

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou Faculté de Génie de la**  
**Construction Département de Génie Mécanique**



---

***MEMOIRE***  
***DE FIN D'ETUDE***

*En vue de l'obtention du diplôme Master académique en Génie Mécanique*  
*Option: Génie des Matériaux*

---

***THEME:***

**Étude comparative des propriétés mécaniques deux résines  
thermodurcissable époxy et polyester en flexion**

---

Proposé par et dirigé par:

Mme. MOHELLEBI Fadhila

Co-encadreur:

Mme. MANSOURI lilla

Présenté par :

Mr. HAMOUMA Moussa

2021/2022

## **REMERCIEMENTS**

*Je remercie en premier lieu le Bon Dieu de m'avoir donné le courage d'aller au bout de mon objectif #*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes parents et toute ma famille, qui grâce à leurs aides, mon travail a vu le jour.*

*Je remercie profondément ma promotrice Madame F. MOHELLEBI, d'avoir accepté de diriger mon travail, par son soutien et ses conseils pertinents qui m'ont permis de travailler tranquillement.*

*J'adresse mes plus vifs remerciements et reconnaissances à Madame L. MANSOURI pour sa disponibilité et aide Précieuse.*

*Je remercie les membres du jury qui me font l'honneur d'examiner mon travail.*

*Je remercie les membres des laboratoires de : l'université UMMTO, RDM génie civil SDM mécanique et labo chimie*

*Mes sincères remerciements vont à tous mes enseignants. Mes remerciements vont également à tous ceux et celles qui de, près ou de loin, m'ont apporté aide et encouragement.*

***DEDICACES***

***Je dédie ce travail :***

***A mes chers parents qui m'ont toujours soutenue tout au***

***Long de mes études***

***A mon cher frère ;***

***A mes chers grands parents ;***

***A toutes les personnes que j'aime ;***

***A tous mes amis et mes collègues***

***HAMOUMA Moussa***

## ***LISTE DES FIGURES***

Figure I.1: Schéma illustratif d'un matériau composite.

Figure I.2. Classification des matériaux composites.

Figure I.3 : Les différentes formes de présentation de la fibre du verre

Figure I.4. Mat à fibres courtes

Figure I.5. Mat à fibres continues

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

Figure I.7. Les principaux types d'armures utilisés pour le tissage des tissus

Figure I.8. Tissage cylindrique et conique

Figure I.9. Tissus multidirectionnels

Figure I.10. Nid d'abeilles

Figure I.11 : Les différents types de renfort de base.

Figure.I.12. Les différents types des matrices

Figure I.13 : Microstructure d'un composite

Figure I.14 : composite Monocouches.

Figure I.15 : composite stratifié.

Figure 1.16. Désignation et convention de signe stratifiées

Figure 1.17. Matériau composite sandwichs.

Figure I.18 : principe de moulage au contact.

Figure I.19 : principe de moulage par projection simultanée.

Figure I.20 : Moulage sous vide.

Figure I.21 : principe de moulage par injection de résine.

Figure I.22 : Principe de moulage à la presse à froid.

Figure I.23 : principe de moulage par compression.

Figure I.24 : Enroulement filamentaire.

Figure II.1 : Traction longitudinale

Figure II.2 : Traction transversale

Figure II.3 : Traction hors axes

Figure II.4 : Courbe de traction conventionnelle

Figure II. 5 : Dispositif d'essai et dimension de l'éprouvette en flexion.

Figure II.6 : Dispositif d'essai et dimension de l'éprouvette en flexion 4 points.

Figure II.7 : Principe de la dureté Brinell.

Figure II.8 : Principe de la dureté Vickers.

Figure II.9 : Principe de la dureté Rockwell (échelle B, bille en acier).

Figure II.10: Principe de l'essai de résilience.

Figure II.11 : Schéma illustrant l'influence des paramètres sur le comportement en fatigue.

Figure III.1 : résine époxy utilisée

Figure III.2 : durcisseur époxy utilisée

Figure III.3 : Résine à l'état liquide

Figure III.4 : résine polyester utilisée

Figure III.5 : durcisseur résine polyester utilisée

Figure III.6 : Les files de verre

Figure III.7 : La cire utilisée lors du moulage.

Figure III 8 : Moules utilisés pour l'étude

Figure III.9 : Balance.

Figure III.10 : une scie circulaire diamanté.

Figure III.11 : une polisseuse.

Figure III.12 : Traitement thermique étuve de marque MAMMERT.

Figure III.13 Numérotation Pour l'absorption

Figure III.14 Numérotation Pour la flexion

Figure III.15 les éprouvettes dans l'eau distillée, et puit dans l'étuve

Figure III.16 une balance sensible

Figure III.17 : microscopique optique

Figure III.19 : Machine de flexion trois points.

Figure III.20 : Essai de flexion trois points a) Déroulement de l'essai b) éprouvette normalisée pour l'essai de flexion

Figure IV.1 : Courbes forces/flèche de résine non renforcée pour l'essai de flexion.

Figure IV.2 : Présentation comparative de la force ( $F_{max}$ ) et le déplacement ( $f_{max}$ ) pour les deux résines

Figure IV.3 : Courbes forces/flèche des composites pour l'essai de flexion.

Figure IV.4 : Présentation comparative de la force ( $F_{max}$ ) et le déplacement ( $f_{max}$ ).

Figure IV.5: Courbes forces/flèche de la résine époxy vieillie en flexion.

Figure IV.6: Courbes forces/flèche du composite en résine époxy vieillie en flexion.

Figure IV.7: Courbes forces/flèche de la résine polyester vieillie en flexion.

Figure IV.8: Courbes forces/flèche du composite en polyester époxy vieillie en flexion.

Figure IV.9 : Présentation adimensionnelle de la variation des propriétés mécanique des matériaux pour la résine époxy en fonction de temps.

Figure IV.10: Présentation adimensionnelle de la variation des propriétés mécanique des matériaux pour la résine polyester en fonction de temps.

Figure IV.11 : L'évolution du taux d'absorption en fonction du temps de la résine époxy.

Figure IV.12 : L'évolution du taux d'absorption en fonction du temps du composite époxy

Figure IV.13 : L'évolution du taux d'absorption en fonction du temps de la résine polyester.

Figure IV.14 : L'évolution du taux d'absorption en fonction du temps du composite polyester

Figure IV.15. Courbes d'absorption moyennes des échantillons de différents lots dans l'eau distillée

Figure IV.16: Courbe d'absorption moyenne des matériaux en polyester.

Figure IV.17: Micrographies des échantillons en résine époxy seule avant vieillissement.

Figure IV.18: Micrographies des échantillons en résine époxy seule après vieillissement à différents temps.

Figure IV.19: Micrographies des échantillons en résine époxy seule après vieillissement à différents temps.

Figure IV.20: Micrographies des échantillons en résine époxy seule après vieillissement à différents temps.

Figure IV.21: Micrographies des échantillons en résine époxy seule après vieillissement pour différents temps.

Figure IV.22: Micrographies des échantillons en résine polyester seule avant vieillissement.

Figure IV.23: Micrographies des échantillons en résine polyester seule après vieillissement à différents temps.

Figure IV.24: Micrographies des échantillons en résine polyester seule après vieillissement à différents temps.

Figure IV.25: Micrographies des échantillons en résine polyester seule après vieillissement à différents temps.

Figure IV.26: Micrographies des échantillons en résine polyester seule après vieillissement à différents temps.

Figure IV.27: Micrographies des échantillons en composite époxy avant vieillissement

Figure IV.28: Micrographies des échantillons en composite époxy après vieillissement à différents temps.

Figure IV.29: Micrographies des échantillons en composite époxy après vieillissement à différents temps.

Figure IV.30: Micrographies des échantillons en composite époxy après vieillissement à différents temps.

Figure IV.31: Micrographies des échantillons en composite polyester avant le vieillissement.

Figure IV.32: Micrographies des échantillons en composite polyester après le vieillissement à différents temps.

Figure IV.33: Micrographies des échantillons en composite polyester après le vieillissement à différents temps.

Figure IV.34: Micrographies des échantillons en composite polyester après le vieillissement à différents temps.

Figure IV.34 : Présentation des spectres IR de la résine époxy.

Figure IV.35 : Présentation des spectres IR du composite époxy.

Figure IV.36: Présentation des spectres IR de la résine polyester.

Figure IV.37: Présentation des spectres IR du composite polyester.

## ***LISTE DE TABLEAUX***

Tableau I.1: Types de verres

Tableau I.2 : Avantages et inconvénients des fibres de verre

Tableau I.3 : Avantages et inconvénients des fibres de Carbone

Tableau I.4 : Avantages et inconvénients des fibres d'aramide

Tableau I.5 : caractéristiques moyennes des fibres et renforts.

Tableau I.6. Principales différences entre les Matrices TP et TD.

Tableau I.7. Avantages et inconvénients de la résine Polyesters insaturés.

Tableau I.8. Avantages et inconvénients de la résine époxyde.

Tableau I.9. Avantages et inconvénients des résines Polyuréthanes et polyuries.

Tableau I.10. Caractéristiques mécaniques des résines thermodurcissables.

Tableau I.11: Tableau comparatif entre les résines thermodurcissables.

Tableau I.12. Caractéristiques mécaniques des résines thermoplastiques.

Tableau II.1 : Dimensions des éprouvettes pour les essais de flexion

Tableau III.1 : Les caractéristiques mécaniques des résines époxydes

Tableau III.2 : Les propriétés mécaniques des polyesters insaturés (UP)

Tableau III.3 Numérotation Pour l'absorption

Tableau III.4 Numérotation pour l'essai de flexion

Tableau III.3 : dimensions (en mm) des éprouvettes de flexion trois points, selon machine de traction IBERTEST

Tableau IV.1 : Caractéristiques des éprouvettes en résine seule.

Tableau IV.2 : Caractéristiques des éprouvettes en flexion de différents matériaux.

Tableau IV.3 : Taux d'absorption (W) et coefficient de diffusion (D) de différents lots.

## ***LISTE DES SYMBOLES***

***C*** : Concentration de solvant au sein e milieu.

***D*** : Coefficient de diffusion de milieu.

***Dpn*** : Degré de polymérisation moyenne en nombre.

***Dt*** : Temps d'apparition ou de vie.

***E*** : Module d'Young.

***Ea*** : Energie d'activation de la diffusion.

***Ef*** : Module d'élasticité de flexion.

***Etr*** : Module de traction.

***Fr*** : Charge à la rupture.

***Mn*** : Masse molaire en nombre.

***Ms*** : Masse d'eau absorbée.

***Mt*** : Masse totale.

***Mw*** : Masse molaire moyenne en poids.

***R*** : Constante des gaz parfaits.

***Rc*** : Résistance à la compression.

***Rt*** : Résistance à la traction.

***Tg*** : Température de transition vitreuse.

**$\Delta h$**  : Déformation relative.

**$\sigma r$**  : Contrainte à rupture.

**$\sigma tr$**  : Contrainte de traction.

***v*** : Vitesse d'un phénomène physique ou chimique.

**$\varphi$**  : Flux.

**$\emptyset$**  : Vitesse de diffusion.

**$\varepsilon$**  : Déformation.

***BMC*** : Bulk Molding Compound.

***CEN*** : Comité européen de Normalisation.

***DMT*** : Diméthyle téréphtalate.

**HM** : Haute module.

**HR** : Haute résistance.

**HT** : Haute ténacité.

**IR** : Infra rouge.

**I.R.T.F** : Infrarouge à transformée de Fourier.

**ISO** : International standardization Organization.

**MEG** : Mono éthylène glycol.

**NFT** : Norme française.

**PAN** : Polyacrylonitrile.

**PBT** : Polybutylénique.

**PC** : Polycarbonate.

**PCI** : Pouvoir calorifique inférieure.

**PEHD** : Polyéthylène haute densité.

**PET** : Poly téréphtalate éthylénique.

**POM** : Polyoxyméthylène.

**PP** : Polypropylène.

**PPS** : Polysulfure de phénylène.

**PSU** : Polysulfure.

**PVC** : Polyvinyle chloride.

**SMC** : Sheet Molding Compund.

**TD** : Thermodurcissable

**TP** : Thermoplastique.

**TPA** : Acide téréphtalique.

**TS** : Thermostable.

**UD** : Unidirectionnelle.

**UV** : Ultraviolet.

**RX** : Rayon X.

# Sommaire

## Introduction Générale

### Chapitre I : Généralité sur matériaux composite

<b>I.1 Introduction.....</b>	<b>5</b>
<b>I.2. Définition .....</b>	<b>5</b>
<b>1.3. Classification des matériaux composites .....</b>	<b>6</b>
<b>1.3.1. Classement suivant la nature des constituants .....</b>	<b>6</b>
<b>1.3.2. Classement suivant la morphologie .....</b>	<b>6</b>
<b>1.4. Constituants des matériaux composites.....</b>	<b>7</b>
<b>I.4.1. Renfort .....</b>	<b>7</b>
<b>I.4.1.1 Fibres .....</b>	<b>8</b>
<b>A Formes linéiques .....</b>	<b>8</b>
<b>B Formes surfaciques.....</b>	<b>9</b>
<b>B.1.Les mats.....</b>	<b>9</b>
<b>B.2. Les tissus et rubans.....</b>	<b>9</b>
<b>C. Forme multidirectionnelle .....</b>	<b>10</b>
<b>C.1 Tresses et préformes.....</b>	<b>10</b>
<b>C.2. Tissus multidirectionnels .....</b>	<b>11</b>
<b>D. Nids d’abeilles .....</b>	<b>11</b>
<b>I.5.1.2. Différentes natures des renforts .....</b>	<b>12</b>
<b>A Fibre de verre : .....</b>	<b>12</b>
<b>B. Fibre de carbone :.....</b>	<b>14</b>
<b>C. Fibre d’aramide :.....</b>	<b>14</b>
<b>D. Fibre de bore :.....</b>	<b>15</b>
<b>E. Fibre de silice (ou de quartz) :.....</b>	<b>15</b>
<b>F. Fibre de polyéthylène de haut module : .....</b>	<b>15</b>
<b>G. Caractéristiques moyennes des fibres et renforts : .....</b>	<b>15</b>
<b>I.4.2 : La matrice .....</b>	<b>16</b>
<b>I.4.2.1 : Les différents types de matrices : .....</b>	<b>17</b>
<b>I.4.2.1.1 Les matrices organiques :.....</b>	<b>17</b>
<b>A. Les matrices thermodurcissables :.....</b>	<b>18</b>
<b>A 1. Polyesters insaturés :.....</b>	<b>18</b>
<b>A 2. Vinyles ers :.....</b>	<b>19</b>

<b>A 3. Phénoliques :</b>	19
<b>A 4. Epoxydes :</b>	19
<b>A 5. Polyuréthanes et polyuries :</b>	19
<b>A 6. Polyamides :</b>	20
<b>B. Les matrices thermoplastiques :</b>	21
<b>I.4.2.1.2 : Les matrices carbonées</b>	22
<b>I.4.2.1.3 : Les matrices métalliques</b>	22
<b>I.4.2.1.4 : Les matrices céramiques</b>	23
<b>I.4.3 Charges et additifs</b>	23
<b>I.4.3.1 Les charges</b>	23
<b>I.4.3.2 Les adjuvants</b>	23
<b>I.4.4 Adhésion renforts/ matrice</b>	24
<b>I.5 Matériaux composites structuraux</b>	25
<b>I.5.1 Monocouches</b>	25
<b>I.5.2 Stratifiés</b>	25
<b>I.5.3 Sandwichs</b>	27
<b>I.6. Procédé de mise en œuvre :</b>	27
<b>I.6.1. Moulage à Basse pression</b>	27
<b>I.6.1.1. Moulage au contact</b>	27
<b>I.6.1.2. Moulage par projection simultanée</b>	28
<b>I.6.2 Les technologies en moule fermé</b>	29
<b>I.6.2.1. Moulage sous vide</b>	29
<b>I.6.2.3 Moulage par injection de compound BMC</b>	31
<b>I.6.2.4 Moulage par compression de mat pré imprégné SMC</b>	31
<b>I.6.2.5 Moulage par enroulement filamentaire</b>	32
<b>I.7. Domaines d'application des composites</b>	32
<b>I.8. Conclusion</b>	33
<b>Introduction</b>	35
<b>II.1 Propriétés physique et mécaniques des composites</b>	35
<b>II.1.1. Loi des mélanges</b>	35
<b>II.1.2.- la densité du composite</b>	35
<b>II.1.3.- Le module de Young du composite <math>E_c</math>, <math>R_{e_c}</math> et <math>R_{m_c}</math></b>	36
<b>II.2 Mode d'essais mécaniques</b>	37
<b>II.2.1 Essai statique</b>	37
<b>II.2.1.1 Essai de traction</b>	37
<b>II.2.1.1.1 : Traction longitudinale</b>	37

II.2.1.1.2 Traction transversale .....	38
II.2.1.1.3 Traction hors axe (essai de traction à 45°) .....	39
II 2.2 Essai de compression .....	40
II.2.3 Essai de flexion .....	41
II.2.3.1 Essai de flexion trois points .....	41
II.2.3.2 Essais de flexion quatre points .....	43
II.1.4 Essai dureté.....	44
II.1.4.1 Dureté Brinell (symbole HB) .....	44
II.1.4.2 Dureté Vickers (HV) .....	45
II.1.4.3 Dureté Rockwell (HV).....	46
II.2.2 Essai dynamique.....	47
II.2.2.1 Essai de résilience (choc).....	47
II.2.2.1 Essai de fatigue .....	48
II. 3 : Conclusion .....	49
III.1 Introduction .....	52
III.2. Matériaux et matériels utilisés : .....	52
III.2.1. Matériaux .....	52
III.2.1.1 résine époxy .....	52
III.2.1.2 Résine polyester .....	53
III.2.1.3 Durcisseur.....	54
III.2.1.4 Le renfort.....	54
III.2.1.5 La cire .....	55
III.2.2. Le matériel d'élaboration.....	55
III.2.2.1. Le moule .....	55
III.2.2.3. La balance .....	56
III.2.3. Etapes suivies pour l'élaboration du matériau d'étude.....	56
III.2.3.1. Etapes suivies pour l'élaboration des plaques du matériau d'étude .....	56
III.2.3.2 Etapes suivies après l'élaboration des plaques en matériaux d'étude .....	57
III.3. Caractérisation du matériau composite.....	60
III.3.1 Caractérisation physique .....	61
III.3.1.1. Observation au microscopique optique .....	61
III.3.2 Caractérisation chimique .....	62
III.3.2.1. Absorption du milieu de vieillissement .....	62
III.3.2. Caractérisation mécanique .....	62
III.3.2.1. Essai de flexion trois points .....	63
III.3.2.1.1 Essai de flexion trois points.....	63

<b>III.4. Conclusion :</b> .....	64
<b>IV.1. Introduction</b> .....	66
<b>IV.2. Résultat de la caractérisation mécanique par essais de flexion</b> .....	66
<b>IV.2.2 Résultats des essais de flexion pour éprouvettes en époxy et en polyester</b> .....	66
<b>IV.2.3. Résultats des essais de flexion pour éprouvettes vieilles</b> .....	69
<b>IV.3. Résultat de la caractérisation physico-chimique</b> .....	75
<b>IV.3.1. Résultats de la cinétique l'absorption pour les matériaux en résine époxy</b> .....	75
<b>IV.3.2. Résultats de la cinétique l'absorption pour les matériaux en résine polyester</b> .....	78
<b>IV.4. Analyse au microscope optique</b> .....	81
<b>IV.4. 1.Analyse au microscope optique des échantillons en résine époxy</b> .....	82
<b>IV.4. 2.Analyse au microscope optique des échantillons en résine polyester</b> .....	85
<b>IV.4. 3.Analyse au microscope optique des échantillons en composite époxy</b> .....	88
<b>IV.4. 4.Analyse au microscope optique des échantillons en composite polyester</b> .....	91
<b>IV.5. Présentation des résultats par Spectroscopie Infra Rouge à Transformée de Fourier des matériaux composites :</b> .....	95
<b>IV.5.1. Présentation des résultats par Spectroscopie Infra Rouge à Transformée de Fourier de la résine époxy :</b> .....	96
<b>IV.5.2. Présentation des résultats par Spectroscopie Infra Rouge à Transformée de Fourier de la résine polyester :</b> .....	98
<b>Conclusion Générale</b> .....	100
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	101



# INTRODUCTION GÉNÉRALE

## Introduction générale

Les matériaux composites atteignent des niveaux de performance inégalés dans la pratique car ils attirent de plus en plus l'attention dans de nombreux domaines (automobile, aviation, construction navale, etc.). Au sens le plus courant du terme, ils sont un ensemble de matériaux de synthèse conçus et mis en œuvre essentiellement pour des applications structurales, de façon à ce que la fonction mécanique est dominante. Ces matériaux trouvent de plus en plus d'application pour la réalisation des pièces structurales de dimensions diverses, dans de nombreux secteurs industriels tels que l'aéronautique, biomédical...etc.

La durabilité des composites à matrice organique n'est pas encore maîtrisée car ils sont très sensibles aux dommages induits par l'environnement et qui dégradent leurs propriétés physiques et mécaniques d'une façon sévère.

Le but de notre travail est de connaître le comportement de deux matériaux (matériaux composites): une matrice résine polyester et une autre matrice résine époxy, avec leur composite (fibre de verre), de suivre leurs évolutions dans le temps. Nos matériaux composites ainsi élaborés, ont suivi un vieillissement accéléré dans l'eau distillée dans l'étuve à une température de 60°C, L'influence de vieillissements sur les caractéristiques intrinsèques de nos matériaux est ainsi analysée. Dix-neuf temps du vieillissement sont pris en considération,  $t_0$  (temps de référence), de vieillissement.

Nous nous sommes intéressés à l'absorption de notre matériau, l'absorption du solvant, en déterminant la vitesse d'absorption ainsi que le temps de saturation pour chaque matériau.

Des observations au microscope optiques sont prises pour nos échantillons vieillis dans l'eau distillée, pour chaque temps de vieillissement,

Du point de vue comportements mécaniques des essais de flexion trois points sont menés sur les deux résines, polyester et la résine époxy, avec leurs composites.

Dans notre présentation de ce travail, nous l'avons organisé sur quatre chapitres, les deux premiers chapitres représentent une partie théorique, et les deux derniers chapitres représentent une partie d'élaboration, d'expérimentation et d'analyse des résultats.

- Dans le premier chapitre de la partie théorique : est consacré à l'étude bibliographique, portant sur les matériaux composites. Nous parlons de leurs composants, leurs

classifications, et leurs caractéristiques générales. Ensuite, on a présenté les avantages et inconvénients des matériaux composites et matériaux composites structuraux. Enfin, nous donnons quelques procédés de fabrication des composites.

- Le deuxième chapitre de la partie théorique concerne le comportement mécanique des matériaux composites. Nous avons cité quelques détails sur le comportement élastique linéaire des matériaux composites ainsi que leurs lois de comportement
- Dans le premier chapitre de la partie expérimental : nous présentant les méthodes et les étapes suivies pour l'élaborer et la caractériser nos matériaux composites.
- Dans le deuxième chapitre de la partie expérimental : nous avons exposé nos résultats et nous les avons commenté et discuté.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale

# Partie théorique

A decorative scroll frame with a light gray background and a thin black border. The frame has rounded corners and a vertical strip on the left side, resembling a scroll. The text is centered within the frame.

# Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

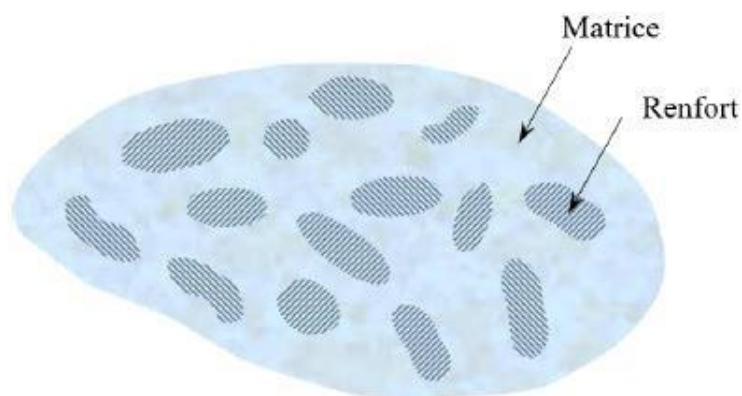
## **I.1 Introduction**

Depuis l'apparition des premières pièces en résine renforcée avec les fibres de verre et de carbone, les composites ne cessent d'évoluer vers des produits qui sont les moins coûteux et les plus performants, ces matériaux sont actuellement très impliqués dans l'industrie et particulièrement dans les domaines aérospatial et aéronautique et les constructions navales, pour des différentes raisons dont voici : Excellent rapport masse, rigidité, résistance en comparaison des matériaux métalliques, ainsi que leur résistance à la fatigue et à la corrosion

On notera toutefois que, bien que l'industrie aéronautique reste un acteur majeur du développement des structures hautes performances, les matériaux composites sont également très utilisés dans le domaine naval, du sport, du génie civil, du secteur automobile, du domaine éolien (principal consommateur actuel de fibres de carbone) et du domaine pétrolier off-shore.

## **I.2. Définition**

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes. Leur association est complémentaire et permet d'aboutir à un matériau dont les performances recherchées seront supérieures à celles des composants pris séparément. Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue, appelée renfort ou matériau renforçant, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue appelée matrice. [1]



**Figure I.1:** Schéma illustratif d'un matériau composite. [2]

### 1.3. Classification des matériaux composites

La classification des composites peut être effectuée selon la forme des composants ou suivant leurs natures [3].

#### 1.3.1. Classement suivant la nature des constituants

- **Composites à matrice organique:(résine, charges) avec :**
  - ✓ Fibres minérales : verre, carbone, etc. ;
  - ✓ Fibres organiques : Kevlar, polyamides, etc. ;
  - ✓ Fibres métalliques : bore, aluminium,etc. ;
  
- **Composites à matrice métallique : (alliages légers, de magnésium, de titane), avec:**
  - ✓ Des fibres minérales : carbone, carbure de silicium (SiC);
  - ✓ Des fibres métalliques : bore;
  - ✓ Des fibres métallo-minérales : fibres de bore vêtues de carbure de silicium (BSiC).
  
- **Composites à matrice minérale : (céramique), avec :**
  - ✓ Des fibres métalliques : bore ;
  - ✓ Des particules métalliques : cermets ;
  - ✓ Des particules minérales : carbures, nitrures, oxydes réfractaires.

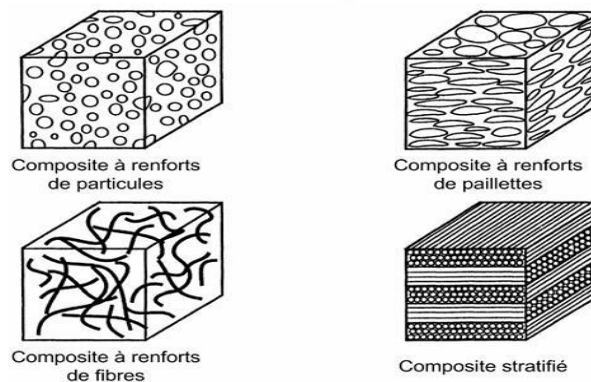
#### 1.3.2. Classement suivant la morphologie

Une manière simple consiste à les classer par les formes des renforts (selon leurs morphologies). Les composites sont donc divisés en quatre catégories suivantes (Figure.I.2):

- ✓ **Composites à renforts de particules :** Le renfort est considéré comme une particule si toutes ses dimensions sont approximativement égales et petites devant les autres dimensions du matériau. Les particules dures sont dispersées aléatoirement dans la matrice moins rigide.
  
- ✓ **Composites à renforts de paillettes :** Les paillettes ont une dimension très faible par rapport aux autres dimensions. La dispersion de ces « particules minces » est

généralement aléatoire. Cependant, les paillettes peuvent être rangées parallèlement l'un à l'autre afin d'avoir des propriétés plus uniformes dans le plan.

- ✓ **Composites à renforts de fibres :** Une fibre a une longueur bien supérieure aux dimensions de la section transversale. Ce type de composites peut être divisé selon les renforts : en fibres discontinues (courtes) ou en fibres continues (longues).
  
- ✓ **Composites stratifiés :** Un stratifié se compose d'au moins deux couches minces de matériau. Les couches peuvent être constituées de différents matériaux monolithiques comme dans les métaux plaqués ou de même matériau composite empilé selon différentes orientations comme pour des stratifiés composites à renforts de fibres longues. Ce dernier devient une classe hybride du composite comportant à la fois le composite à renfort de fibres et la technique de stratification.



**Figure I.2.** Classification des matériaux composites [3].

## 1.4. Constituants des matériaux composites

### 1.4.1. Renfort

Le renfort est tout simplement le squelette ou l'armature du composite ; il confère aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc.

Il permet aussi d'améliorer certaines des propriétés physiques : comportement thermique, tenue en hautes températures, tenue au feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, etc. parmi ces renforts on peut citer : [4]

**I.4.1.1 Fibres**

Les fibres sont des éléments du matériau composite qui apportent généralement les propriétés mécaniques recherchées. Elles se présentent sous forme de filaments de plus ou moins longs.

Les fibres se présentent sous diverses formes commerciales :

- ✓ Linéiques (fils, mèches, ... etc.)
- ✓ Tissus surfaciques (tissus simples, mats, etc.)
- ✓ Multidirectionnelles (tresses, tissus complexes, ...etc.)

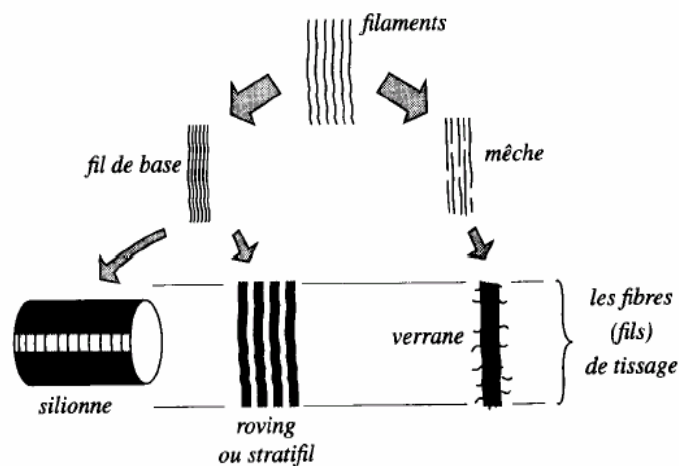
Il existe également des fibres courtes de 1 à 2mm qui sont dispersées dans la matrice, ou encore des fils coupés de 15 à 50mm de longueur. Leur utilisation est encore limitée en raison des difficultés de fabrication.

**A Formes linéiques [4]**

Les fibres sont élaborées suivant un diamètre de quelques microns seulement (filament élémentaires); trop petites pour l'utilisation unitaire, elles sont par conséquent réunies en fils ou en de différentes formes:

- ✓ Mèches Fil de base : ensemble de filaments élémentaires.
- ✓ Fil simple : ensemble de fils de base unitaire continus ou discontinus, maintenus ensemble par torsion.
- ✓ Mèches : ensemble de fibres élémentaires discontinues
- ✓ Stratifié : ensemble de fils de base continus.

L'unité de masse linéique est le tex (1 tex = 1 g /Km).



**Figure I.3 :** Les différentes formes de présentation de la fibre du verre [4]

**B Formes surfaciques**

Les fils peuvent être utilisés pour réaliser les formes surfaciques suivantes :

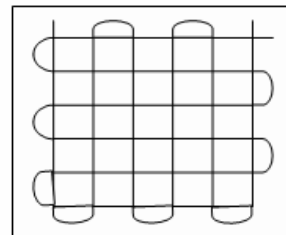
**B.1. Les mats**

C'est des nappes de fils continus ou discontinus, disposés dans un plan sans aucune orientation préférentielle, et maintenus ensemble par un liant soluble ou non dans des résines. L'absence d'orientation préférentielle des fibres conduit à une isotropie des propriétés mécaniques du mat dans son plan [7].

Il existe deux types de mats : mats à fibres courtes (figure I.4); et mats à fibres continues (Figure I.5).



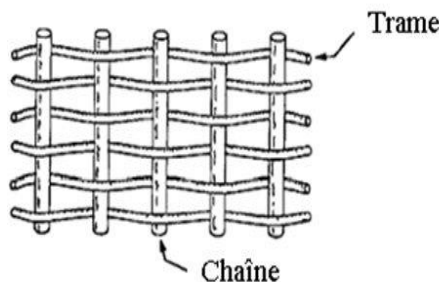
**Figure I.4.** Mat à fibres courtes



**Figure I.5.** Mat à fibres continues

**B.2. Les tissus et rubans**

Ensemble de fils, stratifiés ou mèches réalisés sur un métier à tisser, composé d'une chaîne et d'une trame (Figure I.6)[2].



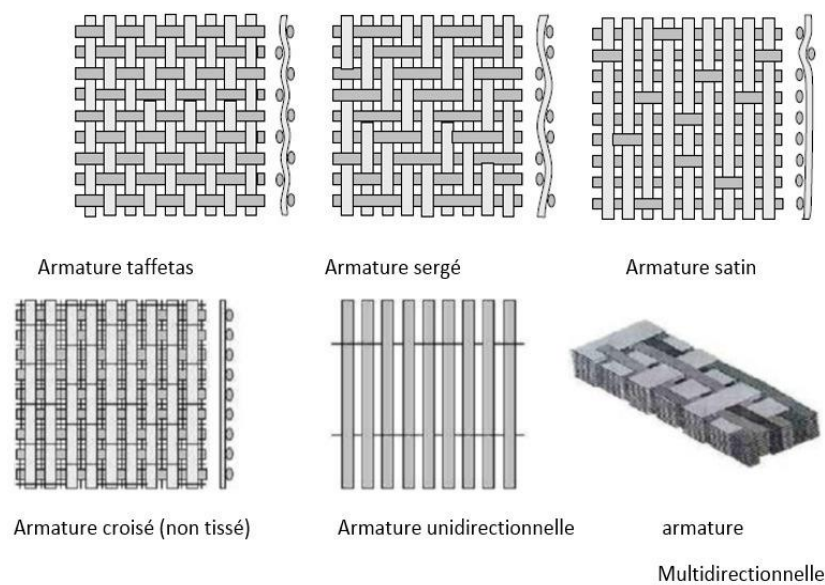
**Figure I.6.** Chaîne et trame d'un tissu

Selon le schéma d'entrecroisement des fils de chaîne et les fils de trame, que l'on nomme l'armure du tissu, on distingue plusieurs types de tissage :

- ✓ Armure toile ou taffetas ;

- ✓ Armure satin ;
- ✓ Armure sergé ;
- ✓ Armure à haut module ;
- ✓ Armure unidirectionnelle.

Les principaux types d'armure utilisés pour le tissage des tissus sont présentés dans la figure I.7 [2].



**Figure I.7.** Les principaux types d'armures utilisés pour le tissage des tissus

## C. Forme multidirectionnelle

### C.1 Tresses et préformes

Ce sont des Tissages cylindriques ou coniques (figure I.8) avec des entre croisements réguliers des fils qui ont la particularité d'être modulable en diamètre. Les fils s'entrecroisent en hélice, le diamètre de la tresse est lié au pas de l'hélice ; par conséquent à l'angle que font les fils entre eux. Ce tissage nous permet de réaliser des pièces de révolution très résistantes ayant un diamètre variable le long de l'axe [2].

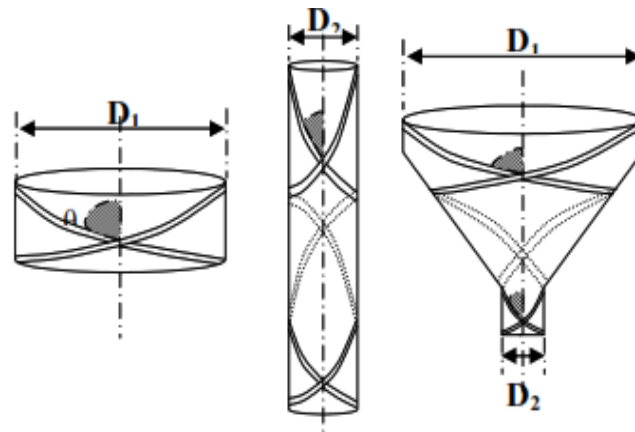


Figure I.8. Tissage cylindrique et conique

### C.2. Tissus multidirectionnels

Ces fibres sont tissées dans plusieurs directions. Ceci permet d'obtenir un tissu très dense et épais mais par conséquent peu souple, ils sont utilisés par exemple pour la réalisation de tuyère. Des tissages 3D et 4D sont montrés respectivement par les figures I.9 [2].

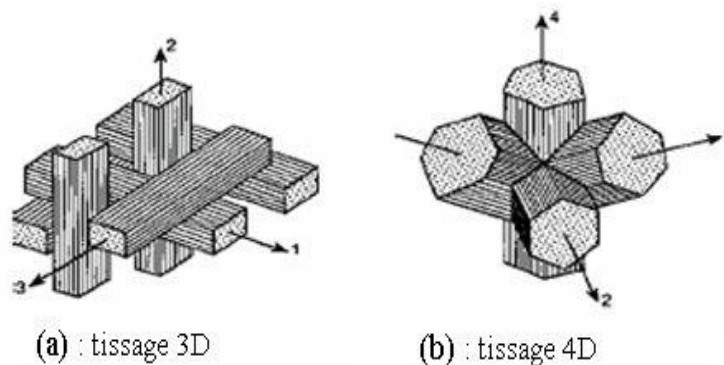


Figure I.9. Tissus multidirectionnels

### D. Nids d'abeilles

Utilisés dans les structures sandwich tel que le rapport rigidité/poids soit important, ces structures sont composées d'une peau- âme et matériau de couplage (figure I.10) [2].

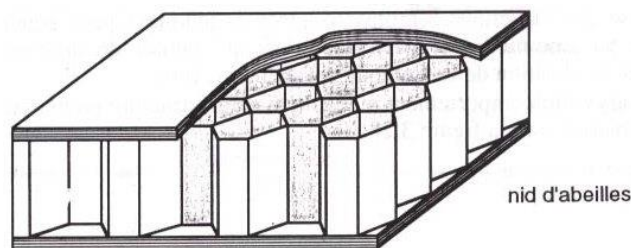
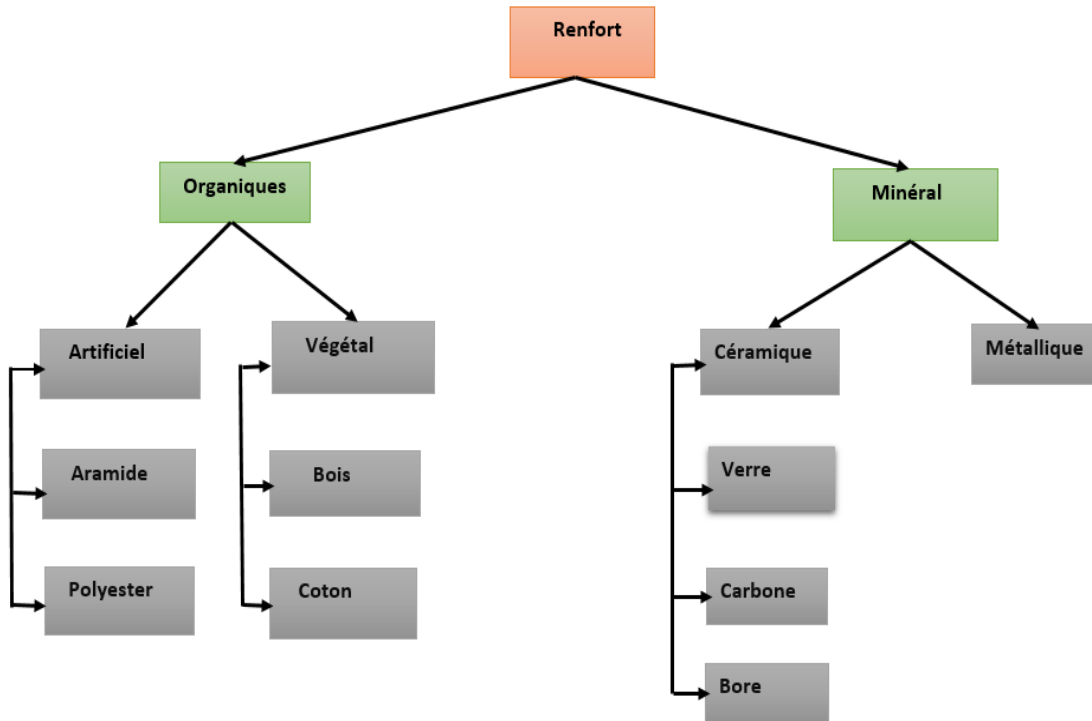


Figure I.10. Nid d'abeilles

**I.5.1.2. Différentes natures des renforts**

Les renforts peuvent être d'origine organiques ou inorganiques, comme illustré sur la figure. I.11



**Figure I.11 :** Les différents types de renfort de base. [5]

La forme la plus utilisée pour les renforts est la forme fibreuse dont les fibres de verre et de Carbone, grâce à leurs propriétés :

**A Fibre de verre :**

C'est la fibre la plus utilisée vu son excellent rapport performances mécaniques/ prix, sa place est au premier rang des renforts utilisés dans les matériaux composites.

Les fibres de verre sont fabriquées à partir d'un mélange à base de silice (SiO<sub>2</sub>), qui est fondu à une température 1200°C puis passé dans une filière en platine, et les filaments sont étirés avant refroidissement à un diamètre de 5 à 13 µm à une vitesse de 60 m/s. En faisant varier la composition du mélange (silice, kaolin, chaux...etc.) on peut obtenir différents types de verre voire tableau suivant. [4]

Les fibres de verre sont obtenues à partir de l'oxyde minéral (Silice, Alumine, Chaux, Magnésie, Oxyde de bore,). On distingue plusieurs types :

- ✓ E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;
- ✓ D: pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectrique).
- ✓ R: pour les composites hautes performances;

**Tableau I.1:** Types de verres

Constituants	Composition en masse%		
	E	D	R
Silice (SiO <sub>2</sub> )	53 – 54	73 – 74	60
Alumine (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	14 – 15,5	—	25
Chaux (CaO)	20 – 24	0,5 – 0,6	9
Magnésie (Mg)	20 – 24	0,5 – 0,6	6
Oxyde de bore (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	6,5 -9	22 – 23	-
Fluor (F)	0 – 0,7		
Oxyde de fer (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	<1	0,1-0,2	-
Oxyde de titane (TiO <sub>2</sub> )	<1	0,1-0,2	
Oxyde de sodium (Na <sub>2</sub> O)	<1	1,3	
Oxyde de potassium (K <sub>2</sub> O)	<1	1,5	

Le tableau ci-dessous illustre certains avantages et inconvénients des fibres de verre

**Tableau I.2 :** Avantages et inconvénients des fibres de verre

Les avantages de fibres de verre	Les inconvénients de fibres de verre
Rapport performances mécaniques/prix Bonne résistance spécifique (pour verre R) Bonne adhérence avec toutes les résines (Existence d'ensimage) Tenue à température élevée Dilatation et conductivité thermique faibles Bonne propriétés diélectriques	Faible module (par rapport à la fibre de carbone ou d'aramide) Vieillissement au contact de l'eau

**B. Fibre de carbone :**

Les fibres de carbone sont des céramiques d'origine inorganiques, constituée de fibre acrylique à partir du poly acrylonitrile (PAN). En raison de la diversité des techniques de fabrication, et de nombre de paramètres entrant en jeu, les fibres de carbone possèdent de très bonnes caractéristiques mécaniques d'autant plus que leur masse volumique est faible et ont une excellente tenue en température en atmosphère non oxydante [4].

On distingue deux groupes :

- ✓ Les fibres à haut ténacité (HT) ou haute résistance (HR)  $\sigma_{tr} = 3000$  MPa.
- ✓ Les fibres à haut module (HM) de module en traction élevé  $E_{tr} = 400000$  MPa.

Le tableau ci-dessous illustre certains avantages et inconvénients des fibres de carbone

**Tableau I.3 :** Avantages et inconvénients des fibres de Carbone

Les avantages de fibres de carbone	Les inconvénients de fibres de carbone
Excellentes propriétés mécaniques ( $R_t, R_c, E$ )	Prix très élevé
Très bonne tenue en température (atmosphère non oxydante)	Tenue limitée aux chocs et à l'abrasion
Dilatation thermique nulle	Mauvais comportement avec l'oxygène (à partir de 400°C), avec les acides oxygénant à chaud et avec les métaux (corrosion galvanique)
Bonne conductibilité thermique et électrique	Adhésion difficile avec les résines.
bonne tenue à l'humidité	
Usinabilité aisée faible densité	

**C. Fibre d'aramide :**

La fibre d'aramide ou (KEVLAR) est issue de la chimie des polyamides aromatique. Il est possible de trouver deux types de fibre d'aramide de rigidités différentes : [6]

- ✓ Les fibres bas modules : utilisés pour les câbles et les gilets pare-balle ;
- ✓ Les fibres hautes modules : employées dans le renforcement pour le composite haute performance.

Les avantages et les inconvénients des fibres aramides sont cités dans le tableau I.4. [4].

Tableau I.4 : Avantages et inconvénients des fibres d'aramide

Les avantages de Fibre d'aramide	Les inconvénients de Fibre d'aramide
Grande résistance au choc, à l'impact et à la fatigue ; Résistance à la rupture en traction spécifique ; Bon comportement chimique vis-à-vis des carburants ; Dilatation thermique nulle ; Très faible densité (1,45).	Prix élevés ; Faible résistance avec les résines d'imprégnations ; Faible résistance à la compression ; Sensibilité aux UV ; Usinabilité difficile; Reprise d'humidité importante (4%) résistant à l'étuvage avant imprégnation; Décomposition à 400°C.

**D. Fibre de bore :**

Le bore est le résultat de dépôt chimique de chlorure de bore (BCI) et de l'hydrogène (H<sub>2</sub>) sur un fil de tungstène de diamètre 13µm chauffé à une température comprise entre 1100 et 1300°C par effet joule [4].

**E. Fibre de silice (ou de quartz) :**

Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leurs hautes tenues chimiques et thermiques dans les tuyères pour moteurs de fusées. [6]

**F. Fibre de polyéthylène de haut module :**

Elles présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité. Pour des structures peut sollicitées, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamides ou polyester. [6]

**G. Caractéristiques moyennes des fibres et renforts :**

On peut résumer les caractéristiques de ces fibres dans le tableau suivant :

Tableau I.5 : caractéristiques moyennes des fibres et renforts. [2]

Fibre	Densité Kg/M3	Charge de rupture traction En MPa	Charge de rupture compression MPa	Allongement a la rupture En%	Module d'élasticité longitudinale en MPa	Diamètre du filament élémentaire En µm
Verre E	2.54	3400	1200	4.8	73000	3–30
Verre R	2.48	4400	1300	5.4	86000	3–30
Aramide Bas module	1.45	3100	500	2	70000	12
Aramide haut module	1.45	3100	500	1	130000	12
Carbone HT	1.78	2800	1800	0.5	200000	8
Carbone	1.8	2200	1300	-	400000	8
Bore	2.63	3500	3500	0.8	400000	100–200
AcierXC10	7.85	1000	-	-	210000	-
Aluminium	2.63	358	-	-	69800	-

**I.4.2 : La matrice [8]**

La matrice est constituée de résine mélangée, pour améliorer ses caractéristiques, à une charge qui facilite aussi la mise en œuvre et diminue le coût de la production. Le mélange est considéré mécaniquement comme une phase homogène, et nous obtenons ainsi un matériau composite formé d'un renfort et d'une matrice. Le rôle de la matrice est d'assurer le lien entre les fibres et de transmettre les sollicitations. Elle assure la résistance du matériau dans le sens transverse du renfort, ainsi qu'une protection physico-chimique des fibres contre les agents nocifs de l'environnement. De plus elle conditionne directement la tenue thermique, et la résistance à la compression et au cisaillement inter-laminaire.

Les résines utilisées doivent être assez déformables et doivent présenter une bonne compatibilité avec les fibres. Elles doivent également avoir une masse volumique faible de manière à conserver au matériau composite des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées.

La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la Figure.I.3

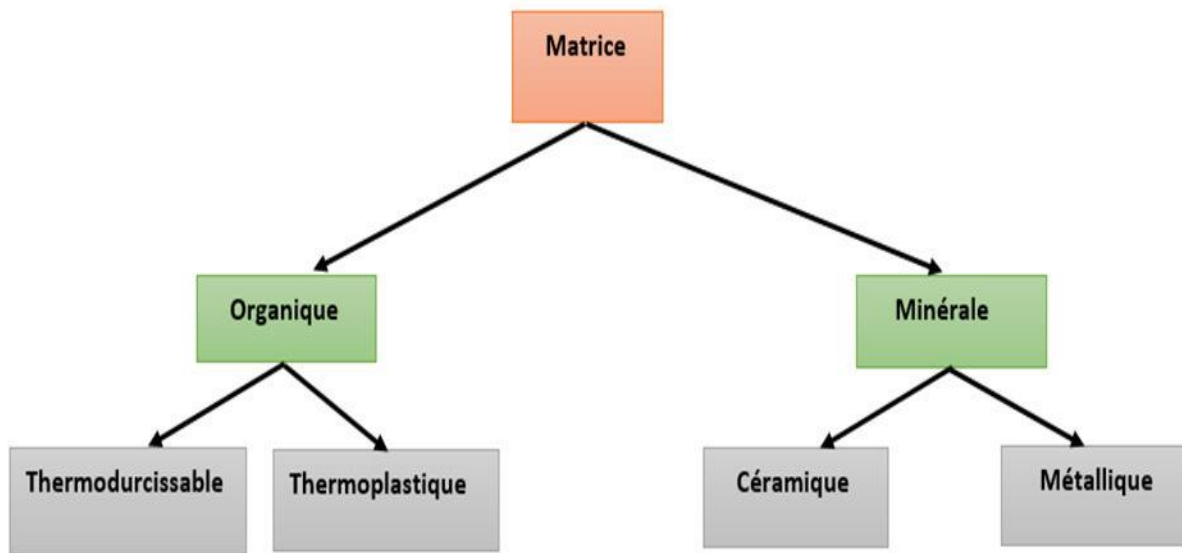


Figure.I.12. Les différents types des matrices [9]

### **I.4.2.1 : Les différents types de matrices :**

#### **I.4.2.1.1 Les matrices organiques :**

Les matrices en polymère de synthèse sont les plus couramment rencontrées dans les composites de grande diffusion. Associées à des fibres de verre, d'aramide ou de carbone, elles ont un faible module et une faible résistance à la traction, mais se prêtent facilement à l'imprégnation des renforts pour leur fabrication. La structure des thermoplastiques (TP) se présente sous forme de chaînes linéaires, ils ont besoin d'être chauffés pour les mettre en forme. Le refroidissement par contre permet de les fixer (les chaînes se bloquent). Pour le cas des thermoplastiques (TP) l'opération est réversible. La structure des thermodurcissables (TD) possède la forme d'un réseau tridimensionnel, le durcir dans ce cas est définitive, la transformation est donc irréversible [10].

Les principales différences entre les Matrices (TP) et (TD) sont représentées dans le tableau I.6

Tableau I.6. Principales différences entre les Matrices TP et TD [10].

Matrices	Thermoplastiques (TP)	Thermodurcissables (TD)
Etat de base	Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à
Stockage	Illimité	Réduit
Moulage	Chauffage+ refroidissement	Chauffage continu
Cycle	Court	Long
Tenue thermique	Réduite	Bonne
Tenue au choc	Assez bonne	Limitée
Chutes et déchets	Recyclables	Perdus ou recyclés en charge
Mouillabilité renforts	Difficile	Aisée

**A. Les matrices thermodurcissables :**

Principalement nous avons :

**A 1. Polyesters insaturés :**

C'est la résine la plus utilisée dans le cas de composites de grande distribution. Une résine de polyester insaturé contenant un monomère insaturé 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 à l'état solide en passant par un état de gel. La réaction de durcissement dépend de la réactivité de la résine, de la forme de l'objet fabriqué (épaisseur, etc.) [10], Les avantages et les inconvénients de la résine Polyesters insaturés sont représentés dans le tableau I.7:

**Tableau I.7.** Avantages et inconvénients de la résine Polyesters insaturés [10].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bonne accroche sur fibres de verre</li> <li>- Bonne résistance chimique</li> <li>- Mise en œuvre facile</li> <li>- Tenue en température (&gt; 150 °c)</li> <li>- Prix réduit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inflammabilité (sauf résines chlorées)</li> <li>- Tenue vapeur et eau bouillante</li> <li>- Retrait important (6 à 15 %)</li> <li>- Durée de conservation en pot limitée</li> </ul>

**A 2. Vinyles ers :**

Elle peut être considérée 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.

**A 3. Phénoliques :**

Elles sont issues de la polycondensation du phénol et du formol. Elle se caractérise par une bonne tenue au feu, sans fumée. Elles la caractéristique d'être fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à colorer et à mettre en œuvre.

**A 4. Epoxydes :**

Elles résultent de la polyaddition de l'épichlorhydrine sur un polyalcool et constitue la résine type des composites hautes performances (HP).

**Tableau I.8.** Avantages et inconvénients de la résine époxyde [10].

Avantages	Inconvénients
- Tenue mécanique	- Prix élevé
- Tenue thermique	- Sensibilité à l'humidité
- Tenue chimique	- Vieillesse sous température
- Tenue Fatigue	- Sensibilité aux chocs
- Faible retrait (1 à 2%)	
- Excellente adhérence sur fibres	
- Mise en œuvre facile	

**A 5. Polyuréthanes et polyurées :**

Dans l'application composite, on utilise surtout des formules élastomériques dont la faible viscosité permet un bon remplissage du moule. Les avantages et les inconvénients des résines polyuréthanes et polyurées sont représentés sur le tableau I.9:

**Tableau I.9.** Avantages et inconvénients des résines Polyuréthanes et polyuréées[10].

Avantages	Inconvénients
- Facilité de moulage	- Résistance mécanique réduite
- Tenue chimique	- Coloration en masse difficile
- Vieillessement	- combustibilité

**A 6. Polyamides :**

Ces résines sont surtout utilisées dans les composites (HP), lorsque l'on cherche une bonne stabilité sous hautes températures (> 250 °C). Elles restent toutefois très difficiles à mettre en œuvre.

Les caractéristiques des matrices thermodurcissables sont représentées dans le tableau I.10 :

**Tableau I.10.**Caractéristiquesmécaniques des résines thermodurcissables [10].

Matrices TD Caractéristiques	époxy	Phénolique	Polyester	Vinyles ter	Silicone	Polyamide
Masse volumique (kg.m-3)	1200	1300	1200	1150	1100	1400
Module d'élasticité	4500	3000	4000	3300	2200	4000 à 19000
Longitudinal (MPa)	1600	1100	1400	/	/	1100
Module de cisaillement (MPa)	0.4	0.4	0.4	/	0.5	0.35
Coefficient de Poisson	130	70	80	75	35	70
Contrainte de rupture (Traction) MPa	2	2.5	2.5	4	/	1
Allongement rupture%	11	1	8	5	/	8

Le Tableau I.11 donne une comparaison entre les différentes résines.

**Tableau I.11:** Tableau comparatif entre les résines thermodurcissables [10]

	Polyesters	Phénoliques	Epoxydes	Polyamides
<i>Caractéristiques Mécanique</i>	Moyennes	Faibles	Très bonnes	Excellentes
<i>Tenue aux chocs</i>	Très bonne	Très faible	Bonne	Très bonne
<i>Tenue en fatigue</i>	Faible	Faible	Moyenne	Bonne
<i>Pouvoir adhésif</i>	Moyen	Moyen	Très bon	Très bon
<i>Température Maxi d'utilisation</i>	140°C	130°C	190°C	260°C
<i>Tenue au feu</i>	Mauvaise	Bonne	Moyenne	Très bonne
<i>Retrait</i>	Important	Faible	Très faible	Très faible
<i>Durée de polymérisation</i>	Courte	Courte	longue	Moyenne
<i>Mise en œuvre</i>	Très facile	Difficile	Facile	Difficile

**B. Les matrices thermoplastiques :**

Les résines TP ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. Un renforcement de fibres courtes leur confère une tenue thermique et mécanique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle. Ce sont donc essentiellement les suivants, qui possèdent tous une tenue en température supérieure à 100 °c [10] :

- ✓ Polyamide (PA), tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures.
- ✓ Polytéraphthalate 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.
- ✓ Polysulfurés (PSU), 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, en particulier :

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

- ✓ Polyéther-éther-cétone (PEEK).

Les caractéristiques des matrices thermoplastiques sont représentées dans le tableau I.12 :

**Tableau I.12.**Caractéristiques mécaniques des résines thermoplastiques [10].

Matrices TP Caractéristiques	PP	PPS	PA	PES	PEI	PEEK
Module d'élasticité longitudinal (MPa)	1200	4000	2000	3000	3300	4000
Coefficient de Poisson	0.4	/	0.35	/	/	/
Contrainte de rupture (traction) MPa	30	65	70	85	105	90
Allongement à rupture %	20à400	100	200	60	60	50
Coefficient de dilatation thermique °C-1*10-5	9	5	8	6	6	5

#### **I.4.2.1.2 : Les matrices carbonées**

Elles sont produites par le même principe que celui utilisé pour la production des fibres de carbones : carbonisation d'une matrice organique à haute température.

Elles sont constituées de grains de carbone pyrolytique qui se dépose à chaud sur les fibres, ce qui assure une liaison mécanique entre celle-ci et ferme les vides laissés entre elles. On obtient ainsi un matériau composite dont la masse volumique sera proche de celle du carbone massif. [8]

#### **I.4.2.1.3 : Les matrices métalliques**

La température maximale d'utilisation des polymères étant peu élevée, et le carbone risque de s'oxyder à plus de 500°C, il faut donc parfois envisager d'utiliser des matrices dont l'inertie chimique est meilleur à plus haute température, certains métaux et alliages métalliques peuvent répondre à cette exigence, on a donc recours à des matrices métalliques dans certaines conditions [8] :

- ✓ Des propriétés mécaniques supérieures,
- ✓ Résistance plus élevée à l'attaque de certains solvants,
- ✓ Tenue en température élevée,

- ✓ Comportement pas parfaitement élastique,
- ✓ Augmentation du poids du composite,

#### **I.4.2.1.4 : Les matrices céramiques**

Les propriétés intrinsèques des céramiques (réfractaire, rigidité, résistance et bonne stabilité chimique), leur permet potentiellement de jouer le rôle de matrice dans des matériaux composites, dans ce cas le but des fibres de renfort est d'améliorer la ténacité de telles matrices, ainsi que leur résistance aux chocs thermiques. [8]

### **I.4.3 Charges et additifs [11].**

#### **I.4.3.1 Les charges**

Les composites peuvent être renforcés par un autre matériau se présentant sous forme de fines particules, ce sont les charges.

Elles ont pour but de modifier les caractéristiques du produit : dureté superficielle, résistance à la contrainte en flexion ou en choc ou encore diminution du pouvoir calorifique, amélioration du comportement au feu et souvent baisse de prix de revient. Les plus employées sont le carbone de calcium pulvérulent (craie broyée), le kaolin, la silice, le mica, l'hydrate d'alumine et les microbilles de verre.

#### **I.4.3.2 Les adjuvants**

Un des additifs de grande importance est l'agent d'interface qui assure la cohésion et l'adhérence entre les différents constituants. Cet agent est en générale déposé sur les fibres de renfort (ensimage du verre) ou sur les charges (carbonate de calcium enrobé).

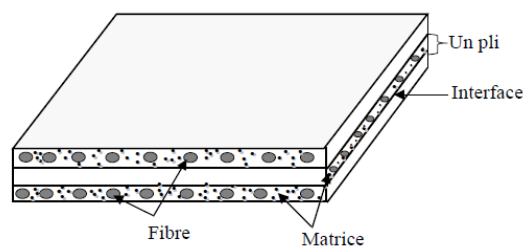
D'autres adjuvants primordiaux sont, dans le cas des matrices Thermodurcissables, les catalyseurs et accélérateurs de durcissement.

Dans cette gamme, on trouve également des lubrifiants et démoulant internes facilitant la mise en œuvre, des stabilisateurs thermiques et des anti-oxygènes, des inhibiteurs de l'action des rayonnements ultraviolets, des dérivés halogénés améliorant le comportement au feu et en fin des pigments et colorants.

### I.4.4 Adhésion renforts/ matrice

Le choix des constituants ne peut se résumer à choisir la « meilleure » matrice et la « Meilleure » fibre. Il est nécessaire que l'adhésion entre les fibres et la matrice soit de qualité suffisante pour que les propriétés du matériau composite obtenu soient supérieures à celles de ses constituants.

On notera que les fibres de carbone présentent une bonne adhésion avec les matrices époxy suite à un traitement oxygène. Les fibres d'aramide, chimiquement inertes, s'associent difficilement avec les matrices organiques. Enfin, les fibres de verre, après humidification, présentent une tenue inter faciale intéressante avec toutes les matrices organiques. D'un point de vue physico-chimique, l'adhésion entre les fibres (carbone ou verre) et la matrice (époxy) est généralement due à des liaisons covalentes (mécanisme de liaison le plus tenace).



**Figure I.13** : Microstructure d'un composite

#### o Ensimage

Les renforts destinés à la fabrication des composites reçoivent un ensimage. L'ensimage est une dispersion aqueuse spécifique comportant un agent collant, un agent pontant et des agents antistatiques, permettant d'assurer différents rôles :

- ✓ Compatibilité de la liaison fibre - matrice ;
- ✓ Cohésion inter filamentaire (raideur du fil) pour qu'il soit manipulable ;
- ✓ Protection contre l'abrasion générée par la mise en œuvre (frottement contre pièces métalliques) ;
- ✓ Élimination des charges électrostatiques dues aux frottements ;
- ✓ Augmentation du mouillage de la fibre au cours de l'imprégnation. L'ensimage est spécifique pour une résine et un procédé donné.

### **I.5 Matériaux composites structuraux**

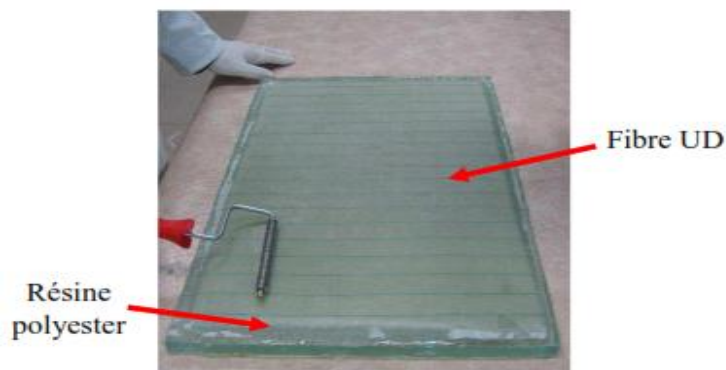
Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types :

- ✓ Les monocouches
- ✓ Les stratifiées
- ✓ Les sandwiches

#### **I.5.1 Monocouches**

Représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues

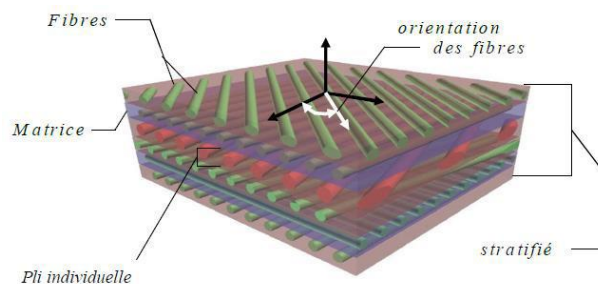
(Unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes. [1]



**Figure I.14 :** Composite Monocouches.

#### **I.5.2 Stratifiés**

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié. La figure ci-après représente un matériau composite stratifié [13].



**Figure I.15 :** composite stratifié. [12]

Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques. Un stratifié possédant l'empilement  $(0, +45, +90, -45)_2s$  est un stratifié avec quatre couches dans les directions  $0^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $90^\circ$  et  $+45^\circ$ , l'orientation  $0^\circ$  coïncidant avec la direction une du repère principal du composite. Ces plans seront répartis symétriquement par rapport au plan moyen du stratifié. [13].

On pourra avoir des stratifiés de type :

1. Equilibré : stratifié comportant autant de couches orientée suivant la direction  $+\theta$  que de couches orientée suivant la direction  $-\theta$ .
2. Symétrique : stratifié comportant des couches disposées symétriquement par rapport à un plan moyen.
3. Orthogonal : stratifié comportant autant de couches à  $0^\circ$  que de couches  $90^\circ$ .

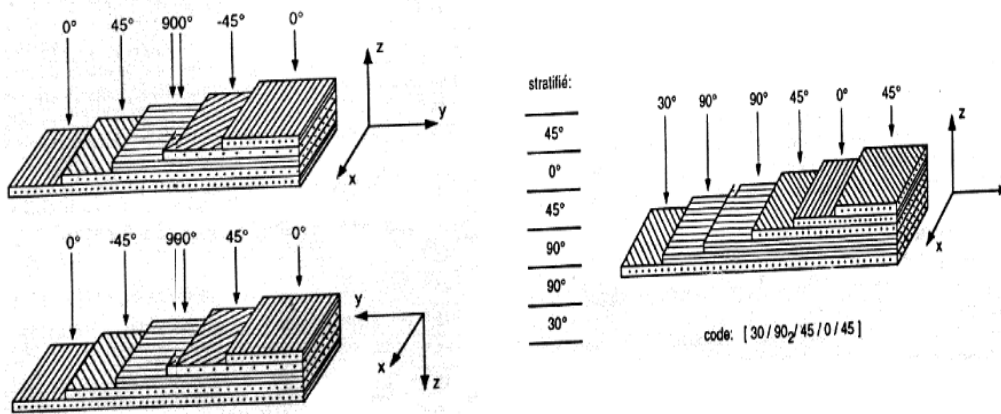


Figure 1.16. Désignation et convention de signe stratifiés [14]

On distingue différents types de stratifiés :

- Stratifiés symétriques.
- Stratifiés symétriques miroir.
- Séquences.
- Stratifiés hybrides.

### 1.5.3 Sandwichs

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance.

L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique. [1].

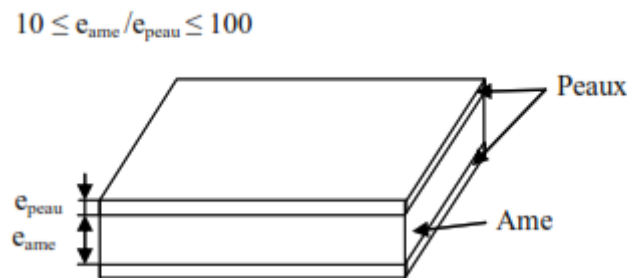


Figure 1.17. Matériau composite sandwichs [13].

### I.6. Procédé de mise en œuvre :

Les techniques de fabrication jouent un rôle considérable dans les composites car chacune des opérations influe de 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. Il existe plusieurs techniques de mise en œuvre à savoir [11] :

- ✓ Technologies manuelles de transformation
- ✓ Procédés de transformation par moulage
- ✓ Procédé de transformation en continu
- ✓ Procédés de fabrication des formes de révolution

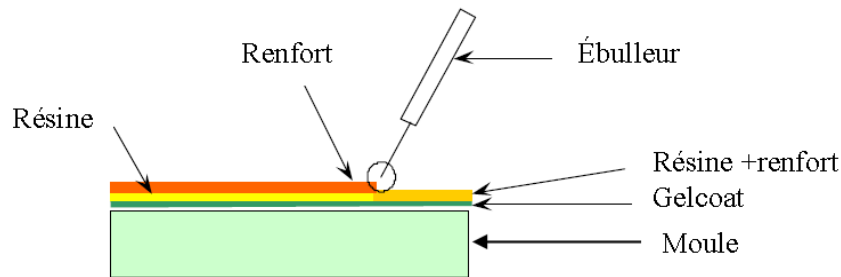
Dans ce travail, nous avons utilisé une des technologies manuelles de transformation qui est le moulage au contact.

#### I.6.1. Moulage à Basse pression

##### I.6.1.1. Moulage au contact.

C'est un procédé manuel pour la réalisation des pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression (figure I.18). [15]

Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée. [1]



**Figure I.18 :** principe de moulage au contact. [10]

On utilise cette technologie de moulage dans le cas de fabrication de petites séries de pièces :

De 1 à 1000 pièces / an, pièces de très grandes dimensions. Ce type de moulage présente des avantages tels que : [1]

- ✓ Très larges possibilités de formes
- ✓ Pas de limite dimensionnelle
- ✓ Une surface lisse gel cotée (aspect, tenue à la corrosion)
- ✓ Propriétés mécaniques moyennes à bonnes
- ✓ Investissements spécifiques très faibles
- ✓ Moules simples, peu onéreux, rapide à réaliser en interne.

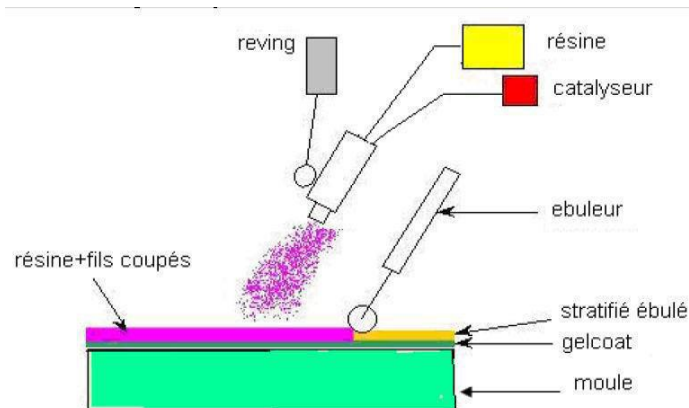
Mais aussi il se limite à :

- ✓ Une seule face lisse
- ✓ Nécessité de finition (détourage, perçage, etc.)
- ✓ Qualité tributaire de la main d'œuvre
- ✓ Faible cadence de production par moule
- ✓ Espace de travail important
- ✓ Conditions de travail médiocres

### **I.6.1.2. Moulage par projection simultanée.**

Le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée sur un moule (figure I.19). 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 [2].



**Figure I.19 :** principe de moulage par projection simultanée. [10]

Les avantages associés à ce type de moulage on retrouve :

- ✓ Très larges possibilités de forme et dimensions
- ✓ Travail simplifié, suppression de la mise en forme obtenue directement par la projection
- ✓ Investissements très modérés
- ✓ Moules simples, peu onéreux, rapides à réaliser en interne.

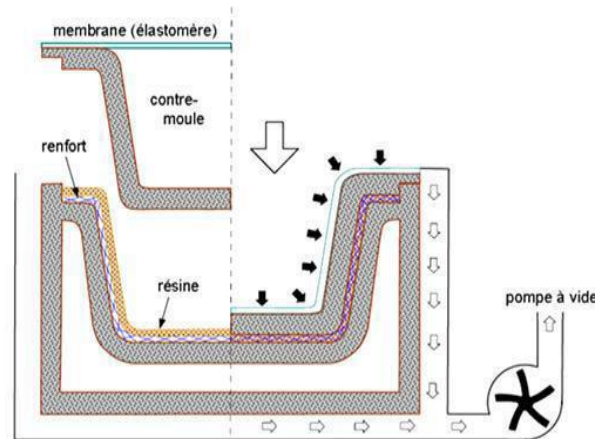
En plus des limites rencontrées par le moulage au contact, celui-ci se limite à des propriétés mécaniques moyennes. [2]

## **I.6.2 Les technologies en moule fermé**

### **I.6.2.1. Moulage sous vide.**

Le moulage sous vide s'effectue entre moule et contre-moule rigide, semi-rigide ou souple suivant la technologie de la mise en œuvre (figure I.20). Le renfort sous forme de mat, tissu, ou préforme est placé à l'intérieur du moule, la résine catalysée est versée sur le renfort.

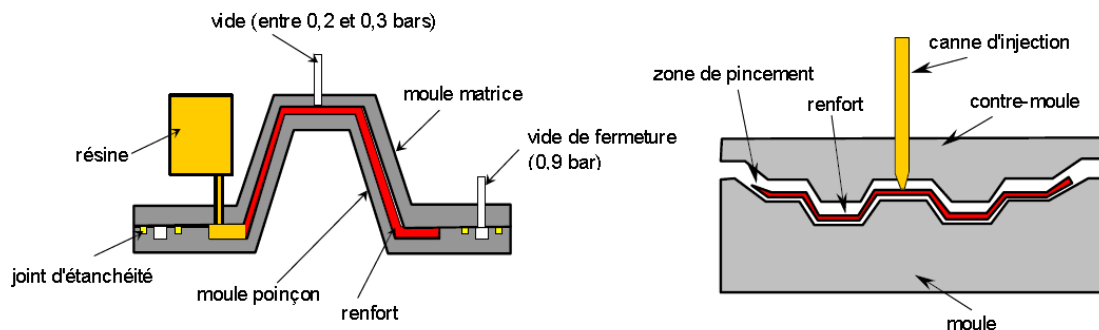
On utilise la pression qui s'exerce sur le moule lors de la mise sous vide pour répartir la résine et imprégner le renfort. La résine peut également être injectée par l'aspiration consécutive au vide [10].



**Figure I.20 :** Moulage sous vide. [2]

**I.6.2.2 Moulage par injection basse pression de résine (RTM)**

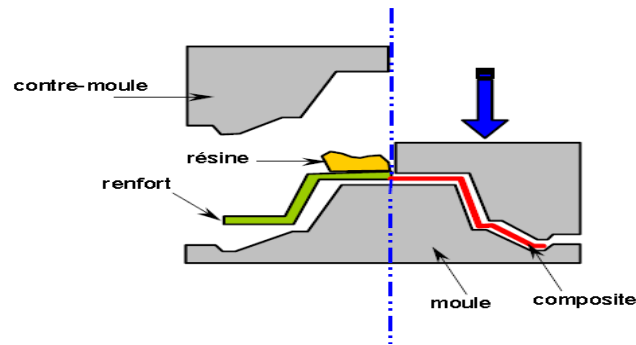
Le moulage par injection de résine liquide RTM (Résine Transfert Molding) s’effectue entre moule et contre –moule rigides. Le renfort (mats, préforme, éventuellement tissus) est mis en place dans le moule, ensuite, la résine, accélérée et catalysée, est injectée sous faible pression (1.5 à 4 bars) à travers le renfort jusqu’au remplissage complet de l’empreinte. La pression de moulage est faible et le procédé convient pour des cadences jusqu’à 30 pièces par jour. [1]



**Figure I.21 :** principe de moulage par injection de résine. [10]

**Moulage à froid :**

C’est un moulage dans lequel on se sert d’une presse à compression entre moule est contre moule rigides initialement sans apport thermique extérieur. Le renfort (mat) est posé sur la partie inférieure du moule, la résine dotée d’un système catalytique très réactif, est tout de suite versée en vrac. La fermeture du moule sous pression (2 à 4 bars) entraîne la répartition de la résine dans l’empreinte et l’imprégnation du renfort. Le durcissement de la résine est accéléré progressivement par l’élévation de température du moule.



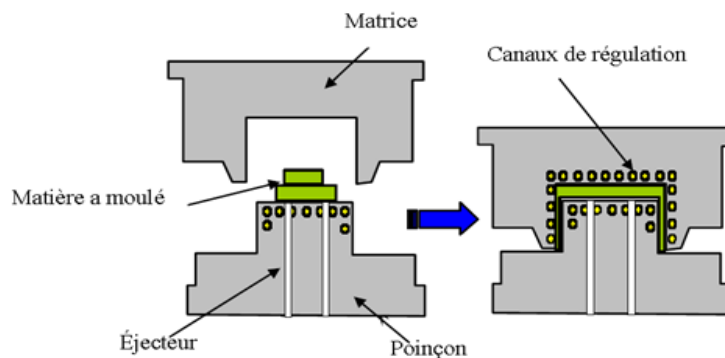
**Figure I.22 :** Principe de moulage à la presse à froid. [10]

**I.6.2.3 Moulage par injection de compound BMC**

Le compound (Bulk Molding Compound), est une masse à mouler constituée de résine, de charges et d’adjuvants divers, renforcé par des fils de verre coupés. Cette masse est préparée dans un malaxeur. Le moulage se fait à chaud (130-150 °C) par injection (principalement) entre moule et contre moule en acier usiné. La pression (50 à 100 bars) de fermeture du moule entraîne le fluage de la matière préalablement dosée et le remplissage de l’empreinte. Le temps de durcissement très court permet un démoulage rapide. On utilise ce type de moulage pour une production en grandes séries, et pour des pièces de taille petite et moyenne, plus ou moins épaisses.

**I.6.2.4 Moulage par compression de mat pré imprégné SMC**

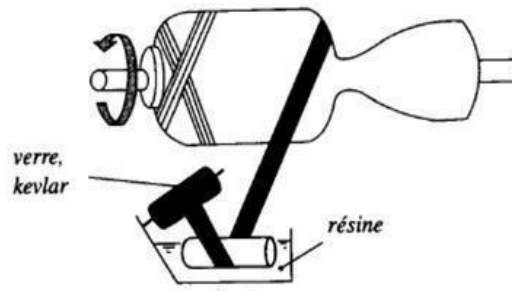
Le mat pré imprégné (Sheet Molding Compound) est une nappe de fils coupés ou continus, imprégné par un mélange de résine polyester, de charges et d’adjuvants spécifiques divers. Découpé en flans de masse et dimensions déterminées, le mat pré imprégné est moulé à chaud (140 à 160°C) par compression entre un moule et un contre moule en acier usiné.



**Figure I.23 :** Principe de moulage par compression. [10]

### I.6.2.5 Moulage par enroulement filamentaire

Suivant le schéma ci-après, il peut être intégré dans une chaîne de fabrication en continu, et ainsi autoriser l'obtention de tubes de grande longueur. [17]. Pour des pièces de révolution à méridienne quelconque, l'enroulement est réalisé sur un mandrin de forme démontable, puis polymérisé en étuve ou en autoclave. Ce procédé est utilisé pour la fabrication de pièces devant résister aux pressions internes, (réservoirs, corps de propulseur etc.)



**Figure I.24 :** Enroulement filamentaire. [16]

## I.7. Domaines d'application des composites

Les excellentes caractéristiques et les bonnes performances mécaniques des matériaux composites à matrice de résine en font des matériaux attrayants pour l'utilisation dans les différentes structures. L'intérêt de ces matériaux réside dans leur anisotropie aisément contrôlable par le concepteur qui peut ainsi ajuster la rigidité et la résistance en fonction des sollicitations extérieures.

De nos jours, les matériaux composites ont pris une place importante dans divers domaines :

- ✓ Electricité et électronique.
- ✓ Construction navale.
- ✓ Construction aéronautique.
- ✓ Construction automobile.
- ✓ Bâtiment et travaux publics.
- ✓ Santé (instrumentation médicale).
- ✓ Sport et loisir (skis, raquette de tennis, planche à voile, surf, ...).

**I.8. Conclusion**

Dans ce premier chapitre, une présentation globale est donnée sur les matériaux composites du point de vue du rôle de chaque constituants, types, architecture, mise en œuvre et domaines d'applications des composites.

Dans les matériaux composites les fibres se trouvent sous forme organique et inorganique, ces dernières peuvent donner une bonne résistance grâce à leurs propriétés, et les propriétés de chaque constituant du composite jouent un rôle dans son comportement mécanique et son évolution dans le temps (vieillessement). L'utilisation des matériaux composite est élargie énormément presque dans tous les secteurs de construction navale jusqu'à la construction aéronautique grâce à des recherches menées par des chercheurs, qui ont découvrent des nouveaux assemblages de matériaux pour créer des matériaux composites plus résistants et les plus légers, on s'intéresse au rapport qualité prix dans la fabrication d'un matériau composite, mais nous devons nous intéressé aussi à la durabilité du produit fabriqué, à son devenir et son cycle de vie. Le comportement mécaniques et physique d'un matériau composite l'endommagement que rencontre le matériau durant son utilisation est le sujet du chapitre II.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both with rounded ends and a slight shadow effect.

# **Chapitre II : Comportement mécanique des matériaux composite**

## **Chapitre II : Comportement mécanique des matériaux composite**

### **Introduction**

Le facteur déterminant dans le choix des matériaux est la connaissance de leur comportement mécanique.

Les moyens qui permettent d'étudier le comportement mécanique et d'évaluer numériquement les propriétés des matériaux sont les essais mécaniques, dans ce chapitre on va aborder quelques essais qu'on a pu réaliser.

### **II.1 Propriétés physique et mécaniques des composites : [18]**

Les propriétés physiques et mécaniques des composites sont complexes car directement liées au comportement d'un mélange fortement anisotrope.

#### **II.1.1. Loi des mélanges :**

La loi des mélanges permet sous certaines conditions de déterminer certaines caractéristiques du composite en fonction de la fraction volumique du renfort. Par exemple si on prend :

- $P_M$  Propriétés de la matrice
- $P_R$  Propriétés du renfort
- $P_C$  Propriétés du composite
- $V_R$  Fraction volumique (%) du renfort

La propriété du composite est :

$$P_C = V_R P_R + (1 - V_R) P_M \quad (\text{II.1})$$

#### **II.1.2.- la densité du composite :**

À partir de la loi énoncé ci-dessus on peut calculer la densité moyenne du composite.

Si :

- $\rho_M$  : densité de la matrice

$\rho_R$  : densité du renfort,

## Chapitre II : Comportement mécanique des matériaux composite

Alors la densité du composite  $\rho_C$  est :

$$\rho_C = V_R \rho_R + (1 - V_R) \rho_M \quad (\text{II.2})$$

### II.1.3.- Le module de Young du composite $E_c$ , $Re_c$ et $Rm_c$ :

Lorsqu'on mélange deux matériaux au comportement élastique linéaire et de module de Young différent, le produit est encore élastique et linéaire.

Le calcul de module de Young est possible à partir de la loi des mélanges si la force est parallèle aux fibres. Dans ce cas sous l'effet d'une force  $\mathbf{F}$ , la matrice, les fibres et le composite subissent une déformation unitaire identique, ce qui se traduit par :

$$\epsilon_C = \epsilon_M = \epsilon_R \quad (\text{II.3})$$

Par application de la loi des mélanges on obtient :

- Pour le module de Young :

$$E_c = V_R E_R + (1 - V_R) E_M \quad (\text{II.4})$$

De la même manière on peut déterminer :

- -La limite d'élasticité du composite

$$Re_c = V_R Re_R + (1 - V_R) Re_M \quad (\text{II.5})$$

- -La résistance maximale à la traction du composite :

$$Rm_c = V_R Rm_R + (1 - V_R) Rm_M \quad (\text{II.6})$$

Pour une force perpendiculaire au sens des fibres, les contraintes dans la matrice, dans les renforts et dans le composite sont identiques. Cela se traduit par :

$$\sigma_R = \sigma_M \quad (\text{II.7})$$

## Chapitre II : Comportement mécanique des matériaux composite

### II.2 Mode d'essais mécaniques :

Les essais non destructifs permettent la mise en évidence des défauts de structure qui initient l'endommagement ainsi que l'évolution du processus de rupture.

- Essais statiques Essai de traction et de compression (traction longitudinale, transversale, hors axes, compression longitudinale...) ; Essai de flexion (trois points, quatre points, ...) ; Essai de dureté.
- Essais dynamiques Essai au choc, Essai de fatigue.

#### II.2.1 Essai statique

##### II.2.1.1 Essai de traction :

L'essai de traction est le plus fondamentale parmi tous les essais mécaniques. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction. [19]

##### II.2.1.1.1 : Traction longitudinale [20]

L'effort  $F$  est appliqué dans la direction des fibres (composite unidirectionnel), comme le montre la figure (II.1)

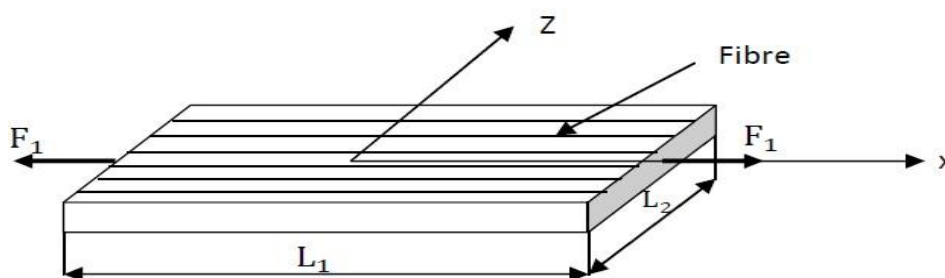


Figure II.1 : Traction longitudinale

Les caractéristiques tirées sont :

- La contrainte normale :

$$\sigma_{xx} = \frac{F_1}{S_1} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

- $S_1$  : section droite du matériau

## Chapitre II : Comportement mécanique des matériaux composite

- Les déformations longitudinales et transversales sont données respectivement par :

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\Delta L_1}{L_1} \quad (\text{II.9})$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\Delta L_2}{L_2} \quad (\text{II.10})$$

- Le module longitudinal  $E_L$  et le coefficient de poisson  $\mu_{LT}$  sont ensuite calculés à partir des expressions suivantes :

$$E_L = \frac{\sigma_{xx}}{\varepsilon_{xx}} \quad (\text{II.11})$$

$$\mu_{LT} = -\frac{\varepsilon_{zz}}{\varepsilon_{xx}} \quad (\text{II.12})$$

### II.2.1.1.2 Traction transversale :

L'effort  $F$  est appliqué suivant le sens de trame (direction transverse aux fibres)

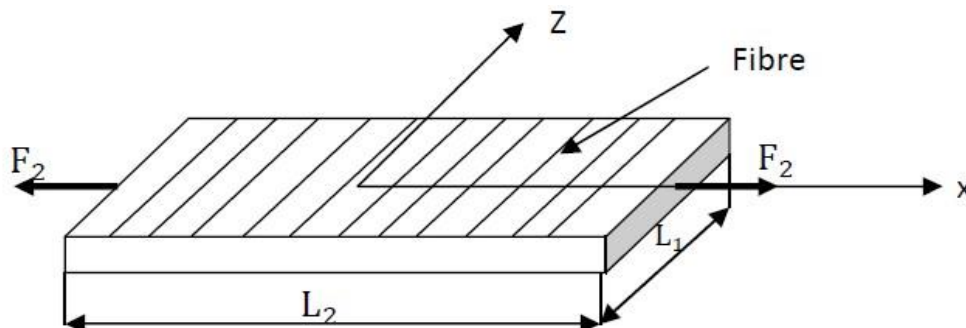


Figure II.2 : Traction transversale

- La contrainte normale est :

$$\sigma_{xx} = \frac{F_2}{S_2} \quad (\text{II.13})$$

Avec  $S_2$ : section droite du matériau sur laquelle s'exerce la charge Le module de Young transversal  $E_T$  et le coefficient de poisson  $\mu_{LT}$  sont calculés respectivement par les relations (II.14) et (II.15).

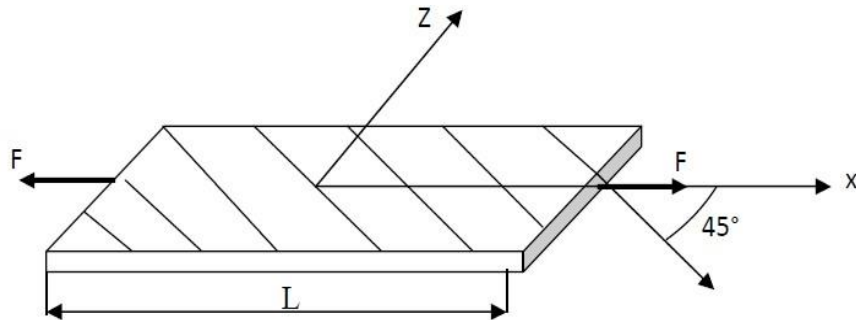
## Chapitre II : Comportement mécanique des matériaux composite

$$E_T = \frac{\sigma_{zz}}{\epsilon_{zz}} \quad (\text{II.14})$$

$$\mu_{LT} = -\frac{\epsilon_{xx}}{\epsilon_{zz}} \quad (\text{II.15})$$

### II.2.1.1.3 Traction hors axe : (essai de traction à 45°)

L'effort F est appliqué à un angle de 45° par rapport aux fibres (les fibres sont inclinées de 45°), cet essai est utilisé pour mesurer le module de cisaillement G



**Figure II.3 :** Traction hors axes

- La Contrainte normale est :

$$\sigma_{xx} = \frac{F}{S} \quad (\text{II.16})$$

- Le module de Yong est :

$$E_{45} = E_{xx} = \frac{\sigma_{xx}}{\epsilon_{xx}} \quad (\text{II.17})$$

- Ce module s'exprime par :

$$\frac{1}{E_x} = \frac{1}{E_{45}} = \frac{1}{4} \left( \frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_T} + \frac{1}{G_{LT}} - 2 \frac{\mu_{LT}}{E_L} \right) \quad (\text{II.18})$$

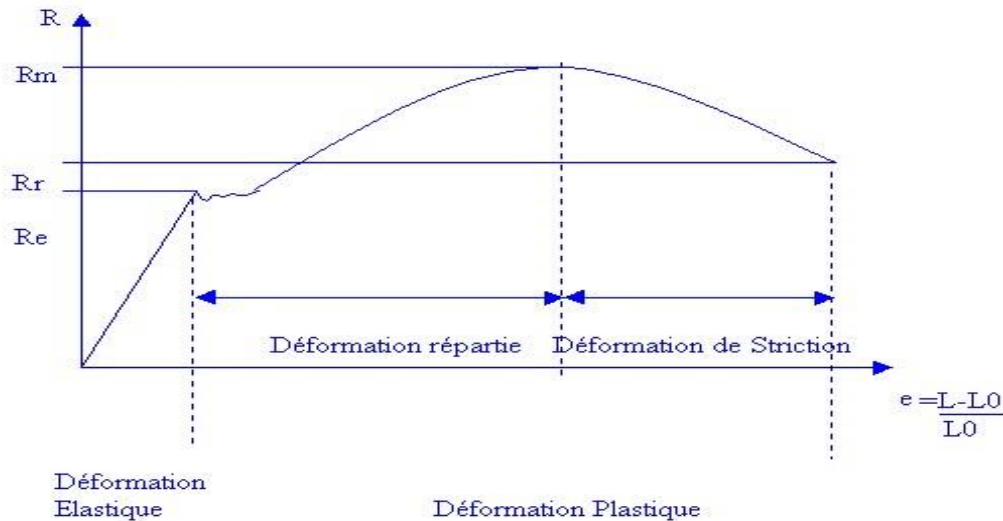
- Le module de cisaillement longitudinal  $G_{LT}$  est donné par:

## Chapitre II : Comportement mécanique des matériaux composite

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{4}{E_{45}} - \frac{1}{E_L} - \frac{1}{E_T} + 2 \frac{\mu_{LT}}{E_L} \quad (\text{II.19})$$

L'essai de traction ne permet pas toujours d'avoir les caractéristiques exactes à cause de la présence des contraintes de contact qui sont dû à la fixation de l'éprouvette.

### Courbe conventionnelle :



**Figure II.4 :** Courbe de traction conventionnelle

L'essai de traction donne plusieurs valeurs importantes :

- ✓ Le module de Young  $E$  ou module d'élasticité longitudinale ;
- ✓ La limite élastique  $R_e$  ou  $\sigma_e$  qui sert à caractériser un domaine conventionnel de réversibilité ;
- ✓ La limite à la rupture  $R_m$  ou  $\sigma_m$  ;
- ✓ L'allongement à la rupture  $A$ , qui mesure la capacité d'un matériau à s'allonger sous charge avant sa rupture, propriété intéressante dans certaines applications ;
- ✓ Le coefficient de Poisson, qui chiffre la variation de volume induite par la déformation des matériaux dans le domaine élastique.

## II 2.2 Essai de compression [21]

L'effort de compression est parallèle au plan de stratification. L'essai consiste à appliquer, à vitesse constante un effort de compression sur un barreau parallélépipédique disposé verticalement.

## **Chapitre II : Comportement mécanique des matériaux composite**

Cet essai détermine la contrainte à la rupture en compression qui est définie par la formule : (II.20).

$$\sigma = \frac{Fr}{lh} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

- Fr : charge à la rupture
- l : Longueur de l'éprouvette
- h : épaisseur de l'éprouvette

### **II.2.3 Essai de flexion :**

L'essai de flexion est un test mécanique statique qui fait partie de la famille des essais indépendants du temps. La simplicité du montage de l'éprouvette et de sa géométrie, le rend facile à mettre en œuvre. Il nous permet d'extraire la contrainte et la flèche à la rupture, et, le module de Young. Pour cet essai deux configurations qui peuvent être retenues : [20]

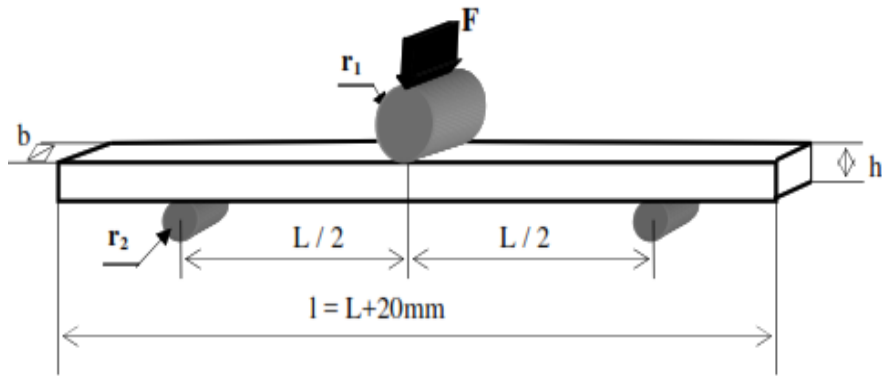
- ✓ Essai de flexion trois points
- ✓ Essai de flexion quatre points.

#### **II.2.3.1 Essai de flexion trois points : [22].**

Le principe de cet essai consiste à déformer un barreau rectangulaire reposant sur deux appuis, par l'intermédiaire d'une panne située à égale distance des appuis et se déplaçant à une vitesse constante. On enregistre la courbe contrainte-déplacement.

La norme EN63 relative aux matières plastiques renforcées au verre textile décrit l'appareillage représenté à la figure suivante [22].

## Chapitre II : Comportement mécanique des matériaux composite



**Figure II. 5** : Dispositif d'essai et dimension de l'éprouvette en flexion.

Avec :

- $r_1$ : Rayon de cylindre de la panne(=5mm);
- $r_2$ : Rayon des cylindres d'appuis (=2.5mm);
- $L$ : Longueur entre appuis;
- $l$ : la longueur totale de l'éprouvette.

Les dimensions de l'éprouvette sont telles que  $l \approx 20h$ ;  $b$  est fonction de  $h$  comme indique dans le tableau suivant (dimensions en mm):

**Tableau II.1** : Dimensions des éprouvettes pour les essais de flexion [22].

Epaisseur $h$	Largeur $b$
$1 < h \leq 10$	$15 \pm 0.5$
$10 < h \leq 20$	$30 \pm 0.5$
$20 < h \leq 35$	$50 \pm 0.5$
$35 < h \leq 50$	$80 \pm 0.5$

Cet essai de flexion trois points, permet de déterminer :

- La contrainte de flexion à rupture  $\sigma_r$  :

$$\sigma_r = \frac{3FrL}{2bh^3} \quad (\text{II.21})$$

- Le module d'élasticité de flexion  $E_f$

$$E_f = \frac{L^3}{4bh^3} a \quad (\text{II.22})$$

- La déformation en surface :

## Chapitre II : Comportement mécanique des matériaux composite

$$\varepsilon = \frac{6W \cdot h}{L^2} \quad (\text{II.23})$$

➤ La contrainte de cisaillement :

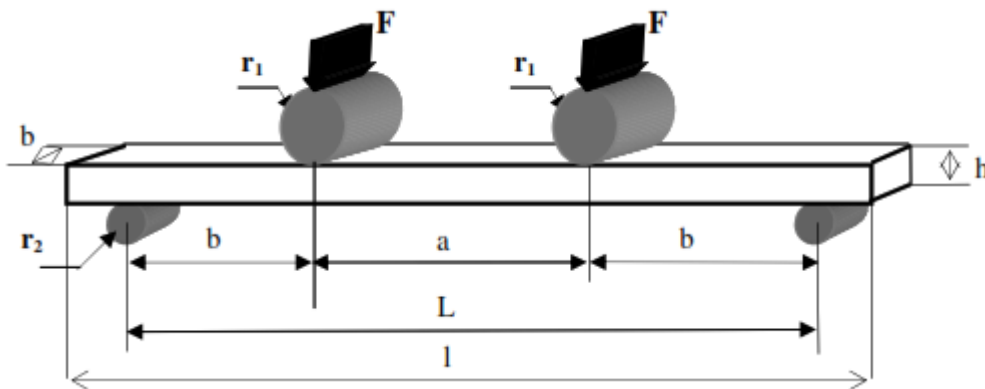
$$\tau = \frac{3F}{4bh} \quad (\text{II.24})$$

Avec :

- $F_r$  : Charge à la rupture ;
- $F$  : charge (en newtons) ;
- $L$  : Portée ;
- $b$  : Largeur de l'éprouvette ;
- $h$  : Epaisseur de l'éprouvette ;
- $a$  : Pêne de la partie rectiligne de la courbe effort-déformation  $a=F/y_c$  .
- $w$  : flèche de l'axe neutre.
- $y_c$  la flèche enregistrée lors de l'essai

Les dimensions des éprouvettes préconisées par la normalisation conduisent parfois à des ruptures en cisaillement. Ce type d'essai pénalise le matériau.

### II.2.3.2 Essais de flexion quatre points [22]



**Figure II.6 :** Dispositif d'essai et dimension de l'éprouvette en flexion 4 points.

Pour ce cas, avec  $L = 4b = 2a$ , nous avons de la flexion pure entre les deux panes de chargement, et on peut enregistrer la contrainte maximale de traction  $\sigma_{xx}$  à  $L/2$  et à  $-h/2$  selon l'expression :

## Chapitre II : Comportement mécanique des matériaux composite

$$\sigma_{xx} = \frac{3PL}{4bh^2} \quad (\text{II.25})$$

➤ Et le module de flexion

$$E_x = \frac{11PL^3}{64bh^3yc} \quad (\text{II.26})$$

### II.1.4 Essai dureté

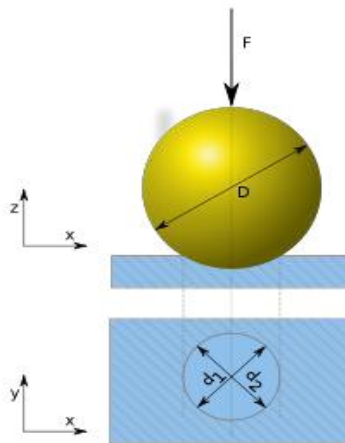
La dureté, de symbole général H, caractérise la capacité d'un matériau à résister au marquage (empreintes, rayures. . .). S'il y résiste bien, il est dit dur, sinon il est dit mou.

Elle peut être évaluée en mesurant une empreinte laissée en surface par un poinçon agissant sous l'action d'une force connue (essais Brinell, Vickers et Rockwell) mais aussi par une hauteur de rebondissement d'un objet très dur sur la surface à tester (essai Shore pour élastomères et plastiques). [23]

On parlera alors de :

#### II.1.4.1 Dureté Brinell (symbole HB)

L'essai consiste à faire pénétrer en appliquant une force F (un pénétrateur ayant une forme de bille diamètre D), généralement du carbure poli, dans un métal afin d'en déduire la dureté du matériau. Figure II.7.



**Figure II.7 :** Principe de la dureté Brinell.

La surface doit être plane et nettoyée (sans lubrifiant, oxyde ou calamine). Il est nécessaire d'avoir une épaisseur suffisante afin que la pénétration de la bille ne déforme pas le matériau.

## Chapitre II : Comportement mécanique des matériaux composite

Dans le cas contraire, la mesure ne serait pas fiable. Il faut une épaisseur d'au moins huit fois la profondeur  $h$  de l'empreinte. [23]

$$HB = \frac{2m}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{II.27})$$

Avec :

- HB = Dureté Brinell.
- $m$  = Masse appliquée. [Kgf], 1 [kgf] = 9,806 65 [N]
- $D$  = Diamètre de la bille. [mm]
- $d$  = Diamètre de l'empreinte laissée par la bille. [mm]

### II.1.4.2 Dureté Vickers (HV)

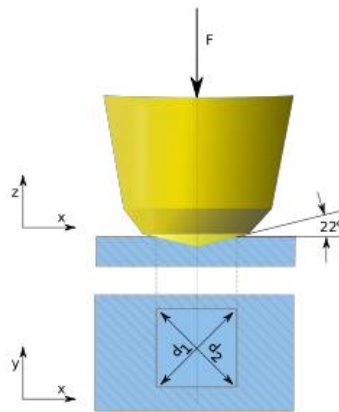
La mesure de dureté Vickers se fait avec une pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à  $136^\circ$ . (Figure II.8)

L'empreinte a donc la forme d'un carré ; on mesure les deux diagonales  $d_1$  et  $d_2$  de ce carré à l'aide d'un appareil optique. On obtient la valeur  $d$  en effectuant la moyenne de  $d_1$  et  $d_2$ . C'est  $d$  qui sera utilisé pour le calcul de la dureté. [23]

$$HV = \frac{2F \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{g \cdot d^2} \quad (\text{II.28})$$

avec :

- HV = Dureté Vickers.
- $F$  = Force appliquée [N]
- $d$  = Moyenne des diagonales de l'empreinte [mm]
- $g$  = Accélération terrestre. [ $\text{ms}^{-2}$ ] (9.80665)



**Figure II.8 :** Principe de la dureté Vickers.

Le degré de dureté, noté  $H_v$ , est ensuite lu sur un abaque (une table) ; il y a un abaque par force d'appui.

### II.1.4.3 Dureté Rockwell (HV)

Les essais de dureté Rockwell sont des essais de pénétration. Il existe en fait plusieurs types de pénétrateurs qui sont constitués d'un cône en diamant ou d'une bille en acier trempé poli. Pour obtenir une valeur de dureté Rockwell, on mesure une pénétration rémanente du pénétrateur sur lequel on applique une faible charge.

L'essai se déroule en trois phases :

- Application sur le pénétrateur d'une charge initiale  $F_0 = 98 \text{ N}$  (soit 10 kgf). Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur initiale  $I$ . Cette profondeur étant l'origine qui sera utilisée pour mesurer la dureté Rockwell ;
- Application d'une force supplémentaire  $F_1$ . Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur  $P$  ;
- Relâchement de la force  $F_1$ . et lecture de l'indicateur d'enfoncement.

La valeur de  $r$  étant l'enfoncement rémanent obtenu en appliquant puis en relâchant la force  $F_1$  :

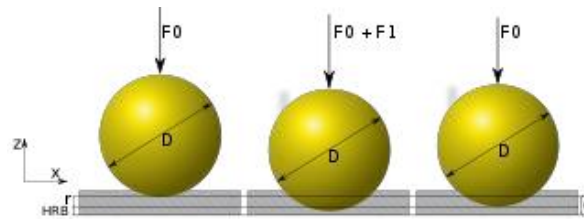
La valeur de dureté est alors donnée par la formule suivante :

- Échelle B, E et F :

$$HRB = 130 - r \quad (\text{II.29})$$

- Échelle C :

$$HRc = 100 - r \quad (II.30)$$



**Figure II.9 :** Principe de la dureté Rockwell (échelle B, bille en acier).

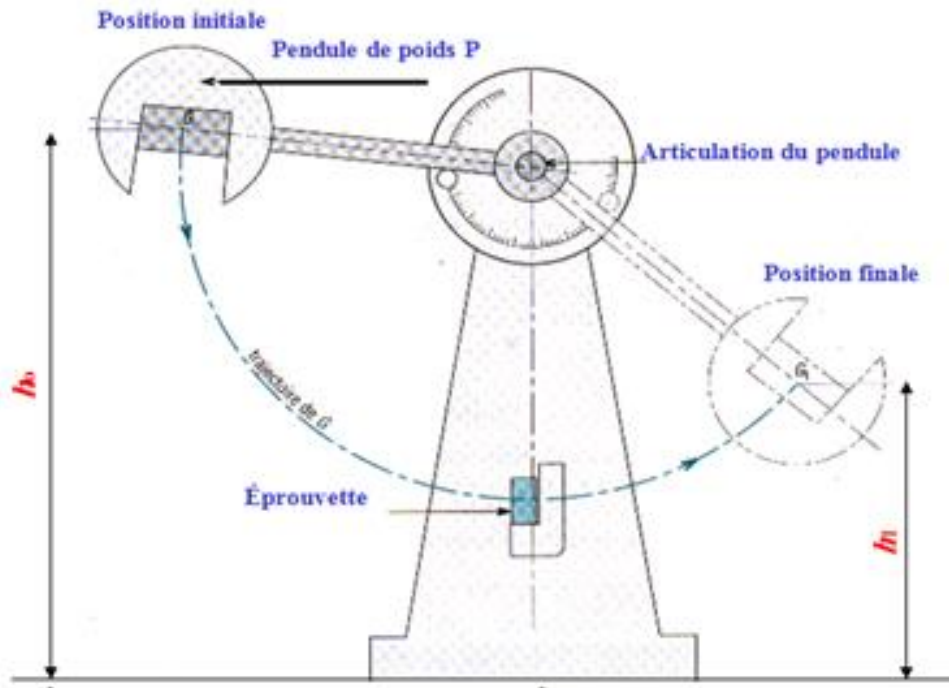
## II.2.2 Essai dynamique

### II.2.2.1 Essai de résilience (choc)

La résilience, de symbole général  $K$ , caractérise la capacité d'un matériau à absorber les chocs sans se rompre. Ce risque est amplifié aux basses températures. Elle est mesurée sur des machines du type Charpy (éprouvette sur deux appuis) ou Izod (éprouvette encastrée).

L'essai, qui est un essai comparatif entre matériaux, mesure l'énergie qu'il faut fournir à un pendule pesant pour briser une éprouvette entaillée du matériau à tester. [23] Figure II.10 L'énergie absorbée par l'éprouvette ( $W$ ) est égale à la différence des énergies potentielles du pendule entre le début ( $W_0 = P.h_0$ ) et l'arrivée ( $W_1 = P.h_1$ ) :

$$W = P.h_0 - P.h_1 = P(h_0 - h_1) \quad (II.28)$$



**Figure II.10:** Principe de l'essai de résilience. [23]

La résilience est égale au rapport de  $W$  sur l'aire de la section au droit de l'entaille.

Deux cas :

$$KCU \text{ ou } KCV = \frac{W}{S_0} \quad (\text{II.31})$$

### II.2.2.1 Essai de fatigue

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue, la modification des propriétés dû à l'application de cycle d'effort dont la répétition peut conduire à la rupture.

L'étude de ce phénomène est d'une grande importance car la contrainte de rupture en fatigue est très inférieure à celle de la rupture en traction, pour certains matériaux, cette contrainte peut même être inférieure à celle de la limite élastique. [24]

Il y a trois types d'essai de fatigue : traction compression, torsion alternée et flexion alternée (le plus classique) et flexion pure alternée.

Dans cet essai on a :

- L'amplitude maximale de la contrainte :

## Chapitre II : Comportement mécanique des matériaux composite

- La valeur moyenne de la contrainte :

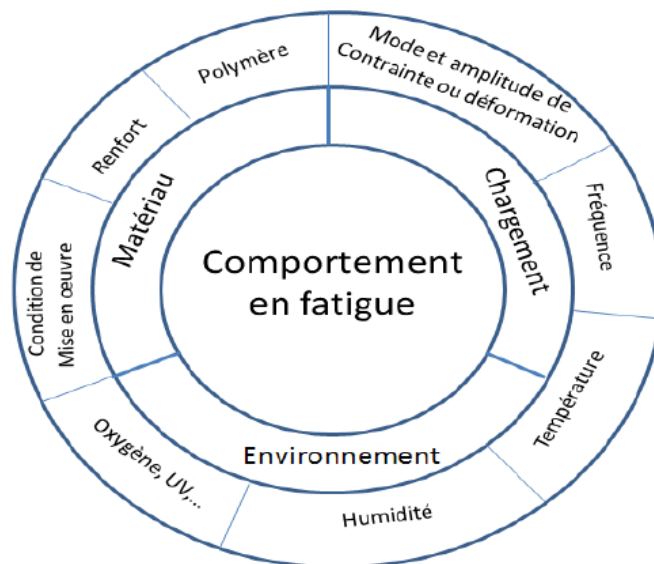
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (II.33)$$

- Le rapport des contraintes maximales et minimales (R)

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (II.34)$$

### Paramètres influençant sur la tenue en fatigue

Les paramètres les plus influençant sont liés au matériau, au chargement et à l'environnement. La figure II.11 montre bien cette influence.



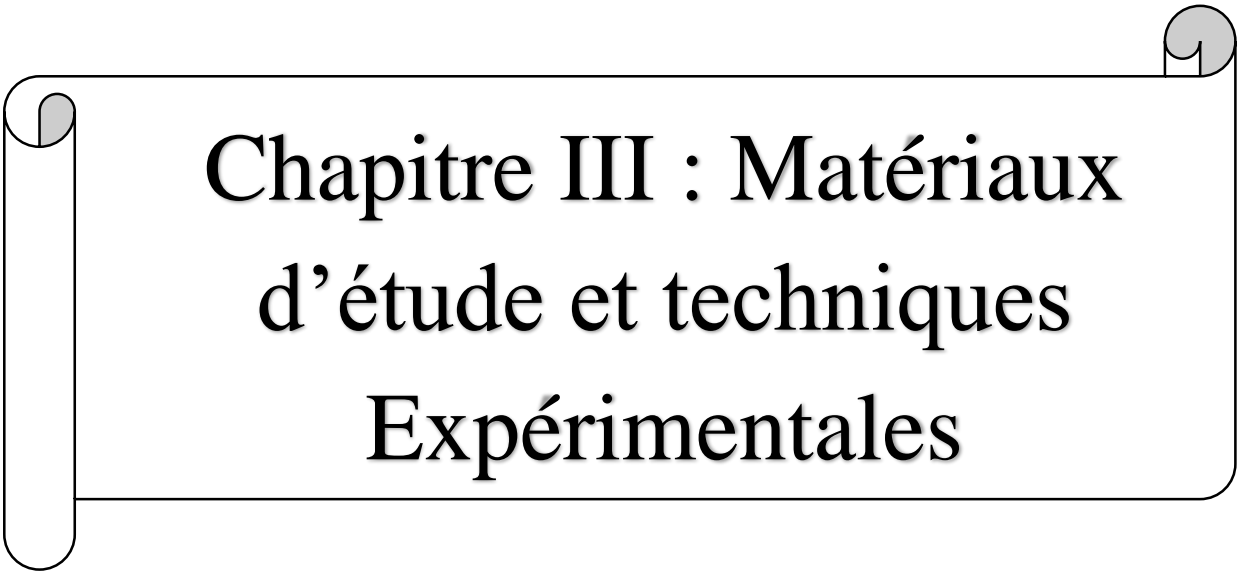
**Figure II.11** : Schéma illustrant l'influence des paramètres sur le comportement en fatigue.

### II. 3 : Conclusion

La caractérisation d'un matériau composite doit tenir compte de toutes les conditions et considérations afin de mieux définir son comportement exact (son rôle et ses performances).

Dans ce chapitre en a fait la connaissance de l'état d'endommagement d'une structure travaillante en matériaux composites est une nécessité largement reconnue, et ce tant pour des raisons de fiabilité, et par conséquent, en besoin de la réalisation ce qui est le but du chapitre qui suit.

# **Partie expérimentale**

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and rounded corners on the right, framing the text.

# Chapitre III : Matériaux d'étude et techniques Expérimentales

## **Chapitre III : Matériaux d'étude et techniques Expérimentales**

### **III.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous présentons les constituants de nos matériaux d'étude choisis et le mode d'élaboration adopté ainsi que les techniques expérimentales de caractérisations physicochimiques et mécaniques pour suivre le comportement de nos matériaux.

### **III.2. Matériaux et matériels utilisés :**

L'élaboration de nos matériaux s'est effectuée au niveau du laboratoire de génie des matériaux au département Génie Mécanique, l'université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou.

#### **III.2.1. Matériaux**

Dans cette étude, nous avons élaboré des matériaux sous forme de plaques constituées d'une résine époxy et une autre en résine, les autres ont été renforcés par une couche de fibres de verre type E sous forme de mat ( $600 \text{ g/m}^2$ ). Les éprouvettes seront découpées selon la norme AFNOR NF T57-105 à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté, à partir des plaques citées précédemment.

##### **III.2.1.1 résine époxy**

Les caractéristiques mécaniques des résines époxydes sont données au tableau III.1.

**Tableau III.1 :** Les caractéristiques mécaniques des résines époxydes

<b>Masse volumique</b>	1100 à 1500 Kg/m <sup>3</sup>
<b>Module d'élasticité en traction</b>	3 à 5 GPa
<b>Contrainte à la rupture en traction</b>	60 à 80 MPa
<b>Contrainte à la rupture en flexion</b>	100 à 150 MPa
<b>Allongement a la rupture en traction</b>	2 à 5 %
<b>Résistance au cisaillement</b>	30 à 50 MPa
<b>Température de fléchissement sous charge</b>	290 °C

## Chapitre III : Matériaux d'étude et techniques Expérimentales

Une résine époxy, nommée LORN Chemicals



Figure III.1. Résine Epoxy

a) La résine, b) le durcisseur

### III.2.1.2 Résine polyester

La résine utilisée est une résine polyester ortho phtalique de stratification de couleur bleu opaque,

Tableau III.2 : Les propriétés mécaniques des polyesters insaturés (UP)

<b>Module d'élasticité en traction</b>	2, 8 à 3,5 GPa
<b>Module d'élasticité en flexion</b>	3 à 4,5 GPa
<b>Contrainte à la rupture en traction</b>	50 à 80 MPa
<b>Contrainte à la rupture en flexion</b>	90 à 130 MPa
<b>Allongement à la rupture en traction</b>	2 à 5 %
<b>Allongement à la rupture en flexion</b>	7 à 9 %



Figure III.2 : résine polyester utilisée

### **III.2.1.3 Durcisseur**

C'est une substance qui augmente la vitesse d'une réaction chimique sans être consommé et sans modifier la position finale de l'équilibre thermodynamique de cette réaction. Le dosage à respecter pour ce catalyseur est de 1 à 2% en masse.



Figure III.3 : durcisseur résine polyester utilisée

### **III.2.1.4 Le renfort**

Dans cette étude nous avons utilisé les fibres de verre comme renfort.



Figure III.4 : Les files de verre (mat 600)

### **III.2.1.5 La cire**

Pour éviter que le matériau composite élaboré ne colle sur le moule, on enduit ce dernier d'une fine couche de cire.



Figure III.5 : La cire utilisée lors du moulage.

## **III.2.2. Le matériel d'élaboration**

### **III.2.2.1. Le moule**

Il est constitué d'une plaque de verre 450X370X5. Un cadre en bois qui délimite latéralement le moule.



Figure III.6 : Moules utilisés pour l'étude

### **III.2.2.3. La balance**

Nous avons utilisé une balance, pour peser nos mélanges.



Figure III.7 : Balance.

### **III.2.3. Etapes suivies pour l'élaboration du matériau d'étude**

Pour la préparation de notre matériau, nous avons suivi les étapes mentionnées ci-dessous pour l'élaboration

#### **III.2.3.1. Etapes suivies pour l'élaboration des plaques du matériau d'étude**

- 1ère étape : Préparation du moule et les couches de renforts.
- 2ème étape : Application de la cire.

### **Chapitre III : Matériaux d'étude et techniques Expérimentales**

- 3ème étape : Peser et mélanger soigneusement les résines avec leur durcisseur.  
Pour la résine Epoxy
  - 65% résine et 35% durcisseurPour la résine Polyester
  - 99% de résine et 1% durcisseur
- 4ème étape : Versement d'une quantité de la résine mélanger avec le durcisseur sur les moules sans renforts et une autre quantité sur le moule qui contient le renfort.
- 6ème étape : Laisser le matériau composite élaboré ainsi durcir le temps nécessaire.

#### **III.2.3.2 Etapes suivies après l'élaboration des plaques en matériaux d'étude**

Après un temps de repos de nos plaques de matériau d'étude, nous avons découpé des éprouvettes normalisées pour l'essai de flexion et l'absorption.

A - Le découpage s'est fait avec une scie circulaire diamanté.



Figure III.8 : une scie circulaire diamanté.

B- Un polissage de l'état de surface des échantillons a été mène à l'aide d'une polisseuse.

### Chapitre III : Matériaux d'étude et techniques Expérimentales



Figure III.9 : une polisseuse.

C- Traitement thermique de relaxation à 40°C, pendant 24 heures, des éprouvettes dans une étuve de marque MAMMERT.

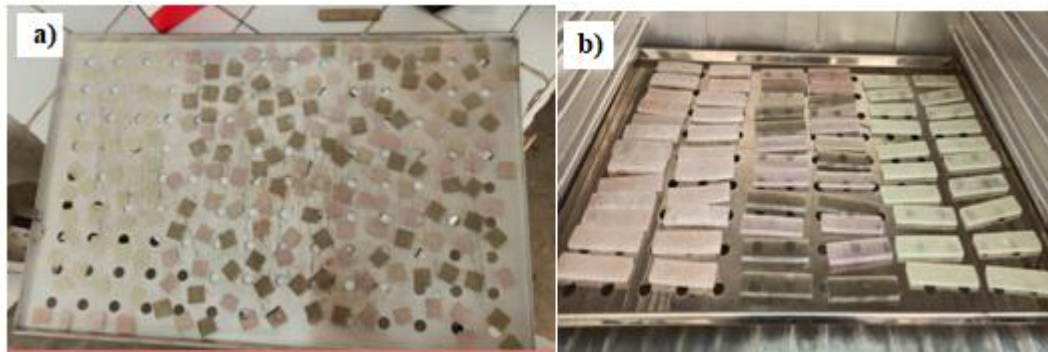


Figure III.10 : Traitement thermique étuve de marque MAMMERT.

a) Eprouvettes d'absorption, b) éprouvettes de flexion

D- Numérotation

Pour l'absorption

Tableau III.3 Numérotation Pour l'absorption

Code	Signification
RE	résine époxy
CE	Composite époxy
RP	résine polyester
CP	Composite polyester

## Chapitre III : Matériaux d'étude et techniques Expérimentales

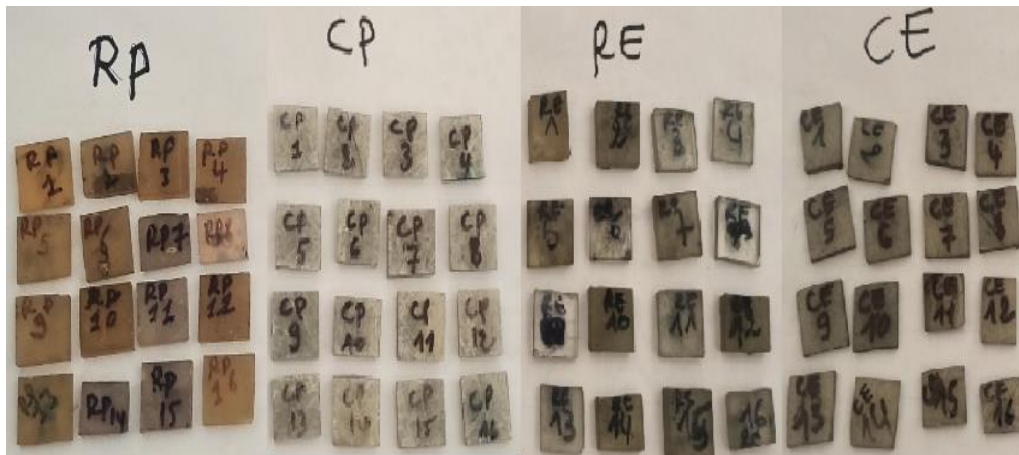


Figure III.11 Numérotation Pour l'absorption

Pour la flexion

Tableau III.4 Numérotation pour l'essai de flexion

Code	Signification
REF	résine époxy flexion
CEF	Composite époxy flexion
RPF	résine polyester flexion
CPF	Composite polyester flexion

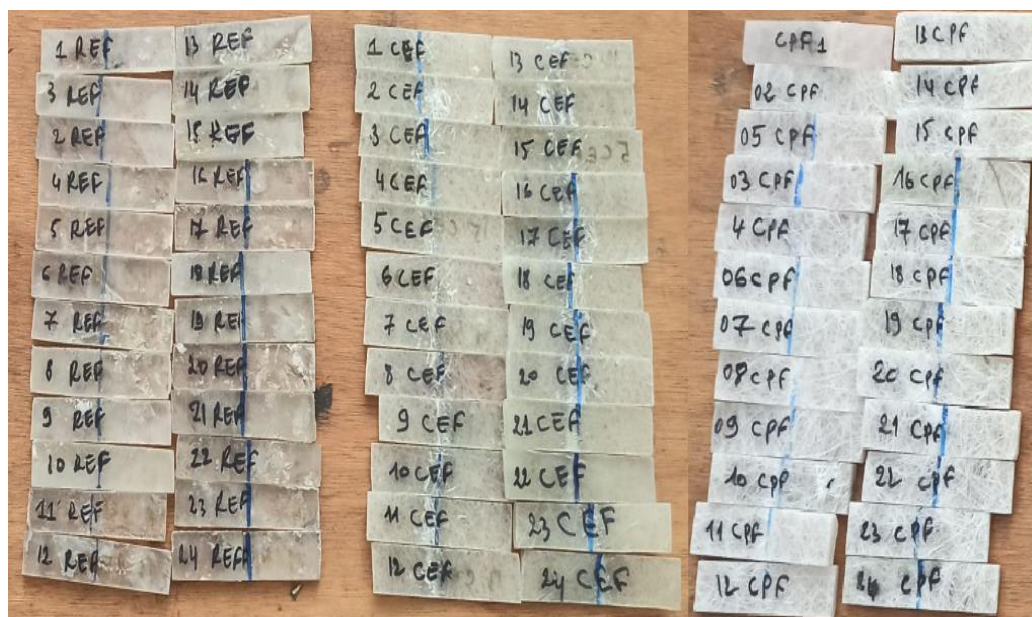


Figure III.12 Numérotation Pour la flexion

### Chapitre III : Matériaux d'étude et techniques Expérimentales

C- mettre les éprouvettes dans l'eau distillée, et puit dans l'étuve, à une température de 60°C.



Figure III.13 Eprouvettes dans l'eau distillée, dans l'étuve

D- mesurer chaque heure (6h) les éprouvette d'absorption après pour chaque 24h avec une balance sensible de précision  $10^{-5}$



Figure III.14 une balance sensible

### **III.3. Caractérisation du matériau composite**

Notre étude est une comparaison du comportement de deux résines thermodurcissable, l'époxy et le polyester. Nous voulons analyser l'influence du milieu sur le comportement

## **Chapitre III : Matériaux d'étude et techniques Expérimentales**

de ces matériaux. Les éprouvettes sont immergées dans l'eau distillée portée à 60° C. L'étude consiste en deux points

- La comparaison de l'absorption d'eau des deux matrices ainsi que des deux composites élaborés (résine + fibres de verre mat 600).
- La comparaison du comportement mécanique en flexion des deux matrices ainsi que des deux composites élaborés.

- l'immersion dans l'eau distillée a des conséquences sur l'état de surfaces des éprouvettes. La diffusion de l'eau dans la structure de la résine est du matériau composite sera analysée.

- Suivre l'évolution des caractéristiques de contraintes et de déformations en fonction du vieillissement et du milieu de vieillissement.

Pour ce faire, nous avons mené les caractérisations citées ci-dessous.

### **III.3.1 Caractérisation physique**

#### **III.3.1.1. Observation au microscopique optique [25]**

Le microscope est un instrument optique qui donne une image agrandie d'un objet. Il est constitué d'un banc optique dont une partie se trouve devant l'objet : l'éclairage, l'autre partie derrière l'objet pour l'observation. Ce banc doit être rigide et posséder tous les organes de centrage des pièces optiques.

L'objet est transformé en une image réelle à l'aide d'un objectif. L'image se forme au plan focal d'un oculaire qui va pouvoir en donner ensuite une image virtuelle située à l'infini. On peut déduire de ce simple schéma que le grossissement de l'appareil dépend non seulement des objectifs et des oculaires mais aussi des distances qui séparent les composants.

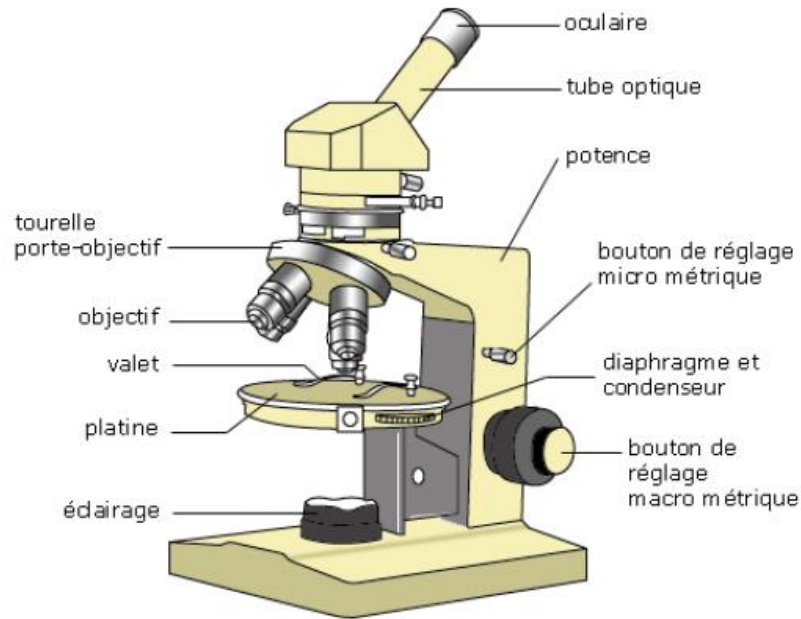


Figure III.15 : microscopique optique

### **III.3.2 Caractérisation chimique**

L'influence de l'absorption de l'eau distillée sur la structure de la résine est analysée. La diffusion de l'eau peut s'accompagner d'une augmentation de la masse de l'échantillon, comme elle peut être aussi accompagnée d'une perte de masse de l'échantillon.

#### **III.3.2.1. Absorption du milieu de vieillissement**

Les échantillons de matériau composite sont immergés dans l'eau distillée à une température déterminée (60°C). La masse d'eau absorbée est obtenue par la variation pondérale observée. Il est à noter qu'il n'est pas possible de transposer le pouvoir d'absorption d'eau de la résine seule et sur le comportement de la matière renforcée en raison de l'influence exercée par le renforcement de la fibre et par la mise en œuvre.

Cet essai s'effectue sur des temps longs, la durée pour atteindre un régime permanent se compte en semaines, voire en mois.

### **III.3.2. Caractérisation mécanique**

Les matériaux composites sont plus sollicités en flexion, c'est pour cela que nous avons opté à une caractérisation mécanique via l'essai de flexion trois points.

## Chapitre III : Matériaux d'étude et techniques Expérimentales

### III.3.2.1. Essai de flexion trois points [25]

L'essai de flexion est un test mécanique statique qui fait partie de la famille des essais indépendants du temps. La simplicité du montage de l'éprouvette et de sa géométrie, le rend facile à mettre en œuvre. Il nous permet d'extraire la contrainte et la flèche à la rupture ainsi que le module de Young en flexion. Pour cet essai on a opté pour la configuration essai de flexion trois points. La machine utilisée est une machine de traction IBERTEST (laboratoire pédagogique de Génie Civil UMMTO).

Tableau III.3 : dimensions (en mm) des éprouvettes de flexion trois points

Longueur l	Distance entre appuis L	Largeur B	Épaisseur h
80	60	15	4



Figure III.16 : Machine de flexion trois points.

#### III.3.2.1.1 Essai de flexion trois points

Cet essai consiste à imposer une déformation (ou flèche) à une éprouvette normalisée (barreau rectangulaire) placé sur deux appuis, à l'aide d'un poinçon se déplaçant à vitesse constante à une distance des deux appuis, puis on mesure la force qu'oppose l'éprouvette à cette déformation.

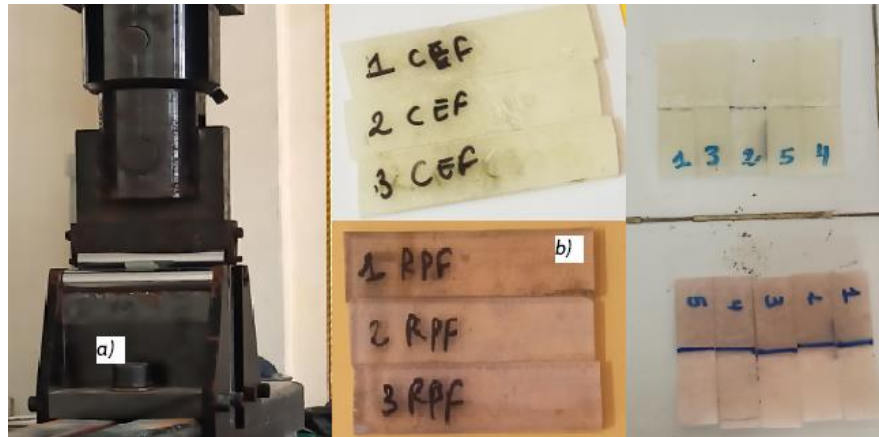


Figure III.17 Essai de flexion trois points a) Déroulement de l'essai b) éprouvette normalisée pour l'essai de flexion

#### **III.4. Conclusion :**

Pour suivre la variation du comportement mécanique de nos deux résines (Epoxy et Polyester) par rapport à un séjour prolongé en eau distillée et à la température de 60° C, nous avons vérifié la variation de la masse des échantillons en fonction du temps du séjour. Cela va nous permettre de déterminer la vitesse de diffusion ainsi que la durée nécessaire pour atteindre la saturation. L'essai de flexion trois points nous permettra de comparer les deux résines ainsi que les deux composites élaborés, connaître l'évolution de leurs caractéristiques mécaniques en fonction du temps du séjour dans l'eau distillée à 60° C.

Les résultats ainsi obtenu pour les deux résines et les deux composites seront donnés et discuté dans le prochain chapitre.



# Chapitre IV. Résultats et discussions

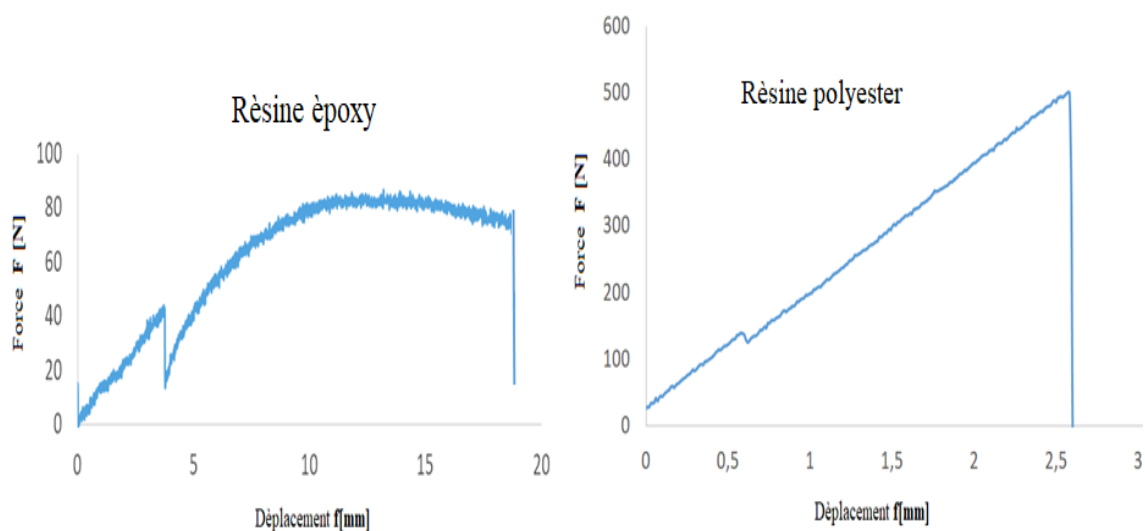
### IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter et discuter l'ensemble des résultats obtenus pour les différents matériaux réalisés dans le cadre de notre étude. Premièrement, nous commençons par les résultats issus des essais de flexions trois points, où nous exposons les différentes courbes qui seront par la suite discutés afin de comprendre le comportement mécanique et l'influence de type de résine, le vieillissement hygrothermique sur l'évolution de la force maximale [F] et le déplacement [f] durant le temps. Nous nous sommes intéressées aux résultats d'absorption de différents matériaux sans fibres et d'autres renforcés par des mats en fibres de verre. De plus, une étude comparative a été faite pour déduire quel est le meilleur matériau qui résiste mieux au vieillissement. Dix-neuf temps du vieillissement sont pris en considération,  $t_0$  (temps de référence), de vieillissement.  $t_{0.1}=1h$ ,  $t_{0.2}=2h$ ,  $t_{0.3}=3h$ ,  $t_{0.4}=4h$ ,  $t_{0.5}=5h$ ,  $t_{0.6}=6h$ ,  $t_1=24h$ ,  $t_2=48h$ ,  $t_3=72h$ ,  $t_4=96h$ ,  $t_5=168h$ ,  $t_6=192h$ ,  $t_7=216h$ ,  $t_8=240h$ ,  $t_9=264h$ ,  $t_{10}=336h$ ,  $t_{11}=384h$ ,  $t_{12}=432h$ ,  $t_{13}=552h$ ,

### IV.2. Résultat de la caractérisation mécanique par essais de flexion

#### IV.2.2 Résultats des essais de flexion pour éprouvettes en époxy et en polyester

Dans cette section, nous présentons les résultats des éprouvettes en matrice seule pour deux types de résines en époxy et en polyester. Le tableau IV.1 présente les caractéristiques mécaniques obtenues lors de l'essai de flexion. Les courbes force-déplacement enregistrées sont présentées par les figures IV.1. Les résultats des propriétés mécaniques obtenus après calcul sont présentés par des valeurs moyennes.

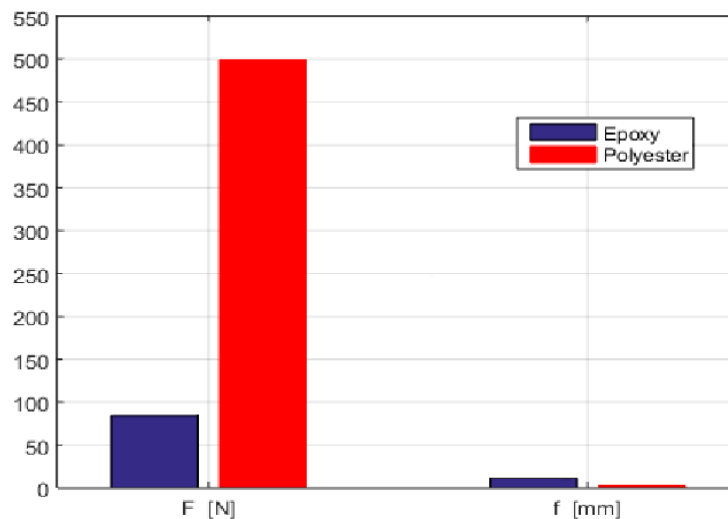


**Figure IV.1** : Courbes forces/flèche de résine non renforcée pour l'essai de flexion.

**Tableau IV.1** : Caractéristiques des éprouvettes en résine seule.

	Résine époxy	Résine polyester
<b>Force F[N]</b>	84.53	499.49
<b>Flèche f [mm]</b>	11.13	2.58

D'après la figure IV.I, nous remarquons que l'allure de la courbe de flexion trois point pour les deux résines n'est pas similaire. Nous pouvons constater que, la courbe de la résine époxy se caractérise par trois zones caractéristiques : - une zone considérée comme quasi-linéaire correspondant au comportement élastique de l'éprouvette ; - une zone non-linéaire associée à l'apparition de la déformation plastique et de l'endommagement et une zone de rupture, représentée par la chute libre des caractéristiques mécaniques du matériau (rupture brutale). Par contre, l'allure de la résine polyester présente seulement deux zones. Une zone linéaire associée au comportement élastique et une zone de rupture ce qui indique que le comportement de la résine est fragile, contrairement au comportement de la résine époxy qui est ductile.

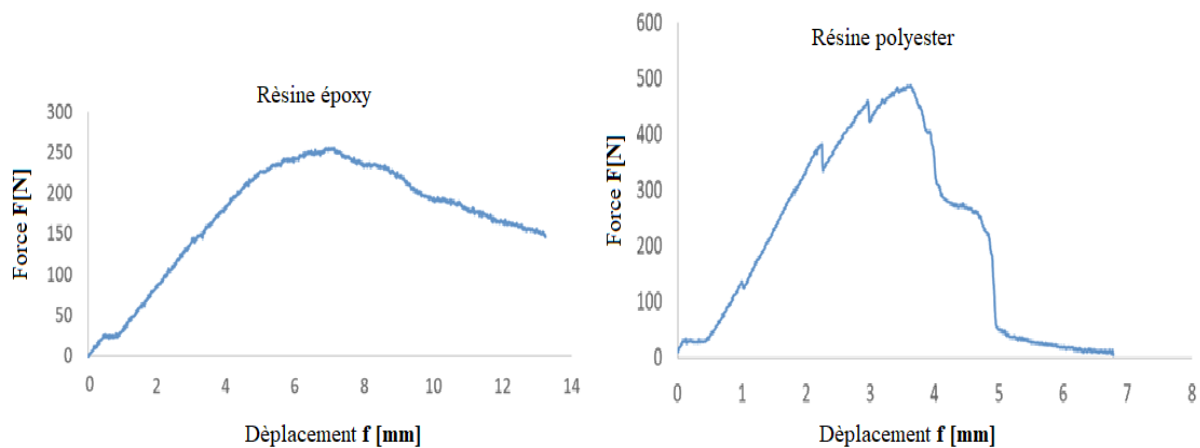
**Figure IV.2** : Présentation comparative de la force ( $F_{max}$ ) et le déplacement ( $f_{max}$ ) pour les deux résines

Selon la figure IV.2, Nous notons aussi que la valeur de la force maximale de la résine polyester (499.49 N) est supérieure à celle de la résine époxy (84.53 N) et l'inverse à signaler concernant le déplacement. Afin de vérifier l'efficacité de la jonction des fibres de verre sous forme de mat

cette étude est suivie pas les mêmes essais de flexion sur des éprouvettes contenant une couche de mat de 600 g/m<sup>2</sup>. Les résultats obtenus sont présentés ci-après.

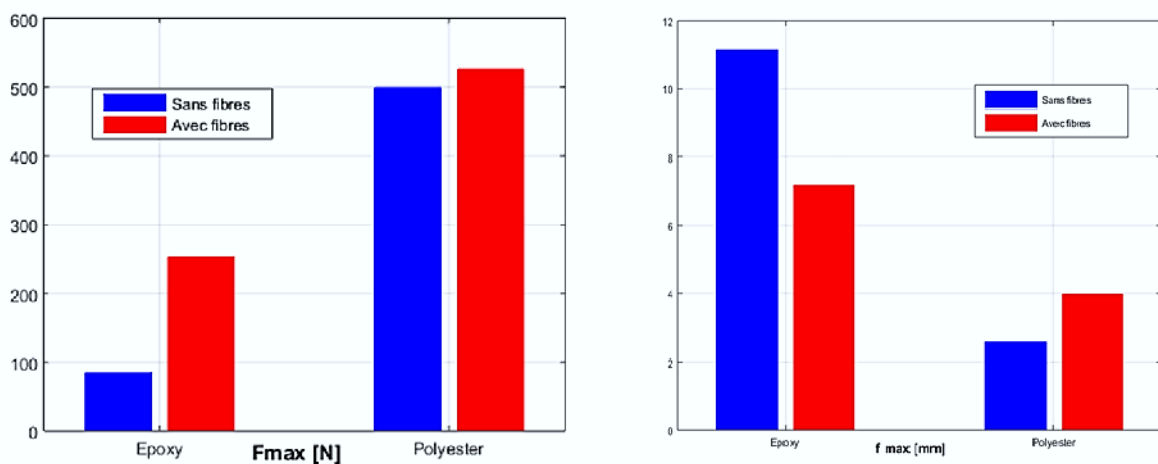
- **Influence du renfort sur les caractéristiques mécaniques en flexion**

Les courbes force –déplacement enregistrées pour les composites en fibres de verre sont présentées par la figure IV.3.



**Figure IV.3 :** Courbes forces/flèche des composites pour l’essai de flexion.

Nous constatons à partir de la figure IV.3 que l’allure de la courbe des éprouvettes de composite en résine époxy presque c’est la même sauf que la zone correspondante au domaine plastique est réduite par rapport à celle de la résine seule. Concernant le composite à résine polyester nous avons remarqué que son comportement est semi fragile et qui est modifié par le renforcement par des fibres de verre.



**Figure IV.4 :** Présentation comparative de la force (Fmax )

et le déplacement (f max ).

La comparaison des valeurs de forces et flèches maximales obtenues présentées par la figure IV.4 montrent une augmentation des valeurs maximales de composite à matrice polyester (amélioration de 5,35% pour la Fmax et plus de 53% pour f max), une valeur importante a été enregistrée pour le composite époxy (3 fois supérieure à celle de la résine seule) qui peut être expliqué par l’effet du renforcement. Néanmoins l’inverse est à signaler concernant le déplacement.

Afin de suivre la variation de ces caractéristiques en fonction du vieillissement hygrothermique cette étude à été suivie par des essais mécaniques effectués sur des éprouvettes vieilles dans l’eau distillée à une température de 60°C pour des temps différents.

**IV.2.3. Résultats des essais de flexion pour éprouvettes vieilles**

Dans cette section, nous exposants les différentes courbes des matériaux vieillis en résine seule et renforcés par fibres de verre afin de monter l’effet du vieillissement sur les propriétés d’usage du matériau. Les figures IV.5 jusqu’à IV.8, présentent consécutivement les courbes force/flèche pour l’essai de flexion des matériaux : résine époxy (Re), composite à matrice époxy (Ce), résine polyester (Rp) et composite à matrice polyester (Cp). Les deux grandeurs tirées sont

Temps [h]	Résine époxy				Résine polyester			
	Force [N]		Fleche [mm]		Force [N]		Fleche [mm]	
	Re	Ce	Re	Ce	Rp	Cp	Rp	Cp
0	84.53	253.33	11.13	7.17	499.49	526.26	2.58	3.97
24	1.0720	0.6554	1.0234	1.2169	0.5816	0.6211	1.3275	0.7267
48	0.9707	0.4217	0.8446	1.3124	0.7336	0.6904	1.5504	0.8161
72	0.5773	0.5965	0.7749	0.9919	1.1252	0.8897	1.7132	0.8161
96	0.7394	0.6246	0.7421	1.2490	0.8768	0.8715	1.7035	0.8010
168	0.4448	0.5070	0.9569	1.1139	0.3361	0.3880	1.1027	0.5856
192	0.8033	0.5928	0.8410	1.0056	0.2500	0.7525	0.6841	0.8438
216	0.3330	0.5625	0.2588	0.9191	0.4644	0.6015	1.4167	0.6801
240	3.4071	1.2532	0.6074	0.8015	0.7653	0.7070	1.4457	0.9005

récapitulées dans le tableau IV.2.

**Tableau IV.2 :** Caractéristiques des éprouvettes en flexion de différents matériaux.

A partir des figures ci-après, nous remarquons que l’allure n’est pas la même et une diminution les valeurs des caractéristiques avec le temps et une dispersion pour le même lot.

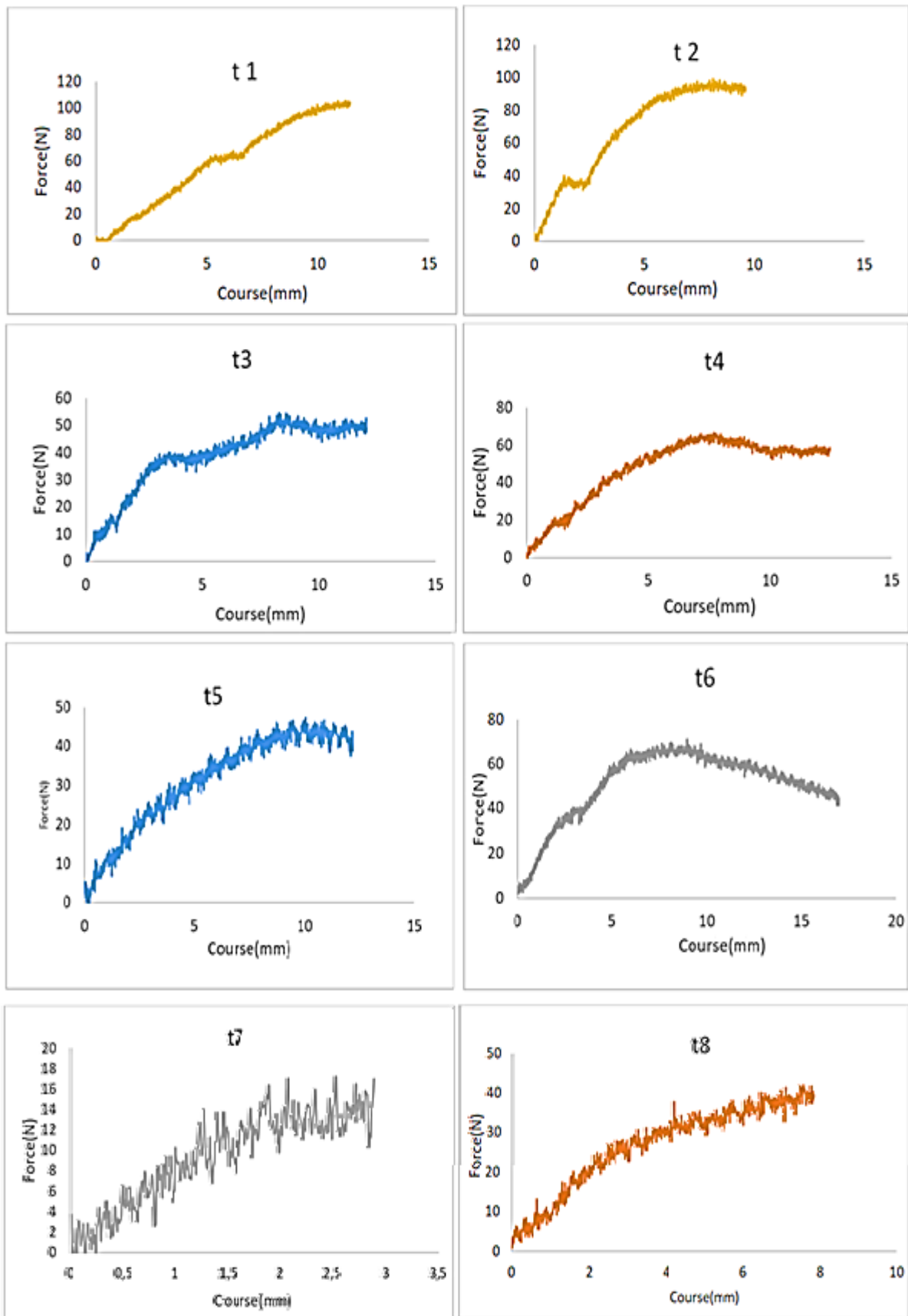


Figure IV.5: Courbes forces/flèche de la résine époxy vieillie en flexion.

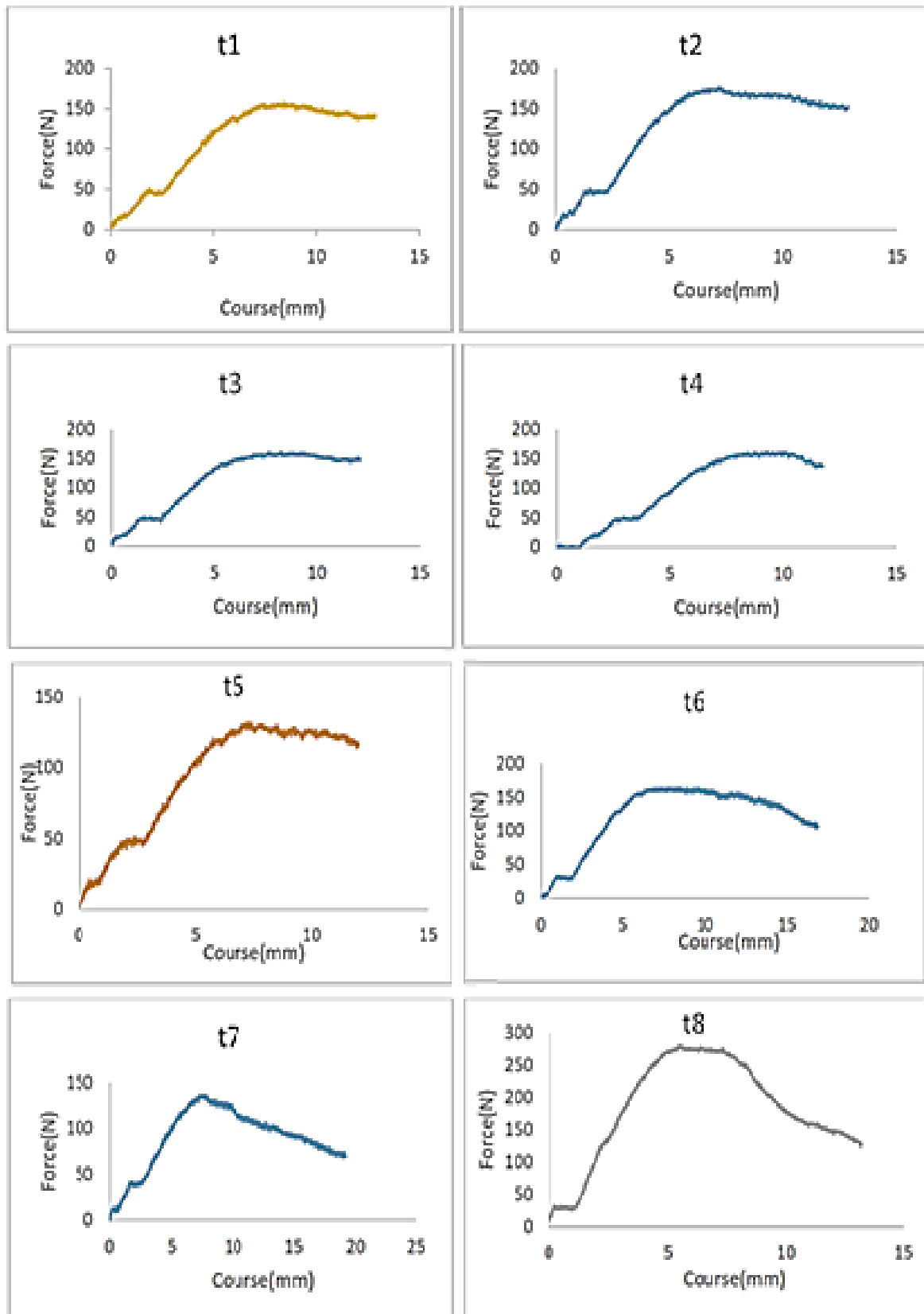


Figure IV.6: Courbes forces/flèche du composite en résine époxy vieillie en flexion.

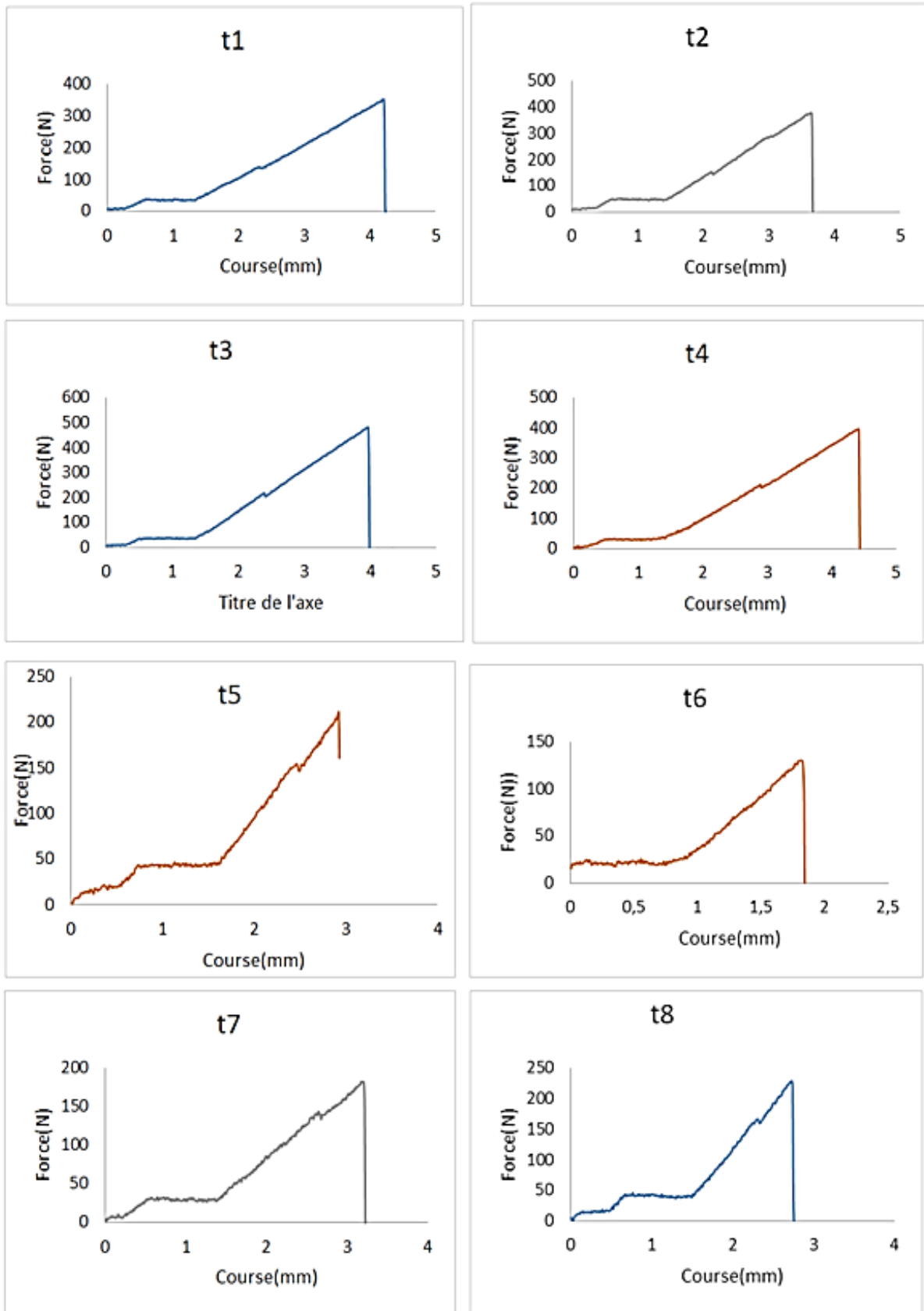


Figure IV.7: Courbes forces/flèche de la résine polyester vieillie en flexion.

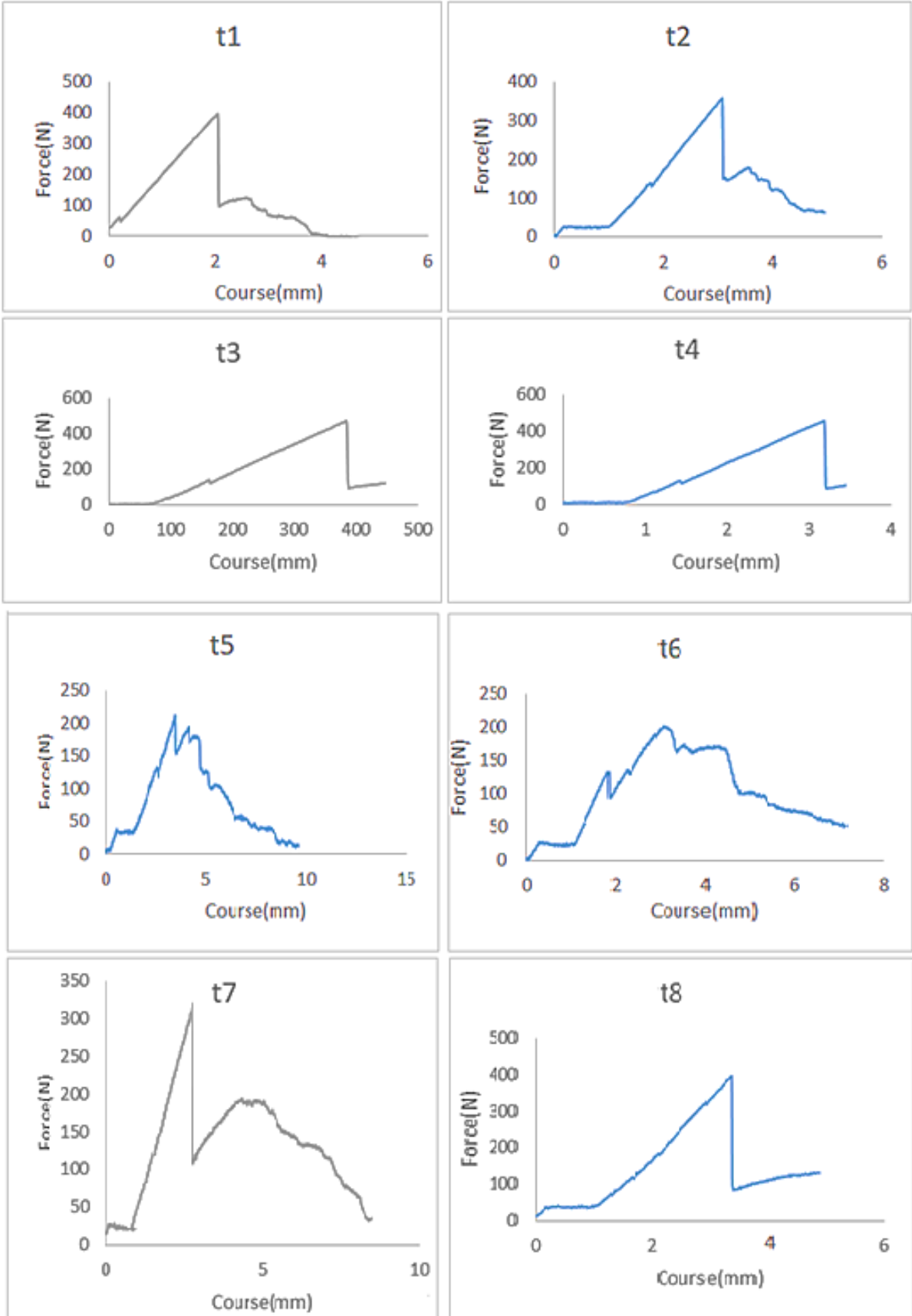


Figure IV.8: Courbes forces/flèche du composite en polyester époxy vieillie en flexion.

Afin de d'évaluer le comportement de nos matériaux une représentation adimensionnelle de la variation des caractéristiques mécaniques en fonction du temps est illustrée par les figures IV.9 - IV.10.

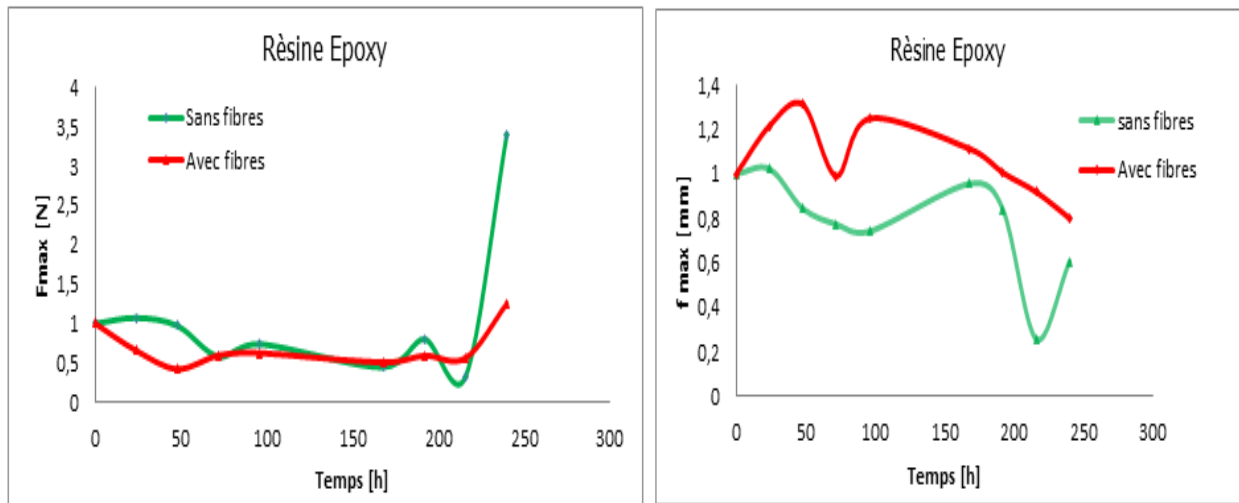


Figure IV.9 : Présentation adimensionnelle de la variation des propriétés mécanique des matériaux pour la résine époxy en fonction de temps.

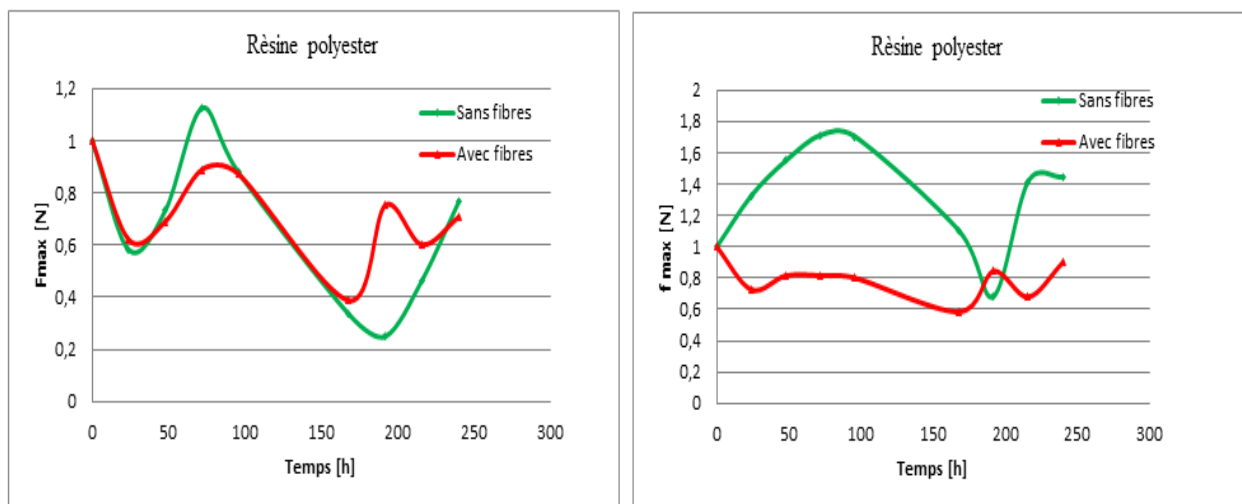


Figure IV.10: Présentation adimensionnelle de la variation des propriétés mécanique des matériaux pour la résine polyester en fonction de temps.

Selon les figures IV.9 et IV.10, nous constatons une diminution brutale des caractéristiques avec le temps de vieillissement. Nous observons la chute de toutes les caractéristiques pour les matériaux en époxy ( 3%  $F_{max}$  de Re, 15% de  $f_{max}$  de Re, 58%  $F_{max}$  de Ce), inversement à la flèche  $f_{max}$  qui a augmenté pour le composite epoxy (Ce). Par contre pour la résine polyester, nous constatons que la force  $F_{max}$  diminue et elle est inversement proportionnelle au

déplacement. La diminution des propriétés mécaniques se dégrade en fonction du temps à cause de la quantité de l'eau distillée qui pénètre dans le matériau. 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. L'eau diffuse dans le matériau à travers la matrice le long de la fibre (interface fibre-matrice) par présence de micro vides, les fibres jouent un rôle d'écran ce qui peut entraîner une dégradation de l'interface, diminuant ainsi les caractéristiques mécaniques du matériau (voir figure IV.10).[26] .

### **IV.3. Résultat de la caractérisation physico-chimique**

Nous nous sommes également intéressés à étudier la cinétique d'absorption de l'eau distillée à une température de 60°C des échantillons pour chaque résine, où nous avons pesé le poids initial d'échantillons avant de les mettre dans l'eau distille et après se sont repesées pour chaque durée de temps pendant 15 jour.

La détermination de la cinétique d'absorption d'eau du matériau étudié consiste à suivre l'évolution de la masse des échantillons immergés dans de l'eau en fonction du temps. Nous déduisons par un simple calcul la teneur massique d'absorption (W %) par l'équation IV.1. Dans le but de définir la cinétique et le taux d'absorption de notre matériau.

La teneur massique d'absorption W (en %) est donnée par l'équation (IV.1).

$$W (\%) = \frac{M - M_0}{M_0} \cdot 100 \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

- M : la masse de l'échantillon immergé dans le solvant à l'instant t.
- $M_0$ : la masse initiale de l'échantillon avant l'immersion.

Les résultats de l'évolution du taux d'absorption d'eau distillée en fonction du temps obtenus sont présentés par la figure IV.11, IV.12, IV.14 et IV.15.

#### **IV.3.1. Résultats de la cinétique l'absorption pour les matériaux en résine époxy**

Nous remarquons que l'allure des courbes d'absorption des matériaux en résine époxy est la même pour tous les échantillons. Chaque courbe se caractérise par une prise de poids au cours de temps jusqu'à atteindre l'équilibre, puis commence à diminuer (voir figure IV.11 et IV.12).

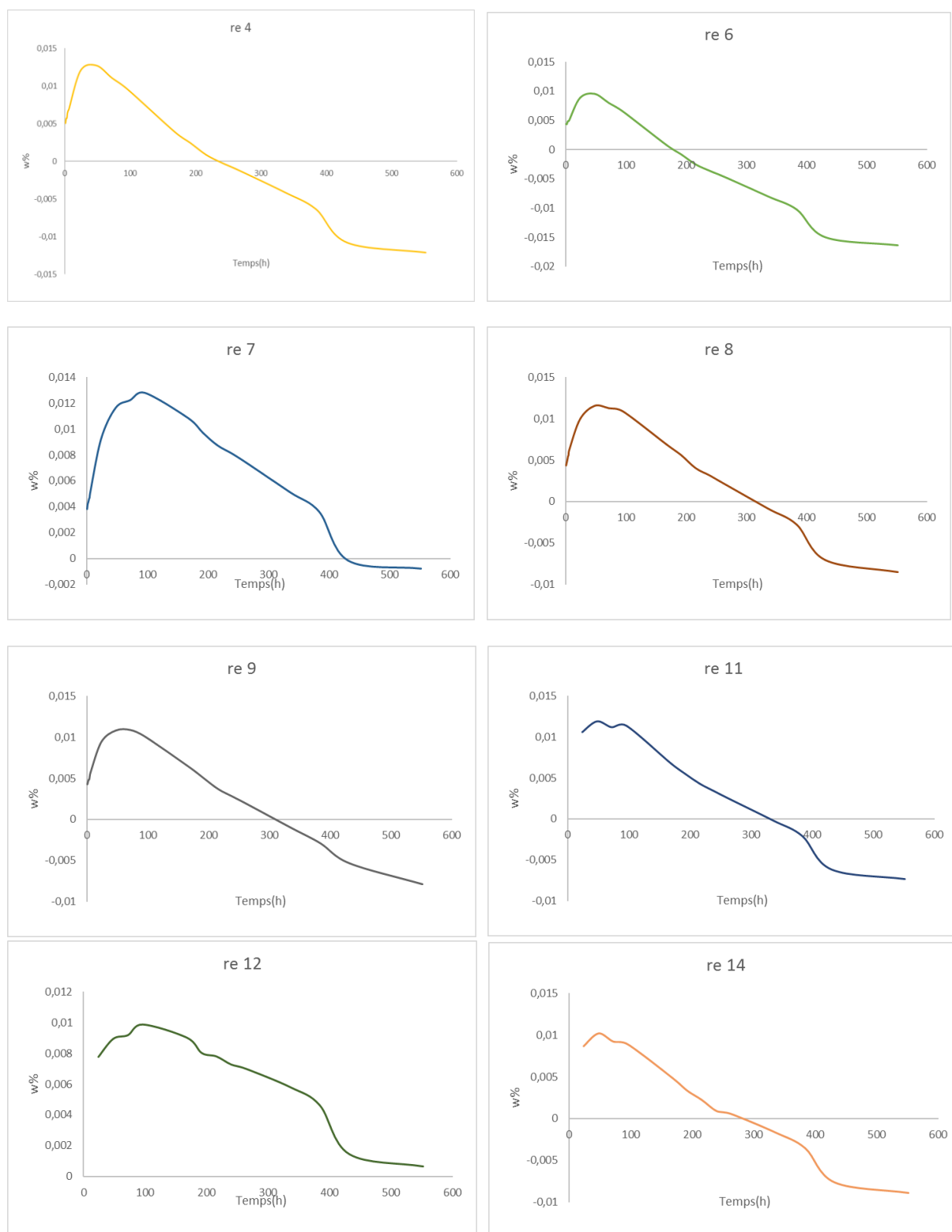


Figure IV.11 : L'évolution du taux d'absorption en fonction du temps de la résine époxy.

• Composite en résine époxy

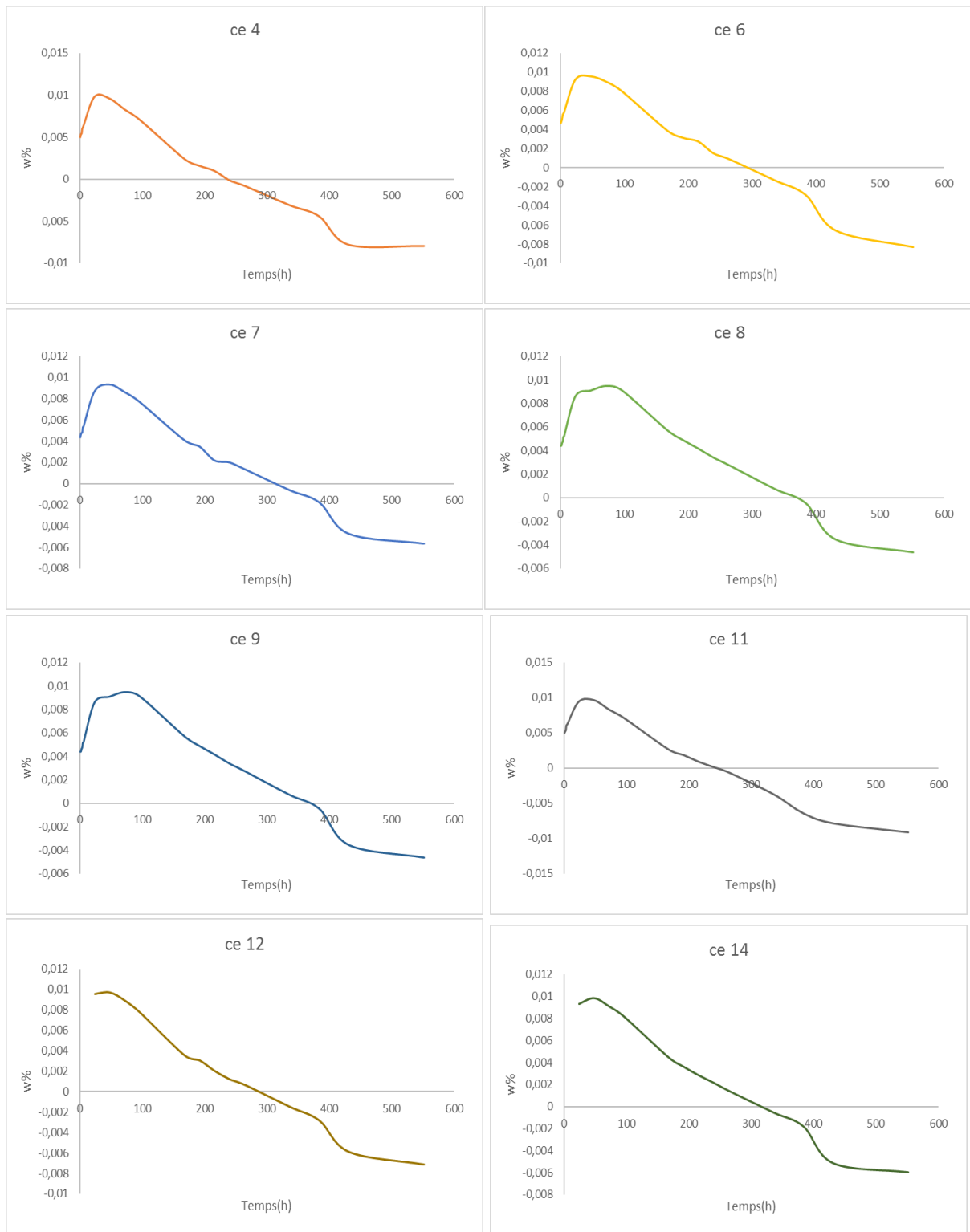
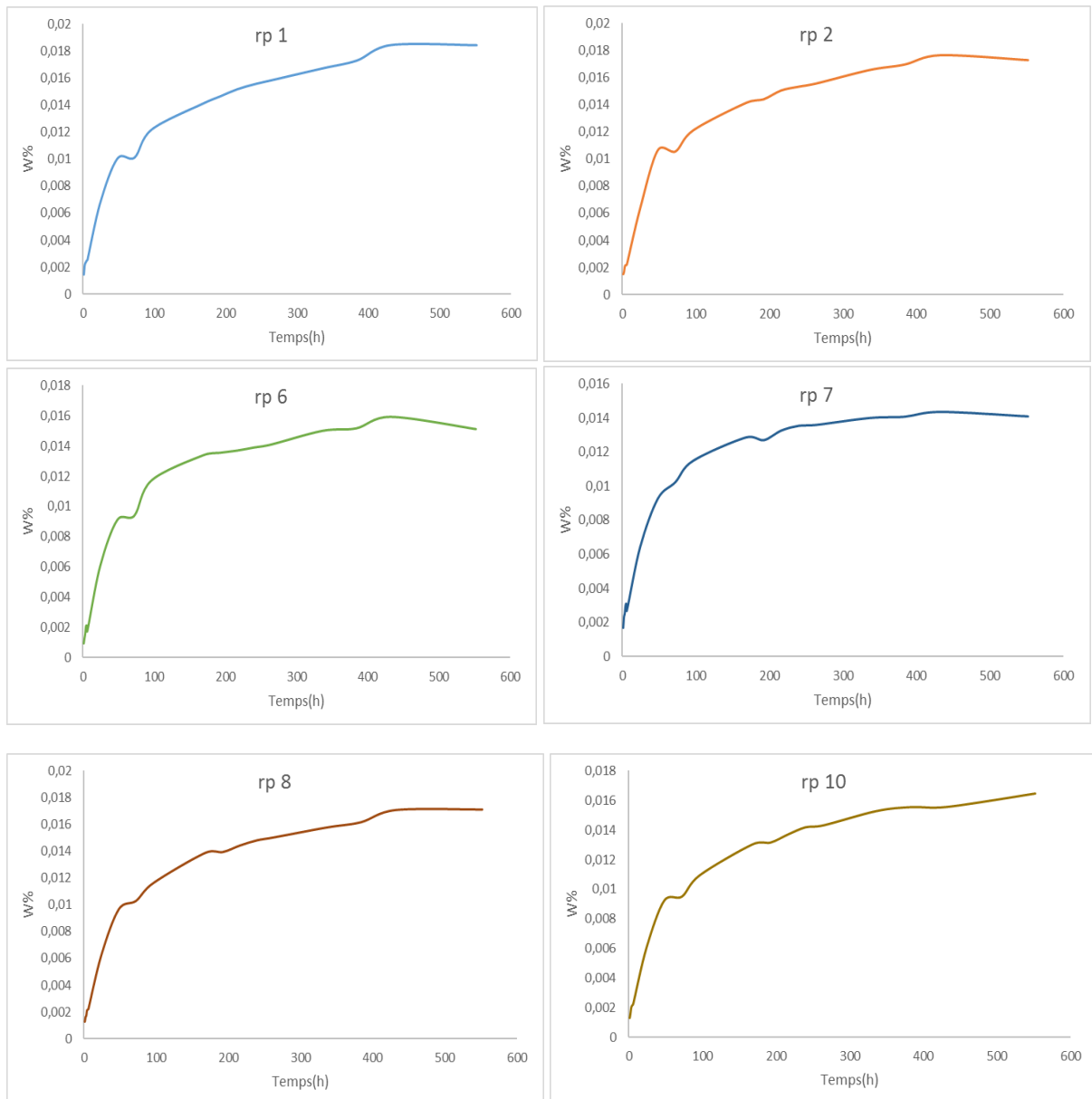


Figure IV.12 : L'évolution du taux d'absorption en fonction du temps du composite époxy.

### IV.3.2. Résultats de la cinétique l'absorption pour les matériaux en résine polyester



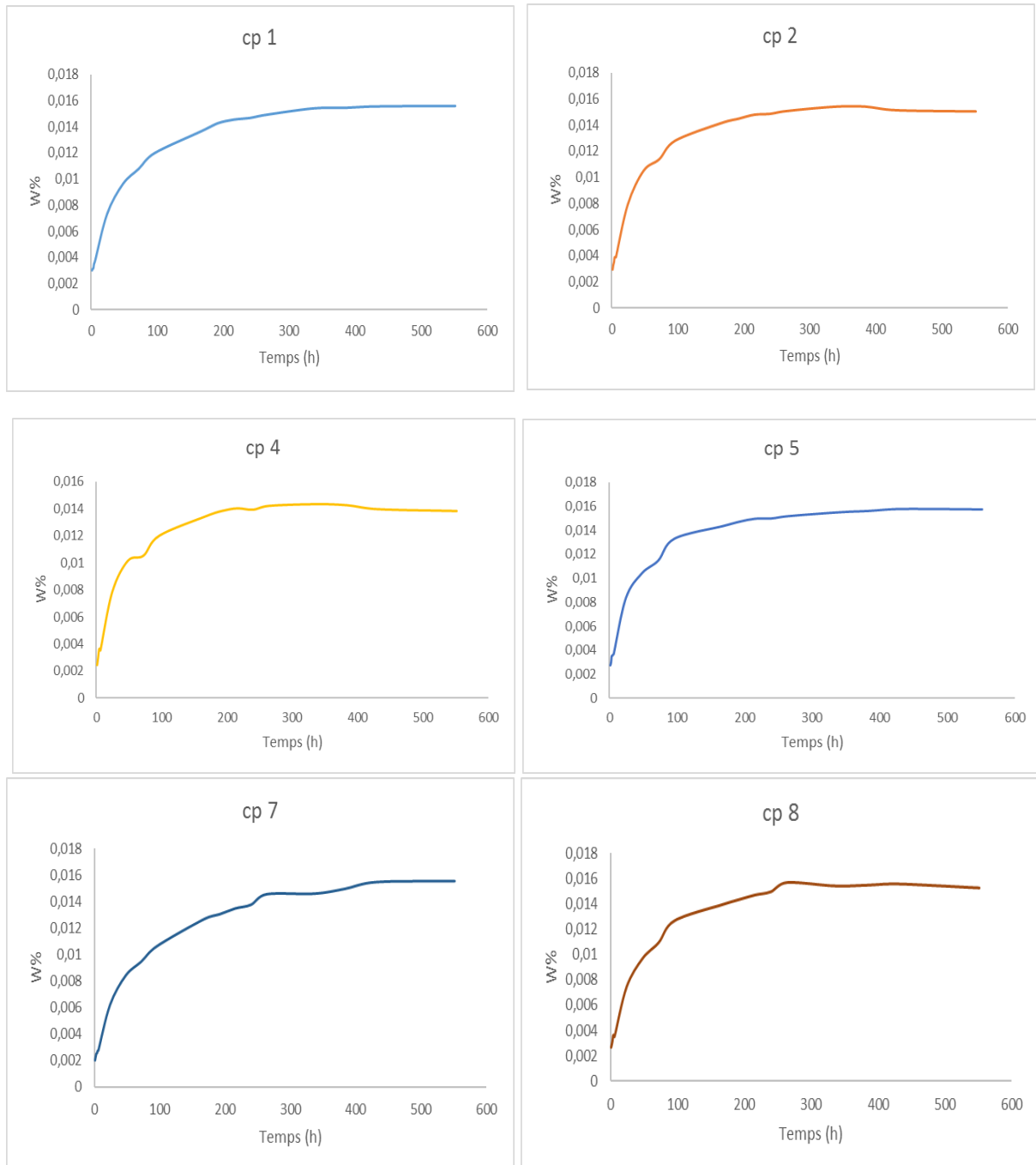
**Figure IV.13 :** L'évolution du taux d'absorption en fonction du temps de la résine polyester.

La cinétique d'absorption d'eau illustrée par les diagrammes de la figure IV.13 et IV.14 des matériaux en résine polyester montrent qu'après l'augmentation linéaire au départ, la prise en masse connaît un ralentissement « pseudo-palier de saturation ». Ces courbes font apparaître deux parties distinctes : - la première partie peut être approchée par une droite, elle correspond au régime transitoire de diffusion, cette dernière se fait à une vitesse rapide par rapport à la

deuxième partie. La diffusion se fait avec une certaine vitesse, qui est caractérisé par la pente de la droite qui définit le coefficient de diffusion  $D$  ; - la deuxième partie, où l'équilibre est atteint,

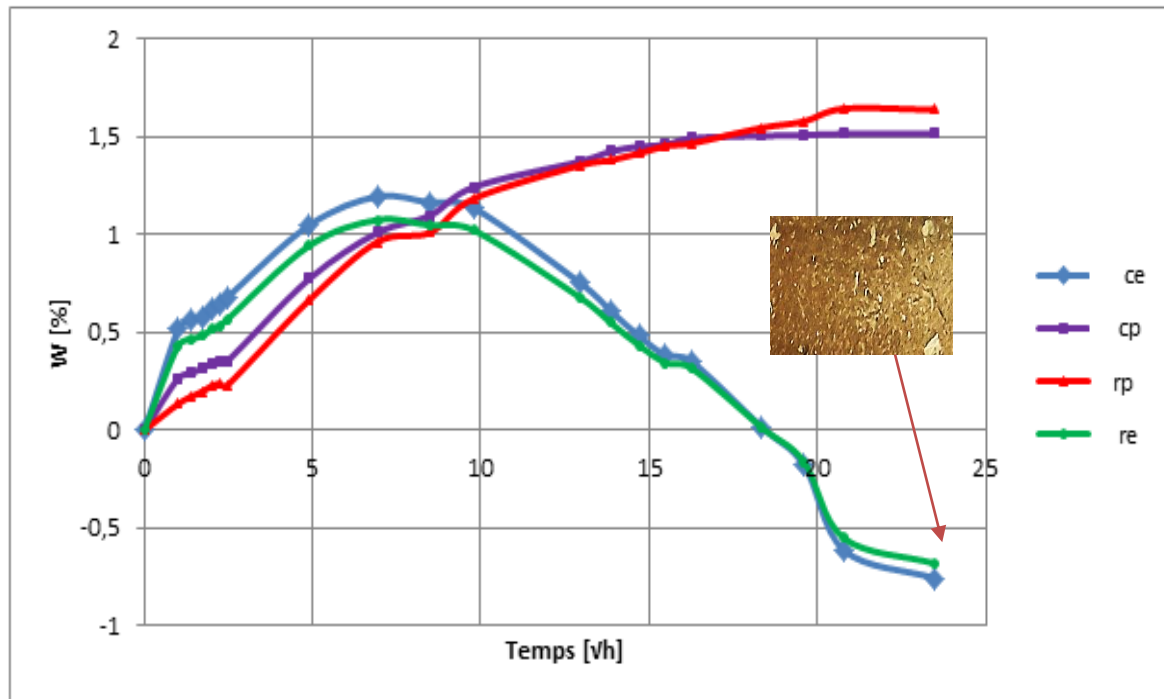
Peut-être approchée par une droite parallèle à l'axe des abscisses, elle correspond à la saturation (régime permanent de diffusion).

• **Composite en résine polyester**



**Figure IV.14 :** L'évolution du taux d'absorption en fonction du temps du composite polyester.

Les courbes moyennes de la cinétique d'absorption d'eau distillée à température de 60° de différents lots sont illustrées par la figure IV.15 qui représente l'évolution du taux d'absorption en fonction du temps pour différents lots.



**Figure IV.15.** Courbes d'absorption moyennes des échantillons de différents lots dans l'eau distillée.

Selon la figure IV.15, nous constatons que la prise en masse n'est pas la même pour les deux résines. La cinétique de diffusion est fickienne concernant la résine polyester et celle renforcée par de fibres de verre, par contre est non fickienne pour la résine époxy et composite époxy. La chute en masse se traduit par le largage de matière, où nous avons trouvés des particules au fond du récipient (voir figure IV.15). Nous avons remarqué que la prise de masse est supérieure pour les deux composites et plus rapide au début, ce qui pourrait s'expliquer par la présence des fibres qui favorise l'absorption.

La saturation est atteinte plutôt dans le cas de composites en polyester (336h) renforcé par des fibres de verre (voir figure IV.16). Par contre, la saturation commence à 432 h pour la résine polyester avec une valeur importante (1.64% W) cela est dû peut-être à la diffusion de l'eau diffuse dans le matériau à travers la matrice par présence de micro vides.

Les valeurs de taux d'absorption W(%) et coefficient de diffusion V de différents lots tirées de ces courbes sont regroupées au tableau IV.3.

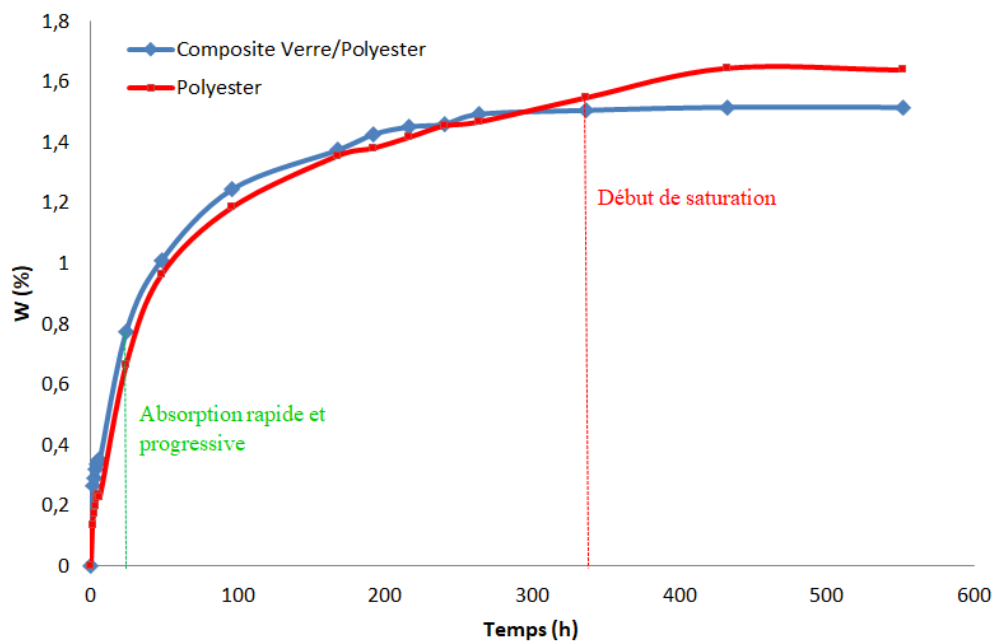


Figure IV.16: Courbe d'absorption moyenne des matériaux en polyester.

	Résine polyester (wrp)	Composite verre/polyester (wcp)	Résine epoxy (wre)	Composite verre/epoxy(wce)
W [%]	1.64	1.49	1.07	1.19
V [%/√h]	0.022	0.021	0.022	0.031

Tableau IV.3 : Taux d'absorption (W) et coefficient de diffusion (V) de différents lots.

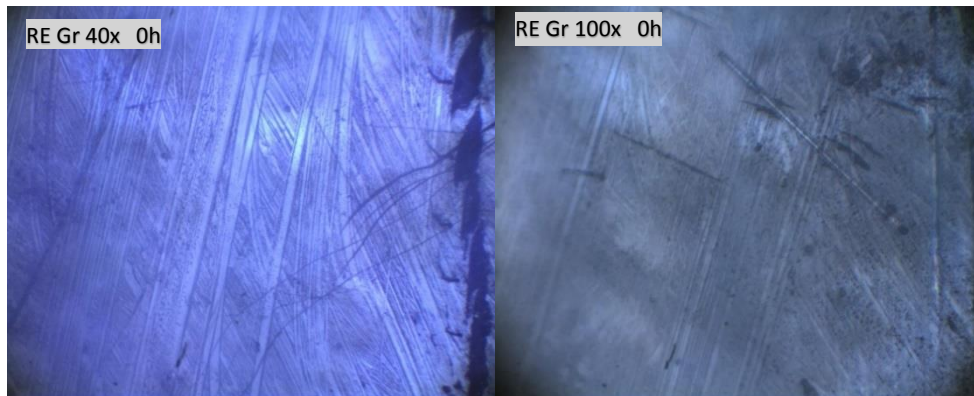
Nous pouvons conclure que, le type de la résine et les fibres influe sur la cinétique d'absorption du matériau. Malgré que le taux d'absorption soit le moins important pour la résine époxy reste la plus sensible au vieillissement dans l'eau distillée.

#### IV.4. Analyse au microscope optique

Afin de voir l'état de surface et l'effet de la diffusion de l'eau dans la structure, des observations au microscope optique ont été menées avant et après le vieillissement hygrothermique dans l'eau distillée à 60°C.

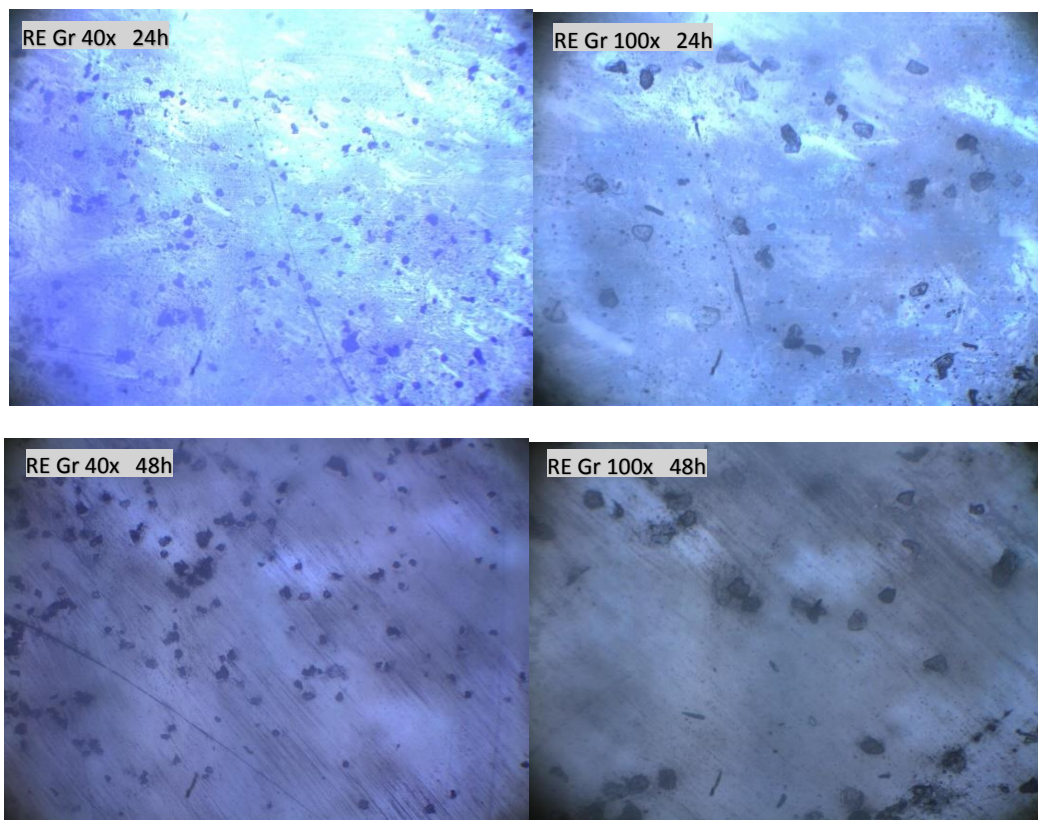
**IV.4. 1. Analyse au microscope optique des échantillons en résine époxy**

- **Avant l'absorption des échantillons en résine seule**

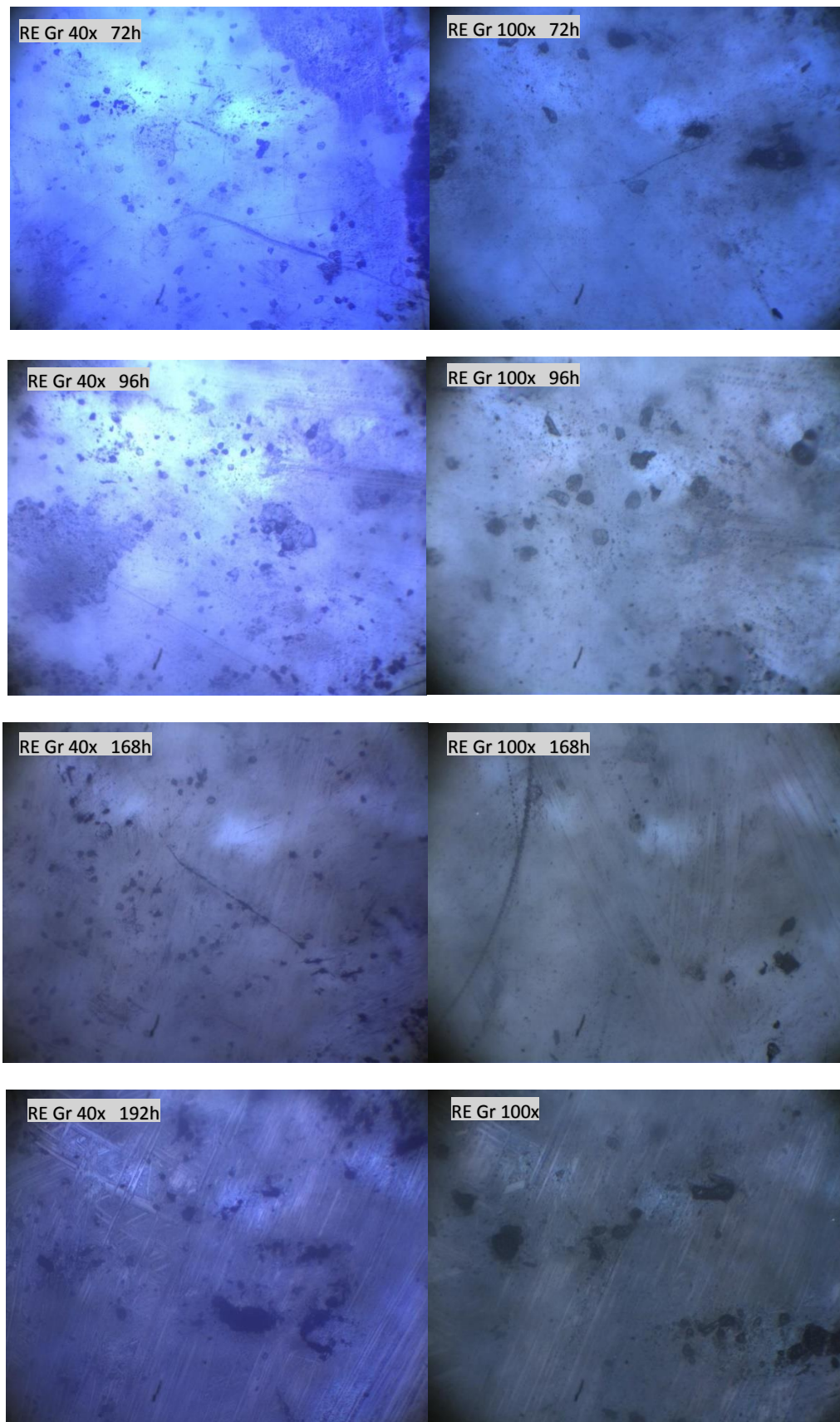


**Figure IV.17:** Micrographies des échantillons en résine époxy seule avant vieillissement.

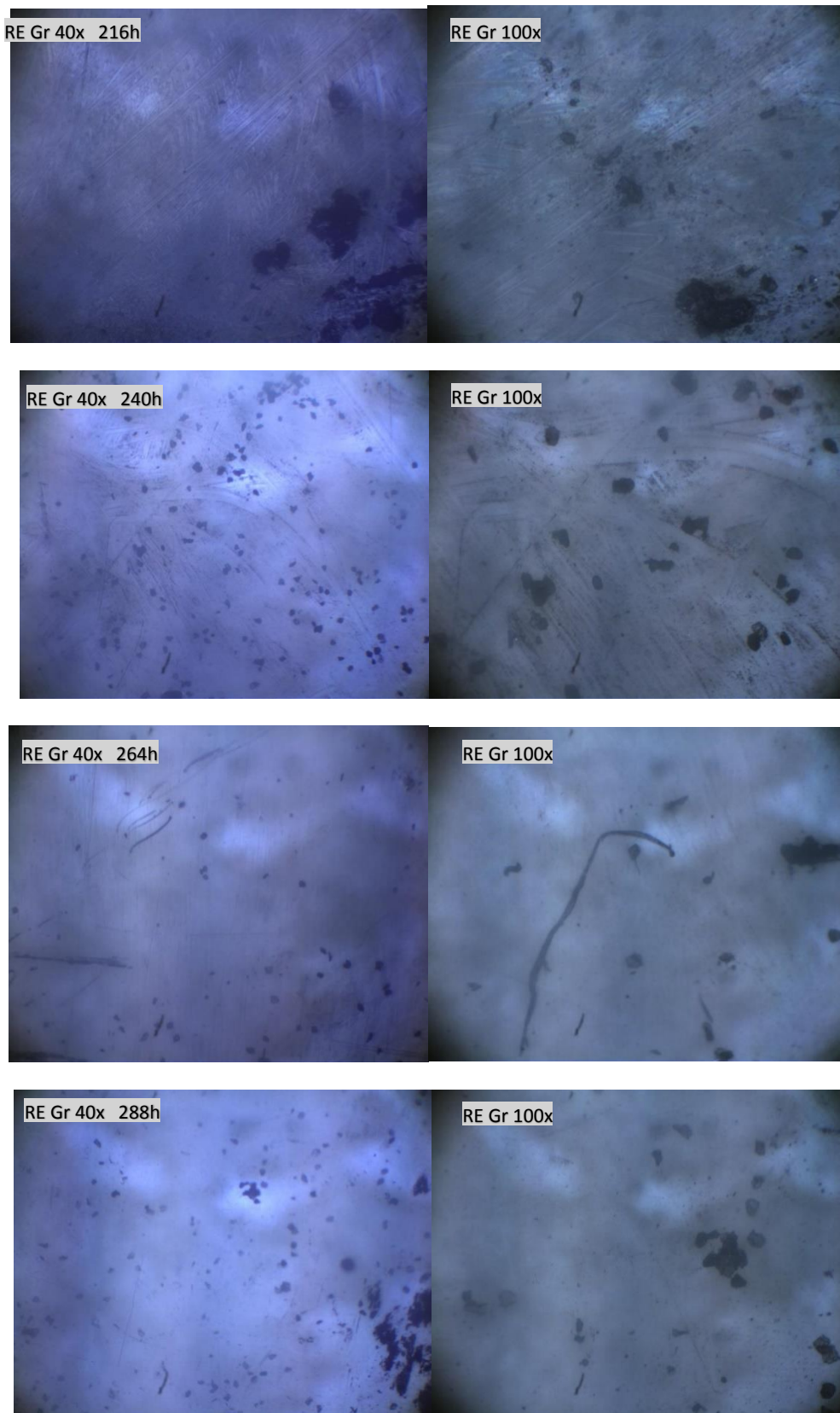
- **Après l'absorption des échantillons en résine seule pour différents temps**



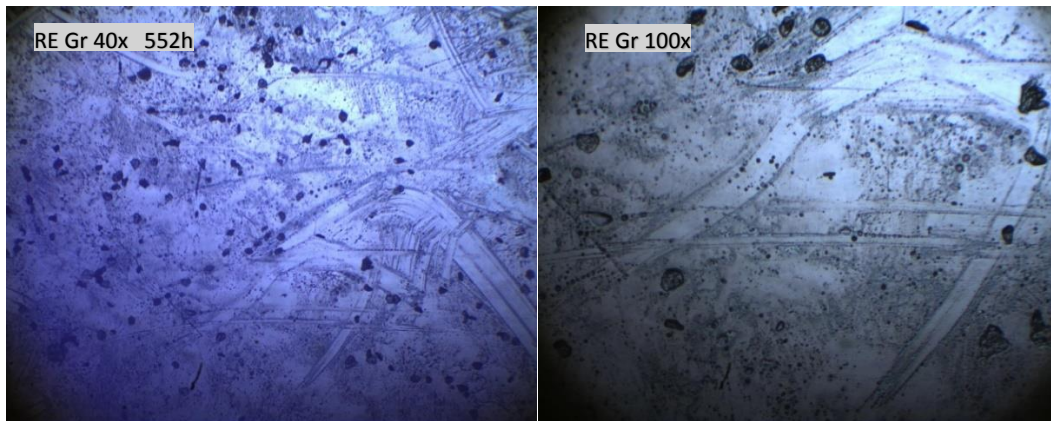
**Figure IV.18:** Micrographies des échantillons en résine époxy seule après vieillissement à différents temps.



**Figure IV.19:** Micrographies des échantillons en résine époxy seule après vieillissement à différents temps.



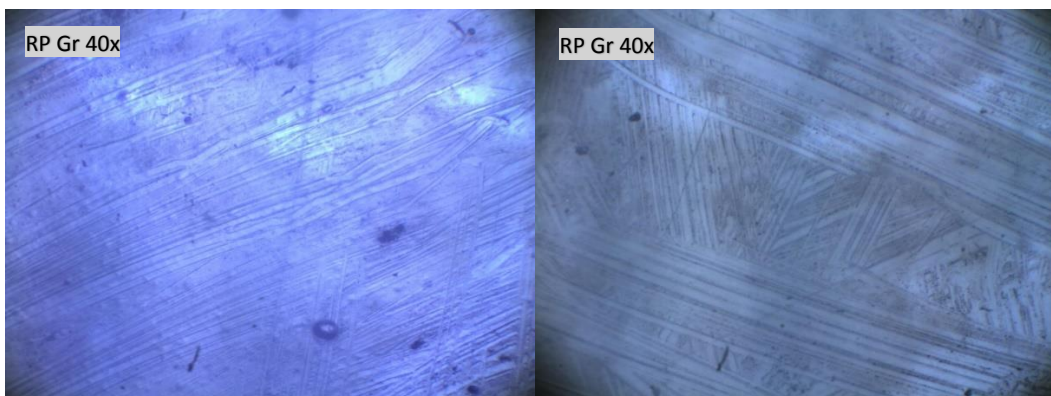
**Figure IV.20:** Micrographies des échantillons en résine époxy seule après vieillissement à différents temps.



**Figure IV.21:** Micrographies des échantillons en résine époxy seule après vieillissement pour différents temps.

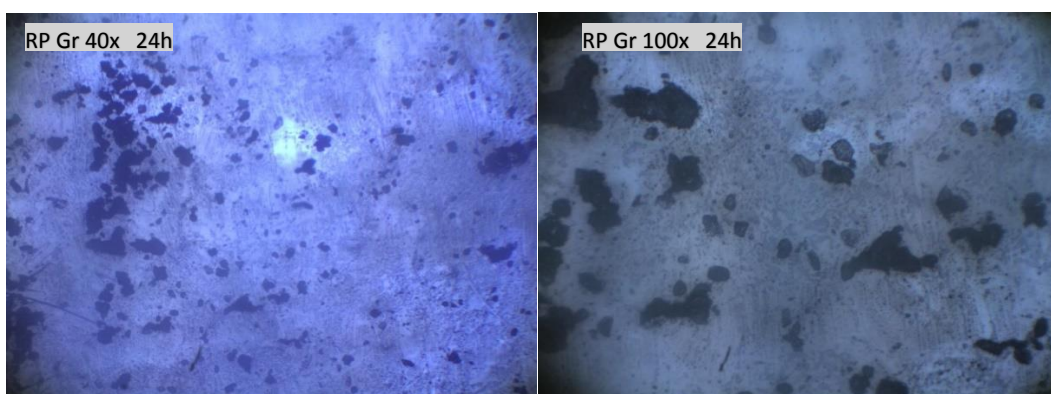
**IV.4. 2. Analyse au microscope optique des échantillons en résine polyester**

- **avant l'absorption des échantillons en résine polyester**

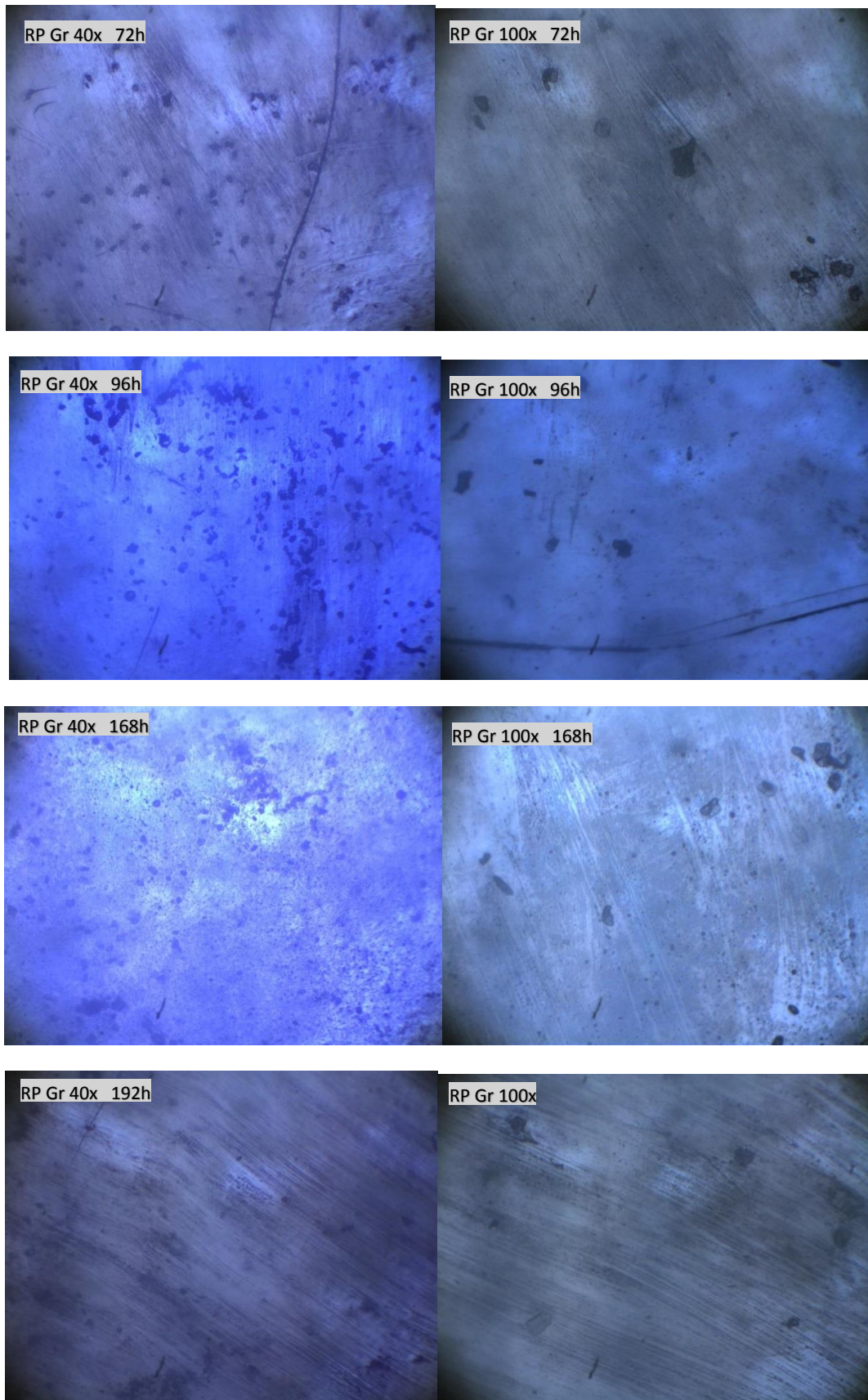


**Figure IV.22:** Micrographies des échantillons en résine polyester seule avant vieillissement.

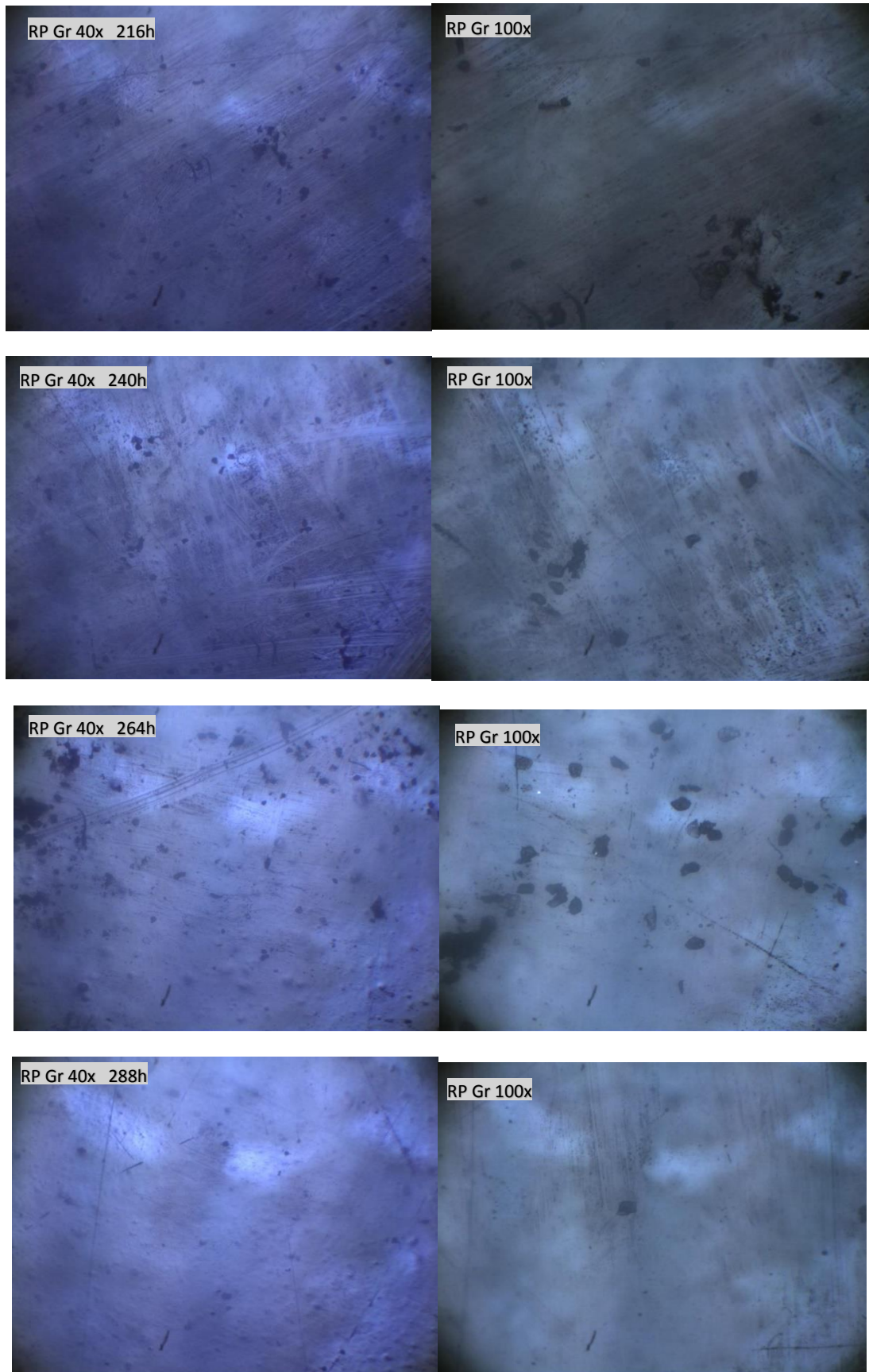
- **Après vieillissement des échantillons en résine polyester à différents temps**



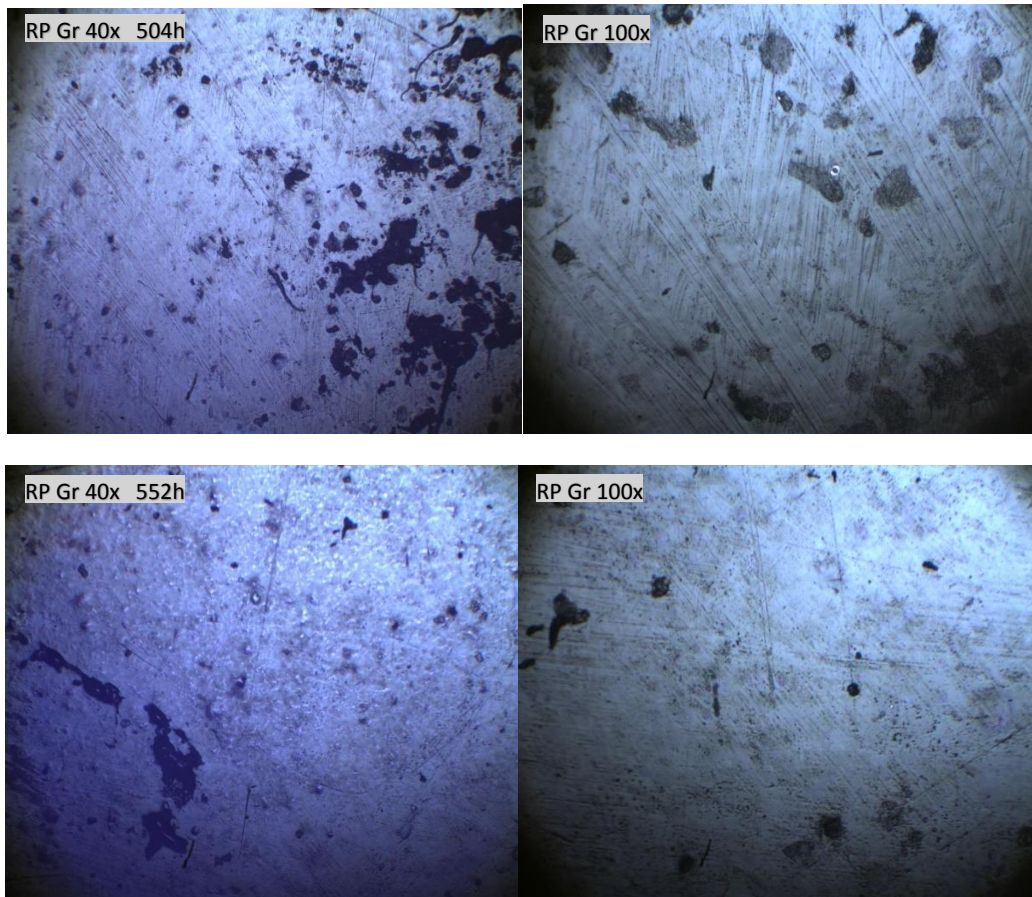
**Figure IV.23:** Micrographies des échantillons en résine polyester seule après vieillissement à différents temps.



**Figure IV.24:** Micrographies des échantillons en résine polyester seule après vieillissement à différents temps.



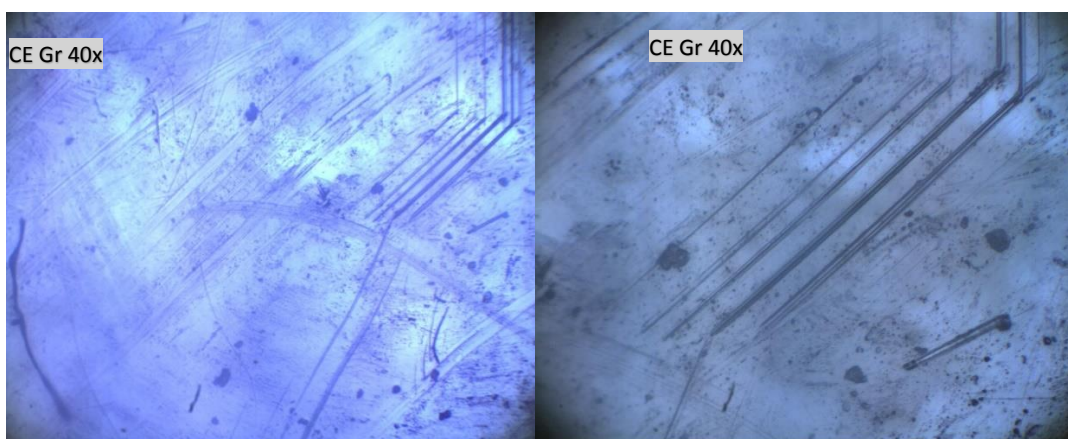
**Figure IV.25:** Micrographies des échantillons en résine polyester seule après vieillissement à différents temps.



**Figure IV.26:** Micrographies des échantillons en résine polyester seule après vieillissement à différents temps.

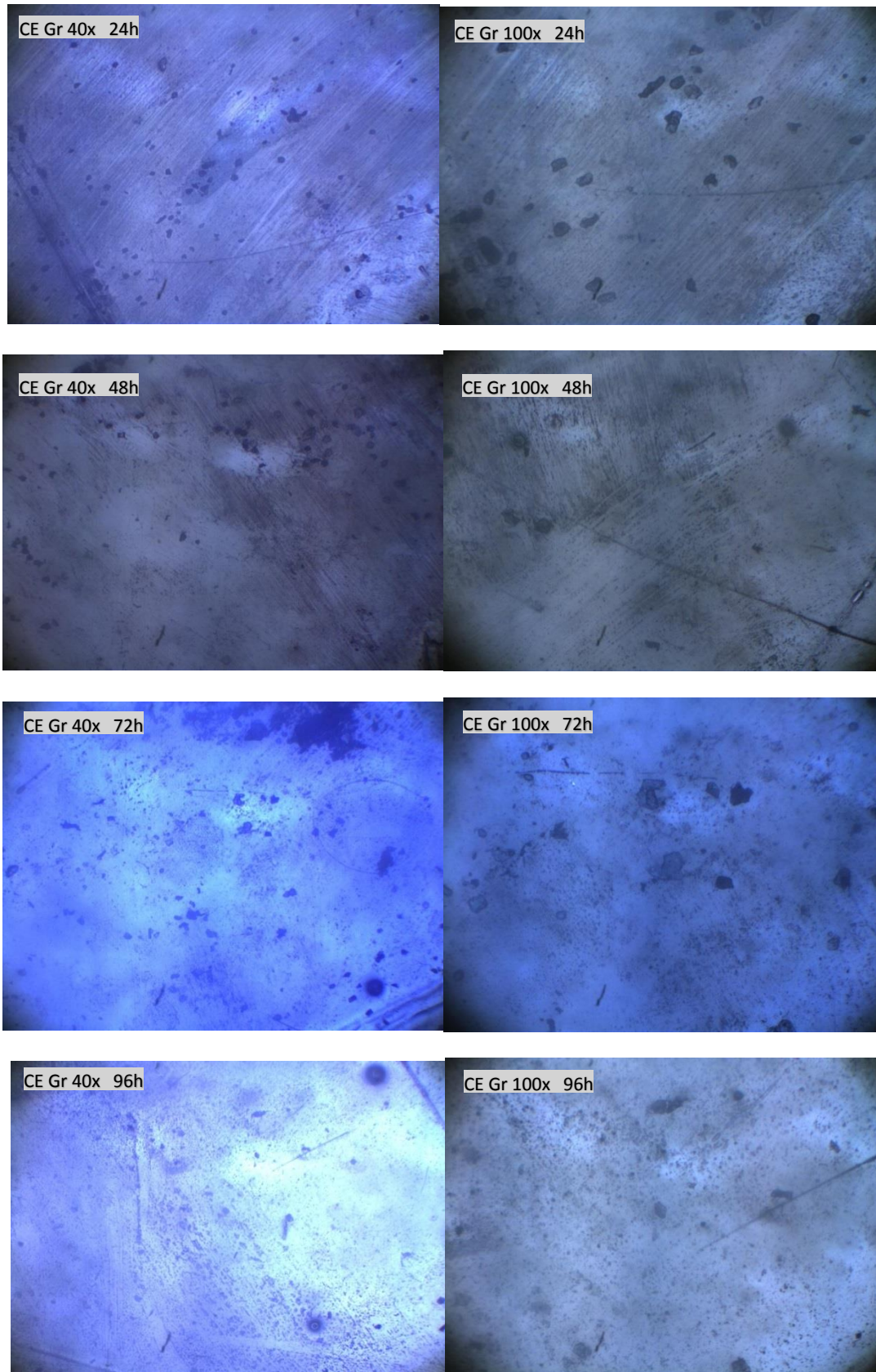
#### **IV.4. 3. Analyse au microscope optique des échantillons en composite époxy**

- **Avant l'absorption des échantillons en composite époxy**

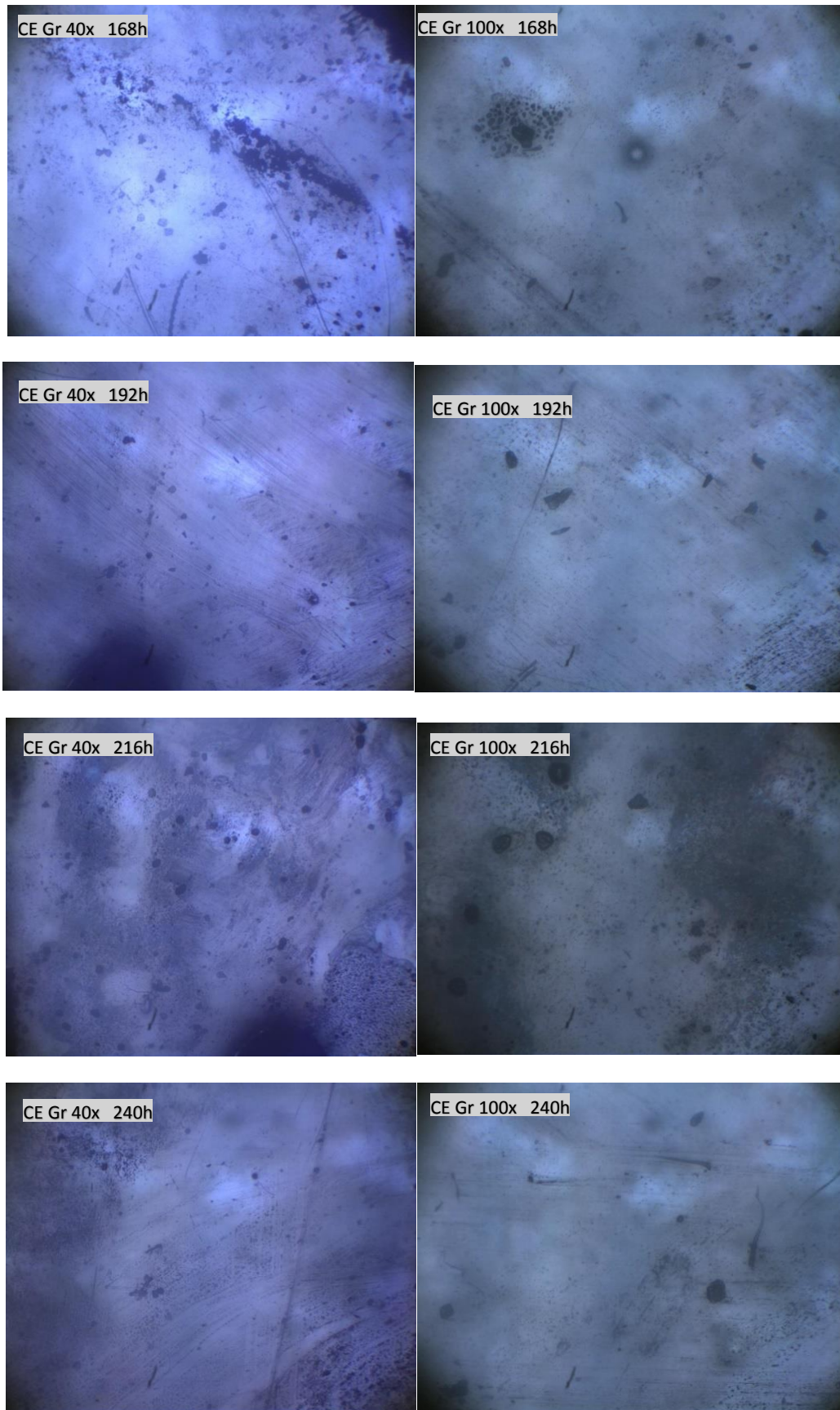


**Figure IV.27:** Micrographies des échantillons en composite époxy avant vieillissement.

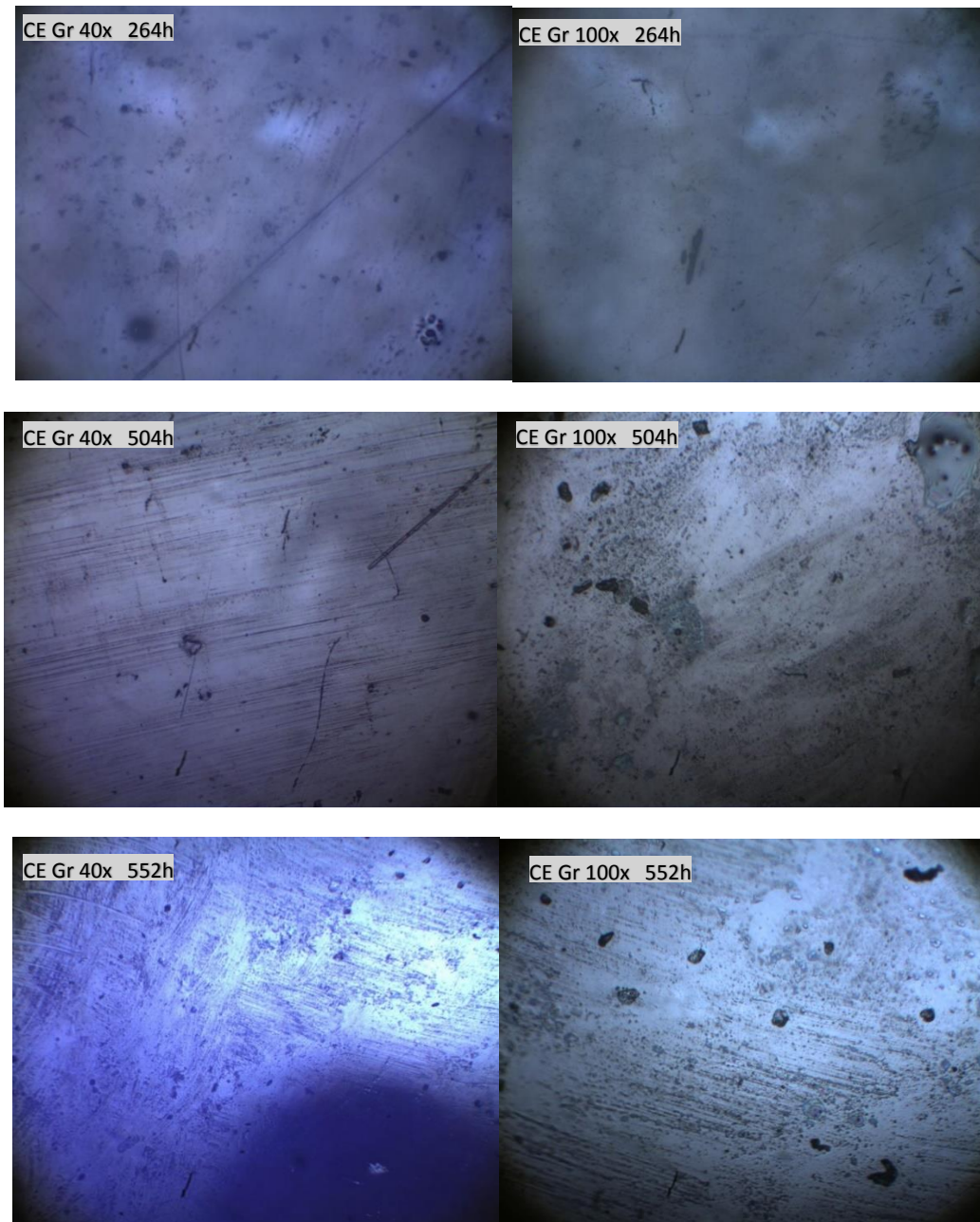
- Après vieillissement des échantillons en composite époxy



**Figure IV.28:** Micrographies des échantillons en composite époxy après vieillissement à différents temps.



**Figure IV.29:** Micrographies des échantillons en composite époxy après vieillissement à différents temps.

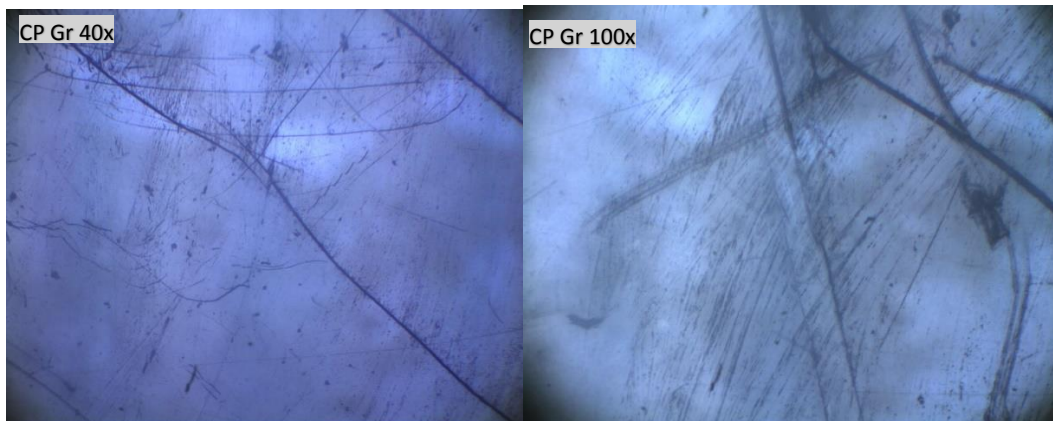


**Figure IV.30:** Micrographies des échantillons en composite époxy après vieillissement à différents temps.

#### **IV.4. 4.Analyse au microscope optique des échantillons en composite polyester**

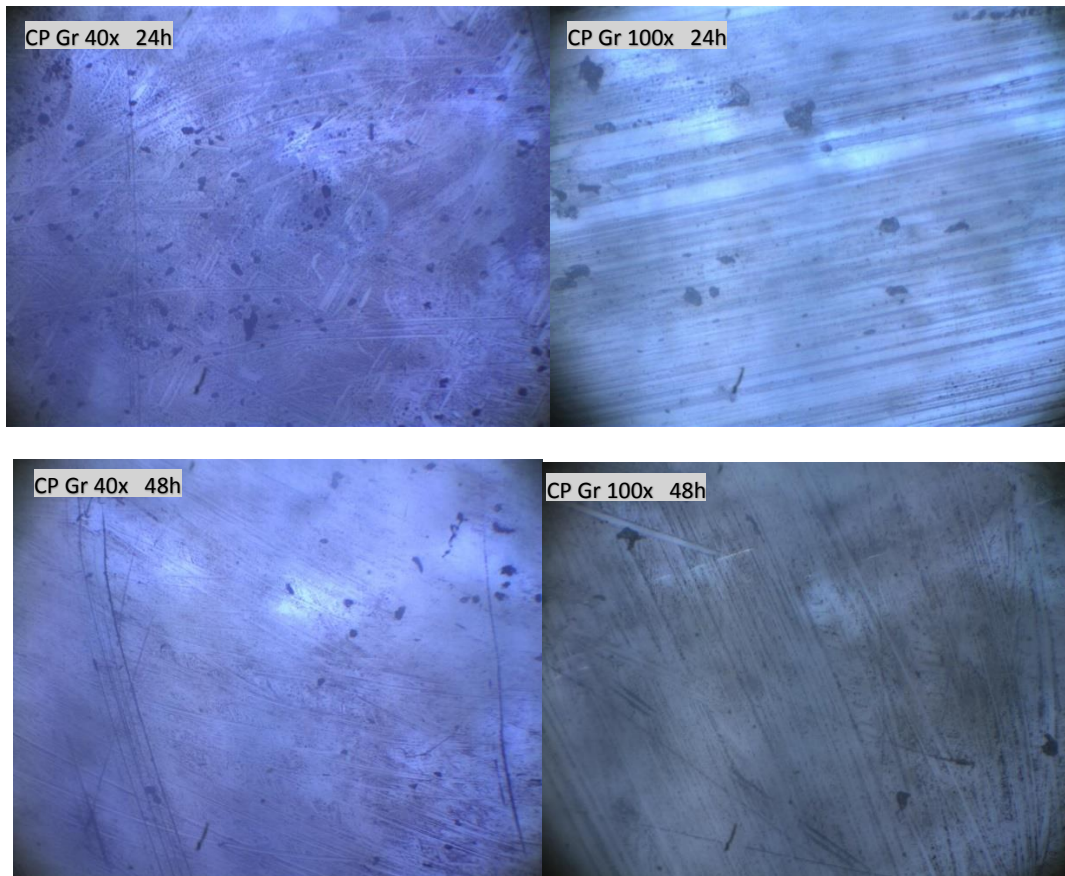
Les mêmes observations au microscope optique menées sur les surfaces des échantillons vieillis et non vieillis qui seront présentées par les figures ci-après.

- **Avant l'absorption des échantillons en composite polyester**

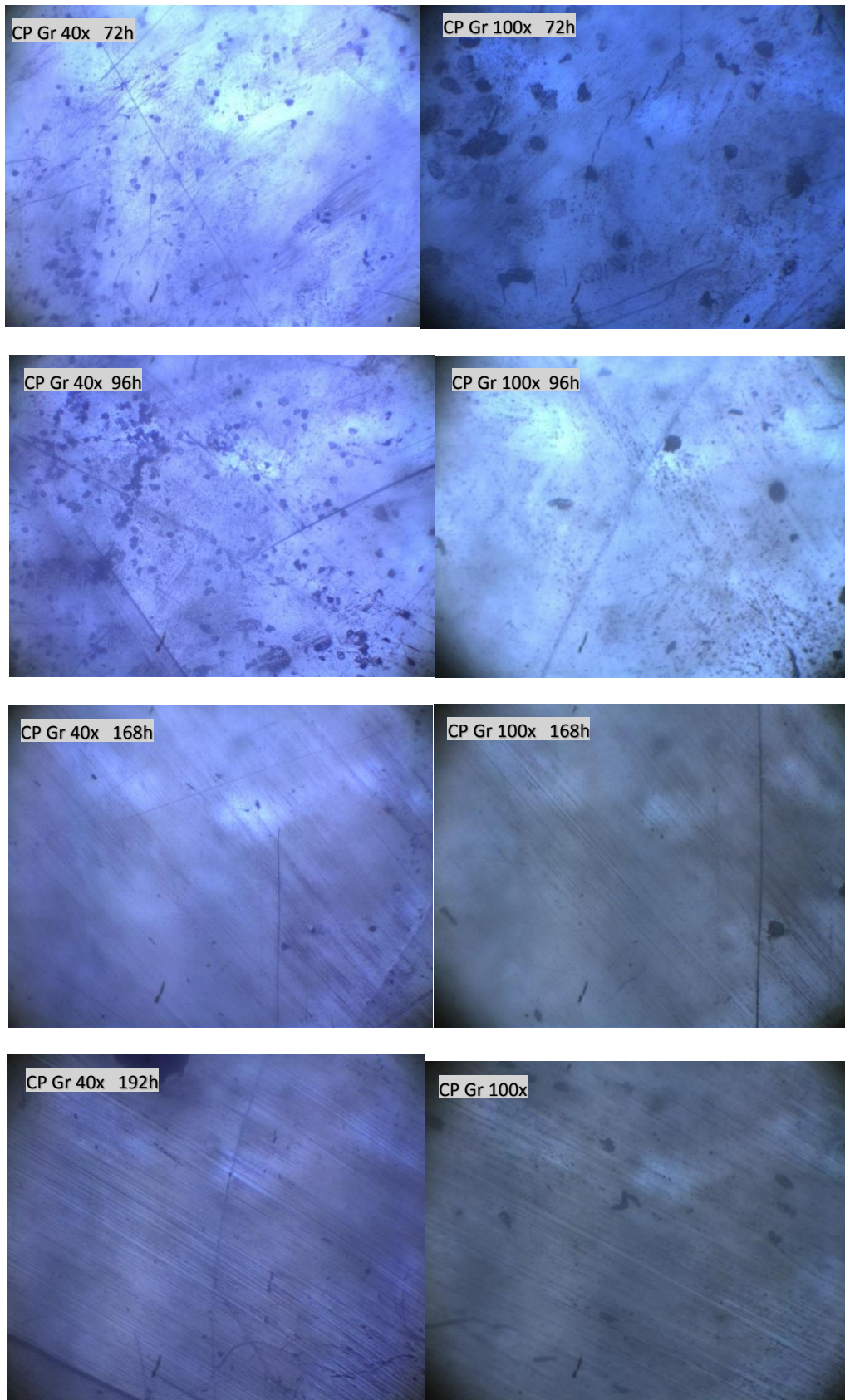


**Figure IV.31:** Micrographies des échantillons en composite polyester avant le vieillissement.

- **Après vieillissement des échantillons en composite polyester**



**Figure IV.32:** Micrographies des échantillons en composite polyester après le vieillissement à différents temps.



**Figure IV.33:** Micrographies des échantillons en composite polyester après le vieillissement à différents temps.

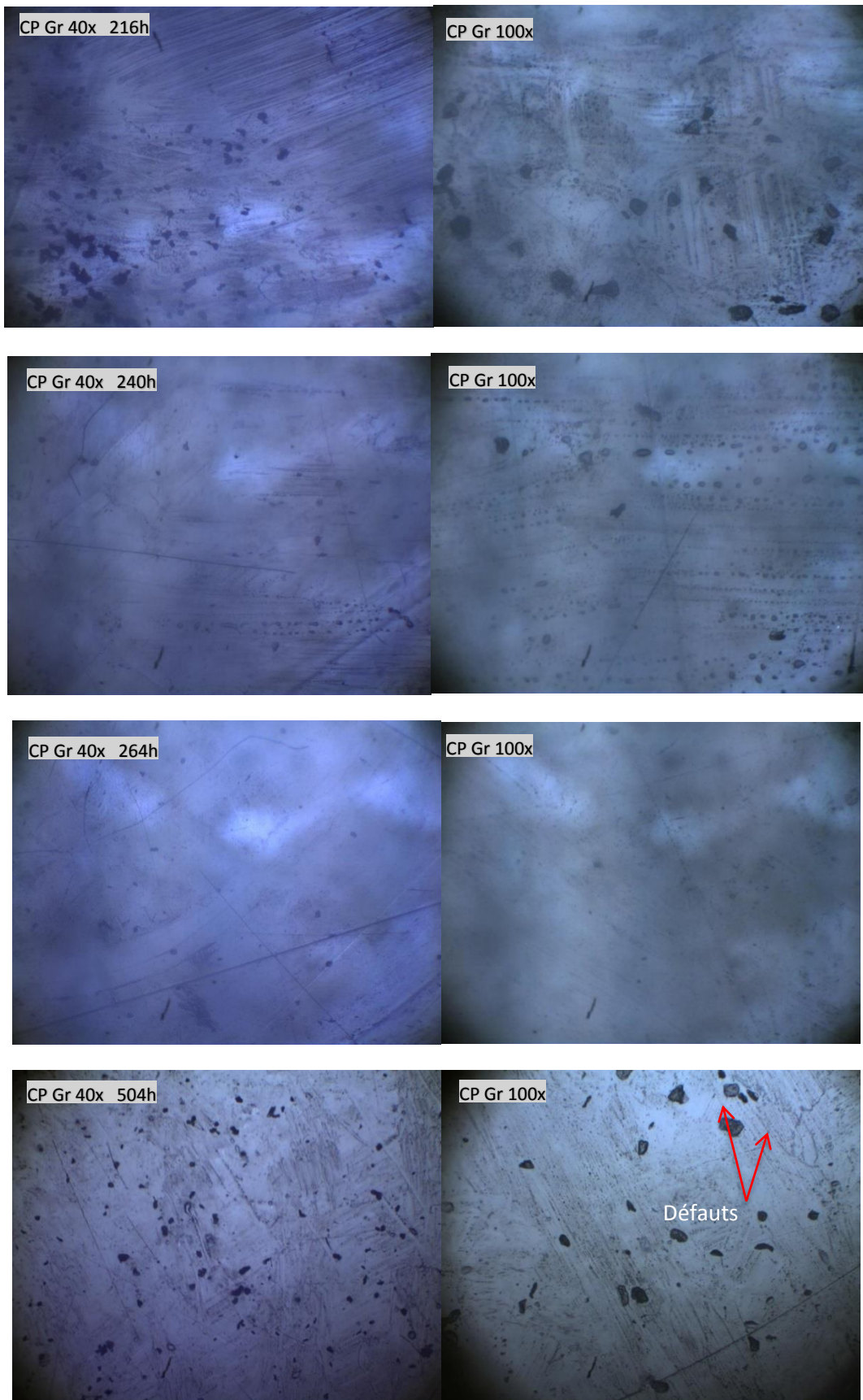


Figure IV.34: Micrographies des échantillons en composite polyester après le vieillissement à différents temps.

L'analyse et la qualité des micrographies obtenues de tous les matériaux observées au microscope optique avant et après vieillissement avec différents agrandissements ne permettent pas de mieux voir l'influence du vieillissement sur la structure de nos échantillons.

D'après les images des figures précédentes, nous avons constaté la présence de plusieurs défauts avec différentes tailles et dimensions. Pour mieux voir et différencier les mécanismes d'endommagement qui se manifestent lors du vieillissement Il nous paraît très important de faire des analyses microscope électronique à balayage (MEB).

#### IV.5. Présentation des résultats par Spectroscopie Infra Rouge à Transformée de Fourier des matériaux composites :

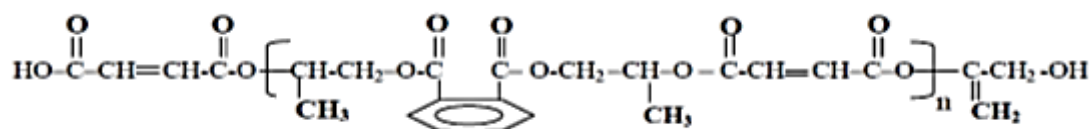
Nous avons effectué des analyses IRTF pour nos échantillons, nous recherchons les différentes fonctions chimiques qui existent dans nos matériaux composites. Cette analyse nous permet de chercher l'influence de l'ajout de du renfort unidirectionnel en fibre de verre sur le spectre de la résine polyester seule. Sur l'axe des abscisses, les valeurs du nombre d'onde vont de  $500 \text{ Cm}^{-1}$  jusqu'à  $4000 \text{ Cm}^{-1}$ , cet intervalle est divisé en deux parties :

**Entre  $4000 \text{ Cm}^{-1}$  et  $1500 \text{ Cm}^{-1}$**  : ces bandes ou ces pics correspondent à l'absorption IR par des liaisons simples (liaisons simples singulières entre  $4000 \text{ Cm}^{-1}$  et  $2500 \text{ Cm}^{-1}$ ), par des liaisons triples (entre  $2500 \text{ Cm}^{-1}$  et  $2000 \text{ Cm}^{-1}$ ), ou par des liaisons doubles (entre  $2000 \text{ Cm}^{-1}$  et  $1500 \text{ Cm}^{-1}$ ). Ces pics ou bandes sont caractérisés par leurs positions (abscisse), leur intensité et leur largeur.

**Entre  $1500 \text{ Cm}^{-1}$  et  $500 \text{ Cm}^{-1}$**  : cette zone est plus complexe ; elle est appelée empreinte digitale de la molécule. Elle est caractéristique de la molécule, mais il est en général difficile d'attribuer les pics observés à des groupes d'atomes précis.

On s'intéresse aux bandes entre  $4000$  et  $1500 \text{ Cm}^{-1}$  et on relève l'abscisse et l'allure de la bande (largeur, intensité).

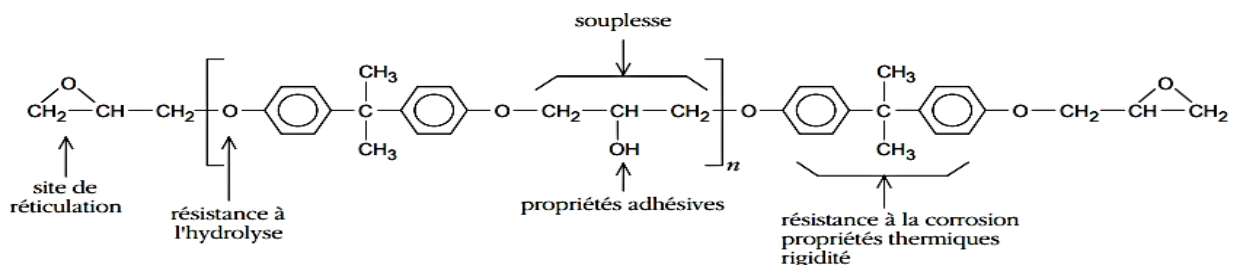
La formule chimique du polyester est représentée ci-dessous :



Dans la formule chimique du polyester nous trouvons les fonctions suivantes :

- 1) fonction carboxylique (COOH) ;
- 2) cycles aromatique ;
- 3) fonction alcool ;
- 4) des groupements méthyle ;
- 5) des doubles liaisons C=C et C=O ;
- 6) des liaisons -C-O-C- ;

La formule chimique de l'époxyde est représentée ci-dessous :



L'analyse par spectroscopie Infra Rouge à transformée de Fourier nous a permis de comparer les spectres obtenus pour les différents échantillons.

#### IV.5.1. Présentation des résultats par Spectroscopie Infra Rouge à Transformée de Fourier de la résine époxy :

Les figures IV.34 et IV.35 présentent les spectres IR de la résine seule époxy et composite à matrice époxy.

Nous constatons que l'allure des deux spectres est similaire et ont les mêmes pics de transmittance et que la formule chimique du composite possède les mêmes fonctions chimiques que les deux matériaux. La superposition des deux spectres n'est pas vérifiée, car un déphasage entre les deux spectres est observé. Les énergies transmises par le composite renforcé par de fibres de verre est supérieures que les énergies transmises par la résine seule. L'énergie absorbée pour la résine seule, est plus grande que l'énergie absorbée par le composite, donc la présence des fibres de verre perturbe un peu l'absorbance d'énergie pour toutes les liaisons existant dans le spectre.

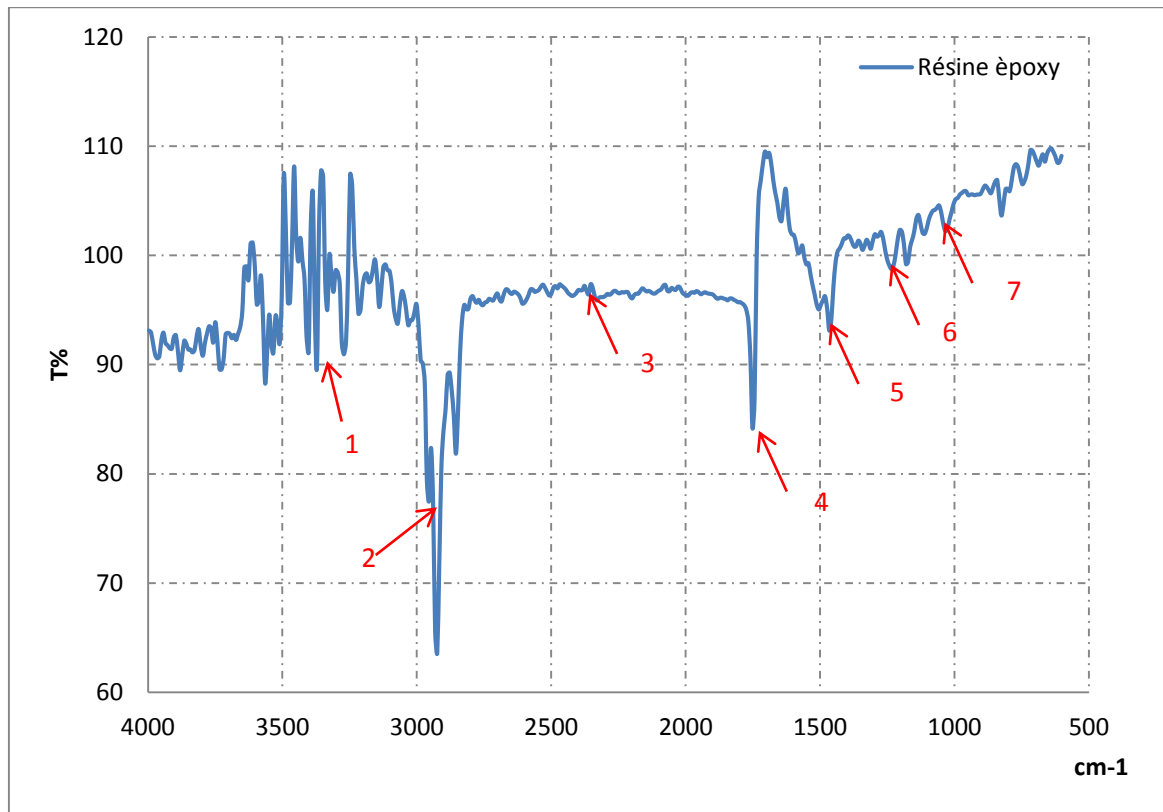


Figure IV.34 : Présentation des spectres IR de la résine époxy.

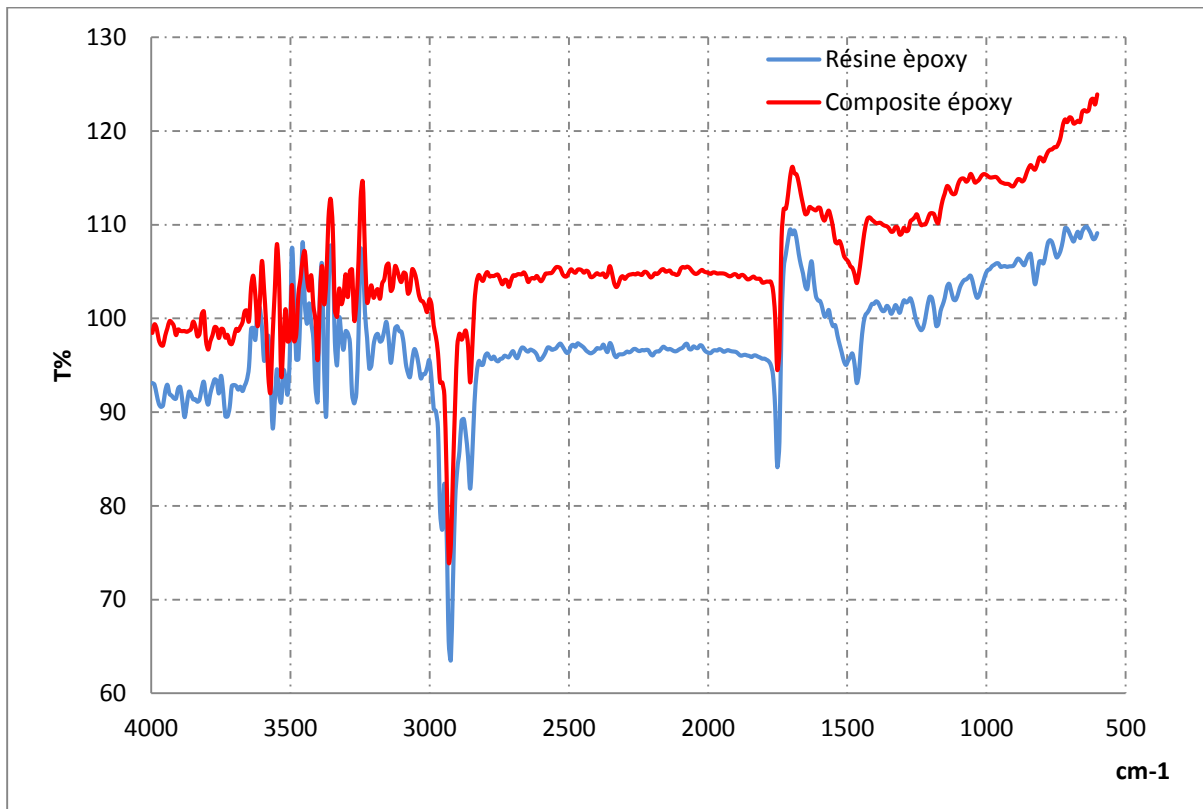
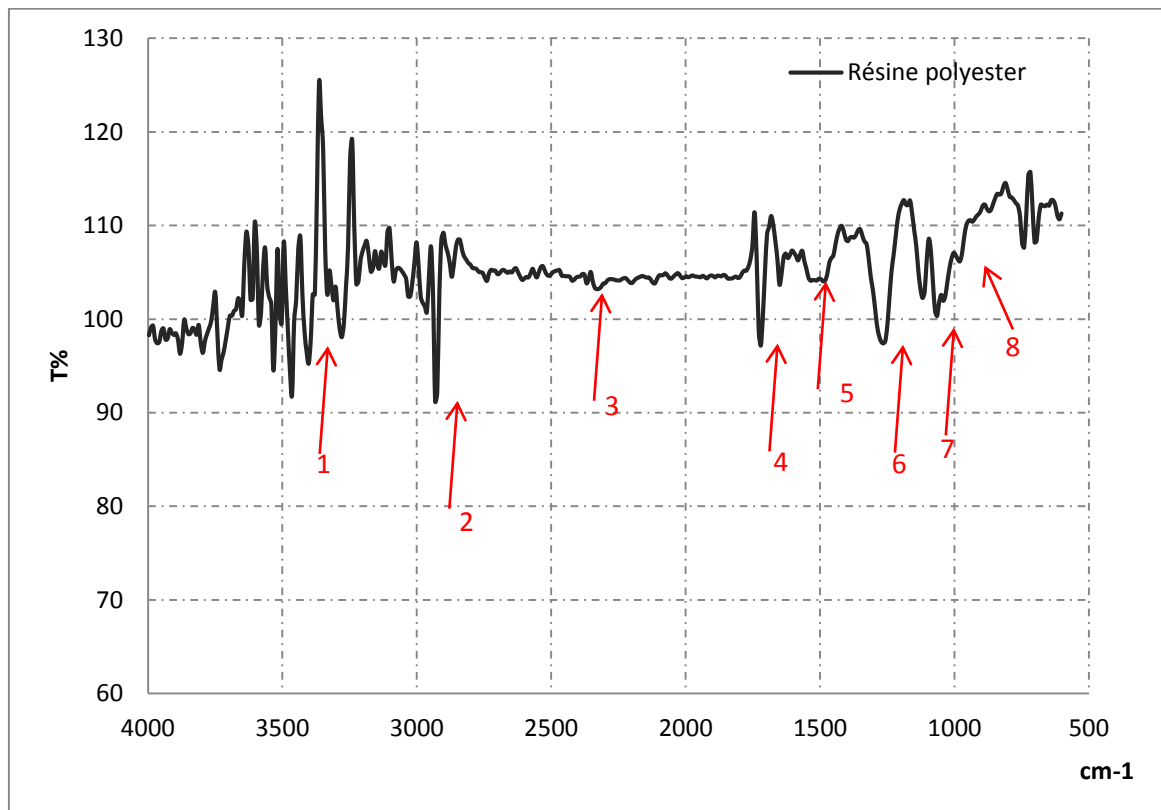


Figure IV.35 : Présentation des spectres IR du composite époxy.

### IV.5.2. Présentation des résultats par Spectroscopie Infra Rouge à Transformée de Fourier de la résine polyester :

Les figures IV.36 et IV.37 présentent les spectres IR de la résine seule polyester et composite à matrice polyester renforcé en fibres de verre.



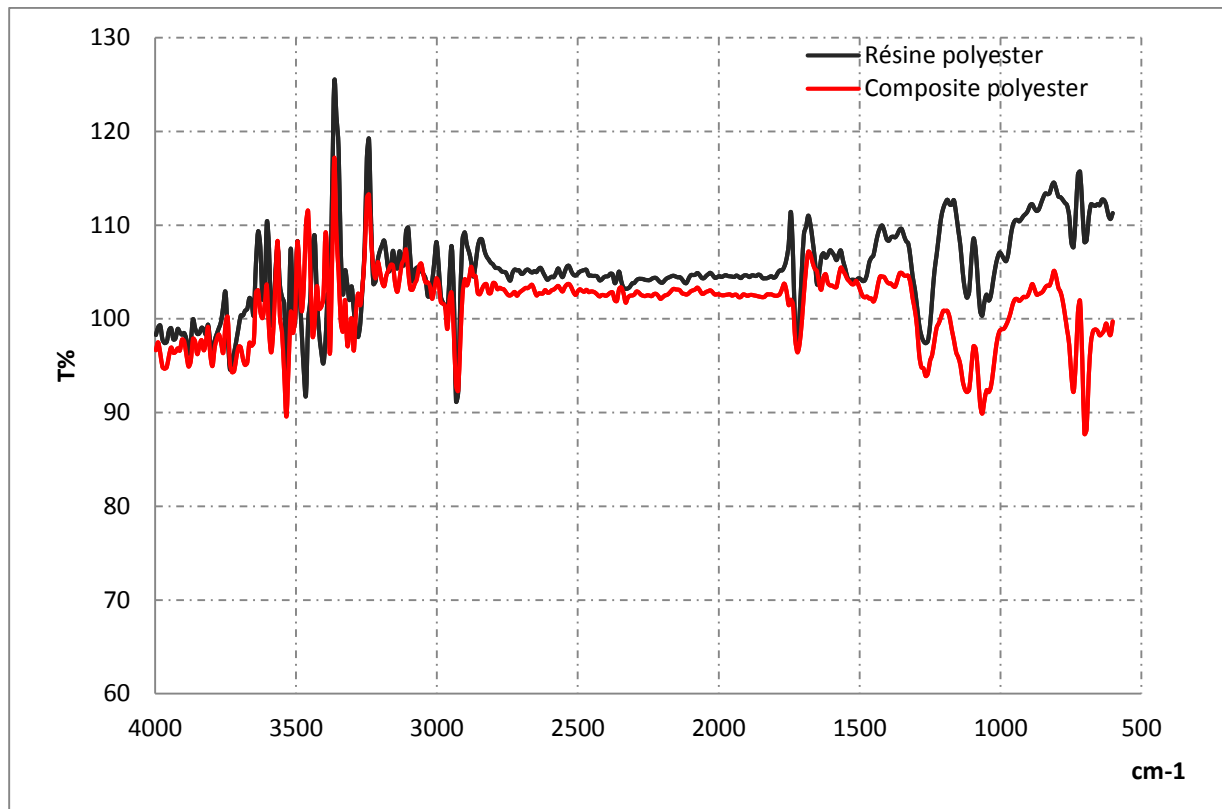
**Figure IV.36:** Présentation des spectres IR de la résine polyester.

Selon les figures IV.35 et IV.37, nous observons que celle de la résine époxy. Les courbes des deux matériaux en polyester ont les mêmes pics de transmittance avec un déphasage entre les deux spectres. Nous avons constaté lors de la comparaison entre les spectres de la résine époxy et polyester qu'il y avait des pics n'existe pas sur celle de la résine époxy.

Les pics de vibrations repérés dans le spectre de la résine seule sont :

- 1- Un pic -O-H, alcool liée à  $3200-3400 \text{ Cm}^{-1}$  ;
- 2- Un pic alcane -C-C à  $2986 \text{ Cm}^{-1}$  ;
- 3- Un pic acide à  $2380 \text{ Cm}^{-1}$  ;
- 4- La présence du groupement carbonyle de la fonction ester est déterminé à  $1731 \text{ Cm}^{-1}$  ;
- 5- Un pic à  $1400$  cycle aromatique ;
- 6- Liaison C-O est déterminée à  $1283 \text{ Cm}^{-1}$  ;

- 7- Quant à la série de bandes entre 1000 et 1076  $\text{cm}^{-1}$ , elle correspond à la déformation symétrique C-O-C ;
- 8- Les bandes de transmittance située à 986  $\text{cm}^{-1}$  correspond à l'élongation C=C du polyester.



**Figure IV.37:** Présentation des spectres IR du composite polyester.

Cette technique nous a permis de déterminer le groupement fonctionnel de la résine polyester et époxy. Nous avons constaté que le renforcement par des fibres de verre n'a apporté aucune modification au spectre de la résine seule. Même si les pics se superposent parfaitement, on remarque toute fois une variation entre ces deux spectres du point de vue de la quantité d'énergie transmise (transmittance) ou absorbée (absorbance) par les liaisons atomiques lors de la vibration. La transmittance dans le cas du matériau composite est supérieure à celle de la résine seule.

## *Conclusion Générale*

### **Conclusion Générale**

L'objectif de ce travail est d'étudier, le comportement mécanique et l'absorption dans un milieu non agressif (l'eau distille), pour un matériau composite, matrice thermodurcissable, chargée en fibre de verre (mat 600).

Nous avons comparé entre deux matériaux composites, le premier dont la matrice est de l'Epoxy, le second sa matrice est du polyester.

Une partie des éprouvettes a subi un traitement thermique de 40° de relaxation afin de diminuer la fragilité de nos éprouvettes lors des essais mécaniques.

La caractérisation mécanique en flexion montre que la résine époxy avec son composite élaboré à un comportement ductile, la résine polyester avec son composite élaboré à un comportement fragile.

L'Observation au microscope optique des surfaces de nos échantillons a révélé beaucoup d'informations : une différence entre l'état de surface de la résine seule et celle du matériau composite. L'eau distille attaque les surfaces de la résine et composite époxy plus vite que son attaque de la résine polyester. La diffusion de l'eau dans l'époxy engendre des détachements de la matière et une perte de masse importante. Pour le polyester, l'absorption provoque une augmentation de la masse du matériau jusqu'à atteindre le plateau de saturation. La résine polyester a un meilleur comportement mécanique vis à vis de l'absorption du solvant par rapport à la résine Epoxy.

Notre travail peut être complété par des observations au MEB, pour l'analyse des points de pénétration du solvant dans la résine, et aussi les cavités qu'il crée à l'intérieur de la matrice.

Aussi, il est très intéressant de faire un traitement thermique de vieillissement cyclique, c'est-à-dire, choisir des paliers de température entre 25°C et 60° C pour simuler le gradient de température que subit pendant une journée, les matériaux composites destinés à la construction navale.

## Référence Bibliographiques

### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] TOUMI Wafa. Mémoire de Master, Optimisation de la configuration des tubes en matériaux composites sous pression, Mohamed Khider de Biskra 2019
- [2] Jean Marie Berthelot, « matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures », 4<sup>ème</sup> édition, TEC &DOC, Le Mans Novembre 2010.
- [3] Prombut. P, « caractérisation de la propagation de délaminage des stratifiés composites Multidirectionnels », thèse Doctorat, Toulouse, 2007.
- [4] Kjherbouche Laaziz. Mémoire de Magister, Introduction aux modélisations et aux Méthodes de calcul des matériaux composites, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2010.
- [5] A. AL-Maghribi, « Comportement des matériaux composites à fibres courtes : applications à l'impact basse vitesse », thèse de doctorat, l'université Paul Sabatier, 2008.
- [6] KACED Ahmed, Mémoire de Magister, Caractérisation mécanique et tolérance à l'endommagement des matériaux composites à renfort verre et matrice organique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2016.
- [7] M. DJELIL. Caractérisation mécanique et physicochimique de matériaux composites à matrice organique dans les prothèses, Mémoire de magister 2006).
- [8] METTOUCHI LOTFI, Mémoire de Master, Influence de la charge particule de cuivre et du renfort couches de fibres de verre sur le comportement mécanique d'un composite, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou,
- [9] Laurent gormet, « Généralités sur les matériaux composites », ECN, Centre Nantes 2008.
- [10] « Glossaire des matériaux composites » - carma –Actualisation octobre 2006.
- [11] ZAIDI Ali. Mémoire de Magister, Etude du comportement de matériaux composites à matrice polymère en fatigue (effet du vieillissement) Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2010.
- [12] A. R. Blythe, « Electrical resistivity measurements of polymer materials », Poly Test, 4 195-209, 1984

## *Référence Bibliographiques*

- [13] J.-M Berthelot. "Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures », 2ème édition, édition MASSON, 1996
- [14] cour matériaux composite <http://www.composites.free.fr/>
- [15] Rahme P. thèse assemblage aéronautique boulonnée - Usinage des trous derivets ou boulons. Université Paul Sabatier
- [16] D. Gay, « Matériaux composites », 5ième édition 2005.
- [17] B. Fairouz, « étude du comportement mécanique de structure sandwiches à différents matériaux de revêtements », mémoire de magister, université Mentouri, Constantine, 2016.
- [18] Michel Dequatremare Thierry Devers, Matériaux parcours IUT, Dunod, paris ,2012
- [19] Jean Marie Berthelot, Matériaux composites, comportement mécanique et Analyse des structures, 4ème Edition, Lavoisier 2005.
- [20] M. Mezzo Aghiles, Mémoire de Master, Etude d'une sollicitation Hors axes d'un composite unidirectionnelle (verre e/époxyde) : cas de la traction, 2012.
- [21] Pierre JACQUINET « Utilisation de matériaux composites » Ed. HERMES.
- [22] J.-M. BERTHELOT « Comportement mécanique et analyse des structures de matériaux composites » Ed. Masson Paris.1992
- [23] Les essais mécaniques, <http://joho.monsite.orange.fr/>.
- [24] BOUZNAD Mohamed, KAROU Mourad, influence du vieillissement et du recyclé sur les caractéristiques mécaniques d'un matériau composite, université mouloud Mammeri, TIZI OUZOU, 2014.
- [25] Marc Moreau, Directeur de recherche CNRS, Université Paul Sabatier de Toulouse.
- [26] Mansouri, Lilla , Mémoire de Magister, Comportement sous sollicitations cyclique et statique des composites à renfort verre et matrice organique (Université Mouloud Mammeri, 2010-06-03)