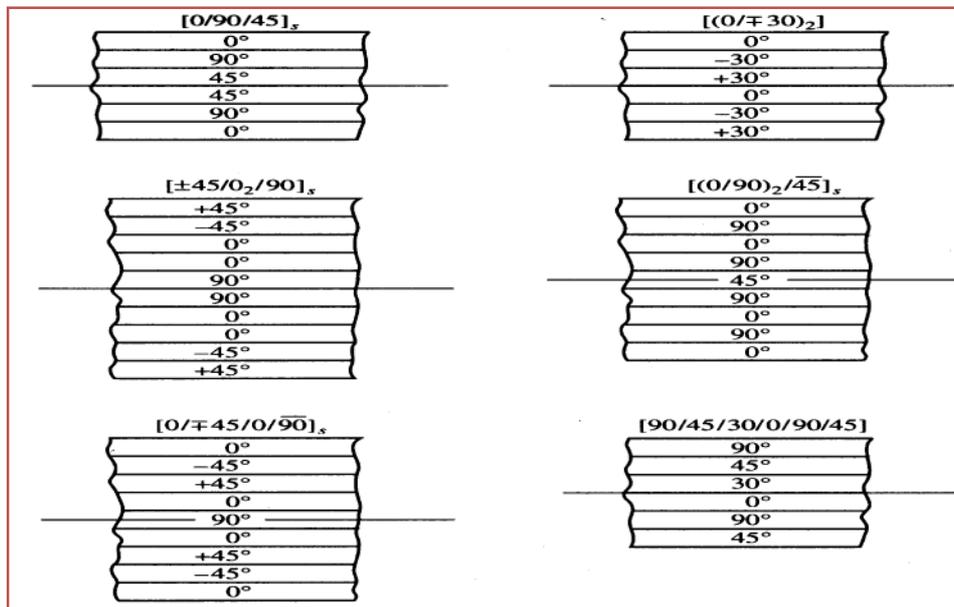


Figure I.19 : Quelques exemples d'empilement

**I.8.2.3 Stratifiés typiques :**

Les structures composites stratifiées sont constituées de couches successives de renforts imprégnés de résines. Les couches sont également nommées plis. Les structures stratifiées

réalisées à partir de matériaux composites sont constituées d'empilements de nappes unidirectionnelles ou bidirectionnelles. Ces nappes sont formées de renforts en fibres longues liées par de la résine. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La résine assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. Les pièces structurales sont réalisées par empilement de nappes en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir. Les matériaux composites sont modélisés à une échelle intermédiaire entre l'échelle microscopique associée aux constituants de base du composite (le renfort et la matrice) et l'échelle macroscopique liée à la structure. à cette échelle, appelée méso échelle, une structure stratifiée est schématisée par un empilement de monocouches homogènes dans l'épaisseur et d'interfaces inter laminaires. La couche et l'interface sont les deux entités appelées méso constituants, qui forment les bases des modèles dédiés à l'étude des structures stratifiées. L'interface inter laminaire est une entité surfacique assurant le transfert des déplacements et des contraintes normales d'une couche à une autre. En élasticité, les couches sont parfaitement liées et l'interface ne joue aucun rôle particulier. L'étude des composites jusqu'à la phase ultime de la rupture montrera l'utilité d'employer un modèle d'interface pour simuler les phénomènes de délaminage (séparation progressive des couche, la désignation de ces stratifiés est généralement effectuée selon le code suivant Chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degrés de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe  $x$  de référence. Les couches successives sont séparées par un / si leurs angles sont différents Les couches successives de même orientation sont désignées par un indice numérique. Les couches sont nommées successivement en allant d'une face à l'autre. Des crochets (ou parenthèses) indiquent le début et la fin du code .La désignation dépend du système d'axes choisi.[9]

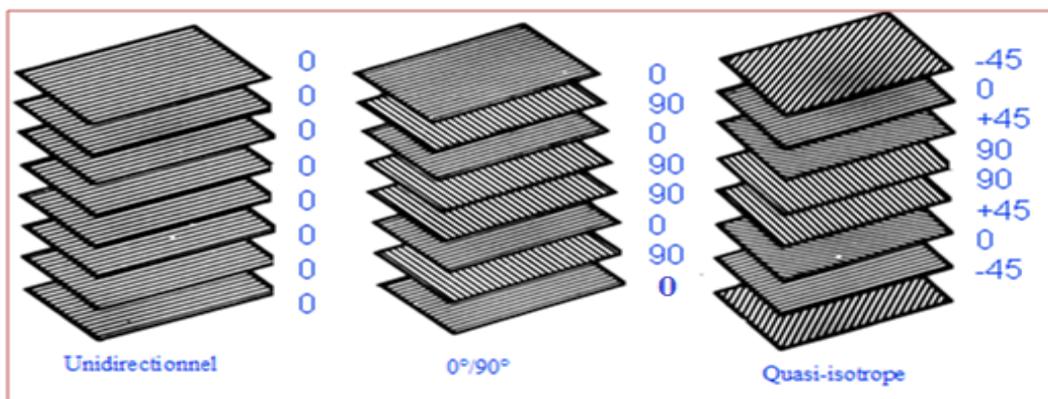


Figure I.20 : Les stratifiés typiques

**I.8.2.4. Stratifiés symétriques :**

Un stratifié est symétrique si son plan moyen est plan de symétrie. Sa désignation ne nécessite alors que la moitié des couches successives. Si le stratifié a un nombre pair de couches, la désignation débute sur une face pour finir au plan de symétrie. Un indice (s) indique que le stratifié est symétrique. Si le stratifié comporte un nombre impair de couches, la désignation est semblable à la précédente, la couche centrale étant surlignée.

-Pourquoi la symétrie miroir : lors de la constitution de la pièce stratifié, les plis successifs imprégnés de résine sont drapés à température ambiante, puis placés dans une étuve pour la polymérisation. Dans le composite ainsi créé à chaud, la dilatation d'ensemble de la pièce d'origine thermique, s'effectue sans qu'il y ait variation globale de sa forme par voilement ou gauchissement. Par contre lors du refroidissement, les plis ont tendance à se contracter différemment suivant le sens des fibres ou suivant le sens travers. Lorsque la symétrie miroir est réalisée, elle entraîne la symétrie de ces contraintes, et empêche ainsi l'apparition des déformations d'ensemble de la pièce : voilement ou gauchissement.[10]

**I.8.2.5 Stratifiés hybrides :**

Les matériaux composites hybrides par intégration de couche de métal dans des structures stratifiées ouvrent le champ à de nouvelles perspectives en termes de propriétés mécaniques et structurales. Les propriétés mécaniques d'usage du stratifié doivent donc rester en accord avec l'utilisation de matériaux hautes performances tels que les fibres de carbone : tenue mécanique, résistances à l'impact et à la propagation des ruptures localisées autour de l'impact. La résistance aux agressions extérieures, telles que vieillissement hygrothermique, tenue en température, doit être de plus conservée. Les stratifiés hybrides sont constitués de couches successives comportant des fibres de natures différentes. Il sera alors nécessaire de les mentionner dans la désignation. Les stratifiés hybrides permettent d'être plus performants en utilisant au mieux les propriétés des diverses fibres disponibles. Parmi les différents hybrides, on peut distinguer :

- Les hybrides inter-couches : constitués d'une suite de couches, chacune de nature différente.
- Les hybrides intra-couches : constitués par une séquence de couches identiques, chaque couche étant constituée de renforts différents.[10]

### I.8.3 Réalisation des stratifiés :

#### Matérielle à utiliser :

- ❖ **Le gel coat** : est la partie visible, colorée et lisse du stratifié. Il est toujours appliqué en premier dans un moule à l'aide d'un pinceau, d'un rouleau ou au pistolet à gravité. Le gel coat est formulé à base de résine polyester additionnée de pigments et de divers produits qui définissent les propriétés telles que ; le temps de gel, le temps de séchage mais aussi le démoulage ou la résistance aux UV.
- ❖ **Résines et renforts** : constituants du stratifié (polymères et fibres)
- ❖ **Matérielles technologiques** : (cutter ou ciseaux, mélangeur, rouleau, moules, pinceau, pistolet.....)
- ❖ **Adjuvants** : Le catalyseur (ou durcisseur) est indispensable à la résine pour polymériser (ou durcir).[11]

#### Stratification :

Appliquer une couche de résine à l'aide d'un pinceau ou d'un rouleau directement sur le gel coat. Mettre le renfort le plus fin (un voile de surface est recommandé lorsque l'on recherche à faire une pièce belle d'aspect, sans marquage de fibre). Imprégner le renfort de résine et débuller. Le débullage consiste à chasser l'air du stratifié à l'aide d'un rouleau débulleur. Il en existe plusieurs sortes adaptées à chaque type de pièce. Le débullage permet également de consolider les couches de renfort entre elles. Un bon débullage permet de dissoudre le liant et de rendre translucide la couche de renfort. On peut ainsi vérifier en croisant les passages du rouleau débulleur qu'il ne reste pas d'air dans le stratifié. Opérer de la même manière pour toutes les couches du stratifié. Chaque couche doit être imprégnée de résine et débullée.

Si la pièce possède des angles, il est préférable de « casser » le renfort ou de préparer des bandes de renfort qui formeront cet angle. En effet, si l'angle est trop marqué, il sera difficile d'enlever l'air piégé sous le renfort. Si des bandelettes sont découpées, les possibilités d'évacuer l'air sont ainsi plus nombreuses.



Figure I.21 : différents types des stratifiés obtenus.

### I.9 Procédé de mise en œuvre :

Les techniques de fabrications jouent un rôle considérable dans la composition car chacune des opérations influe d'une manière irréversible sur le produit fini. De nombreuses méthodes de fabrication ont été développées pour répondre aux besoins, et leurs choix dépendent surtout des caractéristiques mécaniques et de la géométrie du produit, et l'importance des séries. [12]

#### I.9.1 Moulages sans pression :

Les méthodes de moulage à froid et sans intervention d'une presse sont les méthodes les plus simples à mettre en œuvre. Elles nécessitent un minimum d'équipement et par conséquent d'amortissement. Cette facilité a été à l'origine du succès des matériaux composites à fibres de verre, dans l'industrie et l'artisanat.

Ces méthodes permettent la réalisation de pièces en petites et moyennes séries, sans restriction de formes et dimensions. Bien que la proportion de fibres puisse varier, elle reste toutefois limitée. Les pièces comportent une seule face lisse, reproduisant l'aspect du moule. Enfin, la qualité de la pièce moulée dépend dans une large mesure du savoir-faire du mouleur.

#### I.9.2 Moulage au contact :

Le moulage au contact ou stratification au contact est un procédé entièrement manuel de mise en forme des composites, à la température ambiante et sans pression. C'est la plus ancienne méthode de mise en œuvre des composites. Ce procédé permet la réalisation de pièces de formes et de dimensions quelconques pour de petites séries. Le moule, enduit d'un agent de démoulage, reçoit la couche de surface (gel-coat), puis le renfort sous formes de couches successives de mat ou de tissu que l'on imprègne de résine, généralement manuellement, jusqu'à l'obtention de l'épaisseur souhaitée. La polymérisation peut se faire à température ambiante ou être accélérée par chauffage. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée. Celles-ci peuvent être de grandes dimensions et présentent de faibles caractéristiques mécaniques et une seule face d'aspect fini.

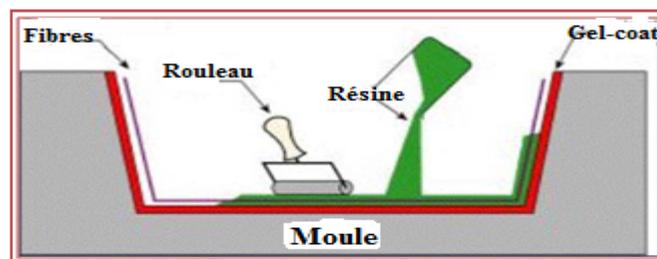


Figure I.22 : Procédé du moulage au contact.

Cette méthode est simple et rapide à mettre en œuvre, et demande peu de matériel. Elle possède néanmoins plusieurs inconvénients: il est difficile de doser correctement la résine, et il y a toujours un risque de présence de bulles d'air, qui sont autant de sources de faiblesse dans la pièce. C'est pourquoi nous réservons cette technique aux pièces trop grandes ou trop fragiles pour rentrer dans un sac à vide, ou aux pièces "annexes" qui ne sont pas utilisées directement.

### I.9.3 Moulage par projection simultanée :

Le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée sur un moule. L'équipement à projeter est constitué d'une machine à couper le stratifié et d'un pistolet projetant la résine et les fibres coupées, l'ensemble fonctionnant par air comprimé. La couche de fibres imprégnées de résine est ensuite compactée et débarrassée des bulles au rouleau cannelé.

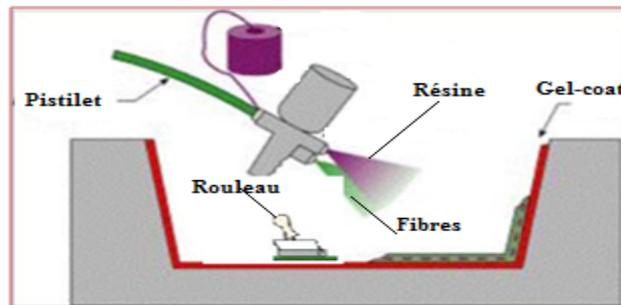


Figure I.23 : Moulage par projection simultanée

### I.9.4 Moulage sous vide :

Le moulage sous vide consiste à utiliser simultanément le vide et la pression atmosphérique. Après enduction de gel-coat, on dispose le renfort sur un moule rigide, puis on coule la matrice. Le contre-moule, recouvert d'une membrane assurant l'étanchéité (feuille de caoutchouc, nylon, etc.), est ensuite emboîté. Une pompe à vide crée une dépression à travers le moule et le contre-moule poreux, qui étale et déboule la résine. Le contre-moule peut éventuellement être limité à la seule membrane d'étanchéité.

Ce procédé de moulage convient pour la fabrication de pièces en petites et moyennes séries. Il permet d'obtenir de bonnes qualités mécaniques, grâce à une proportion de résine uniforme et à une diminution des inclusions d'air. Dans le cas de l'utilisation d'un contre-moule rigide, un bel aspect de surface est obtenu sur les deux faces. Les cadences de production sont toutefois assez lentes. [12]

### **I.9.5. Moulage par compression :**

❖ **Moulage par injection de résine:** Le moulage consiste, par injection de résine sous pression, à imprégner un renfort placé à l'intérieur d'un ensemble moule et contre-moule très rigide et fermé. L'alimentation automatique des résines élimine leur manipulation. La proportion de renfort peut être élevée, d'où l'obtention de pièces à caractéristiques mécaniques élevées. Ce procédé de moulage convient à la réalisation de pièces profondes et de formes compliquées.

❖ **Moulage par compression à froid :**

Le moulage est effectué à basse pression (< 5 bars) sans chauffage du moule, en utilisant l'exothermie de polymérisation de la résine. L'énergie calorifique accumulée par le moulage des pièces est alors suffisante pour maintenir le moule à des températures de 50 à 70 °C, en fonctionnement permanent. Moule et contre-moule sont enduits d'agent de démoulage et de gel-coat. Puis le renfort et la matrice sont déposés sur le moule. L'ensemble moule/contre-moule est fermé, puis pressé. Le temps de polymérisation est lié au type de résine, au catalyseur et à la température atteinte par le moule en régime continu de production. Ce procédé de moulage est adapté à la fabrication de pièces de moyennes séries (4 à 12 pièces par heure). L'investissement (matériel et moule) est moins important que le procédé de compression à chaud. La presse basse pression est simplifiée. Les moules peuvent être réalisés par le transformateur en matériaux composites. Les pièces possèdent un bel aspect de surface sur chaque face. La productivité est inférieure au moulage à la presse à chaud.

### **1.9.6 Moulage par compression à chaud :**

Cette technique permet d'obtenir des pièces en grandes séries au moyen de presses hydrauliques et de moules métalliques chauffants. Le renfort, constitué par du mat à fils coupés ou à fils continus, par des tissus ou par des préformes, est déposé sur le moule chauffant, enduit au préalable d'un agent de démoulage. Puis la résine catalysée est coulée en vrac sur le renfort. Le moule est fermé suivant un cycle déterminé par descente et pressage du contre- moule.

Le temps de pressage est lié au temps de polymérisation de la résine, fonction de la réactivité de la résine et de l'épaisseur de la pièce. Le moule est ensuite ouvert, et la pièce éjectée.

Ce procédé de moulage permet d'obtenir des proportions importantes de renfort, et par conséquent des pièces de bonnes caractéristiques mécaniques. Les dimensions des pièces sont fonction de l'importance de la presse. La pression de moulage est de l'ordre de 10 à 50 bars, la

température des moules de l'ordre de 80 à 150 °C. Les cadences de fabrication peuvent atteindre 15 à 30 pièces par heure.

Elles nécessitent un investissement important en matériel, presse et moule.

### **I.9.7 Technologies RTM (*Resin Transfer Molding*):**

Le renfort est placé à sec dans le moule; ensuite, on procède à l'injection de résine en pression, parfois avec moule sous vide. La polymérisation peut se faire à froid ou à chaud, avec ou sans catalyseur. Cette technologie est la plus employée dans la production de grande série de pièces à faibles qualités structurales. Parfois, on fait l'injection de la résine non en pression mais sous vide.

### **I.10 les principes raisons de l'utilisation des matériaux composites :**

Qu'il s'agisse des constructions aérospatiales, navales, ferroviaires ou de matériels sportifs, on assiste aujourd'hui à la rapide généralisation de l'emploi des matériaux composites dans de nombreux domaines industriels et cela est dû aux différentes raisons dont on peut citer quelques-unes :

- ❖ Excellente résistance en comparaison des matériaux métalliques,
- ❖ Présentant des propriétés élevées uniquement dans les axes de sollicitation afin d'effectuer des gains de masses supplémentaires,
- ❖ Dimensionnement de structure ayant des propriétés particulières (matériau à très faible coefficient de dilatation thermique, intéressant pour les applications satellite) ou à mémoire de forme (tel que les tubes dépoulement pour satellites),
- ❖ Sensibilité nettement moindre à la fatigue que pour les matériaux métalliques,
- ❖ Utilisation des matériaux multifonctionnels ayant des fonctions structurales mais également autre telle que de bonnes propriétés acoustiques, transparence aux ondes électroniques bonne résistance aux feux. [13]

### **I.11 Domaines d'application des matériaux composites :**

Les matériaux composites entrent aujourd'hui dans pratiquement tous les domaines d'applications possibles : Piscines, bassins, bâtiments... Les transports aériens, maritime, routier, ferroviaire... Sports et loisirs, etc.

Pour beaucoup d'applications structurales, comme sur les Plates-formes pétrolières offshore, les composites à matrice polymère apparaissent comme de sérieux concurrents des métaux, du

fait principalement de leur légèreté. Pourtant, l'industrialisation de solutions composites est délicate, car les avantages compétitifs sont amoindris par les surcoûts induits, et surtout, par la difficulté à prévoir l'évolution des propriétés d'usage de ce type de matériaux, notamment sous sollicitations environnementales et mécaniques couplées. [14]

### I.11.1. Les composites dans l'industrie automobile :

Les matériaux organiques composites à matrices thermoplastiques ou thermodurcissables renforcés par des fibres, généralement de verre, courtes ou longues ont fait leur apparition dans l'automobile durant les années 60-70. Même s'ils sont aujourd'hui utilisés presque exclusivement pour satisfaire certaines fonctions, leur taux d'utilisation ne dépasse pas 10 à 15 % selon les véhicules. Généralement, l'habitacle (habillage intérieur) d'un véhicule est essentiellement constitué de matériaux polymères et de composites, qui à eux seuls représentent environ 50 % de la quantité utilisée sur un véhicule tant en Europe qu'aux États-Unis :

- 48 % pour les véhicules nord-américains en 1994
  - 50 à 60 % (y compris les insonorisants) Pour l'ensemble de la gamme actuelle Renault.
- Les principales applications concernent : la planche de bord et le poste de conduite, les ébénisteries et les habillages de portes, les garnitures de toit, les sièges, la tablette arrière, les tapis de sol et les textiles. Les principales applications concernent aussi les accessoires tels que : les peaux de boucliers, les calandres, les grilles d'auvent, les enjoliveurs de roues, les rétroviseurs, les feux de signalisation, les bras d'essuie-vitre, les baguettes, les becquets, les ailerons, les poignées de porte, etc.

### I.11.2. Les composites dans l'aérospatiale :

Les constructeurs aéronautiques font de plus en plus appel aux matériaux composites du type matrice polymère/fibres de carbone continues pour réduire la masse des avions. La pénétration de ces matériaux est passée de 20 % pour l'Airbus A340 à plus de 50 % pour le futur Boeing B787. La réduction des coûts de fabrication à qualité mécanique constante passe par une intégration forte des phases de conception et de fabrication : sélection concomitante des constituants, semi-produits et modes d'assemblage. La prévision des performances doit être souple pour une gamme de solutions données. Un essai représentatif du mode de sollicitation considéré comme le plus pénalisant permet une approche quantitative réaliste dans un contexte industriel. L'essai peut lui-même être en phase de développement lorsqu'il s'agit d'un système original.



**Figure I.24 :** Différents domaines d'utilisation des matériaux composites

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons interprété une présentation des matériaux composites. Récapitulant les caractéristiques mécaniques disponibles dans la littérature. Les matériaux composites sont des matériaux très variés, disponibles partout, et connaissent actuellement un essor important dans tous les domaines d'application, en particulier en mécanique, vu leurs performances mécaniques. Les stratifiés sont des matériaux composites possédants des propriétés très élevées et aussi des théories classiques usuelles qu'il est souhaitable de les étudier. . Il est donc nécessaire de caractériser le comportement mécanique d'une manière aussi détaillé que possible par des essais mécaniques.

Pour cela, le développement et l'analyse de ces essais font l'objet de chapitre deux.

**CHAPITRE I**    Présentation des matériaux composites

## II.1 Introduction :

La validation et le développement des modèles de comportement des composites exige des mesures précises des propriétés de ses constituants et de l'interface (fibre /matrice) .cependant le degré de cette précision dépend du type d'information que l'on peut extraire à partir des moyens de caractérisation afin d'obtenir des résultats de la réponse du composite à tel ou tel type de sollicitation mécanique. Dans ce chapitre nous présentons une théorie générale de l'étude du comportement mécanique des matériaux composites et les lois qui régissent ces derniers.

## II.2 Les essais mécaniques :

Les matériaux composites présentent des comportements thermomécaniques variables selon leur domaine d'utilisation: dépendance aux sollicitations, effet de la température ou de l'environnement. La caractérisation du comportement mécanique des composites dans des conditions précises passe par la détermination d'un certain nombre de grandeurs mécaniques ce sont les essais mécaniques. Ces derniers sont classés en plusieurs types : [2]

### II.2.1 Essais mécaniques sur les composites :

Les essais mécaniques permettent de mettre en évidence les lois de comportement du composite et pour cela nous avons deux types d'essais :

#### II.2.1.1 Essais statiques :

##### 1) Essai de traction

Il s'agit d'un des essais les plus pratiqués, permet de déterminer des caractéristiques mécaniques fondamentales des matériaux : limite d'élasticité  $\sigma_e$ , charge de rupture  $\sigma_r$ , Le module de Young E, Le coefficient de poisson ainsi la contrainte maximale de traction  $\sigma_{tr \max}$ . L'essai de traction est effectué en utilisant des éprouvettes normalisées, elles sont soumises à une extension progressive dans le sens de :

- Longueur des fibres (traction longitudinale) ;
- Perpendiculaire aux fibres (traction transversale) ;
- L'angle de  $45^\circ$  par rapport à la direction des fibres (traction hors axes).

La contrainte normale  $\sigma$  est donnée par :  $\sigma = \frac{F}{s}$  (II.1)

Les déformations longitudinales et transversales sont données par :  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$  (II.2)

### 2) Essai de compression :

L'essai consiste à appliquer à vitesse constante un effort de compression sur un barreau parallélépipédique disposé verticalement. Il détermine la contrainte à la rupture en compression. Mais pour cet essai la résistance du matériau composite unidirectionnel dépend de multiples facteurs tels que la fibre, la matrice, la résistance inter faciale et le taux de vide. Cet essai détermine la contrainte à la rupture en compression qui est définie par la formule :

$$\sigma_r = \frac{F_r}{lh} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$F_r$  : charge à la rupture ;

$L$  : Longueur de l'éprouvette ;

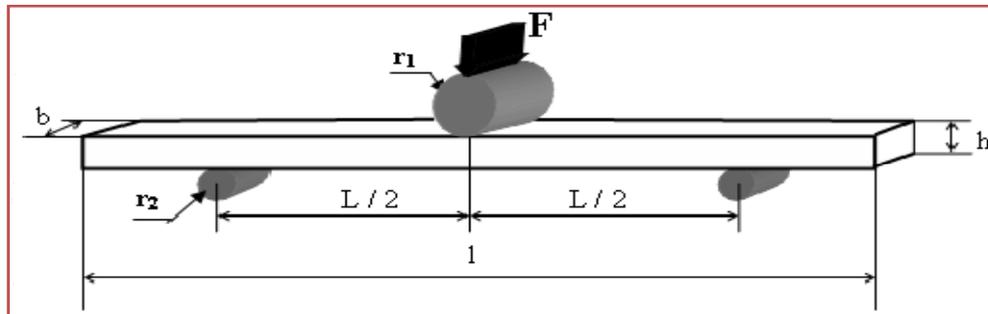
$h$  : épaisseur de l'éprouvette.

### 3) Essai de flexion :

L'essai de flexion est un test mécanique statique, qui fait partie de la famille des essais indépendants du temps (comme le choc, la dureté...). Il est facile à mettre en œuvre (absence de système de fixation d'éprouvette, géométrie simple de l'échantillon), et il reproduit assez bien les sollicitations courantes auxquelles sont soumises les pièces industrielles. Cet essai est très souvent pratiqué pour mesurer des caractéristiques telles que le module d'Young et la résistance en flexion, la flèche maximale... Il nécessite des charges plus faibles que la traction et les mesures de flèches posent moins de problèmes que les mesures d'allongement. Deux configurations peuvent être retenues pour les essais : la flexion trois points et la flexion quatre points, ce dernier cas permettant de bénéficier d'une zone centrale dans laquelle le «moment de flexion» est uniforme. [13]

- **Essai de flexion trois points :**

Le principe de cet essai consiste à déformer une éprouvette parallélépipédique reposant sur deux appuis, par l'intermédiaire d'un poinçon (ou panne) située à égale distance des appuis et se déplaçant à vitesse constante. [13]

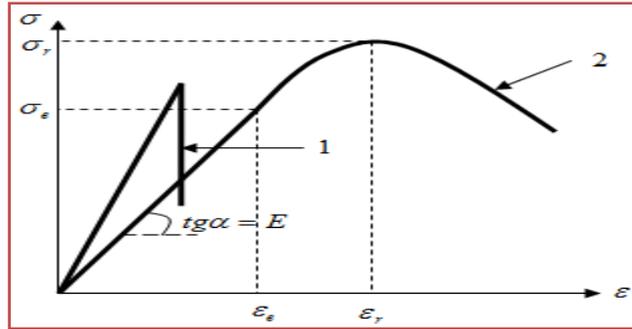


**Figure II.1 :** Géométrie de l'essai de flexion trois points.

Avec :

- **F**: charge appliquée ;
- **r1** : rayon de cylindre de la panne (= 5mm) ;
- **r2** : rayon des cylindres d'appuis (= 2.5mm) ;
- **L** : longueur entre appuis ;
- **L0** : longueur totale de l'éprouvette ;
- **h** : hauteur de la poutre ;
- **b** : largeur de la poutre.

L'essai de flexion trois points sollicite de façon symétrique, une face de l'éprouvette soumise à une contrainte de traction et l'autre face à une contrainte de compression. Il existe aussi une troisième contrainte de cisaillement, sa valeur maximale est située au niveau de la ligne neutre, et que en fonction de la géométrie de l'éprouvette d'essai, il y a compétition entre une rupture en flexion et une rupture en cisaillement, et la courbe de contrainte – déformation est donnée par la Figure suivante :



**Figure. II .2:** Courbe de contrainte-déformation : 1) matériau fragile; 2) matériau ductile.

Des relations issues de la résistance des matériaux permettent de faire le lien entre ces deux grandeurs ( $y$  et  $F$ ), la géométrie de la pièce ( $L$ ,  $h$  et  $b$ ) et les caractéristiques du matériau ( $\sigma$ ,  $\varepsilon$  et  $E$ ). Expérimentalement, on enregistre la courbe force ( $F$ )-flèche ( $Y$ ) à partir de laquelle il est possible de calculer la contrainte à la rupture  $\sigma_r$  (ou une contrainte pour un effort  $P_r$  particulier) et le module d'Young en flexion ( $E_f$ ). Les contraintes et déformation ont pour valeur :

La contrainte de rupture :

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \tag{II.4}$$

La déformation à la rupture :

$$\varepsilon = \frac{6hY}{L^2} \tag{II.5}$$

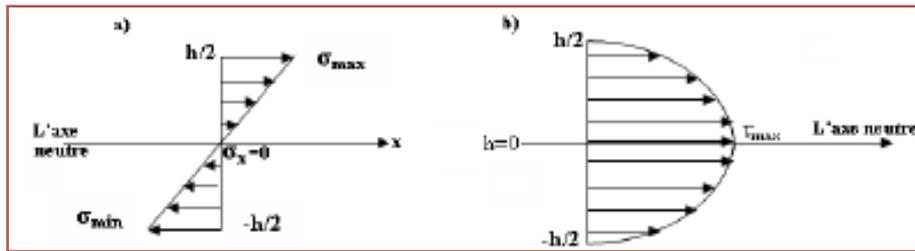
La flèche est maximale au centre de la poutre, c'est-à-dire pour la valeur  $x = \frac{l}{2}$

$$y_{\max} = \frac{Fl^3}{48EI} \tag{II.6}$$

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

$$E = \frac{Fl^3}{48yI} = \frac{Fl^3}{4ybh^3} \tag{II.7}$$

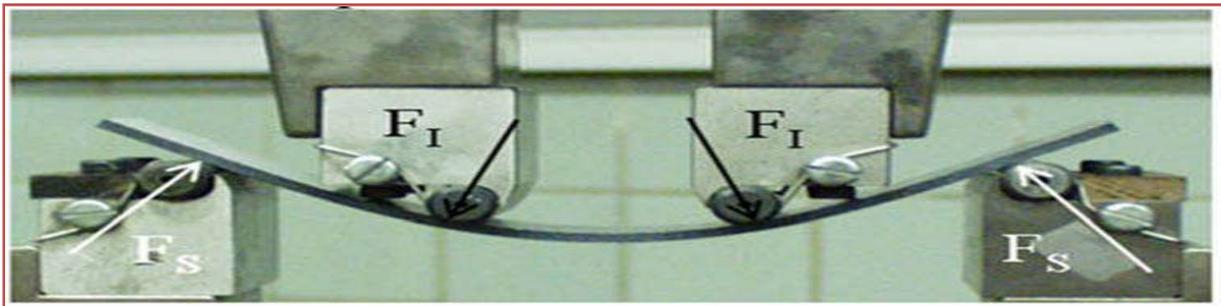
Certaines conditions de sollicitation doivent être respectées. En effet lors de la sollicitation de flexion, le champ de contrainte n'est pas homogène, et l'effort appliqué engendre non seulement des contraintes normales de traction compression mais également des contraintes de cisaillement maximum sur la ligne neutre ( $y=0$ )



**Figure II.3 :** Représentation des contraintes internes d'une éprouvette sollicitée en flexion trois points.

- **Essai de flexion quatre points :**

Pour éviter l'influence des contraintes de cisaillement (sur la déformée et le mécanisme de rupture) qui se superposent aux contraintes normales de flexion, on utilise quelque méthodes de flexion quatre points pour laquelle l'effort tranchant est nul dans la zone des contraintes maximales. [15]



**Figure II.4 :** un stratifié est soumis à un essai de flexion à quatre points

## II .2.1.2 essais dynamiques :

### 1. Essai de résilience (choc) :

L'essai Charpy a pour but de déterminer la résistance aux chocs des matériaux. Il consiste à rompre d'un seul coup à l'aide d'un mouton pendule, une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis. L'entaille peut revêtir diverses formes : en U ou, le plus souvent, en V. L'énergie consommée pour rompre l'éprouvette est mesurée en faisant la différence entre la hauteur de chute du mouton et celle à laquelle il remonte après avoir rompu le barreau. L'énergie de rupture ainsi déterminée s'appelle la résilience. Plus elle est élevée, plus le matériau est tenace. La résilience est l'énergie nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette, est exprimée en joules par  $\text{cm}^2$  ( $\text{J}/\text{cm}^2$ ). [2]



Figure II.5: Mouton pendule de Charpy.

## 2. autres essais dynamiques :

- Essais de compression dynamique ;
- Essais de fatigue

### II.2.2 Essais mécaniques sur l'interface fibre /matrice :

- Essais sur éprouvette modèle (essais pull-out, essais de fragmentation,...)
- Essais sur produit fini (essai micro-indentation, essai de cisaillement inter laminaire, par flexion ou par traction)
- Vieillessement (absorption d'eau, tenue en température)
- Dilatation thermique

## II.3 les principales lois de comportement des composites :

Les lois de comportement ont pour objectif de décrire et de prédire le comportement de milieux matériels soumis à des sollicitations extérieures d'origine mécanique ou thermique. Ces lois sont évidemment empiriques. Ces dernières sont contraintes de satisfaire le second principe de la thermodynamique. Le respect des symétries du milieu matériel étudié est également demandé et aussi de vérifier des conditions liées à la stabilité des équilibres. [14]

### II.3.1 Etat de contraintes et de déformations dans un solide :

Le tenseur des contraintes est une représentation utilisée en mécanique des milieux continus pour caractériser l'état de contrainte, c'est-à-dire les efforts intérieurs mis en jeu entre les portions déformées du milieu. Ce chapitre présente quelques notions générales portant sur les lois de comportement des milieux anisotropes et plus particulièrement des matériaux orthotropes et isotropes transverses

### II.3.2. Tenseur des contraintes :

$\sigma$  est un tenseur d'ordre 2, à 3 lignes et 3 colonnes. Il est défini localement pour un point M donne, note  $\sigma_{ij}$  et représente par la matrice

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

En statique, le tenseur des contraintes est toujours symétrique, c'est-à-dire que :

$$\sigma_{21} = \sigma_{12}, \sigma_{23} = \sigma_{32}, \sigma_{31} = \sigma_{13}$$

### II.3.3. Tenseur des déformations :

Le tenseur des déformations est un tenseur symétrique d'ordre 2 servant à décrire l'état de déformation local résultant de contraintes (efforts internes). Si l'on fait l'hypothèse des petites déformations, on néglige les termes du second ordre et on obtient le tenseur des déformations linéarisé :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{II.9})$$

D'où :  $\vec{U}(P)$  est le vecteur de déplacement du point p.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \frac{\partial U_1}{\partial x_1}, \varepsilon_{12} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_1}{\partial x_2} + \frac{\partial U_2}{\partial x_1} \right), \varepsilon_{13} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_1}{\partial x_3} + \frac{\partial U_3}{\partial x_1} \right) \\ \varepsilon_{22} &= \frac{\partial U_2}{\partial x_2}, \varepsilon_{33} = \frac{\partial U_3}{\partial x_3}, \varepsilon_{23} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_2}{\partial x_3} + \frac{\partial U_3}{\partial x_2} \right) \end{aligned} \quad (\text{II.10})$$

### II.3.4. Equations de Compatibilité :

Ainsi que nous l'avons constaté, les différentes tenseur déformations sont issues de la donnée d'un champ vectoriel, le champ de déplacement. Les relations permettent sans ambiguïté de calculer, dans un repère quelconque, les composantes de chacun de ces tenseurs des lors que l'on connaît les composantes du vecteur déplacement. Ces relations s'appelle les conditions de compatibilité et elles ne sont en fait que les conditions d'intégrabilité au sens de Cauchy pour un système d'équations différentielles.

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial x_i^2} - 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} = 0 \quad (\text{II.11})$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( -\frac{\partial \varepsilon_{ik}}{\partial x_i} + \frac{\partial \varepsilon_{ik}}{\partial x_j} + \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial x_k} \right) \quad (\text{II.12})$$

### II.3.5. Matrice de Rigidité

La relation d'élasticité linéaire est décrite par la loi de Hooke généralisée : [14]

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl}$$

Sous la forme matricielle, elle s'écrit comme suit :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

(II.13)

**II.3.6. Matrice de souplesse (ou de complaisance) :**

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad \text{ou} \quad \varepsilon = s\sigma \tag{II.14}$$

La matrice S est la matrice inverse de la matrice de rigidité C, et s'écrit dans le cas général comme suit :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \tag{II.15}$$

**II.3.7 .Matériaux Anisotropes**

Au sens général du terme, une grandeur physique (macroscopique ou microscopique) est anisotrope, ou isotrope, selon qu'elle dépend ou non de la direction suivant laquelle on la mesure. Ainsi, la densité d'un corps homogène ou la fonction de distribution des vitesses à l'équilibre thermodynamique sont des grandeurs isotropes, tandis que cette même fonction de distribution en régime de transport est anisotrope. Dans cette acception générale, le temps et l'espace étant des grandeurs physiques (puisque mesurables), on parle souvent de leur isotropie ou de leur anisotropie. Par exemple, pour une nappe unidirectionnelle, la résistance et la rigidité sont beaucoup plus grandes dans le sens des fibres que dans les autres directions.[17]

**II.3.7.1. Matériau orthotrope**

L'orthotropie désigne des caractéristiques de symétrie d'un matériau. C'est un cas particulier d'anisotropie. Un matériau est orthotrope s'il possède trois plans de symétrie orthogonaux entre eux. Son comportement élastique est alors défini par neuf modules d'élasticité, son comportement thermique par trois constantes thermiques. L'invariance de la matrice dans un

changement de base effectuée par symétrie par rapport à ce deuxième plan conduit à une relation d'élasticité linéaire de la forme : [14]

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

(II.16)

### II.3.8 Matériaux Isotropes

On dit qu'un système est isotrope si aucune de ses propriétés (macroscopiques) ne possède de dépendance directionnelle, c'est-à-dire que, ces propriétés étant toujours représentées par des tenseurs spécifiques (conductivité, constante diélectrique, module d'élasticité), leurs composantes sont invariantes par rapport à une rotation du trièdre de référence (réflexion et inversion incluses). Il suffit qu'une seule propriété soit directionnelle pour que le corps cesse d'être isotrope. L'application de cette propriété au matériau unidirectionnel conduit aux relations : [14]

$$C_{22} = C_{11}, C_{23} = C_{12}, C_{66} = \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) \quad \text{(II.17)}$$

#### II.3.8.1. Relation d'élasticité :

Un milieu isotrope est caractérisé par 2 constantes d'élasticité indépendantes  $C_{11}$  et  $C_{22}$  qui seront exprimées en introduisant les coefficients de lame  $\lambda$  et  $\mu$  :

$$C_{22} = \lambda, \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) = \mu, C_{11} = \lambda + 2\mu$$

La matrice de rigidité devient comme suit :

$$\begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \gamma & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & S_{22} & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \quad \text{(II.18)}$$

La détermination de la matrice de souplesse S fait intervenir le calcul de la matrice de C donnée par la relation :

$$S_{11}=S_{22} = S_{33} = \frac{(\lambda + 2\mu)^2 - \lambda^2}{4\mu^2(3\lambda + 2\mu)} = \frac{\lambda + \mu}{\mu[3\lambda + 2\mu]} = \frac{1}{E}$$

$$S_{12} = S_{13} = S_{23} = \frac{\lambda(\lambda + 2\mu) - \lambda^2}{4\mu^2 + (3\lambda + 2\mu)} = \frac{\lambda}{2\mu(3\lambda + 2\mu)} = \frac{\nu}{E}$$

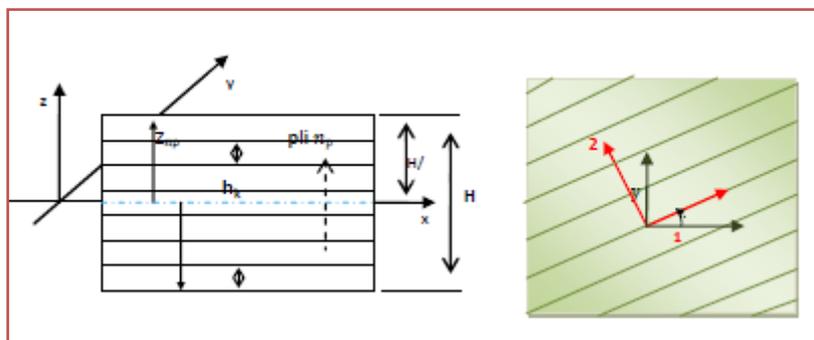
$$S_{44} = S_{55} = S_{66} = \frac{1}{\mu} = 2 \frac{1+\nu}{E}$$

La matrice de souplesse s'écrit dans toute base comme suite :

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\frac{1+\nu}{E} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\frac{1+\nu}{E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\frac{1+\nu}{E} \end{bmatrix} \tag{II.19}$$

**II.4. Théories classiques des composites :**

Les coordonnées du stratifié sont définie avec un axe z perpendiculaire au plan du stratifié. L'origine de l'axe z est au centre géométrique (plan médian) du stratifié, les coordonnées dans le plan (x,y) sont arbitraires. Il est cependant habituel d'assigner l'axe des x à une direction spécifique de chargement ou à une direction principale de la structure. Une fois le système de coordonnées établi, les angles des strates,  $\theta_k$ . c'est-à-dire que  $\theta_k$  est l'angle entre la direction des fibres et l'axe x. [1]



**Figure II.6. :** coordonnées d'un stratifié orienté par un angle  $\theta_k$ .

Un pli k de stratifie est défini par un repère local orthogonal (1,2), où l'axe 1 est parallèle à la direction des fibres. Les propriétés du pli de stratifié sont mesurées dans le repère (1,2)

**II.4.1. Les relations entre les contraintes et les déformations :**

Dans le repère local de chaque pli la représentation des liens entre les déformations et les contraintes est définie par l'équation suivante : [6]

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Où les termes de la matrice de rigidité  $[Q_{ij}]$  sont :

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (\text{II.21})$$

$$Q_{12} = Q_{21} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (\text{II.22})$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (\text{II.23})$$

$$Q_{66} = G_{12} \quad (\text{II.24})$$

L'équation (2 ; 20) permet de déterminer les propriétés mécaniques du stratifié dans le repère définie(1,2) mais dans le repère(x,y) les contraintes et les déformations ont des liaisons. Ces dernières sont décrites par l'équation suivante : [1]

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{Q}] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Après la transformation de la matrice de rigidité  $[Q]$  dans le repère (1,2) à la matrice  $[\bar{Q}]$  dans le repère ( x,y ) par rapport à un angle de rotation des fibres ( $\theta_k$ ) on trouve :

$$[\bar{Q}] = [T]^{-1} [Q] [T]^{-T}$$

**(II.26)**

Avec :

$$[T]^{-T} = [T(-\theta)]^t = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix}$$

**(II.27)**

C'est-à-dire :

$$\begin{Bmatrix} Q_{xx} \\ Q_{xs} \\ Q_{xy} \\ Q_{ss} \\ Q_{sy} \\ Q_{yy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C^4 & 2S^2C^2 & 4S^2C^2 & S^4 \\ SC^3 & S^3C - SC^3 & 2(S^3C - SC^3) & -S^3C \\ S^2C^2 & C^4S^4 & -4S^2C^2 & S^2C^2 \\ S^2C^2 & -2S^2C^2 & C^4 + S^4 - 2S^2C^2 & S^2C^2 \\ S^3C & SC^3 - S^3C & 2(SC^3 - S^3C) & -SC^3 \\ S^4 & 2S^2C^2 & 4S^2C^2 & C^4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q_{11} \\ Q_{12} \\ Q_{66} \\ Q_{22} \end{Bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Où [T] est la matrice de changement de repère c'est-à-dire, de repère local au repère global (x ,y ) défini par l'équation :

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -\sin \theta \cos \theta \\ -2\sin \theta \cos \theta & 2\sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Avec [T] liant les déformations dans le repère global (x ,y) à celles du repère locale (1,2), ceci est montré dans équation :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{1}{2}\gamma_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

#### II.4.2. Les liaisons entre les efforts résultants et les déformations :

Le comportement mécanique de plaque stratifié a caractérisé par la liaison suivante : [1]

$$N^T = A\varepsilon^\circ + Bk^\circ$$

$$M^T = B\varepsilon^\circ + Dk^\circ$$

Où  $N^T = (N_x, N_y, N_{xy})$  est le vecteur de forces résultants dans le plan moyen,

$M^T = (M_x, M_y, M_{xy})$  est le vecteur des moment résultants et  $(\varepsilon_x^\circ, \varepsilon_y^\circ, \gamma_{xy}^\circ), (k_x^\circ, k_y^\circ, k_{xy}^\circ)$  sont respectivement les déformations et les courbures qui définissent dans le plan moyen c'est-à-dire (z =0) ; en plus les deux équations (II, 31) et (II,32) montrent la relation entre les efforts résultants et les déformations. [1]

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^\circ \\ \varepsilon_y^\circ \\ \gamma_{xy}^\circ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x^\circ \\ k_y^\circ \\ k_{xy}^\circ \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^\circ \\ \varepsilon_y^\circ \\ \gamma_{xy}^\circ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x^\circ \\ k_y^\circ \\ k_{xy}^\circ \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

Les éléments des matrices [A] « matrice de rigidité en membrane », [B] « matrice de couplage membrane-flexion » et [D] « matrice de rigidité en flexion » sont définis respectivement par les équations suivantes : [6]

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^{n_p} (\overline{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \quad (\text{II.33})$$

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^{n_p} (\overline{Q}_{ij})_k \frac{z_k^2 - z_{k-1}^2}{2} \quad (\text{II.34})$$

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^{n_p} (\overline{Q}_{ij})_k \frac{z_k^3 - z_{k-1}^3}{2} \quad (\text{II.35})$$

Avec  $i=1, 2, 6$  et  $j=1, 2, 6$  et où  $(\overline{Q}_{ij})_k$  sont les éléments de la matrice de rigidité réduite de strate  $k$  et  $(z_k)$  les coordonnées de l'interface entre pli ( $k$ ) et pli ( $k+1$ ). Dans une structure du stratifié symétrique, les composants de la matrice de couplage membrane-flexion égalent le zéro ( $B_{ij} = 0$ ), et aussi  $A_{16} = A_{26} = 0$ , si le stratifié est équilibré c'est-à-dire un stratifié continu un nombre de pli orientés par un angle  $(+\theta_k)$  égale le nombre de plis orientés par un angle inverse  $(-\theta_k)$ . [1]

Utilisation des structures du stratifié symétrique équilibré est justifiée par l'avantage d'un calcul analytique facile. Par exemple le cas des charges de flambement et de la fréquence naturelle.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^\circ \\ \varepsilon_y^\circ \\ \varepsilon_{xy}^\circ \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x^\circ \\ k_y^\circ \\ k_{xy}^\circ \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

#### II.4.3. Critère de la déformation maximale :

Nous calculons les déformations dans les plis grâce à la loi de comportement. Nous regroupons dans une matrice [ABD] les trois matrices A, B, D et il faut inverser la matrice complète aux dimensions  $6 \times 6$ , on peut relier les déformations du plan moyen d'un stratifié en fonction des forces et des moments appliqués sur ce plan moyen. Cette relation est donnée à l'équation :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x^\circ \\ \varepsilon_y^\circ \\ \gamma_{xy}^\circ \\ k_x^\circ \\ k_y^\circ \\ k_{xy}^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

**II.4.4. la matrice de rigidité en flexion et torsion.**

Finalement, les relations entre les éléments de réduction et les déformations du plan moyen géométrique peuvent s'écrire : [6]

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_{xy} \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{16} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_6 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^\circ \\ \varepsilon_y^\circ \\ \varepsilon_{xy}^\circ \\ k_x^\circ \\ k_y^\circ \\ k_{xy}^\circ \end{Bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

Après avoir déterminé les déformations du plan moyen, on peut calculer les déformations  $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy})$  d'un pli « k » en fonction de la position « z » par rapport au plan moyen de ce pli selon l'équation : [1]

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^\circ \\ \varepsilon_y^\circ \\ \gamma_{xy}^\circ \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} k_x^\circ \\ k_y^\circ \\ k_{xy}^\circ \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

Pour calculer les contraintes dans le repère du stratifié il suffit d'appliquer sur un pli k, la loi contrainte-déformation pour position z qui appartient au pli, normalement, le calcul est fait en correspondance du plan moyen du pli, en plus les contraintes dans le repère local (1, 2) du pli peuvent être calculées en multipliant les déformations par la matrice [Q] de ce pli. [1]

**II.5. Les caractéristiques du mélange renfort-matrice :**

Il est fondamental pour le concepteur de prévoir et de connaître aussi précisément que possible les caractéristiques géométriques d'un mélange « renfort + matrice » qui est la structure de base des pièces composites, On qualifie couramment le nom de pli le demi - produit « renfort + matrice » présente sous forme quasi bidimensionnelle. [14]

- Un unidirectionnel + matrice.
- Un tissu (chaîne + trame) + matrice
- Un mat + matrice

- La teneur en masse de renfort :

On appelle ainsi le rapport :

$$M_f = \frac{\text{Masse de renfort}}{\text{Masse totale}} \quad (\text{II.41})$$

En conséquence :

- La teneur en masse de la matrice est telle que :

$$M_m = \frac{\text{Masse de la matrice}}{\text{Masse totale}} \quad (\text{II.42})$$

Ou encore :

$$M_m = 1 - M_f$$

(II.43)

- La teneur en volume de renfort :

$$V_f = \frac{\text{Volumederenfort}}{\text{Volumetotale}} \quad (\text{II.44})$$

En conséquence:

- La teneur en volume de la matrice est telle que

$$V_m = \frac{\text{volumedelamatrice}}{\text{volumetotale}} \quad (\text{II.45})$$

Ou encore:

$$V_m = 1 - V_f$$

(II.46)

## II.6. Calcul des caractéristiques mécaniques de composite :

### II.6.1. Module d' Young longitudinal

Le module d'Young longitudinal est déterminé dans un essai de traction longitudinale :

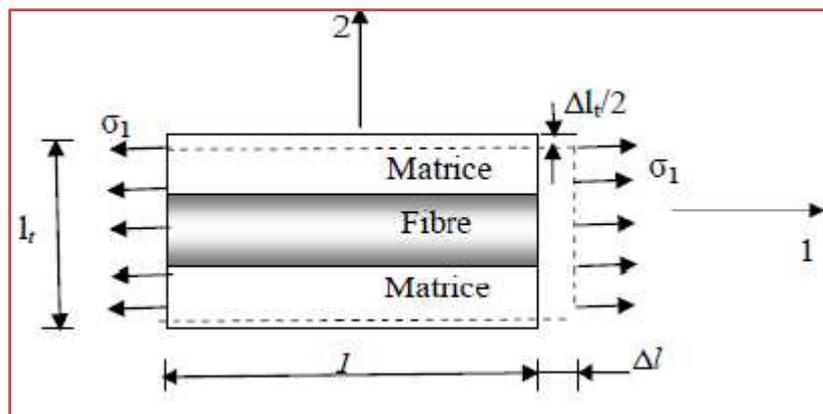


Figure II.7 : schéma simplifié d'une traction longitudinale.

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l} \text{ Déformation longitudinale}$$

Ou  $\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_l$

Si la fibre et la matrice ont un comportement élastique, les contraintes dans la fibre et la matrice sont exprimées par :

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_l \qquad \sigma_m = E_m \varepsilon_l \qquad \text{(II.47)}$$

La charge totale appliquée est :  $F_1 = \sigma_f S_f + \sigma_m S_m$  (II.48)

Ou  $S_f$  et  $S_m$  sont respectivement les aires des sections droites de la fibre et de la matrice. Si  $S$  est l'aire de la section droite de la cellule moyenne, la contrainte moyenne  $\sigma_l = \frac{E_l}{S}$

$$\sigma_l = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \qquad \text{(II.49)}$$

Cette contrainte moyenne est liée a la déformation de la cellule par le module d'Young longitudinal :  $\sigma_l = E_l \varepsilon_l$  (II.50)

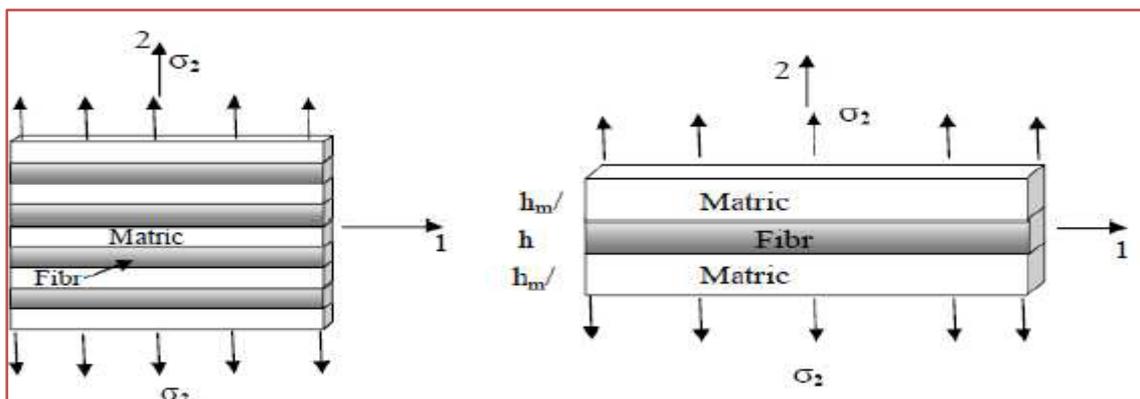
La combinaison des relations (II.45) et (II.41) conduit à l'expression du module d'Young longitudinal :

$$E_l = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \qquad \text{(II.51)}$$

Cette expression est connue sous le nom de loi des mélanges pour le module d'Young dans la direction des fibres.

**II.6.2. Module d'Young transversal :**

Le module d'Young transversal est déterminé dans un essai de traction transversal ou le composite est chargé suivant la direction normale aux fibres.



**Figure II.8 :** schématisation par couches d'un composite unidirectionnel.

La hauteur des couches doit simplement vérifier :

$$V_f = \frac{h_f}{h_f - h_m} \text{ et } 1 - V_f = \frac{h_m}{h_f - h_m} \qquad \text{(II.52)}$$

La charge  $F_2$  imposée suivant la direction transversale est transmise intégralement dans la fibre et dans la matrice, imposant des contraintes égales :

$$\sigma_f = \sigma_m = \sigma_2$$

Il en résulte que les déformations respectives de la fibre et de la matrice dans la direction Transversale s'écrivent :

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_2}{E_f} \quad \text{et} \quad \varepsilon_m = \frac{\sigma_2}{E_m} \tag{II.53}$$

L'allongement transversal d'une cellule élémentaire est :

$$\Delta l_2 = \varepsilon_f h_f + \varepsilon_m h_m \tag{II.54}$$

Et la déformation transversale s'écrit :

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta l_2}{h_f + h_m} = \varepsilon_f \frac{h_f}{h_f + h_m} + \varepsilon_m \frac{h_m}{h_f + h_m} \tag{II.55}$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_f V_f + \varepsilon_m (1 - V_f) \tag{II.56}$$

Cette déformation est liée à la contrainte imposée sur la cellule, par le module transversale :

$$\sigma_2 = E_T \varepsilon_2 \tag{II.57}$$

La combinaison des expressions 53 et 57 conduit à l'expression du module transversal :

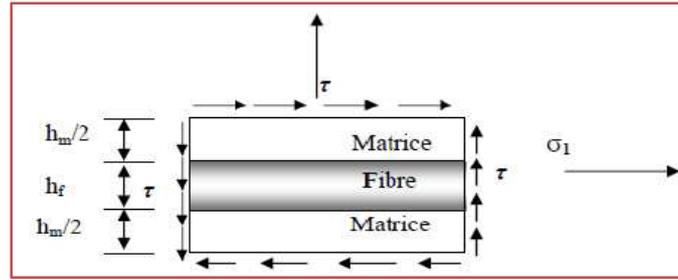
$$\frac{1}{E_T} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{1 - V_f}{E_m} \tag{II.58}$$

L'expression du module d'Young transversal est :

$$E_T = E_m \left[ \frac{1}{1 + \left[ \frac{E_m}{E_f} - 1 \right] V_f} \right] \tag{II.59}$$

### II.6.3. Module de cisaillement longitudinal :

Le module de cisaillement longitudinal  $G_{LT}$  est déterminé dans un essai de cisaillement Longitudinal schématisé ci-dessous :



**Figure II.9:** Schéma par couches d'un essai cisaillement longitudinal.

Les déformations en cisaillement de la fibre et de la matrice s'expriment donc suivant :

$$\gamma_f = \frac{\tau}{G_f} \text{ et } \gamma_m = \frac{\tau}{G_m} \quad (\text{II.60})$$

Les déformations induites dans la fibre et dans la matrice sont :

$$\delta_f = h_f \gamma_f \text{ et } \delta_m = h_m \gamma_m \quad (\text{II.61})$$

La déformation totale de la cellule est :

$$\delta = \delta_f + \delta_m = h_f \gamma_f + h_m \gamma_m \quad (\text{II.62})$$

Et l'angle de cisaillement de la cellule est déterminé par l'expression :

$$\gamma = \frac{\delta}{h_f + h_m} = \gamma_f V_f + \gamma_m (1 - V_f) \quad (\text{II.63})$$

Cet angle est lié à la contrainte de cisaillement par le module de cisaillement longitudinal  $G_{LT}$

$$\gamma = \frac{\tau}{G_{LT}} \quad (\text{II.64})$$

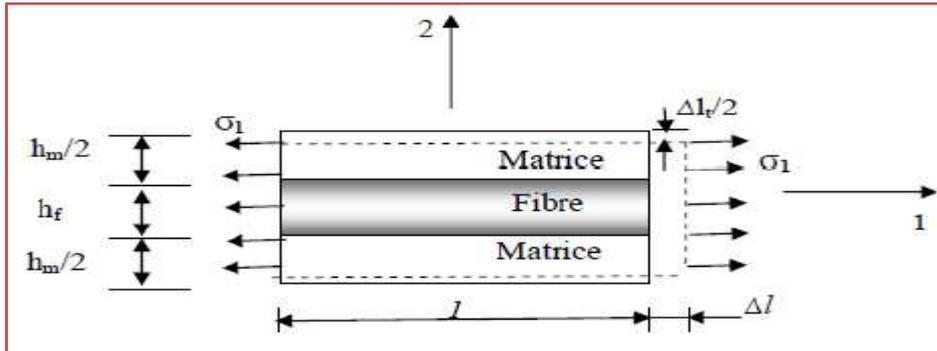
En combinant les expressions 61 et 63, nous obtenons :

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{1 - V_f}{G_m} \quad (\text{II.65})$$

L'expression du module de cisaillement longitudinal est :

$$G_{LT} = G_m \left[ \frac{1}{(1 - V_f) \frac{G_m}{G_{ft}}} \right] \quad (\text{II.66})$$

**II.6.4. Coefficient de poisson longitudinal :** Le coefficient de poisson est déterminé dans un essai de traction longitudinale :



**Figure II.10:** Schéma par couches d'une traction.

Les déformations transversales dans la matrice et dans les fibres s'écrivent :

$$\varepsilon_{2m} = -\nu_m \varepsilon_1 \text{ et } \varepsilon_{2f} = -\nu_f \varepsilon_1 \quad (\text{II.67})$$

L'allongement transversal de la cellule élémentaire est :

$$\Delta l_t = -\nu_m \varepsilon h_m - \nu_f \varepsilon h_f \quad (\text{II.68})$$

Et la déformation transversale s'écrit :

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta l_t}{h_m - h_f} = -[\nu_m(1 - \nu_f) + \nu_f V_f] \varepsilon_1 \quad (\text{II.69})$$

D'ou l'expression du coefficient de poisson :

$$\nu_{LT} = \nu_f V_f + \nu_m (1 - V_f) \quad (\text{II.70})$$

**Conclusion :**

L'étude du comportement des matériaux composites apparait mieux en effectuant des essais mécaniques, et cela nous conduit à prendre en compte la détérioration progressive du composite qui mène à la rupture macroscopique de ce dernier. L'endommagement des composites est complexe, il peut avoir son origine dans le développement des défauts présent dès l'étape d'élaboration pour cela la connaissance de l'état d'endommagement est une nécessité largement reconnue.

Le troisième chapitre aura pour objectif d'étudier les différents phénomènes d'endommagement des matériaux composites.

### III.1.Introduction :

Avant toute utilisation des matériaux composites il est nécessaire d'avoir une idée sur le comportement chimique, physique, mécanique et leurs milieux de mise en service, sans oublier sa durabilité. En effet les composites peuvent subir des modifications ou transformation structurelles où ces dernières peuvent être réversibles ou irréversibles. Les principales dégradations des matériaux composites proviennent des actions mécaniques qu'ils subissent associées aux sollicitations environnantes. Lors d'une sollicitation quelconque sur un matériau composite une importante déformation plastique peut apparaître au sein de ce composite, L'évolution du comportement mécanique de ce dernier depuis son état initial jusqu'à sa rupture est décrite par la théorie de l'endommagement et celle du vieillissement. [17]

### III.2.Endommagement des composites :

L'endommagement des composites est un phénomène de séparation de la matière de nature essentiellement irréversible. Les nouvelles surfaces créées peuvent entrer en contact mais ne peuvent s'adhérer au sens de la mécanique des surfaces. Le processus de séparation de la matière correspond alors à la dissipation de l'énergie consommée pour la création de nouvelles surfaces et/ou de déformations irréversibles. Le phénomène d'endommagement est très complexe; il se manifeste généralement par la combinaison de trois modes : Rupture de fibre, décohésion de l'interface fibre-matrice et fissuration de la matrice. Ces mécanismes et la multiplicité des facteurs influençant la résistance du composite rendent difficile la description de son endommagement. Ainsi, il existe des paramètres, tels que la fraction volumique, l'orientation des fibres, l'épaisseur des plis et l'espacement entre fibres, qui jouent un rôle très important dans la cinétique de l'endommagement. [13]

#### III.2.1. Les différentes échelles d'observation de l'endommagement :

Plusieurs types d'endommagement au sein d'une structure stratifiée, unidirectionnelle ou tissés qui se révèlent à différentes échelles d'observation. Les plus significatifs sont les suivants :

- 1) A l'échelle microscopique apparaissent les ruptures d'interfaces : c'est le phénomène de décohésion fibre/matrice et d'autre part, la rupture de fibre, et de matrice.
- 2) A l'échelle macroscopique on observe le phénomène de décollement inter pli : c'est le délaminage.
- 3) A l'échelle mesoscopique on observe l'apparition de nombreuses fissures intralaminaires mais également la rupture de fibres qui intervient au stade ultime de la ruine du matériau, qui sont parallèles à la direction des fibres. [18]

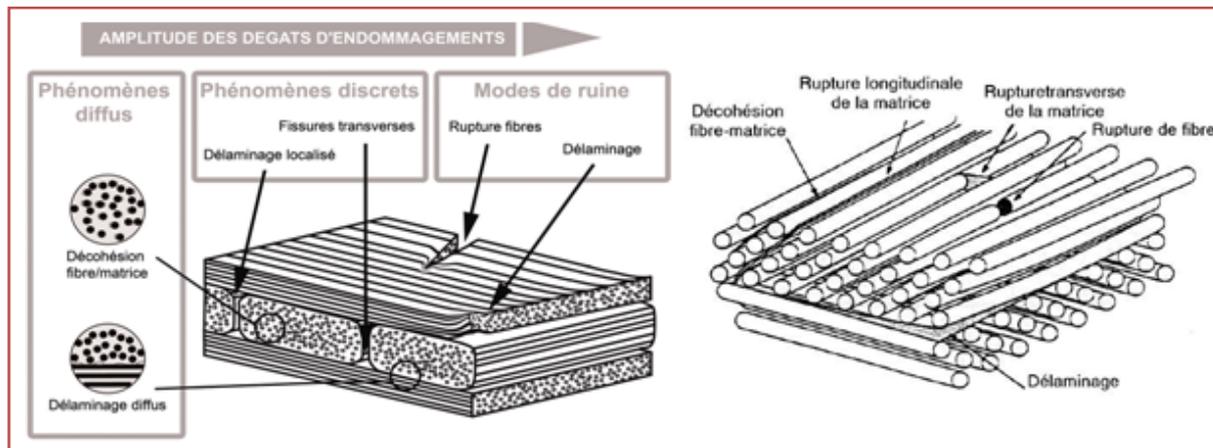


Figure III.1: Phénoménologie des endommagements

**III.2.2. Les mécanismes d’endommagement :**

Les mécanismes d’endommagement d’un matériau hétérogène ne sont pas uniformément présents au sein du matériau. Ils dépendent notamment de la sollicitation, de l’architecture des constituants et de l’orientation des plis. Un composite à matrice polymère soumis à une sollicitation mécanique, peut regrouper trois principaux modes différents : [13]

- a) Rupture des fibres;
- b) Fissuration matricielle ;
- c) Rupture de l’interface fibre-matrice et déchaussement de fibre ;

**1. Rupture de fibre**

La rupture de fibre intervient soit à la première mise en charge soit au cours de la sollicitation. On peut dire que la fibre rompt si elle subit une contrainte supérieure à sa résistance. On aperçoit ce phénomène lors d’existence d’un défaut qui subit une concentration de contrainte.

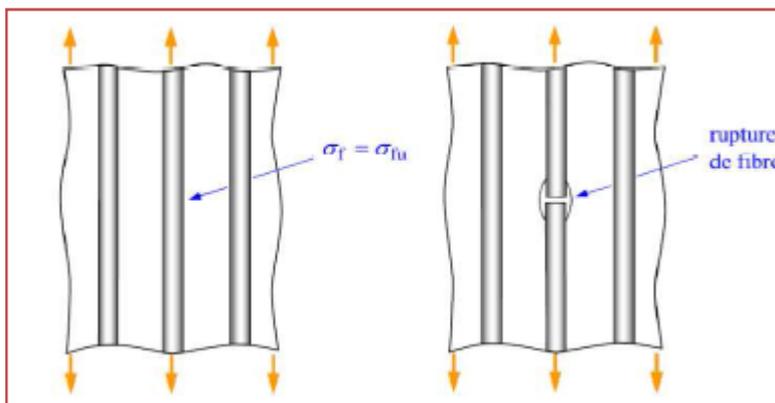


Figure III.2 : Rupture de fibre.

**2. Fissuration matricielle**

Les matrices organiques étant des matériaux ductiles. La rupture finale intervient, après une initiation de la fissure et sa progression, dès que la contrainte à la rupture  $R_s$  est atteinte. Ces fissures prennent naissance aux défauts présents dans le matériau lors de son élaboration. En traction longitudinale, la fissuration de la matrice est soit transverse dans le cas où  $s \parallel m$  dans la

matrice atteint la contrainte à la rupture en traction ; soit longitudinale dans le cas où la contrainte à la rupture en cisaillement est atteinte. Ce dernier mode ne se produit que dans le cas où la contrainte de décohésion de l'interface est supérieure à la contrainte en cisaillement de la matrice. Dans le cas contraire, il y aura alors décohésion de l'interface.

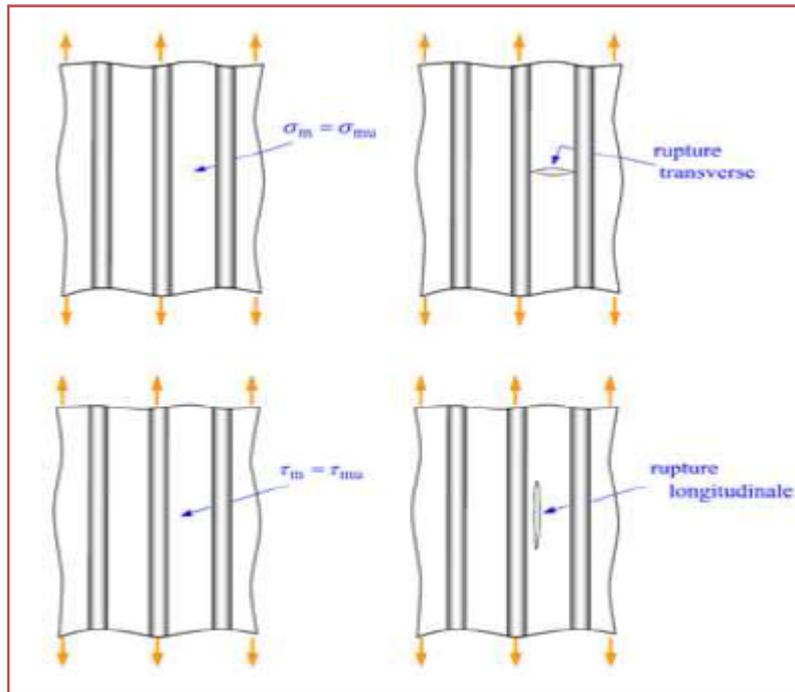


Figure III.3 : Rupture de la matrice.

### 3. Décohésion fibre-matrice

Dans un polymère renforcé par les fibres unidirectionnelles, la décohésion de l'interface intervient lorsque la contrainte de cisaillement  $\tau$  dans la matrice atteint la contrainte de décohésion  $\tau_d$ , et cela arrive quand cette dernière est inférieure à la contrainte en cisaillement à la rupture de la matrice  $\tau_m$ .

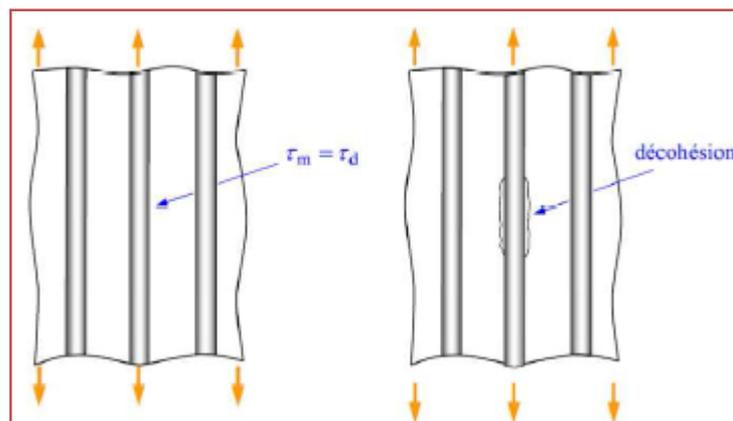
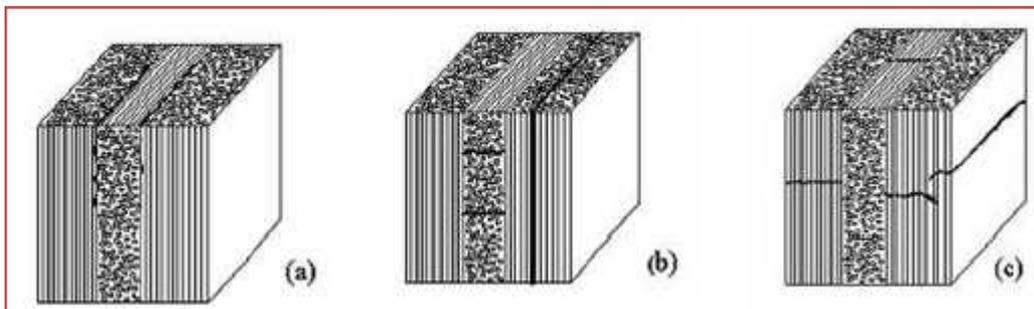


Figure III.4: Décohésion fibre-matrice.

#### III.2.3.Fissurations des composites stratifiés :

Les matériaux composites stratifiés constitués des couches superposées renforcées de fibres unidirectionnels, de tissus ou de mats peuvent présenter différents types de fissuration (interlaminaire, intralaminaire, ou translaminaire).

- a) **Fissures interlaminaire** : la fissure se développe suivant un plan parallèle aux couches de renfort, entre deux couches. Ce type d'endommagement se rencontre lors d'essai en mode I ou II, lors d'essai de flexion entre appuis rapprochés.
- b) **Fissures Intralaminaire** : le plan de la fissure est perpendiculaire ou parallèle aux couches de renfort à l'intérieure des couches. Ce mode d'endommagement se rencontre lors d'essai de cisaillement ou de traction transverse sur matériau unidirectionnel par exemple.
- c) **Fissures translaminaire** : le plan de la fissure est perpendiculaire aux couches et aux renforts. Ce mode d'endommagement est par exemple observé lors d'essai de traction ou compression uniaxial dans le sens des fibres.[13]



**Figure III.5** : Différents types de fissuration au sein d'un composite stratifié.

aux mécanismes décrits précédemment, s'ajoute un autre mécanisme d'endommagement entre couche appelé délaminage.

#### III.2.4. Délaminage :

Dans le matériau composite, l'endommagement principal se produit parallèlement à cette même force à cause de la faiblesse des interfaces entre les plis. Ce phénomène s'appelle Délaminage. Le processus de délaminage est le résultat d'une chronologie de divers types d'endommagement. Les propriétés mécaniques de la matrice et de la fibre ainsi que les propriétés adhésives et cohésives de l'interface gèrent cette chronologie en révélant des types d'endommagement fréquemment rencontrés comme la micro fissuration de la matrice, la rupture des fibres et la rupture des interfaces.

L'endommagement par délaminage interlaminaire se traduit par une décohérence plane inter faciale qui produit un dédoublement de l'épaisseur du composite. Ce type de dommage, a fait l'objet de traitement par la mécanique de la rupture sous des sollicitations de tension et de cisaillement, ce qui a montré l'intérêt de se limiter à l'application du concept du taux d'énergie dissipé  $G$  au délaminage. [14]

### III.2.5. La ruine du stratifié :

La ruine du stratifié est la cause de deux principaux endommagements : la rupture des fibres et le délaminage. La rupture de fibre est souvent la conséquence directe d'un choc. C'est le type d'endommagements auquel nous sommes confrontés en réparation automobile.

Le délaminage est souvent celui qui pose le plus de soucis en fabrication, car il dépend essentiellement de la conception d'origine du stratifié. Il apparaît le plus souvent aux endroits sensibles de la pièce (trous pour passages divers, raccords entre stratifiés différents, etc.). [5]

### III.3. Influence de l'environnement sur les matériaux composites :

La durabilité des composites revêt une importance primordiale. Ces matériaux se détériorent graduellement au cours de leurs utilisations et le mécanisme de la dégradation dépend fortement de l'intensité et de la durée des agressions chimiques et physiques lorsque le composite est exposé séparément ou combiné aux différents facteurs : lumière, chaleur, humidité, oxygène, produits chimiques.

Quelque soit l'origine de la dégradation, elle mène toujours à la détérioration des propriétés des matériaux composites conduisant au vieillissement de ces derniers veut dire à la réduction de leurs durées de vie. [13]

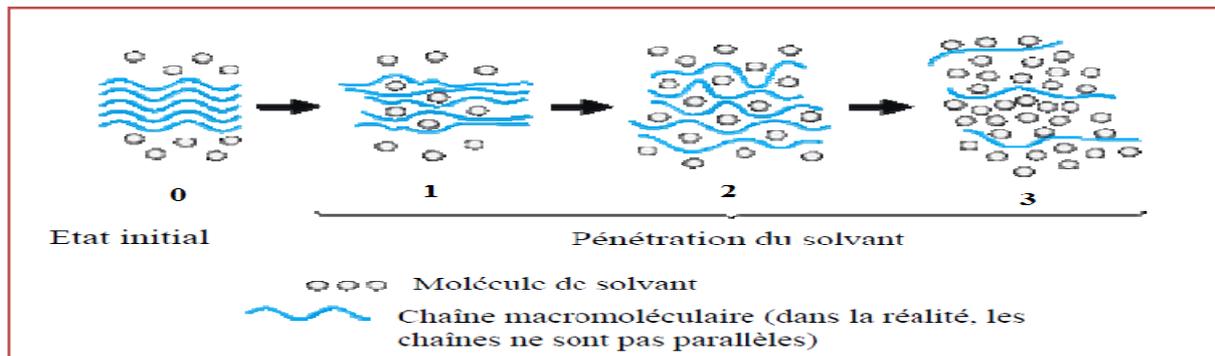
#### III.3.1. Vieillissement des matériaux composites à matrice polymères en présence d'un fluide:

Le vieillissement est défini comme étant une dégradation provoquant un processus irréversible qui entraîne un changement significatif dans la structure du matériau. Le changement est classiquement caractérisé par une perte des propriétés initiales (poids moléculaire, structure moléculaire, résistance à la traction) et/ou une fragmentation. Quand à la dégradation elle est affectée par les paramètres environnementaux et se déroule en une ou plusieurs étapes. Cependant cette définition ne prend pas en compte le vieillissement physique qui est un phénomène réversible pour cela nous distinguons deux types de vieillissement. [19]

#### III.3.1.1. Mécanisme de dégradation par vieillissement :

##### III.3.1.1.1. Vieillissement physique :

Il est reconnu qu'en dessous de sa température de transition vitreuse  $T_g$ , un polymère n'est généralement pas dans un état d'équilibre thermodynamique. En effet, au cours d'un refroidissement, le matériau se fige avec un excès de volume libre et d'enthalpie au passage de la zone de transition vitreuse. Le vieillissement physique, qui est un phénomène réversible, résulte alors d'une restructuration progressive des molécules dans le polymère vers une configuration plus stable et se traduit par un gain de ductilité ou un gonflement du matériau. [19]



**Figure III.6.** Schématisation de la pénétration d'un solvant à l'intérieur d'un système polymère

Les molécules d'eau peuvent s'insérer dans le réseau tridimensionnel en brisant les liaisons secondaires, type van der Waals ou liaisons hydrogène, entre les groupes polaires des chaînes macromoléculaires voisines. Les groupes polaires du polymère vont se lier préférentiellement à une molécule d'eau. La rupture des liaisons entre les chaînes, qui assuraient en bonne partie la rigidité du matériau, va permettre une augmentation de mobilité des chaînes ou des segments de chaînes macromoléculaires. On parle dans ce cas de plastification. Cette mobilité accrue va affecter les propriétés mécaniques et physicochimiques du polymère. Les propriétés mécaniques (généralement les modules d'Young et de cisaillement), ainsi que l'évolution de la température de transition vitreuse  $T_g$  sont les plus étudiées. Dans la plupart des cas, on constate une diminution du module d'Young et du module de cisaillement ainsi qu'une baisse de  $T_g$ . Le phénomène est réversible fibres et des délaminages. Ce phénomène est d'autant plus important que la résistance de l'interface est faible. [20]

### III.3.1.1.2. Vieillessement chimique :

Certaines études ont montré que la masse échantillon d'un matériau composite peut augmenter continuellement lorsque celui-ci est exposé à un environnement très humide. et d'autre scientifique par la modification de certaines bandes d'absorption ont supposé un mécanisme de dégradation polymère : <<l'hydrolyse>> : au cours de l'absorption les molécules d'eau peuvent remplacer les liaisons d'hydrogène déjà existantes par des liaisons hydrogène entre l'eau et le polymère. Le résultat de ces réactions chimiques à long terme est la dégradation de la résine et de l'interface par hydrolyse qui est activé thermiquement et susceptible d'être catalysé par divers agents chimique. Il peut y avoir aussi des coupures de chaînes entre nœuds de réticulation et ainsi création de fragmentation de chaînes macromoléculaires se retrouvant libre dans le réseau et pouvant diffuser vers le milieu extérieur, on parle dans ce cas de lessivage. Ce dernier peut être mis en évidence directement par gravimétrie en absorption de solvant (augmentation puis diminution de la masse globale de l'échantillon).

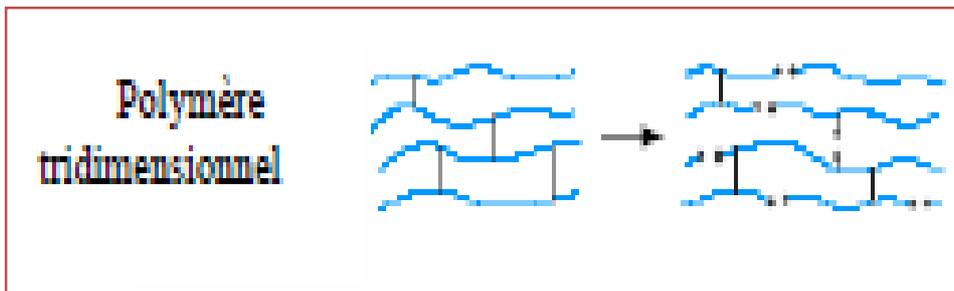


Figure III.7. Processus de coupure statistique des squelettes macromoléculaires

Le phénomène d’osmose qui a préoccupé la construction navale de plaisance dans les années 1980 est une illustration du phénomène d’hydrolyse. Vis-à-vis l’extérieur, le gel coat forme une membrane perméable qui va permettre le passage de l’eau au niveau de la matrice. Les produits d’hydrolyse s’accumulent dans les défauts de structure et entre les nœuds de réticulation de la matrice. Au niveau de ces sites privilégiés, les molécules emprisonnées se trouvent alors sous pression osmotique se qui conduit au final à la formation de cloques. [13]

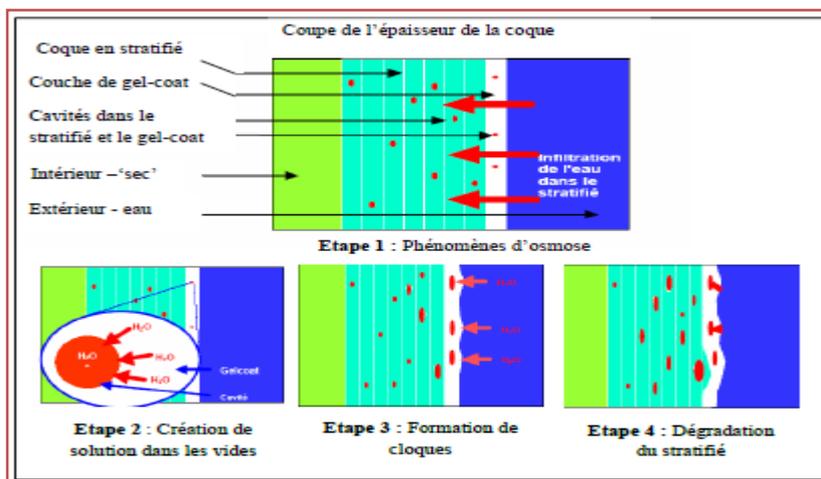
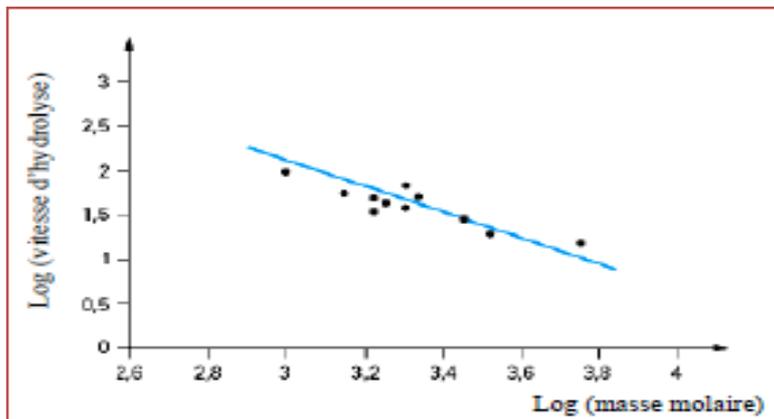


Figure III.8. Modèle schématique du processus d’osmose

▪ Cas d’une résine thermodurcissable :

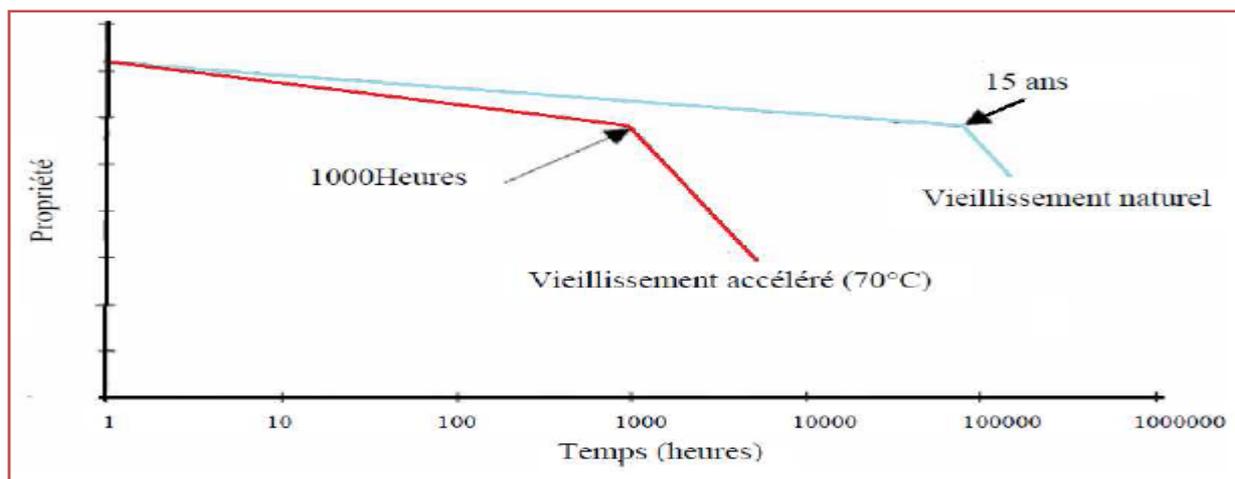
Dans le cas d’une matrice thermodurcissable, la masse peut affecter significativement, sa vitesse d’hydrolyse. Pour une même composition chimique et des conditions de mise en œuvre identiques. des scientifiques ont montré que la vitesse d’hydrolyse d’un stratifié verre /polyester dépend de la masse molaire en nombre  $M_n$  de la résine. Plus la masse molaire est faible et la vitesse d’hydrolyse du composite est élevée.



**Figure III.9.** Influence de la masse molaire en nombre Mn du polymère sur la vitesse d’hydrolyse d’une résine thermodurcissable (polyester) renforcée de fibre de verre.

▪ **Corrélation entre vieillissement naturel et accéléré :**

Afin de s’assurer de la résistance au vieillissement des composites, de nombreux travaux ont été réalisés. Des chercheurs ont entrepris des essais de vieillissement naturel (21 ans) sur des résines polyesters et époxy avec différents types de renforts. Ces essais permettent de décrire dignement le comportement du matériau, mais une durée aussi longue reste l’inconvénient majeur. C’est pourquoi des essais de vieillissement accélérés furent menés en parallèle dans différents environnements (eau bouillante, eau de mer naturelle et synthétique et en eau douce) à des températures variant de 20°C à 70°C pour des durées allant de 4 heures jusqu’à 8000 heures. Pour le polyester, ils ont observé une symétrie très nette entre vieillissement naturel et accéléré. Ainsi, ils ont constaté que 1000 heures de vieillissement accéléré provoquent la même dégradation que 15 ans en conditions naturelles. [20]



**Figure III.10 :** Courbe de vieillissement « échelle semi –logarithmique »

De même, ils ont noté que, quelque soit le type de vieillissement, on obtient toujours le même type de courbes. Même si les facteurs de corrélation entre vieillissement naturel et accéléré ne sont pas

toujours connus puisqu'ils diffèrent suivant la nature des matériaux, les essais de vieillissement accéléré permettent de sélectionner ou valider plus rapidement un matériau.

**III.4. Comportement des structures composites exposées à un fluide :**

La cinétique d'absorption des fluides est très complexe, car ces derniers peuvent interagir avec les constituants du composite, ce qui rend la cinétique dépendante du type de fluide en contact, sa concentration et de sa structure.

En général, lorsqu'un solide entre en contact avec un fluide, de l'eau dans la plupart des cas, la cinétique commence par une absorption surfacique, puis le fluide se répand dans le volume du solide selon les lois de la diffusion. Ce phénomène est caractérisé par une prise de poids du solide au cours du temps. La diffusion est définie comme un phénomène de transport moléculaire dû à l'existence d'un gradient de concentration du solvant vers le polymère.

**III.4.1. Diffusion Fickienne :**

Le modèle le plus simple pour la diffusion d'un solvant (espèce diffusante) dans un solide est donné par la loi de Fick (1855). Le gradient de concentration du solvant induit un flux  $\phi$  qui lui est proportionnel, c'est donc le moteur de la diffusion. La vitesse de diffusion est caractérisée par le coefficient de diffusion  $D$ . La première loi de Fick est donnée par l'équation (III.1) qui suit :

$$\phi = -Dg\vec{rad}C \quad \text{Où:}$$

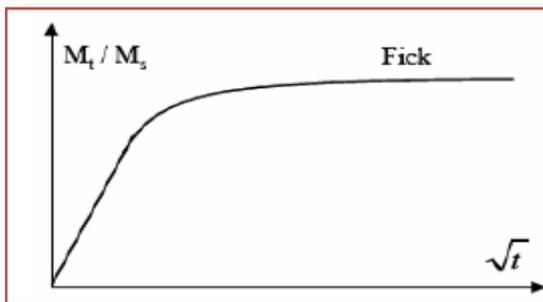
$D$  : coefficient de diffusion du milieu en  $mm^2/s$

$C$  : concentration du solvant au sein du milieu

Le signe négatif indique que le flux est dirigé des zones à concentration élevée vers celles à concentration plus faible. La seconde loi de Fick fait intervenir le temps. On considère que l'eau pénètre librement et sans interaction avec les composants. Elle combine la loi de conservation de la masse avec la première loi de Fick. La conservation de la masse est donnée par l'équation :

La seconde loi de Fick est donnée par l'équation

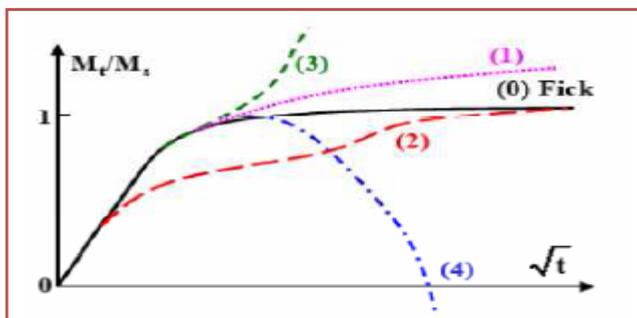
$$\frac{\partial C}{\partial t} = div(-D.g\vec{rad}C)$$



**Figure III.11 :** Courbe d'absorption Fickienne

### III.4.2 Diffusion non Fickienne :

L'évolution des cinétiques de sorption d'eau des polymères ou composites à matrice polymère présente dans de nombreuses circonstances des écarts par rapport au comportement Fickien, figure III.8. Dans certains cas, ces écarts prennent l'allure d'une déviation négative de la courbe de sorption (courbe 4, figure III.8). Ce phénomène résulte de l'élimination de matière due à l'hydrolyse de la résine, les microcavités formées sont aussitôt occupées par l'eau (pression osmotique) de plus faible densité que la résine. Des déviations positives (courbes 1, 2 et 3 de la figure III.8) peuvent également apparaître à partir de l'instauration d'un pseudo-palier de saturation (résines polyester), elles sont dues en particulier au fait que lors de l'hydrolyse, d'une résine polyester par exemple, chaque coupure se traduit par l'incorporation d'une molécule d'eau dans le réseau et par la formation de fonctions hydrophiles (alcool et acide) qui vont augmenter la quantité d'eau que va pouvoir absorber le réseau ( $\text{RCOOR}' + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{RCOOH} + \text{R}'\text{OH}$ )



**Figure III.12 :** Courbes schématiques représentatives de quatre catégories de cinétiques d'absorption d'eau non fickienne

- \_ La courbe (0) correspond au comportement Fickien.
- \_ La courbe (1), caractérisée par une augmentation continue de la prise de poids, correspond au cas « pseudo-fickien » couramment rencontré. L'équilibre n'est jamais atteint.
- \_ La courbe (2) représente une cinétique de type Langmuir.
- \_ Le cas (3) correspond à une accélération rapide de l'absorption d'eau, qui est généralement accompagnée de déformations importantes et d'endommagements au sein du matériau.
- \_ Enfin le cas (4) présente une perte de poids du matériau après une certaine durée de vieillissement. Ce cas de figure peut être attribué à des dégradations physiques ou chimiques ou à une hydrolyse du matériau. Des groupements chimiques peuvent être arrachés des chaînes polymères et évacués dans le solvant, ce qui explique la perte de matière et la baisse de la masse globale, malgré l'absorption d'eau.

### III.4.3. Mécanismes d'hydrophilie :

L'hydrophilie se caractérise en pratique par la teneur massique en eau que le matériau peut atteindre à l'équilibre dans un milieu isotherme et à taux hygrométrique constant. Dans la littérature, on trouve en général deux approches du mécanisme d'hydrophilie, qui peuvent être

combinées : l'approche « volumique » et l'approche mettant en jeu des interactions entre polymère et molécules d'eau grâce aux liaisons hydrogène. Au sein d'un stratifié verre/résine, l'eau peut pénétrer suivant différents mécanismes: diffusion à l'intérieur de la résine (par interaction ou dans le volume libre), diffusion dans les défauts présents dans la matrice (vides, porosités, fissures) ou capillarité le long de l'interface fibre/matrice. Vis à vis des chaînes macromoléculaires d'une résine thermodurcissable la molécule d'eau est petite. Elle a une forte tendance à former des liaisons hydrogène soit avec ses propres molécules soit avec d'autres groupes polaires. Au niveau chimique, l'absorption d'eau d'une résine sera alors fonction de la polarité de sa structure moléculaire, de son degré de réticulation ou de la présence d'espèces hydrophiles. Par ailleurs, la salinité de l'eau peut modifier la diffusion. Des essais réalisés pour comparer les cinétiques d'absorption en eau douce et en eau de mer ont montré que les essais en eau douce sont plus « agressifs » que ceux réalisés en eau de mer. De même des scientifiques ont, en effet, remarqué que la quantité d'eau absorbée à la saturation diminue lorsque la concentration en NaCl dans l'eau augmente. Cela s'explique par la formation de cluster « constitués de plusieurs molécules d'eau liées entre eux par des liaisons hydrogènes » dans l'eau salée dont le volume spécifique est supérieur à celui de l'eau libre. Autrement dit, l'eau distillée est un environnement plus sévère pour le vieillissement des composites à matrices organiques car les molécules d'eau diffusent plus librement. [21]

### **Conclusion :**

Au vu des recherches scientifiques il apparait que les travaux consacrés à l'étude de vieillissement hygrothermique qui ont été réalisées pour les composites sont peut, alors que ces dernier sont des matériaux qui connaissent un grand essor au niveau de notre pays.

C'est pourquoi, nous avons choisi, pour la présente étude, un composite à matrice polyester renforcé par des fibres de verre à fin d'étudier et de caractériser leur comportement mécanique et leur endommagement vis à vis les conditions et l'environnement imposés.

### IV.1 Introduction :

L'objectif envisagé dans cette partie est l'étude de comportement mécanique de différents matériaux composites (stratifiés) aux sollicitations statique par le biais des essais de flexion trois points, et physico-chimique (vieillessement dans l'eau de mer et l'eau distillée) et de voir leurs influence sur les propriétés mécaniques de ces matériaux.

### IV.2 Matériaux de l'étude :

Les matériaux composites utilisés dans cette étude, proviennent de l'entreprise ISELMAN (Ets. AMOKRANE Abdallah). Ils sont principalement destinés à la fabrication des bateaux de pêche et de plaisance. Les constituants de base de ces matériaux (résine : polyester et renfort : fibre de verre) sont des produits commerciaux de composition complexe.

Dans cette étude nous avons gardé la même stratification que celle utilisée par l'entreprise pour la réalisation des coques de bateaux 4,80 m (composée de quatre couches: mat 300, mat 450, taffetas 800 et mat 300) avec et sans gel coat.

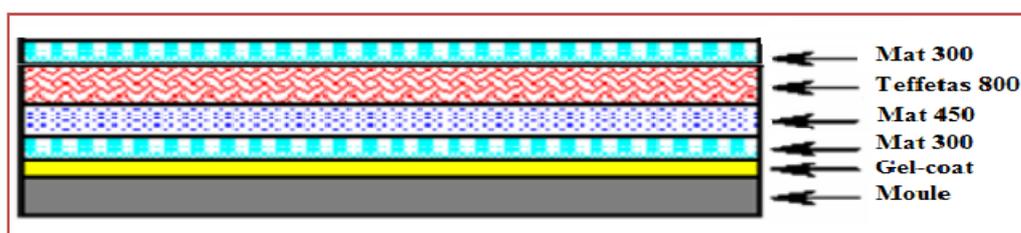


Figure IV.1 : Stratification utilisée par l'entreprise pour le bateau

#### IV. 2.1 Constituants des matériaux

##### ➤ Matrice

Nous avons utilisé une matrice synthétique en polyester insaturé thermodurcissable.

##### ➤ Renforts

Nous avons utilisé les fibres de verre type E, sous différentes architectures à savoir : mat 300, mat 450 et taffetas 800 (roving 800)



Figure IV.2 : Les différents renforts utilisés ; a) Mat 300g/m<sup>2</sup> ; b) Mat 450g/m<sup>2</sup>  
c) Taffetas 800g/m<sup>2</sup>

### IV.2.2 Procédé de mise en œuvre des matériaux :

Les plaques de stratifiés ayant servi au découpage des éprouvettes sont obtenues par le même procédé de fabrication que celui utilisé pour les bateaux de pêche, à savoir, le moulage au contact. Le procédé est manuel, il consiste à nettoyer d'abord le moule avec de la cire qui sert d'un agent de démoulage puis appliquer (ou ne pas appliquer) une couche colorée de gel-coat d'épaisseur  $(0,28 \pm 0,05)$  mm sur une plaque lisse et rigide à l'aide d'un pistolet. Après 12 heures environ, on procède à l'empilement des différentes couches imbibées de résine (mélangée à 3% du durcisseur) et les compactées manuellement à l'aide d'un rouleau d'ébulleur pour chasser les bulles d'air, jusqu'à obtention de la séquence désirée. Après conditionnement à température ambiante pendant 24 heures, les plaques sont démoulées et subissent par la suite une post-cuisson à température ambiante.

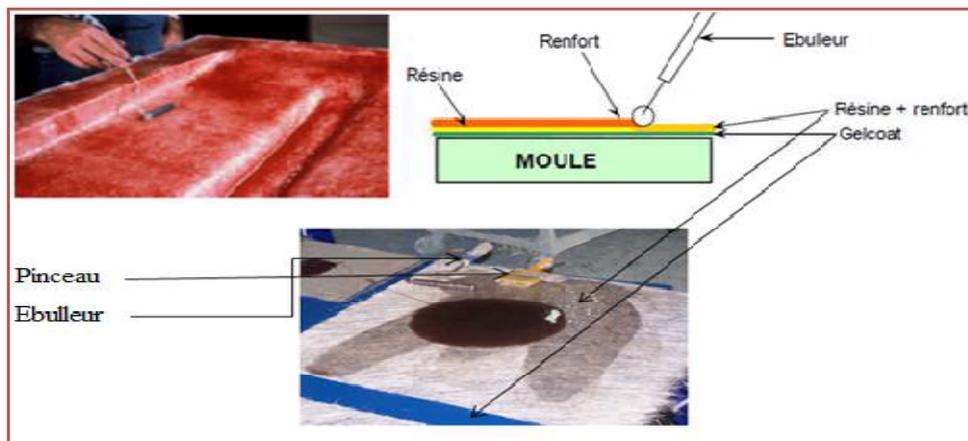


Figure IV.3 : Procédé de Moulage au contact

### IV.3 présentation des matériaux :

Nous allons utiliser dans cette étude plusieurs plaques stratifiés différents selon leurs ordre de plis que nous allons présenter dans le tableau suivant :

Lots	Ordre des plis
1	Gel-coat (300+450+800+300)
2	(300+450+800+300)
3	(300+300+300+300)
4	(450+450+450+450)
5	(800+800+800+800)

Tableau IV.1 : Différents lots d'éprouvettes d'essais

#### IV.3.1 Découpage des éprouvettes :

Les plaques élaboré en composite verre /polyester insaturé sont de dimensions  $(450 \times 450)$  mm<sup>2</sup>. Les éprouvettes sont découpées des plaques suscitées à l'aide d'une scie à disque diamanté sous un jet d'eau. Après la découpe, les éprouvettes sont nettoyées.



**Figure IV.4 :** Scie à disque diamanté

▪ **Géométrie des éprouvettes de flexion :**

Les dimensions des éprouvettes utilisées pour les essais de flexion trois points ont été choisies selon la norme NFT 51-120. C'est-à-dire :

$$l = 120 \text{ mm} \pm 1 \quad 13 < b \leq 15 \text{ mm pour } h \leq 4 \text{ mm}$$

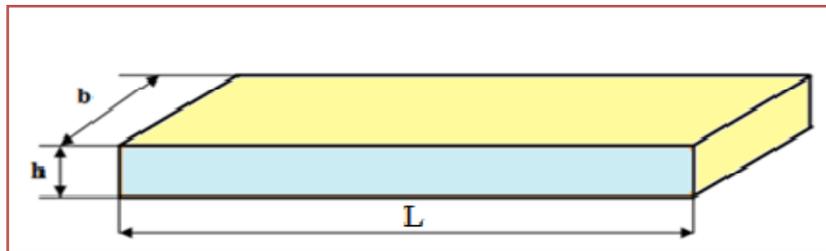
L: longueur de l'éprouvette;

b : largeur ;

h : épaisseur.

Les dimensions utilisées dans les calculs, sont les valeurs moyennes :

$$h_m = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 h_i \quad ; \quad b_m = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 b_i$$



**Figure IV.5 :** Géométrie des éprouvettes

**IV.4 Essais physico-chimiques :**

Dans cette section, nous allons étudier le comportement des matériaux élaborés sous les essais suivants:

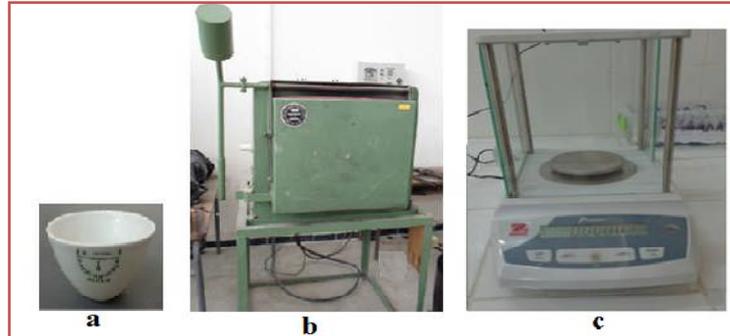
- 1) Essai de perte au feu (Calcination)
- 2) Essai de vieillissement dans différents milieux pendant des périodes de temps différentes :
  - Eau distillée. pendant : (un mois, deux mois, et trois mois)
  - Eau saline (eau de mer). pendant : (un mois, deux mois, et trois mois)

**IV.4.1 Essai de perte au feu (calcination) :**

Ce test permet de déterminer, pour un matériau composite, le taux de fibres en masse et celui de la résine et permet aussi de voir l'architecture des fibres de notre matériau utilisé.

#### IV.4.1.1 Matériel utilisé :

- ❖ Creuset en porcelaine pour mettre les échantillons de dans.
- ❖ Un four dont la température est réglé à 650° C.
- ❖ Une balance de précision.



**Figure IV.6 :** (a) Creuset en porcelaine, (b) Four, (c) balance de précision

#### IV.4.1.2. Principe de l'essai

Nous avons effectué des essais de perte au feu pour le lot dont la stratification est de (300+450+800+300). Les échantillons sont pesés à sec et placés dans des creusets préalablement pesés, le tout est placé dans un four dans lequel la température évolue de 25°C à 1100°C. L'essai est réalisé à 650°C, température pour laquelle la résine est entièrement calcinée (environ 20 mn), l'ensemble est alors mis dans le dessiccateur, nous le laissons refroidir pendant 10min. Les creusets et les fibres de verre sont pesés. Le taux massique de la matrice est calculé comme suit :

#### V.4.1.3 Déroulement de l'essai

Nous pesons à vide les creusets, en suite nous les pesons avec les échantillons et on les met dans un four réglé à une température suffisante pour la calcination entière de la résine, soit 650° C, pendant 20 min environ. Après calcination, il restera juste les fibres. Après le refroidissement, on fait la pesée des fibres restante dans chaque creuset.



**Figure IV.7 :** a) avant calcination, b) après calcination, c) échantillon avant et après calcination

Et cela nous permet de calculer toutes les fractions massiques des fibres et celle de la résine avec les lois suivantes :

$$Mf(\%) = \left(1 - \frac{Me - mf}{Me}\right) * 100 \quad (\text{IV.1})$$

$$Mm(\%) = \left(\frac{Me - mf}{Me}\right) * 100 \quad (\text{IV.2})$$

$Mf(\%)$  : Fractions massique de la fibre

$Me$ : Masse de l'échantillon avant calcination.

$mf$ : Masse des fibres.

$Mm(\%)$  : Fractions massique de la matrice  $Mm(\%) = 100 - Mf(\%) \quad (\text{IV.3})$

$Me$ = la masse de l'échantillon avec le creuset avant calcination - la masse du creuset à vide

$Mf$ = la masse de l'échantillon avec le creuset après calcination - la masse du creuset à vide

Les résultats obtenus après calcination sont représentés dans le tableau ci dessous :

Poids g	creuset I	creuset II	creuset III	creuset IV	moyenne
à vide	49,6067	52,4154	48,37967	55,17824	/
ave échantillon	54,02133	56,8672	52,85464	59,72302	
après calcination	51,44706	54,2804	50,22906	57,05762	
poids de l'échantillon	4,414627	4,45183	4,47497	4,54478	
poids de fibre	1,840357	1,86507	1,84939	1,87938	1,85854925
% MF	41,68771	41,8945	41,32743	41,3524967	41,5655234

**Tableau IV.2** : Résultats des essais de perte au feu pour lot 2

**IV.4.1.4 Calcule théorique:** on calcule théoriquement le taux de fibres dans le Lot « 2 »

(selon la dispersion des fibres sur les surface des échantillons).

Echantillon	S (mm <sup>2</sup> )	Taux de fibre(g/mm <sup>2</sup> )	Me (g)	% Mf
1	345,45	0,6390825	1,41961	45,018174
2	335,25	0,6202125	1,47919	41,9291977
3	329,5125	0,60959813	1,44617	42,152591
4	339,75	0,6285375	1,52882	41,1125901
5	321,21	0,5942385	1,41961	41,3574052
6	331,2	0,61272	1,47919	40,2084181
7	316,4625	0,58545563	1,44617	38,7662476
8	347,3	0,642505	1,52882	41,2541816
9	327,2975	0,60550038	1,41961	38,8594626
10	351,36	0,650016	1,47919	44,8664393
11	335,975	0,62155375	1,44617	40,9299313
12	332,775	0,61563375	1,52882	42,2091935
moyenne		0,61875447		41,5553193

**Tableau IV.3:** résultats du calcule théorique

#### IV.4.2 Essai de vieillissement dans différents milieux :

##### ➤ Conditions de vieillissement

Pour reproduire des conditions de vieillissement proches de celles rencontrées en utilisation réelle, un essai de vieillissement a été réalisé aux matériaux afin d'évaluer leurs comportements sous deux milieux agressifs : environnement marin (l'eau de mer) et (l'eau distillé).

Le mode de vieillissement que nous avons appliqué est basé sur les travaux réalisés et rapportés par les références [13]. Nous avons procédé par immersion des éprouvettes dans les deux milieux suscités, à une température ambiante.

##### ➤ Déroulement de l'essai :

Les échantillons que nous avons utilisé pour cette essai sont prélevés des lots : « lot 1 » et « lot 2 » dont les stratifications sont respectivement : « Gel-coat (300+450+800+300) » et « (300+450+800+300) » ces éprouvettes sont, tout d'abord, marquées, puis immergées dans les bacs d'eau de mer et d'eau distillée pour vieillir au cours des temps suivant des périodes d'un mois jusqu'à trois mois.

**Remarque :** nous avons remarqué un changement de la couleur des échantillons ces derniers ont perdus leurs aspect brillant et cela est due à la pénétration du solvant dans le composite.

#### IV.5 Essais mécaniques :

La détermination des caractéristiques mécaniques intrinsèques d'un quelconque matériau nécessite la pratique d'un certain nombre d'essai mécanique. Dans notre étude nous avons effectué des essais :

- Statique en flexion trois points pour tous les lots (1, 2, 3, 4, 5) sans vieillissement, en prenant considération le sens de la découpe (des échantillons dans le sens longitudinale (A) et d'autre dans le sens transversale (B)).

Et des essais de flexion pour les lots (1, 2) après vieillissement dans chaque période (après 1 mois, après 2 mois et après 3 mois).

##### IV.5.1 Essai statique en flexion trois points :

Nous intéressons à la détermination des propriétés mécaniques usuelles telles que le module d'élasticité ( $E$  apparent), la contrainte à la rupture ( $\sigma_r$ ) et la déformation à la rupture, ( $\epsilon_r$ ) la force maximale ( $P_r$ ), la flèche à la rupture ( $f_r$ ) ainsi qu'au profil du comportement du matériau.

### IV.5.2. Machine de flexion :

La machine IBERTEST est destinée à caractériser le comportement et par conséquent, en déduire les propriétés des matériaux en traction, compression, flexion et torsion. Ce modèle comprend :

- Un bâti d'essais pouvant mettre en œuvre une cellule de force maximale de 100 KN
- Une chaîne d'acquisition automatique permettant d'enregistrer le résultat de chaque essai, c'est-à-dire la charge ou force en fonction de l'allongement, ainsi qu'en fonction du temps.

La partie sensible de l'ensemble est constituée par le capteur de force appelé cellule qui mesure la force appliquée au spécimen. Cette force est appliquée sur les têtes de spécimens par l'intermédiaire de mâchoires auto serrantes, de manière à assurer une répartition homogène des contraintes dans la partie utile de spécimen. La charge est appliquée progressivement à la vitesse de chargement contrôlée et ce, jusqu'à la rupture



**Figure IV.8:** Machine de traction IBERTEST et le dispositif de flexion trois points

### IV.5.3. Résultats des essais de flexion trois points :

Pour une représentation plus cohérente des résultats des essais nous avons utilisé les formules de passage suivantes données par la théorie des poutres :

$$\sigma_{\max} = \frac{3PL}{2bh^2} \quad , \quad \varepsilon_{\max} = \frac{6hf}{L^2} \quad , \quad E_{\text{appa}} = \frac{L^3}{4bh^3} \frac{\Delta P}{\Delta Y} \quad (\text{IV.4})$$

$\sigma_{\max}$  : La contrainte normale maximale

$\varepsilon_{\max}$  : La déformation relative maximale

$f$  : flèche mesurée au cours de l'essai pour chaque charge.

Avec les conditions suivantes : élanement ( $e$ ) =  $20 \cdot h$  et la vitesse ( $v$ ) =  $h/2$

Dans les tableaux qui suivent nous présentons les dimensions des éprouvettes utilisées et les caractéristiques mécaniques intrinsèques.

lot1 non vieilli	pe N	fe mm	σe MPa	εe %	pr N	fr mm	σr MPa	εr %	E appa GPa
1-1p	138	11,8	113,15	0,03485	153	15,86	125,45	0,047	3,3039
1_2p	191	9,67	137,99	0,03037	255	15,04	184,23	0,047	4,7527
Moyenne	164,5	10,27	134,29	0,03822	204	15,45	178,2	0,047	4,0283

Tableau IV.4 : Caractéristiques mécaniques du « lot 1 » non vieillis en flexion

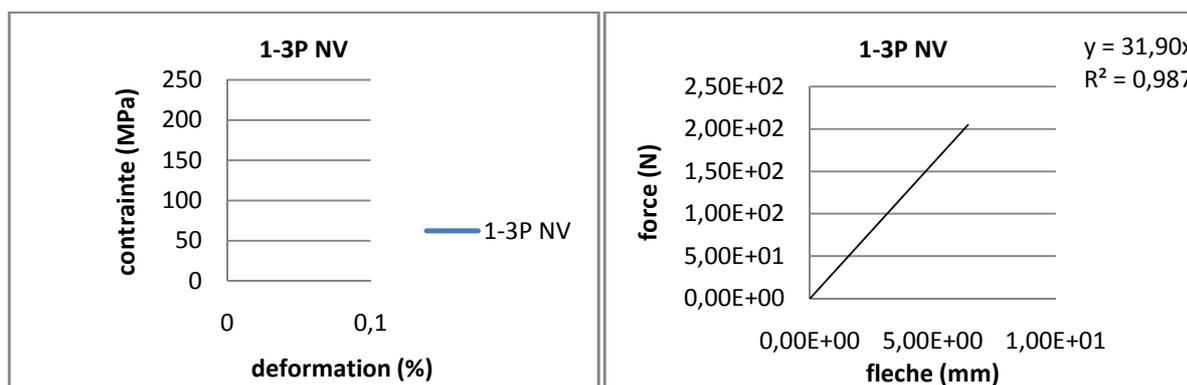


Figure IV.9 : Evolution contrainte / déformation de l'échantillon 1-3p non vieilli

lot 2 non vieilli (sens A)	pe N	fe mm	σe MPa	εe %	pr N	fr mm	σr MPa	εr %	E appa GPa
2A-1	155	8,06	144,41	0,02237	205	14,94	191	0,041	6,4531
2A-2	80	4,87	90,462	0,01237	142	13,6	160,57	0,035	7,2414
2A-3	142	6,03	98,665	0,01922	221	12,73	153,56	0,041	5,3428
2A-4	143	8,89	148,1	0,0235	197	14,85	204,03	0,039	6,2522
moyenne	130	6,963	120,41	0,01937	191,3	14,03	177,29	0,039	6,3224

Tableau IV.5 : Caractéristiques mécaniques du « lot 2(sens A) » non vieillis en flexion

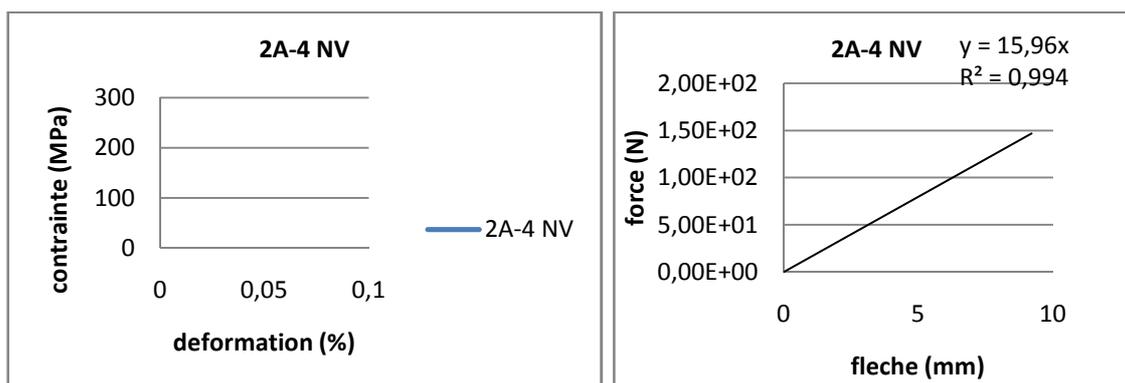


Figure IV.10 : Evolution contrainte / déformation de l'échantillon 2A-4 non vieilli

lot 2 non vieilli (sens B)	pe N	fe mm	σe MPa	εe %	pr N	fr mm	σr MPa	εr %	E appa GPa
2B-1	118	5,42	80,06	0,0175	198	12,3	134,3	0,04	4,850
2B-3	147	6,27	104,5	0,0198	205	11,7	145,8	0,04	5,959
2B-4	150	7,48	138,6	0,0208	202	12,3	186,7	0,03	7,160
moyenne	137	6,68	108,1	0,0201	194	12,1	151,6	0,04	5,989

Tableau IV.6 : Caractéristiques mécaniques du « lot 2(sens B) » non vieillis en flexion

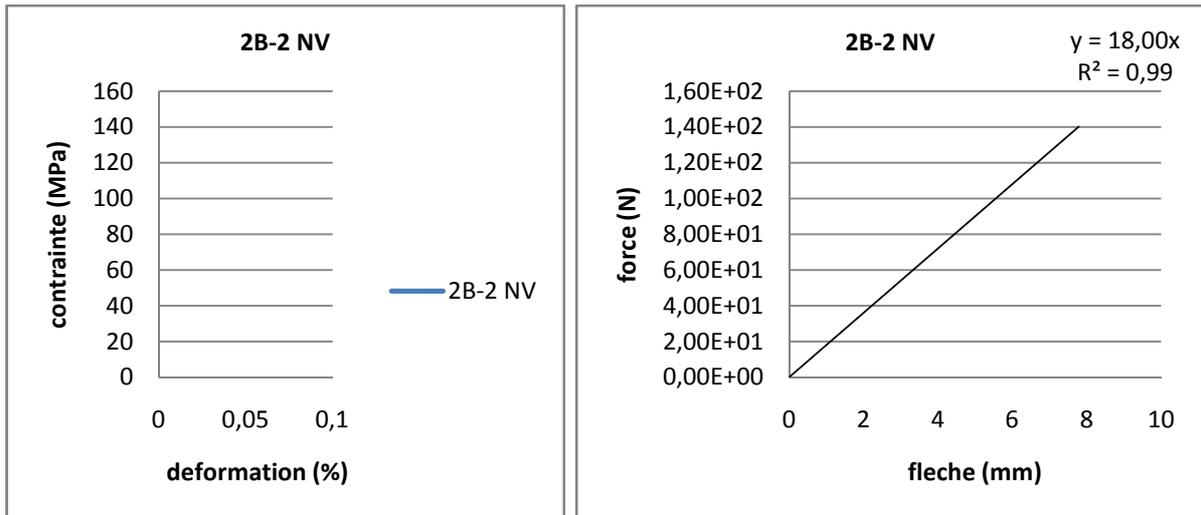


Figure IV.11 : Evolution contrainte / déformation de l'échantillon 2B-2 non vieilli

lot 3 non vieilli (sens A)	pe N	fe mm	$\sigma_e$ MPa	$\epsilon_e$ %	pr N	fr mm	$\sigma_r$ MPa	$\epsilon_r$ %	E appa GPa
3A-1	122	10,14	74,479	0,03441	145	14,28	88,52	0,048	2,165
3A-2	127	7,18	88,121	0,02309	196	16,3	136	0,052	3,830
3A-3	133	7,6	72,071	0,02743	173	13,63	93,747	0,049	2,813
3A-4	171	11,8	90,998	0,04325	189	14,38	100,58	0,053	2,121
moyenne	138,3	9,18	81,417	0,03205	175,8	14,65	104,71	0,051	2,732

Tableau IV.7 : Caractéristiques mécaniques du « lot 3(sens A) » non vieillis en flexion

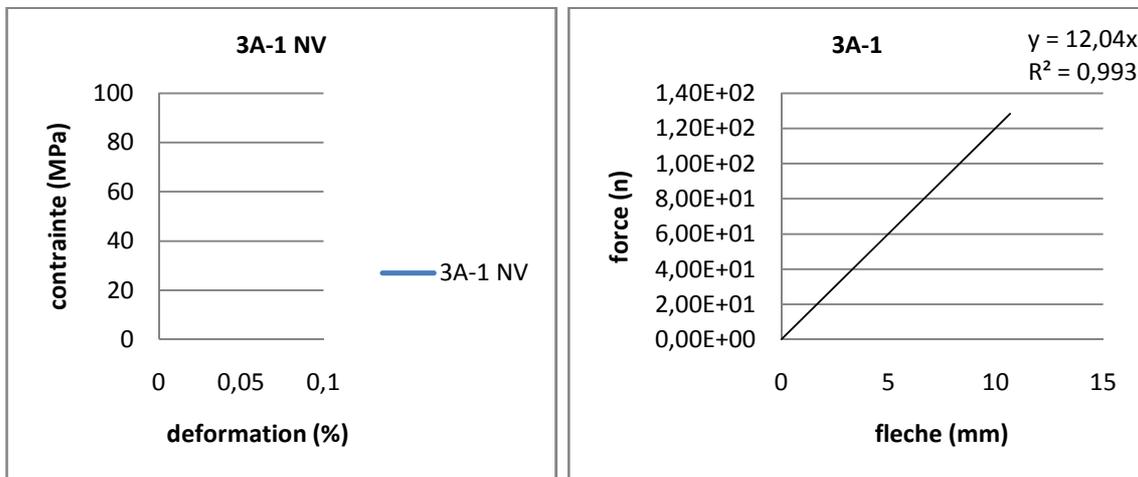


Figure IV.12 : Evolution contrainte / déformation de l'échantillon 3A-1 non vieilli

lot 3 non vieilli (sens B)	pe N	fe mm	$\sigma_e$ MPa	$\epsilon_e$ %	pr N	fr mm	$\sigma_r$ MPa	$\epsilon_r$ %	E appa GPa
3B-1	171	7,8	108,75	0,02633	230	11,99	146,27	0,04	4,177
3B-2	100	7,392	59,674	0,02571	153	14,38	91,301	0,05	2,443
3B-4	141	8,74	98,609	0,02802	157,6	12,38	110,22	0,04	3,710
moyenne	137,3	7,977	89,009	0,02669	180,2	12,92	115,93	0,043	3,443

Tableau IV.8: Caractéristiques mécaniques du « lot 3(sens B) » non vieillis en flexion

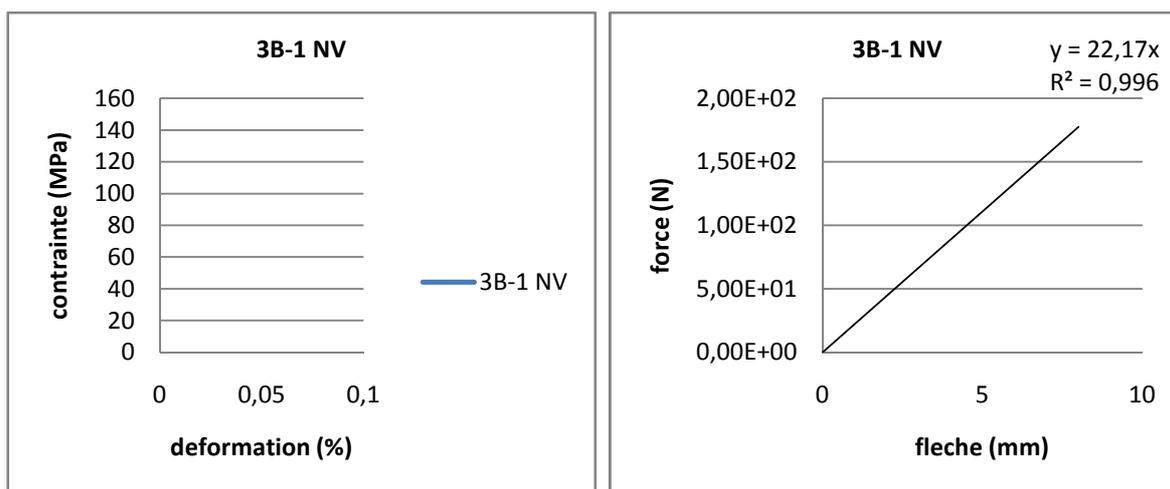


Figure IV.13 : Evolution contrainte / déformation de l'échantillon 3B-1 non vieillie

lot 4 non vieillie (sens A)	pe N	fe mm	$\sigma_e$ MPa	$\epsilon_e$ %	pr N	fr mm	$\sigma_r$ MPa	$\epsilon_r$ %	E appa GPa
4A-1	246	6,49	102,81	0,02708	295	8,022	123,29	0,033	3,903
4A-2	245	6,99	98,192	0,03014	273	7,85	109,41	0,034	3,503
4A-3	245	6,25	102,18	0,02619	317	7,581	132,21	0,032	4,825
4A-4	338	7,47	132,1	0,03256	354	7,901	138,35	0,034	4,151
moyenne	268,5	6,8	108,82	0,02899	309,8	7,839	125,82	0,033	4,096

Tableau IV.9: Caractéristiques mécaniques du « lot 4(sens A) » non vieillis en flexion

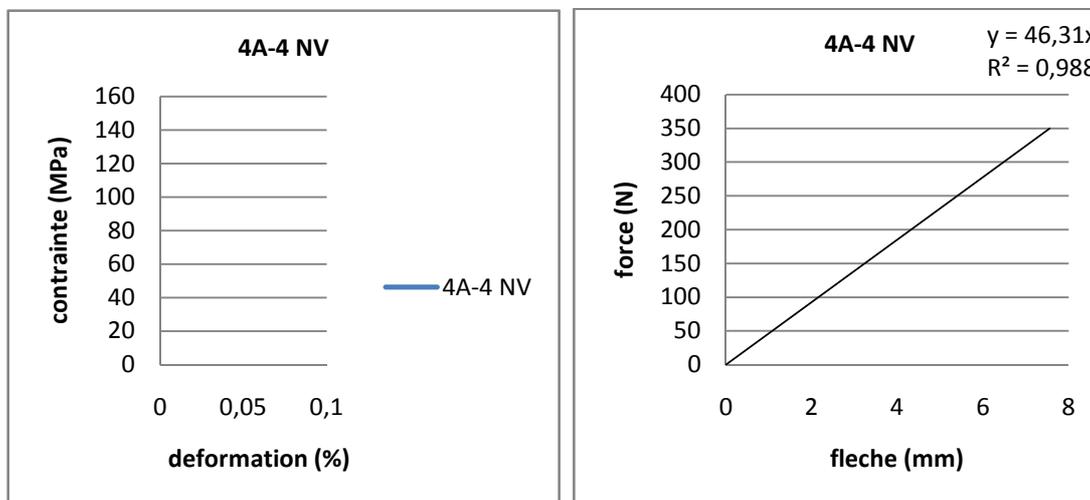


Figure IV.15: Evolution contrainte / déformation de l'échantillon 4A-4 non vieillie

lot 4 non vieilli (sens B)	pe N	fe mm	$\sigma_e$ MPa	$\epsilon_e$ %	pr N	fr mm	$\sigma_r$ MPa	$\epsilon_r$ %	E appa GPa
4B-1	212	5,68	102,93	0,02194	292	8,76	141,78	0,034	4,632
4B-2	290	7,24	131,78	0,02885	336	8,91	152,68	0,036	4,637
4B-3	274	8,31	123,35	0,03358	309	9,87	139,1	0,04	3,783
4B-4	315	7,51	144,39	0,02971	344	8,17	157,69	0,032	4,950
moyenne	272,8	7,185	125,61	0,02852	320,3	8,928	147,81	0,035	4,501

Tableau IV.14: Caractéristiques mécaniques du « lot 4(sens B) » non vieillis en flexion

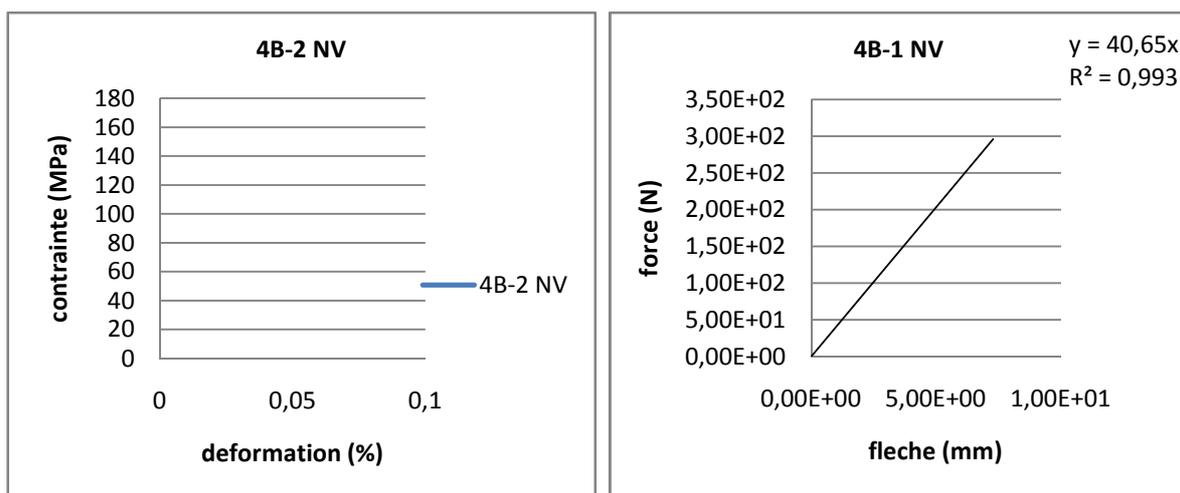


Figure IV.15: Evolution contrainte / déformation de l'échantillon 4B-1 non vieillie

lot 5 non vieillie (sens A)	pe N	fe mm	$\sigma_e$ MPa	$\epsilon_e$ %	pr N	fr mm	$\sigma_r$ MPa	$\epsilon_r$ %	E appa GPa
5A-1	349	7,26	274,49	0,02178	366	8,164	287,86	0,024	12,752
5A-2	342	5,77	266,67	0,01758	514	11,73	400,79	0,036	15,127
5A-3	358	5,8	247,39	0,01838	383	6,14	264,67	0,019	13,824
5A-4	328	5,33	232,32	0,01704	416	11,1	294,65	0,035	13,836
moyenne	344,3	6,04	255,22	0,01869	419,8	9,284	311,99	0,029	13,885

Tableau IV.11: Caractéristiques mécaniques du « lot 5(sens A)» non vieillis en flexion

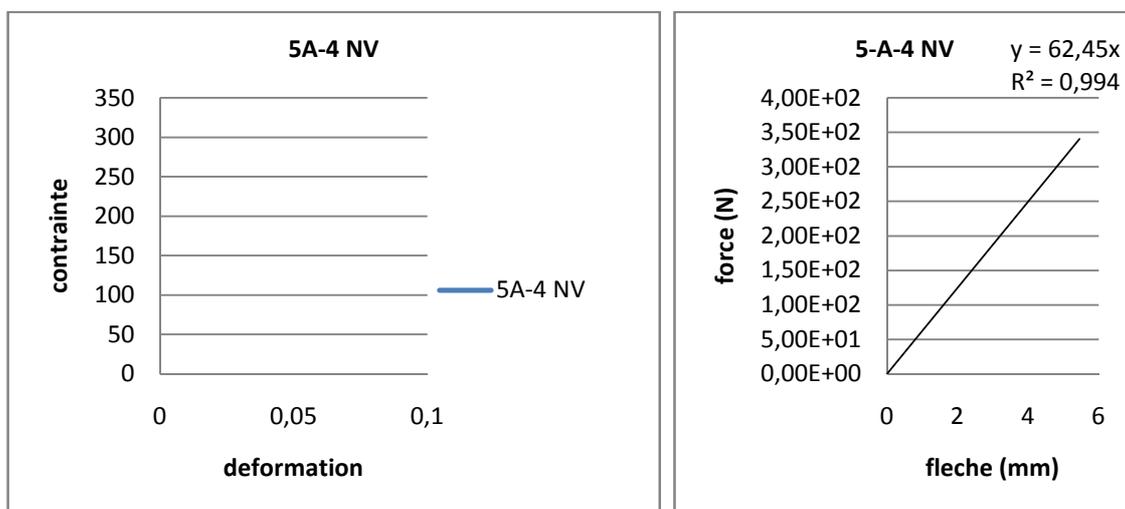


Figure IV.16: Evolution contrainte / déformation de l'échantillon 5A-4 non vieillie

lot 5 non vieilli (sens B)	pe N	fe mm	$\sigma_e$ MPa	$\epsilon_e$ %	pr N	fr mm	$\sigma_r$ MPa	$\epsilon_r$ %	E appa GPa
5B-1	297	5,31	240,9	0,0157	357	6,36	289,6	0,02	15,192
5B-2	252	5,3	199,3	0,0158	229	6,84	181,1	0,02	15,054
5B-3	358	6,12	293,3	0,018	355	6,04	290,9	0,02	16,370
5B-4	314	5,35	248,1	0,0157	343	6,05	271,1	0,02	15,940
moyenne	305	5,52	245,4	0,0163	321	6,32	258,1	0,02	15,639

Tableau IV.12: Caractéristiques mécaniques du « lot 5(sens B)» non vieillis en flexion

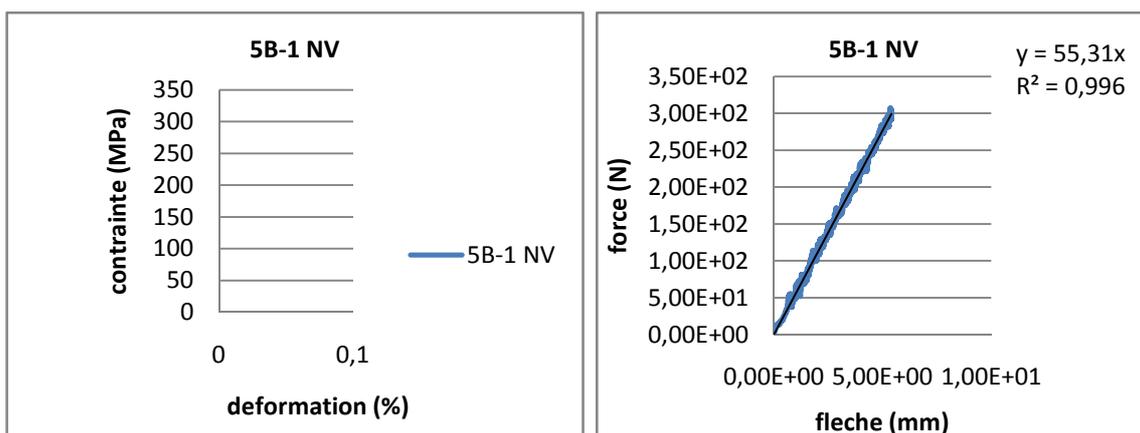


Figure IV.17: Evolution contrainte / déformation de l'échantillon 5B-1 non vieilli

lot 2 vieilli 1 mois dans l'eau de mer	pe N	fe mm	σe MPa	εe %	pr N	fr mm	σr MPa	εr %	E appa GPa
2A-5	181	9,76	162,53	0,02718	191	10,67	171,51	0,03	5,892
2A-6	163	7,63	140,76	0,02217	197	10,8	170,12	0,031	6,124
2A-8	175	9,95	174,15	0,02677	201	13,4	200,02	0,036	6,287
moyenne	173	9,11	159,14	0,02565	196,3	11,41	191,27	0,032	6,101

Tableau IV.13: Caractéristiques mécaniques du « lot2 vieilli 1 mois dans l'eau de mer » en flexion

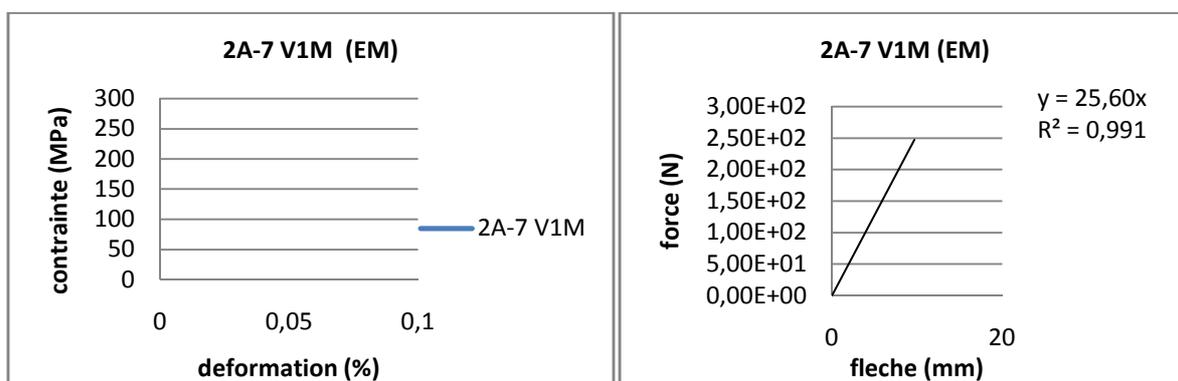
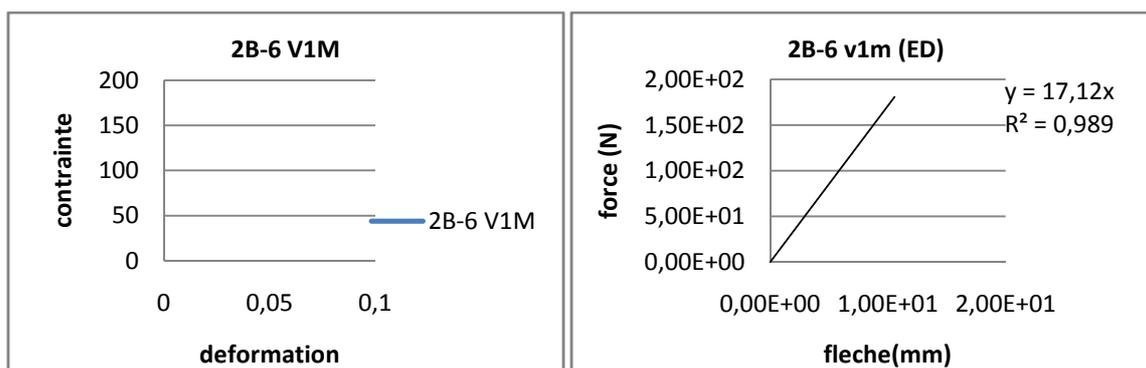


Figure IV.18: Evolution contrainte / déformation de l'échantillon 2A-7 vieilli 1 mois dans l'eau de mer

lot 2 vieilli 1 mois dans l'eau distillée	pe N	fe mm	σe MPa	εe %	pr N	fr mm	σr MPa	εr %	E appa GPa
2B-5	213	10,83	127,24	0,03655	222	11,35	132,62	0,038	3,373
2B-6	180	10,2	166,46	0,02831	195	11,6	180,33	0,032	5,772
2B-7	213	10,41	153,06	0,0324	219	10,5	157,38	0,033	4,698
moyenne	202	10,46	135,81	0,03385	212	10,15	156,88	0,035	4,614

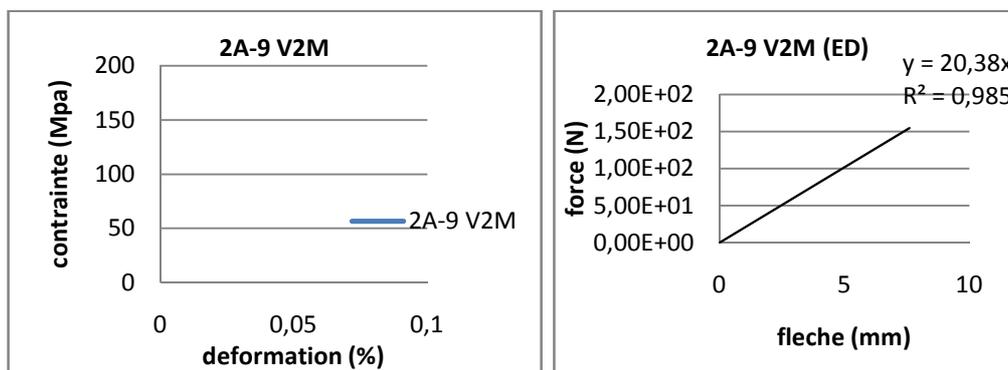
Tableau IV.14: Caractéristiques mécaniques du « lot2 vieilli 1 mois dans l'eau distillée » en flexion



**Figure IV.19:** Evolution contrainte / déformation de l'échantillon 2B-6 vieilli 1 mois dans l'eau distillée

lot 2 vieilli 2 mois dans l'eau de mer	pe N	fe mm	$\sigma_e$ MPa	$\epsilon_e$ %	pr N	fr mm	$\sigma_r$ MPa	$\epsilon_r$ %	E appa GPa
2A-9	150	7,46	116,41	0,02238	195	11,59	151,33	0,035	5,272
2A-10	130	10,29	131,4	0,0274	142	11,43	143,52	0,03	4,859
2A-11	156	8,32	122,53	0,02496	177	11,4	139,02	0,034	4,935
2A-12	138	9,22	116,64	0,02714	162	12,1	136,92	0,036	4,387
<b>moyenne</b>	<b>143,5</b>	<b>8,823</b>	<b>121,74</b>	<b>0,02547</b>	<b>169</b>	<b>11,63</b>	<b>142,7</b>	<b>0,034</b>	<b>4,863</b>

**Tableau IV.15:** Caractéristiques mécaniques du « lot2 vieilli 2 mois dans l'eau de mer » en flexion



**Figure IV.20:** Evolution contrainte / déformation de l'échantillon 2A-9 vieilli 2 mois dans l'eau de mer

lot 2 vieilli 2 mois dans l'eau distillée	pe N	fe mm	$\sigma_e$ MPa	$\epsilon_e$ %	pr N	fr mm	$\sigma_r$ MPa	$\epsilon_r$ %	E appa GPa
2B-9	163	8,55	106,96	0,02789	195	11,59	127,96	0,038	3,920
2B-11	158	7,69	115,14	0,02357	201	10,66	146,47	0,033	5,091
2B-12	148	10,3	118,55	0,0309	154	11,3	123,36	0,034	3,804
<b>moyenne</b>	<b>156</b>	<b>8,475</b>	<b>113,55</b>	<b>0,02546</b>	<b>183,3</b>	<b>11,42</b>	<b>150,45</b>	<b>0,035</b>	<b>4,272</b>

**Tableau IV.16:** Caractéristiques mécaniques du « lot2 vieilli 2 mois dans l'eau distillée » en flexion

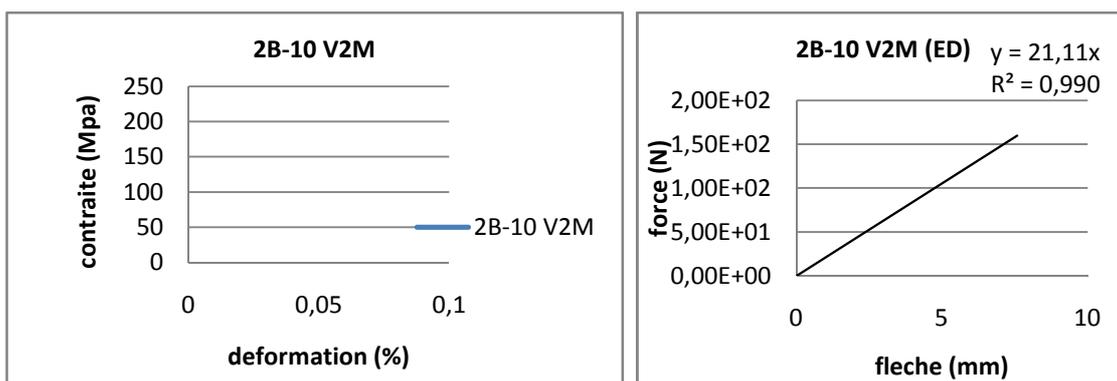


Figure IV.21: Evolution contrainte / déformation de l'échantillon 2B-10 vieilli 2 mois dans l'eau distillé

lot 1vieilli 2mois (EM)	pe N	fe mm	σe MPa	εe %	pr N	fr mm	σr MPa	εr %	E appa GPa
1A-1	251	9,02	169,2	0,0288	311	15,3	209,6	0,05	5,942
1A-2	235	7,53	76,62	0,0254	329	15,2	214,5	0,05	5,985
1A-3	194	6,24	117,4	0,0211	271	15,3	164	0,05	5,672
1A-4	147	4,73	83,67	0,0164	269	10,6	153,1	0,04	4,433
moyenne	207	6,88	111,7	0,0229	295	14,1	185,3	0,05	5,508

Tableau IV.17: Caractéristiques mécaniques du « lot1 vieilli 2 mois dans l'eau de mer » en flexion

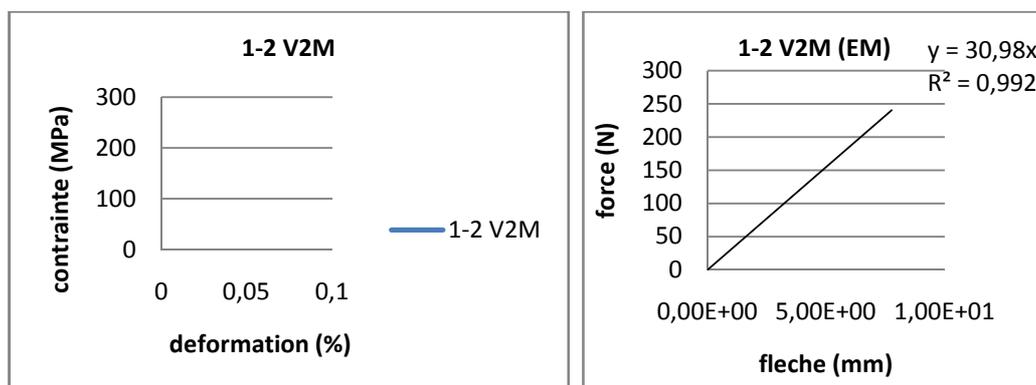


Figure IV.22: Evolution contrainte / déformation de l'échantillon 1A-2 vieilli 2 mois dans l'eau de mer

Lot2 vieilli 3Mois dans l'eau de mer	pe N	fe mm	σe MPa	εe %	pr N	fr mm	σr MPa	εr	E appa GPa
2A-15	117	5,55	93,71	0,0164	163	9,32	130,5	0,03	5,538
2A-14	95	6,9	67,78	0,022	134	10,3	95,6	0,03	3,252
2A-13	116	6,75	59,82	0,0247	163	11,3	84,05	0,04	2,470
Moyenne	109	6,4	73,77	0,021	153	10,3	103,4	0,03	3,753

Tableau IV.18: Caractéristiques mécaniques du « lot2 vieilli 3 mois dans l'eau de mer » en flexion

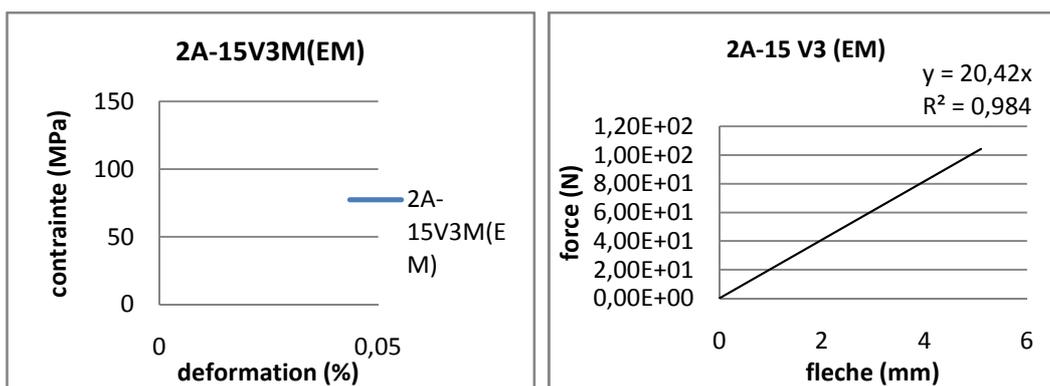


Figure IV.23: Evolution contrainte / déformation de l'échantillon 2A-15 vieilli 3 mois dans l'eau de mer

Lot2 vieilli 3Mois dans l'eau distillée	pe N	fe mm	σe MPa	εe %	pr N	fr mm	σr MPa	εr %	E appa GPa
2B-16	88,7	7,35	81,537	0,02053	133	11,11	122,26	0,031	4,017
2B-15	131	5,97	88,858	0,01925	162	8,31	109,88	0,027	4,271
2B-14	122	8,77	124,01	0,02327	140	11,63	142,31	0,031	4,873
2B-13	142	8,45	98,881	0,02701	190	12,4	132,31	0,04	4,103
Moyenne	120,9	7,635	98,322	0,02252	156,3	10,86	126,69	0,032	4,316

Tableau IV.19: Caractéristiques mécaniques du « lot2 vieilli 3 mois dans l'eau distillée » en flexion

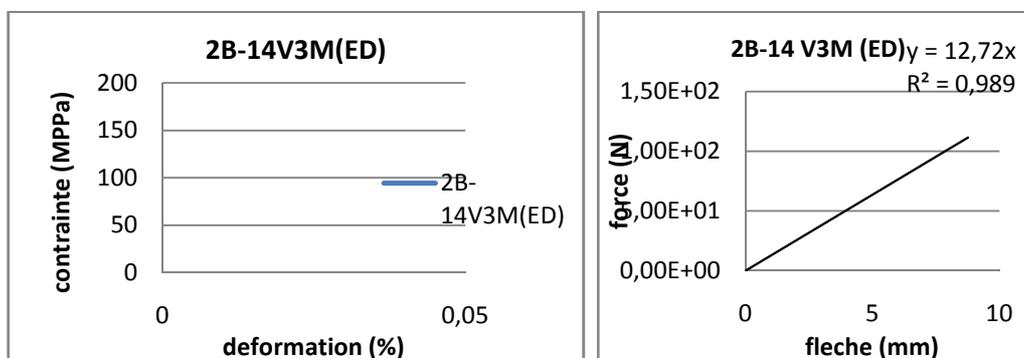
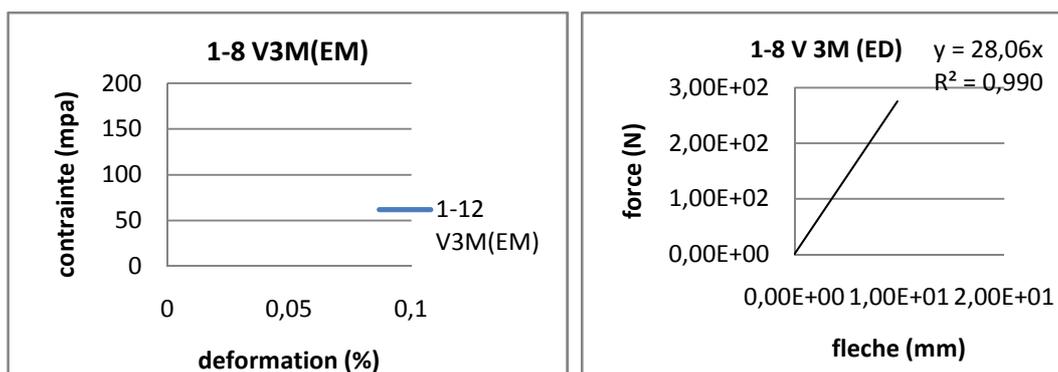


Figure IV.24: Evolution contrainte / déformation de l'échantillon 2B-14 vieilli 3 mois dans l'eau distillée

lot 1 vieilli 3mois dans l'eau de mer	pe N	fe mm	σe MPa	εe %	pr N	fr mm	σr MPa	εr %	E appa GPa
1A-9	208	8,99	99,653	0,03456	250	12,97	119,78	0,05	11,667
1A-8	360	6,84	160,91	0,02693	386	11,5	172,53	0,045	12,651
1A-7	254	7,32	113,53	0,02882	314	11,8	140,35	0,046	12,232
1A-6	270	9,69	120,68	0,03815	401	9,6	179,23	0,038	12,872
moyenne	273	8,21	123,69	0,03212	337,8	11,47	152,97	0,045	12,106

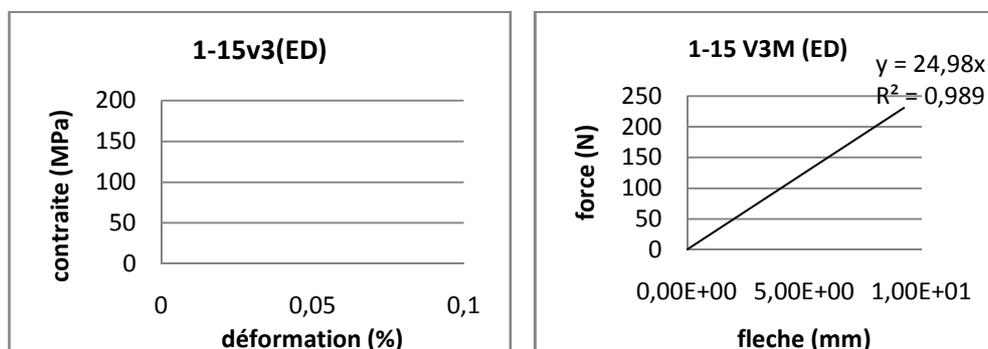
Tableau IV.20: Caractéristiques mécaniques du « lot1 vieilli 3 mois dans l'eau de mer » en flexion



**Figure IV.25:** Evolution contrainte / déformation de l'échantillon 1A-8 vieilli 3 mois dans l'eau de mer

lot 1 vieilli 3mois dans l'eau distillée	pe N	fe mm	σe MPa	εe %	pr N	fr mm	σr MPa	εr %	E appa GPa
1B-16	300	7,87	154,96	0,02914	353	10,4	182,33	0,039	17,508
1B-15	219	8,92	127,13	0,03094	271	2,98	157,32	0,01	16,722
1B-14	229	8,96	125,2	0,03192	273	12,64	149,26	0,045	16,114
1B-13	264	10,52	151,55	0,03649	279	12,84	160,16	0,045	17,012
moyenne	253	9,068	139,71	0,03212	294	9,715	162,27	0,035	17,839

**Tableau IV.21:** Caractéristiques mécaniques du « lot1 vieilli 3 mois dans l'eau distillée » en flexion



**Figure IV.26:** Evolution contrainte / déformation de l'échantillon 1B-15 vieilli 3 mois dans l'eau distillé

**IV.6. Analyse et comparaison des résultats de flexion trois points :**

Toutes les éprouvettes présentent un comportement similaire pour le même lot avec une dispersion des caractéristiques mécaniques, ceci est dû principalement à l'existence de défauts (bulles d'air) et au procédé d'obtention des matériaux (moulage au contact).

Nous relevons selon les courbes contrainte /déformation que la majorité des lots présentent un comportement ductile. Néanmoins d'autres présentent un comportement fragile.

La discussion des résultats est présentée dans les figures suivantes avec comparaisons :

1. Comparaison des caractéristiques suivant la dispersion des fibres et le sens de la découpe :

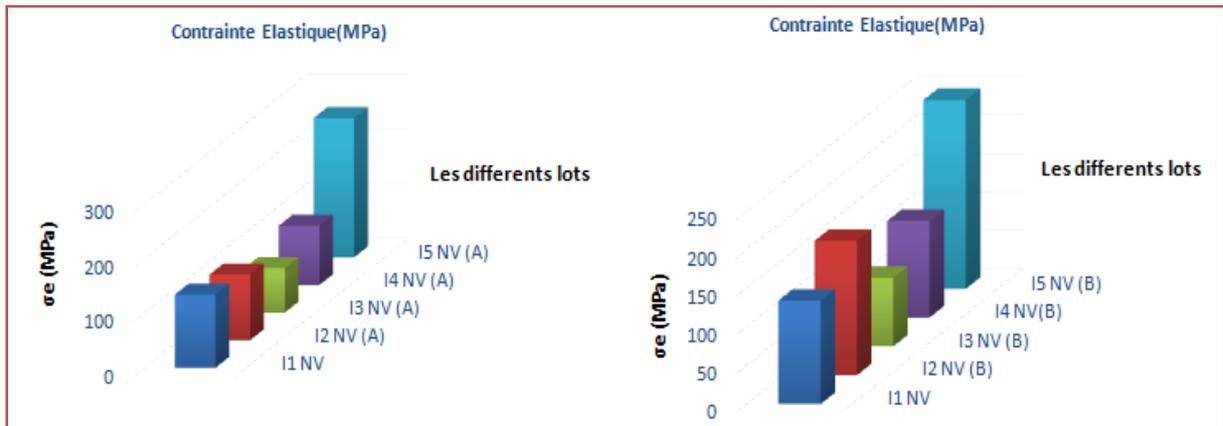


Figure IV.27 : histogramme des résultats de  $\sigma_e$  obtenus pour les lots (1,2,3,4,5) non vieillis découpés dans les sens longitudinale (A) et transversale .

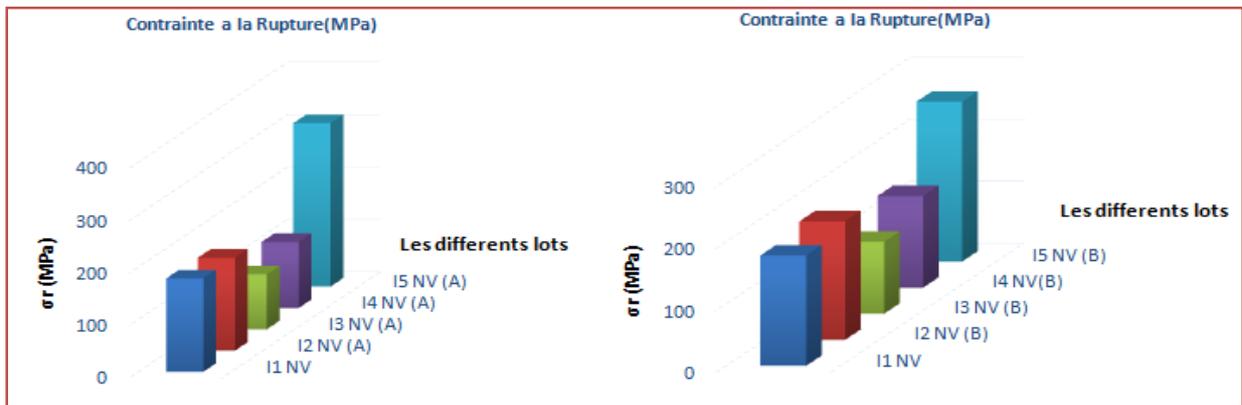


Figure IV.28 : histogramme des résultats de  $\sigma_r$  obtenus pour les lots (1, 2, 3, 4, 5) non vieillis découpés dans les sens longitudinale(A) et transversale (B).

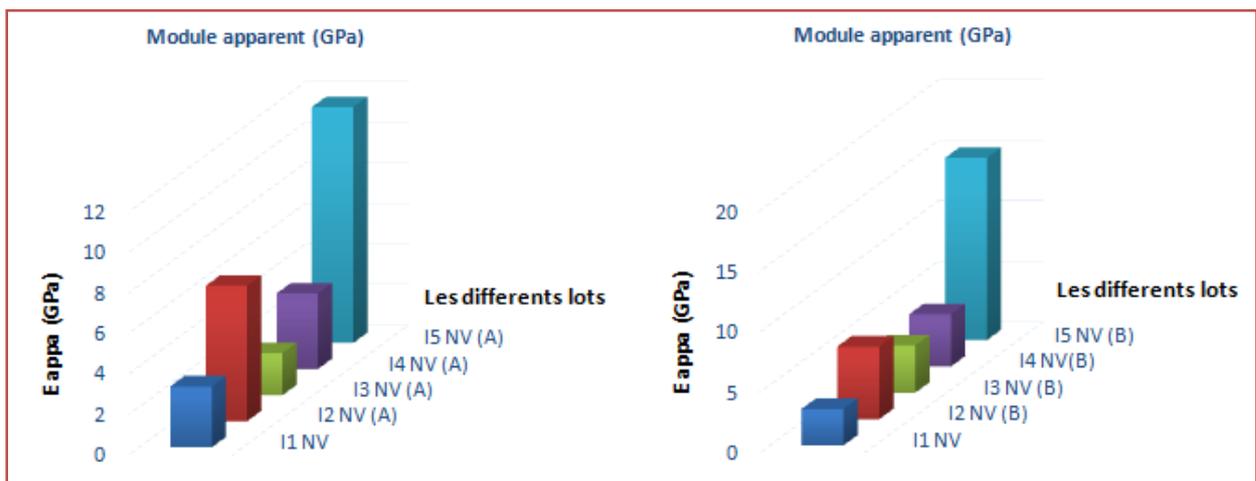
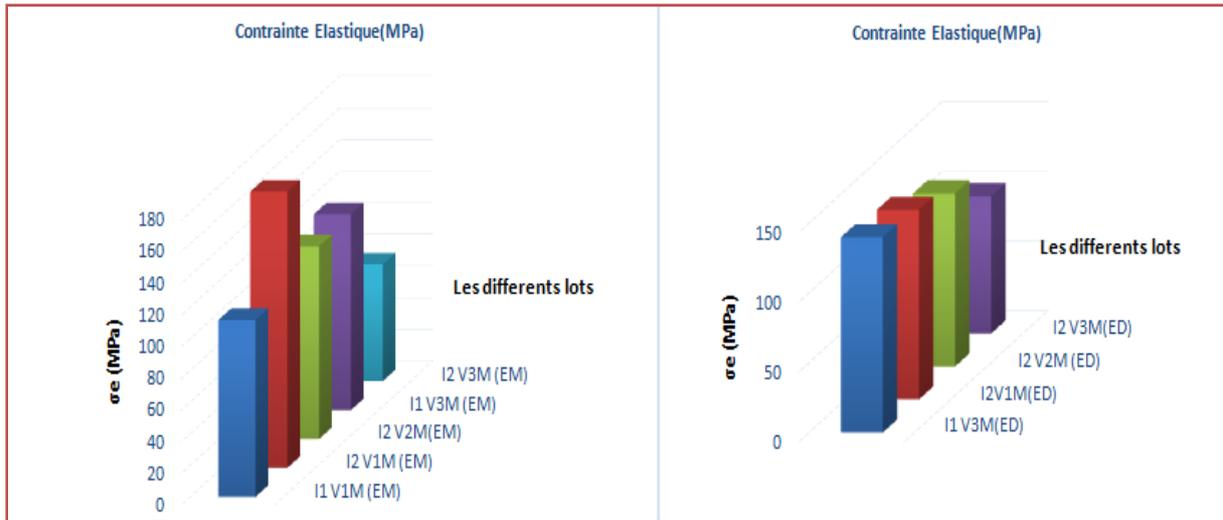


Figure IV.29 : histogramme des résultats de  $E_{appa}$  obtenus pour les lots (1, 2, 3, 4, 5) non vieillis découpés dans les sens longitudinale (A) et transversale (B).

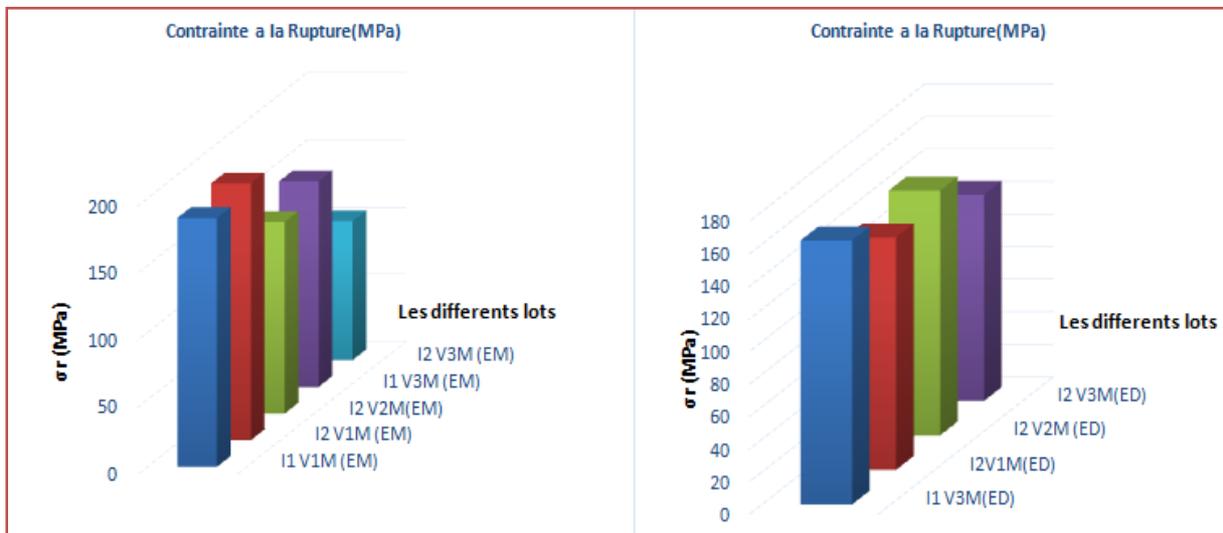
à partir de ces figures nous constatons que le lot 5 représente de meilleures caractéristiques mécaniques que les autres, outre le lot 3 ne possède pas de bonne propriétés comparé aux autres. Cependant nous remarquons que le sens de la découpe influe sur la résistance des éprouvettes ou nous relevons que les échantillons résiste mieux lorsque ces dernier sont découpés longitudinalement.

**2. Comparaison des caractéristiques suivant le temps de vieillissement :**

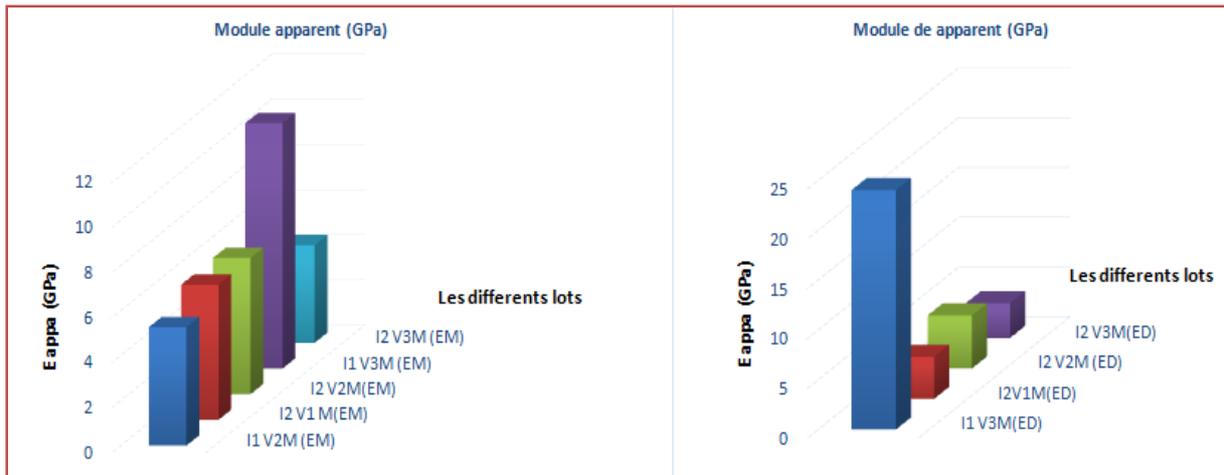
Les résultats obtenus pour les éprouvette prélevés après vieillissement sont discutés dans les figures suivantes :



**Figure IV.30 :** histogramme des résultats de  $\sigma_e$  obtenus pour les lots (1 et 2) vieillis dans l'eau de mer et l'eau distillée



**Figure IV.31 :** histogramme des résultats de  $\sigma_r$  obtenus pour les lots (1 et 2) vieillis dans l'eau de mer et l'eau distillée



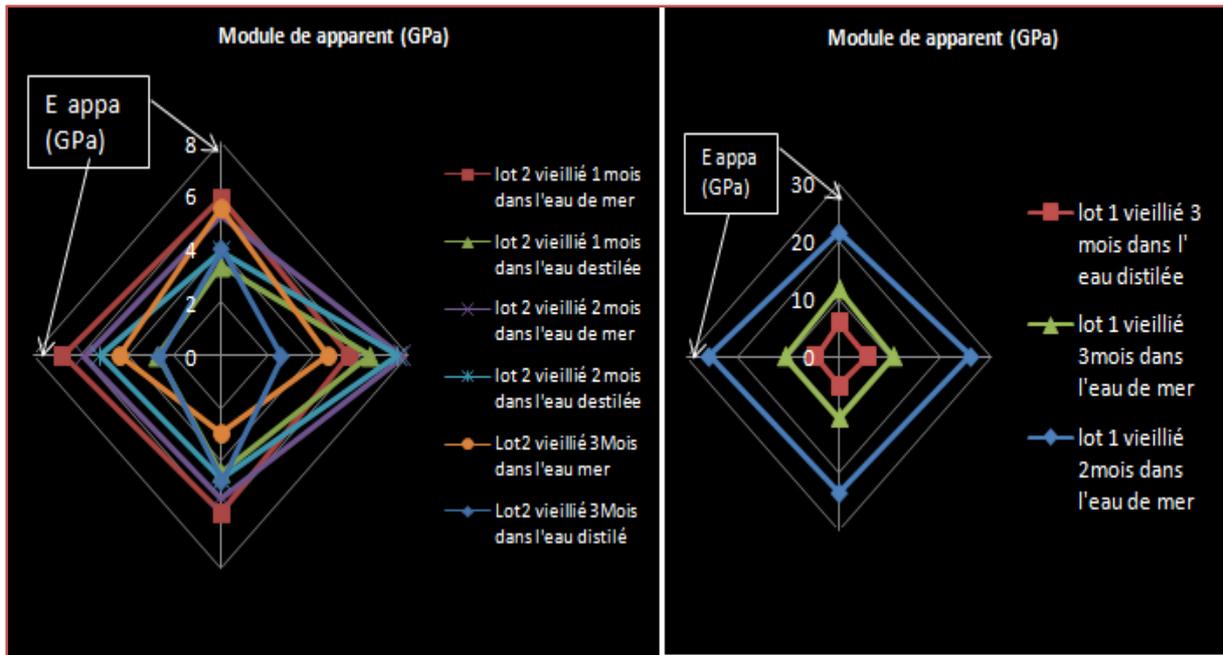
**Figure IV.32 :** histogramme des résultats de  $E_{appa}$  obtenus pour les lots (1 et 2) vieillis dans l'eau de mer et l'eau distillée

Les figures (IV.31, IV.32, et IV.33) montrent l'évolution des résultats obtenus des caractéristiques mécaniques des éprouvettes vieillis aux cours du temps dans les milieux agressifs et la nous constatons une diminution de la contrainte élastique et la contrainte à rupture pour le lot 2.

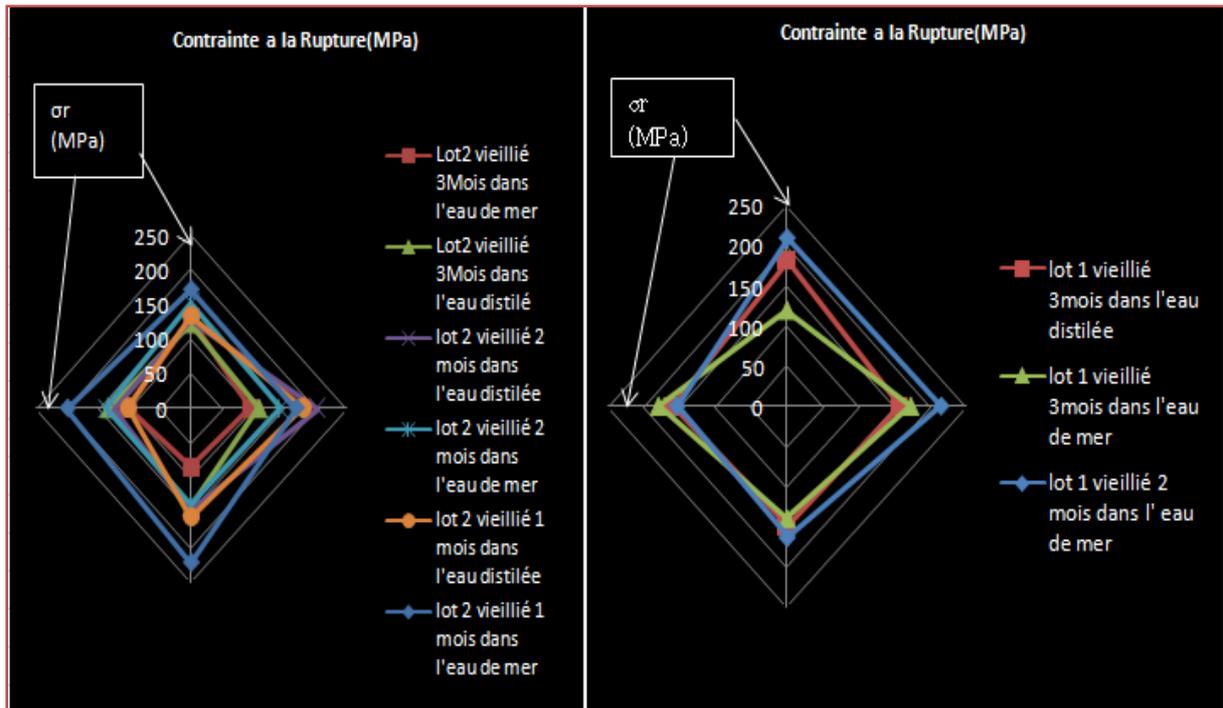
Néanmoins nous observons une diminution du module apparent pour le lot 2 vieilli dans l'eau distillée mais nous remarquons une dispersion dans les résultats obtenus pour le vieillissement dans l'eau de mer ceci est dû principalement à l'existence de défauts (bulles d'air) et au procédé d'obtention des matériaux (moulage au contact). Par ailleurs le lot 1 possède des propriétés meilleures que celle du lot 2 et ça provient de la couche du gel coat que ce lot a de plus cette dernière empêche la pénétration de l'eau aux seins du composite et ça ralenti son vieillissement

### 3. La comparaison des résultats selon les milieux du vieillissement :

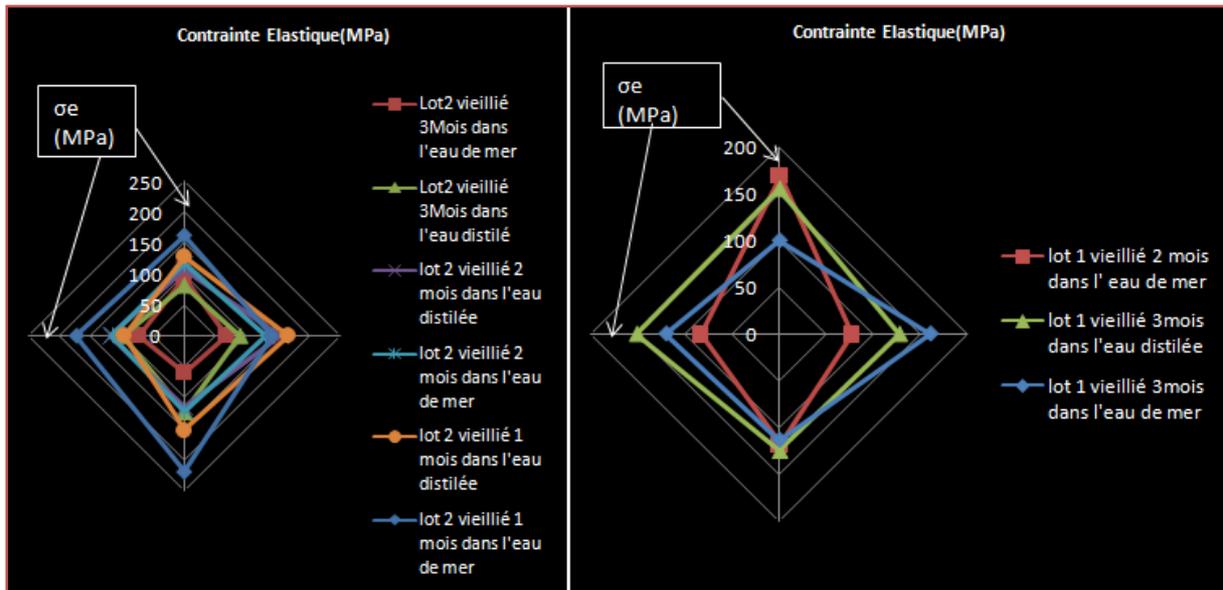
La comparaison des ces résultats selon les milieux du vieillissement nous représenterons par les figures suivantes :



**Figure IV.33 :** comparaison des résultats obtenus du module apparent du vieillissement dans l'eu de mer et l'eau distillée



**Figure IV.34 :** comparaison des résultats obtenus de la contrainte à la rupture du vieillissement dans l'eu de mer et l'eau distillée



**Figure IV.35** : comparaison des résultats obtenus de la contrainte élastique du vieillissement dans l'eau de mer et l'eau distillée

On peut extraire à partir des images (IV.34, IV.35, et IV.36) que vieillissement dans l'eau distillée est plus influent que le vieillissement dans l'eau de mer et cela s'explique par la présence de sels dans l'eau saline qui ralentit la diffusion du solvant dans le composite et cela fait ralentir le vieillissement du matériau.

### Conclusion :

Les résultats obtenus dans les essais mécaniques montrent que l'immersion des éprouvettes prélevées des plaques des composites en (verre/polyester) dans de l'eau de mer et l'eau distillée au cours du temps provoque des phénomènes de dégradation physiques et chimiques (hydrolyse de la résine et de l'interface fibre/matrice, dégradation des fibres). Ces phénomènes pourraient être à l'origine d'une perte de résistance et de ductilité.

Une dispersion parfois importante des résultats concernant les caractéristiques mécaniques pour un même lot, ce qui peut être dû à la technique d'élaboration qui joue un rôle considérable sur le produit fini.

## Conclusion générale

Dans un premier temps, nous avons effectué des essais statiques de flexion trois points sur des stratifiés non vieillis et vieillis à différents milieux. L'objectif principal consiste à suivre les évolutions physico-chimiques et leurs influences sur les propriétés mécaniques d'usage du matériau. Afin de caractériser l'effet du vieillissement hygrothermique sur nos composites, Une étude comparative des propriétés d'usage est menée de l'état non vieilli et vieilli du matériau. Par la suite, une analyse globale de l'ensemble des résultats expérimentaux relevés dans ce travail est effectuée et confrontés avec d'autres résultats, ce qui nous permettra d'évaluer le comportement de notre matériau.

Dans cette étude un vif intérêt a été porté sur l'effet du vieillissement hygrothermique sur les propriétés mécaniques du matériau composites. L'analyse de l'ensemble des résultats obtenus, montre une diminution des valeurs des caractéristiques mécaniques, qui peut être expliqué par l'effet du vieillissement. On sait qu'au cours d'un vieillissement hygrothermique, la présence de molécules d'eau dans un composite à matrice polymère peut notamment dégrader les liaisons à l'interface renfort-matrice et entraîner ainsi une dégradation irréversible des propriétés du composite.

Un phénomène de dégradation est constaté, suite à la perte de résistance et de ductilité détectées par les essais mécaniques sur les échantillons immergés dans les deux milieux. De plus, nous avons constaté une perte de brillance du gel-coat pour les composites et un changement de couleur pour la résine, en revanche l'éclat du gel-coat des bateaux de pêche et de plaisance doit être conservé au cours des années.

L'analyse et la qualité des résultats obtenus, permettent de conclure que le composite reste un matériau assez complexe à définir avec son comportement anisotrope. Pour une meilleure connaissance du matériau, il faut encore voir son comportement dans le temps sous différentes conditions et dans différents milieux.

## Conclusion générale

Malgré que l'objectif de ce travail est plus au moins atteint et plusieurs paramètres sont pris en considération, il nous a ouvert beaucoup de perspectives, qui, si nous nous pouvons les prospector, nous permettent d'enrichir nos résultats et de mieux assimiler les différents phénomènes rencontrés lors de cette étude.

En perspectives, nous pensons qu'il serait utile de prévoir un travail complémentaire qui traitera :

- ✚ Une caractérisation chimique plus poussée afin d'identifier toute évolution dans la structure du matériau (analyse de l'eau d'immersion au cours de vieillissement,...).
- ✚ Une étude de la réversibilité des effets de vieillissement.
- ✚ L'influence de différentes températures sur la réponse de matériau.
- ✚ L'étude du comportement dynamique du matériau vieilli.
- ✚ L'étude de la possibilité d'entretien et de réparation du matériau.

## Bibliographie

---

- [1] **Safer Malika** ; Mémoire de magister<< Modélisation et optimisation des stratifiés composites par algorithme génétique>>; 2013.
- [2] **F.Yahyaten ; M. Alilechene** ; Mémoire de fin d'étude <<influence des sollicitations hors axes sur les propriétés d'un stratifié à matrice polyester>>; 2013.
- [3] **Pier Jackiné**; Utilisation des matériaux composites ; Edition HERMES, Paris 1991.
- [4] **R. Boumediane ;L. Djira** ;Mémoire de fin d'étude <<Etude du comportement mécanique d'un stratifié verre polyester>>;2015.
- [5] **Dossier pédagogique (ANFA)** ;<<Matériaux Composite>>collaboration Marc Marzona-Action composite et Pascal Celle-(GNFA).
- [6] **François-Xavier IRISARRI** ;Thèse Doctorat<<Stratégies de calcul pour l'optimisationmultiobjectif des structures composites>>; 2009.
- [7]**Sylvian Drapier RMP composites** ;<<Mécanique des composites hautes performances>>
- [8] **Mécanique des Matériaux composites** ;(chapitre 7) Analyse des stratifiés.
- [9] **Marc François** ;<<Matériaux non Métallique>> Module M227 ; Université Paris-sud-11
- [10] **JK. Kim, ML. Sham**; Impact and delamination failure of woven-fabric composites.
- [11] **Guide du stratifieur** ;<<Mode d'emploi des polyesters>>
- [12] **Jean-Marie BERTHELOT** ;<<Mécanique des matériaux et structure composite>>
- [13] **A.ZAIDI**. Mémoire de magister « Etude du comportement de matériaux composites à matrice polymère en fatigue (effet du vieillissement) », 2014.

## Bibliographie

---

[14] **Nait Saada ; M.Meziche** ; Mémoire de fin d'étude ; <<étude théorique des stratifiés et prise en compte du cisaillement transverse>>;2016.

[15] **David Tahibaudau** ; <<Modélisation d'un stratifié (carbone époxy en flexion 4 points)>>;2014.

[16] **Viorel SERGIESCO**, « ISOTROPIE & ANISOTROPIE », Encyclopédie Universale  
[en ligne],

[17] **Radhiadjalouah** ; Mémoire Magister ; <<Comportement mécanique résiduel de polymère après vieillissement chimique en présence de l'acide sulfurique >>;2009 .

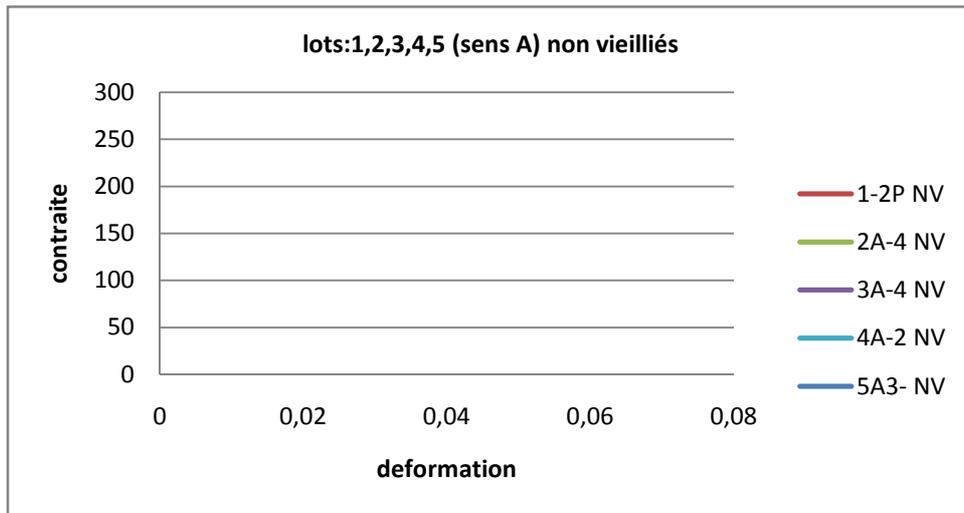
[18] **Danièle. Gay** ; « Matériaux composites », HERMES ,4eme édition 1997.

[19] **Hamadache Hassiba** ; Mémoire Magister ; <<Etude du comportement d'un composite verre/polyester en milieu acide et base>>;2012.

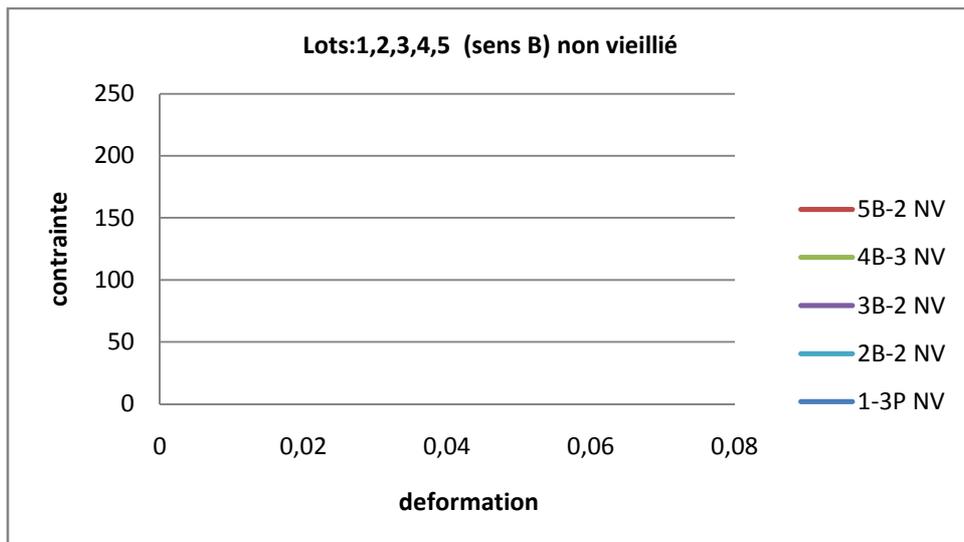
[20] **laoubikhadoudja** ; Mémoire Magister ; <<Etude du vieillissement d'un matériau composite en verre /polyester insaturé utilisé dans la fabrication des bateaux de pêche et de plaisance>>;2009.

[21] **J.Mercier** ; <<prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans le dimensionnement de structure en matériau composite>>;**thèse Paris 2006.**

# ANNEXES

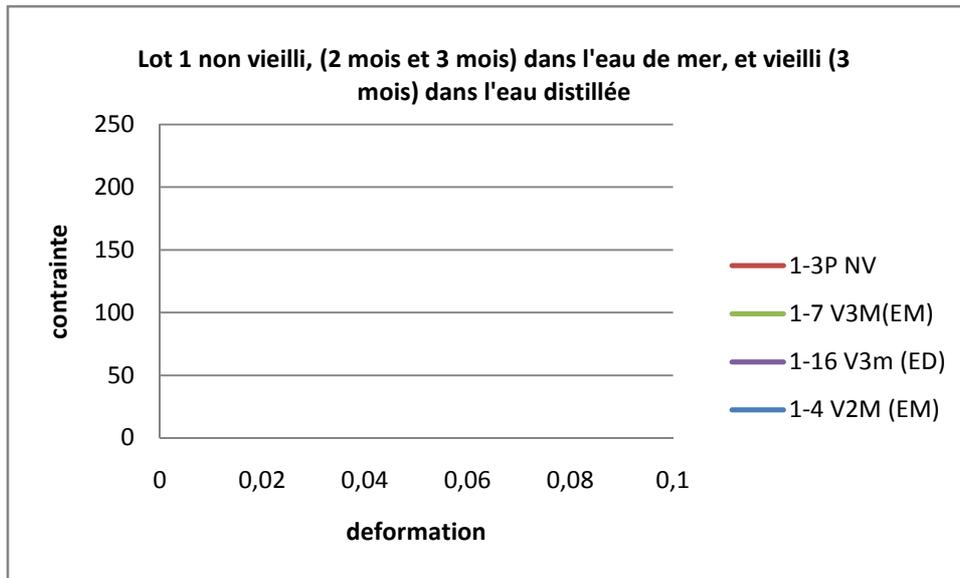


**Figure 1 :** Courbes d'évolution contraintes / déformations des lots (1, 2, 3, 4, 5) dans le sens longitudinale

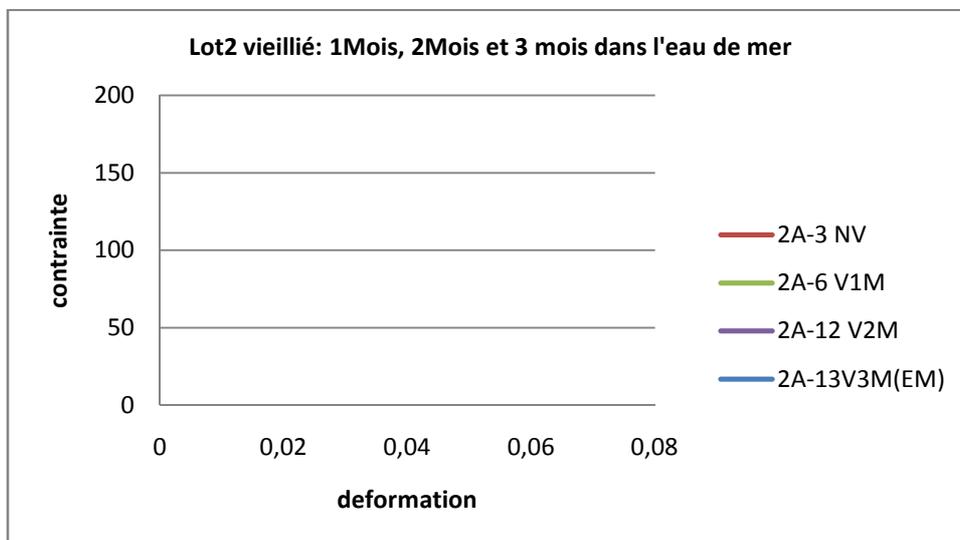


**Figure 2 :** Courbes d'évolution contraintes / déformations des lots (1, 2, 3, 4, 5) dans le sens transversale

# ANNEXES

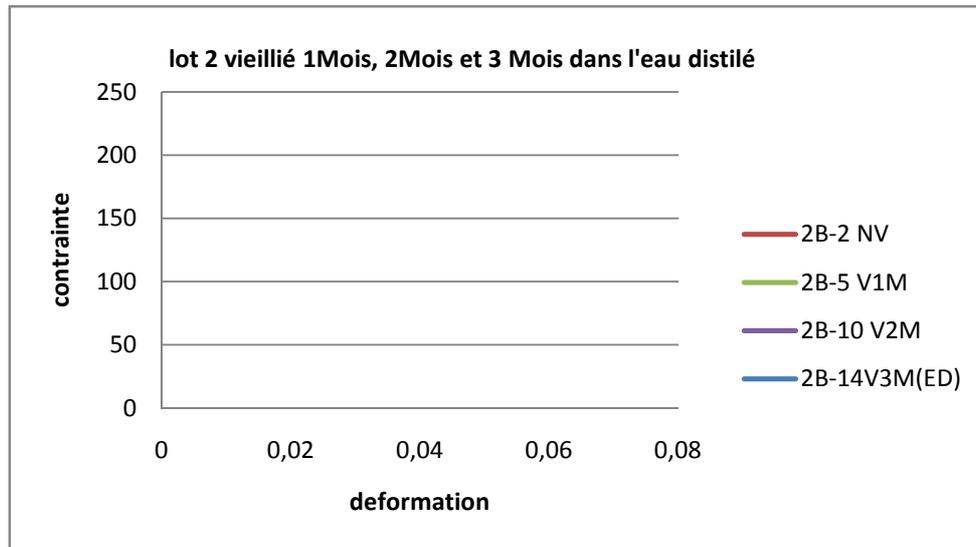


**Figure 3 :** Courbes d'évolution contraintes / déformations du lot (1) vieillis (2mois et 3mois) dans l'eau de mer et vieillis (3 mois) dans l'eau distillée

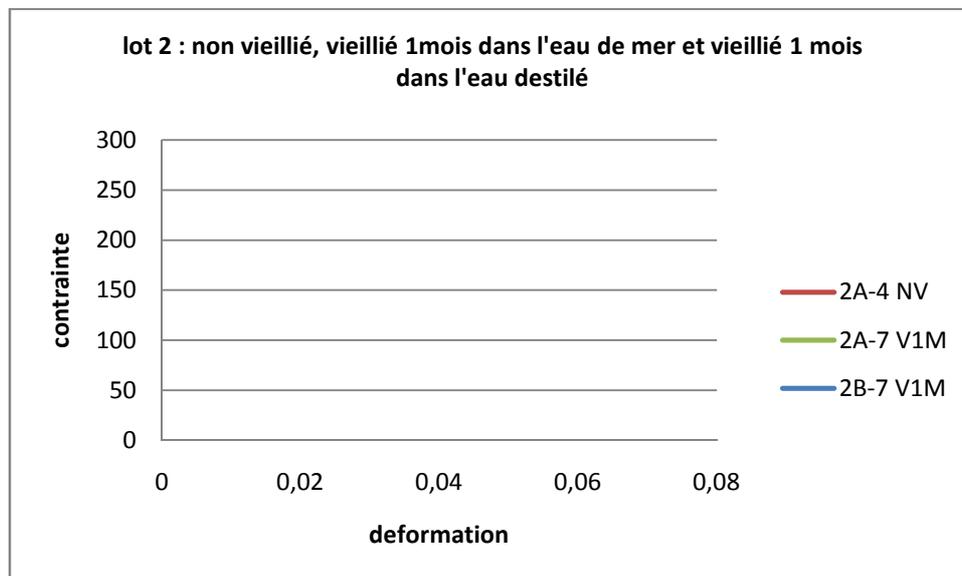


**Figure 4 :** Courbes d'évolution contraintes / déformations du lot (2) vieillis (1 mois, 2mois et 3mois) dans l'eau de mer

# ANNEXES

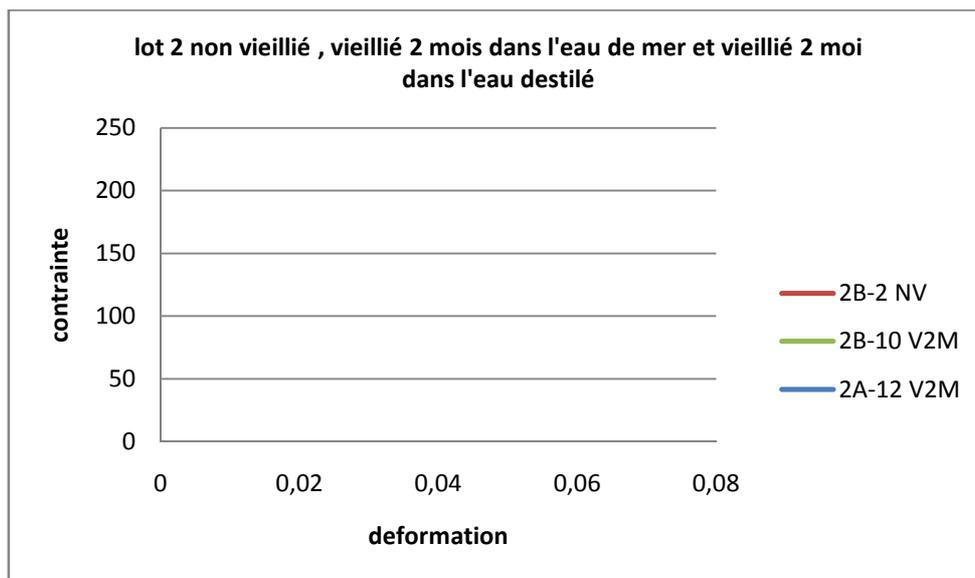


**Figure 5 :** Courbes d'évolution contraintes / déformations du lot (2) vieillis (1 mois, 2mois et 3mois) dans l'eau distillée

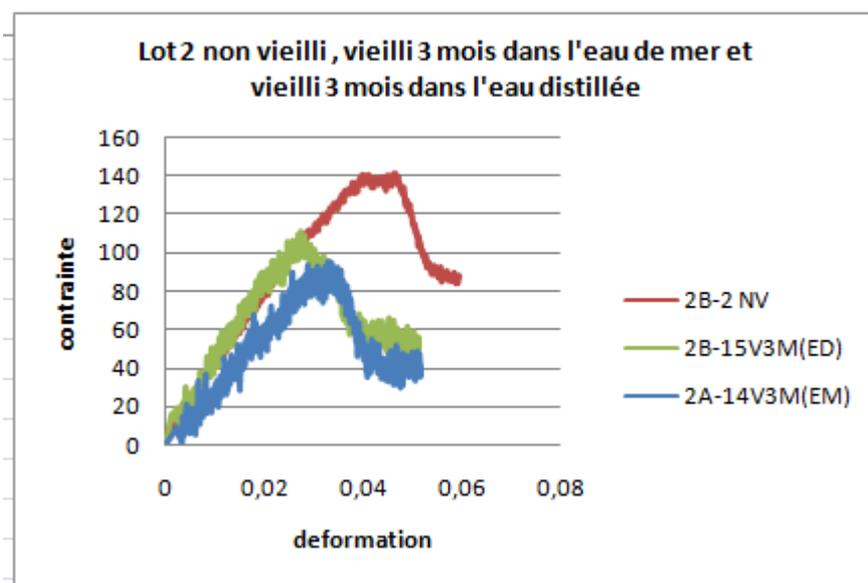


**Figure 6 :** Comparaison des courbe d'évolution contraintes / déformations du lot (2) vieillis (1 mois) dans l'eau distillée et vieilli (1mois) dans l'eau de mer

# ANNEXES

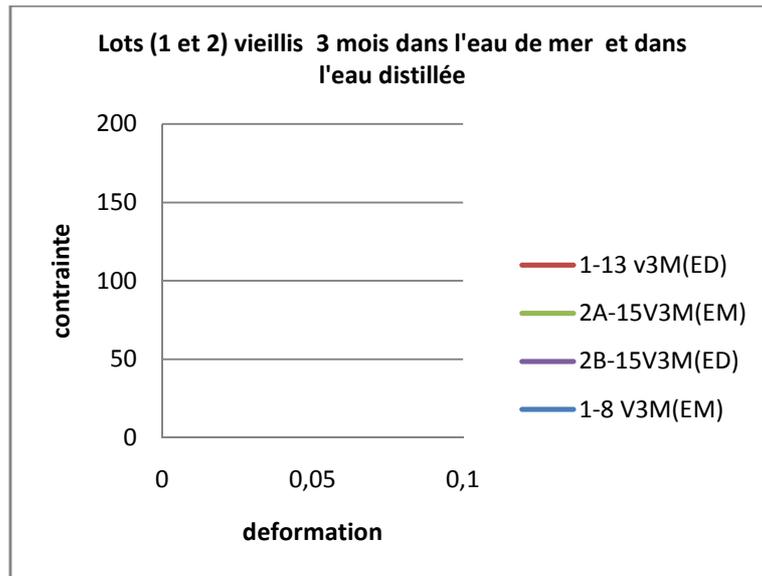


**Figure 7 :** Comparaison des courbe d'évolution contraintes / déformations du lot (2) vieillis (2 mois) dans l'eau distillée et vieilli (2mois) dans l'eau de mer



**Figure 8 :** Comparaison des courbe d'évolution contraintes / déformations du lot (2) vieillis (3 mois) dans l'eau distillée et vieilli (3 mois) dans l'eau de mer

# ANNEXES



**Figure 9:** Comparaison des courbe d'évolution contraintes / déformations des lots (1 et 2) vieilliss (3 mois) dans l'eau distillée et vieilli (3 mois) dans l'eau de mer