

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE
LABORATOIRE DE MECANIQUE, STRUCTURES ET ENERGETIQUE**



MEMOIRE DE MAGISTER

**SPECIALITE : Génie Mécanique
OPTION : Mécanique Appliquée**

Etudiée par :

M^{lle} MANSOURI Lilla

Thème :

**COMPORTEMENT SOUS SOLLICITATIONS CYCLIQUE ET STATIQUE
DES COMPOSITES A RENFORT VERRE
ET MATRICE ORGANIQUE**

Soutenue le 03 juin 2010 devant le jury composé de :

M. Amar	BOUAZZOUNI	Professeur, UMMTO	Président
M. Arezki	DJEBBAR	Maître de conférences, UMMTO	Rapporteur
M. Ali	BILEK	Maître de conférences, UMMTO	Examineur
M. Said	LARBI	Chargé de recherche, UMMTO	Examineur

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au Laboratoire Mécanique, Structure et Energétique (LMSE) de Tizi –Ouzou sous la direction de Monsieur le professeur AOUCHICHE. H, à qui je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude.

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur DJEBBAR, A Maître de Conférences, pour avoir accepté d'encadrer ce travail. Pour son aide et sa grande disponibilité, ses conseils judicieux qui m'ont permis de surmonter beaucoup de difficultés.

Ma gratitude et mes remerciements à Monsieur BOUZZOUNI, A, professeur à l'université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider ce jury.

Je remercie vivement monsieur BILEK, A, Maître de Conférences à l'université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail.

Je remercie également monsieur LARBI, S, Chargé de Recherche à l'université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail.

Je veux aussi remercier chaleureusement le personnel de la bibliothèque de Génie Mécanique sans oublier le personnel du Laboratoire de Génie Mécanique et de Génie Civil pour leur disponibilité.

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

Ce travail n'aurait pas abouti sans le soutien de nombreuses personnes. Elles sont trop nombreuses pour être toutes citées, mais trouveront ici le témoignage de ma profonde reconnaissance pour leur aide, conseils et bonne humeur.

Enfin, je tiens à remercier mes parents pour la confiance qu'ils m'ont accordés, pour m'avoir toujours aidé à la réalisation de mes projets et pour leur soutien sans faille.

A bouquet of light pink tulips and white snowdrops. The tulips are in various stages of bloom, with some fully open and others as buds. The snowdrops are small, white, bell-shaped flowers with green stamens. The bouquet is tied with a green ribbon and has long green stems.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Mes très chers parents qui se sont sacrifié pour que je puisse arriver jusque là et qui m'ont beaucoup soutenu durant mon cursus.

Mes adorables frères.

Mes adorables sœurs Salîha, Samia et Hassiba qui sont toujours à mes cotés et n'ont jamais cessé de me soutenir.

Toute ma famille.

Ma copine Sabrina.

Tous mes amis (es).

M. LILA

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I

Présentation des Matériaux Composites

I.1. Application et intérêt des matériaux composites.....	3
I.2. Définition.....	4
I.3. Caractéristiques générales des matériaux composites.....	5
I.4. Classification des matériaux composites.....	6
I.4.1. Classification suivant la forme.....	6
I.4.2. Classification suivant la nature.....	7
I.5. Présentation des constituants.....	8
I.5.1. Les matrices.....	8
I.5.2. Les renforts.....	9
I.5.2.1. Les fibres.....	10
I.5.3. L'interface.....	19
I.5.4. Les charges.....	21
I.5.5. Additifs.....	22
I.6. Architecture des matériaux composites.....	22
I.6.1. Les stratifiés.....	22
I.6.2. Composites sandwiches.....	23
I.7. Procédés de mise en œuvre.....	24
I.7.1. Moulage sans pression.....	24
I.7.1.1. Moulage au contact.....	24
I.7.1.2. Moulage par injection simultanée.....	26
I.7.2. Moulage par compression.....	27
I.7.2.1. Moulage par injection de résine RTM.....	27
I.7.3. Moulage sous vide.....	28
I.7.4. Les procédés de transformation en continu.....	29
I.7.4.1. Imprégnation en continu.....	30
I.7.4.2. La pultrusion.....	30

I.7.5. Procédés de fabrication des formes de révolution.....	31
I.7.5.1. La transformation par centrifugation.....	31
I.7.5.2. L'enroulement filamentaire.....	31

CHAPITRE II

Matrices Organiques

II.1. Matrices organiques.....	34
II.2. Les résines thermodurcissables (TD).....	37
II.2.1. Les principales résines thermodurcissables.....	38
II.2.1.1. Polyesters insaturés.....	38
II.2.1.2. Vinylesters.....	39
II.2.1.3. Phénoliques.....	39
II.2.1.4. Epoxydes.....	39
II.3. Les résines thermoplastiques (TP).....	40
II.3.1. Les principales résines TP.....	41
II.3.1.1. Les polyamides (PA).....	41
II.3.1.2. Les polysters saturés (PETP, PBTP).....	41
II.3.1.3. Le polyéther-éther-cétone (PEEK).....	41
II.3.1.4. Le polypropylène (PP).....	42
II.3.1.4.1. Différents types de PP.....	43
II.3.1.4.2. Propriétés d'usage.....	44
II.4. Composite à matrice organique.....	46
II.4.1. Polypropylènes chargés.....	47
II.4.2. Polypropylène renforcé de fibre de verre E.....	48
II.5. Avantages de la matrice organique.....	51

CHAPITRE III

Comportement Mécanique des Composites

III.1. Essais mécaniques.....	53
III.1.1. Essai de traction.....	53
III.1.2. Essai de compression.....	56
III.1.3. Essai de flexion	57
III.1.3.1. Essai de flexion trois points.....	57

III.1.3.2. Endommagement de la structure.....	63
III.1.4. Essai de choc.....	65
III.1.5. Essai de fluage.....	66
III.2. Essais physico-chimiques	69
III.2.1 Essais sur les constituants des matériaux composites.....	70
III.2.1.1. Essais sur les renforts.....	70
III.2.1.2. Essais sur la résine	71
III.2.2. Le vieillissement	73
III.2.2.1. Mécanisme de vieillissement.....	73
III.2.2.1.1. Vieillissement physique.....	73
III.2.2.1.2. Vieillissement chimique	73
III.2.2.1.3. Vieillissement par absorption de solvant	74
III.2.3. Essai de perte au feu	80

CHAPITRE IV

La Fatigue et l'Endommagement des Composites

IV.1. Fatigue.....	81
IV.1.1. Définition.....	81
IV.1.2. Essai de fatigue.....	81
IV.1.3. Diagrammes d'endurance.....	84
IV.1.3.1. Fatigue oligocyclique.....	85
IV.1.3.2. Zone d'endurance limitée	86
IV.1.3.3. Limite d'endurance.....	87
IV.1.4. Description de la courbe de Wöhler pour un composite	88
IV.1.5. Interprétation de la courbe de Wöhler	88
IV.1.6. Essai de fatigue en flexion	93
IV.1.6.1. Fatigue en flexion.....	95
IV.2. Endommagement des composites.....	96
IV.2.1. Rupture de fibre	98
IV.2.2. Fissuration matricielle.....	99
IV.2.3. Décohésion fibre-matrice.....	100
IV.2.4. Délaminage.....	105
IV.2.5. Composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale	106
IV.2.6. Composite unidirectionnel soumis à une traction transversale	107

IV.2.7. Résistance au cisaillement	107
IV.2.8. Résistance à la compression longitudinale	108
IV.2.9. Résistance à la compression transversale	109
Conclusion.....	109

<p>CHAPITRE V Partie Expérimentale</p>

V.1. Présentation du matériau	111
V.1.1. Longueur des fibres.....	111
V.1.2. Répartition des fibres.....	113
V.2. Géométrie des éprouvettes.....	115
V.2.1. Prélèvement des éprouvettes.....	115
V.3. Essais physico-chimiques	116
V.3.1. Essai de perte au feu	116
V.3.2. Vieillessement par absorption de solvant.....	117
V.3.3. Interprétation des résultats.....	120
V.4. Méthodes expérimentales	122
V.4.1 Essais réalisés et objectifs.....	122
V.4.2. Moyens d'essais.....	122
V.4.2.1. Essai de flexion trois points.....	122
V.4.2.2. Essai de fatigue.....	124
V.4.2.2.1. Mode opératoire.....	125
V.4.3. Méthode d'exploitation des résultats.....	126
V.4.3.1. Essais quasi statiques.....	126
V.4.3.2. Essai de fatigue	128
V. 5. Résultats expérimentaux.....	130
V.5.1. Résultats d'essai à rupture	130
V.5.2. Résultats d'essai élastique	138
V.5.3. Résultats d'essai de fatigue	145
V.6. Analyse des faciès de rupture en fatigue	152
Conclusion	153
Conclusion et perspectives.....	154

ANNEXES

Annexe 1	156
Annexe 2	157
Annexe 3	162
Annexe 4	163
Annexe 5	165
Annexe 6	166
Annexe 7	168

Liste des figures

Figure I.1: Schéma d'un composite.....	4
Figure 1.2: La position des composites.....	5
Figure I.3: Différentes familles de matrice.....	9
Figure I.4: Les différents types de renfort de base.....	10
Figure I.5: Les différentes formes de présentation de la fibre du verre.....	11
Figure I.6: Chaîne et trame d'un tissu.....	12
Figure I.7: Principaux types de tissus.....	13
Figure I.8: Tissage cylindrique et conique.	13
Figure I.10: Comparaison entre les différents types de verre.	16
Figure I.11: Désignation d'un stratifié.	23
Figure I.12: Structure en sandwich.....	24
Figure I.13: Principe de moulage au contact.....	25
Figure I.14: Moulage par projection simultanée.....	26
Figure I.15: Principe de moulage par injection.....	27
Figure I.16: Moulage sous vide.....	29
Figure I.17: Principe de la pultrusion.....	30
Figure I.18: Procédés de fabrication des formes de révolution.	31
Figure I.19: Principe de moulage par enroulement filamentaire.....	32
Figure II.1: Les principaux groupes de polymères.....	35
Figure II .2: Macromolécule de polypropylène	42
Figure II.3: Schéma de structure semi-cristalline des polymères.....	43
Figure II.4: Courbes de traction du matériau avec fibres traitées.	50
Figure II.5: Courbe contrainte-déformation d'un PP pur et chargé de talc en traction....	51
Figure III.I: Traction longitudinale.....	54
Figure III.2: Traction transversale.....	55
Figure III.3: Traction hors axes.....	55
Figure III.4: Géométrie de l'essai de flexion trois points.....	58
Figure III.5: Courbe de Force-Déplacement.....	59
Figure III.6: Diagramme des efforts tranchants et moment fléchissant.....	60

Figure III.7: Représentation du champ des contraintes en flexion trois points.....	62
Figure III.8: Types d'endommagement en flexion 3 points des unidirectionnels.....	64
Figure III.9: Mouton pendule de Charpy.....	66
Figure III.10: Courbes de fluage.....	67
Figure III.11: Les trois stades d'un essai de fluage.....	68
Figure III.12: Courbes de fluage en traction	69
Figure III.13: Courbe d'absorption d'eau pour un composite.....	75
Figure III.14: Courbe d'absorption Fickienne.	77
Figure III.15: Courbes d'absorption d'eau non Fickienne.....	79
Figure IV.1 : Différents types de sollicitation en flexion.....	83
Figure IV.2 : Principales zones de la courbe de Wöhler.....	84
Figure IV.3 : Courbe de Wöhler d'un matériau composite.....	88
Figure IV.4: Interprétation de la courbe de Wöhler (Diagramme de Talreja).....	89
Figure IV.5 : Définition des critères de fin d'essai en flexion trois points.....	90
Figure IV.6 : Courbe charge – déplacement.....	91
Figure IV.7 : Courbe d'endommagement.....	92
Figure IV.8 : Courbe de Wöhler avec différents critères de fin d'essai.....	92
Figure IV.9 : Schéma de principe d'une machine de fatigue.....	93
Figure IV.10 : Schéma de principe d'une machine de fatigue à rotation.....	94
Figure IV.11 : Courbes d'endurance en flexion trois points.....	95
Figure IV.12 : Les différents types d'endommagement.....	97
Figure IV.13 : Rupture de fibre.	98
Figure IV.14 : Rupture de la matrice.	99
Figure IV.15 : Modes de fissuration de la matrice.	100
Figure IV.16: Décohésion fibre-matrice.....	100
Figure IV.17: Propagation de la rupture dans le cas d'une forte interface.....	101
Figure IV. 18 : Propagation de la fissure dans le cas d'une faible adhérence	102
Figure IV.19 : Propagation d'une fissure matricielle perpendiculairement aux fibres.....	103
Figure IV.20 : Rôle de l'interface dans le comportement mécanique.....	104
Figure IV.21 : Diagramme contrainte – déformation.....	106
Figure IV.22: Rupture d'un composite.....	107
Figure IV.23 : Rupture d'un composite soumis à une compression longitudinale.....	108

Figure V.1 : Plaque de matériau composite en fibres discontinues.....	110
Figure V.2 : Micrographies des longueurs de fibres.....	112
Figure V.3 : La règle de mesure.....	113
Figure V.4 : Observation de la disposition des fibres.....	114
Figure V.5 : Mesure du diamètre des fibres (X100).....	114
Figure V.6 : Géométrie de l'éprouvette.....	115
Figure V.7 : Sens de découpage des éprouvettes.....	116
Figure V.8 : Courbes d'absorption des échantillons longitudinaux.....	119
Figure V.9 : Courbe d'absorption moyenne des échantillons vieillis.....	120
Figure V.10 : Machine de flexion.....	123
Figure V.11 : Géométrie de l'essai de flexion.....	124
Figure V.12 : Machine de fatigue.....	124
Figure V.13 : schéma de fonctionnement de la machine de fatigue.....	125
Figure V.14 : Evolution effort-déplacement lors d'un essai statique à rupture.....	127
Figure V.15 : Evolution effort-déplacement lors d'un essai élastique.....	127
Figure V.16 : Courbe d'étalonnage du capteur d'effort.....	130
Figure V.17 : Courbe d'évolution force /flèche FCT.....	131
Figure V.18 : Evolution des contraintes /déformations des éprouvettes FCT.....	132
Figure V.19 : Courbe d'évolution force /flèche FCL	133
Figure V.20 : Courbe d'évolution contraintes / déformations du FCL.....	133
Figure V.21 : Courbe d'évolution force /flèche FCL vieilli.....	134
Figure V.22 : Courbe d'évolution contraintes / déformations du FCL vieilli.....	135
Figure V.23 : Courbe d'évolution contraintes / déformations du FCL.....	135
Figure V.24 : Représentation en étoile des caractéristiques mécaniques.....	137
Figure V.25 : Evolution de E_{11} et G_{12} en fonction de l'éclatement de FCT.....	138
Figure V.26 : Evolution de E_{11} et G_{12} en fonction de l'éclatement de FCT.....	139
Figure V.27 : Evolution de E_{11} et G_{12} en fonction de l'éclatement de FCT.....	140
Figure V.28 : Evolution de E_{11} et G_{12} en fonction de l'éclatement de CFL.....	141
Figure V.29 : Evolution de E_{11} et G_{12} en fonction de l'éclatement de CFL.....	142
Figure V.30 : Evolution de E_{11} et G_{12} en fonction de l'éclatement de CFL.....	143
Figure V.31 : Courbe d'évolution contrainte / déformation essai élastique pour FCT..	144
Figure V.32 : Courbe d'évolution contrainte / déformation essai élastique pour FCL...	144
Figure V.33 : Evolution de la perte de rigidité en fonction du nombre de cycles.....	146
Figure V.34 : Courbe de Wöhler des éprouvettes non vieilles.....	148

Figure V.35: Courbe de Wöhler des éprouvettes vieilles.....	149
Figure V.36 : Comparaison des résultats obtenus lors de l'essai de fatigue.....	151
Figure V.37 : Faciès de rupture en fatigue.....	153

Liste des tableaux

Tableau I.1: Avantages et inconvénients des fibres de verre.....	15
Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients des fibres de carbone.....	17
Tableau I.3 : Principales caractéristiques mécaniques des fibres de base.....	19
Tableau I.4 : Caractéristiques principales de moulage au contact.....	25
Tableau I.5 : Caractéristiques principales de moulage par projection simultanée.....	26
Tableau I.6 : Caractéristiques principales de moulage par injection de résine.....	28
Tableau I.7 : Caractéristiques principales de moulage sous vide.....	29
Tableau I. 8 : Caractéristiques principales de moulage par enroulement filamentaire.....	33
Tableau II.1: Caractéristiques des résines TP et TD.....	36
Tableau II.2 : Principales différences entre matrices TP et TD.....	37
Tableau II.3 : Avantages et inconvénients des Polyesters insaturés.....	39
Tableau II.4 : Avantages et inconvénients des Epoxydes.....	40
Tableau II. 5: Influence des paramètres structuraux sur les principales propriétés des PP....	46
Tableau II.6 : Caractéristiques de différents polypropylènes chargés.....	49
Tableau II.7 : Paramètres moyens de traction d'un composite à fibres traitées.....	50
Tableau V.1 : Propriétés du polypropylène	111
Tableau V.2 : Propriétés des fibres de verre.....	111
Tableau V.3 : Détermination de la longueur moyenne des fibres.....	113
Tableau V.4 : Composite à fibres de verre.....	115
Tableau V.5 : Résultats de l'essai de perte au feu.....	117
Tableau V.6: Evolution des teneurs massiques des échantillons de composite.....	119
Tableau V.7 : Valeurs du taux d'absorption et coefficient de diffusion.....	121
Tableau V.8 : Etalonnage de la charge.....	129
Tableau V.9: Caractéristiques mécaniques des éprouvettes transversales.....	131
Tableau V.10: Caractéristiques mécaniques des éprouvettes longitudinales.....	132
Tableau V.11: Caractéristiques mécaniques des éprouvettes FCL vieilles.....	134
Tableau V.12: Modules apparents sous contraintes élastiques.....	138
Tableau V.13: Niveaux de sollicitation.....	146
Tableau V.14: Evolution des sollicitations en fonction du critère de fin d'essai.....	150
Tableau V.15: Valeurs de contraintes pour ½ cycle.....	152

Liste des symboles

- σ_{tr} : Contrainte de traction [MPa].
- E : Module de Young [GPa].
- ρ : Masse volumique [Kg/m^3].
- ρ_m : Masse volumique de la matrice [Kg/m^3].
- E_m : Module de Young de la matrice [GPa].
- E_f : Module de Young de la fibre [GPa].
- E_c : Module d'élasticité du composite [GPa].
- G_m : Module de glissement de la matrice [MPa].
- ν_m : Coefficient de Poisson .
- σ_m : Contrainte de la matrice [MPa].
- A : Allongement [%].
- α_f : Coefficient de dilatation de la fibre.
- α_m : Coefficient de dilatation de la matrice.
- σ_{fR} : Contrainte à la rupture de la fibre [MPa].
- ϵ_f : Déformation à la rupture de la fibre [%].
- ϵ_m : Déformation à la rupture de la matrice [%].
- ν_f : Fraction volumique de la fibre.
- ν_m : Fraction volumique de la matrice.
- G_f : Module de glissement de la fibre [MPa].
- l : Longueur [mm].
- d : Diamètre [mm].
- h : Epaisseur [mm].
- S : Section [mm^2]
- P : Charge [N]
- Y : Flèche [mm]
- T_v : Température de transition vitreuse [$^{\circ}\text{C}$].
- T_f : Température de fusion [$^{\circ}\text{C}$].

ε_1 : Déformation longitudinale.

ε_2 : Déformation transversale.

E_L : Module longitudinal.

τ : Contrainte de cisaillement [MPa].

μ : Coefficient de frottement.

E_{app} : Module de flexion apparent.

σ_{fl} : Contrainte de flexion [MPa].

σ : Contrainte de traction dans la fibre [MPa].

E_{fl} : Module de flexion [MPa].

M_f : Moment fléchissant [N.m].

Y_c : Flèche au centre [m].

I : Moment d'inertie de l'éprouvette.

W_{fl} : Energie de déformation en flexion

W_{tr} : Energie de déformation en traction.



Introduction

Générale



Les matériaux composites à matrice organique sont aujourd'hui largement utilisés dans des domaines très divers. Les bonnes propriétés mécaniques de ces matériaux permettent en effet un allègement des structures, particulièrement recherché dans des secteurs d'activités comme l'aéronautique et l'automobile.

Dans le domaine automobile, la course aux économies d'énergie et aux limitations d'émissions de gaz polluants suscite un intérêt croissant de la part des constructeurs et équipementiers pour l'utilisation des matériaux de faibles densités. En parallèle, le souci de protéger les automobilistes mais aussi les piétons lors d'un choc, est à l'origine de normes de sécurité de plus en plus sévères. Constitués de matériaux aux caractéristiques complémentaires, les composites apparaissent comme de bons candidats pour répondre à toutes ces exigences.

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

S'il est incontestable que rien ne peut remplacer l'expérience sur pièces réelles, quelle doit être alors la finalité des essais sur éprouvettes ?

C'est à cette question que nous tentons d'apporter notre contribution à partir de la caractérisation des propriétés mécaniques et leur évolution dans le temps au cours d'une sollicitation en flexion d'un composite en polypropylène renforcé par des fibres de verre courtes. Le but de ces études est d'essayer de prédire la durée de vie d'organes mécaniques soumis à une sollicitation cyclique à partir d'une caractérisation préalable du matériau.

Pour atteindre cet objectif, plusieurs étapes ont été nécessaires durant cette étude. Afin de parvenir à la mise au point de ce travail, nous l'avons divisé en cinq chapitres :

Nous aborderons au premier chapitre les matériaux composites. Nous rappelons dans un premier temps, une définition et une classification de ces matériaux, ainsi que les procédés de leur mise en œuvre. Les différents types de matrices organiques et les propriétés mécaniques ainsi que les principaux paramètres du matériau utilisés dans ce travail font l'objet du second chapitre. Nous décrivons au troisième chapitre les essais mécaniques indispensables pour accéder aux caractéristiques des matériaux. Au quatrième chapitre nous nous intéressons à la fatigue des composites et la procédure à suivre pour tracer la courbe de Wöhler, ainsi que la description des différents mécanismes d'endommagement.

Le dernier chapitre est consacré à l'identification du matériau étudié ainsi que la technique expérimentale. Une interprétation des différents résultats obtenus au cours des essais est présentée.

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

Chapitre

I

*Présentation des
Matériaux Composites*

Les matériaux composites ne sont pas un concept nouveau. Leur production se développe rapidement du fait des nombreux avantages qu'il offre par rapport aux matériaux conventionnels. Leur utilisation comme matériau de structure dans l'aéronautique, le transport automobile, les constructions navales ou dans le bâtiment a nettement augmenté grâce à leurs excellentes propriétés spécifiques. Parmi ces avantages, on cite leur faible densité, leur haute résistance, leur haute rigidité et leur excellente durabilité. Ils ont une bonne résistance à la corrosion et une bonne adaptabilité de leurs propriétés mécaniques aux sollicitations spécifiques qu'ils rencontrent au cours de leur utilisation.

I.1. Application et intérêt des matériaux composites

Le principal intérêt des composites réside dans la possibilité de réaliser des matériaux dont les performances et caractéristiques sont spécifiquement adaptées aux usages prévus. Les matériaux composites assurent diverses fonctions mécaniques (résistance à la traction, aux chocs, à l'abrasion etc.), chimiques (résistance à la corrosion, au feu etc.) et physiques (isolation thermique, électrique etc.) qui peuvent être regroupées selon des objectifs de durée de vie, de sécurité et de facilité de conception. Ces fonctions et objectifs sont diversement recherchés par les différents secteurs d'activité.

- dans l'aéronautique ces matériaux sont recherchés pour leur tenue à la fatigue, à la corrosion, au feu les possibilités d'intégration de fonctions, de réalisation de formes complexes et d'allègement de structures ;
- dans l'automobile, ces dernières qualités sont également appréciées, ainsi que la résistance à la corrosion et aux chocs ;
- dans le ferroviaire ce sont seulement la tenue au feu et la possibilité de formes complexes qui retiennent l'intérêt.

Les niveaux de performances exigés ainsi que l'importance des coûts relatifs varient également selon les secteurs. L'aéronautique requiert des performances très hautes sans que le coût soit prioritaire, alors que pour l'automobile les exigences techniques sont moyennes mais les coûts déterminants, le ferroviaire étant exigeant des deux points de vue.

I.2. Définition

Un matériau composite (figure I.1) peut être défini comme l'assemblage de plusieurs matériaux non miscibles de nature différente à l'échelle microstructurale afin d'obtenir un matériau hétérogène et fortement anisotrope. Les composites sont le plus souvent constitués d'une matrice dans laquelle on a dispersé de façon contrôlée des renforts. La matrice maintient les renforts et assure les transferts de charge, tandis que les renforts apportent principalement leurs caractéristiques mécaniques élevées (modules et limite d'élasticité, résistance mécanique...) [1].

L'interface assure la compatibilité des constituants et la parfaite cohésion entre les renforts et la matrice.

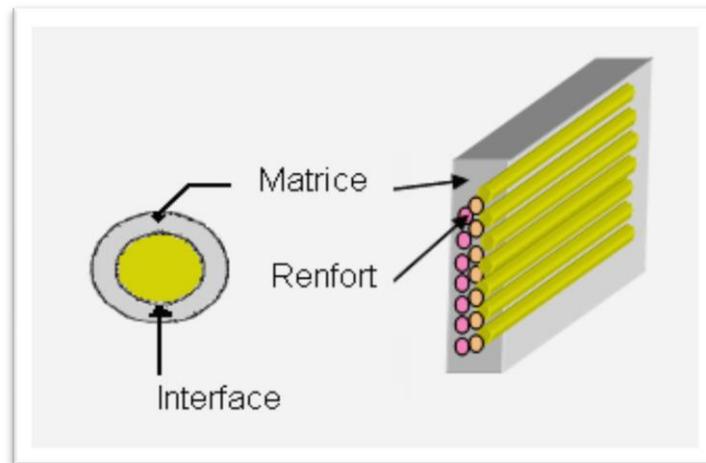


Figure I.1 : Schéma d'un composite.

Cette association a pour but d'obtenir un matériau dont les propriétés spécifiques (propriétés mécaniques rapportées à la masse volumique) sont supérieures à celles de la matrice non renforcée. Le concept de matériau composite, par le choix des constituants et de leurs proportions respectives, ainsi que par le choix de la forme, des dimensions et de la disposition des renforts, permet donc de concevoir un matériau présentant les caractéristiques spécifiques recherchées.

On peut alors retenir de la figure 1.2 l'arborescence de la famille des matériaux de synthèse avec la place spécifique des composites [2].

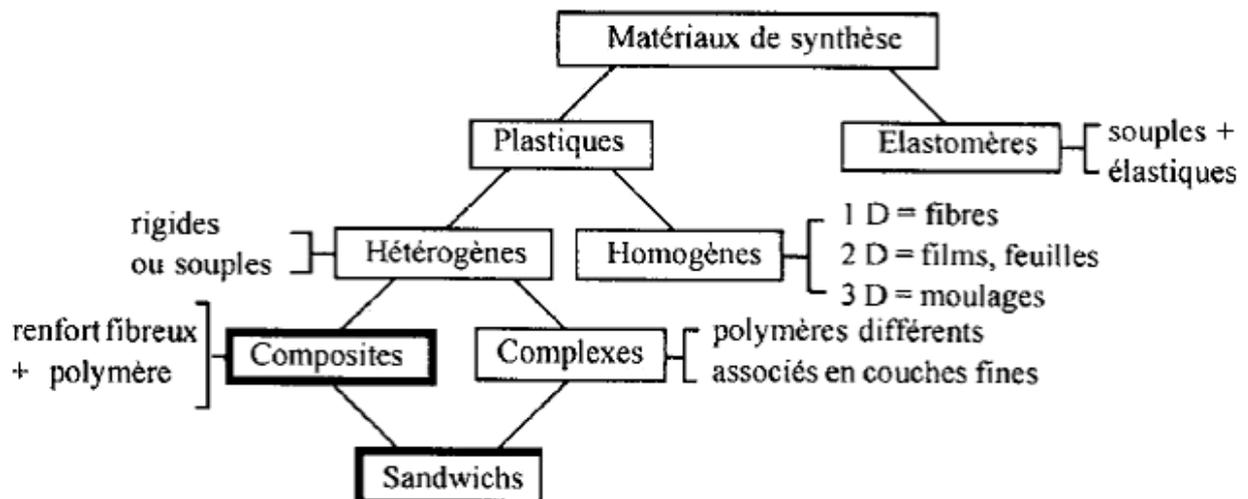


Figure 1.2: La position des composites

I.3. Caractéristiques générales des matériaux composites

Dans le cas général, un matériau composite comprend une ou plusieurs phases discontinues (renfort) réparties ou noyées dans une phase continue (matrice). Dans le cas où le matériau composite contient plusieurs phases discontinues de nature différentes, le matériau est dit hybride.

Le matériau composite au niveau de ses propriétés doit s'adapter aux exigences de conception, alors que la conception découle habituellement des propriétés des matériaux constitutifs, donc on réalise à la fois le matériau et le produit.

Pour cela le système d'élaboration inclut [3]:

- la nature, la texture et la forme du renfort ;
- le taux de renforcement ;
- la nature de la résine, des charges et additifs ;
- la qualité de l'interface renfort-matrice ;
- la géométrie de la pièce à réaliser ;
- le procédé de mise en œuvre utilisé.

En particulier le couple constituant/procédé est indissociable, donc le but recherché est de mieux orienter les renforts en fonction des efforts. Nous réalisons en quelque sorte une anisotropie contrôlée (des matériaux à la carte).

I.4. Classification des matériaux composites

Les matériaux composites peuvent être classés suivant la forme et la nature des constituants.

I.4.1. Classification suivant la forme

En fonction de la forme des constituants, on distingue deux grandes classes.

a. Composites à fibres

Un matériau composite est dit à fibre, si le renfort se trouve sous forme de fibres. Les fibres se présentent sous forme continue ou discontinue. L'arrangement des fibres et leur orientation permettent de moduler les propriétés mécaniques des matériaux. Deux grandes catégories peuvent être distinguées [4]:

- **Composites à hautes performances (HP)** : Sont surtout des matériaux composites à résine époxyde renforcées par des fibres de verre, de carbone ou d'aramide. Ils possèdent des caractéristiques mécaniques très élevées.
- **Composites à grandes diffusions (GD)** : Sont les plus courants, généralement réalisés à partir des fibres de verre et de résine, polyester insaturé ou phénolique, destiné à des fabrications de grandes séries.

Les principaux obstacles dans l'industrie des composites GD et HP sont :

- **Pour GD**

- **Freins techniques :**

- température d'emploi limitée ;
- inflammable ou susceptible d'entretenir un foyer quelconque ;
- vieillissement des structures ;
- problèmes liées à l'humidité (notamment en milieu marin ou en sous sol.

➤ Freins industriels :

- essentiellement liés aux codes de réglementation de construction ;
- ainsi qu'au recyclage des déchets (ex : pollution par les solvants).

➤ Freins économiques :

- coûts d'investissement et d'entretien élevés (fabrication, pose, contrôle, maintenance).

• Pour HP

➤ Freins techniques :

- les structures composites à base de carbone souffrent d'une résistance faible à l'impact ;
- les expérimentations restent longues et onéreuses.

➤ Freins industriels :

- en France, la mise en œuvre d'un nouveau produit, d'une nouvelle fibre est encore trop artisanale.

b. Composites à particules

Un matériau composite est dit à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule par opposition aux fibres ne possède pas des dimensions privilégiées. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la teneur à la température, la résistance à l'abrasion ... etc.

Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charges pour réduire le coût de matériau, sans en diminuer les caractéristiques [3].

I.4.2. Classification suivant la nature

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites que l'on classe généralement en trois familles en fonction de la nature de la matrice [5] :

✚ **Composites à matrices organiques (CMO)** : Ils constituent, de loin, les volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle ;

✚**Composites à matrices céramiques (minérales) (CMC)** : Réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme dans les domaines spatial, nucléaire et militaire, ainsi que le freinage (freins carbone) ;

✚**Composites à matrices métalliques (CMM)** : Bonne ductilité, bonne résistance à certains solvants et bonne tenue en température.

I.5. Présentation des constituants

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

I.5.1. Les matrices

Cette phase indispensable à la liaison des divers éléments constitutifs, est composée d'une résine (polyester, époxyde, etc....) et d'une charge (carbonate de calcium, graphite, etc.).

Leur rôle est de lier les renforts, de répartir les charges (contraintes, résistance à la traction et rigidité) et d'assurer la protection chimique contre les agents agressifs extérieurs tels que (acides, humidité, corrosion...) et donne la forme au produit réalisé; pour les composites plastiques, elle est par définition un polymère ou une résine organique. Le choix de la matrice dépend de l'utilisation à laquelle est destinée le matériau composite [6].

Nous pouvons retrouver dans l'organigramme de la figure I.3 [7] les différentes familles de matrices.

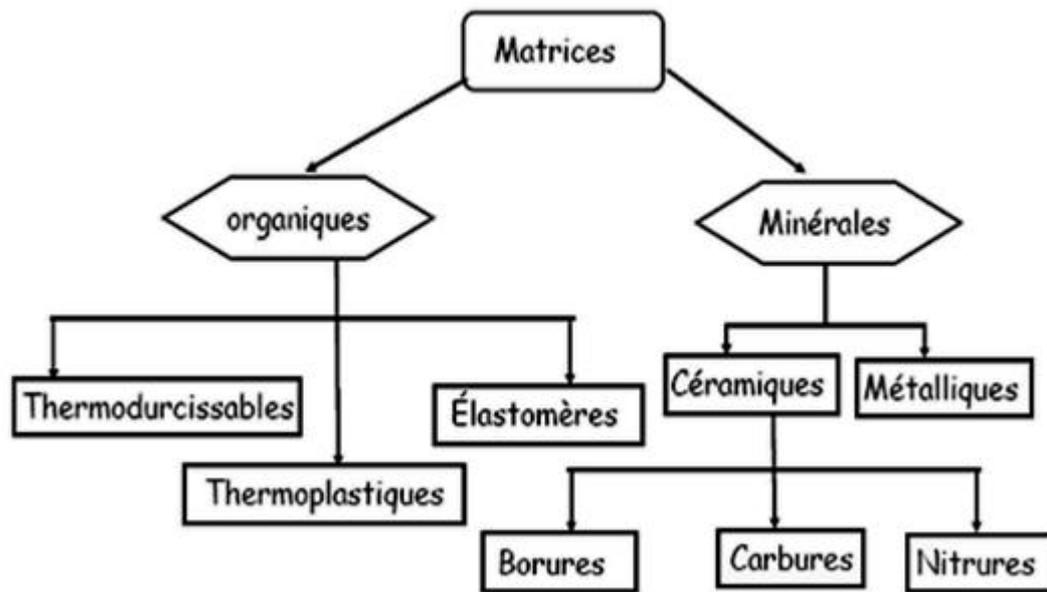


Figure I.3 : Différentes familles de matrice.

Trois familles principales correspondent à des matrices de nature différente : organique, métallique ou minérale. Les plus répandus actuellement sont les matériaux composites à matrice organique renforcée de fibres (90% de l'ensemble). Cette matrice est surtout choisie pour sa facilité de mise en œuvre.

I.5.2. Les renforts

Le but des renforts dans les matériaux composites est essentiellement d'accroître leurs propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc.) et d'améliorer des propriétés physiques, tels les comportements au feu et à l'abrasion, la tenue en température (conservation des caractéristiques mécaniques à haute température) ou les propriétés électriques. Outre les propriétés mécaniques élevées qu'ils procurent, les caractéristiques recherchées dans les renforts sont une masse volumique faible, une compatibilité avec les matrices et une facilité de mise en œuvre. Les renforts peuvent provenir d'origines diverses (Figure I.4).

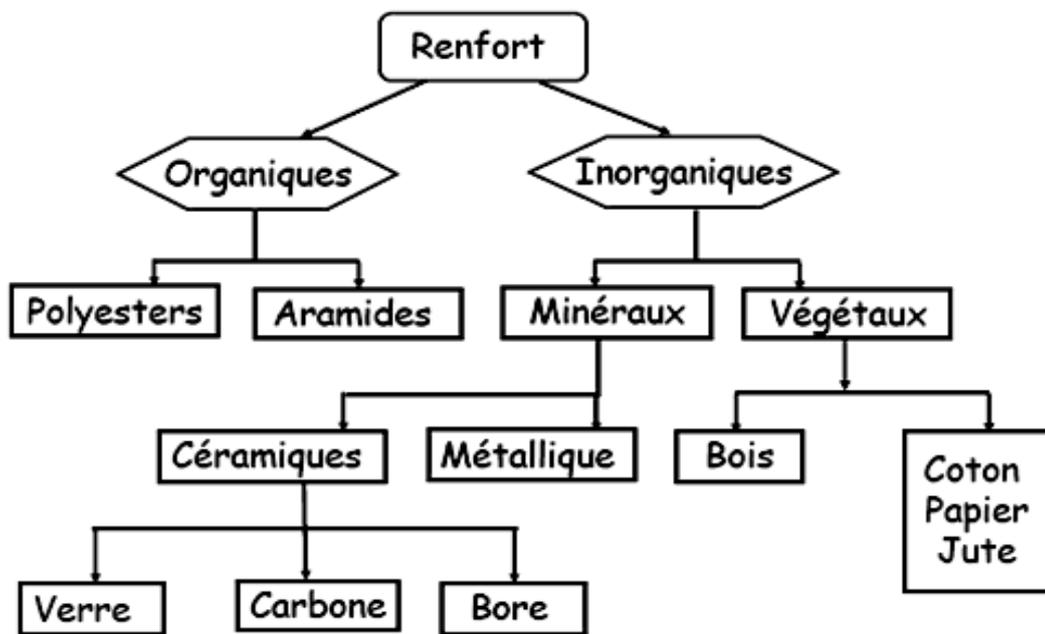


Figure I.4 : Les différents types de renfort de base.

I.5.2.1. Les fibres

Les fibres sont les éléments du matériau composites, elles se présentent sous forme de filaments, qui apportent les propriétés mécaniques intéressantes à la structure composite dont on trouve les qualités recherchées : bonne caractéristique mécanique, légèreté, résistance thermique, compatibilité avec les résines, adaptabilité aux procédés de mise en œuvre, faible prix. Dans une structure en composite, le renfort représente une fraction volumique comprise entre 30 et 70 % du volume total.

On les commercialise essentiellement sous forme de [8] :

- **Fibres courtes** : quelques centimètres ou fraction de millimètres : ce sont les feutres, les mats et les fibres courtes injectées utilisés en moulage.

Fibres dispersées dans une matrice isotrope, généralement sans orientation préférentielle; comportement macroscopique isotrope.

Elles sont utilisées, avec les thermoplastiques (TP), pour les pièces de petite taille moulées par injection et aux caractéristiques mécaniques réduites. Avec les thermodurcissables (TD), elles sont utilisées pour des températures supérieures à 150° C.

• **Fibres longues** : fibres longues noyées dans une matrice isotrope avec orientation établie; comportement macroscopique anisotrope. Elles sont coupées au moment de la fabrication du composite, utilisées telles quelles, ou bien tissées.

Les fibres se présentent sous diverses formes :

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

a. Forme linéique

Les fibres sont élaborées suivant un diamètre de quelques microns seulement (filaments élémentaires); trop petites pour l'utilisation unitaire, elles sont par conséquent réunies en fils ou en mèches de différentes formes (figure I.5) [8].

- Fil de base : ensemble de filaments élémentaires.
- Fil simple : ensemble de fils de base unitaires continus ou discontinus, maintenus ensemble par torsion.
- Fil retors : ensemble de fils simples retordus ensemble.
- Fil câblé : ensemble de fils retors, avec éventuellement des fils simples retordus une ou plusieurs fois ensemble.
- Mèches : ensemble de fibres élémentaires discontinues
- Stratifil : ensemble de fils de base continus.

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

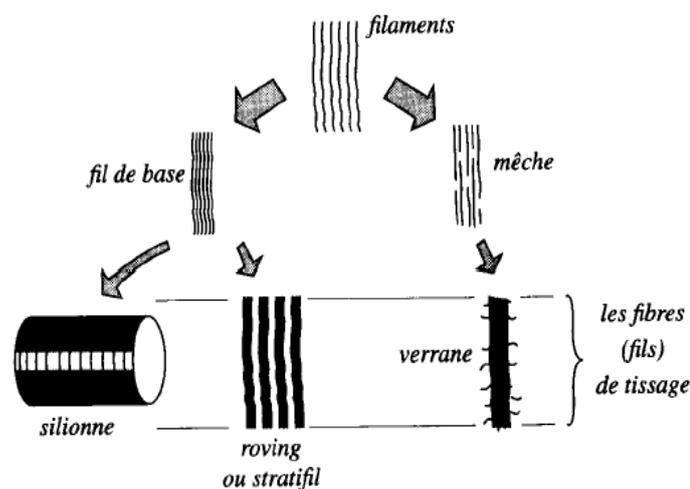


Figure I.5 : Les différentes formes de présentation de la fibre de verre.

b. Formes surfaciques

Les fils peuvent être utilisés pour réaliser des formes surfaciques de divers types[3] : mats, tissus ou rubans, essentiellement développés dans le cas de fibres de verre.

✦ **Les mats** : Ce sont 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 les résines. L'absence d'orientation préférentielle des fibres conduit à une isotropie des propriétés mécaniques du mat dans son plan.

✦ **Les tissus et rubans** : Les tissus (figure 1.6) réalisés à partir de fils, de mèches, etc., réalisé sur un métier à tisser, composé d'une chaîne (ensemble de fils parallèles répartis dans un plan suivant la longueur du tissu) d'une trame (ensemble de fils s'entrecroisant avec les fils de chaîne).

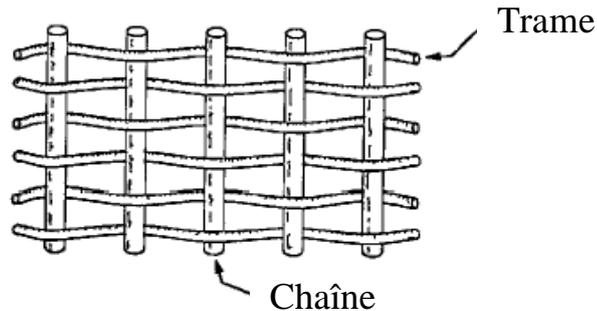


Figure I.6 : Chaîne et trame d'un tissu.

Les tissus sont classés selon l'entrecroisement des fils de chaînes et de fils de trame. Les principaux types (figure I.7) sont [9] :

- **Taffetas (toile)** : La chaîne et la trame s'entrecroisent alternativement, le tissu obtenu est très plat mais peu performant.
- **Satin** : Le fil de trame ne se croise pas avec tous les fils de chaîne. Chaque satin est défini par un chiffre de 4 ou 8, indiquant que le fil de trame n'entrecroise qu'un fil de chaîne sur 4 ou sur 8. Le fil de trame passe sous les autres fils de chaîne.

Les fils de croisement étant moins nombreux, sont la raison pour laquelle ce type de tissu offre une grande déformation par conséquent, une meilleure performance au niveau de traction et la compression et un faible cisaillement.

- **Serge** : Le fil de trame n'encroise qu'un fil de chaîne sur 3,4 ou 5 et passe sur les autres fils de chaîne. Son avantage réside dans sa densité et sa souplesse.

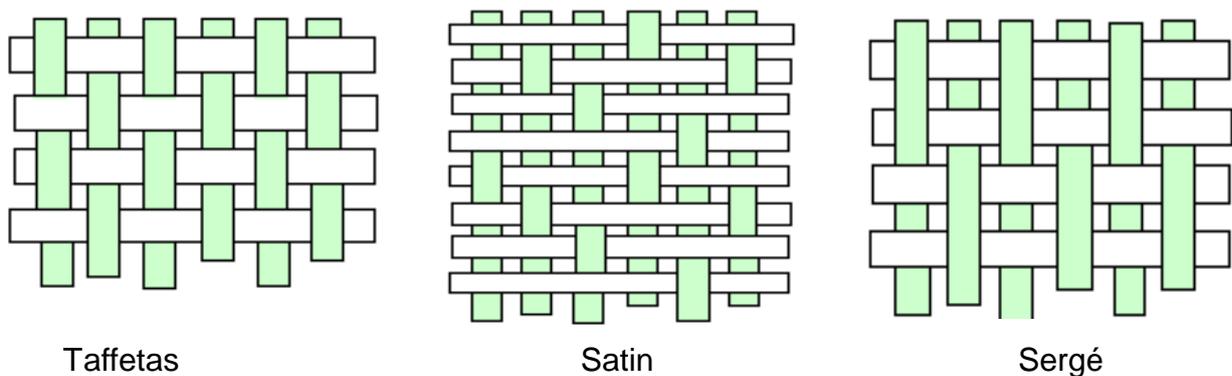


Figure I.7 : Principaux types de tissus.

c. Forme multidirectionnelle

✚ **Tresses et préformes** : Tissage cylindrique ou conique (figure I.8) avec des entrecroisements réguliers des fils qui a 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 [3].

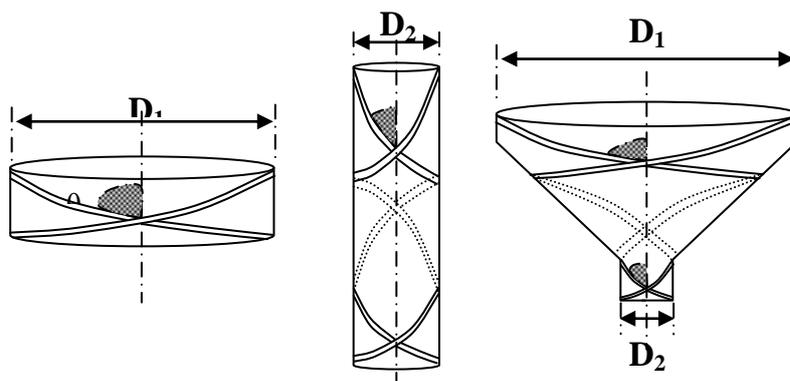


Figure I.8 : Tissage cylindrique et conique.

✦ **Tissus multidirectionnels** : Les fibres sont tissées dans plusieurs directions. Ceci permet d'obtenir un tissu très dense et épais mais par conséquent peu souple, il est utilisé par exemple pour la réalisation de tuyère. Des tissages 3D et 4D sont montrés respectivement par les figures I.9a et I.9b.

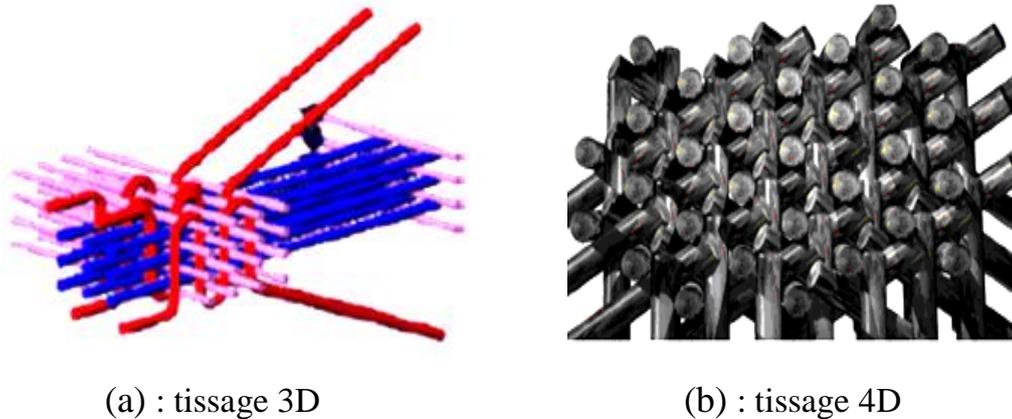


Figure I.9 : Tissus multidirectionnels.

I.5.2.1.1. Nature des principales fibres

✦ **Les fibres de verre** : Actuellement, c'est de loin le renfort le plus utilisé dans les matériaux composites en raison du rapport performance mécanique/prix. Ces fibres sont composées principalement d'oxydes, généralement de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3), de magnésie (MgO), de chaux (CaO) et d'oxyde de bore (B_2O_3).

On y retrouve aussi d'autres oxydes (Fe_2O_3 , K_2O , TiO_2 , etc.) et du fluor en très faibles proportions. En faisant varier la composition du mélange on peut obtenir différents types de verre.

Les fibres sont filées à travers des filières en alliage de platine et de rhodium. Chaque filière comporte un nombre important d'orifices (entre 400 et 4000) de 2 mm de diamètre environ. A une température de filage voisine de 1250°C pour les fibres de verre E, la viscosité est suffisamment basse pour que le mélange puisse s'écouler par

les filières et former des filaments qui sont étirés à très grande vitesse (une vitesse de 60 m/s), refroidis à l'air et ensuite à l'eau [10]. Ces avantages et inconvénients d'utilisation sont regroupés au tableau I.1 [11].

Les différents types de verre se distinguent par leurs propriétés et leurs utilisations.

- Verre E : fibre la plus couramment utilisée.
- Verre D : est utilisé pour les circuits imprimés (en raison de leurs propriétés diélectriques).
- Verre R ou S : sont utilisés dans les industries de pointe pour les pièces de haute performance en raison de leurs haute résistance mécanique.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Rapport performance mécanique / prix intéressant ; ⊕ Bonne adhérence avec toutes les résines ; ⊕ Disponibilité sous toutes les formes (fils, mat, tissus.) ; <ul style="list-style-type: none"> ⊕ Résistance à des températures élevées ; ⊕ Bonne résistance à l'humidité et à la corrosion ; ⊕ Dilatation et conductivité thermique faible ; ⊕ Bonne résistance spécifique (pour verre R) ; ⊕ Bonne propriété diélectrique. 	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Vieillissement au contact de l'eau ; ⊕ Faible module (par rapport au carbone ou aramide).

Tableau I.1: Avantages et inconvénients des fibres de verre.

La figure I.10 présente une comparaison entre les différents types de verre [12].

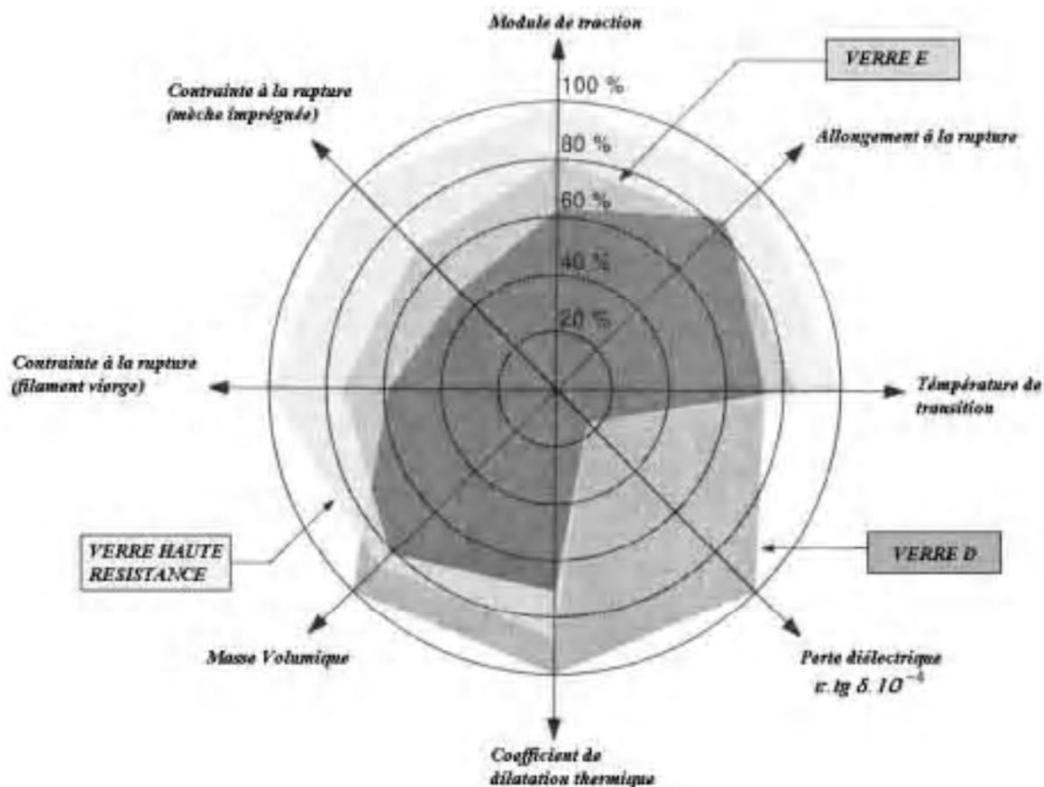


Figure I.10: Comparaison entre les différents types de verre.

✚ **Les fibres de carbone** : La fibre de carbone est la plus utilisée pour les composites (HP), elle est fabriquée d'une matière organique de base (appelée précurseur) constituée de fibre acrylique à partir du poly acrylonitrile (PAN) [8].

En raison de la diversité des techniques de fabrication et de nombre de paramètres entrant en jeu, les fibres produites ont des propriétés plus au moins différentes. On distingue deux grandes familles :

-Les fibres à haute ténacité (HT) ou à haute résistance (HR), $\sigma_{tr} = 3000$ MPa.

-Les fibres à haut module (HM), module en traction élevée. $E = 400$ GPa.

Ces avantages et inconvénients d'utilisation sont regroupés au tableau I.2 [11].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - excellentes propriétés mécaniques (ténacité, élasticité et module de Young) ; - très bonne tenue en température ; - dilatation thermique nulle ; - bonne conductibilité thermique et électrique ; - magnétisme et perméabilité aux rayons X ; - bonne tenue à l'humidité ; - usinabilité aisée ; - faible densité (<2). 	<ul style="list-style-type: none"> - prix très élevé ; - précautions à prendre dans la mise en oeuvre (fibres cassantes) ; - tenue limitée aux chocs et à l'abrasion ; - mauvais comportement chimique avec l'oxygène (à partir de 400°C), avec les acides oxydants à chaud et avec les métaux (corrosion galvanique) ; - adhésion difficile avec les résines.

Tableau 1.2 : Avantages et inconvénient des fibres de carbone.

✚ **Les fibres de bore :** Obtenues par dépôt chimique de chlorure de bore (BCl) et de l'hydrogène (H₂) sur un fil de tungstène de diamètre 13µm chauffé à une température comprise entre 1100 et 1300°C par effet joule.

✚ **Les fibres de carbure de silicium :** Le principe d'élaboration est analogue à celui de la fibre de bores: dépôt chimique en phase vapeur (1200°C) du méthyl trichlorosilane mélangé à l'hydrogène.

✚ **Les fibres d'aramide (Kevlar) :** Ce sont des fibres de polyaramides ou polyamides aromatiques de synthèse dont les cycles aromatiques sont reliés par des groupes CO et NH. L'obtention des fibres aramides se fait à basse température (- 10°C) puis par filage en solution. Les fibres sont ensuite étirées et traitées thermiquement pour augmenter leur module d'élasticité.

Les fibres aramides les plus connues sont le Kevlar mais elles existent sous d'autres noms commerciaux comme le Technora et le Twaron. Le comportement des fibres aramides est semblable à celui des métaux car sous faible charge elles sont élastiques et deviennent plastiques quand elles sont soumises à de fortes contraintes.

Elles constituent un bon compromis entre les fibres de carbone et celles à base de verre. Les fibres aramides ont une bonne tenue au feu.

†Les autres types de fibres : Cette partie rassemble toutes les fibres qui ne se retrouvent pas dans les autres groupes. Généralement ces fibres sont utilisées pour des applications spécifiques (papiers spéciaux, pour une bonne conductivité électrique).

Ces fibres possèdent des modules d'élasticité très faibles comparés aux autres fibres. Les fibres concernées sont :

- Les fibres d'origine végétale (cellulose, lin, chanvre, etc.) ;
- Les fibres d'origine minérale (amiante, silice) ;
- Les fibres synthétiques (tergal, spectra, dacron, etc.) issus des polyesters, de Polypropylène ou de polyéthylène ;
- Les fibres métalliques (acier, cuivre, aluminium) qui sont utilisées souvent avec des matrices métalliques.

Ces fibres sont appréciées pour diverses raisons par exemple :

- Leur prix de revient assez bas ;
- Leur haute capacité d'isolation thermique,
- Leur bonne conductivité thermique et électrique ;
- Leur propriété d'isolation acoustique ;

Les caractéristiques mécaniques des fibres sont résumées dans le tableau I.3 [8].

Fibre	Densité ρ Kg/m ³	Charge de rupture en traction MPa	Charge de rupture en compression MPa	Allongement à la rupture %	Module d'élasticité longitudinale MPa	Diamètre du filament élémentaire 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 haute ténacité	1.78	2800	1800	0.5	200000	8
Carbone haut module	1.8	2200	1300	-	400000	8
Bore	2.63	3500	3500	0.8	400000	100 – 200
Acier XC10	7.85	1000	-	-	210000	-
Aluminium	2.63	358	-	-	69800	-

Tableau I.3 : Principales caractéristiques mécaniques des fibres de base.

I.5.3. L'interface

Les matériaux composites permettent, par association de fibres à caractéristiques élevées à des matrices, d'obtenir des performances accrues dans les directions de renforcement. Ces performances dépendent des propriétés intrinsèques des matériaux constitutifs du composites, mais également de l'interface, c'est-à-dire l'adhésion entre le renfort et la matrice [13].

A l'échelle macroscopique l'interface est une surface sans épaisseur, il existe deux types :

- les interfaces générées par le procédé de mise en œuvre du matériau.

L'interface inter plis, défini par la superposition des plis et intra plis ou inter mèches au niveau d'un pli ;

- les interfaces liés à la structure elle-même du composite, créés par l'association des composants de base (matrice/renfort).

Il joue un rôle prépondérant dans la tenue du composite lorsqu'il est soumis à des contraintes. Il assure la compatibilité renfort/matrice en transmettant les contraintes de l'un sur l'autre, sans déplacement relatif.

Plusieurs rôles essentiels sont attribués aux interfaces pour un bon comportement du composite :

- assurer la continuité physique d'un constituant à l'autre à travers tout le matériau, en empêchant, par exemple, la formation de porosités ;

- transmettre les efforts : en effet, la matrice répartit et transmet les efforts aux fibres par l'intermédiaire des interfaces ;

- protéger l'une des deux phases : les fissures peuvent ainsi être déviées, l'humidité arrêtée par l'ensimage (fibre de verre) ou la réaction chimique de la matrice sur le renfort est ralentie (matrice métallique).

Les caractéristiques de ces liaisons (ou l'interface) sont fonction de plusieurs paramètres : les propriétés physico-chimiques des constituants (fibres et matrice), la microstructure, les contraintes thermiques résiduelles, la méthode d'élaboration du composite, etc...Il faut donc une bonne adhésion :

+Physico- chimique : Assemblage par liaison inter moléculaire entre la fibre et la matrice.

+Mécanique : Accrochage de la résine dans les aspérités existantes ou créés spécialement à la surface de la fibre.

A cause de sa structure, l'interface, peut être considérée d'un point de vue mécanique, comme un point faible du composite.

I.5.4. Les charges

Les composites peuvent être renforcés par un autre matériau se présentant sous forme de fines particules : ce sont les charges. Apportent des propriétés particulières ou complémentaires, leurs rôle est de modifier les caractéristiques des matériaux et permettent un abaissement du prix de revient. Elles sont utilisées surtout dans les composites de grande diffusion, elles peuvent remplir différentes fonctions.

a. Charges renforçantes

➤ Sphériques ($10 < \Phi < 150 \mu\text{m}$) : Leurs intérêts sont de répartir régulièrement les efforts et évitent les concentrations de contraintes dans la masse du composite.

On les trouve sous différents types : microbilles de verre creuses ou pleines, microbilles de carbone [11].

➤ Non sphériques : Elles se présentent sous forme d'écailles (environ $300 \times 10 \mu\text{m}$) ou de paillettes. On utilise essentiellement le mica sous cette forme, mais il existe également des écailles de verre, d'alumine, de carbure de silicium, pour ce type de charge leurs rôles est : d'améliorer les propriétés diélectriques, la rigidité mécanique, mais aussi la tenue aux agents chimiques.

b. Charges non renforçantes

Ces charges sont ajoutées à la résine afin de réduire le coût de la résine. Elles sont extraites de roches ou de minerais (carbonate de calcium, talc, kaolin, silices etc..). L'incorporation de ces charges à la matrice a pour effet d'augmenter certaines propriétés entre autres, la masse volumique, le module d'élasticité, la dureté, la viscosité et la stabilité dimensionnelle. Par contre, on obtient une réduction du prix, de la résistance à la traction et de la résistance à la flexion du composite.

- **Les Talcs** : Les talcs sont utilisés pour améliorer l'isolation thermique et la résistance à l'eau, et faciliter l'opération de moulage. Le talc est la charge la plus utilisée dans les thermoplastiques. Il leur confère une meilleure résistance au fluage ainsi qu'une plus grande rigidité. Notons également que l'introduction de talc facilite l'usinage des produits finis [9].

c. **Charges ignifugeantes** : hydrate d'alumine, oxyde d'antimoine.

I.5.5. Additifs

Ils s'ajoutent à faibles quantités, et interviennent comme :

- des catalyseurs ;
- des accélérateurs de polymérisation ;
- des lubrifiants et agents de démoulage ;
- des agents anti – retrait ;
- des agents anti – UV.

I.6. Architecture des matériaux composites

Les définitions suivantes sont utilisées pour comprendre les différentes architectures des composites.

- * **Renfort unidirectionnel** : Fibres de renforcement disposées dans une seule direction (sauf indication contraire, le renfort est supposé continu).
- * **Tissus** : Assemblage de mèches entrelacées.
- * **Renfort dispersé** : Fibres disposées sans direction préférentielle, ou réparties aléatoirement sur une surface (sauf indication, les fibres sont supposées coupées et de quelques centimètres de longueur) – autre dénomination mat.
- * **Pli** : Nappe élémentaire dans la constitution d'un stratifié.
- * **Couche** : Ensemble de plis identiques empilés avec la même direction.

I.6.1. Les stratifiés

Les stratifiés sont constitués de couches successives de renforts (fils, stratifils, mats...etc.) Imprégnées de résine, orientées de façon quelconque les unes par rapport aux autres [3].

Les avantages des stratifiés résident dans la possibilité d'adopter et de contrôler l'orientation des fibres pour que le matériau résiste à des sollicitations déterminées dans des meilleures conditions.

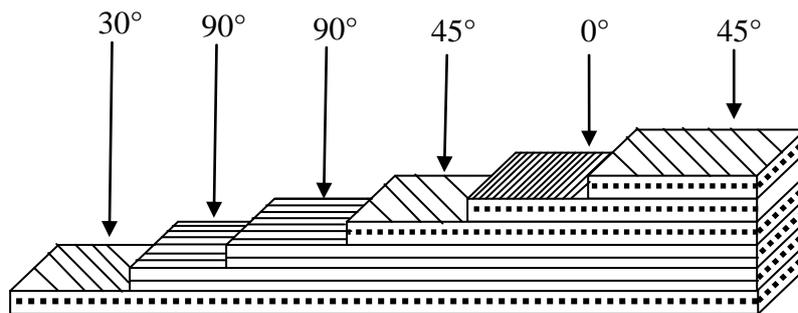


Figure I.11 : Désignation d'un stratifié.

La figure I.11 schématise un stratifié code (30/90₂/45/0/45)

Le codage se fait comme suite : depuis le pli extrême de coté $Z < 0$ jusqu'au pli extrême de coté $Z > 0$

- Chaque pli est repéré par son orientation ;
- Les plis successifs sont séparé par (/) ;
- Lorsque plusieurs plis de même direction sont groupés, un chiffre en indice indique le nombre des plis identique.

On pourra avoir des stratifiés de type :

- 1. Equilibré** : stratifié comportant autant de couches orientées suivant la direction $+ \theta$ que de couches orientées 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° que de couches à 90° .

I.6.2. Composites sandwiches

Cette technique consiste à déposer une âme ou cœur (constituée d'un matériau léger possède de bonnes caractéristiques en compression) entre deux feuilles ou peaux (possèdent de bonnes caractéristiques en traction). (Figure I.12)

Les âmes peuvent être pleines (bois, mousse, ...etc.) ou creuses (alliages métalliques léger, papier, ...etc.). Les peaux sont des stratifiés ou des feuilles d'alliages légers.

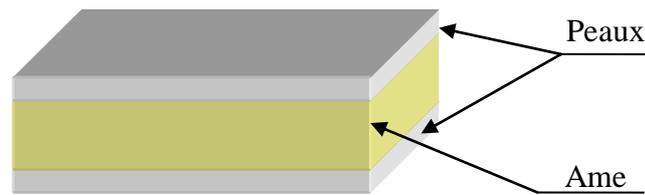


Figure I.12 : Structure en sandwich.

I.7. Procédès 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 final. De nombreuses méthodes de fabrication ont été développées pour répondre aux besoins, et leur choix dépend surtout des caractéristiques mécaniques dérivées et de la géométrie du produit, et l'importance des séries.

Il existe plusieurs méthodes pour élaborer et mettre en forme les composites qui peuvent être regroupées en catégorie :

- ✦ Par extrusion, très utilisée avec les thermoplastiques ;
- ✦ Par imprégnation, utilisée souvent avec les tissus et les fils ;
- ✦ Par dépôt pour les composites en sandwichs.

Ces techniques sont souvent suivies d'un moulage qui définit les formes du matériau.

Le moulage peut être réalisé de plusieurs façons :

I.7.1. Moulage sans pression

La méthode la plus simple permettant l'obtention de pièces en grande série et à bas prix. Le taux de renfort est toutefois limité ;

I.7.1. 1. Moulage au contact

➤ **Principe :** Procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée (figure I.13). Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée [9].

- **Cas d'utilisation** : Procédé pour petites séries : de 1 à 1000 pièces/an
Pièces de grandes à très grandes dimensions

Le procédé consiste à déposer sur la forme :

- Une couche de surface (gel coat) et des catalyseurs de polymérisation ;
- Alternativement des couches de renforts (mats ou tissus) imprégnés au rouleau d'une résine polymérisant dans des conditions proches de l'environnement ambiant de l'atelier.

- **Caractéristiques principales** :

Avantages	Limites
<ol style="list-style-type: none"> 1. Très larges possibilités de forme 2. Pas de limite dimensionnelle 3. Une surface lisse gelcoatée (aspect, tenue à la corrosion) 4. Propriétés mécaniques moyennes à bonnes 5. Investissements spécifiques très faibles 6. Moules simples, peu onéreux, rapide à réaliser en interne 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Une seule face lisse 2. Nécessité de finition (détourage, perçage, etc.) 3. Qualité tributaire de la main d'oeuvre 4. Faible cadence de production par moule 5. Espace de travail important Conditions de travail médiocres

Tableau I.4 : Caractéristiques principales de moulage au contact.

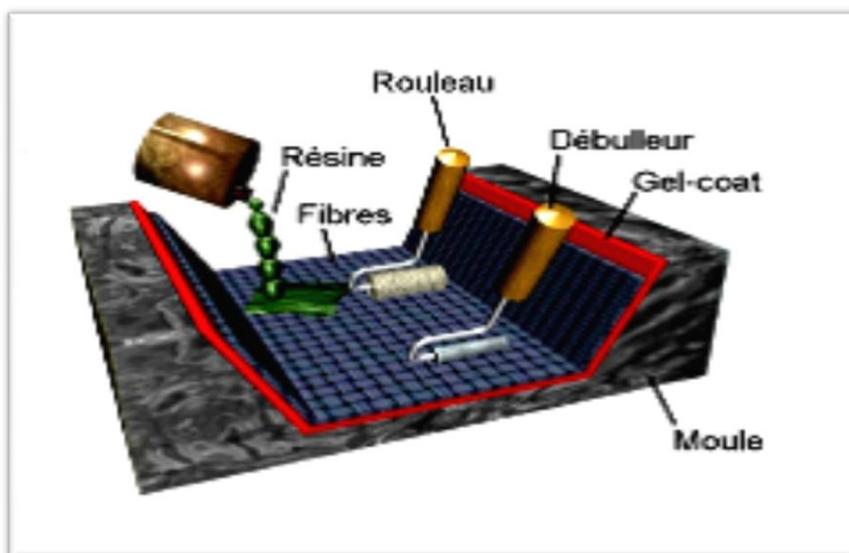


Figure I.13 : Principe de moulage au contact.

I.7.1.2. Moulage par injection simultanée

La technologie est similaire au moulage par contact mais la résine catalysée et les fibres de renfort coupées sont projetées simultanément au moyen d'un pistolet sur une forme (figure I.14). Cette forme peut être un moule, ou tout simplement une ossature de stratifié ou d'unidirectionnels qui peuvent faire partie de la structure ou non (procédés C-flex). La limite du procédé réside dans la qualité moyenne des pièces obtenues. Il est possible de disposer des tissus entre deux couches projetées, pour améliorer les caractéristiques. [3]

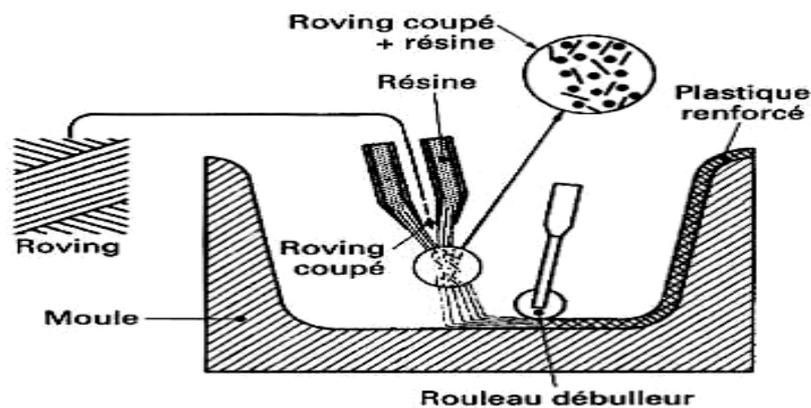


Figure I.14 : Moulage par projection simultanée.

- **Cas d'utilisation** : - Production de pièces de moyennes à grandes dimensions
 - Recherche de réduction des coûts par rapport au contact
 - Petite et moyenne série.

➤ **Caractéristiques principales :**

Avantages	Limites
1. Très larges possibilités de forme et dimensions	1. Une seule face lisse
2. Travail simplifié, suppression de la mise en forme obtenue directement par la projection	2. Propriétés mécaniques moyenne
3. Investissements très modérés	3. Qualité tributaire de la main d'oeuvre
4. Moules simples, peu onéreux, rapides à réaliser en interne	4. Conditions de travail très médiocres en absence d'agencements nécessaires

Tableau I.5 : Caractéristiques principales de moulage par projection simultanée.

I.7.2. Moulage par compression

Ce procédé de moulage permet d'obtenir des formes profondes et délicates. Il s'agit d'une méthode utilisée pour les composites à fort taux de renfort ou des pièces produites en grande quantité.

I.7.2.1. Moulage par injection de résine RTM (Résine Transfert Molding)

➤ **Principe** : Le moulage par injection (figure I.15) de résine liquide RTM (Résine Transfert Molding) s'effectue entre moule et contre moule rigides. Le renfort (mats, préforme, éventuellement tissus) est disposé dans l'entrefer du moule. Une fois celui-ci solidement fermé, 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. Après durcissement de la résine, le moule est ouvert et la pièce démoulée.

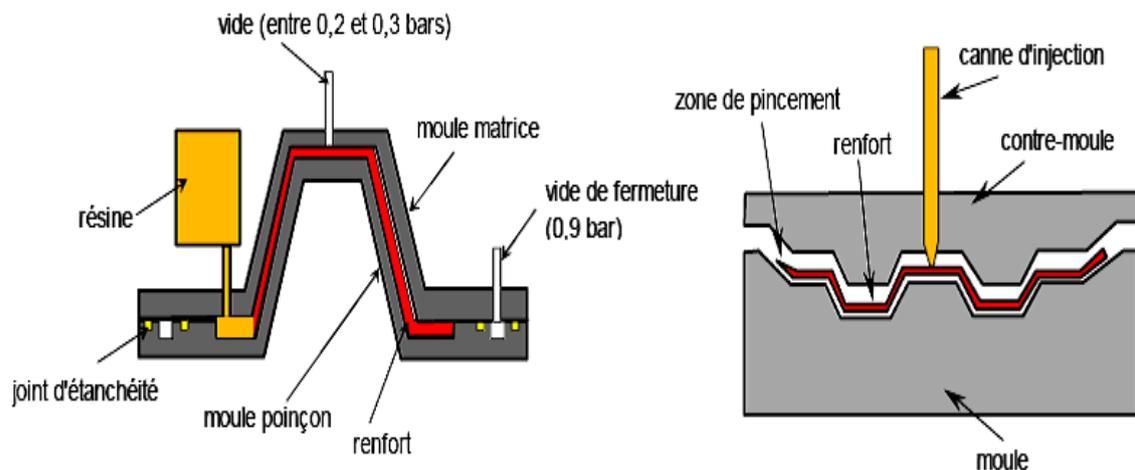


Figure I.15 : Principe de moulage par injection.

- **Cas d'utilisation** : Procédé pour moyennes séries : 1000 - 10000 pièces/an
- Pièces demandant une reproductibilité d'épaisseur

➤ **Caractéristiques principales :**

Avantages	Limites
<ol style="list-style-type: none"> 1. Deux faces lisses, éventuellement gelcoatée 2. Dimensions jusqu'à 7 m² 3. Qualité non tributaire de la main d'oeuvre 4. Qualité constante 5. Cadence de production élevée 6. Nécessite peu de surface 7. Investissements très modérés 8. Bonnes conditions de travail et d'hygiène 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Limité aux formes peu ou moyennement complexes 2. Taux de renforcement et caractéristiques mécaniques moyennes à élevées 3. Nécessité d'effectuer des finitions post moulage

Tableau I.6 : Caractéristiques principales de moulage par injection de résine.

Il existe encore d'autres types comme : **[8]**

- moulage par compression semi-produit thermodurcissable ;
- l'imprégnation en continu ;
- Injection des thermoplastiques renforcés ;
- Procédé d'estompage ;
- Procédé d'injection par réaction de R-Rim.

I.7.3. Moulage sous vide

Ce procédé appelé aussi moulage en dépression ou moulage au sac (figure I.16). On utilise un moule ouvert sur lequel on dispose les couches de renfort imprégné, ainsi éventuellement que les âmes de remplissage lorsqu'il s'agit de matériaux sandwiches. Une feuille de plastique vient couvrir le tout hermétiquement (pose d'un joint d'étanchéité sur le périmètre de la pièce). On fait le vide sous la feuille. **[8]**

Il y a alors compactage de la pièce, élimination des bulles d'air, fluage de l'excédant de résine qui est absorbée par un tissu de pompage. L'ensemble est ensuite soumis à polymérisation :

- En étuve ;
- En autoclave, avec suppression (7 bars dans le cas du carbone / époxyde pour obtenir une meilleure résistance mécanique.

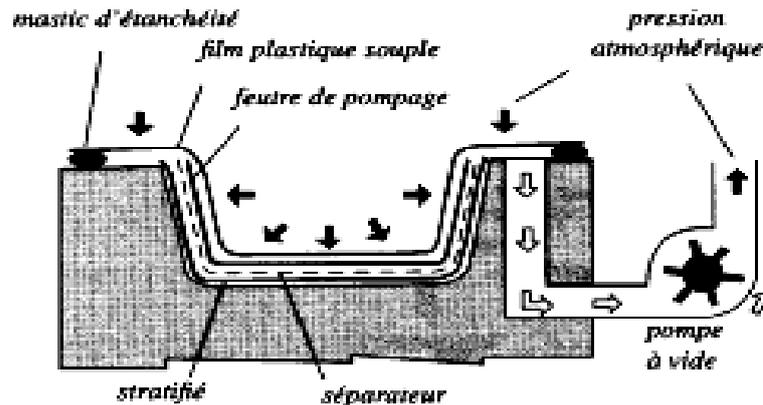


Figure I.16 : Moulage sous vide.

• **Cas d'utilisation**

- Production en petites séries de pièces nécessitant deux faces lisses ;
- Amélioration des conditions de travail et d'hygiène (réduction des émanations de styrène).

• **Caractéristiques principales**

Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> -Deux faces lisses, éventuellement gel coatées -Qualité non tributaire de la main d'œuvre -Qualité constante -Bonne cadence de production - Nécessite peu de surface -Investissements très modérés -Bonnes conditions de travail et d'hygiène 	<ul style="list-style-type: none"> -Possibilités de formes plus réduites qu'au contact -Mise au point parfois difficile

Tableau I.7 : Caractéristiques principales de moulage sous vide.

I.7.4. Les procédés de transformation en continu

Les procédés de transformation en continu permettent une réalisation automatique de profilés en composites et comprennent essentiellement la pultrusion et l'imprégnation en continu.

1.7.4.1. Imprégnation en continu

L'imprégnation continue a été le premier procédé industrialisé de fabrication des composites. Il permet de produire simultanément et d'une manière continue le matériau composite et les produits finis sous formes de plaques.

Le cycle de fabrication est de l'ordre de 6 à 12 mètres/minute. Les étapes de mise en œuvre du procédé sont les suivantes :

- les renforts (mats de fibres de verre coupées) et la résine polyester sont mélangés par absorption et pression mécanique sur un rouleau transfert ;
- la polymérisation a lieu dans une étuve entre 60°C et 80°C.

Les principales applications concernent essentiellement la construction civile et industrielle avec des plaques ondulées, des bacs de couverture (toiture) industrielle, des couvertures d'étanchéité d'habitation et des chemins de câbles.

1.7.4.2. La pultrusion

Le procédé de transformation en continue, dit pultrusion, permet de fabriquer par une opération unique et continue le matériau composite et le produit fini sous forme de profilés longs, en effet, le renfort filamentaire est imprégné de résine puis formé par traction à travers une filière chauffée qui assure la polymérisation. La figure I.17 présente le principe de la pultrusion. Les cadences de production sont de l'ordre de mètre de profiler par minute [3].

La pultrusion utilise :

- ✓ Des fibres de verre (GD) ou de carbone (HP) avec des taux de renforts de 50 à 80% ;
- ✓ Des résines polyester (GD) ou époxy (HP) ;

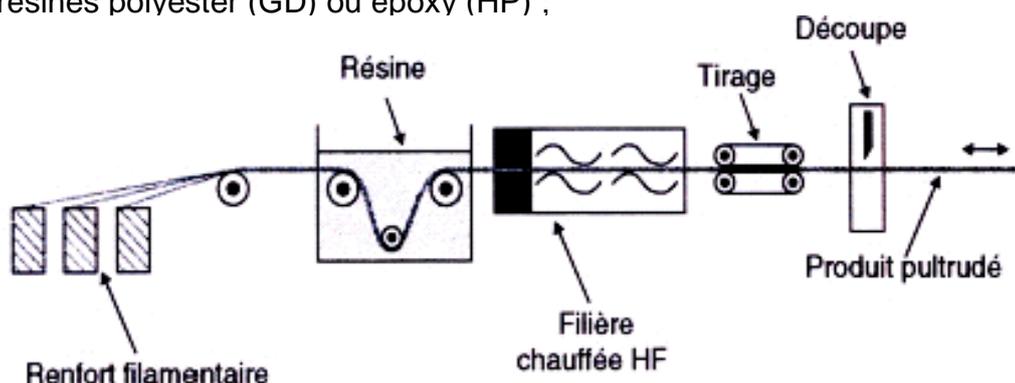


Figure I.17 : Principe de la pultrusion.

I.7.5. Procédés de fabrication des formes de révolution

I.7.5.1. La transformation par centrifugation

Technique réservée pour les formes cylindriques (tubes, tuyaux) ; Les composites transformés par centrifugation ont des propriétés mécaniques moyennes ; Elle permet de réaliser simultanément le corps de révolution et le matériau composites :

- la résine polyester et le renfort, sous forme de fibres de verre coupées, sont introduits successivement dans un moule métallique cylindrique tournant ;
- la résine imprègne le renfort sous l'effet de la force centrifugeuse et forme, après polymérisation, une structure de révolution.

Le cycle de fabrication est d'une durée de quelques heures (fonction du volume réalisé). Le procédé n'a que des applications marginales réduites à quelques pièces cylindriques tels des mâts ou supports et des silos. Le choix des formes est limité et les caractéristiques mécaniques sont moins bonnes que celles des composites obtenus par enroulement filamentaire [8].

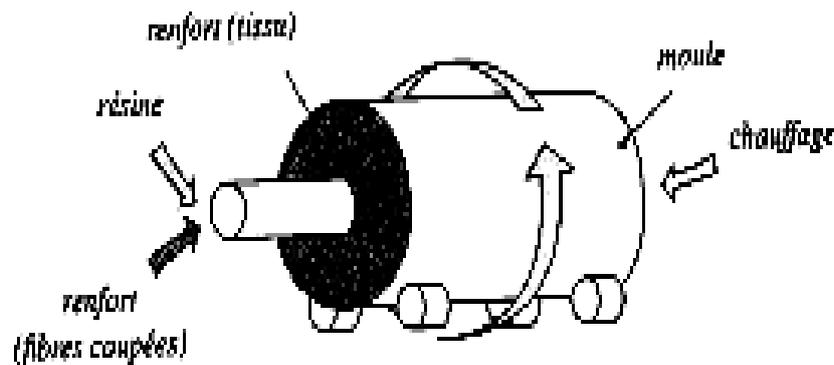


Figure I.18 : Procédés de fabrication des formes de révolution.

I.7.5.2. L'enroulement filamentaire

➤ **Principe** : Procédé de moulage limité aux formes de révolution. Initialement, destiné à la réalisation d'enveloppes de révolution nécessitant de hautes performances mécaniques par enroulement progressif sur un mandrin, selon un angle déterminé de fils de verre imprégnés de résine (figure I.19) [7].

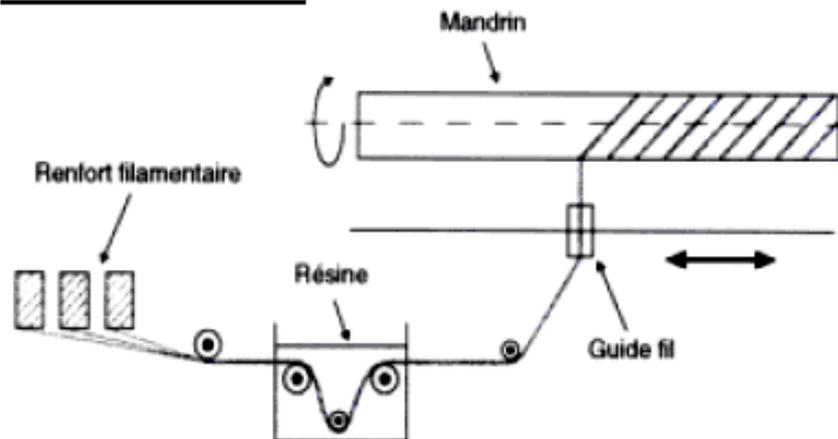
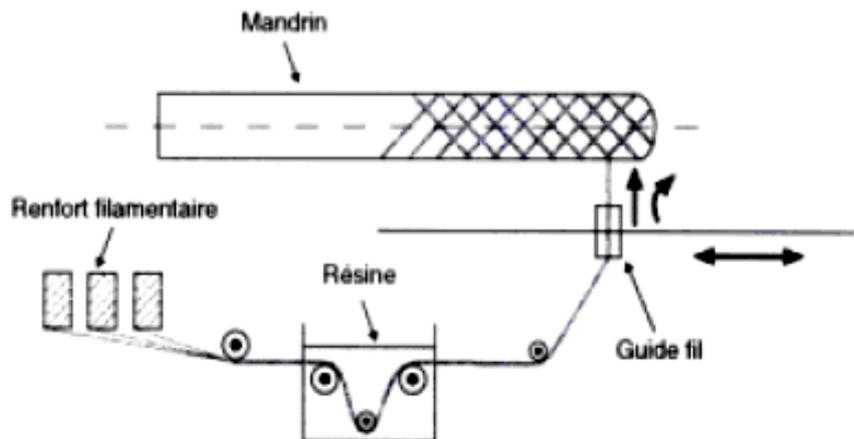
Enroulement CylindriqueEnroulement Polaire

Figure I.19 : Principe de moulage par enroulement filamentaire.

Ce procédé a été étendu à des structures moins performantes en associant aux rovings bobinés d'autres types de renfort (fils coupés, mat, tissu) appliqués de façon adaptée. Suivant le mouvement relatif du mandrin on distingue :

- l'enroulement circonférentiel, hélicoïdal, discontinu ou continu ;
- l'enroulement polaire.

Ce procédé est utilisé pour la fabrication des pièces pouvant résister aux pressions internes (réservoirs, corps de propulseurs).

➤ **Cas d'utilisation :**

- Toutes pièces de révolution à produire en série ;
- Pièces nécessitant une résistance élevée.

➤ **Principales caractéristiques :**

Avantages	Limites
1. Pièces à haute, voire très haute résistance (taux de renfort jusqu'à 80 % pondéral, fils continus orientés selon la direction des contraintes) 2. Très grande latitude dimensionnelle (de quelques mm à plusieurs mètres en diamètre et longueur) 3. Part de main d'œuvre réduite : mécanisation 4. Cadences de production élevées	1. Formes de révolution seulement 2. Une seule face lisse 3. Investissements assez élevés (lignes industrielles)

Tableau I. 8 : Caractéristiques principales de moulage par enroulement filamentaire.

La conception d'un matériau composite dépend du type d'application, de chargement, etc. Ce qui le diffère fortement des matériaux classiques, où la conception d'une structure est adaptée en fonction du matériau constitutif. Il est évident de voir que la qualité et la convenance d'un matériau composite dépendent du choix de ces deux composants de base (matrice et fibres) en fonction des applications spécifiques qui lui sont envisagées.

En particulier, la recherche du meilleur couple matériau / procédé de fabrication d'une pièce va prendre en compte de nombreux critères : des critères techniques et industriels liés à la capacité et à la disponibilité des moyens de mise en forme, des critères économiques liés au coût de la matière et aux coûts de production et enfin des critères sociaux guidant les orientations des choix du client final.

Maintenant nous remarquons une avancée étonnante de l'emploi des matériaux composites à matrice organique. Ils sont aujourd'hui largement utilisés dans des domaines très divers, il est donc nécessaire de présenter les matrices organiques au chapitre II.

Chapitre

II

*Matrices
Organiques*

Dans un matériau composite, le terme matrice désigne la matière solide qui entoure les renforts pour former une masse compacte. Ce solide qui forme la matrice peut être d'origine organique, métallique, ou céramique.

Le premier rôle de la matrice est de protéger les fibres contre l'abrasion et l'environnement agressif. Elle sert entre autres à :

- assurer le transfert adéquat des contraintes mécaniques appliquées au matériau composite. Pour ce faire, elle doit adhérer suffisamment aux fibres afin que ce transfert soit optimal et que les déplacements soient limités. En outre, la matrice ne doit pas être trop rigide, car elle risquerait alors de contrarier le travail des fibres. Enfin, sa ductilité constitue également un paramètre important ;
- incorporer les fibres, c'est-à-dire qu'elle permet de fabriquer facilement le matériau composite, et ce au coût le plus faible possible.

Bien que les propriétés mécaniques de la matrice soient très faibles devant celles des renforts, la performance générale du composite (matrice/renfort) est très dépendante du choix de la matrice. Le rôle de la matrice devient très important pour la tenue à long terme (fatigue, fluage).

II.1. Matrices organiques

Les matrices organiques sont faites de matières plastiques. Elles sont désignées sous le vocable beaucoup plus large de résines. Elles sont obtenues à partir de polymères modifiés par différents adjuvants et additifs.

Elles permettent de réaliser des structures légères et performantes et des pièces de formes complexes. La matrice peut aussi être un mélange de polymères différents afin d'améliorer certaines caractéristiques [11].

Les polymères sont des enchaînements macromoléculaires organiques de motifs (ou monomères) simples ou différents. Un monomère est une suite d'atomes de carbone liés entre eux et avec d'autres éléments (H, N, Si, Cl...). La nature chimique des monomères constituant les macromolécules, leurs nombres et leurs arrangements procurent aux polymères des propriétés élastiques ou viscoélastiques particulières [14].

On distingue des homopolymères, répétition d'une unique structure moléculaire, et des copolymères, répétition de plusieurs structures différentes. Les polymères sont donc l'élément essentiel de nombreux matériaux et sont donc souvent classés d'après leurs propriétés thermomécaniques [15]. Citons notamment :

- les **thermoplastiques**, qui deviennent malléables quand ils sont chauffés ce qui permet leur mise en œuvre;
 - les **thermodurcissables**, qui durcissent sous l'action de la chaleur ou par addition d'un additif;
 - les **élastomères**, qui sont déformables de manière réversible. Elles sont renforcées par plusieurs fibres pour les appliquer dans le domaine d'automobile. Ils sont caractérisés par une forte élasticité avec un module d'Young très faible.
- Les principaux groupes sont présentés dans la figure II. 1 [16].

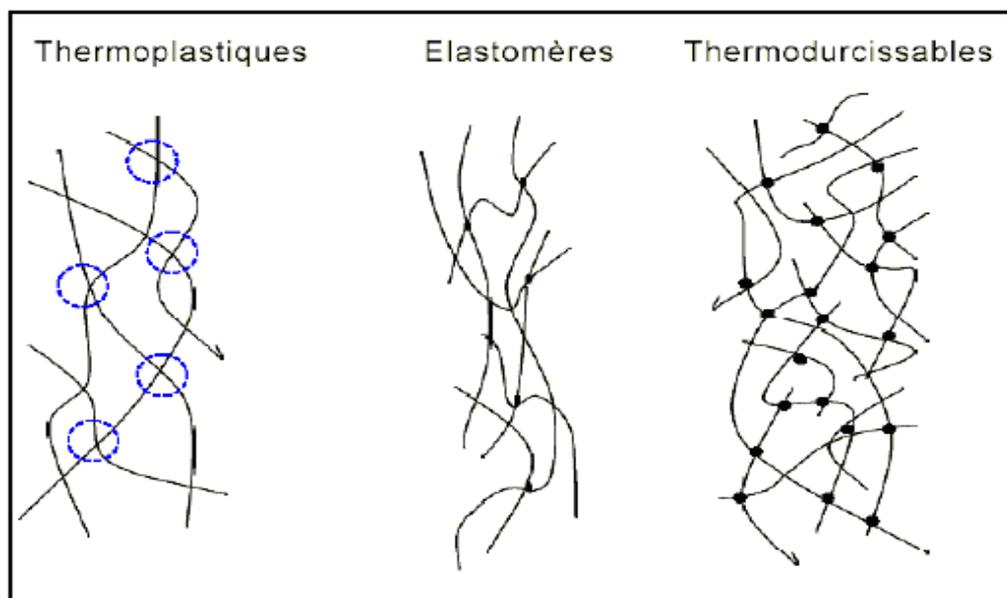


Figure II.1: Les principaux groupes de polymères

Les tableaux II.1 et II.2 présentent quelques caractéristiques des matrices TP et TD et leurs différences fondamentales.

Matrices résineuses		ρ_m Kg/m ³	E_m MPa	G_m MPa	ν_m	σ_m MPa	A %	α 10 ⁻⁵ °C ⁻¹	T_{max} °C
Thermodurcissables	Epoxyde	1200	4500	1600	0.4	130	2(100°C) 6(200°C)	11	90 à 200
	Phénolique	1300	3000	1100	0.4	70	2.5	1	120 à 200
	Polyester	1200	4000	1400	0.4	80	2.5	8	60 à 200
	Polycarbonate	1200	2400			60		6	120
	Vinylester	1150	3300			75	4	5	>100
	Silicone	1100	2200			35			100 à 350
	Uréthane	1100	700 à 7000			30	100		100
	Polyimide	1400	4000 à 19000	1100	0.35	70	1	8	250 à 300
Thermoplastiques	Polypropylène	900	1200			30	20 à 400	9	70 à 140
	Polysulfure de phénylène	1300	4000			65	100	5	130 à 250
	Polyamide	1100	2000			70	200	8	170
	Polyéther sulfone	1350	3000			85	60	6	180
	Polyéther imide	1250	3500			105	60	6	200
	Polyétheréthe rcétone	1300	4000			90	50	5	140 à 250

Tableau II.1: Caractéristiques des résines TP et TD.

Matrices	Thermoplastiques TP	Thermodurcissables TD
Etat de base	solide prêt à l'emploi	liquide visqueux à polymériser
Stockage	illimité	réduit
Mouillabilité renforts	difficile	aisée
Moulage	chauffage + refroidissement	chauffage continu
Cycle	court	long
Tenue au choc	assez bonne	limitée
Tenue thermique	réduite	bonne
Chutes et déchets	recyclables	perdus ou recyclés en charges
Conditions de travail	propreté	émanation pour "méthode humide"

Tableau II.2 : Principales différences entre matrices TP et TD.

II.2. Les résines thermodurcissables (TD)

Sont, en général, associées avec des fibres longues. Ils sont des polymères qui ne peuvent être mis en forme qu'une seule fois. Ils ont la forme d'un réseau tridimensionnel ; au cours de la polymérisation, ce réseau se ponte (double liaison de polymérisation) et durcit de façon définitive lors du chauffage selon la forme souhaitée.

Quatre grandes familles sont présentées :

- les polyesters insaturés, mélanges d'un polymère insaturé, d'un solvant réactif et d'un catalyseur .Pour les applications grandes diffusions qui présentent un bon compromis coût/performances ;
- les époxydes, mélange d'un prépolymère et d'un agent de réticulation. Produits pour applications structurales (composites, adhésifs, résines d'enrobage, etc.) ;
- les vinylesters, dont la chimie de durcissement est identique à celles des polyesters insaturés, mais avec un coût supérieur d'un facteur de deux à trois, justifié par une très bonne tenue à la corrosion ;

— les phénoliques, pour leur tenue au feu et à hautes températures.

D'autres familles sont également utilisées (polyuréthanes, mélamines, silicones...) mais encore en quantités faibles pour les applications composites [13].

II.2.1. Les principales résines thermodurcissables

Les principales résines TD utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont :

II.2.1.1. Polyesters insaturés

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

La réaction est exothermique et la température de la résine augmente progressivement depuis le gel jusqu'à un maximum pour redescendre ensuite lentement à la température ambiante. Le durcissement sera d'autant plus rapide ou, si l'on préfère, le temps nécessaire dans le moule sera d'autant plus court que la courbe de température en fonction du temps se rapprochera davantage de la verticale [14].

La réaction de durcissement dépend de la réactivité de la résine, de la forme de l'objet fabriqué (épaisseur, etc.), de la nature et du dosage du système catalytique.

Il existe différents types de résines :

- orthophtalique : la plus courante ;
- isophtalique : qui donne une meilleure tenue à l'humidité ;
- chlorée : apportant une auto extingüibilité ;
- bisphénol : possédant de bonnes caractéristiques chimiques et thermiques.

Leurs avantages et inconvénients sont donnés au tableau II.3.

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

Tableau II.3 : Avantages et inconvénients des Polyesters insaturés.

II.2.1.2. Vinylesters

Considérée comme une variante des polyesters produite à base d'acides acryliques. Elles possèdent une bonne résistance à la fatigue et une excellente résistance à la corrosion, mais demeure combustible.

II.2.1.3. Phénoliques

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

II.2.1.4. Epoxydes

Elles résultent de la polyaddition de l'épichlorhydrine sur un polyalcool et constitue la résine type des composites hautes performances HP. On distingue deux classes de résines en fonction :

- du durcissement à chaud ou à froid ;
- de la tenue en température (120-130 °C, ou 180-200 °C).

Leurs avantages et inconvénients sont donnés au tableau II.4.

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

Tableau II.4 : Avantages et inconvénients des Epoxydes.

II.3. Les résines thermoplastiques (TP)

Ils sont des polymères à chaîne linéaire, très répandus et peu coûteux (polyéthylène, polystyrène, polyéther cétone). Ces résines peuvent être modifiées plusieurs fois suite à des chauffages et refroidissements cycliques. Elles sont fréquemment utilisées seules, sans renfort et sans charges, et il ne s'agit plus, bien entendu, dans ce cas de matériaux composites. Leurs propriétés intrinsèques sont suffisantes pour permettre la réalisation d'objets, de pièces à fonctions diverses, supports, mécanismes, emballages. On les appelle communément les plastiques.

Les polymères utilisés sont essentiellement des thermoplastiques techniques qui présentent à l'état vierge de bonnes caractéristiques mécaniques. Un renforcement de fibres courtes leur confère une tenue thermique, mécanique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle.

Ceux dont on observe une modification spectaculaire des propriétés lorsqu'on les additionne d'un renfort, sont appelés les technopolymères. Leur mise en œuvre se fait en générale par injection haute pression.

La présence du renfort, généralement de la fibre de verre très courte (1 à 2 mm) a pour effet d'augmenter leur dureté, leur résistance à la contrainte en flexion et d'améliorer leur comportement aux élévations de température de service. La variété de ces matériaux est très grande et leurs caractéristiques couvrent un large éventail [4].

Les principales résines thermoplastiques utilisées dans les composites sont :

- le polypropylène (PP) ;
- les polyamides (PA) 6, 6-6, 12 ;
- les polyesters saturés ;
- le polyéther-éther-cétone (PEEK).

II.3.1. Les principales résines TP

II.3.1.1. Les polyamides (PA)

Les polyamides sont des polymères thermoplastiques à chaînes linéaires de la forme $-\text{CO}-\text{NH}-\text{R}-$. C'est le groupe amide $-\text{CONH}-$ qui donne son nom au polymère. Il existe plusieurs types de polyamides qui diffèrent par la nature du segment R dans la chaîne. Ils sont commercialisés entre autres sous les marques nylon et rilsan. Ils sont en général semi-cristallins (température de transition vitreuse d'environ 20 °C, température de fusion d'environ 250 °C). Mais si R contient un noyau phényle, ils sont amorphes et transparents en l'absence de charges additives [17].

Les PA sont parmi les thermoplastiques les plus résistants. Ils ont une densité de 1,04 à 1,15 et sont très sensibles à l'humidité qui altère leurs propriétés. Les variations saisonnières d'humidité (20 à 70% d'humidité relative de l'air) n'affectent pas les PA car la vitesse d'absorption et de désorption est faible.

Leur gamme est large et ils s'appellent 6,6-6,6-10,11 ou 12 selon le nombre de carbones entrant dans la molécule de leurs produits d'élaboration. Leur intérêt réside dans de bonnes propriétés mécaniques, la résistance au frottement et un bon comportement au feu. Leur tenue en température est considérablement accrue par la présence de fibres de verre.

II.3.1.2. Les polysters saturés (PETP, PBTP)

Polytéréphtalate d'éthylène et de butylène. Ils disposent de propriétés mécaniques, chimiques et électriques intéressantes, mais une faible tenue à l'eau à partir de 70 ou 80° C. leur comportement en élévation de température est largement amélioré grâce à l'apport de fibres de verre. Leur mise en œuvre est délicate car elle implique une déshydratation soignée du produit avant sa mise en fusion [4].

II.3.1.3. Le polyéther-éther-cétone (PEEK)

Le PEEK est un polymère technique de haute performance. Thermoplastique semi-cristallin, il possède un point de fusion très élevé pour un polymère (335 °C) et une température de transition vitreuse de 143 °C, résiste exceptionnellement bien aux agents chimiques, est très peu inflammable. Il est employé en aéronautique, dans l'automobile, l'ingénierie, la chirurgie [17].

II.3.1.4. Le polypropylène (PP)

Le polypropylène noté PP est un thermoplastique de la famille des polyoléfines. Il provient de la polymérisation du monomère propylène. Le mode de synthèse le plus répandu actuellement est le procédé de catalyse hétérogène Ziegler Natta qui conduit à l'obtention de polypropylène isotactique. D'autres modes de synthèse permettent l'obtention de conformations atactiques ou syndiotactiques, mais c'est la forme isotactique qui est la plus répandue.

Ces caractéristiques font que ce matériau trouve un large champ d'applications industrielles puisqu'il représente aujourd'hui un des polymères les plus utilisés au monde. De plus, son point de fusion relativement bas et son comportement fluide au-delà permettent une simplicité de transformation.

Il existe un grand nombre de producteurs, mais pour des raisons économiques liées au mode de synthèse et à l'utilisation de cette matière, il existe une faible variété de grades de polypropylènes disponibles industriellement. La macromolécule de polypropylène (figure II.2) est constituée d'une chaîne carbonée linéaire dans laquelle les liaisons sont covalentes. Les liaisons entre chaînes sont de type Van der Waals, donc faibles [18].

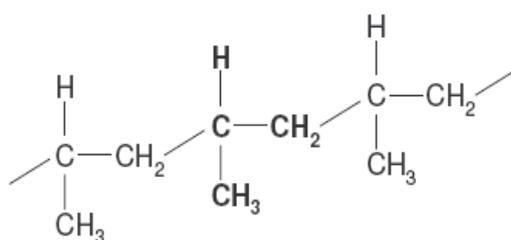


Figure II .2 : Macromolécule de polypropylène (Motif élémentaire en caractères gras)

Ce polymère est semi-cristallin, sa température de fusion se situe entre 165 et 170°C et la transition vitreuse de sa phase amorphe se situe aux environs de 0°C. Il s'agit donc d'un polymère cristallisable composé d'une phase amorphe (disposition aléatoire des atomes ou molécules) et d'une phase cristalline (état ordonné dans lequel les atomes, les molécules, sont répartis de façon périodique). La cristallinité est constituée généralement par les sphérolites, ces éléments étant constitués eux-mêmes de lamelles cristallines reliées entre elles par des chaînes amorphes (Figure II. 3) [18].

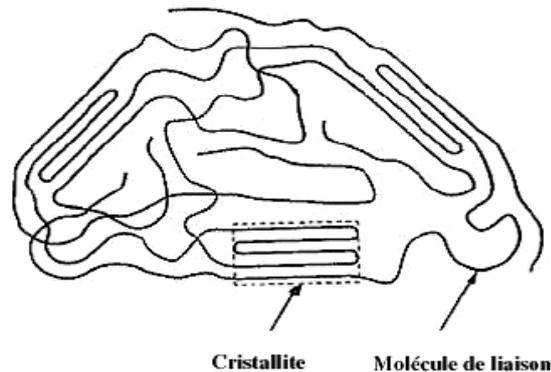


Figure II.3 : Schéma de structure semi-cristalline des polymères

Selon l'emplacement de groupe méthyle (CH_3), qui dépend du mode de fabrication, on distingue trois types de PP :

- **Polypropylène isotactique** : Les groupes méthyle sont répartis du même côté de la chaîne macromoléculaire, est le plus intéressant industriellement par ses qualités ;
- **PP syndiotactique** : dont les groupements CH_3 sont placés alternativement d'un côté et d'autre de la chaîne ;
- **PP atactique** : dans lequel les groupements sont placés d'un côté ou de l'autre de façon aléatoire.

II.3.1.4.1. Différents types de PP

Les catalyseurs et les procédés actuels permettent la fabrication de trois types de polypropylène :

- **Les homopolymères** : ce sont des polymères obtenus par polymérisation d'un seul monomère, le propylène. Leur isotacticité est maximale (92 à 99 %), donc leur cristallinité est maximale. Ils sont caractérisés par un module d'Young et une température de fusion élevés, mais une résistance au choc faible [19] .

• **Les copolymères statistiques** : Ils sont généralement obtenus par copolymérisation de propylène et d'éthylène. La structure de ces copolymères est semblable à celle des homopolymères, avec une distribution statistique (c'est-à-dire au hasard) des motifs éthyléniques. Ils sont plus résistants aux chocs par contre, leur module d'Young, leur température de fusion et leur densité sont plus faible.

• **Les copolymères séquencés ou à blocs** : ils sont fabriqués par copolymérisation en plusieurs étapes de séquences macromoléculaire de structure différente – homopolymère ou copolymère –, le comonomère étant généralement de l'éthylène.

II.3.1.4.2. Propriétés d'usage

a. Propriétés physiques

Le polypropylène est le plus léger des thermoplastiques usuels : sa masse volumique est de $0,905 \text{ g/cm}^3$. Les pièces refroidies rapidement présentent une densité plus basse et une structure cristalline plus fine. Le taux de cristallinité varie entre 60 et 70% [19].

b. Propriétés mécanique

• **Rigidité** : les polypropylènes homopolymères présentent une rigidité élevée à la température ambiante. Et à 100°C la rigidité du polypropylène est comparable à celle d'un polyéthylène basse densité à température ambiante.

• **Résistance au choc** : Le comportement au choc du polypropylène dépend de sa composition, de sa masse moléculaire, de l'orientation moléculaire et du degré de cristallinité. La résistance au choc d'un polypropylène augmente avec sa masse moléculaire et varie dans le même sens que la température. La tendance à la fragilité apparaît d'autant plus vite que la masse moléculaire est faible. Dans le cas d'applications à basse température, il y a lieu d'utiliser des copolymères séquencés qui conservent de bonnes propriétés à des températures inférieures à 0°C .

• **Caractéristiques en traction** : La cristallinité élevée du polypropylène lui confère de bonnes propriétés en traction. Le comportement du polypropylène est fortement influence par la vitesse d'étirage, de la façon suivante :

- si elle est faible, après la déformation élastique, le retirement à lieu jusqu' à la rupture après un allongement de 800 à 1 200 %. Pendant cette deuxième étape, la résistance augmente du fait de l'orientation parallèle des chaînes ;
- si elle est élevée ou moyennement élevée, la rupture a lieu dans la zone de déformation élastique ou après la déformation élastique dans une zone de striction.

c. Abrasion

La résistance à l'abrasion est bonne, voisine de celle des polyamides. Les articles ont une surface brillante et une résistance à la rayure excellente.

d. Propriétés chimiques - corrosion

- Les polypropylènes possèdent une très grande stabilité chimique. A des températures inférieures 0 60°C, ils sont pratiquement insolubles. Ils ne sont attaqués ni par les acides, ni par les bases, ni par les solutions de sels. Ils sont insolubles dans l'eau et sont reconnus utilisables pour des applications alimentaires : attention à l'introduction de substances non autorisées par la réglementation ;
- Les polypropylènes présentent une excellente résistance à la fissuration sous contrainte en présence de savons, détergents, alcools ;
- La bonne résistance à l'oxydation est recuite au contact du cuivre et de ses alliages.
- Les polypropylènes à l'état naturel sont sensibles à la dégradation par les rayons ultraviolets. Les producteurs proposent ou réalisent à la demande des produits stabilisés.

e. Propriétés thermiques

- La température de fusion théorique d'un polypropylène homopolymère 100 % isotactique est de 176°C. En pratique, les fractions inévitables de polypropylène atactique ramènent cette température à 165-170°C pour les polypropylènes homopolymères et copolymères séquences commerciaux. Dans le cas des copolymères statistiques, la diminution de la cristallinité par l'incorporation du comonomères se traduit par une température de fusion encore plus faible, de l'ordre de 140°C.
- En l'absence de contrainte, le polypropylène homopolymère peut supporter une température de 140°C (stérilisation répétée). Cette température décroît sous charge.

f. Stabilité dimensionnelle

La stabilité dimensionnelle est indépendante de la reprise d'humidité très faible. 0,03 % en 24 h à 23 °C. Ces polymères cristallins présentent un retrait important dont il faut tenir compte au moulage.

Parmi ces défauts, on peut citer une certaine fragilité de l'homopolymère à froid ou en présence d'une entaille. Ce défaut peut être en grande partie éliminé en utilisant des alliages constitués d'une matrice PP homopolymère à l'intérieur de laquelle est finement dispersée une phase caoutchoutique. Le tableau II.5, résume l'influence des paramètres structuraux sur les principales propriétés des PP [17] .

Propriétés	Variation (1) des propriétés	
	Cristallinité	Masse molaire
Température de fusion.....	↗	→
Température de ramollissement Vicat.....	↗	→
Résistance en traction.....	↗	↗
Module de Young.....	↗	→
Résistance au choc.....	↘	↗
Perméabilité aux gaz.....	↘	→
Indice de fluidité à chaud (IF).....	→	↘
Viscosité à l'état fondu.....	→	↗

(1) ↗ augmente → varie peu ↘ diminue.

Tableau II. 5: Influence des paramètres structuraux sur les principales propriétés des PP.

II.4. Composite à matrice organique

Les matériaux composites à matrice thermoplastique ou thermodurcissable renforcée par des fibres, généralement de verre, courtes ou longues ont fait leur apparition dans l'automobile durant les années 60-70. Même s'ils sont aujourd'hui utilisés presque exclusivement pour remplir des fonctions bien précises, leur taux d'utilisation ne dépasse pas 10 à 15% selon les véhicules [20].

Dans le cadre d'une utilisation dans le secteur automobile, ces matériaux présentent à priori trois handicaps majeurs par rapport aux matériaux métalliques :

- un prix au kilogramme élevé ;
- des caractéristiques mécaniques plus faibles que les métalliques ;
- des procédés de mise en œuvre lents à l'exception du procédé d'injection ;
- des problèmes de conduction thermique et électrique (matériau isolant).

Pourtant les matériaux composites à matrice organique présentent des avantages importants :

- une faible densité ;
- des technologies de mise en œuvre par moulage qui offre la possibilité d'obtenir des pièces de forme complexe et suppriment les usinages de finition ;
- un excellent comportement vis-à-vis de la corrosion, de l'indentation due aux petits chocs urbains et un comportement acoustique favorable.

Notre étude s'intéresse à une seule famille de matériaux : les matériaux à renfort verre et matrice polypropylène.

II.4.1. Polypropylènes chargés

Les polypropylènes (PP) purs ou chargés sont de plus en plus utilisés dans l'industrie automobile, car :

- ils possèdent de bonnes propriétés mécaniques et chimiques ;
 - ils montrent une bonne résistance aux chocs (absorbeurs d'énergie) ;
 - ils sont légers et peu chers.
- Le comportement plastique du PP est caractérisé par un fort durcissement aux grandes déformations ;

— Les polypropylènes chargés supportent une grande déformation sans le moindre durcissement [21].

Les mélanges à bases de PP les plus utilisés sont ceux renforcés par de fibres de verre.

II.4.2. Polypropylène renforcé de fibre de verre E

Les verres de type E, constituent le **renfort** par excellence de tous les matériaux composites à matrices organiques. Ce sont des **borosilicates d'alumine** à très faible teneur en oxydes de métaux alcalins (moins de 1 % en $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$). Développés initialement pour leurs bonnes propriétés électriques d'isolation, ils ont vu leur production et leur emploi ensuite généralisés en raison de leur relative facilité de fibrage, de leurs bonnes propriétés mécaniques et de leur coût modéré.

Ces renforts augmentent non seulement le module d'Young et la tenue thermique du PP, mais aussi sa résistance au choc.

L'addition de fibres de verre courtes (PVC) à une matrice Polypropylène (PP) permet d'augmenter très sensiblement le module, la résistance ainsi que la stabilité dimensionnelle après moulage mais elle provoque également une dramatique réduction de la capacité de déformation et donc une fragilisation des composites PP+FVC.

Le fait de renforcer le polypropylène avec des fibres de verre discontinus (30% en masse en moyenne), permet de lui apporter une grande stabilité dimensionnelle liée à la limitation des retraits ainsi que la très sensible augmentation des caractéristiques mécaniques, notamment de la rigidité à haute température.

Les caractéristiques des différents polypropylènes chargés sont regroupées dans le tableau II.6 [19].

Propriété	Norme	PP (homopolymère)		PP modifié par un élastomère
		+ 40 % talc	+ 30 % fibres de verre	
Masse volumique .....(kg · m ⁻³)	NFT 51-063	1 210	1 140	898 à 900
Propriétés thermiques				
Température de fusion .....(°C)	NF EN ISO 3146	158 à 168	168	150 à 168
Température de ramollissement Vicat sous 1 kg .....(°C)	NF EN ISO 306	160	160	130 à 145
Température maximale d'utilisation (1) .....(°C)	.....	100	100	100
Conductivité thermique (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	NF X 10-021	0,51	0,27	0,22
Capacité thermique massique..... (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	.....	1 340	1 340	1 700
Coefficient de dilatation linéique .....(K ⁻¹)	ISO 11359-2	0,8 × 10 ⁻⁴	0,8 × 10 ⁻⁴	1,1 × 10 ⁻⁴
Propriétés mécaniques				
Contrainte au seuil d'écoulement en traction .....(MPa)	NF EN ISO 527	31 à 33	.....	11 à 28
Résistance à la rupture (MPa)	NF EN ISO 527	29 à 35	70	18 à 35
Allongement à la rupture.....(%)	NF EN ISO 527	3 à 8	1 à 3	200 à 700
Résistance en flexion .....(MPa)	NF EN ISO 178	49 à 68	80 à 98	21 à 42
Module de Young en traction.....(MPa)	NF EN ISO 527	3 150 à 4 025	6 500 à 7 000	350 à 1 050
Résistance au choc (Charpy) à 23 °C (2) (kJ/m ²)	NF EN ISO 179	4	6	30
Propriétés électriques				
Facteur de dissipation diélectrique (tan δ) à 10 ⁶ Hz.....	NF C 26-230	2,51	2,62	2,2
Rigidité diélectrique (MV/m)	PR NF EN 62062	95	50	70
Résistivité transversale (Ω · cm)	NF C 26-215	> 10 ¹⁶	> 10 ¹⁶	> 10 ¹⁶
(1) En service continu. (2) Sur éprouvettes entaillées.				

Tableau II.6 : Caractéristiques de différents polypropylènes chargés, renforcés et modifiés par des élastomères.

a. Influence du taux de fibre sur le comportement en traction

Le comportement du PP chargé de fibres courtes en traction est fortement influencé par la variation de taux de fibres.

Les courbes de traction monotone jusqu'à rupture pour un taux de fibre de 20 %, 30 % et 40 % pour le matériau avec fibres traitées est présenté sur la figure II.4 [21] et Les paramètres mesurés à partir de ces essais sont résumés dans le tableau II.7 [22].

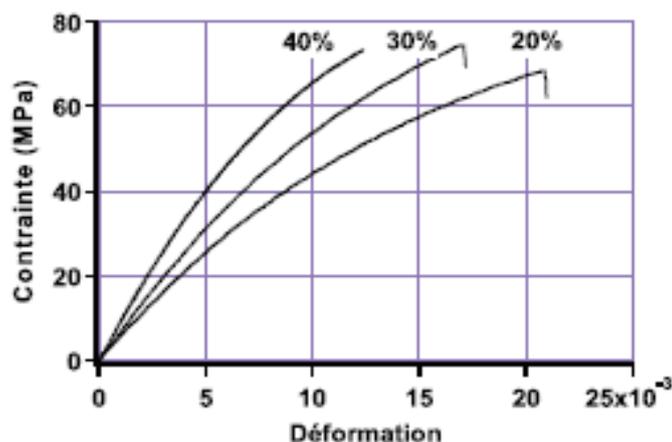


Figure II.4 : Courbes de traction du matériau avec fibres traitées pour les taux de fibres en masse de 20 %, 30 % et 40 %.

Taux de fibres	Module de Young (MPa)	Écart-type	Contrainte maxi (MPa)	Écart-type	Déformation maxi à rupture	Écart-type
20 %	5150	300	62,87	6,73	0,0156	0,0036
30 %	6810	410	70,46	3,67	0,0153	0,0025
40 %	9410	350	73,25	5,03	0,0123	0,003

Tableau II.7 : Paramètres moyens de traction d'un composite à fibres traitées pour les taux de fibre en masse de 20 %, 30 % et 40 %.

La courbe de traction et les tableaux des propriétés mécaniques montrent que l'augmentation du taux de fibres, diminue l'élongation à rupture mais favorise à la fois le module et la ténacité. On constate que la contrainte maximale évolue très faiblement lorsqu'on passe de 30 % à 40 % de taux de fibres comparé au passage de 20 % à 30%. La contrainte maximale ainsi que la déformation à rupture n'évolueront quasiment plus pour un taux de fibres supérieur à 40 % en masse. On peut conclure, que le meilleur taux de fibre est de 40 %.

Les composites peuvent être renforcés par un autre matériau se présentant sous forme de fines particules : ce sont les charges. Le talc est la charge la plus utilisée dans les thermoplastiques. Il augmente la rigidité et la tenue thermique ; La figure II.5 présente la courbe de traction d'un polypropylène pur et chargé de talc 20 % en masse dans ce matériau. [21]

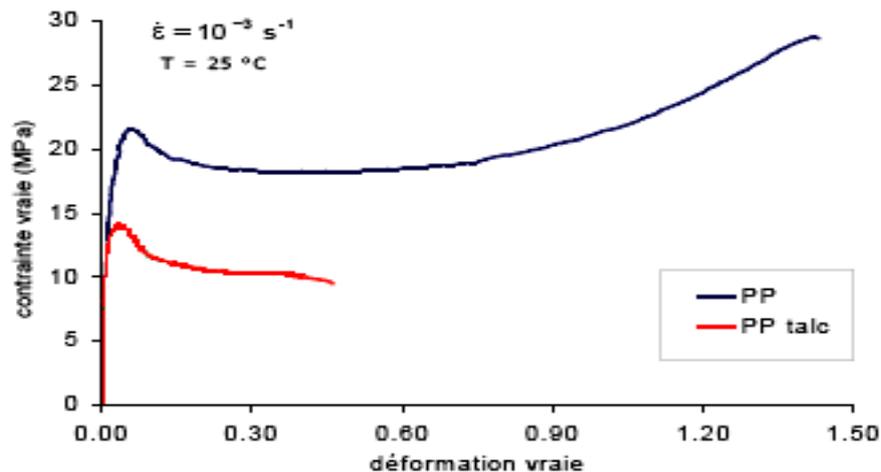


Figure II.5 : Courbe contrainte-déformation d'un PP pur et chargé de talc en traction.

II.5. Avantages de la matrice organique

Leurs excellentes propriétés spécifiques ont positionné les matériaux composites à matrice organique (CMO) comme des candidats évidents pour le remplacement des matériaux traditionnels dans des domaines aussi divers et exigeants que les transports, l'énergie, le nucléaire et le génie civil. Ils allient de bonnes propriétés mécaniques et une faible densité et peuvent permettre d'améliorer les performances et d'accroître la longévité des structures. La mutation a déjà eu lieu avec succès dans de nombreux cas de figures. Elle est à l'ordre du jour pour des applications de plus en plus exigeantes sur le plan de la fiabilité, mais elle ne pourra s'opérer que si la durabilité des matériaux composites est mieux connue. Cette méconnaissance est en partie liée à la complexité des mécanismes de vieillissement, et d'endommagement d'origine mécanique. De tels matériaux sont très sensibles à des contraintes environnementales (humidité, température) et mécaniques qui peuvent créer des dégradations irréversibles et rendre une pièce inutilisable. Il est donc impératif de connaître l'évolution des propriétés du matériau au cours du vieillissement, afin de prévoir la durée de vie ou l'état de résistance au bout d'un temps donné.

Chapitre

III

Comportement

Mécanique des Composites

La caractérisation du comportement mécanique des matériaux composites passe par la détermination d'un certain nombre de grandeurs mécaniques. Ce sont les essais mécaniques qui peuvent lui fournir ces données nécessaires. Les matériaux composites présentent des comportements thermomécaniques variables selon leur domaine d'utilisation : dépendance aux sollicitations, effet de la température ou de l'environnement. Afin de caractériser son comportement dans des conditions bien précises, nous avons recours à un certain nombre d'essais classés en plusieurs types :

* Essais sur produit fini : Selon la vitesse de chargement, les conditions environnementales, les configurations de sollicitations nous amènent à classer les essais mécaniques en deux grandes familles :

➤ Essais statiques :

- Essai de traction et de compression (traction longitudinale, transversale, hors axes, compression longitudinale...);
- Essai de flexion (trois points, quatre points, par flambement, ...);
- Essai de dureté.

➤ Essais dynamiques :

- Essai de compression dynamique ;
- Essai au choc ;
- Essai de fatigue.

* Essais sur éprouvettes modèles : Sont des essais qui ont été spécialement conçus pour déterminer les caractéristiques des interfaces fibre/matrice, et plus exactement leur résistance ou leur ténacité. Les tests principaux sont :

- **Le test de déchaussement** (pull out), dont une forme dérivé est le test dit de la goutte : consiste à tirer sur une fibre dont l'extrémité est enchâssée dans la résine [23].

- **Le test de fragmentation** : il consiste à solliciter en traction une éprouvette de résine contenant une fibre unitaire.

- **Le test de micro-indentation** : consiste à appliquer une sollicitation de compression à une fibre unitaire à l'aide d'un indenteur.

De plus d'autres essais ou analyses permettront une meilleure connaissance du composite :

- Vieillissement (absorption d'eau, tenue en température,...) ;
- Dilatation thermique, ...etc.

Dans cette étude, nous nous intéressons à des essais sur produit fini, c'est des essais réalisés sur éprouvette normalisée d'un matériau fini, dans le but de déterminer les caractéristiques de ce dernier.

III.1. Essais mécaniques

L'étude du comportement mécanique en statique et en dynamique des matériaux composites est un point primordial pour évaluer leur aptitude à être utilisés dans certains domaines. Les essais mécaniques traditionnels en traction, flexion, cisaillement ou compression sont les plus souvent utilisés pour qualifier succinctement l'interface fibre-matrice qui influe sur les lois de comportement des composites.

III.1.1. Essai de traction

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

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

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

a. Traction longitudinale

La charge F_1 est exercée suivant la direction des fibres (composite unidirectionnel) ou suivant la direction de chaîne (composite tissu) sur la section droite S_1 du matériau, figure III.1 [3].

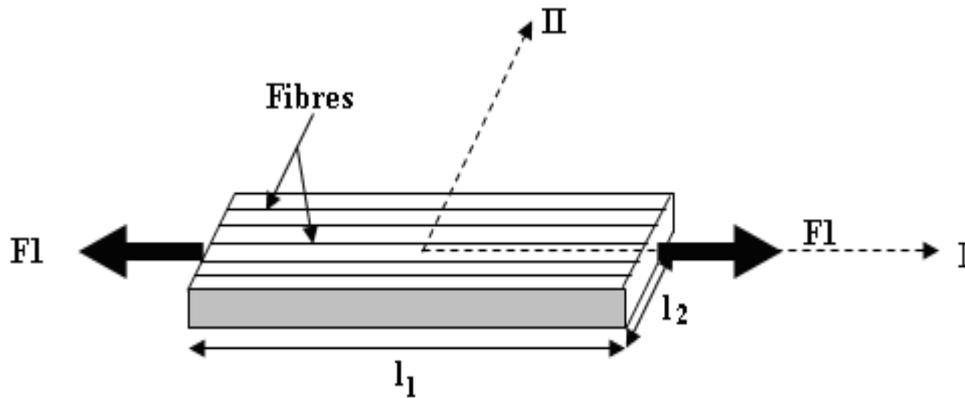


Figure III.1 : Traction longitudinale.

La contrainte normale σ_{11} est donnée par :

$$\sigma_{11} = \frac{F_1}{S_1} \quad (\text{III.1})$$

Les déformations longitudinales et transversales sont données respectivement par :

$$\varepsilon_{11} = \frac{\Delta l_1}{l_1} \quad (\text{III.2})$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{\Delta l_2}{l_2} \quad (\text{III.3})$$

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

$$E_L = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}} \quad (\text{III.4})$$

$$\nu_{LT} = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} \quad (\text{III.5})$$

b. Traction transversale

La charge F_2 est exercée suivant la direction transverse aux fibres ou suivant le sens trame (figure III.2) [3].

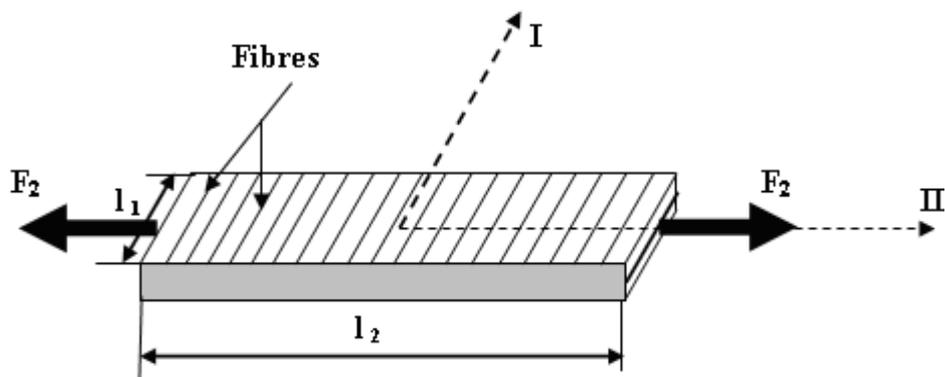


Figure III.2 : Traction transversale.

La contrainte normale σ_{22} est donnée par :

$$\sigma_{22} = \frac{F_2}{S_2} \quad (\text{III.6})$$

S_2 : l'aire de la section droite sur la quelle est exercée la charge F_2 .

Le module de Young transversal E_T et le coefficient de poisson ν_{TL} sont calculés respectivement par les relations suivantes :

$$E_T = \frac{\sigma_{22}}{\varepsilon_{22}} \quad (\text{III.7})$$

$$\nu_{TL} = -\frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_{22}} \quad (\text{III.8})$$

c. Traction hors axes (essai de traction à 45°)

L'essai usuellement utilisé pour mesurer le module de cisaillement longitudinal G_{LT} , est un essai de traction effectué à 45° de la direction des fibres. La charge F est exercée suivant la direction X sur la section S (figure III.3) [3].

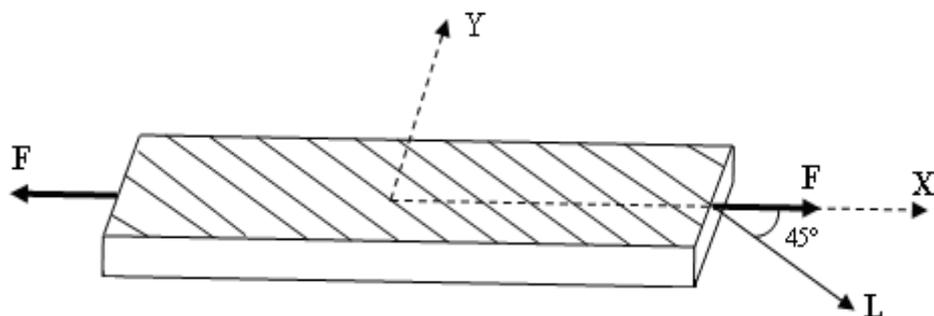


Figure III.3: Traction hors axes.

Lors d'un essai de traction hors axes sur composites unidirectionnel, le matériau subit un état de contraintes planes (contraintes longitudinales, transversales et de cisaillement).

La contrainte normale σ_{xx} est donnée par :

$$\sigma_{xx} = \frac{F}{S} \quad (\text{III.9})$$

Le module de Young dans la direction X s'exprime par :

$$E_{45} = E_x = \frac{\sigma_{xx}}{\varepsilon_{xx}} \quad (\text{III.10})$$

Ce module s'exprime par :

$$\frac{1}{E_x} = \frac{1}{E_{45}} = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_T} + \frac{1}{G_{LT}} - 2 \frac{\nu_{LT}}{E_L} \right) \quad (\text{III.11})$$

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

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{4}{E_{45}} - \frac{1}{E_L} - \frac{1}{E_T} + 2 \frac{\nu_{LT}}{E_L} \quad (\text{III.12})$$

Remarque

Il est nécessaire de bien veiller à ce que, lors d'un essai de traction longitudinale, la direction de la charge appliquée coïncide réellement avec la direction des fibres. Un désalignement, même faible, peut entraîner, dans le cas d'un composite unidirectionnel, des valeurs mesurées nettement plus faibles que les valeurs réelles du module d'Young longitudinal. Ce problème n'est pas aussi critique dans le cas d'un essai de traction transversale [3].

III.1.2. Essai de compression

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

Cet essai détermine la contrainte à la rupture en compression qui est définie par la

formule :

$$\sigma_{\mathbf{r}} = \frac{F_r}{lh}$$

Avec :

F_r : charge à la rupture ;

l : Longueur de l'éprouvette ;

h : épaisseur de l'éprouvette.

III.1.3. Essai de flexion

L'essai de flexion est un test mécanique statique, qui fait partie de la famille des essais indépendants du temps (comme le choc, la dureté...). Il est facile à mettre en œuvre (absence de système de fixation d'éprouvette, géométrie simple de l'échantillon), et il reproduit assez bien les sollicitations courantes auxquelles sont soumises les pièces industrielles.

Cet essai est très souvent pratiqué pour mesurer des caractéristiques telles que le module d'Young et la résistance en flexion, la flèche maximale... Il nécessite des charges plus faibles que la traction et les mesures de flèches posent moins de problèmes que les mesures d'allongement. Deux configurations peuvent être retenues pour les essais : la flexion trois points et la flexion quatre points, ce dernier cas permettant de bénéficier d'une zone centrale dans laquelle le «moment de flexion» est uniforme [25].

III.1.3.1. Essai de flexion trois points

Le principe de cet essai consiste à déformer une éprouvette parallélépipédique reposant sur deux appuis, par l'intermédiaire d'un poinçon (ou panne) située à égale distance des appuis et se déplaçant à vitesse constante. (Figure III. 4)

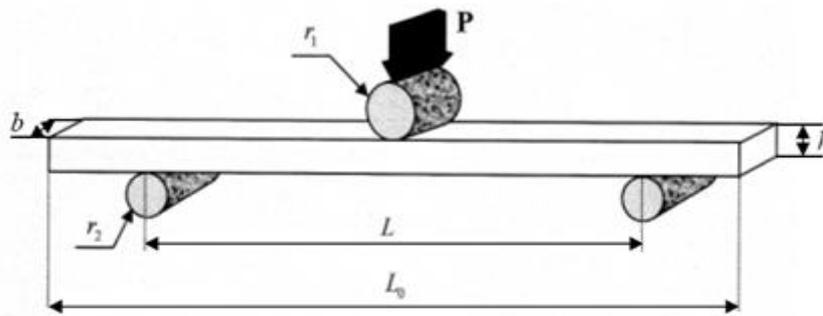


Figure III.4 : Géométrie de l'essai de flexion trois points.

Avec :

- **P** : charge appliquée ;
- r_1 : rayon de cylindre de la panne (= 5mm) ;
- r_2 : rayon des cylindres d'appuis (= 2.5mm) ;
- **L** : longueur entre appuis ;
- L_0 : longueur totale de l'éprouvette ;
- **h** : hauteur de la poutre ;
- **b** : largeur de la poutre.

Des relations issues de la résistance des matériaux permettent de faire le lien entre ces deux grandeurs (y et P), la géométrie de la pièce (L , h et b) et les caractéristiques du matériau (σ , ε et E).

L'essai de flexion trois points sollicite de façon symétrique, une face de l'éprouvette soumise à une contrainte de traction et l'autre face à une contrainte de compression. Expérimentalement, on enregistre la courbe force (P)-flèche (Y) (figure III.5) à partir de laquelle il est possible de calculer la contrainte à la rupture σ_r (ou une contrainte pour un effort P_r particulier) et le module d'Young en flexion E_f . Les contrainte et déformation ont pour valeur :

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (\text{III.13})$$

$$\varepsilon = \frac{6hY}{L^2} \quad (\text{III.14})$$

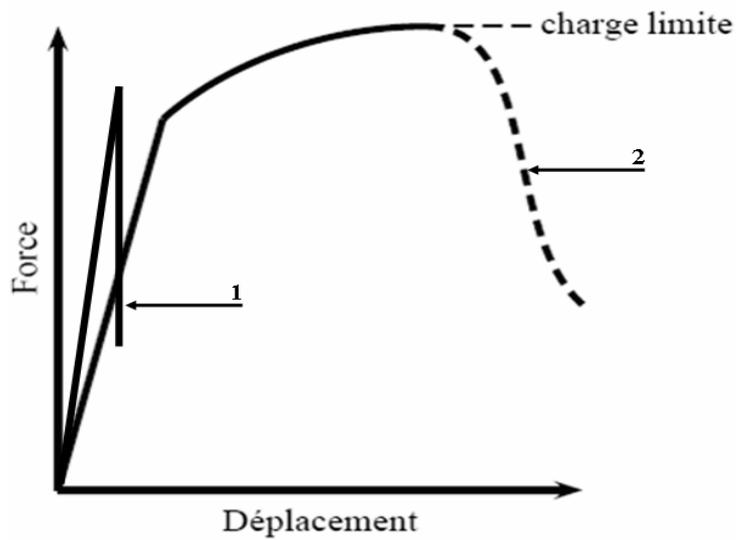


Figure III.5 : Courbe de Force-Déplacement.

1 : matériau fragile ; 2 : matériau ductile

Par raison de symétrie, les réactions aux appuis sont :

$$R_A = R_B = \frac{P}{2}$$

▲ Effort tranchant (T) :

$$\text{pour } 0 \leq x \leq \frac{L}{2} \quad T = \frac{P}{2}$$

$$\text{pour } \frac{L}{2} \leq x \leq L \quad T = -\frac{P}{2}$$

▲ Moment fléchissant (M_f) :

Le moment fléchissant s'écrit :
$$M_f = \int_0^x T dx \tag{III.15}$$

$$\text{pour } 0 \leq x \leq \frac{L}{2} : M_f = R_A \cdot x = \frac{P}{2} \cdot x \Rightarrow \begin{cases} x=0 : M_f = 0 \\ x=\frac{L}{2} : M_f = \frac{PL}{4} \end{cases}$$

$$\text{pour } \frac{L}{2} \leq x \leq L : M_f = \frac{P}{2} \cdot x - P \left(x - \frac{L}{2} \right) = -\frac{P}{2} (x - L) \Rightarrow \begin{cases} x=\frac{L}{2} \Rightarrow M_f = \frac{PL}{4} \\ x=L \Rightarrow M_f = 0 \end{cases}$$

Le moment fléchissant est maximum au milieu de l'éprouvette ($x = \frac{L}{2}$).

$$M_{\max} = \frac{P.L}{4}$$

Le diagramme des moments fléchissant et les efforts tranchants sont schématisés par la figure III.6.

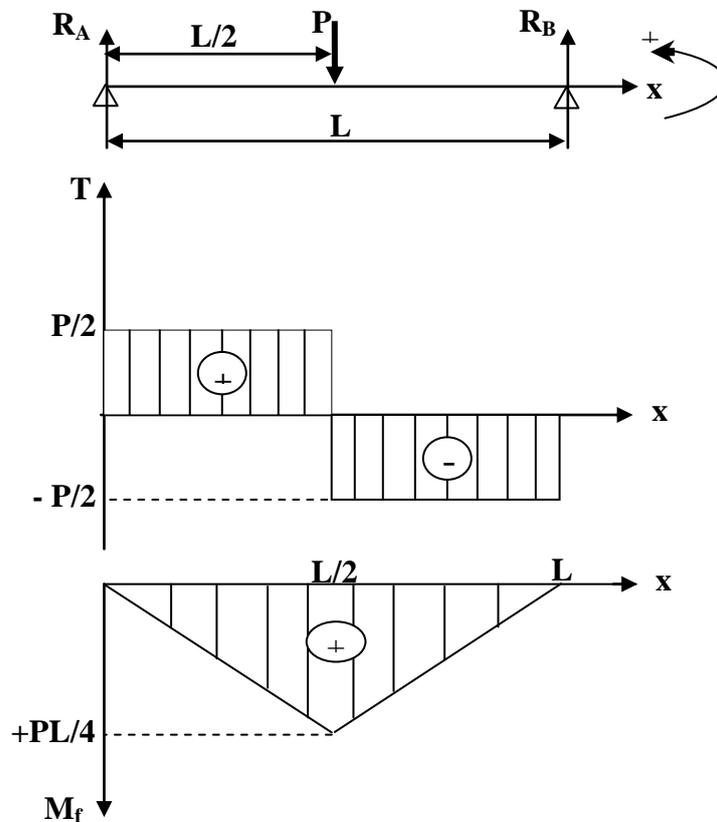


Figure III.6 : Diagramme des efforts tranchants et moment fléchissant dans le cas de la flexion trois points.

L'énergie de déformation dans le cas de la flexion pure (sans contribution du cisaillement) est donnée par l'expression suivante :

$$W = \frac{1}{2EI} \sum \int_0^x M_f^2 dx \tag{III.16}$$

Avec : $Y(x) = \frac{\partial W}{\partial P}$

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

$$Y(x) = \frac{1}{EI} \left(\frac{P}{12} x^3 - \frac{PL^2}{16} x \right) \quad (\text{III.17})$$

Avec

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

Où :

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

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

$$Y_{\max} = \frac{PL^3}{48EI} \quad (\text{III.18})$$

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

$$E = \frac{PL^3}{48Y_c I} = \frac{PL^3}{4bh^3 Y_c} \quad (\text{III.19})$$

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

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

$$\sigma = \frac{M_f}{I} \cdot Y \quad (\text{III.20})$$

Avec : $M_f = \frac{P}{2} x$

L'expression III.20 pour $x = \frac{L}{2}$ sera : $\sigma = \frac{3PL}{bh^3} \cdot Y$

La valeur maximale de la contrainte normale σ_M est déterminée pour $Y = \pm \frac{h}{2}$ (fibres extrêmes de la poutre) (figure III.7 a):

$$\sigma_M = \pm \frac{3PL}{2bh^2} \quad (III.21)$$

De l'expression III.19 et III.21, on trouve l'expression de la déformation :

$$\varepsilon_{\max} = \frac{6Y.h}{L^2} \quad (III.22)$$

On notera aussi que pour une sollicitation en flexion trois points, l'effort tranchant engendre non seulement des contraintes normales de traction-compression, mais également des contraintes de cisaillement τ , avec une répartition parabolique (Figure III.7b), et un maximum τ_{\max} dans le plan de symétrie de l'éprouvette (axe neutre). τ et τ_{\max} sont données par [24]:

$$\tau_{xy} = \frac{3P}{4bh^3} (h^2 - 4Y^2) \quad (III.23)$$

La contrainte de cisaillement est maximale sur la fibre neutre ($y = 0$) ;

$$(\tau_{xy})_{\max} = \frac{3P}{4bh} \quad (III.24)$$

Pour $\left(Y = \pm \frac{h}{2}\right)$ la contrainte est nulle.

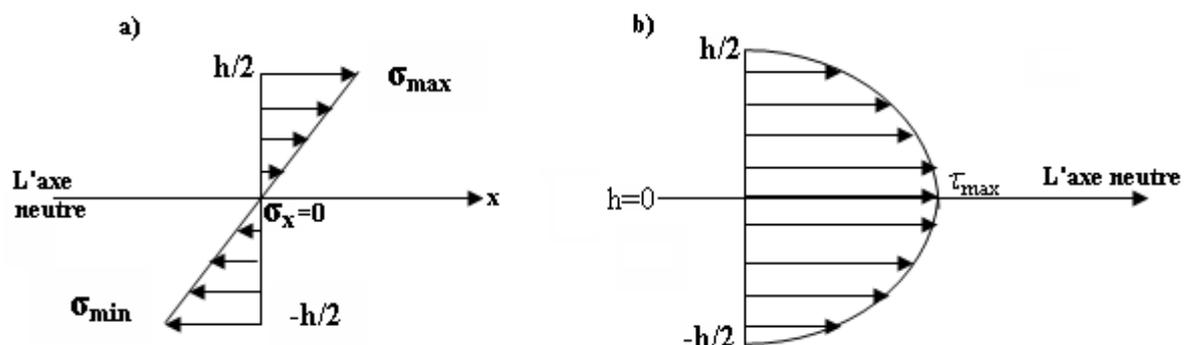


Figure III.7 : Représentation du champ des contraintes en flexion trois points.
(contraintes normales et de cisaillement)

L'influence de ces contraintes de cisaillements n'est pas négligeable car lors d'un essai de flexion trois points, la flèche total Y_T imposée à l'éprouvette est la résultante des contributions du fléchissement Y_f et du cisaillement Y_c .

$$E_{app} = \frac{L^3}{4bh^3} \frac{dP}{dY} \quad (III.25)$$

Le module de flexion apparent calculé par la formule (III.25) est d'autant plus proche de module longitudinal de traction (E_{xx}) du matériau testé que la contribution du cisaillement est faible. Cette contribution est inversement proportionnelle au rapport L/h , et proportionnelle au rapport d'anisotropie E_{xx}/G_{xy} . L'écart entre le module apparent et le module longitudinal réel (E_{xx}) est donné par l'équation :

$$\frac{E_{xx}}{E_{app}} = 1 + \alpha \frac{E_{xx}}{G_{xy}} \left(\frac{h}{L} \right)^2 \quad (III.26)$$

$\alpha = \frac{5}{6}$ Coefficient d'anisotropie dû à la section réduite de l'effort tranchant.

Pour une valeur suffisamment grande de L/h , dépendant fortement de la nature du matériau, caractérisé par son rapport d'anisotropie E_{xx}/G_{xy} , les effets de cisaillement peuvent être négligés.

Lors des essais de flexion, il est possible de privilégier un mode de rupture par rapport à l'autre en jouant sur la distance entre appuis. Par exemple, pour des composites à fibres de verre, on aura :

- Pour $L/h \geq 16$, rupture en traction compression ;
- Pour $L/h \leq 5$, rupture en cisaillement interlaminaire.

III.1.3.2. Endommagement de la structure

Dans cet essai normalisé, trois types d'endommagement peuvent être rencontrés (figure III.8), dont deux seulement sont recevables pour notre matériau: endommagement en traction et endommagement en compression. Ils sont liés à l'effet d'une flexion et donc permettent de quantifier la contrainte maximale.

Si un endommagement de cisaillement est observé, alors cette quantification n'est plus possible, et on constate que les hypothèses de l'essai ne sont pas remplies [25].

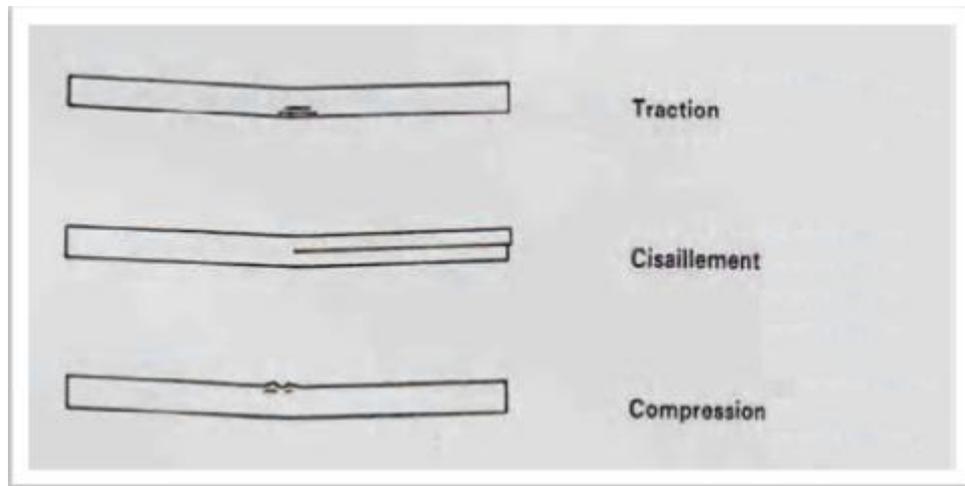


Figure III.8 : Types d'endommagement en flexion 3 points des unidirectionnels.

A partir de l'effort, la contrainte maximale est connue, ce qui permet d'estimer la résistance du matériau en flexion. Cependant, il est notable que les valeurs de résistance trouvées en flexion sont toujours plus élevées que celles trouvées en traction. La raison en est l'origine de la rupture, toujours liée à la présence d'un défaut. Or, dans l'essai de traction, tout le volume est soumis à la contrainte maximale, alors qu'en flexion seule la peau est à la contrainte maximale. La probabilité de trouver un défaut dans un volume augmente avec celui-ci. Elle est décrite par une loi de Weibull.

Remarque

Si, nous nous permettons d'exprimer l'avantage de l'essai de flexion en quasi statique c'est surtout du point de vue pratique par :

- la préparation des éprouvettes qu'il suffit de découper aux dimensions normalisées ; les éprouvettes ne demandent aucune des opérations si complexes et nécessaires à faire ;

- lors des essais de traction donc à savoir des talons et de arrondis sur les extrémités pour la fixation dans le but d'éviter l'écrasement du matériau ;
- ne demandant aucun moyen de fixation de l'éprouvette qu'il suffit d'ajuster sur les pannes d'appui.

Nous ne devons pas négliger les inconvénients générés par l'essai de flexion trois points et qui peuvent masquer parfois beaucoup les résultats à obtenir par, d'un coté, la présence des contraintes de cisaillement (qu'on néglige bien sure avec l'augmentation de la longueur entre appuis) et l'autre la où les pannes de chargement engendrant des contraintes de contact surtout sur les composites à matrice organique thermoplastique en la déformant ce qui fera passer l'application de charge linéaire en un charment surfacique.

Des déformations sont aussi créées à l'endroit des panes d'appui, ce qui augmenterait les contraintes de cisaillement et au point même de remettre en cause la considération des appuis simples ou par la présence des frottements vont transformer la forme de la courbure.

III.1.4. Essai de choc

L'essai Charpy a pour but de déterminer la résistance aux chocs des matériaux. Il consiste à rompre d'un seul coup à l'aide d'un mouton pendule, une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis (figure III.9). L'entaille peut revêtir diverses formes : en U ou, le plus souvent, en V.

L'énergie consommée pour rompre l'éprouvette est mesurée en faisant la différence entre la hauteur de chute du mouton et celle à laquelle il remonte après avoir rompu le barreau [24].

L'énergie de rupture ainsi déterminée s'appelle la résilience. Plus elle est élevée, plus le matériau est tenace. La résilience est l'énergie nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette, est exprimée en joules par cm^2 (J/cm^2).

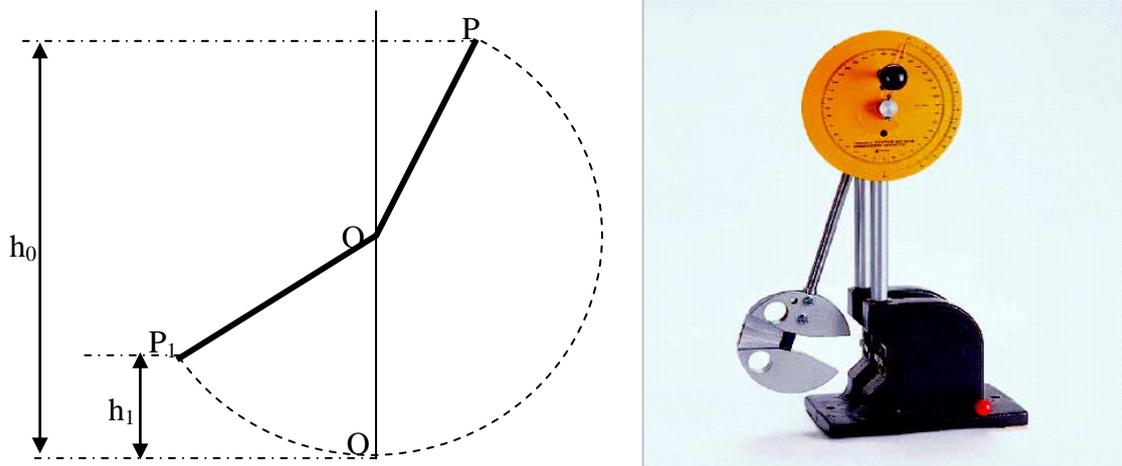


Figure III.9: Mouton pendule de Charpy.

Le travail absorbé ou résilience (K) notée KCV pour les éprouvettes à entaille en « V », et KCU pour les éprouvettes à entaille en « U » et donnée par l'expression suivante :

$$\text{Résilience}(K) = \frac{W}{S} = \frac{(\text{joules})}{(\text{cm}^2)} \quad (\text{III.27})$$

W : représente l'énergie absorbée lors de la rupture.

S : représente la section de l'éprouvette au niveau de l'entaille.

L'énergie que possède le pendule à la position P_0 est $W_0 = M.g.h_0$

A la position P_1 , l'énergie $W_1 = M.g.h_1$.

Donc l'énergie absorbée est donnée par :

$$W = W_0 - W_1 = M.g.(h_0 - h_1)$$

III.1.5. Essai de fluage

En théorie, le fluage est un phénomène qui se manifeste dans un matériau par une augmentation de la déformation en fonction du temps, lorsqu'on lui applique instantanément une contrainte constante dans une configuration de sollicitation donnée (traction, flexion, compression...) (figure III.10 a) [26] .

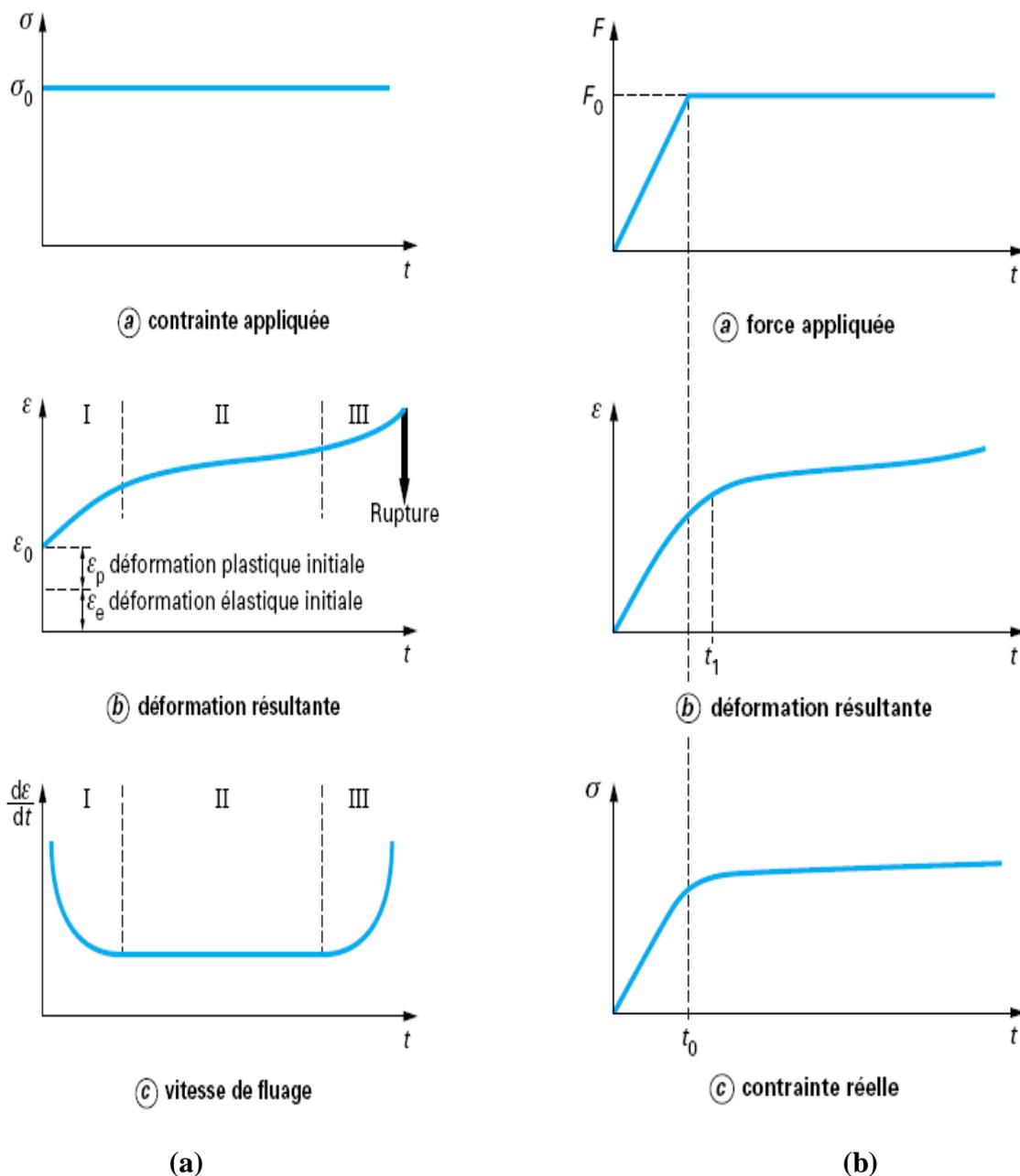


Figure III.10 : Courbes de fluage : a : théorique ; b : expérimentales.

La caractérisation des courbes de fluage est réalisée à l'aide de plusieurs paramètres [27] :

- la température et la contrainte ;
- le temps de rupture ;
- la déformation à la fin du fluage primaire ;
- la vitesse de déformation minimale définie par le minimum de la courbe.

On distingue classiquement 3 stades dans un essai de fluage, comme indiqué sur la figure III.11.

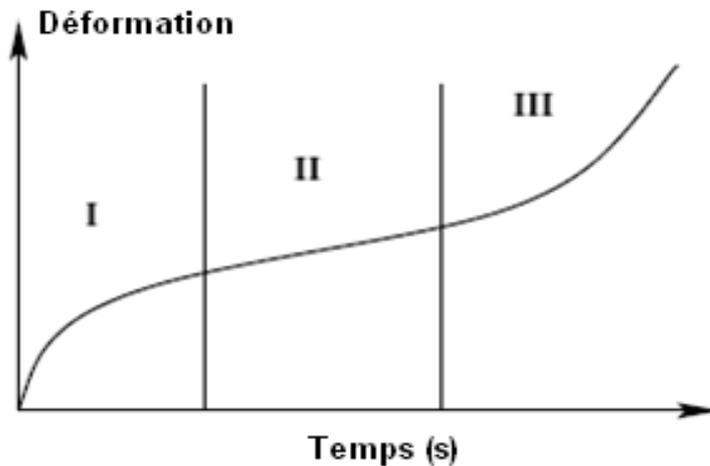


Figure III.11 : Les trois stades d'un essai de fluage.

Zone I : L'application de la contrainte à l'instant $t = 0$ provoque une déformation instantanée élastique, suivie d'une déformation dépendant du temps (courbe concave vers le bas) il s'agit du **fluage primaire** ou **transitoire**. Cette zone s'étend sur un intervalle de temps d'autant plus réduit que les conditions de sollicitation sont sévères. Initialement, les liaisons du réseau macromoléculaire ne sont pas orientées, il y a donc peu de mouvement ce qui explique que la vitesse de fluage primaire est importante. Ensuite il y a une réorganisation du matériau (alignement des fibres et orientation de la structure moléculaire de la matrice) qui a pour effet d'augmenter la résistance au fluage provoquant ainsi une baisse de la vitesse de déformation.

Zone II : C'est une zone très étalée dans le temps et donc la plus dominante durant tout l'essai de fluage, appelée zone de **fluage secondaire** ou **stationnaire**. La déformation varie linéairement en fonction du temps en d'autres termes la vitesse de déformation est constante. Il est par ailleurs établi que les mécanismes d'endommagement qui se produisant dans cette zone contrôlent le fluage.

Zone III : Zone de **fluage tertiaire** ou **accélééré**, caractérisée par une accélération brutale et continue de la vitesse de déformation (courbe convexe vers le bas). Elle est associée à l'apparition d'un endommagement croissant allant jusqu'à la ruine du matériau [28].

Le comportement en fatigue statique est également sensible à l'état de la liaison renfort/matrice. C'est ce qui est illustré sur la figure III.12 dans le cas de composites fibres de verre courtes/PP pour des durées d'essai relativement courtes.

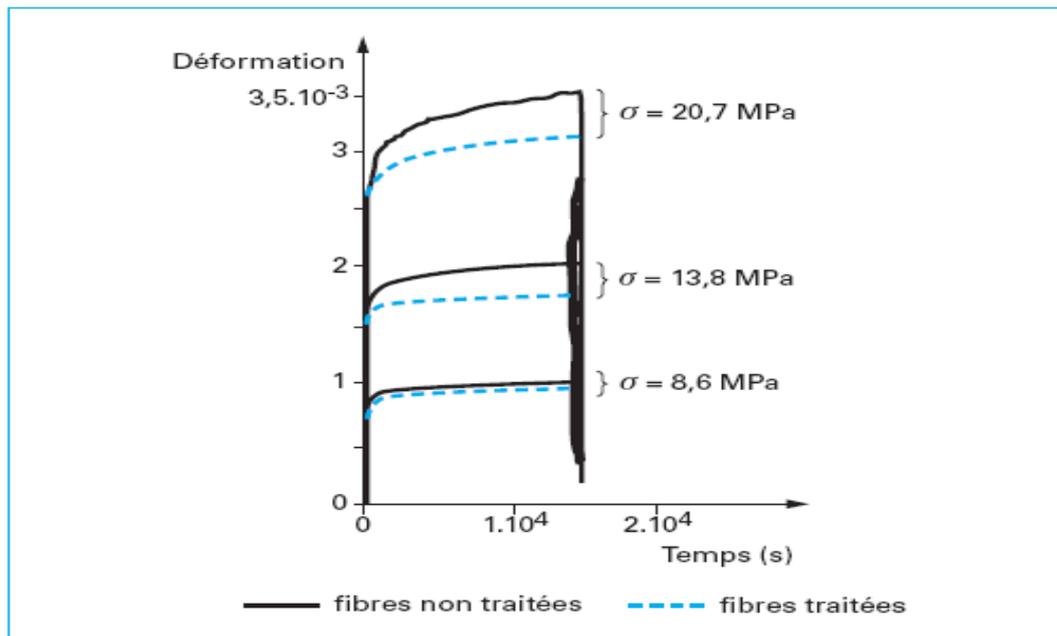


Figure III.12 : Courbes de fluage en traction de matériaux fibres de verre courtes (40 % en masse)/PP à différents niveaux de sollicitation.

III.2. Essais physico-chimiques

Toute conception d'une nouvelle structure nécessite une connaissance du comportement mécanique, physique et chimique des matériaux utilisés, pour avoir accès à ces données on fait appel à différents essais normalisés. Ces essais se divisent en deux familles.

- essais de réception (contrôle) qui permettent de suivre la qualité et la conformité de fabrication ;
- essais de qualification qui permettent d'évaluer les performances de produit et de démontrer l'aptitude du produit à des applications particulières.

III.2.1 Essais sur les constituants des matériaux composites

III.2.1.1. Essais sur les renforts

La qualité des matériaux composites dépend des caractéristiques de renfort constituant, telles que ses propriétés physiques et mécaniques, ainsi que son aptitude à réaliser des liaisons avec la matrice.

a. Contrôles physiques :

- **L'aspect**

Dans le cas des tissus, cette opération consiste à faire une visite du tissu, c'est-à-dire à dérouler les rouleaux pour faire un examen visuel pour déceler tous les défauts de tissage susceptibles d'engendrer des défaillances du produit fini.

Chaque défaut est repéré en lisière (bord) par un petit repère de couleur, une sonnette, qui alerte l'utilisateur qui peut ainsi éliminer le défaut au moment des opérations de découpe.

Les principaux défauts classés de cette catégorie sont : les trous, les déchirures, les ondulations, les plis, les taches

- **Le tissage**

Cette opération de contrôle consiste à vérifier certain nombre de paramètres liés aux opérations textiles :

- l'armure (mode de tissage : toile, satin,...) ;
- le nombre de mailles en centimètre dans le sens de trame et chaîne ;
- l'épaisseur : cette mesure s'effectue sous une pression donnée ;
- le grammage : c'est la masse surfacique pour les tissus et la masse linéique pour les fibres.

b. Aptitude à l'imprégnation [22] :

Certaines caractéristiques du renfort, influent sur la liaison avec la matrice. Donc il est nécessaire de les contrôler avant l'imprégnation.

- **Taux d'humidité**

C'est la détermination de la quantité d'eau présente dans le tissu par différence de masse avant et après séchage.

➤ **Taux de reprise d'humidité**

Aptitude du tissu à reprendre l'eau dans des conditions climatiques déterminées (température et hygrométrie).

➤ **Taux de porosité**

Le taux de porosité (ou taux de vide) et sa distribution dans le composite dépendent de nombreux facteurs tels que :

- le type de résine (nature, accélérateur, catalyseur, caractéristiques rhéologiques, composants volatils) ;
- l'orientation, le taux et la structure du renfort (armure, ensimage, séquence d'empilement) ;
- les paramètres technologiques liés aux procédés de fabrication (températures, temps, pressions et dépressions, degré hygrométrique).

Un taux de porosité élevé se traduit essentiellement par des chutes de propriétés mécaniques importantes, surtout à la rupture en cisaillement et dans la direction perpendiculaire aux fibres.

➤ **Taux et nature des impuretés**

Certaines impuretés peuvent constituer des inhibiteurs pour les réactions de polymérisation des résines. Dans ce cas précis, nous déterminons le taux par perte au feu (pesée avant et après calcination) et la nature par des techniques d'analyse spectrale.

III.2.1.2. Essais sur la résine

La résine a pour fonctions de transférer les charges d'une fibre vers l'autre notamment en cas de surcharge ou rupture, de donner la forme du corps solide, d'assurer l'interface avec l'environnement mécanique, de stabiliser la fibre en compression (anti-flambement) et en fin de protéger les fibres des agressions environnementales (corrosion, abrasion...) ; en plus de ça la résine est sensible aux agents extérieurs comme la température, l'humidité...etc.

Donc la qualité du composite en fin de fabrication dépend des propriétés physiques et chimiques de cette matière première.

a. Contrôle chimique :

La vérification de la composition de la résine par rapport à une formule de base nécessite des analyses chimiques parmi lesquels nous mentionnons :

- l'indice d'acide, teneur en styrène, teneur en eau pour des résines polystère ;
- l'équivalent époxyde teneur en chlore, pour des résines époxydes ;
- Teneur en formole et phénol libre, teneur en eau pour des résines phynolformaldéhydes

b. Viscosité de la résine :

La viscosité est une caractéristique très importante car elle influe sur la qualité finale du matériau composite. Elle est en fonction des chaînes de molécule. Ainsi des chaînes moléculaires courtes peuvent donner un matériau de plus faible résistance. De plus, la viscosité a une grande importance lors de la mise en œuvre par le caractère mouillabilité.

Un contrôle approché peut être effectuée par l'écoulement de la résine à travers un orifice calibré dans des conditions déterminées de température et de hydrométrie. On peut également utiliser un viscosimètre de torsion type BROOFILD.

c. Durée d'utilisation d'un système résine-durcisseur :

Elle est mesurée par l'évolution de la viscosité, ainsi, que la température lors de la polymérisation.

d. Mesure de la réactivité :

Elle exprime la vitesse à laquelle la résine va polymériser au cours de cycle de cuisson.

e. Mesure de temps de gel :

Au cours de la polymérisation, la résine passe par un état gel qui correspond au moment où les molécules sont devenues suffisamment longues pour ne pas être soluble dans un solvant, ce passage de la viscosité est associé à des propriétés que l'on utilisera pour mesurer le temps de passage de l'état liquide à l'état gel pour une résine placée dans des conditions thermiques particulière.

III.2.2. Le vieillissement

Les mécanismes de vieillissement des composites à matrice organique sont très divers et varient en fonction du polymère, des conditions de vieillissement comme la température, l'humidité, la pression d'oxygène, mais aussi en fonction de l'état de référence (cycle de cuisson, vitesse de refroidissement, contraintes internes), des conditions de mise en œuvre de la structure des matériaux (géométrie).

Le vieillissement désigne toute altération des propriétés d'un matériau au cours du temps, ces propriétés peuvent être des caractéristiques mécaniques, physico-chimique, de surface,...

III.2.2.1. Mécanisme de vieillissement

Le vieillissement entraîne généralement des ruptures des chaînes de polymère, et des pertes de propriétés, les mécanismes mis en jeu dans ce processus de vieillissement sont essentiellement fonction de la structure du polymère et des conditions d'exposition [29].

Les causes du vieillissement des matériaux polymères peuvent être divisées selon le mécanisme mis en jeu :

III.2.2.1.1. Vieillissement physique

Le vieillissement physique est un phénomène dans lequel la structure chimique des macromolécules et autres constituants du matériau polymère n'est pas modifiée. Il englobe, les phénomènes de vieillissement sous contrainte mécanique, les phénomènes de relaxation, les phénomènes liés aux transferts de masse comme l'absorption ou la diffusion de molécules.

III.2.2.1.2. Vieillissement chimique

Concerne tout phénomène impliquant une modification chimique du matériau. Dans ce type de vieillissement, différentes catégories peuvent être citées : le vieillissement thermo-chimique, thermo-oxydatif, photochimique et radiochimique, biochimique ou biologique, le vieillissement résultant d'agression par des réactifs chimiques... Ce vieillissement se superpose très souvent au vieillissement physique et les deux phénomènes interfèrent.

Le vieillissement peut être déterminé selon son mécanisme, physique ou chimique, ou selon son mode d'action qui peut être hydrolytique, thermique, photochimique, de biodégradation...

Toutes ces causes peuvent agir simultanément, voire en synergie, et doivent être explorées. Le mode d'action à étudier plus particulièrement doit être choisi principalement en fonction du milieu agressif rencontré.

III.2.2.1.3. Vieillissement par absorption de solvant

L'absorption d'un solvant par les matériaux composites et l'influence spécifique d'un certain nombre d'agents chimiques sur ces matériaux donne naissance à trois types de comportements qui sont :

- interaction physique pure ;
- réaction chimique conduisant à une augmentation de la masse sèche ;
- réaction chimique conduisant à une diminution de la masse sèche.

a. Absorption d'eau

On considère un solide plus ou moins poreux qui entre en contact avec un liquide, de l'eau dans la plupart des cas. A ce contact, le matériau absorbe de l'eau par ses surfaces, puis l'eau se répand dans le volume du solide selon les lois de la diffusion. Ce phénomène est l'absorption, qui est donc caractérisée par une prise de poids du solide au cours du temps. La diffusion se définit ainsi comme un phénomène de transport moléculaire dû à l'existence d'un gradient de concentration du solvant vers le polymère [30].

a.1. Influence d'eau sur les composites

Au sein d'un matériau composite à matrice polymère, l'eau interagit, d'une part, avec la matrice en volume, d'autre part, avec le renfort et les zones interfaciales. Les cinétiques de diffusion de l'eau dans une résine homogène diffèrent de celles existant au sein d'une résine renforcée.

Deux mécanismes peuvent contribuer au processus d'absorption d'eau dans le polymère : la fixation des molécules d'eau sur les sites actifs polaires du réseau macromoléculaire et la diffusion à travers le volume libre et les microvides.

Ces processus dépendent également fortement des conditions externes : l'augmentation de la température a tendance à accélérer la prise d'eau en modifiant les paramètres morphologiques et structuraux du matériau (réarrangements moléculaires, relaxation des contraintes thermiques résiduelles).

La figure III.13 représente une courbe typique d'absorption d'eau pour un composite. L'axe des abscisses représente la racine carrée du temps écoulé et l'axe des ordonnées représente le taux d'humidité exprimé sous la forme d'un pourcentage. Il est calculé selon l'équation :

$$M\% = \frac{M_t - M_0}{M_0} \times 100 \quad (\text{III.28})$$

Avec

M_t : la masse de l'échantillon immergé dans le solvant à l'instant t ;

M_0 : la masse initiale de l'échantillon.

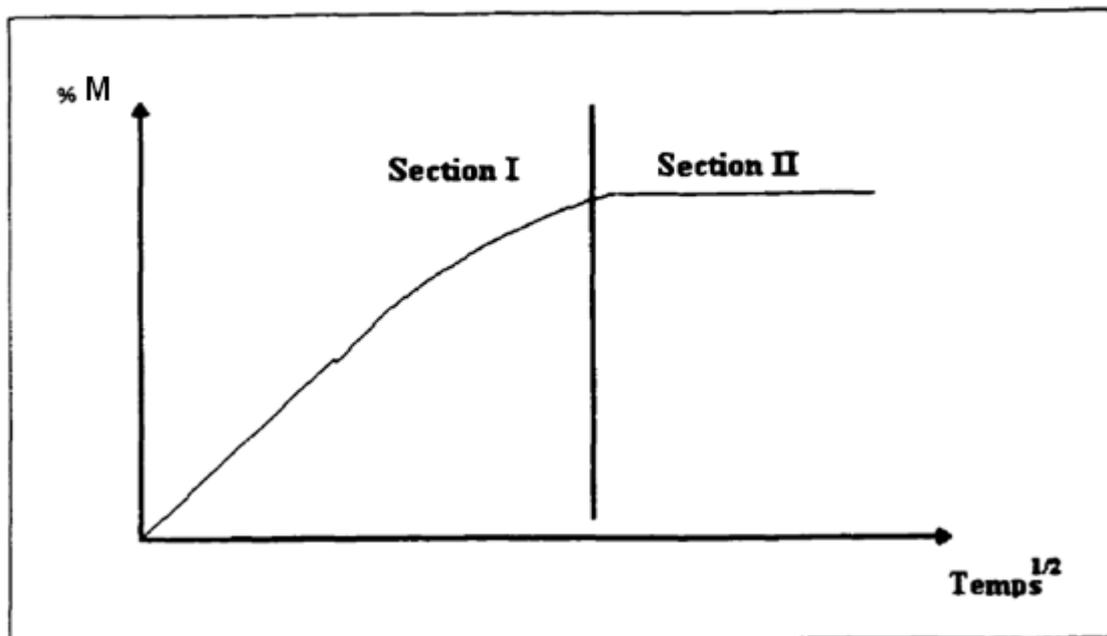


Figure III.13 : Courbe d'absorption d'eau pour un composite.

En observant la figure, nous pouvons constater la présence de deux régions clairement définies. La région 1 correspond au début de l'exposition.

On observe alors que le pourcentage d'humidité augmente constamment et de façon linéaire. La pente de cette courbe est proportionnelle à la diffusivité du matériau. Plus celui-ci est perméable, plus la courbe sera abrupte. S'il n'y a pas présence de fissures, de délamination ou de vides et si la structure chimique de la matrice change lentement par rapport à la concentration d'humidité dans le composite, nous pouvons alors présumer que le processus de diffusion obéit à la loi de Fick [31].

a.2. Absorption d'eau par diffusion

La diffusion d'eau au sein d'un composite est un phénomène qui dépend à la fois du taux d'humidité relative et de la température du milieu dans lequel il se trouve. Pour une atmosphère donnée, la cinétique de diffusion ne dépend que de la température. D'un point de vue théorique, la cinétique d'absorption d'eau peut être :

➤ **absorption fickienne :**

A température ambiante, la diffusion d'eau dans les résines thermodurcissables est lente et il est courant d'utiliser expérimentalement des températures de vieillissement plus élevées pour accélérer le phénomène.

Cependant, l'élévation de température ne doit pas être trop importante car la plupart des résines possèdent une température limite au delà de laquelle la diffusion d'eau n'est plus Fickienne [30].

La loi de Fick décrit donc la diffusion d'une espèce telle que l'eau dans un milieu présentant un gradient de concentration. Elle se traduit à une échelle macroscopique par une relation linéaire entre le flux du diffusant à travers une surface plane, de dimensions infinies par rapport à l'épaisseur, et la dérivée seconde de la concentration perpendiculairement à cette surface par :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (\text{III.29})$$

Où, D est le coefficient de diffusion constant dans la direction normale à la surface et x la distance entre les deux faces extrêmes du matériau.

Cette équation différentielle décrit la diffusion d'eau au travers l'épaisseur de la plaque et est caractérisée par un coefficient de diffusion unique D indépendant du temps et de l'espace, ainsi que de la concentration en molécules d'eau mais dépendant de la température du milieu.

Le coefficient de diffusion représente la rapidité avec laquelle l'eau diffuse dans le composite. Ainsi, plus celui-ci est élevé, plus le composite atteindra son taux maximum d'humidité rapidement.

La courbe d'absorption Fickienne est donnée par la figure III.14 [32]

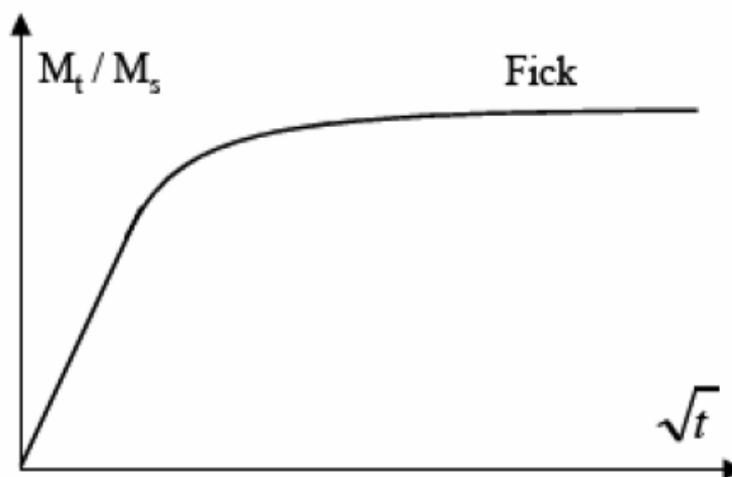


Figure III.14 : Courbe d'absorption Fickienne.

En fait, la diffusion fickienne est caractérisée par un seuil d'absorption d'eau asymptotique M_s atteint pour un temps infini correspond à l'équilibre et s'exprime généralement en pourcentage. Il caractérise le gain de masse.

Lorsque $M_t / M_s < 0,5$, l'équation (III.29) par différence finies devient :

$$\frac{M_t}{M_s} = \frac{4}{h} \sqrt{\frac{D_X \cdot t}{\pi}} \quad (\text{III.30})$$

h : épaisseur de la plaque et M_s la masse à la saturation ;

M_t : la masse totale d'eau dans le matériau à un instant t ;

D_x : le coefficient de diffusion constant dans la direction normale à la surface et x la distance entre les deux faces extrêmes du matériau.

Le pourcentage d'eau absorbée varie linéairement en fonction de la racine carrée du temps pour des valeurs de M inférieures à 60 % de M_s , c'est à dire lorsque la concentration reste nulle au centre de la plaque. Au delà ($M > 0,6M_s$), l'équation (III.30) n'est plus valable et d'autres modèles doivent être utilisés (Springer, Langmuir) [33]. Citons par exemple le modèle de Springer décrit par la relation :

$$\frac{M_t}{M_s} = \left[1 - \exp\left(\frac{D \cdot t}{h^2}\right)^{0.75} \right] \quad (\text{III.31})$$

Des essais expérimentaux permettent de tracer des courbes similaires à celle de la (Figure III.14). Il est alors possible de connaître M_s et d'accéder au coefficient de diffusion D . Cependant, les échantillons habituellement utilisés en laboratoire n'ont pas une longueur et une largeur infiniment grande devant leur épaisseur si bien qu'un facteur correctif doit être introduit.

La correction prend en compte l'eau qui pénètre par les faces latérales de l'échantillon à l'aide d'un coefficient β dépendant de la géométrie de l'échantillon.

$$\beta = 1 + \frac{h}{b} + \frac{h}{l}$$

Avec, Avec, b et l sont respectivement la largeur et la longueur de l'échantillon. La relation (III.30) s'exprime alors de la manière suivante :

$$\frac{M_t}{M_s} = \beta \cdot \frac{4}{h} \cdot \sqrt{\frac{D \cdot t}{\pi}} \quad (\text{III.32})$$

Les lois de Fick permettent donc, à partir d'une hypothèse physique simple, de calculer les cinétiques de diffusion à l'aide de deux paramètres accessibles expérimentalement. Cette simplicité explique leur très large utilisation pour la modélisation des transports d'eau dans les polymères et composites [32].

➤ **absorption non fickienne :**

Dans de nombreuses circonstances, les cinétiques d'absorption d'eau de polymères ou composites à matrice polymère présentent des écarts par rapport au comportement fickien (figure III.15), évoqué dans les paragraphes précédents [34].

Les courbes schématiques données sur la figure ci-dessous sont représentatives des différents cas rencontrés déjà :

La courbe (0) : correspond au comportement fickien.

La courbe (1) : elle est caractérisée par une augmentation continue de la prise de poids, correspond au cas pseudo-fickien couramment rencontré. L'équilibre n'est jamais atteint.

La courbe (2) : représente une cinétique de type Langmuir.

Le cas (3) : correspond à une accélération rapide de l'absorption d'eau, qui est généralement accompagnée de déformations importantes, d'endommagements au sein du matériau.

Enfin la courbe (4) : présente une perte de poids du matériau, après une certaine durée de vieillissement. Ce cas de figure peut être attribué à des dégradations physiques ou chimiques ou à une hydrolyse du matériau. Des groupements chimiques peuvent être arrachés des chaînes polymères et évacués dans le solvant, ce qui explique la perte de matière et la baisse de la masse globale, malgré l'absorption d'eau.

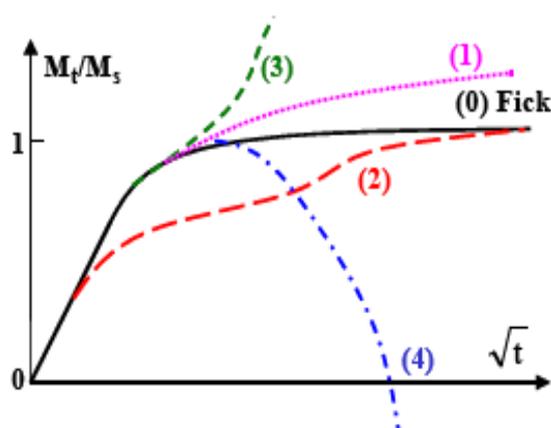


Figure III.15: Courbes schématiques représentatives de quatre catégories de cinétiques d'absorption d'eau non fickienne.

En raison de la grande variété de structures moléculaires des polymères, et de la diversité des structures en composites à matrice organique, il est difficile de suggérer des causes spécifiques pour les différents cas évoqués ci-dessus. Cependant, la synthèse des données de la littérature suggère que les cas (0) et (2), où le matériau parvient à une saturation en eau vis à vis du milieu environnant, se produisent généralement pour des conditions peu sévères : vieillissement en humidité relative ou en immersion à faible température. Les cas (3) et (4) correspondent, eux, plus fréquemment à des processus d'absorption dans des conditions plus sévères, en immersion, à des températures élevées et parfois sous des contraintes externes élevées. Ils sont plus fréquents pour les composites que pour les résines pures [32].

III.2.3. Essai de perte au feu

Dans le cas de composites, un essai de calcination (essai dit de perte au feu) à des températures de l'ordre de 650°C pour le cas de nos matériaux. La pesée d'échantillons avant et après passage au four permet :

- de mesurer le taux massique de charges non volatiles à la température d'essai
- d'identifier chaque couche (tissus, mats, stratifiés unidirectionnels), d'en mesurer la masse au mètre carré (grammage) et l'orientation ;
- de séparer les charges pulvérulentes minérales ;
- de définir le degré d'homogénéité du composite en utilisant des échantillons de volumes différents, prélevés en plusieurs points.

Dans le cas de composites dont les fibres ne supportent pas la calcination, l'utilisation d'une méthode d'extraction par dissolution et décantation permet d'accéder aux mêmes résultats, tout en étant cependant plus délicate à mettre en œuvre.

Les essais classiques (traction, compression, flexion) sont insuffisants pour le choix d'un matériau, il est important de savoir son comportement dans le temps et savoir les endommagements que provoque une sollicitation variable (phénomène de la fatigue). Il apparaît donc important de comprendre au quatrième chapitre la fatigue et l'endommagement de ces composites.

Chapitre

IV

*La Fatigue et
l'Endommagement
des Composites*

L'utilisation des matériaux composites engendre de nombreuses difficultés relatives au dimensionnement et à la durabilité des structures, ce qui limite encore la diffusion de ces structures composites à plus grande échelle.

Lorsqu'une structure est soumise à des variations de contraintes répétées, elle finit par se rompre, et ce pour des valeurs de contraintes appliquées qui peuvent être très inférieures aux valeurs ultimes initiales. C'est le phénomène de *fatigue* ou *endommagement par fatigue*, qu'il est nécessaire de prendre en compte dans tout dimensionnement de pièce en état de service.

IV.1. Fatigue

IV.1.1. Définition

La fatigue ou endommagement par fatigue des matériaux est le résultat de la modification des propriétés consécutive à l'application répétée de cycles d'effort ou de déformation, qui peut conduire à la rupture. Les amplitudes de sollicitation sont souvent bien inférieures au seuil d'élasticité conventionnel. L'endurance est alors définie comme la capacité de résistance à la rupture par fatigue du matériau [35].

Le but des essais de fatigue dynamique est de définir quantitativement la limite d'endurance d'un matériau soumis à une sollicitation périodique, c'est-à-dire l'amplitude maximale qu'il peut supporter indéfiniment, sans rupture apparente. En fait, il s'agit souvent d'une limite pratique ou conventionnelle pour laquelle la rupture n'intervient qu'après un certain nombre de cycles qui peut être imposé dans la durée de vie en utilisation ou, le plus souvent, par l'appareillage d'essai [26].

IV.1.2. Essai de fatigue

L'essai de fatigue donne le comportement d'un matériau soumis à des contraintes périodiques, cet essai permet de déterminer une limite d'endurance, c'est-à-dire la contrainte (ou la déformation) maximale sous laquelle la durée de vie de la pièce, serait maximale [36].

On distingue en fonction de R les différents types de fatigue qui sont :

- Alternée symétrique : $\sigma_m = 0$ $R = -1$
- Alternée dissymétrique : $0 < \sigma_m < \sigma_a$ $-1 < R < 0$

➤ Répétée	$\sigma_m = \sigma_a$	$R = 0$
➤ Ondulée	$\sigma_m > \sigma_a$	$0 < R < 1$

Tel que le paramètre R est le rapport de la contrainte minimale exercée sur la contrainte maximale exercée au long d'une période d'essai.

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad \text{ou bien} \quad R = \frac{\varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\max}}$$

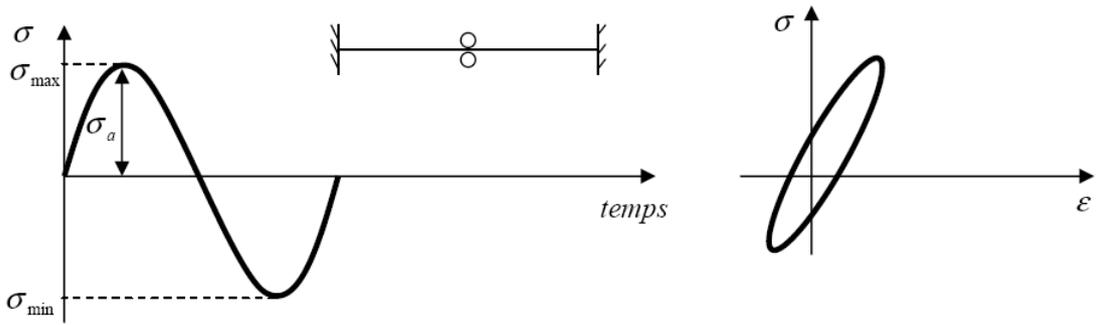
Avec
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

Remarque

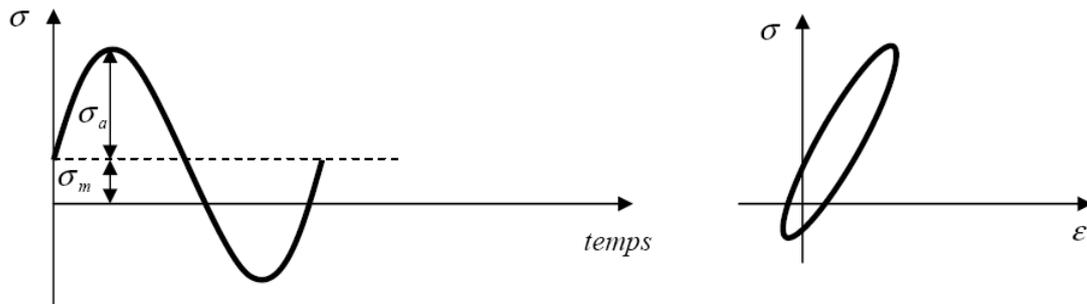
Pour $R=1$, on n'est plus dans la fatigue dynamique mais dans la fatigue statique (relaxation).

- **La durée de vie** est généralement mesurée par le nombre de cycles à rupture N_R . L'exécution de n cycles ($n < N$) entraîne un certain endommagement de la pièce qu'il est important de chiffrer car il détermine sa capacité de vie.

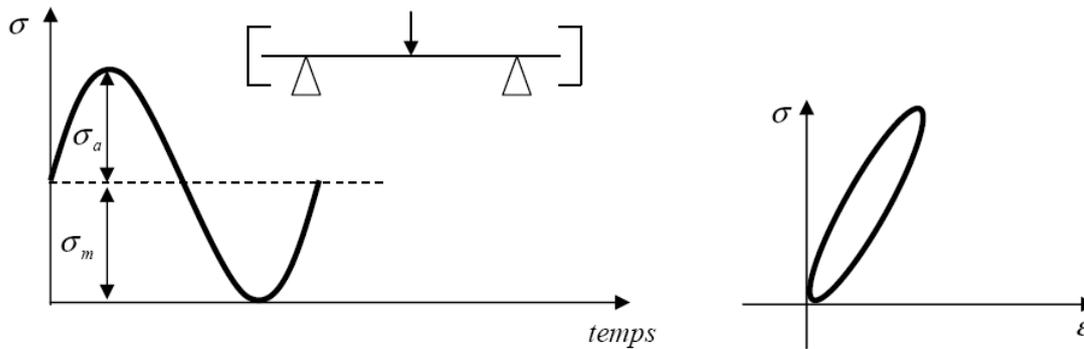
On appelle **endurance** la capacité de résistance à la fatigue des pièces et des assemblages. Ainsi, d'une façon très générale, il y aura fatigue toutes les fois que l'on est en présence d'efforts variables dans le temps. Ce qui est bien particulier à la fatigue et qui en fait le danger, c'est que la rupture peut se produire pour des contraintes apparentes relativement faibles, souvent bien inférieures à la résistance à la traction et même à la limite d'élasticité du matériau, lorsque leur application est répétée un grand nombre de fois.



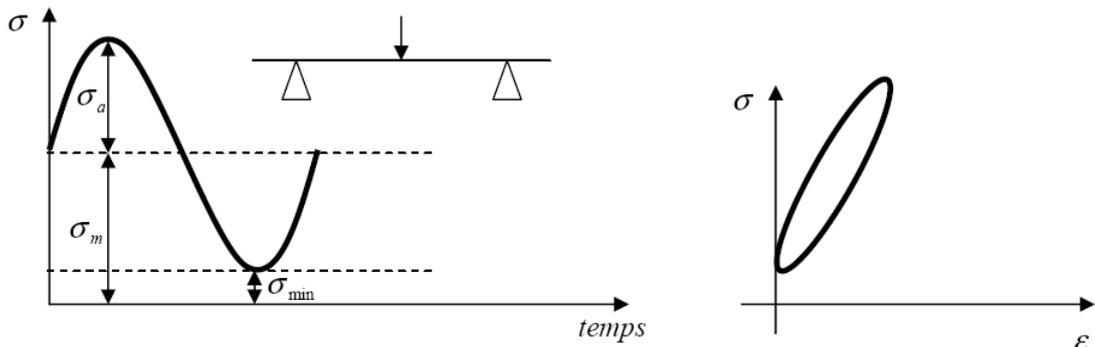
Contraintes alternées symétriques ($R = -1$)



Contraintes alternées dissymétriques ($-1 < R < 0$)



Contraintes répétées ($R = 0$)



Contraintes ondulées ($0 < R < 1$)

Figure IV.1 : Différents types de sollicitation en flexion.

IV.1.3. Diagrammes d'endurance

L'essai de fatigue le plus simple consiste à soumettre chaque éprouvette à des cycles d'efforts périodiques (généralement sinusoïdaux), d'amplitude maximale σ et de fréquence constante, et à noter le nombre de cycles au bout duquel la rupture se produit (N). A chaque éprouvette correspond un point du plan (σ, N) et à partir d'un lot d'éprouvettes soumises à des contraintes maximales différentes, on obtient une courbe qui a l'allure de celle représentée sur la figure IV.2 [37].

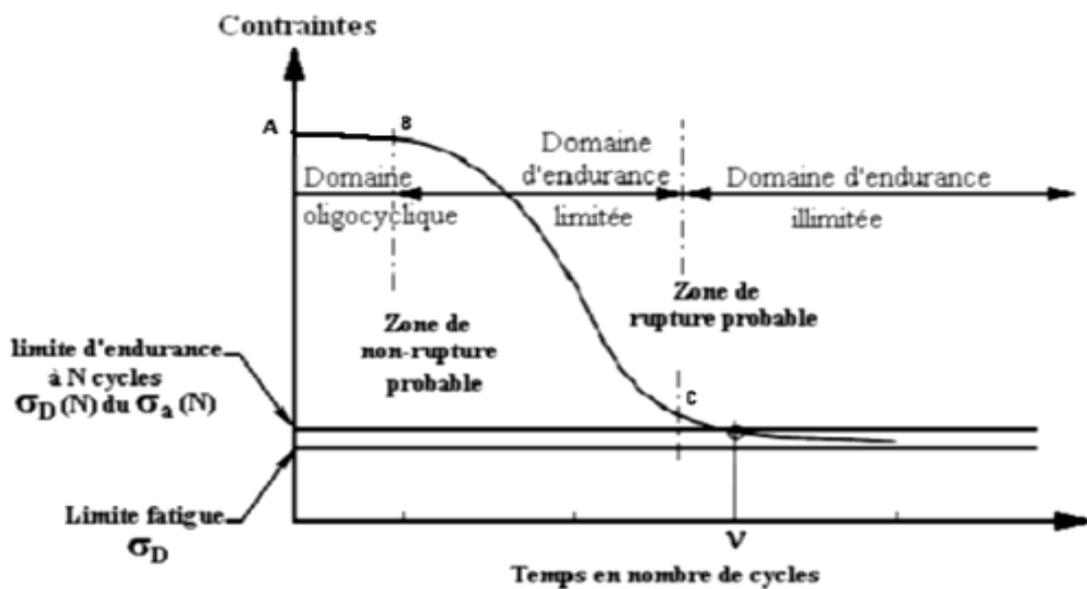


Figure IV.2 : Principales zones de la courbe de Wöhler

Sur cette courbe, connue sous les noms de WOHLER, courbe S-N (Stress – Number of cycles) ou courbe d'endurance, on peut distinguer trois domaines :

- **la zone AB, dite oligocyclique**, qui correspond aux contraintes les plus grandes, où la rupture survient après un petit nombre d'alternances et est précédée d'une déformation plastique notable ;
- **la zone BC, dite zone de fatigue ou d'endurance limitée**, où la rupture est atteinte après un nombre limité de cycles compris approximativement entre 10^4 et 10^6 à 10^7 . La rupture n'est pas accompagnée d'une déformation plastique d'ensemble, mesurable. La réponse de l'éprouvette atteint dans ce cas un régime adapté.

L'adaptation est dû à l'état élastique, où la réponse de l'éprouvette est purement élastique. Néanmoins peut y avoir de la déformation plastique due aux premiers cycles, mais au bout d'un certain nombre de cycles, elle reste constante. Bien entendu l'état final dépend de l'état initial de la structure. C'est le domaine dans lequel travaillent les structures qui pour diverses raisons (coût, esthétique..), doivent avoir des masses et des volumes impérativement réduits. Il existe de très nombreuses relations reliant σ et N pour représenter le phénomène dans ce domaine où N croît quand σ décroît.

• **la zone CD, dite zone d'endurance illimitée ou zone de sécurité**, où D est un point pour les métaux ferreux qui est à l'infini. La courbe de Wöhler présente généralement une variation de pente plus ou moins marquée autour de 10^6 à 10^7 cycles, suivie d'une zone (CD) où la courbe tend vers une limite asymptotique parallèle à l'axe des N . En deçà de cette valeur limite de σ , notée σ_D , il n'y a plus rupture par fatigue quel que soit le nombre de cycles appliqué. σ_D est nommée *limite de fatigue*.

IV.1.3.1. Fatigue oligocyclique

Il est généralement admis que ce domaine correspond à des contraintes élevées supérieures à la limite d'élasticité du matériau. Le nombre de cycles à rupture s'étend de $\frac{1}{4}$ jusqu'à 10^4 ou 10^5 .

Sous l'effet du cyclage en déformation imposée, la courbe effort déformation prend la forme d'une boucle d'hystérésis ouverte qui se stabilise et se ferme au bout d'un certain nombre de cycles, au cours desquels le matériau s'adapte aux sollicitations cycliques. Cette accommodation en fatigue peut se produire de deux manières : il pourra y avoir durcissement ou adoucissement suivant l'état initiale du matériau. Souvent, pour des sollicitations alternées, un matériau initialement écrouit s'adoucit en fatigue, et inversement, un matériau initialement mou durcit.

En joignant les sommets des boucles stables obtenues par différentes valeurs de déformation, on trace une courbe dite de traction cyclique qui caractérise l'état stable des déformations sous sollicitations cycliques.

Chacun des deux comportements possibles d'un matériau est mis en évidence par la position de la courbe de traction cyclique par rapport à la courbe de traction statique. Ces positions relatives permettent donc de prévoir le comportement d'un matériau sous sollicitations cycliques : s'il y a durcissement, la courbe de traction cyclique est au dessus de la courbe de traction statique, au dessous s'il y a adoucissement.

Différents auteurs ont trouvé que, d'une manière générale, les matériaux dont le rapport de la résistance à la traction sur la limite d'élasticité R_m/Re est supérieur à 1.4, durcissent sous sollicitations cycliques, tandis que les matériaux dont le rapport R_m/Re est inférieur à 1.2 s'adoucissent ; lorsque $1.2 < R_m/Re < 1.4$, on observe soit un adoucissement, soit un durcissement, soit une réponse stable du matériau.

La relation la plus simple entre la déformation plastique $\Delta\varepsilon_p$ et le nombre de cycles à rupture N_r est celle proposée par COFFIN.

$$N_r^k \times \Delta\varepsilon_p = C$$

L'exposant K est voisin de $1/2$ pour les matériaux courants (aciers, alliages légers).

IV.1.3.2. Zone d'endurance limitée

C'est le domaine de la fatigue habituellement considéré où la rupture apparaît après un nombre limité de cycle de (10^5 à 10^8), sans être accompagnée d'une déformation plastique d'ensemble mesurable. Le nombre de cycles à rupture N , croît quand l'amplitude de la contrainte périodique σ décroît. Parmi les nombreuses expressions proposées pour relier N , à σ , nous citons celle de WEIBULL :

$$N_r (\sigma - \sigma_D)^n = A \quad (IV.1)$$

Avec $n = 1$ ou 2 selon les métaux, et celle de BASTENAIRE :

$$N_r + B = \frac{A e^{-C(\sigma - \sigma_D)}}{(\sigma - \sigma_D)} \quad (IV.2)$$

Où σ_D est la limite d'endurance qui borne inférieurement ce domaine, A , B , C des paramètres caractéristiques de la nature de l'acier et des conditions d'essai.

IV.1.3.3. Limite d'endurance

Pour les contraintes maximales appliquées dans ce domaine, la durée de vie peut être considérée comme supérieure à celle envisagée pour la pièce ou la construction, c'est-à-dire σ_D . Pour les contraintes maximales inférieures à σ_D , c'est-à-dire inférieures à la moitié ou au tiers de la charge de rupture, les conditions de germination des microfissures sont rarement réunies, ou alors leur dimension n'atteint pas la taille critique.

Pour certains matériaux (aluminium), le passage du domaine de fatigue au domaine de sécurité est très progressif. La courbe (σ, N) présente un coude très arrondi et elle ne devient horizontale qu'au-delà de 10^8 cycles ; parfois même, il n'apparaît pas de limite d'endurance asymptotique. Par contre, pour d'autres matériaux comme les aciers ferritiques, la courbe (σ, N) présente un coude très accentué, situé entre 10^6 et 10^7 cycles, et on peut déterminer une limite d'endurance.

Dans ce cas, il faut en réalité considérer une zone entourant cette limite, zone dans laquelle la rupture garde un caractère aléatoire et où il est possible de déterminer statistiquement une limite d'endurance à partir de la distribution des ruptures et des non-ruptures ; ce sera, par exemple, la contrainte correspondant à la probabilité d'apparition de 50% de rupture.

La limite d'endurance théorique est la limite supérieure de la contrainte périodique qui peut être appliquée indéfiniment sans causer la rupture.

La limite conventionnelle est la valeur maximale de la contrainte qui n'entraîne pas la rupture avant un nombre de cycles donné. Celle-ci peut toujours être déterminée.

En pratique, la détermination de la limite d'endurance pose un problème particulier par suite du caractère aléatoire des ruptures de fatigue dans la zone d'endurance. C'est pourquoi les seules méthodes rigoureuses de détermination de la limite d'endurance font appel à des méthodes statistiques.

Notons enfin que la dispersion des résultats des essais de fatigue est un fait d'expérience. Celle-ci provient en effet de nombreuses causes liées à l'hétérogénéité des matériaux, aux tolérances d'usinage, aux défauts superficiels, à la présence de contraintes résiduelles, aux tolérances de montage sur la machine, aux variations de température et de milieu au cours de l'essai, etc.

On peut la réduire en précisant tous les paramètres et en les maintenant dans des limites étroites, mais on ne peut pas l'éliminer par suite du caractère aléatoire des ruptures par fatigue. C'est pourquoi, sur la courbe de WOHLER, la durée de vie pour une contrainte donnée σ ne peut pas être représentée par un point mais par une distribution du nombre de cycles N .

IV.1.4. Description de la courbe de Wöhler pour un composite

Mandel (1982) [17] a introduit une relation linéaire par laquelle les courbes de Wöhler pour les composites à matrices organiques sont décrites dans le cas d'un essai de traction à contrainte imposée, cette relation est donnée par :

$$\sigma = A - B \text{Log} N_x \quad (\text{IV.3})$$

Tel que :

A: Constante du matériau, elle correspond à la contrainte à rupture pour un demi-cycle.

B: Est la pente de la droite d'endurance. Homogène à une vitesse, cette valeur correspond au taux de chute de la déformation(ou contrainte) maximale admissible.

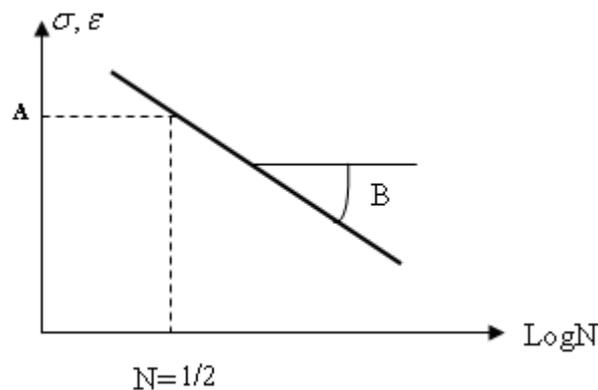


Figure IV.3 : Courbe de Wöhler d'un matériau composite.

IV.1.5. Interprétation de la courbe de Wöhler

En fatigue par traction et déformation imposée on remarque l'existence de trois régimes de fatigue potentielle répartie en trois phases :

Phase I : déformation à rupture du composite (déformation élevée) et généralement cette rupture est accompagnée par décohésion interfaciale et rupture de fibre.

Phase II : fissuration de la matrice et rupture des interfaces en cisaillement (zone de fatigue).

Phase III : la non propagation des endommagements, elle intervient lorsque la déformation appliquée devient plus faible que la limite de fatigue de la matrice (ϵ_{md}).

Pour un composite sollicité en flexion, on distingue deux phases qui sont :

Phase I : Qui est gouvernée par la fissuration matricielle et interfaciale, ici la rupture des fibres intervient lentement. On remarque bien que la durée de vie augmente lorsque la déformation imposée décroît.

Phase II : Qui représente la zone de non propagation des endommagements, quand la déformation imposée est inférieure à la limite d'endurance ϵ_d , qui n'est pas toujours assimilée à celle de la matrice ; car les défauts qui existent dans le matériau conduisent à la rupture des fibres, ce qui engendre des sur contraintes qui peuvent conduire à la fissuration matricielle et à la propagation des endommagements même à des déformations inférieures à ϵ_{md} .

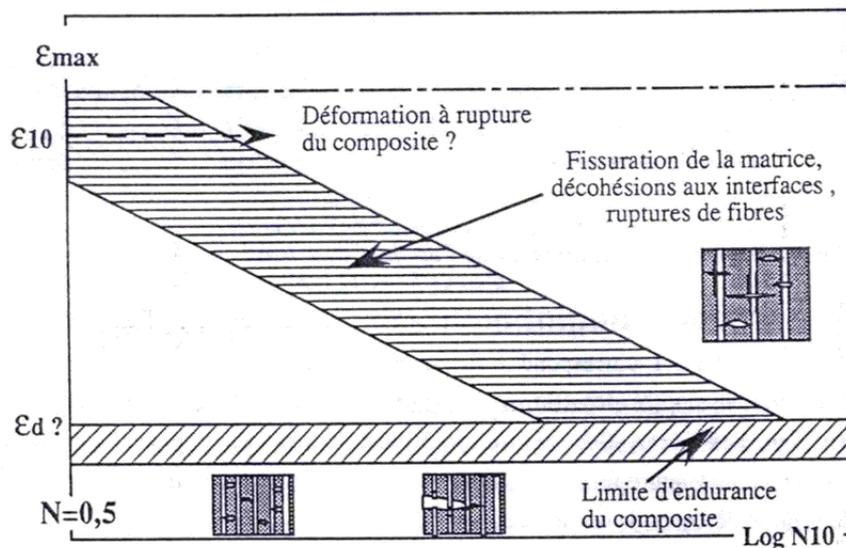


Figure IV.4: Interprétation de la courbe de Wöhler (Diagramme de Talreja).

a. Traceurs de l'endommagement

Le traceur le plus utilisé est celui qui utilise la variation de la rigidité $\frac{P}{P_0}$ en fonction du nombre de cycles. On peut envisager trois grandes étapes, chacune d'entre elles étant délimitée par un critère d'endommagement donné par la figure IV.5.

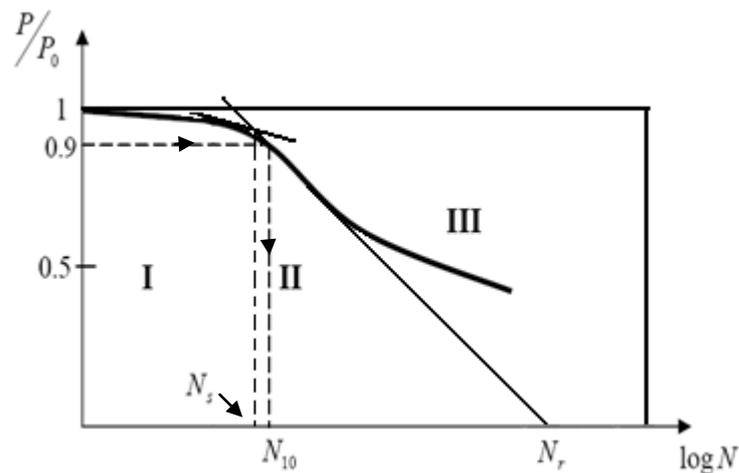


Figure IV.5 : Définition des critères de fin d'essai en flexion trois points

La zone I : est caractérisée par une décroissance linéaire de la raideur apparente P/P_0 du matériau, liée essentiellement à un endommagement microscopique du matériau. Cet endommagement a lieu dès la première mise en charge.

La zone II : est une phase de propagation des défauts initiaux, se traduit par une perte progressive des propriétés du matériau qui est liée à la propagation macroscopique de l'endommagement. A ce stade de l'endommagement, divers modes de propagation, fonction du comportement de l'interface sont identifiables (propagation localisée, multiplication des ruptures). Des macros fissures se propagent à travers les zones à fortes densités de défauts.

La zone III : est relative à une propagation de l'endommagement dans le sens de l'épaisseur par propagation de macro fissure, provoquant une diminution de la section efficace, donc une augmentation de la vitesse de propagation de l'endommagement et une perte significative de rigidité. Ces trois grandes étapes de l'endommagement sont délimitées par des critères d'endommagement spécifiques. Parmi ceux-ci, nous utiliserons :

- N_s : nombre de cycles seuil ; il traduit la discontinuité de la courbe d'évolution $P/P_0 = f(N)$, marquant ainsi le passage d'un endommagement microscopique à un endommagement macroscopique plus ou moins localisé.
- N_{10} : nombre de cycles pour lequel le matériau testé a perdu 10% de sa raideur initiale ($P/P_0 = 0,9$).
- N_R : nombre de cycles à rupture.

b. Procédure à suivre pour tracer la courbe de Wöhler

La caractérisation monotone en flexion trois points est tout à fait indispensable pour une bonne analyse du comportement sous sollicitation cyclique. Pour tracer la courbe de Wöhler, nous utilisons la courbe charge – déplacement tracée lors d'un essai statique en flexion trois points (figure IV.6). Nous relèverons quelques valeurs des déplacements qui sont comprises dans le domaine élastique et pour chacune de ces valeurs nous utilisons cinq éprouvettes afin d'effectuer un essai de fatigue à déplacement imposé [35].

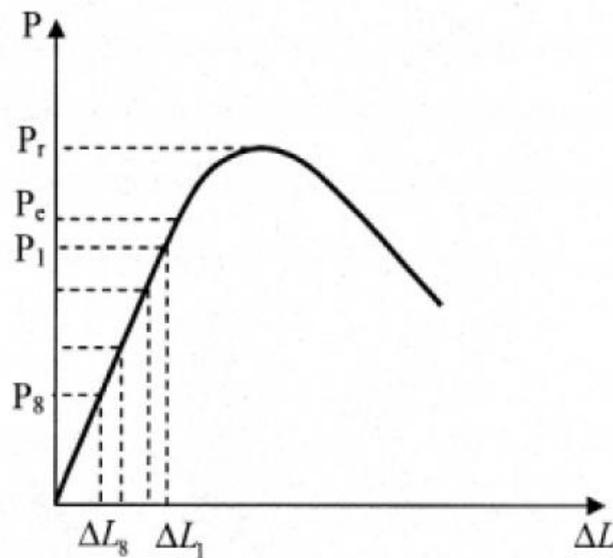


Figure IV.6 : Courbe charge – déplacement.

A partir de l'évolution relative de la charge au cours d'un essai de fatigue, nous tracerons alors la courbe d'endommagement pour chaque déplacement imposé (figure IV.7). Ensuite, nous tracerons une droite (Δ_1) parallèle à l'axe des abscisses, qui correspond au critère de fin d'essai (ou de dépouillement) pour lequel la charge (P) a baissée de 5% (elle est notée N_5). Nous relèverons les points (e_1, e_2, e_3, e_4, e_5) d'intersections de cette droite avec les courbes d'endommagement des cinq éprouvettes.

Les moyennes des nombres de cycles pour le critère de dépouillement fixé de la courbe d'endommagement, correspondent à un point sur la courbe de Wöhler (e_{m1}) (figure IV.8).

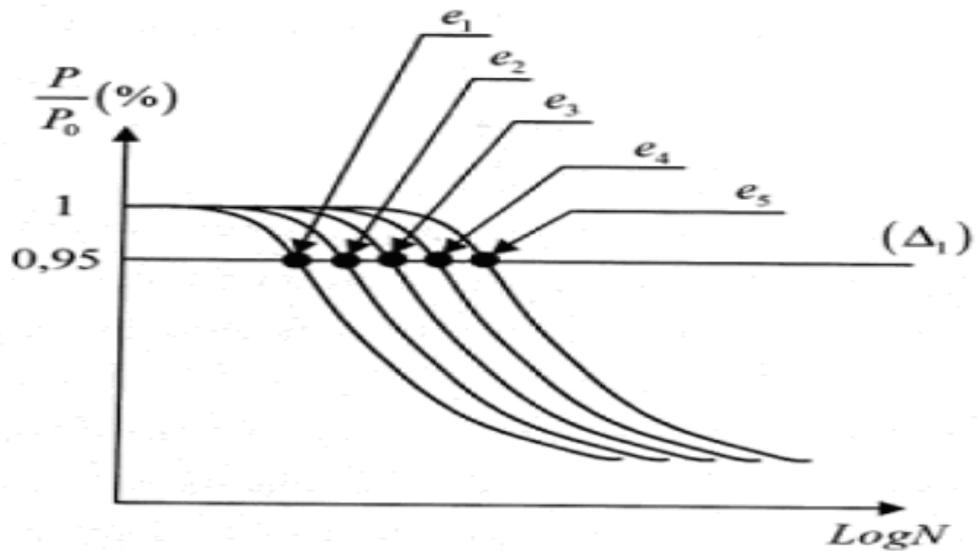


Figure IV.7 : Courbe d'endommagement.

Nous procéderons de la même manière afin d'obtenir les autres points (e_{m1} , e_{m2} , e_{m3} , ..., e_{m7} , e_{m8}) de la courbe de Wöhler, qui correspondent respectivement aux déplacements (Δl_1 , Δl_2 , Δl_3 , ..., Δl_7 , Δl_8) ainsi nous pourrons tracer la courbe de Wöhler qui correspond à une baisse de raideur de 5% (N_5) .

Nous pouvons également tracer des courbes correspondantes à différents critères de fin d'essai N_{10} , N_{20} .

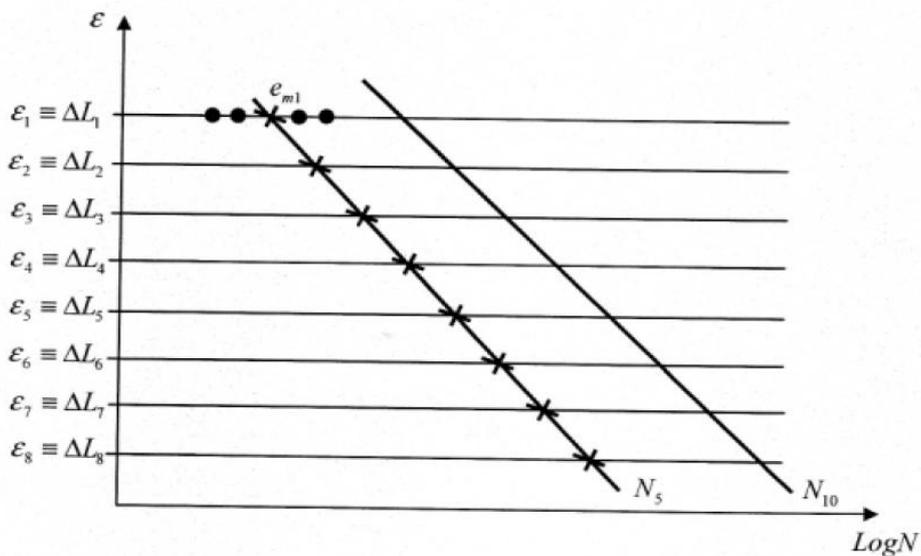


Figure IV.8 : Courbe de Wöhler avec différents critères de fin d'essai.

IV.1.6. Essai de fatigue en flexion

Au plan pratique, un certain nombre de pièces mécaniques fonctionnent en flexion cyclique. Au plan expérimental, il est toujours moins coûteux de faire un essai de fatigue en flexion qu'en traction. Autant de raisons qui justifient l'intérêt que l'on porte à la fatigue en flexion.

Pour ce qui est du mode opératoire, peuvent être pratiqués des essais de fatigue en :

- Les **essais de traction répétée ou ondulée** sont souvent utilisés pour les composites ou pour les thermoplastiques sur éprouvettes entaillées.
- Les essais de **flexion répétée ou ondulée trois ou quatre pannes** sont recommandés pour les matériaux ne présentant pas une forte propension au fluage.

Les éprouvettes sont rectangulaires et les montages de flexion analogues à ceux utilisés pour les essais statiques. Le schéma de principe d'une machine de flexion trois pannes à amplitude de flèche constante : la déformation est imposée par un excentrique réglable et une bielle est représenté sur la figure IV.9 [26].

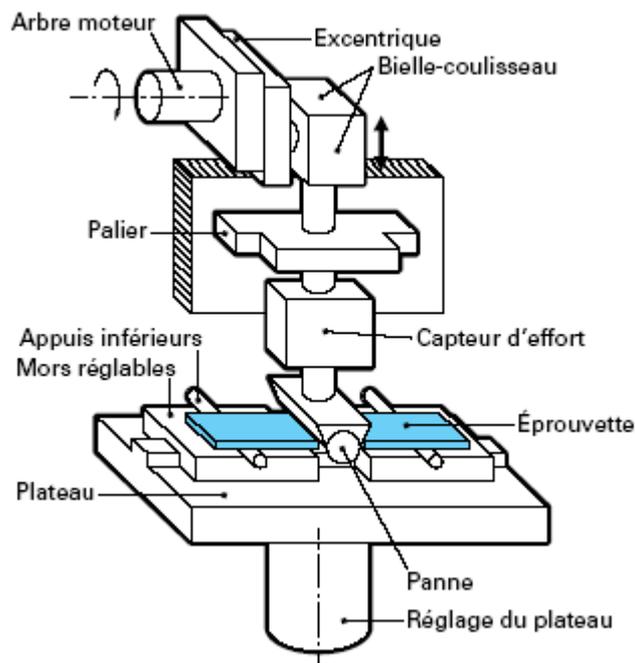


Figure IV.9 : Schéma de principe d'une machine de fatigue à flèche imposée en flexion ondulée trois points (d'après norme NF T 51-120-3)

L'appareillage est instrumenté d'un capteur d'effort à jauges de déformation et d'un capteur de déplacement inductif. La panne centrale de rayon 5mm ainsi que les appuis latéraux de rayon 2,5 mm. L'enregistrement de l'effort (P) en fonction du temps imposé permet une évaluation simple des principales caractéristiques mécaniques du matériau.

On peut envisager différents modes de contrôle de l'essai (flèche imposée). Ceux-ci conditionneront la durée de vie et les mécanismes d'endommagement mis en jeu lors de l'essai de fatigue, et surtout la propagation de l'endommagement dans le matériau.

- Les **essais de flexion alternée sur éprouvettes encastrées** concernent les plastiques renforcés ou non, à l'exception des unidirectionnels. Ils consistent à imposer une flexion à partir de la rotation de l'extrémité encastrée d'une éprouvette de type haltère tout en astreignant l'extrémité « libre » à se déplacer entre deux appuis fixes. La figure IV.10 présente le principe d'une machine d'essai à amplitude de force ou de déformation imposée. L'amplitude de l'angle de rotation de l'encastrement est fixée par la position de l'axe du moteur. Cet essai présente la particularité d'imposer à la fois le chargement et le déchargement.

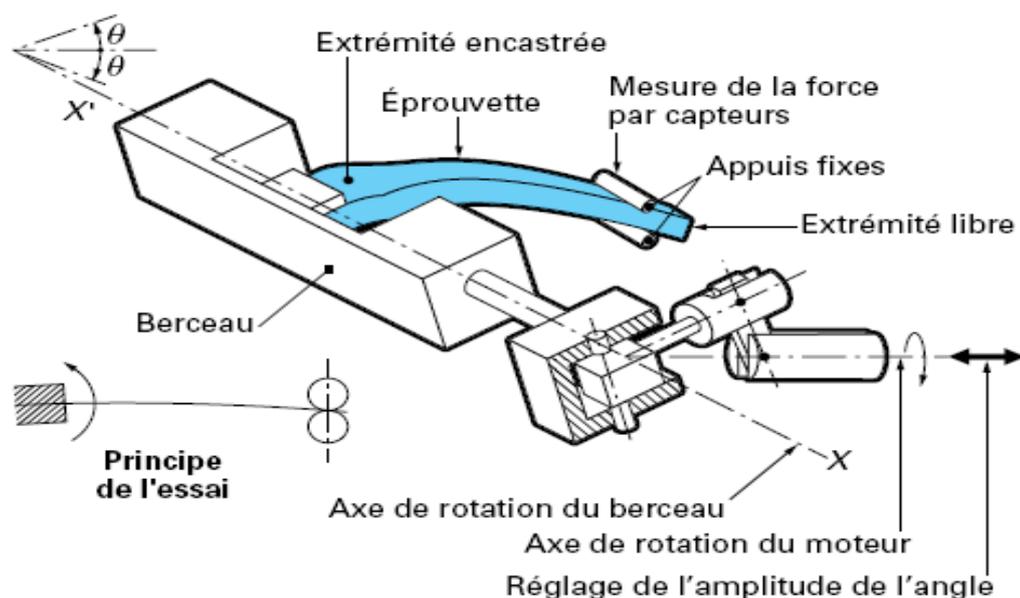


Figure IV.10 : Schéma de principe d'une machine de fatigue à rotation d'encastrement en flexion alternée.

IV.1.6.1. Fatigue en flexion

L'analyse du phénomène et des résultats est complexe parce que plusieurs types de dommage vont se développer en flexion trois points, les uns en traction, les autres en cisaillement, enfin en compression le cas échéant, toutes ces sollicitations étant présentes simultanément en flexion. Il résulte de cette remarque que la durée de vie d'un échantillon soumis à la flexion dépend de sa section et notamment de son épaisseur [38].

De Roo [38] montre que la limite d'endurance d'un composite verre-époxy unidirectionnel passe de 250 à moins de 200MPa, lorsque l'épaisseur du composite croit de 4 à 8 mm (figure IV.11). Le même auteur met en évidence une influence du type de sollicitation, en force ou en flèche imposé, sur la variation de la raideur en fonction du nombre de cycles, au-delà d'une perte de raideur de quelques pourcents. Autrement dit, dès l'apparition des premiers endommagements, le composite ne se comporte plus de la même façon en force ou en flèche imposée.

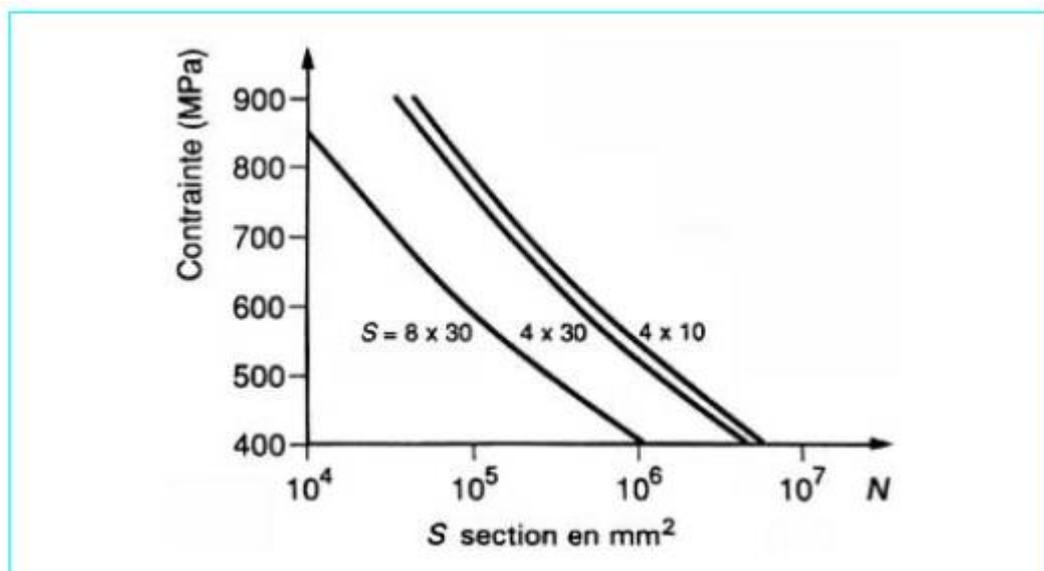


Figure IV.11 : Courbes d'endurance en flexion trois points après une chute de rigidité de 5 % pour un composite à fibres de verre unidirectionnel et pour trois sections.

Il faut compter de plus sur une influence notable de la distance entre points d'appui qui modifie la répartition des contraintes de tension et de cisaillement à

l'intérieur du matériau et conduit à des délaminages différents. L'essai de fatigue en flexion mérite donc une attention particulière sur la normalisation.

En flexion, la matrice a un rôle non négligeable à jouer, en particulier sur le déclenchement du délaminage. Une étude de Croman dans un composite renforcé par des fibres de carbone montre que la résine époxy est meilleure que la résine thermoplastique, en flèche imposée. L'auteur explique ce résultat par le fait que la résine thermoplastique résiste au délaminage et pas à la compression.

L'aspect physique du dommage reflète les modifications subies par la matière sous l'action des sollicitations entraînant des variations des propriétés physiques du matériau pendant la fatigue.

Les essais classiques de fatigue (courbes de Wöhler donnant la contrainte en fonction du nombre de cycles à rupture N_r) donnent une information globale sur l'endurance d'un matériau (amorçage + propagation + rupture). Ils permettent de porter des jugements qualitatifs quant au choix des matériaux, mais s'avèrent parfois d'un usage difficile pour leur application quantitative à une structure.

Lors de leur vie en service, les pièces peuvent être soumises à diverses sollicitations mécaniques dont les effets peuvent être aggravés par le facteur temps ou par un environnement plus ou moins agressif.

Il est donc important d'avoir une idée sur la manière dont les composites se comportent vis à vis des contraintes mécaniques et du vieillissement.

IV.2. Endommagement des composites

De manière générale, l'endommagement est défini comme un ensemble de changements microstructuraux au sein du matériau qui occasionnent une détérioration irréversible plus ou moins importante. Par exemple, quand une structure stratifiée est sollicitée, la dégradation de ses propriétés est effective bien avant sa rupture finale. En outre pour les matériaux composites, notamment ceux à forte anisotropie, sa géométrie dépend, non pas du mode de chargement comme pour les matériaux métalliques, mais de l'arrangement géométrique des constituants du composite. Notons également que

l'endommagement présente un caractère unilatéral, les microfissures pouvant se refermer sous l'action du chargement [34].

Il existe plusieurs types d'endommagement au sein d'une structure stratifiée de plis unidirectionnels ou tissés qui se révèlent à différentes échelles d'observation (figure IV.12). Les plus significatifs sont les suivants :

- A l'échelle **microscopique** apparaissent les ruptures d'adhérence entre les fibres et la matrice : c'est le phénomène de décohésion fibre/matrice ;
- A l'échelle **mésoscopique**, on observe l'apparition de nombreuses fissures intralaminaires mais également la rupture de fibres qui intervient au stade ultime de la ruine du matériau ;
- A l'échelle **macroscopique**, on observe le phénomène de décollement interpli : c'est le délaminage.

Pour les matrices renforcées de fibres de verre coupées, les phénomènes d'endommagement observés sont la décohésion fibre/matrice mais aussi la fissuration matricielle.

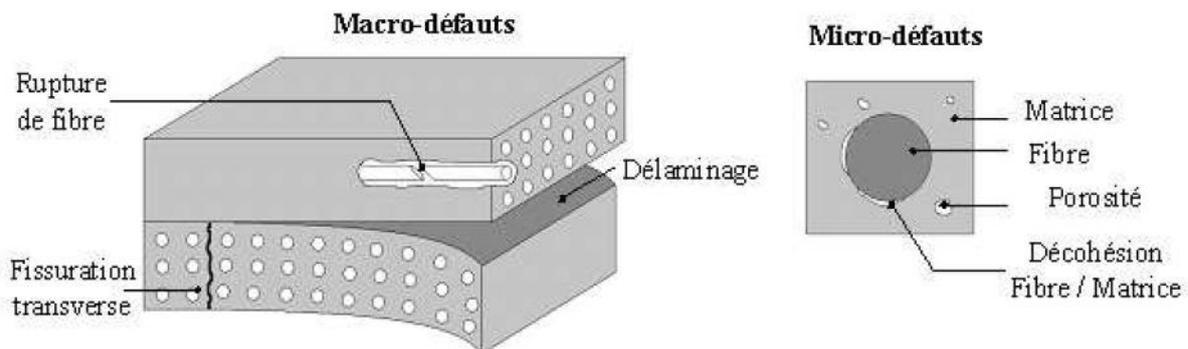


Figure IV.12 : Les différents types d'endommagement et échelles d'observation.

Illustration sur un matériau stratifié.

En fonction de l'arrangement géométrique de ses constituants, le matériau composite va présenter un comportement plus ou moins anisotrope. De plus, l'orientation et la proportion des renforts peut favoriser l'apparition de certains endommagements par rapport à d'autres, peut empêcher ou non le caractère élasto-viscoplastique de la matrice de se développer. Pour les matrices renforcées de fibres

de verre continues, les différents phénomènes d'endommagement peuvent être observés.

Les mécanismes d'endommagement d'un matériau hétérogène, notamment les composites à base de polymère soumis à une sollicitation mécanique, peuvent se regrouper en trois principaux modes différents selon le site où ils opèrent :

- rupture des fibres;
- fissuration matricielle ;
- rupture de l'interface fibre-matrice et déchaussement de fibre.

Ajouter à ceux là un mécanisme de rupture entre-couches, appelé rupture par délaminage, dans le cas des stratifiés.

Ces divers mécanismes coexistent et se développent suivant la nature des matériaux et les conditions de sollicitations mécaniques imposées.

IV.2.1. Rupture de fibre

La rupture de fibre (figure IV.13) intervient lorsque la contrainte de traction σ_f dans une fibre atteint la contrainte à la rupture σ_{fr} de fibre. Elle produit une concentration de contrainte au voisinage de la rupture, il s'ensuit une redistribution de ces contraintes. Le processus de rupture dépend principalement de la contrainte à la rupture des fibres, de la capacité de la matrice à absorber l'énergie libérée et les propriétés de l'interface fibre- matrice [3].

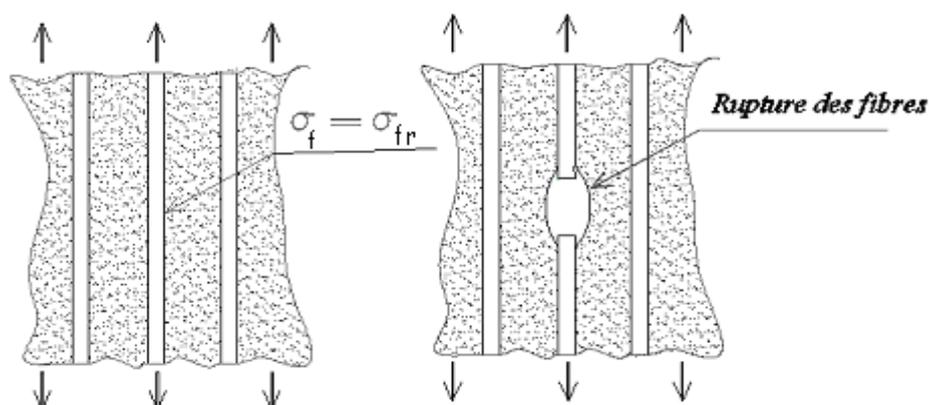


Figure IV.13 : Rupture de fibre.

IV.2.2. Fissuration matricielle

La complexité des matériaux composites introduit plusieurs types d'endommagements à l'échelle microscopique. Les microfissures se produisant au sein de la matrice apparaissent aux niveaux des porosités et des inclusions soit par fissuration transverse (figure IV.14a) lorsque la contrainte en traction σ_m dans la matrice atteint la contrainte à la rupture $\sigma_{m,r}$ de la matrice, soit par fissuration longitudinale (figure IV.14b) lorsque la contrainte en cisaillement à la rupture τ_m dans la matrice atteint la contrainte en cisaillement à la rupture $\tau_{m,r}$, généralement au voisinage d'une fibre. Ce dernier mode de rupture se produit lorsque la contrainte de décohésion est supérieure à celle de cisaillement. Cette fissuration se propage selon la direction perpendiculaire à la sollicitation et elle peut provoquer une décohésion fibre-matrice.

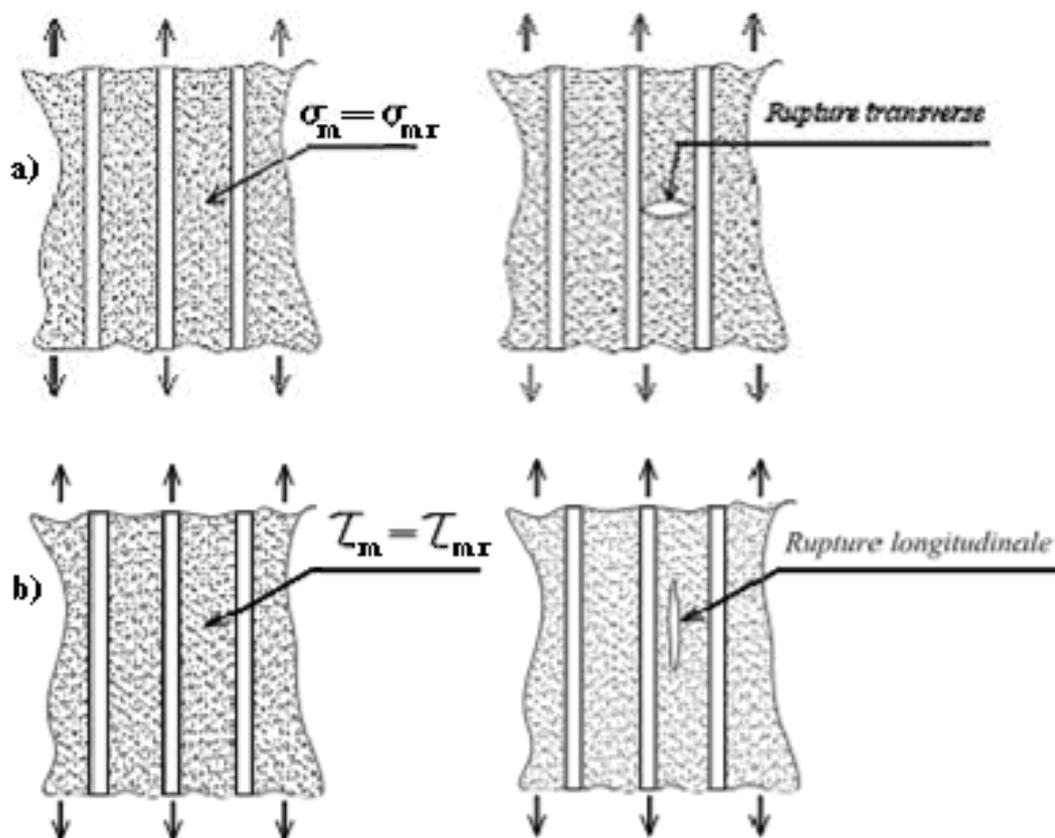


Figure IV.14 : Rupture de la matrice.

Pour des déformations assez faibles, les fissures n'apparaissent que dans la matrice, l'application des charges cyclique fait augmenter leur nombre de fissures. On parle de fissuration dispersée (figure IV.15). Par contre, pour des contraintes élevées, les fibres se cassent au bout de la longueur et permettent la propagation de fissures. C'est le mode de rupture localisé [3].

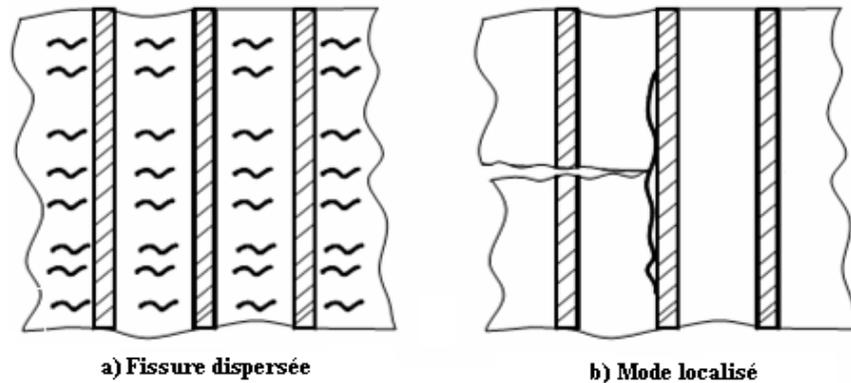


Figure IV.15 : Modes de fissuration de la matrice.

IV.2.3. Décohésion fibre-matrice

Dans un polymère renforcé par les fibres unidirectionnelles, la décohésion de l'interface intervient lorsque la contrainte de cisaillement τ dans la matrice atteint la contrainte de décohésion τ_d , et cela arrive quand cette dernière est inférieure à la contrainte en cisaillement à la rupture de la matrice (figure IV.16) [3].

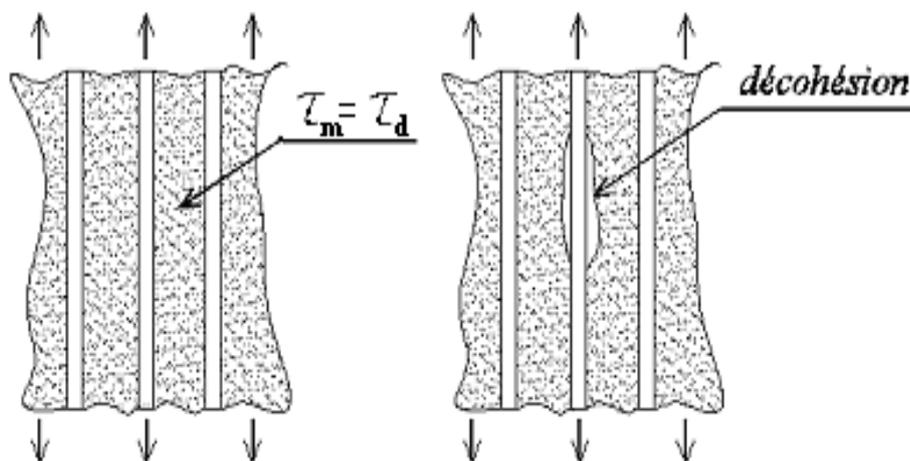


Figure IV.16: Décohésion fibre-matrice.

C'est dans la zone de l'interface où s'effectue le transfert de charge de la matrice vers le renfort ou vice versa. Après initiation, la propagation de la rupture change suivant la nature de l'adhésion fibre-matrice. Dans le cas d'un composite à fibres unidirectionnelles sollicité parallèlement aux fibres, on peut distinguer les cas suivants :

a. Cas d'une interface très forte adhérence

si l'adhérence entre fibre et matrice est très forte, on aura une propagation de la fissure initiée soit par rupture de fibre, soit par rupture de la matrice comme elle n'avait rencontré aucun obstacle, induit en front de fissure des concentrations de contraintes conduisant à une propagation de la rupture successivement dans les fibres et dans la matrice (figure IV.17a). La rupture observée sera de type fragile (figure IV.17b) : l'interface a résisté mais la fissure s'est agrandie et a toutes chances de se propager de façon critique; Il est également possible d'observer un pontage, par rupture longitudinale de la matrice ou par décohésion fibre- matrice, de deux fissures initiées dans des zones différentes (figure IV.17c et d).

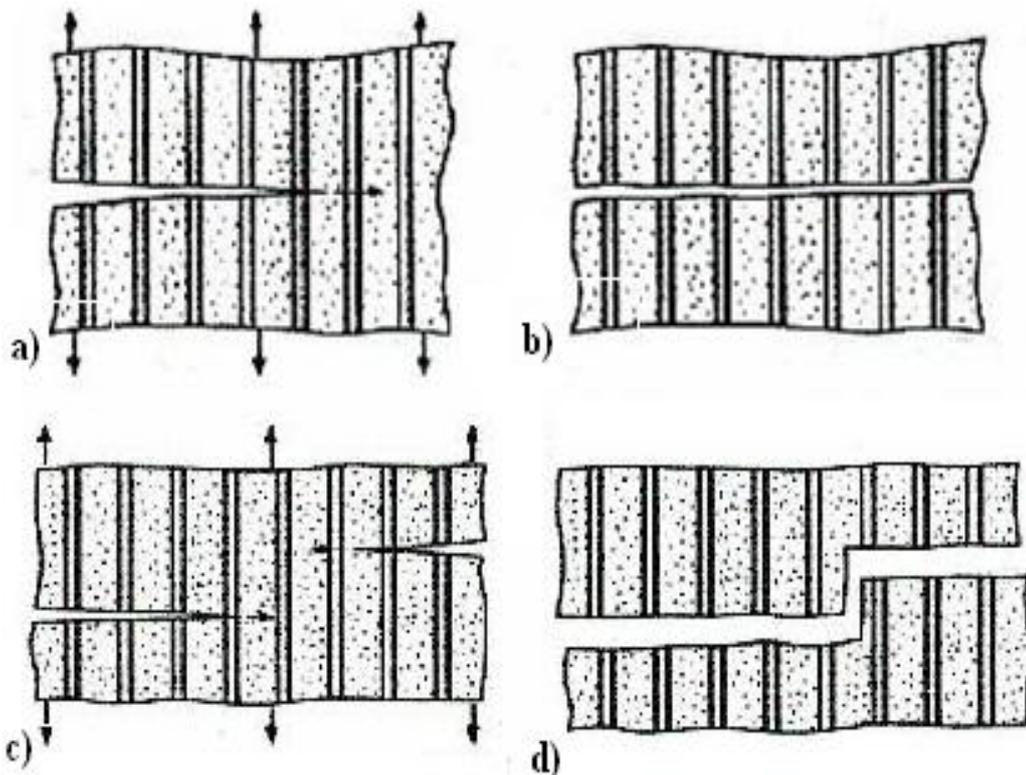


Figure IV.17 : Propagation de la rupture dans le cas d'une forte adhérence fibre-matrice.

b. Cas d'une interface faible

La rupture de la fibre provoque une fissuration interfaciale qui permettra de dissiper l'énergie libérée par la rupture de la fibre et à répartir les contraintes sur une zone suffisamment grande pour que le processus de fissuration soit localement stoppé.

Dans le cas d'une faible adhérence (la fissuration transverse), la rupture de la matrice traverse les fibres, sans qu'il y ait rupture des fibres (figure IV. 18). Dans le cas de concentration de contrainte en tête de fissure, il y a décohésion d'interface fibre-matrice avant rupture transverse de la matrice. L'ouverture de la fissure induit des contraintes élevées dans les fibres pontant la fissure. Ces contraintes provoquent la rupture des fibres à une distance plus ou moins proche de la surface de rupture. La fissure continuant de progresser, les fibres rompues sont extraites de la fissure au fur et à mesure de la propagation de la fissure.

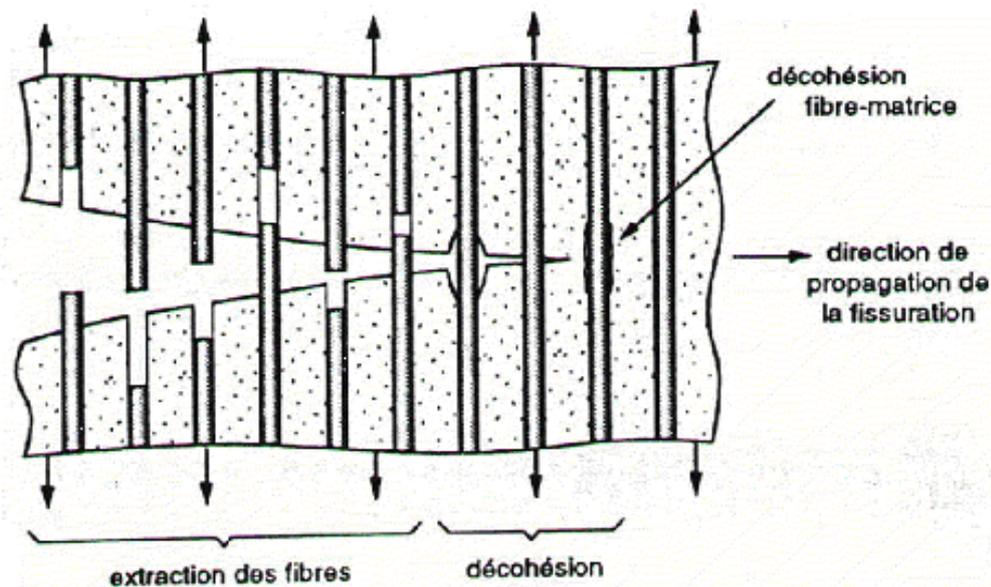


Figure IV. 18 : Propagation de la fissure dans le cas d'une faible adhérence fibre matrice

Dans le cas d'une fissuration de la matrice perpendiculairement aux fibres figure VI.19 Dans le cas de l'interface «forte», figure (a), les sur contraintes présentes en front de fissure vont entièrement servir à rompre la fibre et il y aura propagation de la fissure. Si l'interface est moins résistante, figure (b), elle cédera avant la fibre, provoquant ainsi une déviation de la fissure initiale et sa propagation est retardée. La fibre peut être momentanément épargnée.

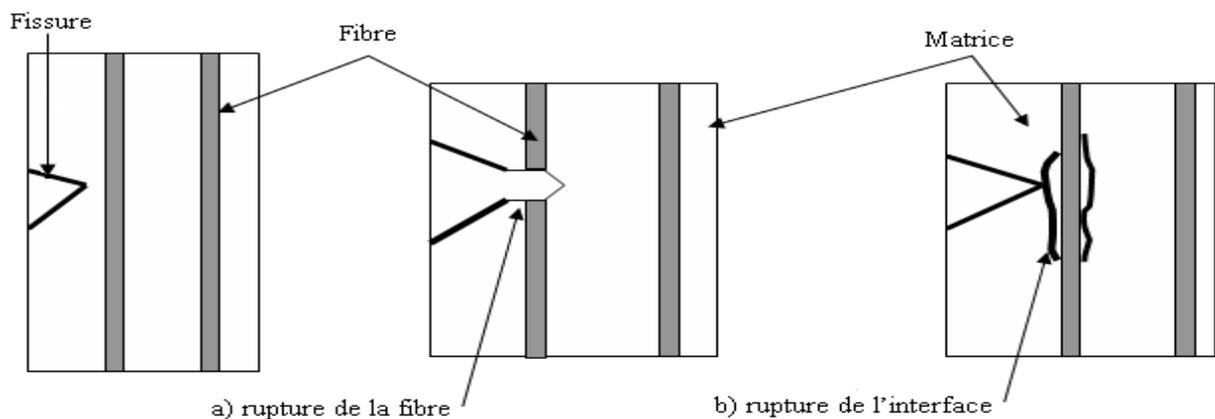


Figure IV. 19 : Propagation d'une fissure matricielle perpendiculairement aux fibres;

a) interface «forte » : rupture de la fibre et propagation de la fissure ;

b) interface « faible » : décohésion interfaciale et arrêt momentané de la fissuration.

c. Cas d'une interface très faible

Le composite se comporte comme une mèche sèche de la fibre. La fissuration matricielle est déviée à l'interface, la décohésion fibre-matrice s'étend sur une très grande distance telle que la fibre rompue ne participe plus à la résistance du matériau, mais n'entraîne pas de concentration de contrainte. Ce cas est moins favorable que le précédent car la surcharge subie par le reste du composite est plus importante (mais moins localisée).

d. Cas d'une interface ayant des propriétés intermédiaires

La fissure au contact d'une fibre se dévie dans un plan perpendiculaire en provoquant un décollement de la matrice au niveau de l'interface.

La figure IV.20 présente le rôle de l'interface dans le comportement mécanique des composites à fibres.

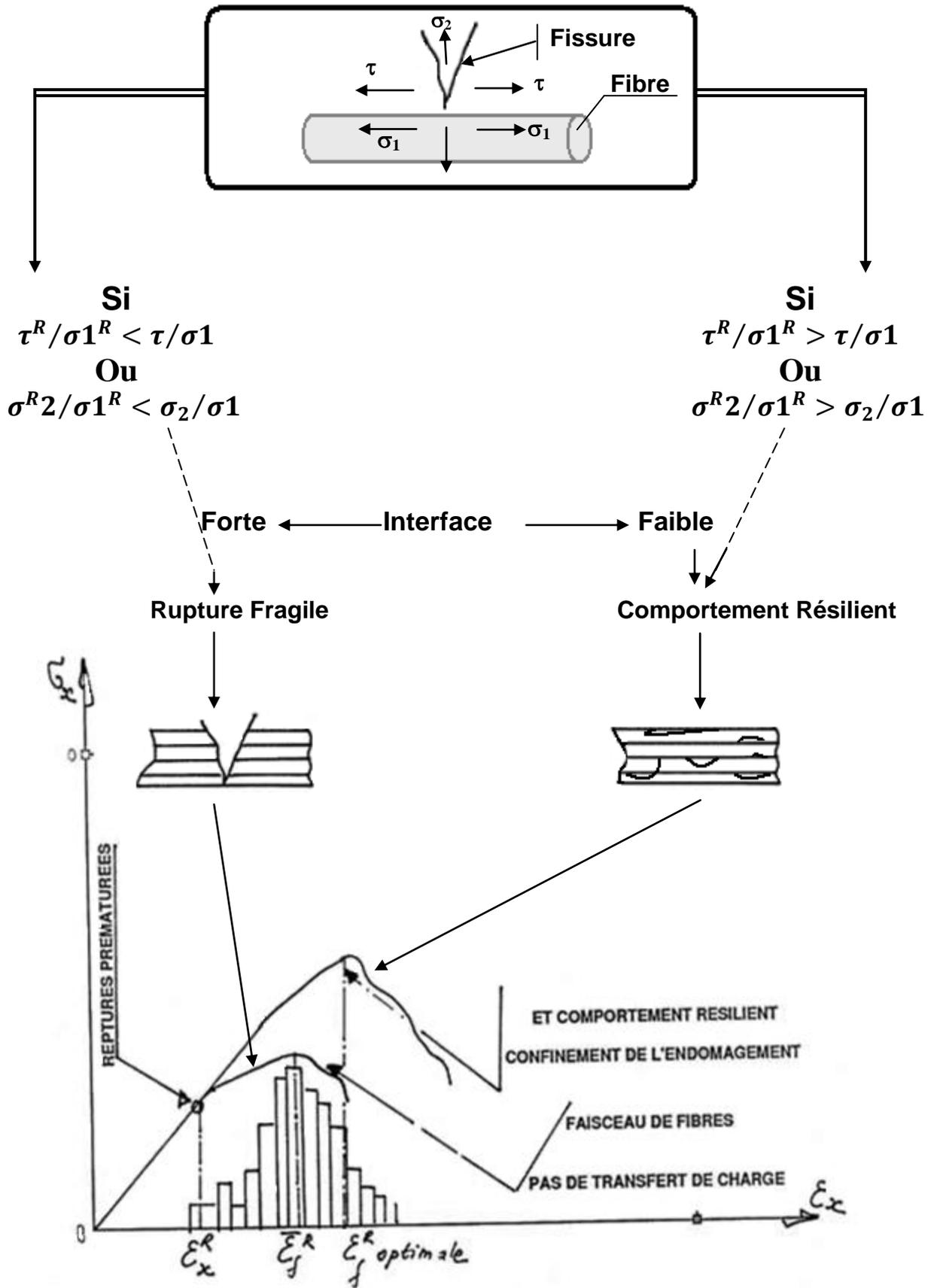


Figure IV.20 : Rôle de l'interface dans le comportement mécanique des composites à fibres.

L'interface fibre-matrice peut être considérée comme une phase car sa microstructure est différente de celle des fibres et de la matrice. Elle est appelée zone de transition interfaciale, sa morphologie dépend du type, de la géométrie et du traitement de surface des fibres et de la composition de la matrice.

D'un point de vue mécanique l'interface peut être considérée comme un point faible du matériau composite. Le transfert d'efforts entre la matrice et les fibres est assuré par l'interface, ce qui lui confère un rôle important dans le comportement mécanique du composite.

IV.2.4.Délaminage

Dans le cas de stratifiés, aux mécanismes décrits précédemment, s'ajoute un autre mécanisme d'endommagement entre couche appelé délaminage. Le processus de délaminage est le résultat d'une chronologie de divers types d'endommagement. Les propriétés mécaniques de la matrice et de la fibre ainsi que les propriétés adhésives et cohésives de l'interface gèrent cette chronologie en révélant des types d'endommagement fréquemment rencontrés comme la micro fissuration de la matrice, la rupture des fibres et la rupture des interfaces. Le délaminage progresse essentiellement par fissuration interlaminaire considéré comme le premier responsable du dédoublement de son épaisseur. A cela on associe un réseau très important de fissures intralaminaires qui sont eux aussi induites par les fissures interlaminaires par différents moyens (rupture de matrice, de fibre et d'interface) allant jusqu'au décollement total des deux plis. Ce type d'endommagement contribue largement à la dégradation des propriétés mécaniques de la structure.

IV.2.5. Composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale

Dans le cas, l'initiation de la rupture se produit soit par la rupture des fibres et cela quand la déformation à la rupture des fibres est plus faible de celle de la matrice ($\varepsilon_{fr} < \varepsilon_{mr}$), soit par la rupture transverse dans le cas contraire.

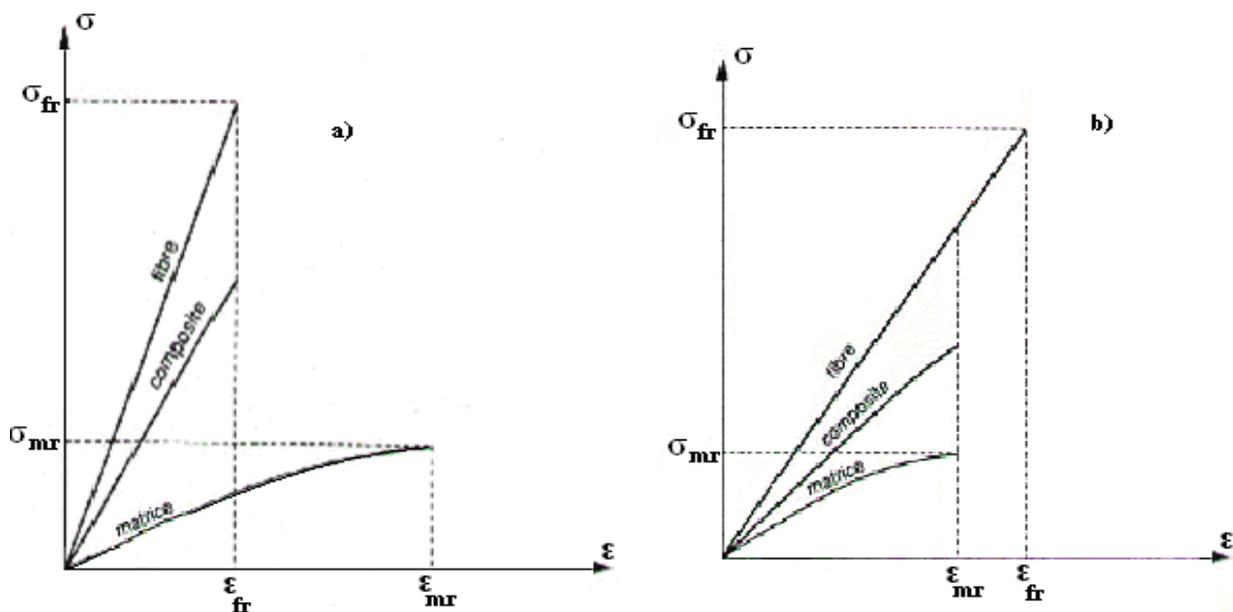
➤ Dans le cas où ($\varepsilon_{fr} < \varepsilon_{mr}$) : les courbes contrainte-déformation sont schématisées sur la figure IV.21a. La contrainte de la rupture est donnée par :

$$\sigma_{cr} = v_f \sigma_{fr} + \sigma_m^* v_m \quad (IV.4)$$

Avec : σ_{cr} : contrainte à la rupture du composite ;

σ_{fr} : contrainte à la rupture des fibres ;

σ_m^* : contrainte dans la matrice pur une déformation égale à la déformation ε_{fr} à la rupture dans la fibre.



➤ Dans le cas ($\epsilon_{fr} > \epsilon_{mr}$) : L'initiation de la rupture se produit par rupture transverse de la matrice (Figure IV.21b). La contrainte de la rupture est donnée par :

$$\sigma_{cr} = \sigma_f^* v_f + \sigma_{mr} v_m \quad (IV.5)$$

Avec : σ_f^* est la contrainte dans la fibre pour une déformation égale à la déformation ϵ_{mr} à la rupture de la matrice.

IV.2.6. Composite unidirectionnel soumis à une traction transversale

Dans ce cas, la rupture se produit soit par la rupture de la matrice, soit par la décohésion de l'interface fibre-matrice. La rupture de la matrice se produit lorsque la contrainte en traction σ_m de la matrice atteint la contrainte à la rupture σ_{mr} de la matrice.

Ce processus intervient lorsque la contrainte à la rupture de la matrice est inférieure à la contrainte de décohésion σ_d en traction de l'interface fibre matrice. Dans le cas contraire ($\sigma_{mu} > \sigma_d$), la rupture du composite se traduit par la rupture de l'interface fibre-matrice (figure IV.22).

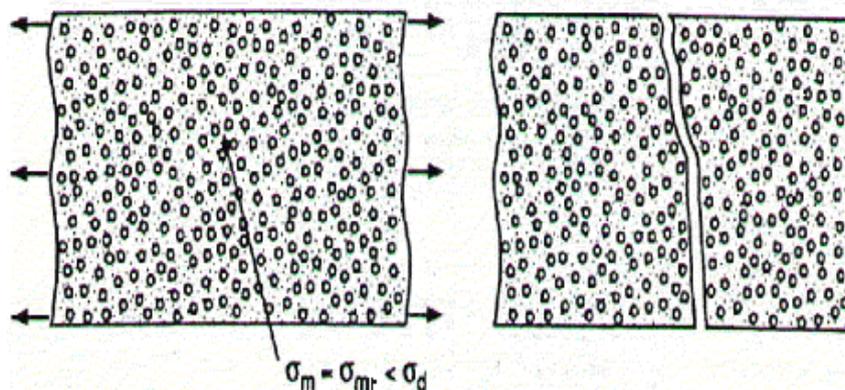


Figure IV.22: Rupture d'un composite dans le cas $\sigma_m = \sigma_{mr} < \sigma_d$.

IV.2.7. Résistance au cisaillement

La rupture a lieu uniquement dans la matrice sans nécessité la rupture de la fibre, dans ce cas la résistance en cisaillement du composite est proche de la résistance en cisaillement dans la matrice.

Cette rupture en cisaillement est observée généralement lors de l'essai de flexion trois points, où le cisaillement dû à l'effort tranchant, atteint la limite de rupture avant la contrainte de traction sur la face tendue [34].

IV.2.8 Résistance à la compression longitudinale

Dans un écheveau de fibres soumis à compression vont présenter immédiatement un flambage. Dans un composite, la matrice joue un rôle important de support latéral qui peut conduire à une résistance en compression (R_{com}) (figure IV.23) [34].

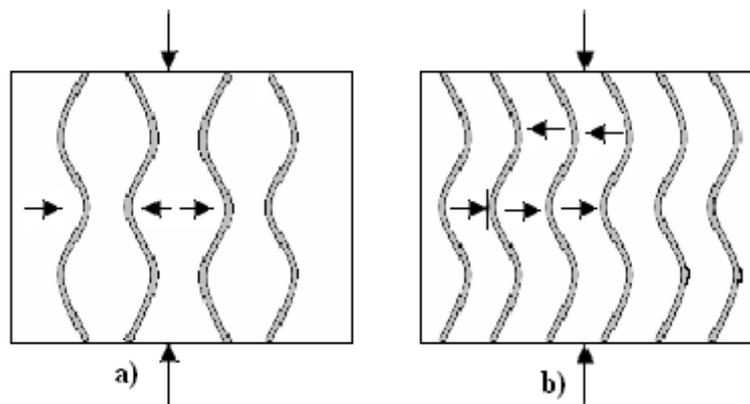


Figure IV.23 : Rupture d'un composite soumis à une compression longitudinale.

a. Mode flambage en extension (figure IV.23a)

Les fibres présentent un flambage en opposition de phase, la matrice subissant des tractions, compression transversales. La résistance en compression est donnée par :

$$R_{com} = 2v_f \left[\frac{v_f E_m E_f}{3(1 - \nu_f)} \right]^{1/2} \quad (IV.6)$$

Avec ν_f : coefficient du poisson des fibres.

b. Mode en flambage en cisaillement (figure VI.23b)

Les fibres présentent un flambage en phase, et la matrice subissant un effort de cisaillement et la résistance s'écrit :

$$R_{com} = \frac{G_m}{1 - \nu_f} \quad (IV.7)$$

IV.2.9. Résistance à la compression transversale

Dans ce cas la rupture se produit par cisaillement de la matrice, dans un plan 45° de l'effort de compression et contenant la direction des fibres.

Une solution est tenue en compte on appliquant un effort multidirectionnel entraînant un accroissement important de la résistance en compression transversale.

Conclusion

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 de sécurité.

Le comportement mécanique des matériaux composites est complexe. Une étude complète du comportement d'un composite doit tenir compte de :

- l'interface fibre matrice : l'interface joue un rôle très important dans le comportement mécanique d'un composite, en ce sens que c'est elle qui transmet la charge de la matrice aux renforts. Il est donc nécessaire de bien connaître et de bien modéliser les phénomènes s'y déroulant. Elle doit être considérée comme une phase à part entière ayant ses propres caractéristiques mécaniques ;
- l'orientation des fibres dans le composite : Pratiquement l'orientation des fibres doit être considérée comme aléatoire ;
- initiation de la fissuration de la matrice : le comportement des composites est différent selon que la fissuration de la matrice survient avant ou après le décollement interfacial.

Chapitre

V

Partie

Expérimentale

Introduction

Cette partie concerne l'étude expérimentale du comportement de matériau composite constitué d'une résine en polypropylène et d'un renfort en fibres de verre sous sollicitations statique (flexion trois points) et cyclique.

En premier lieu, nous présentons le matériau de l'étude ainsi que l'analyse physico-chimique afin de déterminer la cinétique d'absorption. Nous allons ensuite exposer les différentes techniques expérimentales auxquelles nous avons eu recours pour mener à bien notre étude. Pour chacune de ces techniques, nous rappelons le principe et détaillons les conditions d'essais choisies.

Enfin, nous avons regroupé les résultats des expériences qui ont permis de déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau avant et après vieillissement tout au long des essais statique et de fatigue. Ces derniers sont accompagnés également d'observations macroscopiques des facies de rupture et microscopiques afin d'identifier les mécanismes d'endommagement du matériau.

V.1. Présentation du matériau

Nous avons étudié un composite constitué d'une matrice thermoplastique (PP), renforcée par des fibres de verre E discontinues chargées de talc.

Ils ont été mis en œuvre par injection moulage sous forme de plaques (figure V.1) de dimensions 600x200x4 mm³. Le point d'injection se trouvant au centre du moule.

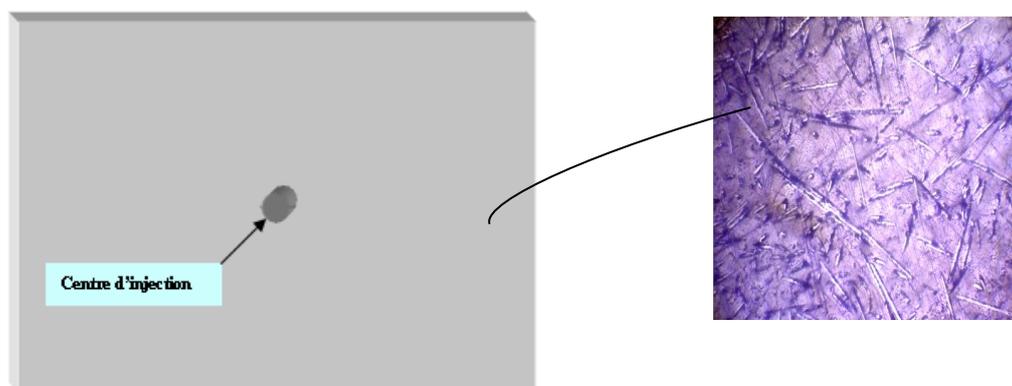


Figure V.1 : Plaque de matériau composite en fibres discontinues.

Les propriétés du polypropylène sont résumées au tableau V.1.

Masse volumique (g.cm-3)	0,90 – 0,91
Température de transition vitreuse (°C)	-20
Température de fusion (°C)	165
Contrainte mécanique à la rupture (MPa)	31 - 42
Allongement à la rupture (%)	100 - 600
Module d'Young (GPa)	1,15 – 1,57

Tableau V.1 : Propriétés du polypropylène [18] .

L'utilisation des fibres courtes dans une matrice organique constitue un composite de caractéristiques thermomécaniques très améliorées par rapport aux résines seules. Ces fibres jouent un rôle de renfort de la résine afin d'augmenter la rigidité.

Les fibres de verre considérées ici sont de type E. Ces fibres sont les plus répandues pour les composites de grande diffusion. Leurs propriétés sont résumées dans le tableau V.2.

Masse volumique (g.cm-3)	2,54
Température de ramollissement (°C)	846
Contrainte à la rupture (MPa) à 23°C	3446
Allongement à la rupture (%) à 23°C	4,8
Module d'Young (GPa) à 23°C	72,3

Tableau V.2 : Propriétés des fibres de verre [18].

V.1.1. Longueur des fibres

Les caractéristiques mécaniques des composites renforcés dépendent de la longueur des fibres. Une fibre rompue participe à la résistance et la rigidité du composite si elle a une longueur minimale l_c . (Voir annexe 1)

Nous avons procédé à la mesure de la longueur des fibres à l'aide des micrographies (figure V.2) prises après calcination moyennant d'un microscope optique de marque Hund, couplé à un système d'analyse d'images (PicedCora) qui permet une automatisation complète de la mesure.

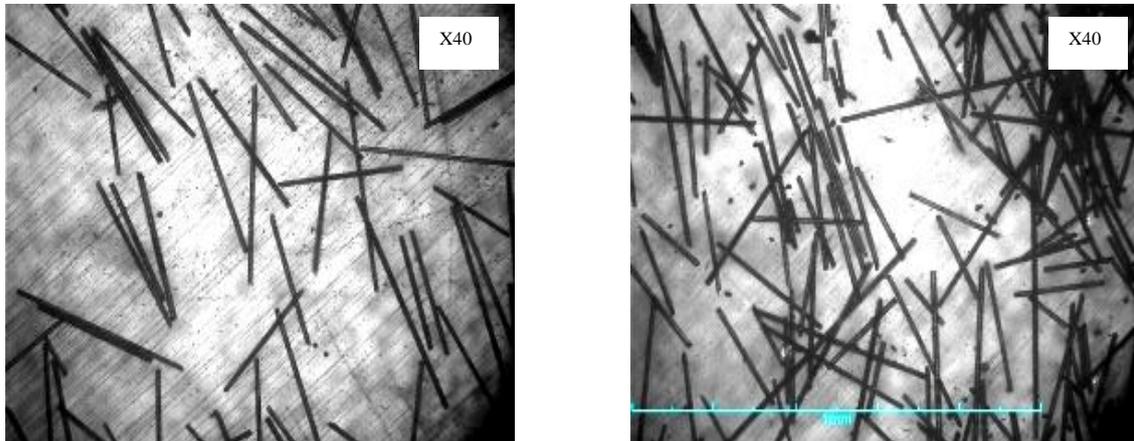


Figure V.2 : Micrographies des longueurs de fibres

Les fibres sont déposées manuellement sur des supports. La mesure est reproduite sur plusieurs fibres. La gamme de mesure est comprise entre 0,1 et 0,98mm.

Cette technique consiste :

- a prendre des photos des échantillons et de la réglette (figure V.3) avec le même grossissement ;
- pour calibrer la mesure, il faut tracer une droite sur la réglette qui correspond à 1mm. Automatiquement lorsqu'on trace une droite sur la fibre, il affiche la valeur de la longueur de la fibre.

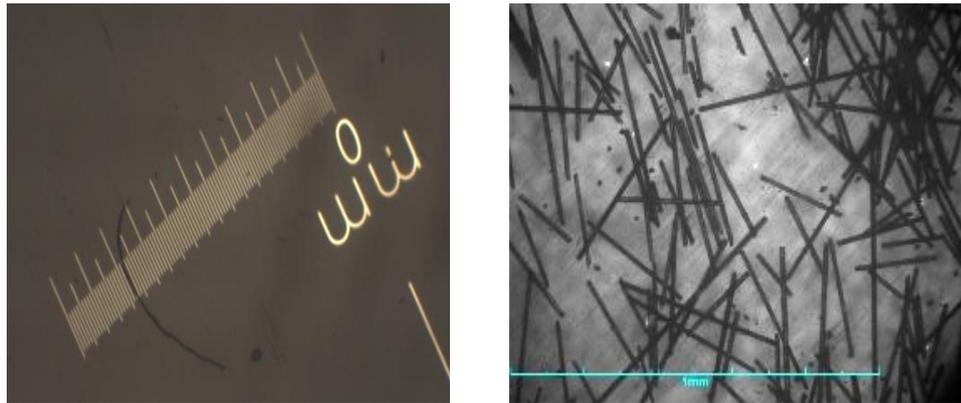


Figure V.3 : La règle de mesure

Les résultats de mesure obtenus sont donnés dans le tableau V.3 dont la longueur de fibres moyen est de 0,38 mm.

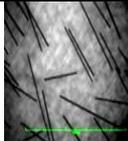
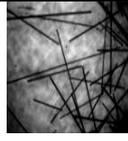
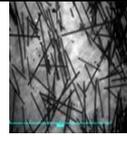
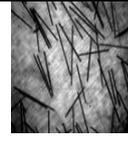
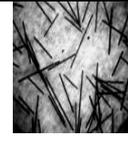
		Photos							
									
		N°1	N°2	N°3	N°4	N°5	N°6	N°7	N°8
Moyenne [mm]		0,437 (0,12)	0,38 (0,05)	0,51 (0,11)	0,486 (0,11)	0,236 (0,09)	0,32 (0,13)	0,34 (0,07)	0,295 (0,08)
	Moyenne [mm]									0,38 (0,09)

Tableau V.3 : Détermination de la longueur moyenne des fibres.

V.1.2. Répartition des fibres

Pour mieux observer la répartition des fibres nous avons scindé la procédure de travail en trois phases :

- la première consiste à enrober les échantillons ;

- la phase de polissage constitue la deuxième étape de la préparation. Elle est primordiale car elle détermine la qualité du contraste entre les fibres et la matrice ;
- la troisième étape est réservée uniquement à l'observation des micrographies (figure V.4) prises au microscope optique avec un grossissement de 40 muni d'une camera.

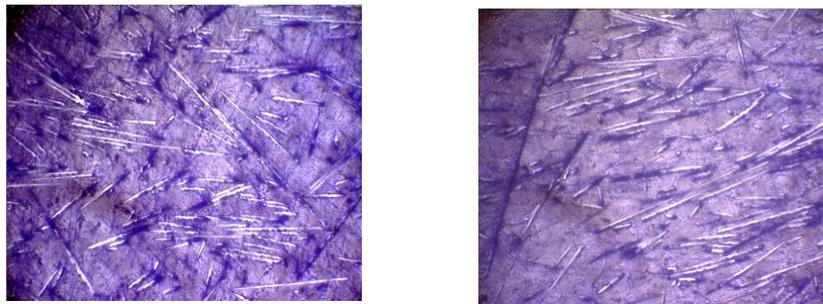


Figure V.4 : Observation de la disposition des fibres (X40).

Les micrographies de la figure V.4 font apparaître que les fibres sont réparties de manière aléatoire dans le plan.

La valeur moyenne de diamètre des fibres est de 0,02 mm (0,018). Elle est mesurée à l'aide des micrographies réalisées suivant l'épaisseur des échantillons avec un grossissement de 100 (figure V.5).

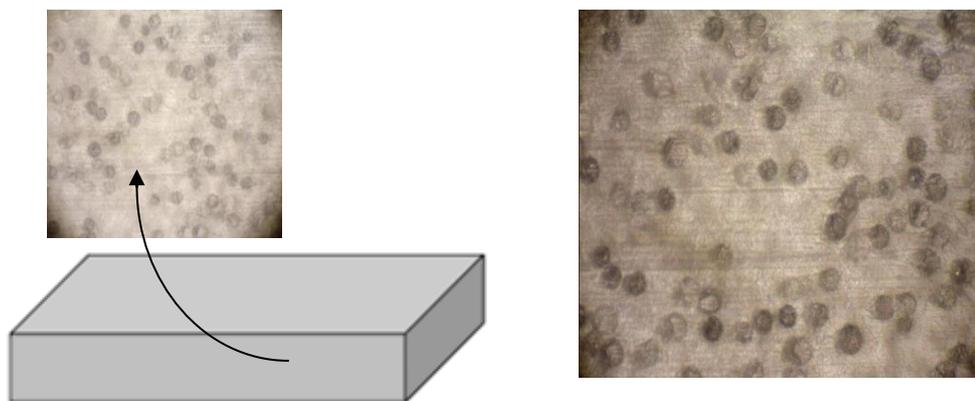


Figure V.5 : Mesure du diamètre des fibres (X100).

Les principaux résultats des fibres obtenus pour ce matériau sont résumés au tableau V.4.

Taux de fibre en masse [%]	40
Longueur (l) de fibres [mm]	0,38
Diamètre (d) de fibres [mm]	0,02
Elancement L/d	19

Tableau V.4 : Composite à fibres de verre

V.2. Géométrie des éprouvettes

Les dimensions des éprouvettes ont été choisies selon la norme NFT 51-120. (figure V.6).

$$l = 100 \text{ mm} \pm 1 ; b \text{ est fonction de } h ; 10 < b \leq 15 \text{ mm} \quad h \leq 5 \text{ mm}$$

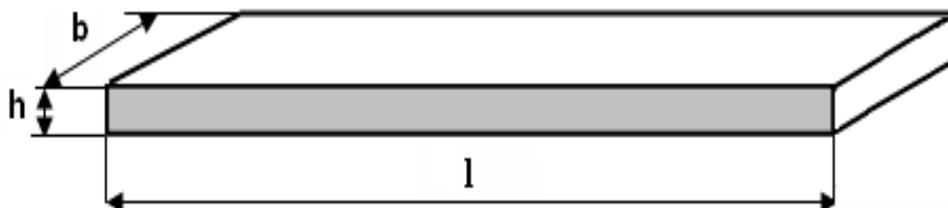


Figure V.6 : Géométrie de l'éprouvette.

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

$$h_m = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n h_i \quad b_m = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n b_i$$

V.2.1. Prélèvement des éprouvettes

Le découpage est assuré à l'aide d'une tronçonneuse d'établi réglable équipée d'un disque diamanté avec lubrification abondante (selon les dimensions largeur et longueur prédéfinies).

Les éprouvettes sont découpées dans deux directions (figure V.7) :

- direction longitudinale (**L**) parallèle à l'axe X;
- direction transversale (**T**) orthogonale à longitudinale.

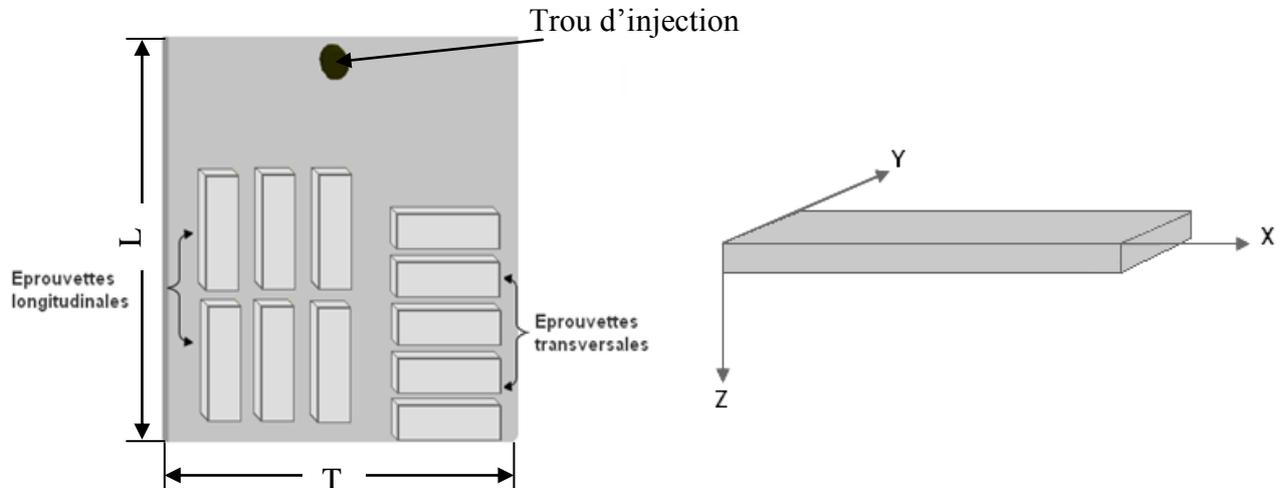


Figure V.7 : Sens de découpage des éprouvettes.

Un minimum de cinq éprouvettes est testé en statique monotone et en fatigue. Pour les éprouvettes longitudinales nous avons effectué des tests d'absorption. Sur ces dernières, des essais de caractérisation statique et de fatigue sont conduits sur des échantillons saturés dans le but de déterminer l'influence du vieillissement.

V.3. Essais physico-chimiques

L'objectif principal consiste à suivre les évolutions physico-chimiques et leurs influences sur les propriétés mécaniques d'usage du matériau.

V.3.1. Essai de perte au feu

L'essai de la perte au feu, appelé aussi méthode de calcination, est une technique utilisée pour déterminer les teneurs massiques des constituants (résine, renforts...) de notre matériau.

Appareillage :

- Balance (précision 10^{-4} g) ;
- Four spécifique équipé d'un thermostat et d'une fente permettant l'évacuation des gaz de combustion tout en empêchant l'entrée de l'air ;
- Creusets en céramique ;
- Les pesées sont réalisées à une même température

Méthode de l'essai

Les échantillons sont pesés à sec et placés dans des creusets préalablement pesés, le tout est placé dans un four dans lequel la température peut atteindre 1100°C . L'essai est réalisé à une température de 625°C , pour laquelle la résine est entièrement calcinée (environ 70 mn). Les creusets et les fibres sont repesés à température ambiante.

Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau V.5 dont le taux de fibres moyen est de 39,6%.

	poids creuset vide(g) (A)	poids creuset+échantillon(g) (B)	B - A	poids final(g) (C)	C - A	%
N°1	12,8170 (6E-4)	16,364 (4E-5)	3,547	14,2147 (1E-4)	1,3977	39,4051
N°2	13,230 (1E-4)	16,4105 (1E-4)	3,1805	14,5141 (8E-5)	1,2841	40,3741
N°3	13,2250 (1E-4)	15,711 (1E-4)	2,486	14,1973 (1E-4)	0,9723	39,111
N°4	15,2711 (2E-4)	17,8018 (1E-4)	2,5307	16,2646 (3E-4)	0,9935	39,2579
N°5	13,161 (1E-4)	16,2070 (2E-4)	3,046	14,3825 (7E-4)	1,2215	40,1017
						moyenne(%) 39,6499 (0,496)

Tableau V.5 : Résultats de l'essai de perte au feu.

V.3.2. Vieillessement par absorption de solvant

Les composites à matrice polymère sont des matériaux dont l'emploi industriel ne cesse de s'étendre. S'ils possèdent de très bonnes caractéristiques en début d'utilisation, ils sont en revanche très sensibles, au cours du temps, à l'environnement extérieur et notamment au vieillissement (humide), qui atténue les propriétés en service du matériau composite.

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. On déduit par un simple calcul la teneur massique d'absorption (W %) par l'équation V.1. Dans le but de définir la cinétique et le taux d'absorption de notre matériau.

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

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.

- **Essai d'absorption en eau distillée**

L'essai est réalisé au laboratoire de mécanique structure et énergétique de l'université Mouloud MAMMARI. En prenant les masses initiales des échantillons, puis les mettre dans l'eau distillée. Une température de 40°C a été choisie pour augmenter la vitesse d'absorption et aboutir au palier de saturation en temps raisonnable.

Pour chaque pesée on sèche les échantillons à l'aide d'un papier filtre afin d'éliminer les gouttes d'eau restantes sur les surfaces. Les prélèvements et les pesées seront faits à intervalles réguliers. Les résultats obtenus sont donnés au tableau V.6.

Les courbes (figure V.8) représentant l'évolution du taux d'absorption d'eau distillée en fonction du temps.

Temps (√h)	w (%)									moyenne
	2L1	2L2	2L3	2L4	2L5	2L6	1L12	1L13	1L14	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,8990	0,0116	0,0174	0,0161	0,0224	0,0203	0,0198	0,0127	0,0171	0,0160	0,0170
6,9282	0,0262	0,0261	0,0263	0,0294	0,0229	0,0255	0,0155	0,0243	0,0233	0,0244
8,4853	0,0335	0,0363	0,0365	0,0447	0,0420	0,0326	0,0324	0,0371	0,0407	0,0373
12,6491	0,0524	0,0566	0,0599	0,0615	0,0608	0,0581	0,0493	0,0557	0,0567	0,0568
14,4222	0,0640	0,0696	0,0672	0,0741	0,0710	0,0709	0,0788	0,0714	0,0683	0,0706
15,2315	0,0655	0,0696	0,0672	0,0741	0,0710	0,0737	0,0873	0,0842	0,0814	0,0749
19,3907	0,0727	0,0754	0,0759	0,0853	0,0811	0,0851	0,1070	0,1056	0,0974	0,0873
22,7816	0,0873	0,0899	0,0905	0,1021	0,1029	0,1007	0,1281	0,1227	0,1221	0,1051
32	0,1149	0,1131	0,1241	0,1356	0,1304	0,1418	0,1422	0,1399	0,1381	0,1311
37,8153	0,1338	0,1334	0,1475	0,1566	0,1521	0,1645	0,1816	0,1812	0,1846	0,1595
43,1509	0,1644	0,1653	0,1811	0,1930	0,1898	0,2027	0,1985	0,1984	0,2006	0,1882
46,8828	0,1673	0,1653	0,1869	0,2013	0,2014	0,2098	0,2126	0,2126	0,2122	0,1966
50,3389	0,1687	0,1668	0,1884	0,2027	0,2028	0,2127	0,2154	0,2155	0,2151	0,1987
52,9717	0,1687	0,1668	0,1884	0,2027	0,2028	0,2127	0,2154	0,2155	0,2151	0,1987
56,3915	0,1687	0,1668	0,1884	0,2027	0,2028	0,2127	0,2154	0,2155	0,2151	0,1987

Tableau V.6: Evolution des teneurs massiques des échantillons du composite.

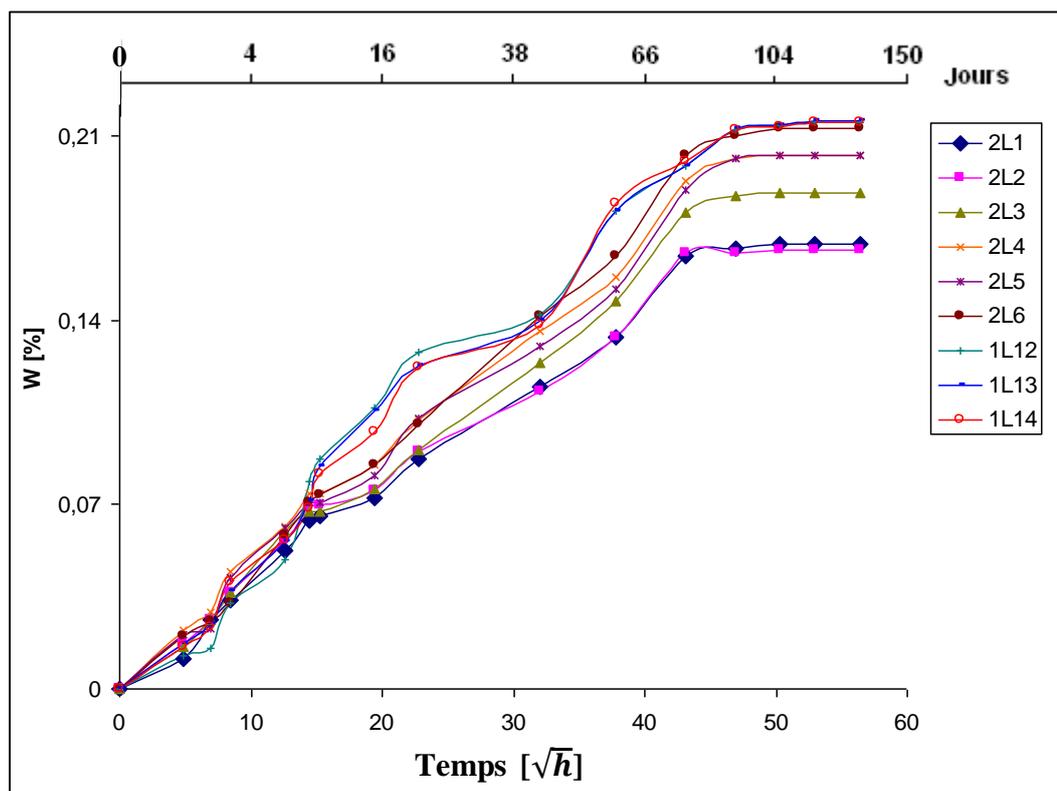


Figure V.8 : Courbes d'absorption des échantillons longitudinaux.

V.3.3. Interprétation des résultats

La cinétique d'absorption d'eau est illustrée par les diagrammes de la figure V.8. Cette figure montre que la cinétique de diffusion est Fickienne (chapitre III). On remarque qu'après l'augmentation quasi linéaire de départ, la prise en masse connaît un ralentissement « pseudo-palier de saturation ». Ces courbes font apparaître deux parties distinctes (figure V.9) :

- 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).

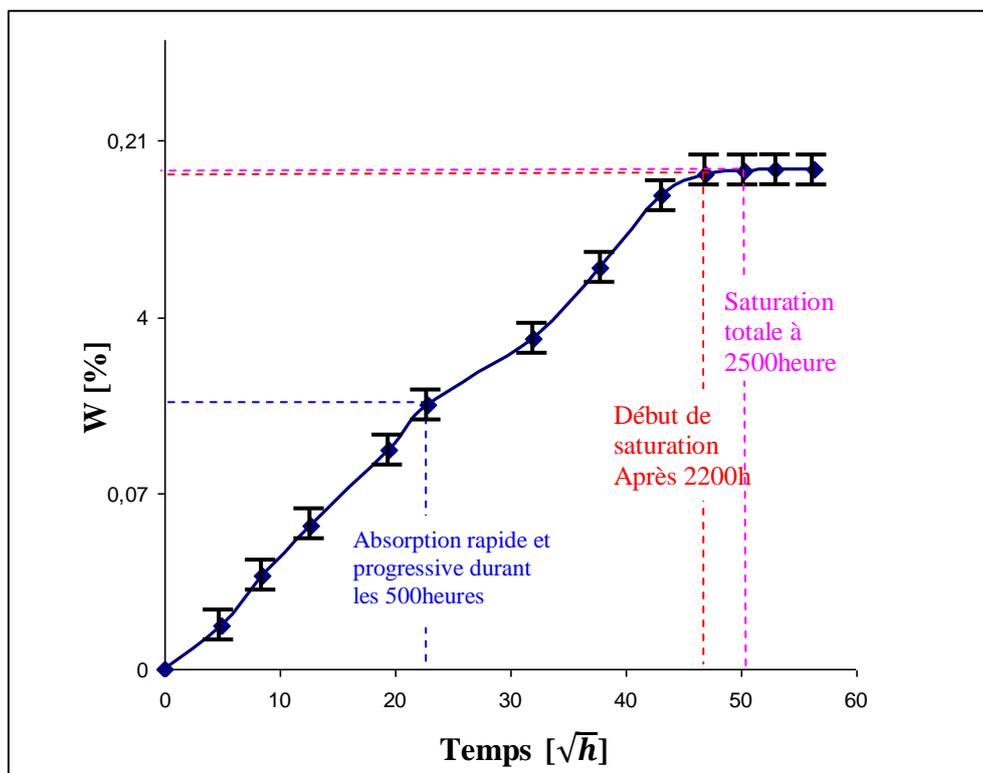


Figure V.9: Courbe d'absorption moyenne des échantillons vieillis.

Chaque courbe correspondante nous permet ainsi de déterminer deux grandeurs :

- L'une relative à l'équilibre atteint : taux maximum d'absorption du solvant, qui caractérise la solubilité du solvant dans le matériau (teneur massique d'absorption à l'équilibre w_{∞}).
- L'autre est relative à la vitesse à laquelle cet équilibre est atteint. Et qui dépendra essentiellement de l'épaisseur de l'échantillon et de la cinétique de diffusion (coefficient de diffusion).

Afin de montrer l'effet du talc sur l'absorption d'eau de notre matériau (tableau V.7) , nous le comparons au vieillissement dans le même milieu du matériau non chargé .

matériaux	Taux d'absorption W(%)	Coefficient de diffusion D (%/h)
Talqué	0,1987	0.0043
Non talqué	0,2572	0.0107

Tableau V.7 : Valeurs du taux d'absorption et coefficient de diffusion d'un composite talqué et non talqué.

La comparaison de ces résultats montre que le coefficient de diffusion (D) et le taux d'absorption (W) diminue en présence du talc dans le matériau. La saturation est atteinte plus rapidement dans le cas d'un composite non talqué (117h) par rapport à celle talqué (2500h). Ce qui pourrait s'expliquer par la présence de talc qui ralentit la diffusion.

Conclusion

La présence de l'humidité au sein des matériaux composites (fibres/polymère) provoque une détérioration des propriétés mécaniques.

On sait qu'au cours d'un vieillissement hygrothermique, la présence de molécules d'eau dans un composite à matrice polymère peut notamment dégrader les

liaisons à l'interface renfort-matrice et entraîner ainsi une dégradation irréversible des propriétés du composite.

L'eau diffuse dans le matériau à travers la matrice le long de la fibre (interface fibre-matrice) par présence de microvides, les fibres jouent un rôle d'écran ce qui peut entraîner une dégradation de l'interface, diminuant ainsi les caractéristiques mécaniques du matériau.

Cette étude est suivie par des essais mécaniques pour étudier l'effet du vieillissement sur les caractéristiques mécaniques en fatigue et statique monotone.

V.4. Méthodes expérimentales

V.4.1 Essais réalisés et objectifs

Afin de déterminer les caractéristiques mécaniques de notre matériau, nous avons procédé aux essais suivants :

- des essais statiques en flexion trois points ont été conduits selon la norme NFT57-105. Ces essais permettent de choisir les niveaux de sollicitation pour la conduite des essais de fatigue. Les essais sont réalisés à une vitesse de mise en charge $V = 0.5 \text{ h}$ (h : épaisseur de l'éprouvette) ;
- essais de fatigue en mode de flexion encastree / libre.

V.4.2. Moyens d'essais

V.4.2.1. Essai de flexion trois points

Ces essais ont été réalisés sur une machine d'essai universelle de type Thumier modèle TH3630 10-320-2003 (figure V.10). Propriété du laboratoire de mécanique et structure énergétique, qui peut effectuer sans encombre la traction, la compression et la flexion, avec bien sur changement de mors qui se montent et démontent facilement.



Figure V.10: Machine de flexion.

Elle est dotée d'une vitesse de chargement qui varie de 1 à 500 mm/min contrôlées automatiquement. Elle est constituée essentiellement d'une traverse inférieure, et d'une traverse supérieure mobile. Sur chacune des traverses se trouve des mors permettant de fixer l'éprouvette.

La machine est pilotée par un ordinateur. A l'aide d'un logiciel nous pouvons enregistrer la flèche au centre de l'éprouvette et la force en temps réel au cours de l'essai à l'aide d'un capteur de déplacement et d'effort en traçant la courbe effort /déplacement.

V.4.2.1.a. Géométries de l'essai de flexion

L'essai consiste à déformer jusqu'à rupture une éprouvette reposant sur deux appuis (figure V.11) cylindriques de 5mm de diamètre, par l'intermédiaire d'une panne de 10mm de diamètre située à égale distance des appuis. La géométrie de l'essai est choisie de façon à solliciter les éprouvettes en flexion pure, et ça en réglant la distance entre appuis afin de minimiser l'effet du cisaillement.

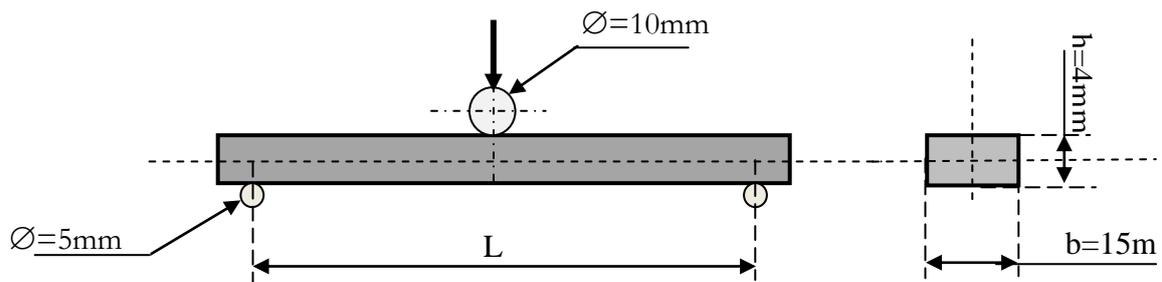


Figure V.11 : Géométrie de l'essai de flexion.

V.4.2.2. Essai de fatigue

Ces essais sont réalisés sur une machine de fatigue dynamique travaillant à déplacement imposé en modes de flexion encastree / libre. La machine est pilotée par micro-ordinateur assurant une acquisition de la valeur de l'effort en fonction du temps (figure V.12).

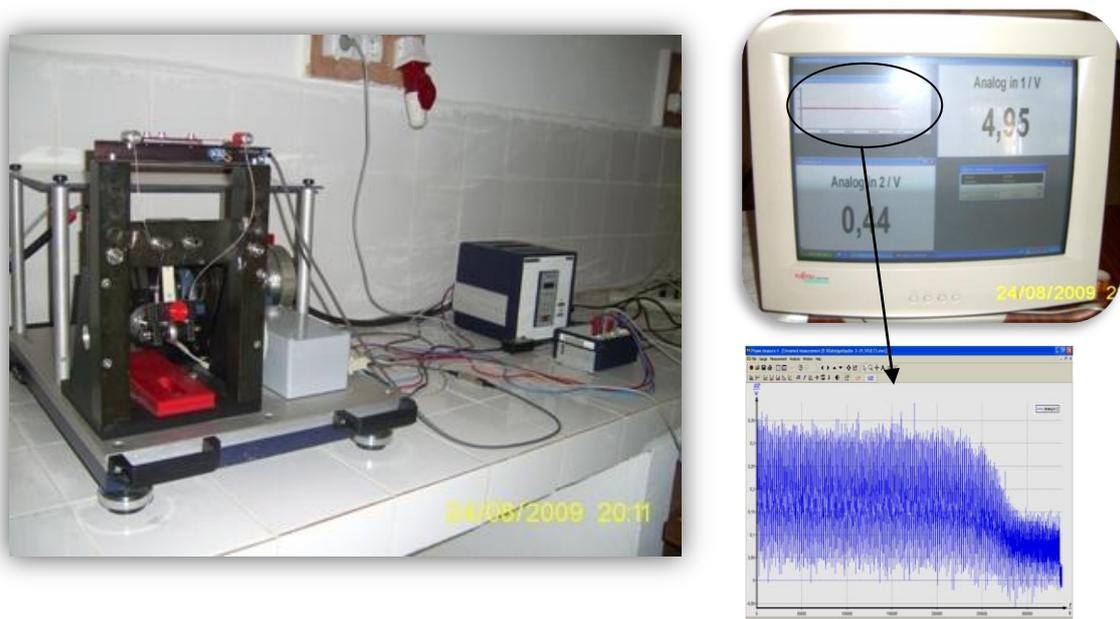


Figure V.12 : Machine de fatigue.

L'appareillage est équipé d'un capteur d'effort (± 500 N maximum). La fréquence de sollicitation maximale de 7 Hz, elle nous permet de régler la vitesse de rotation du moteur.

V.4.2.2.1. Mode opératoire

L'éprouvette (1) est fixée dans la machine par deux mors. Les mors sont appropriés pour les éprouvettes de largeur 30 mm et 5 mm d'épaisseur, et d'une longueur de 210 mm.

Sur le disque excentrique (2) se trouve un bloc excentrique ajustable (3) permettant d'imposer la flèche de déplacement jusqu'à 40 mm.

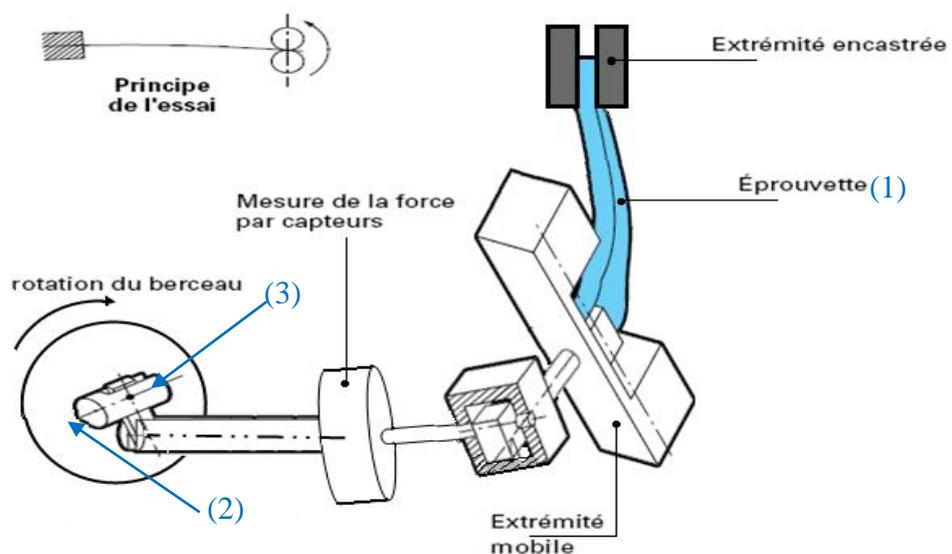
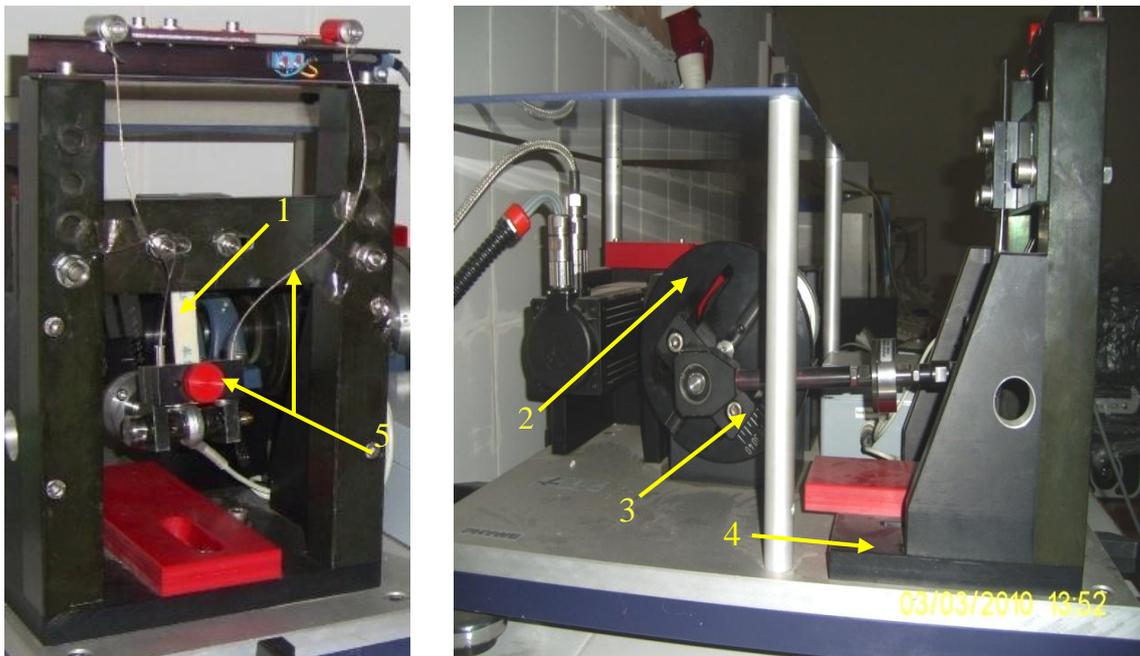


Figure V.13 : schéma de principe de fonctionnement de la machine de fatigue.

Pour soumettre l'échantillon aux différents types de sollicitations, le support (4) peut être déplacé vers la gauche ou la droite de 50 mm maximum.

Afin de prévenir les dommages ou la destruction de la machine, la pince inférieure est liée des fils en acier (5). Ces derniers activent un interrupteur de sécurité au moyen d'un levier élastique et éteindre l'unité de commande de la machine dès que l'éprouvette est rompue.

V.4.3. Méthode d'exploitation des résultats

Nous tentons tout d'abord d'identifier séparément les évolutions de propriétés mécaniques par des essais statiques et de fatigue.

V.4.3.1. Essais statiques

Deux types d'essai seront menés:

V.4.3.1.1. Essai à rupture

Cet essai Consiste à déformer jusqu'à rupture l'éprouvette telle que définie précédemment dans la géométrie de l'essai. Nous avons choisi le rapport $L= 20h$.

La courbe force/flèche obtenue est présenté par la figure V.14.

L'essai statique permet d'accéder aux caractéristiques mécaniques du matériau déterminées par les formules V.2, V.3 et V.4

Nous rappelons quelques formules de résistance des matériaux exprimant ces grandeurs mécaniques :

$$\sigma_e = \frac{3P_e L}{2bh^2} \quad (V.2)$$

$$\varepsilon_e = \frac{6Y_e \cdot h}{L^2} \quad (V.3)$$

$$E_{app} = \frac{L^3}{4bh^3} \frac{\Delta P}{\Delta Y} \quad (V.4)$$

σ_e : la contrainte normale élastique ; ε_e : la déformation relative élastique.

L'analyse des résultats obtenus lors de cet essai nous a permis de choisir le domaine élastique utilisé lors des essais élastiques.

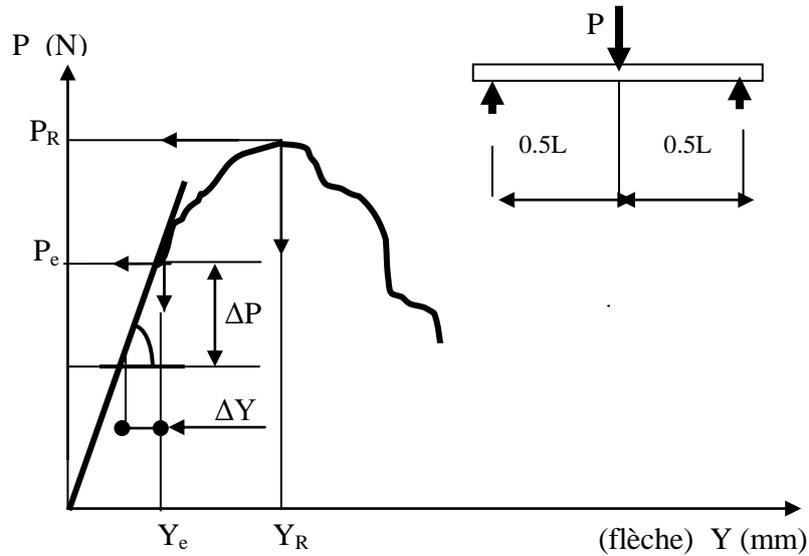


Figure V.14 : Evolution effort-déplacement lors d'un essai statique à rupture.

V.4.3.1.2. Essai élastique

L'essai est effectué sur une seule éprouvette de longueur importante. Ce qui nous permettra de tenir compte de l'effet du cisaillement transverse.

Les valeurs des pentes force-flèche (figure V.15) sont relevées à chaque fois dans un domaine qui reste éloigné de la rupture.

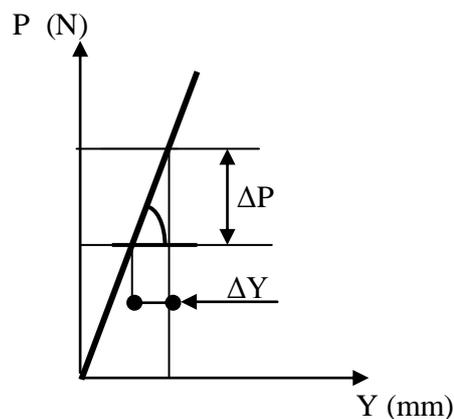


Figure V.15: Evolution effort-déplacement lors d'un essai élastique

Afin de déterminer le module longitudinal E_{11} et de cisaillement transversal G_{12} nous avons utilisé deux méthodes complémentaires.

a. Méthode de Fisher

Cette méthode consiste à considérer deux élancements sur une même éprouvette.

Fisher propose ces deux formules :

$$E_{11} = \frac{K_1 K_2}{4 \cdot b} \left| \frac{C}{B} \right| \quad (V.5)$$

$$G_{12} = - \left(\frac{3}{8} \right) \left(\frac{K_1 K_2}{b} \right) \left| \frac{C}{A} \right| \quad (V.6)$$

Le calcul de A, B, C est détaillés dans l'annexe 2.

b. Méthode de Fisher modifiée

Consiste à prendre plusieurs élancements. La détermination des module E_{11} et G_{12} est obtenus selon l'expression suivante:

$$\frac{1}{E_{app}} = \frac{1.18}{G_{12}} * \left[\frac{h}{L} \right]^2 + \frac{1}{E_{11}} \quad (V.7)$$

La détermination de l'équation V.7 est détaillée dans l'annexe 2

Nous voyons bien que la relation est de la forme : $y = ax + b$.

Nous pouvons déduire les modules d'élasticité longitudinal E_{11} et transversal G_{12} par :

$$E_{11} = \frac{1}{b} \quad (V.8)$$

$$G_{12} = \frac{1.18}{a} \quad (V.9)$$

V.4.3.2. Essai de fatigue

Du fait que les essais statiques ont été conduits en flexion trois points, l'utilisation de ces essais en fatigue nécessite des formules de passage en mode flexion encasturé/libre (Voir annexe 3). Les essais sont conduits à flèche constante calculée par la relation V.10

$$Y = \frac{4PL^3}{E_{app}bh^3} \quad (V.10)$$

Les paramètres d'essai sont :

- la fréquence est de 5hz
- le rapport R est égal à -1 (solicitation symétrique).

Avant de commencer les essais, nous avons procédé à l'étalonnage du capteur d'effort, pour nous permettre de convertir les valeurs électriques des charges (v), en valeurs physiques : forces (N).

- **Etalonnage de la charge:**

Nous plaçons des poids et en relève pour chaque charge la valeur en volt affichée sur l'écran. Les valeurs relevées sont données par le tableau V.8

poids (N)	Tension(Volt)
0	0,06
100	1,27
105	1,33
110	1,4
115	1,46
117	1,49
119	1,52
120	1,53

Tableau V.8 : Etalonnage de la charge.

A l'aide d'une régression linéaire nous avons tracé la courbe en nuage de points (figure V.16), que nous avons approximé avec une courbe de tendance qui a pour équation :

$$P(N) = 81,843X - 4,6673 \quad (V.11)$$

Avec le coefficient de régression $R^2=0,9998$

P (N) : Charge calculée en newton

X : Valeur de la charge en volts.

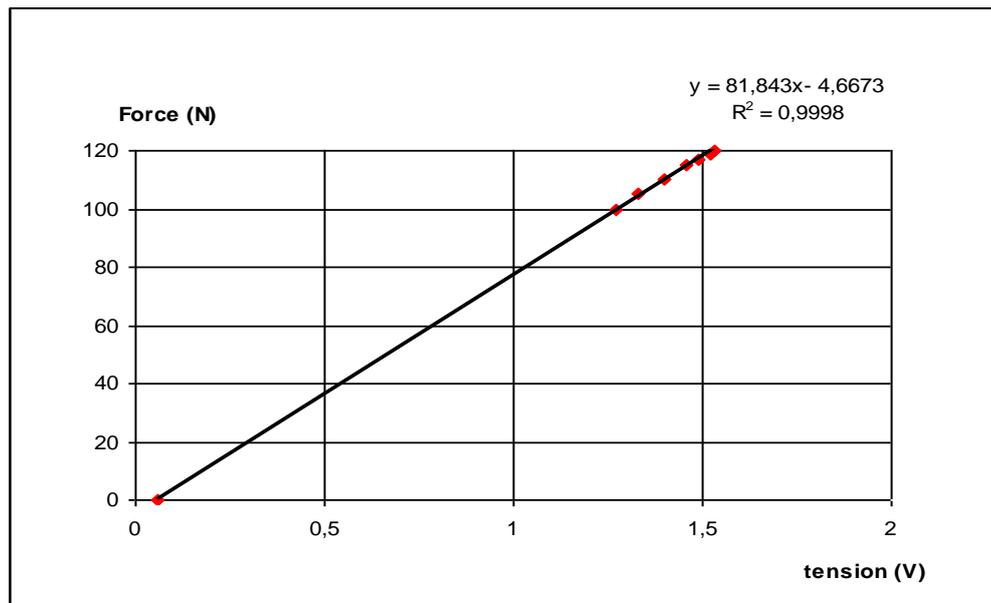


Figure V .16 : Courbe d'étalonnage du capteur d'effort.

Le principe de la mesure consiste à suivre en continu l'effort maximal à chaque cycle, et de définir une perte de rigidité apparente du matériau P/P_0 au cours du temps. Un système informatisé multitâche, permet l'acquisition des données, ainsi que le tracé en temps réel des courbes d'évolution.

V. 5. Résultats expérimentaux

Nous allons présenter les résultats des différents essais expérimentaux réalisés dans le cadre de la présente étude. Nous commençons tout d'abord à donner les résultats d'essais quasi statiques du composite vierge et vieilli. Par la suite nous présentons les résultats des essais de fatigue.

V.5.1.Résultats d'essai à rupture

Après la connaissance des cinétiques d'absorption d'eau, nous nous sommes également intéressés à la détermination des caractéristiques mécaniques du matériau à la fois à l'état non vieilli et vieilli. Les résultats obtenus sont donnés par les tableaux : V.9, V.10 et V.11 représentés par les courbes V.17, V.18, V.19, V.20, V.21, V.22 et V.23.

a. Etat vierge

	1T1	1T2	1T3	1T4	1T5	Moyenne
h [mm]	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85
b [mm]	15,41 (0,3)	15,26 (0,1)	15,19 (0)	15,20 (0,02)	15,19 (0)	15,25 (0,08)
P[N]	68,19	67,31	64,98	65,31	67,73	66,70 (1,3)
Y [mm]	3,33	3,46	3,25	3,15	3,15	3,26 (0,11)
ϵ_e	0,0129	0,0135	0,0126	0,0122	0,0122	0,01268 (4E-4)
σ_e [MPa]	34,48	34,37	33,33	33,48	34,74	34,08 (0,56)
ϵ_R	0,058	0,059	0,06	0,062	0,057	0,0592 (1E-3)
σ_R [MPa]	80,76	74,18	73,48	74,95	77,25	76,12 (2,64)
Eapp [MPa]	2760,67	2769,59	2770,77	2776,71	2786,44	2772,84 (8,52)

Tableau V.9: Caractéristiques mécaniques des éprouvettes transversales non vieilles (FCT).

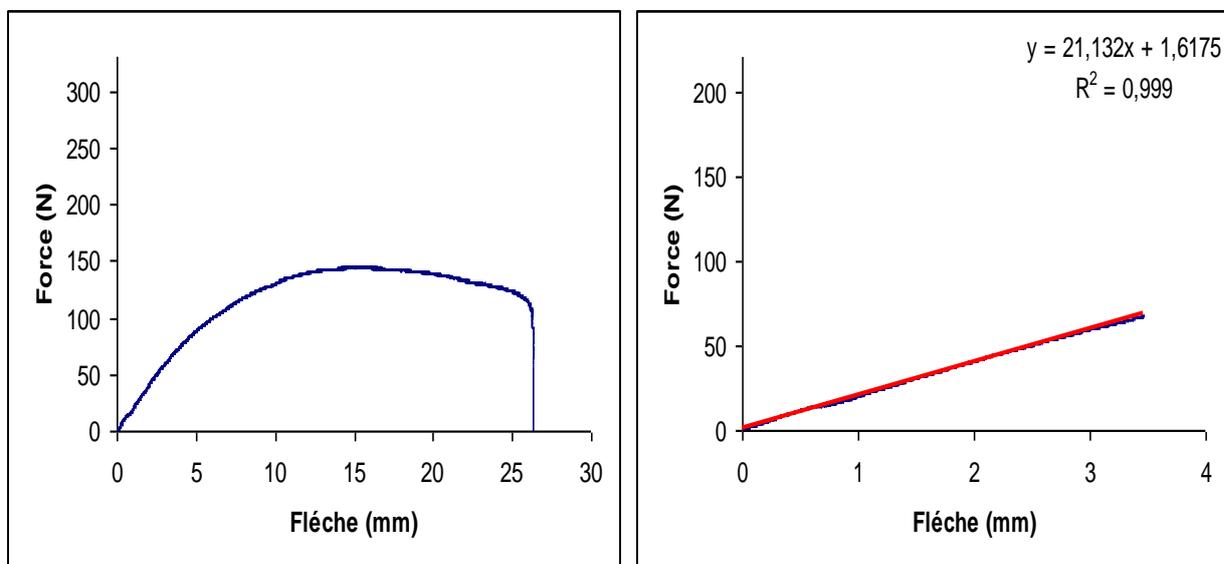


Figure V.17 : Courbe d'évolution force /flèche des éprouvettes transversales non vieilles(FCT).

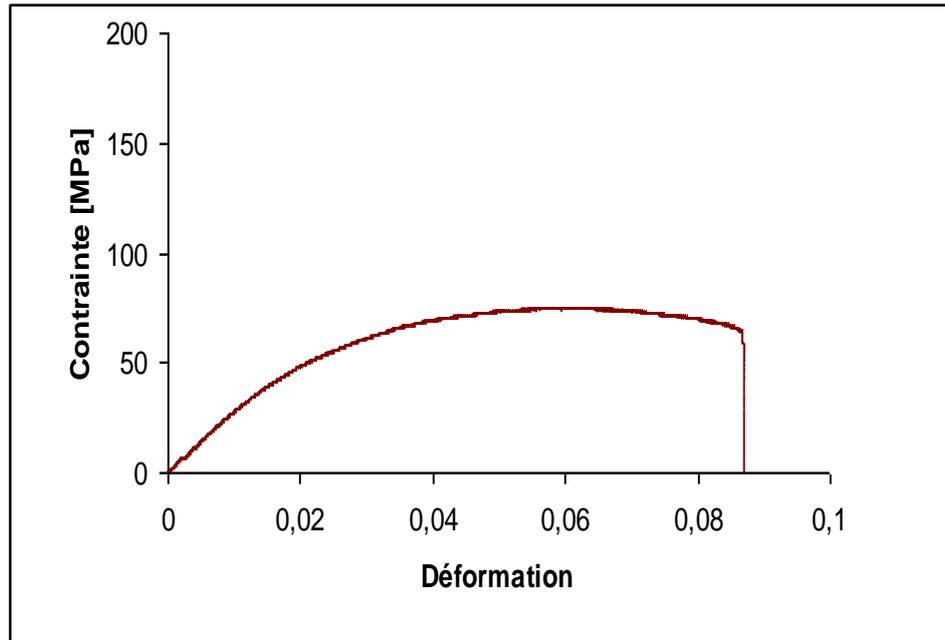


Figure V.18: Evolution des contrainte /déformation des éprouvettes transversales non vieilles (FCT).

	1L1	1L2	1L3	1L4	1L5	Moyenne
h [mm]	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85
b [mm]	15,58 (0,06)	14,32 (0,08)	15,21 (0,02)	15,19 (0)	15,19 (0)	14,89 (0,37)
P[N]	162,4	106,74	169,75	95,82	165,54	140,05 (31,93)
Y [mm]	2,7	2,68	2,76	2,46	2,81	2,68 (0,12)
ϵ_e	0,0105	0,0104	0,0107	0,009	0,0109	0,0103 (6E -4)
σ_e [MPa]	86,79	58,08	86,96	49,15	84,92	73,18 (16,24)
ϵ_R	0,03	0,044	0,027	0,048	0,029	0,0356 (8E -3)
σ_R [MPa]	169,5	138,42	159,44	124,38	155,93	149,53 (16,08)
Eapp [MPa]	8500,96	5669,24	8421,56	5516,26	8466,1	7318,82 (1407,12)

Tableau V.10 : Caractéristiques mécaniques des éprouvettes longitudinales non vieilles(FCL).

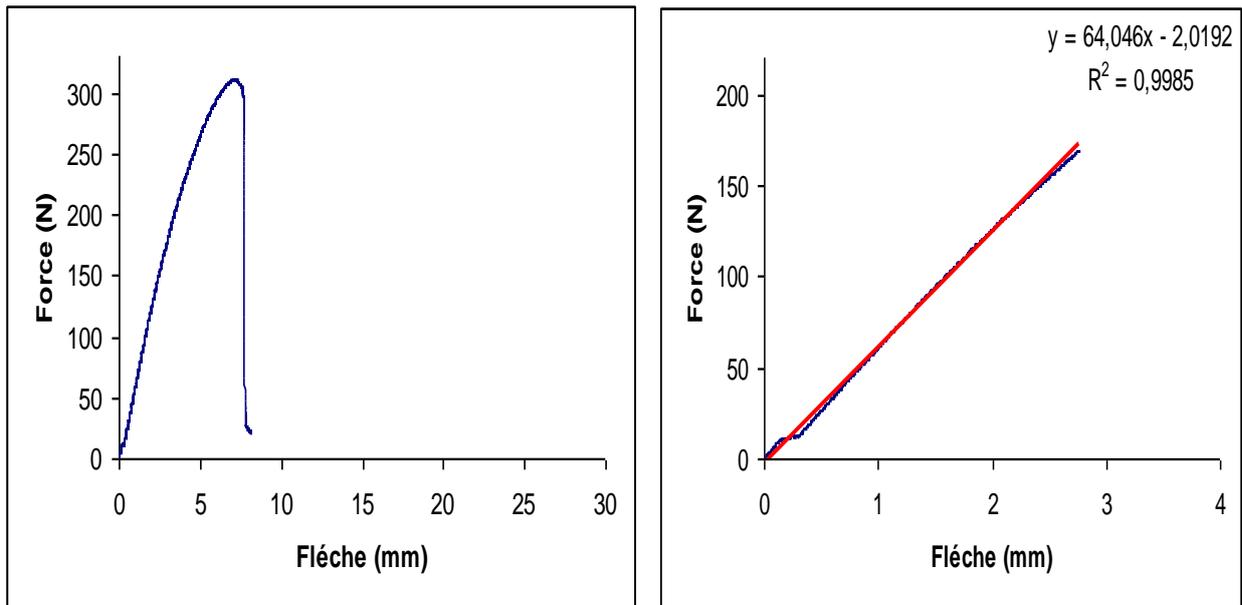


Figure V.19 : Courbe d'évolution force /flèche des éprouvettes longitudinales non vieilles(FCL).

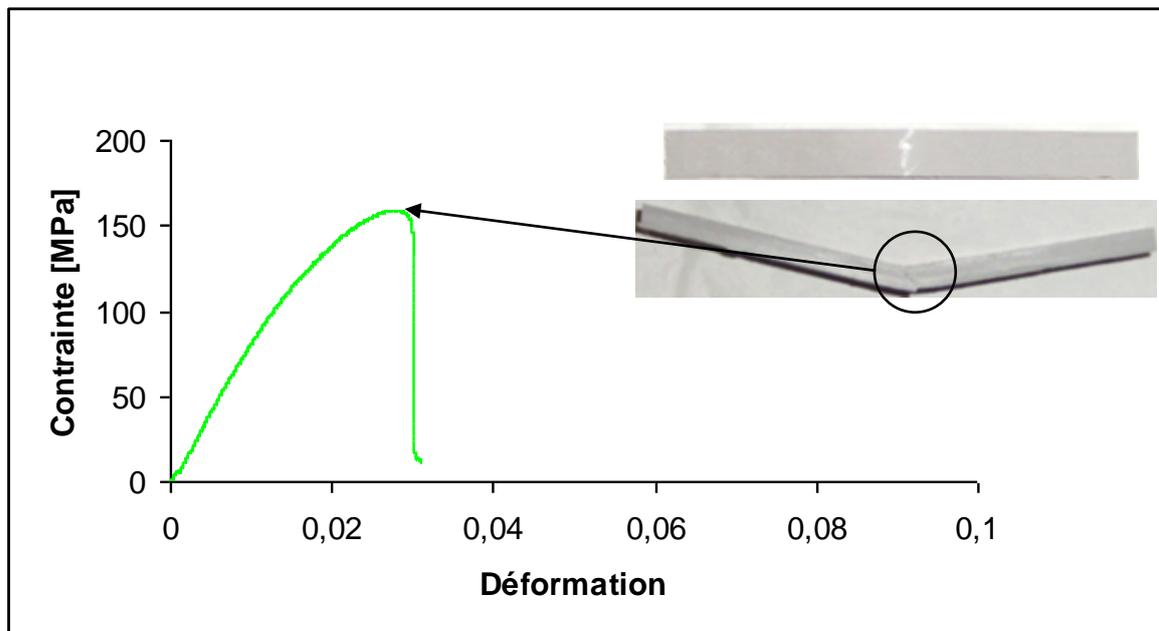


Figure V.20 : Courbe d'évolution contraincte / déformation des éprouvettes longitudinales non vieilles(FCL).

b. Etat vieilli

	2L1	2L2	2L3	Moyenne
h [mm]	3,85	3,85	3,85	3,85
b [mm]	14,83 (0,06)	14,68 (0)	15,18 (0,06)	14,89 (0,2)
P [N]	77,02	152,03	140,88	123,31 (33,04)
Y [mm]	1,516	3,292	3,06	2,3 (0,19)
ϵ_e	0,006	0,0104	0,012	0,009 (2E -4)
σ_e [MPa]	40,67	80,698	72,31	64,56 (17,23)
ϵ_R	0,0337	0,024	0,023	0,023 (6E -3)
σ_R [MPa]	120,881	119,20	111,40	118,16 (2,74)
Eapp [MPa]	6718	6254,76	5967,85	6313,54 (309,05)

Tableau V.11 : Caractéristiques mécaniques des éprouvettes Longitudinales vieilles(FCL).

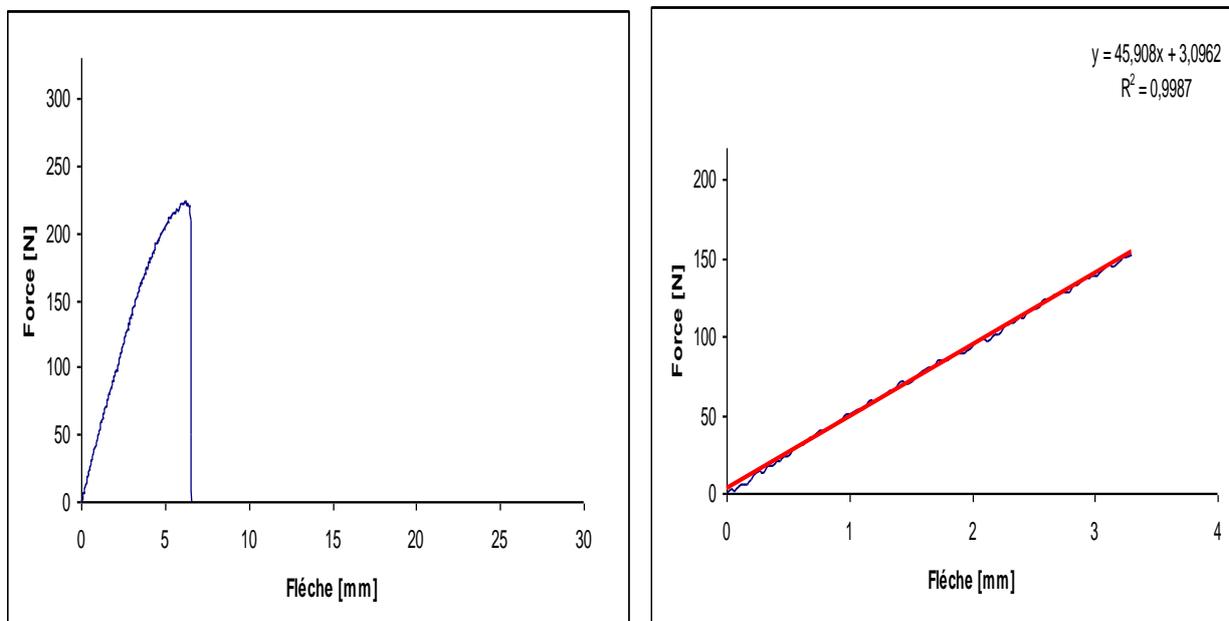


Figure V.21: Courbe d'évolution force /flèche des éprouvettes Longitudinales vieilles(FCL).

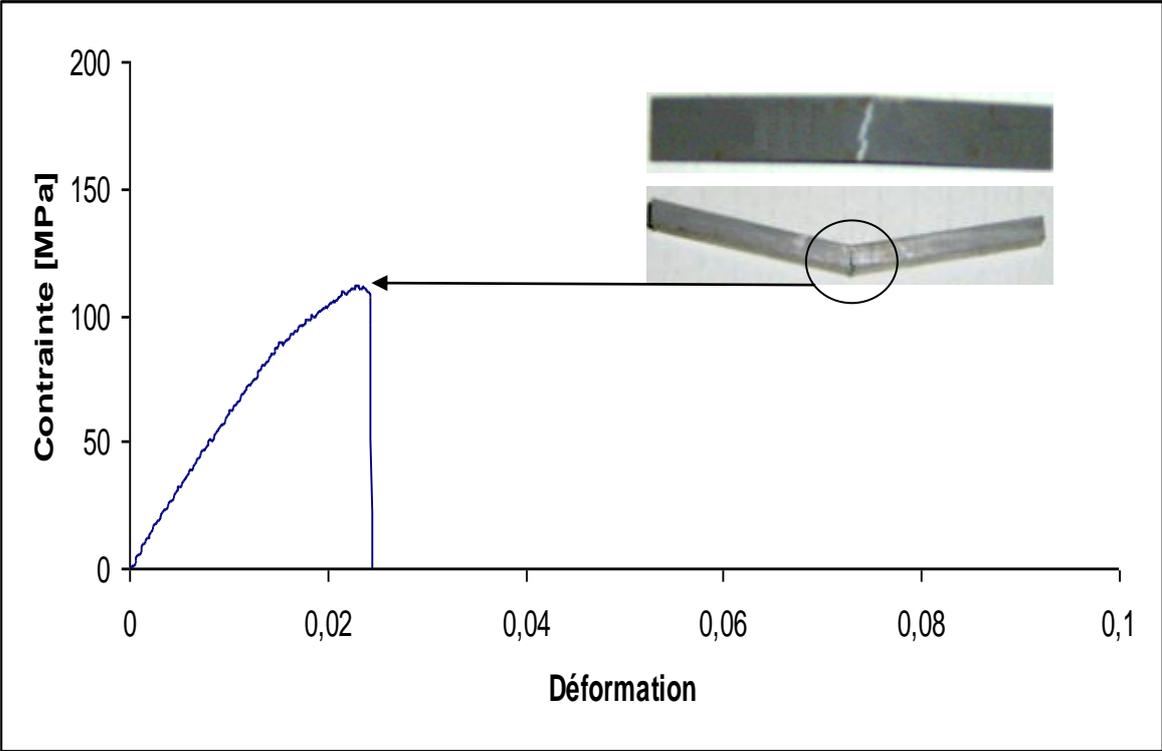


Figure V.22 : Courbe d'évolution contraintes / déformations des éprouvettes Longitudinales vieillies(FCL).

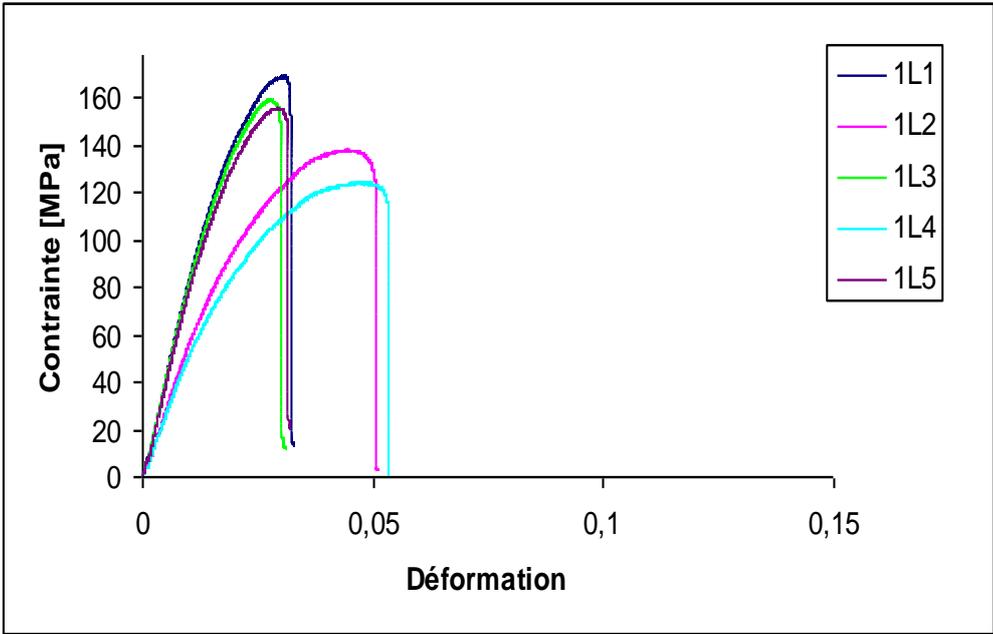


Figure V.23 : Courbe d'évolution contraintes / déformations des éprouvettes Longitudinales non vieillies(FCL).

Interprétation des résultats

Concernant l'allure générale des courbes, on peut constater trois zones caractéristiques.

- une zone considérée comme linéaire correspondant au comportement élastique de l'éprouvette ;
- une zone non-linéaire associée à l'apparition de la déformation plastique et de l'endommagement. Le caractère non-linéaire est plus marqué dans le cas des matériaux sollicités transversalement (Figure V.18) ;
- une zone de rupture, représentée par la chute libre des caractéristiques mécaniques du matériau (rupture brutale).

-Le mécanisme global de rupture de nos éprouvettes s'effectue toujours sur la face en traction.

Nous notons que les propriétés mécaniques diffèrent selon l'endroit où les éprouvettes sont prélevées par rapport à l'orifice d'injection. Un exemple est donné par la figure V.23 dans le sens longitudinal des fibres.

Selon cette figure nous avons constaté que les caractéristiques mécaniques des éprouvettes (L1, L3, L5) prises aux extrémités des plaques sont supérieures à celles des éprouvettes découpées près de l'orifice d'injection (L2, L4) (voir annexe 4).

Cette différence peut être expliquée par l'orientation des fibres ou bien par le taux de fibres. Nous avons procédé à une calcination des échantillons prélevés au près de l'orifice d'injection. Les résultats obtenus, montrent que le taux de fibre est le même (voir annexe 5). Les fibres s'orientent suivant la direction l'injection. Comme l'injection se fait au centre, un fait qui pourrait être en relation avec l'entraînement d'une certaine quantité de fibres avec l'écoulement de la matrice jusqu'aux bords du moule.

Nous remarquons que le module et la contrainte maximale des éprouvettes longitudinales sont nettement supérieurs à ceux des éprouvettes transversales. Ce résultat est bien entendu dû à l'orientation des fibres lors de la mise en œuvre : en sens longitudinal, la majorité des fibres se retrouvent parallèle au sens d'application de la charge, donnant un caractère plus résistant et rigide au composite.

Au contraire, en sens transversal, la plus grande partie des fibres est perpendiculaire à la sollicitation et c'est la matrice, moins résistante qui doit reprendre une partie des efforts. Néanmoins l'inverse est à signaler concernant la déformation (figure V.24).

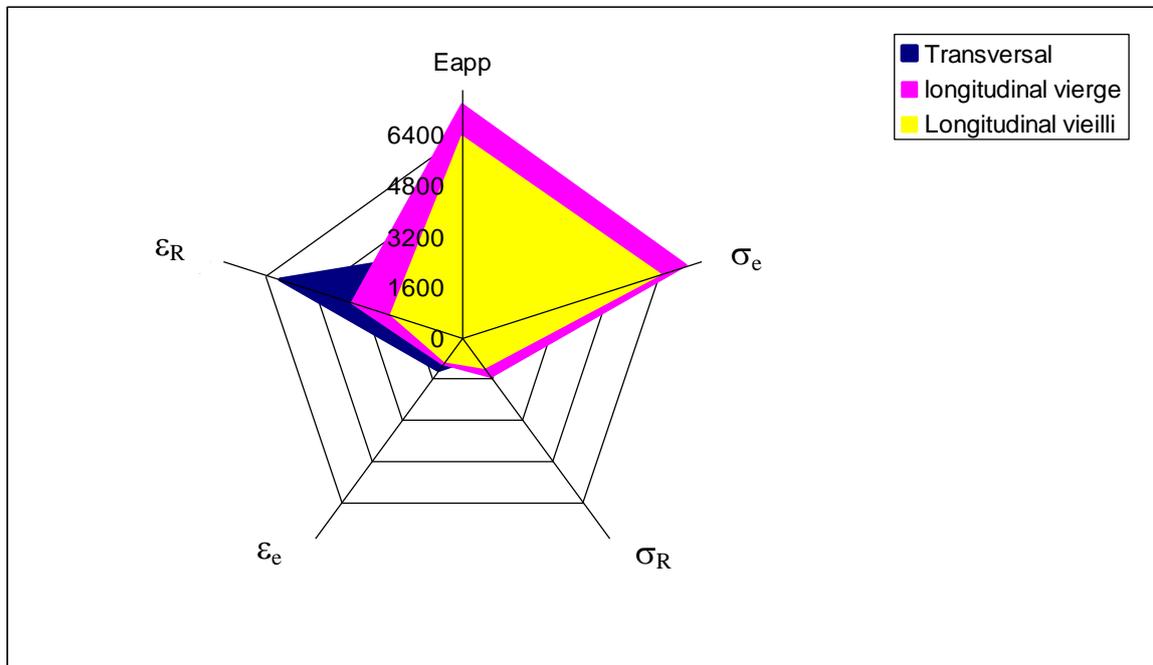


Figure V.24 : Représentation en étoile des caractéristiques mécaniques des éprouvettes transversales, longitudinales vierges et vieilles.

D'après la figure V.24 nous remarquons une diminution des valeurs des caractéristiques mécaniques (chute de 87% ϵ_e , 64% de ϵ_R et 86% du module apparent), qui peut être expliquée par l'effet du vieillissement.

Cette étude nous amène à choisir des éprouvettes loin de l'orifice d'injection pour les essais de fatigue.

V.5.2. Résultats d'essai élastique

Afin de trouver les valeurs des modules transversal et longitudinal, nous avons choisi deux méthodes.

a. Résultats du modèle de Fisher

L'évolution de module longitudinal et de cisaillement transversal sont regroupées au tableau (voir annexe 2) qui nous permet de tracer les courbes données par les figures V.25, V.26, V.27, V.28, V.29, V.30.

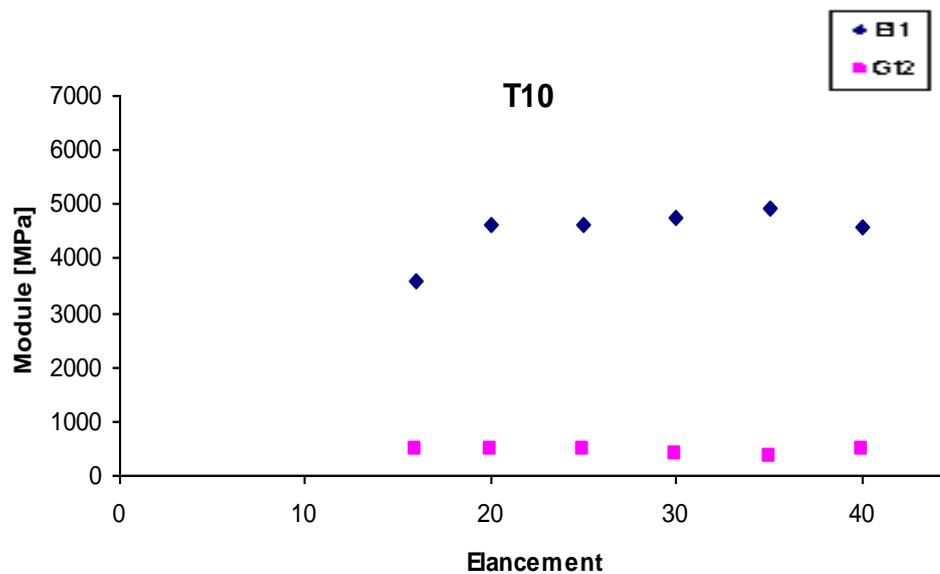


Figure V.25 : Evolution de E_{11} et G_{12} en fonction de l'élancement dans le sens transversal.

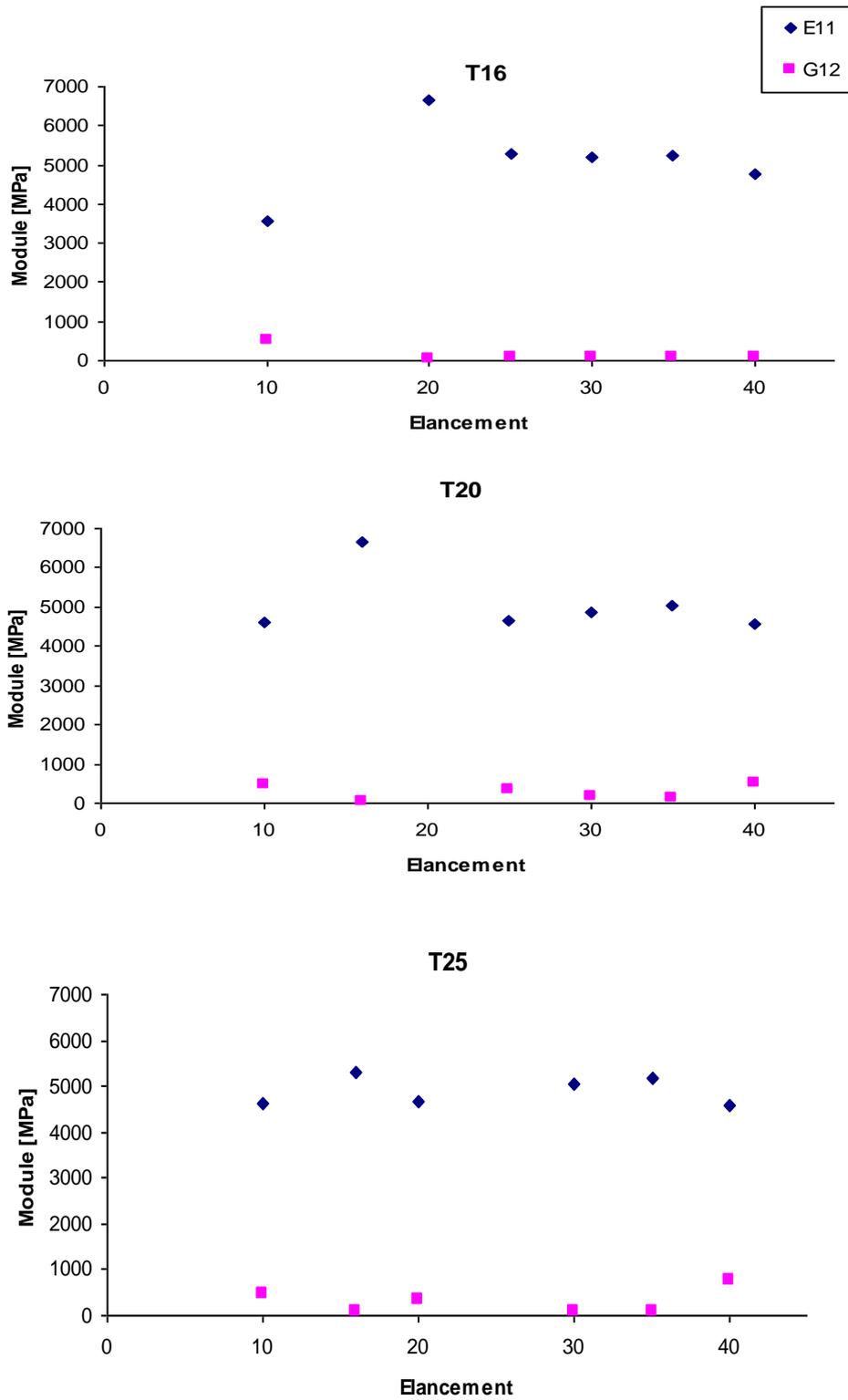


Figure V.26 : Evolution de E_{11} et G_{12} en fonction de l'éancement dans le sens transversal.

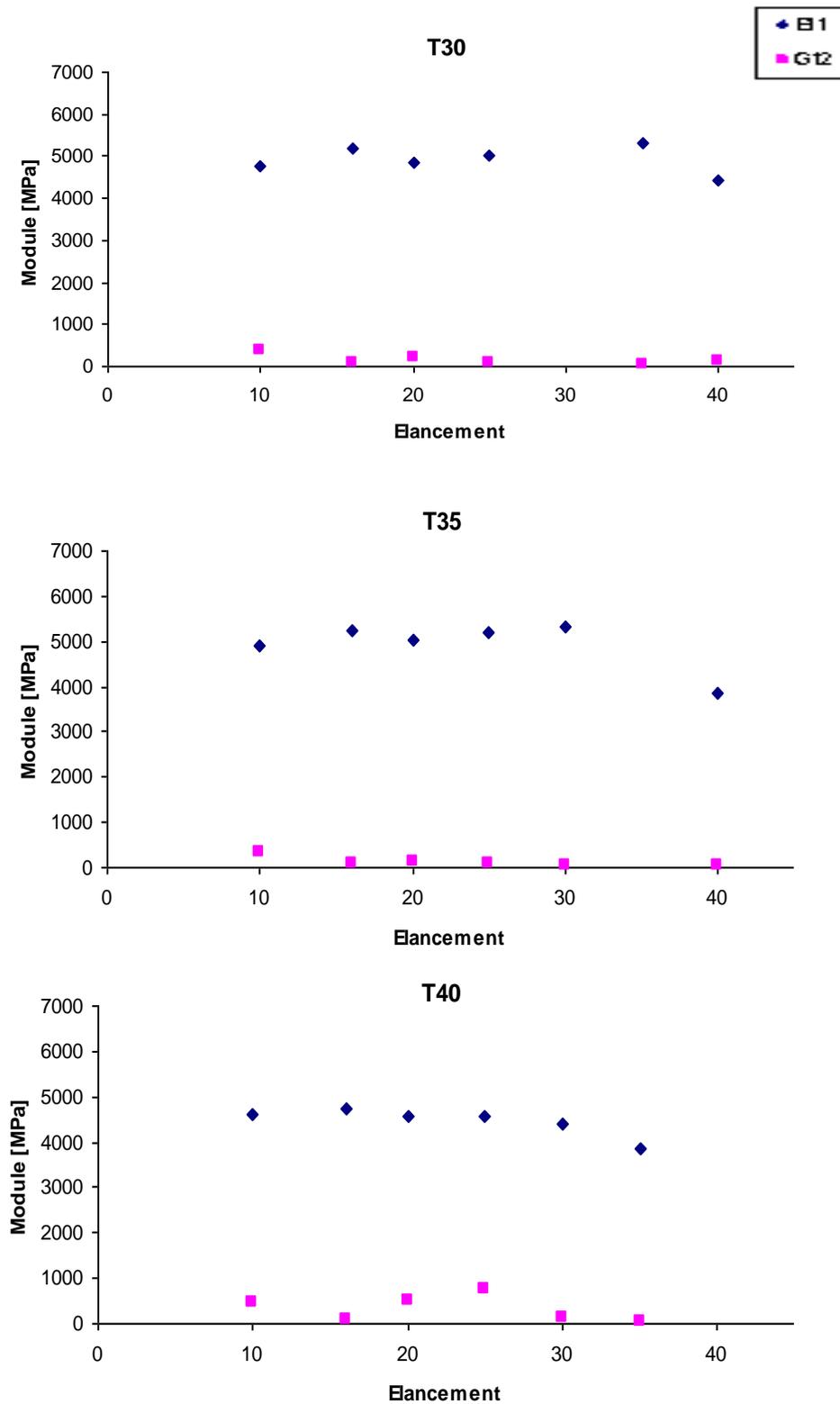


Figure V.27 : Evolution de E_{11} et G_{12} en fonction de l'élancement dans le sens transversal

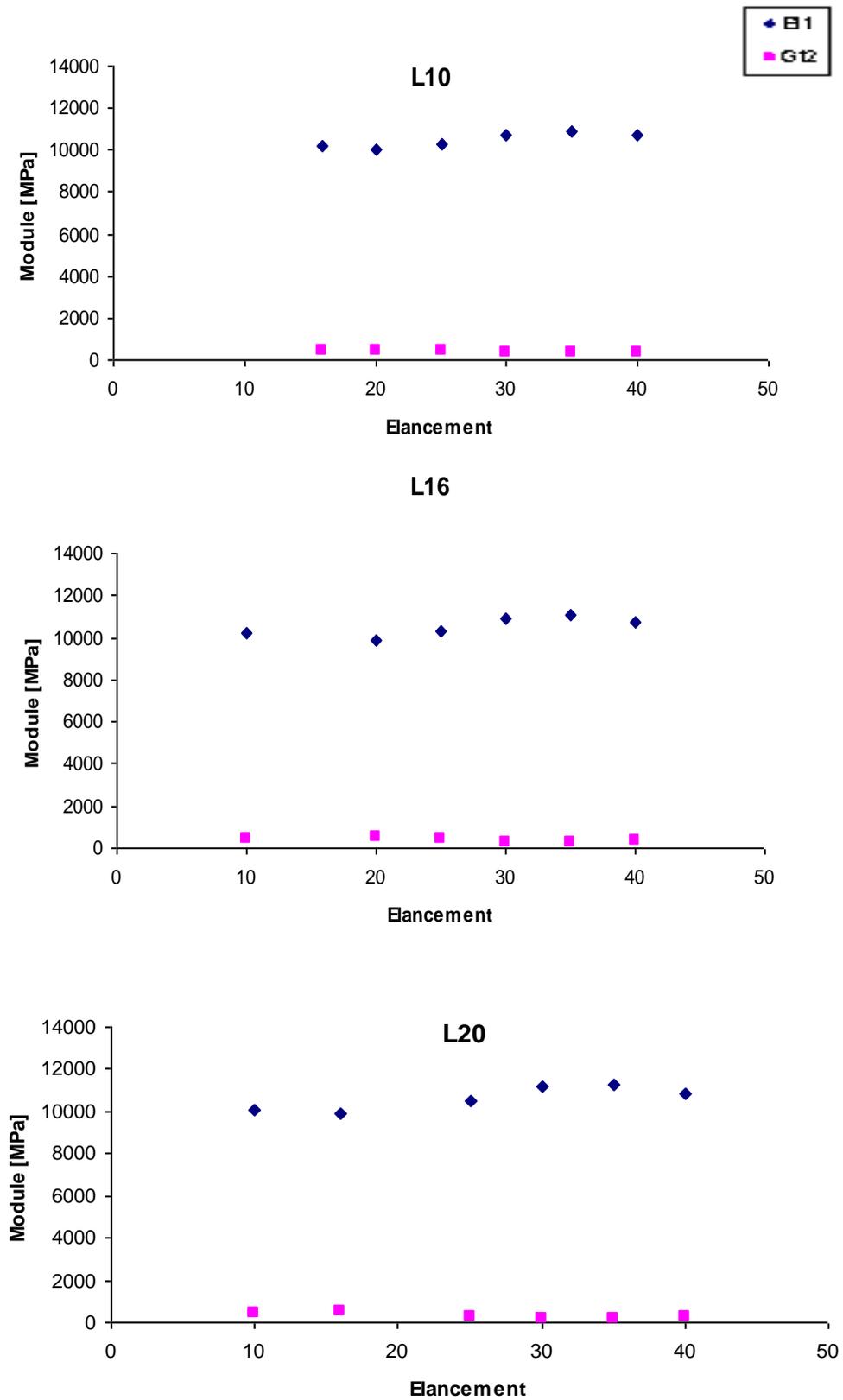


Figure V.28 : Evolution de E_{11} et G_{12} en fonction de l'élacement dans le sens longitudinal

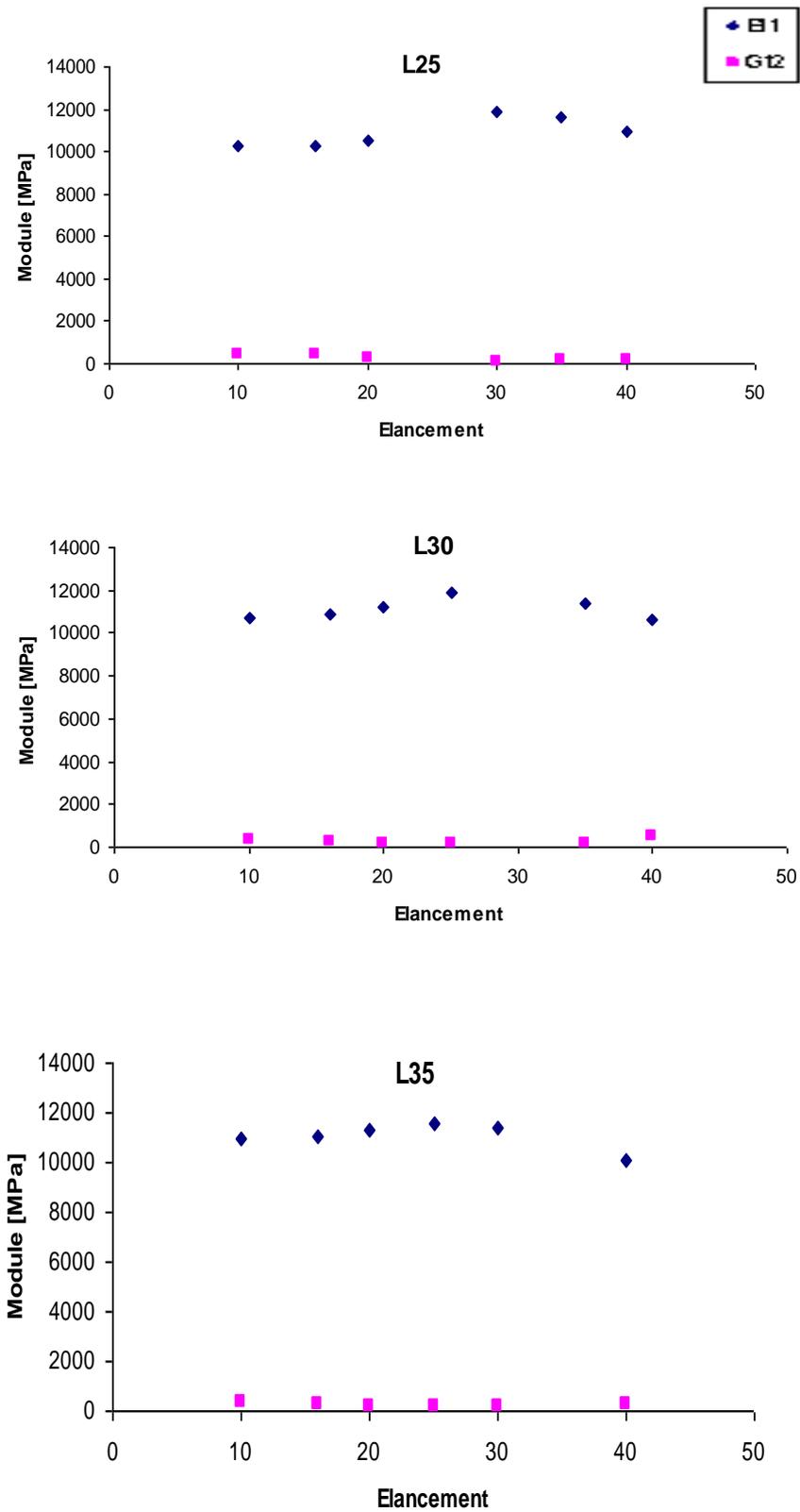


Figure V.29 : Evolution de E_{11} et G_{12} en fonction de l'élancement dans le sens longitudinal

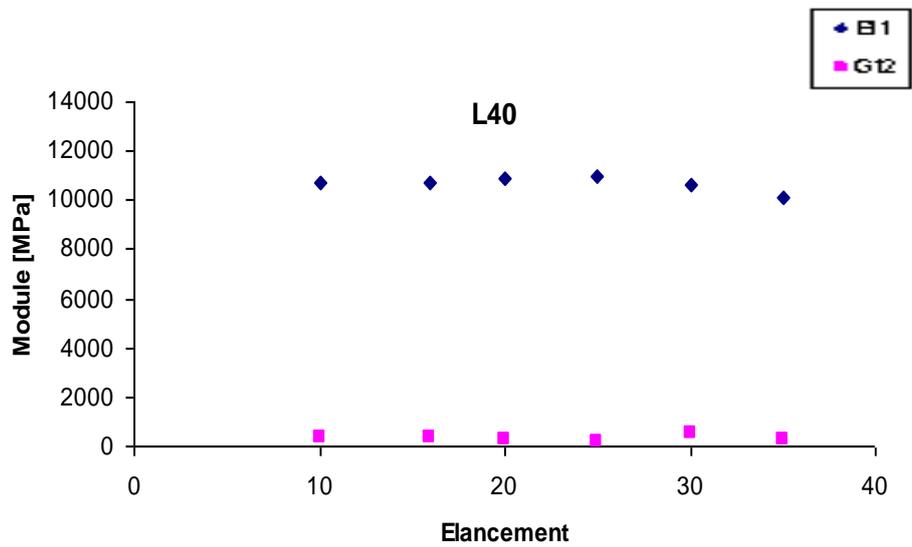


Figure V.30 : Evolution de E_{11} et G_{12} en fonction de l'élancement dans le sens longitudinal

b. Résultats du modèle de Fisher modifié

L (mm)	E _{app} [MPa]	
	FCT	FCL
h (mm)	3,85	3,85
38	3456,7	6855,17
62	4410,53	8342,46
77	4130,89	8968,46
96	4410,53	9662,65
116	4625,48	9821,62
135	4793,7	9900,54
154	4735,66	9936,83
E ₁₁ (GPa)	4651,16	9756,09
G ₁₂ (Mpa)	151,28	245,83
E ₁₁ /G ₁₂	30,74	39,68

Tableau V.12 : Modules apparents sous contraintes élastiques.

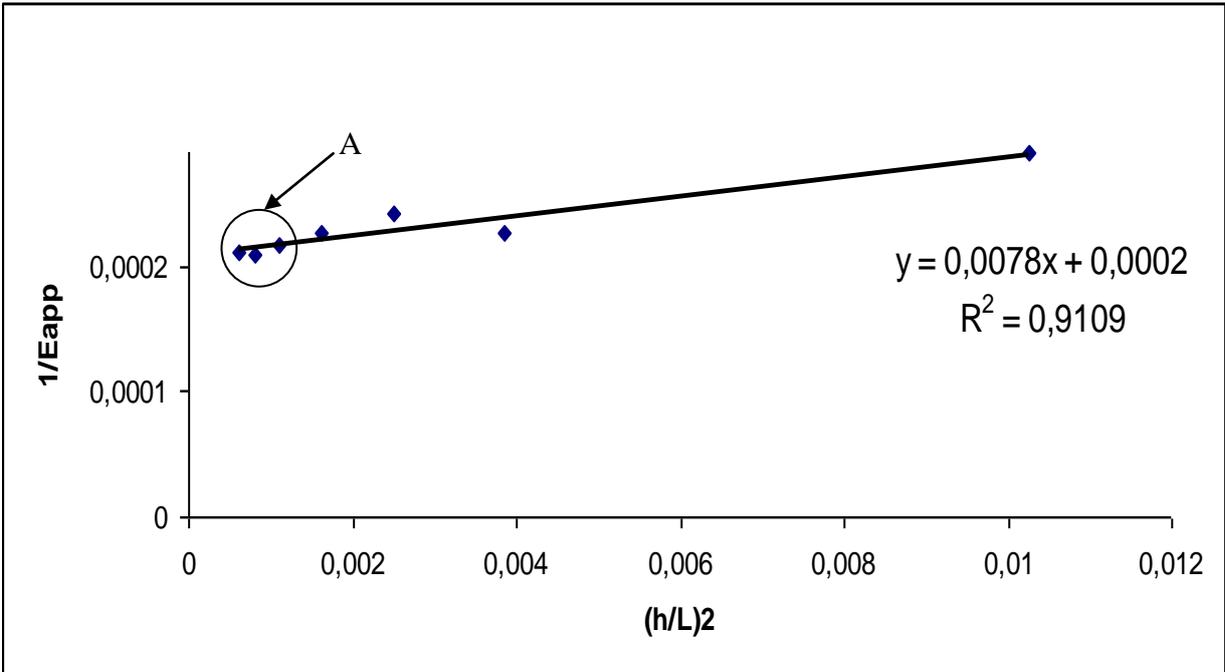


Figure V.31 : Courbe d'évolution contraintes / déformations essai élastique pour éprouvette transversale

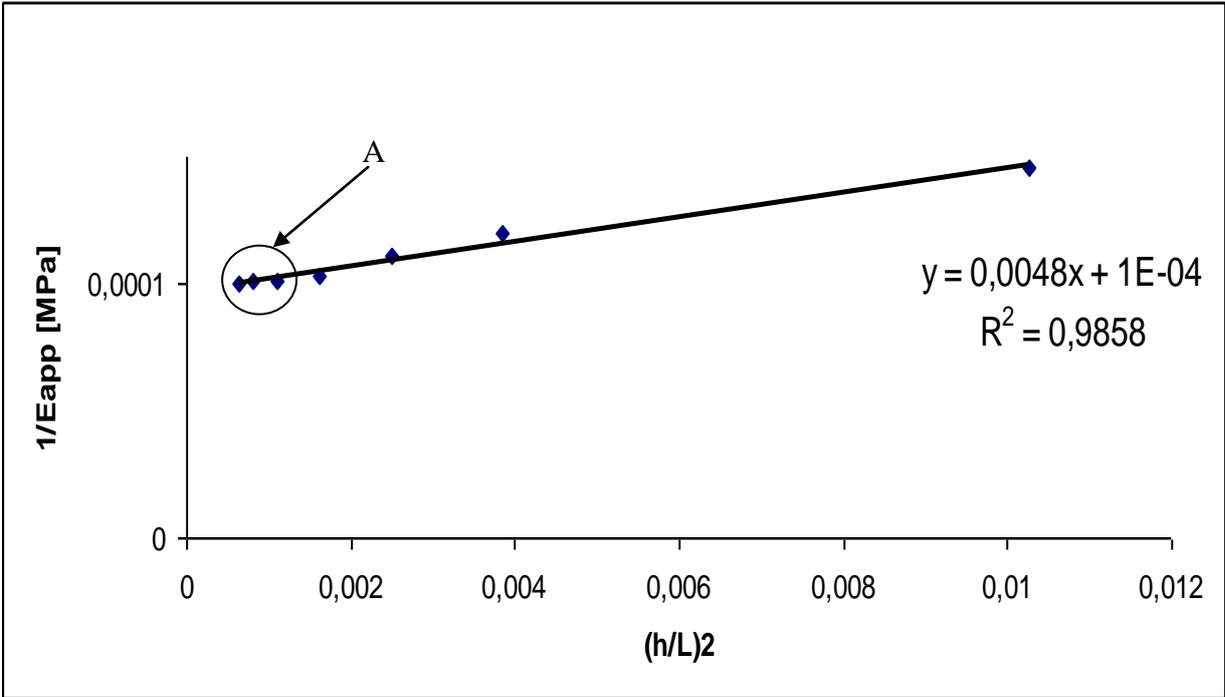


Figure V.32: Courbe d'évolution contraintes / déformations essai élastique pour éprouvette longitudinale.

➤ Les figures V.25 jusqu'à V. 30 présentent l'évolution de E_{11} et G_{12} en fonction de l'élanement (les remarques seront donc les mêmes pour les essais à rupture et élastique concernant le module longitudinal).

Nous remarquons la même évolution des deux modules dans les deux sens. Le module E_{11} augmente avec la variation de l'élanement puis décroît au plus grand élanement, et le contraire pour le G_{12} .

Les résultats obtenus par la méthode de Fisher sont plus importants par rapport à ceux de Fisher modifié

➤ Nous constatons à partir des figures V.31 et V.32 que le module apparent varie avec le rapport $\frac{L}{h}$. Nous avons remarqué l'existence d'un palier (détail A). Ce dernier montre que le module E_{app} ne change pas (cas de la flexion pure). Donc E_{11} est d'autant plus proche du module E_{app} du matériau testé, quand la contribution de cisaillement est faible.

La détermination du module E_{11} est prise au niveau du palier et non au niveau de l'intersection de la droite avec l'axe des ordonnées.

- Les essais de flexion sur éprouvettes à différentes longueurs ont montré que le module de cisaillement est inférieur au module longitudinal du matériau ($E_{11} \gg G_{12}$).

La méthode de Fisher modifiée utilise plusieurs élanements par contre l'autre méthode préconise deux élanements.

V.5.3. Résultats d'essai de fatigue

Le suivi de la perte de rigidité est considéré comme un traceur de l'endommagement. C'est l'une des méthodes la plus utilisée pour caractériser le comportement en fatigue des composites. Au cours de ces essais, nous enregistrons l'évolution de la charge maximale P en fonction du temps (nombre de cycles N). Une représentation adimensionnelle est choisie dans notre cas P/P_0 (P_0 la charge appliquée au premier cycle).

Afin de visualiser plus clairement la chute des caractéristiques mécaniques et notamment la perte de rigidité nous avons utilisé les valeurs maximales (P), en portant en ordonnée la variation relative de la rigidité (P /P0) en abscisse le logarithme décimal du nombre de cycles (Log N) (figure V.33). (voir annexe 6)

Les niveaux de sollicitations pris pour la conduite des essais de fatigue sont donnés dans le tableau V.13.

Niveau de contrainte [MPa]	Etat vierge		Etat vieilli	
	$\sigma/\sigma_{rupture}$ [%]	$\varepsilon/\varepsilon_{rupture}$ [%]	$\sigma/\sigma_{rupture}$ [%]	$\varepsilon/\varepsilon_{rupture}$ [%]
43,19	28,88	16,57	36,42	29,64
33,63	22,49	12,90	28,97	23,16
25,55	17,08	9,80	21,55	17,53

Tableau V.13 : Niveaux de sollicitation.

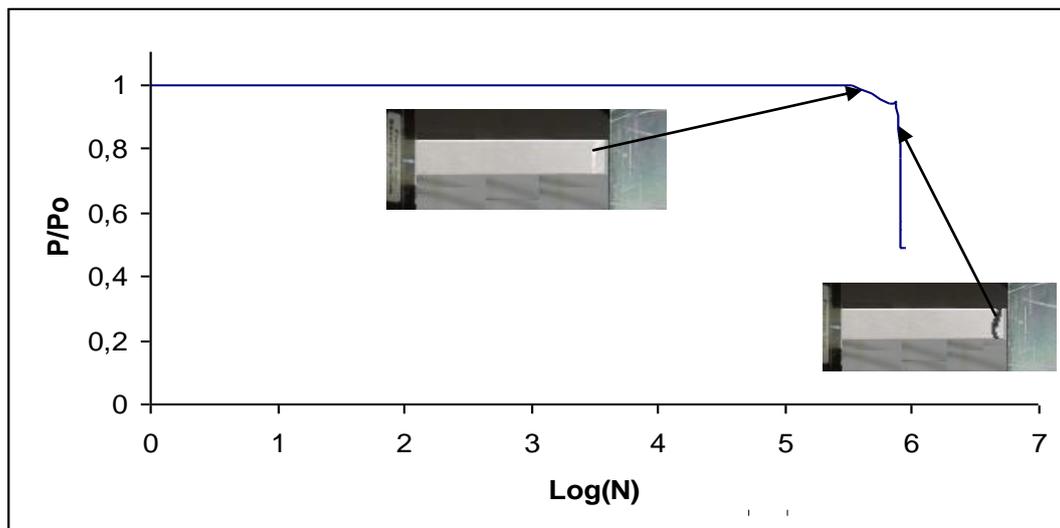


Figure V.33 : Evolution de la perte de rigidité en fonction du nombre de cycles.

Cette représentation met en évidence trois zones principales de décroissance :

- Amorçage : création de défauts,
- Propagation des défauts existants ou créés,
- Rupture par accumulation des endommagements.

Les résultats obtenus montrent que la perte de rigidité jusqu'à la rupture de l'éprouvette se déroule :

- au début, une réduction progressive qui caractérise la totalité de la durée de vie en fatigue suivie par une phase très courte, là où la perte de rigidité s'accélère jusqu'à la ruine totale de l'éprouvette.

La définition d'un critère de dépouillement conduit, au tracé des diagrammes d'endurance. Le plus connu est le diagramme de Wöhler qui représente en ordonnée la valeur de la sollicitation imposée et en abscisse la durée de vie en coordonnées logarithmiques.

• **Critère de durée de vie :**

Pour le dépouillement des courbes obtenues par les essais de fatigue, la spécificité du comportement des matériaux composites ainsi que le mode de contrôle de l'essai nous obligent à définir un critère de fin d'essai. La rupture complète de l'échantillon est considérée comme un critère de rupture (N_r).

Les courbes d'endurance sont tracées à partir des courbes de perte de raideur en fonction du nombre de cycles (voir chapitre IV p91). Les résultats sont représentés sous forme de courbes d'endurance ou courbe S-N : amplitude de la contrainte (S : stress (σ)) ou de la déformation (S : strain (ε)) maximum en fonction du nombre de cycles (N) correspondant à un endommagement donné représentés par les courbes ci-après.

Nous avons les critères de 5% 10% et 20% pour le dépouillement des courbes des essais de fatigue.

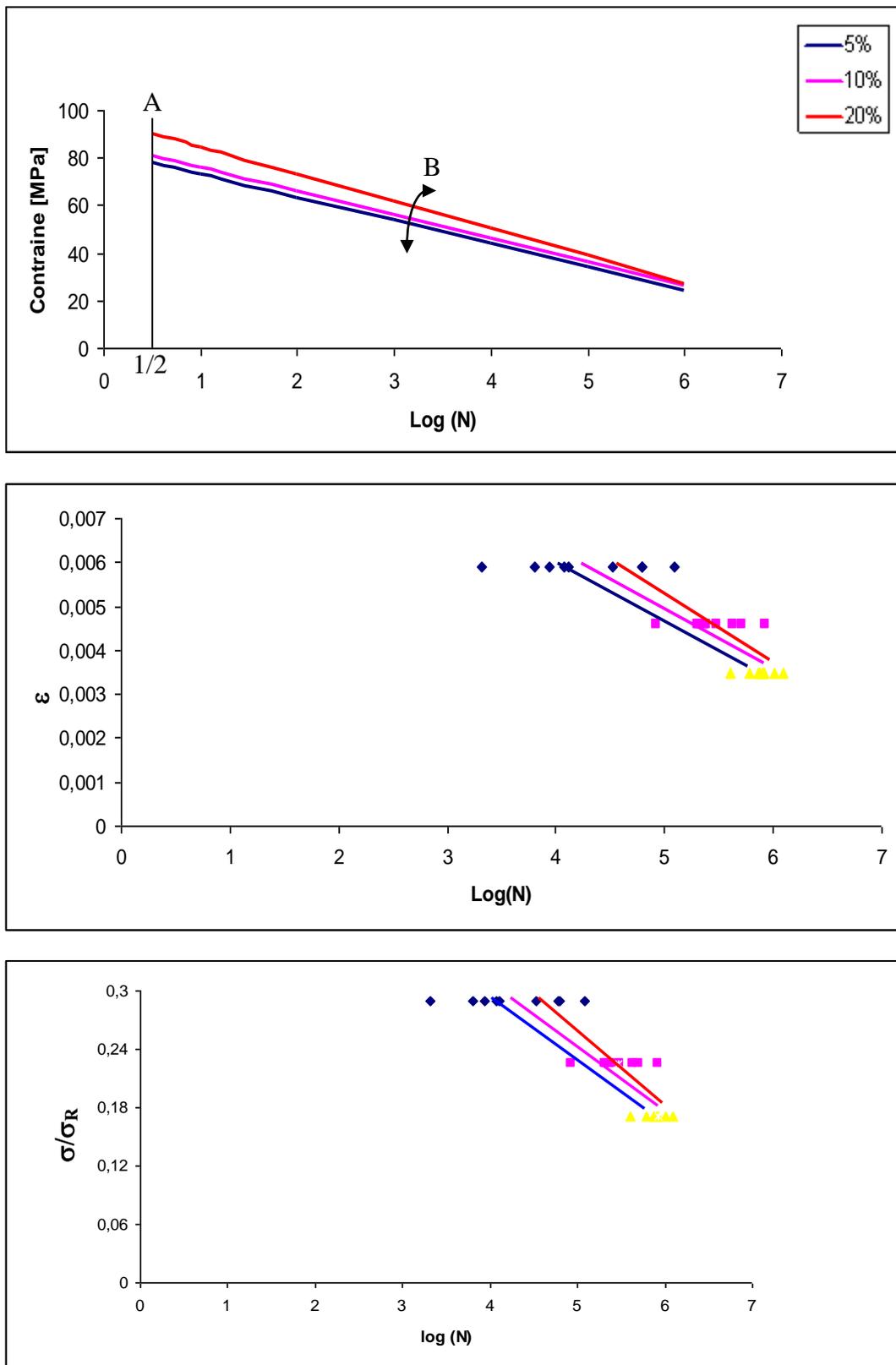


Figure V.34 : Courbe de Wöhler des éprouvettes non vieilles.

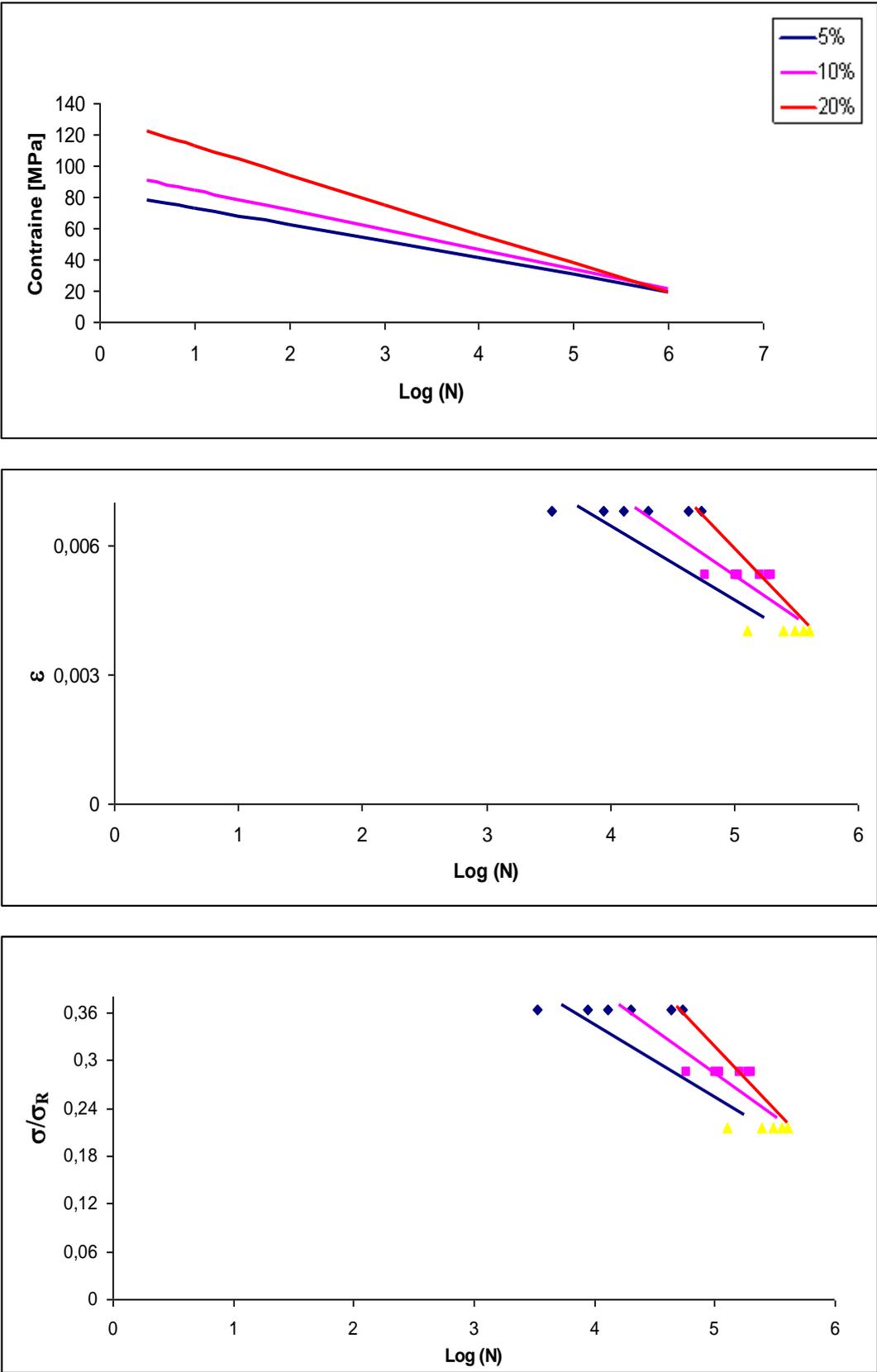


Figure V.35: Courbe de Wöhler des éprouvettes vieilles.

Les Figures V.34 et V.35 donnent respectivement les courbes d'endurance des éprouvettes à l'état initial et vieilli en considérant les critères de fin de vie de 5%, 10% et 20%. Dans tous les cas, la courbe d'endurance peut être représentée par une droite de régression tracée à partir des valeurs ε , $\text{Log } N_x$. Nous obtenons une relation linéaire qui peut s'écrire sous la forme :

$$\varepsilon_{\max} = A - B \text{Log} N_x \quad (\text{V.12})$$

où

ε_{\max} est la déformation maximale imposée sur la fibre la plus sollicitée, N_x , le nombre de cycles qui correspond à une perte de raideur de x%.

A, la valeur (extrapolée) de la déformation donnant une perte de raideur de x%(5% ,10% et 20%) pour un demi cycle.

B : est la pente de la droite d'endurance. Homogène à une vitesse, cette valeur correspond au taux de chute de la déformation maximale admissible qui s'exprime en %

Les résultats obtenus sont donnés par le tableau V.14 :

	$\sigma = f(\log N)$	$\% \varepsilon_{\text{rupture}} = f(\log N)$	$\% \sigma_{\text{rupture}} = f(\log N)$
Etat vierge	$82,831 - 9,7421 \log N_5$	$31,791 - 3,7391 \log N_5$	$55,394 - 6,5152 \log N_5$
	$85,575 - 9,8767 \log N_{10}$	$32,844 - 3,7907 \log N_{10}$	$57,23 - 6,605 \log N_{10}$
	$95,826 - 11,423 \log N_{20}$	$36,788 - 4,384 \log N_{20}$	$64,084 - 7,639 \log N_{20}$
Etat vieilli	$83,78 - 10,755 \log N_5$	$57,695 - 7,4065 \log N_5$	$70,904 - 9,1022 \log N_5$
	$96,81 - 12,649 \log N_{10}$	$66,668 - 8,7106 \log N_{10}$	$81,931 - 10,705 \log N_{10}$
	$131,4 - 18,785 \log N_{20}$	$90,488 - 12,936 \log N_{20}$	$112,2 - 15,898 \log N_{20}$

Tableau V.14 : Evolution des sollicitations en fonction du critère de fin d'essai

L'analyse du comportement en fatigue d'un matériau repose donc sur la connaissance des deux paramètres de l'équation V.12, A et B. Une bonne tenue en fatigue s'obtient avec une valeur de A élevée associée à une valeur de B aussi faible que possible.

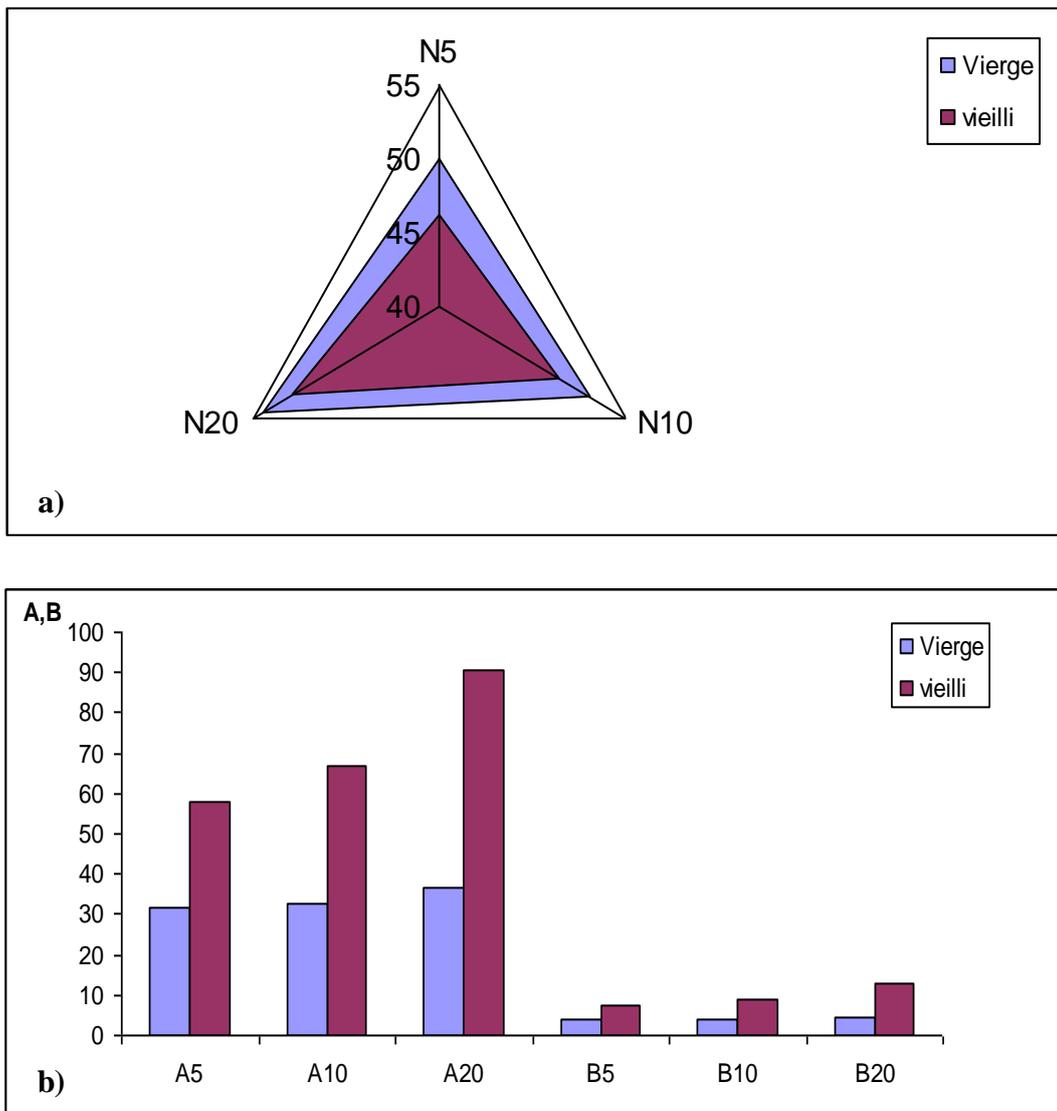


Figure V.36 : Comparaison des résultats obtenus lors de l'essai de fatigue.

L'analyse des résultats obtenus, montre une grande dispersion de la durée de vie. Cependant, il ressort que l'ensemble des résultats converge vers l'unité pour des faible nombre de cycles en raison du type de sollicitation. Le cycle symétrique réduit la durée de vie, parce que les deux faces sont sollicitées en traction et compression. Ainsi que la fixation dans les mors entraîne souvent des artefacts (rupture au voisinage des mors).

D'après les figures V.34 et V.35, nous avons remarqué que l'endommagement de 5% est continu. A un certain nombre de cycles (10%, 20%) les lignes se coupent et s'inverse dans le cas des éprouvettes vieilles.

En ce qui concerne l'influence du vieillissement (figure V.36b), il apparaît que les composites vieillis résistent moins bien à l'accumulation des efforts (B grand). Comme nous avons pu constater également la diminution de nombre de cycles (figure V.36a).

La contrainte à appliquer au niveau du matériau pour provoquer un endommagement de 5% ,10% et 20% pour un demi-cycle sont regroupées au tableau V.15.

	Contrainte	Contrainte
	[MPa]	[MPa]
	Non vieilli	vieilli
5%	77,96	78 ,40
10%	80,64	90,48
20%	90,11	122

Tableau V.15 : Valeurs de contraintes pour ½ cycle.

V.6. Analyse des faciès de rupture en fatigue

Il nous paraît très important de différencier les mécanismes d'endommagement. Pour observer ces mécanismes, les extrémités des échantillons testés en fatigue ont été analysées au MEB (figure V.37) (voir annexe 7)

Il s'agit principalement de mécanismes de microfissuration de la matrice, de décohésion de l'interface et de rupture de fibres.

D'après les micrographies obtenues on constate la présence des 3 mécanismes :

- La rupture de la matrice par fissuration observée sur la figure V.37.a ;
- La figure V.37.b montre la rupture transversale des fibres ;
- Dans la zone c de la figure V.37 on remarque la décohésion interfacial

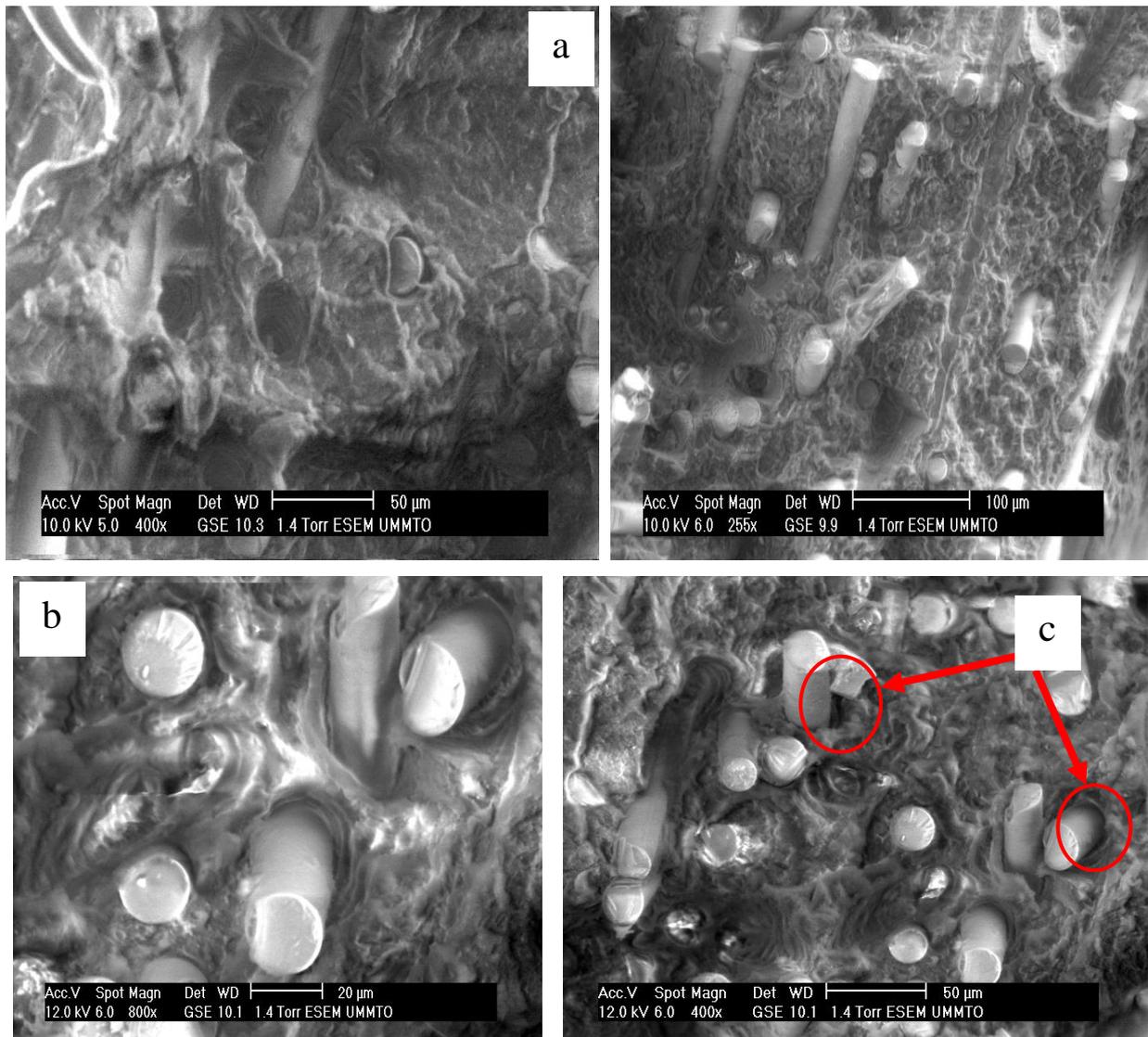


Figure V.37 : Faciès de rupture en fatigue.

Conclusion

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

Conclusion

et

Perspectives

Le présent mémoire a pour but la caractérisation mécanique en quasi statique et en fatigue d'un composite à matrice organique renforcés par des fibres de verre discontinues.

Dans cette étude un vif intérêt a été porté sur l'effet du vieillissement et l'orientation des fibres sur les propriétés mécaniques du matériau.

L'analyse de l'ensemble des résultats des essais quasi statiques et de fatigue nous a conduits aux conclusions suivantes :

- le comportement du matériau est anisotrope ;
- le module et la contrainte maximale des éprouvettes longitudinales sont nettement supérieurs à ceux des éprouvettes transversales ;
- ce composite supporte des déformations importantes dans le sens transversal ;
- les propriétés mécaniques diffèrent selon l'endroit où les éprouvettes sont découpées par rapport à l'orifice d'injection;
- l'humidité provoque la dégradation des caractéristiques mécaniques du matériau;
- le talc ralentit la diffusion de l'eau dans le matériau.
- la tenue en fatigue globalement plus faible sur les échantillons vieillis ;
- le type de fixation des éprouvettes libre/encastree provoque des contraintes supplémentaires pouvant masquer le comportement réel du matériau ;
- l'introduction d'un critère de fin d'essai N_x pour le dépouillement des courbes de fatigue.

Perspectives :

- Il serait envisageable de modifier la géométrie de l'essai afin d'éviter l'encastrement et d'opter pour des essais libre/libre ($0 < R < 1$) ;
- intégrer plusieurs paramètres : l'effet de la vitesse, la température, le taux d'humidité HR ;
- il serait intéressant de déterminer les propriétés mécaniques de ce matériau dans différents milieux couplés avec différents températures ;
- d'étudier la réponse du matériau avant la saturation ;
- varier le taux de renfort et d'étudier en particulier l'effet du taux de charges ;
- étudier l'effet des faibles impacts sur le comportement en service du matériau.



Bibliographie



[1] **Damien DUCRET, thèse doctorat**

Elasticité anisotrope et endommagement des matériaux composites : caractérisation ultrasonore et modélisation micromécanique, Institut national des sciences appliquées de LYON, juillet 2000.

[2] **ELHADROUZ Mourad**

Les matériaux composites: propriétés, modélisation et utilisation industrielle dans l'automobile, ARTS et Métiers ParisTech, Tobias Mueller, Janvier 2008.

[3] **Jean-Marie BERTHLOT**

Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures
4^{ème} édition, Ed TEC&DOC, Lavoisier, 2005.

[4] **Pierre JACQUINET**

Utilisation des matériaux composites ; Edition HERMES, Paris 1991.

[5] **El Hadji Babacar LY, thèse doctorat**

Nouveaux matériaux composites thermoformables à Base de Fibres de Cellulose, institut national polytechnique de GRENOBLE, Janvier 2008.

[6] **Jean-Paul BAILON et J.M DORLOT**

Des matériaux, 3^{ème} édition, Ecole Polytechnique de MONTREAL, 2000.

[7] **L'industrie française des matériaux composites**

Etude stratégique réalisée Nodal consultants pour le compte de la iGITIP/SIM.
Louis Berreur Bertrand de maillard, Stanislas nösperger,
17 décembre 2001, Rév.2 du13 mai 2002.

[8] **Daniel Gay**

Matériaux composites, 5^{ème} Edition révisée, HERMES, Lavoisier 2005.

[9] **Glossaire des matériaux composites**

CARMA, Actualisation octobre 2006.

[10] **P.E Bourban, Leif Carlsson, Jean Pierre Mercier et J. Anders E. Manson**

Matériaux composites à matrices organique, presses polytechniques et universitaires ROMANDES, 2004.

[11] **Maurice REYNE**

Technologie des composites, édition HERMES, 1990.

[12] **Damien MARQUIS, Eric GUILLAUME**

Tenue au feu des composites, Etat de l'art de l'utilisation des matériaux composites sandwichs dans le milieu naval, EMC PARIS, juillet 2007

[13] **Claude Bathias et Coll**

Matériaux composites ; L'usine Nouvelle, DUNOD, Paris 2005.

[14] **DRIS Locif**

Evaluation simultanée des vitesses de propagation et d'atténuation des ultrasons dans des matériaux composites et polymériques ; université M'hand Bougara, BOUMERDES, 2007.

[15] **Alain BOUDET**

Voyage au cœur de la matière plastique, les microstructures des polymères, CNRS éditions, Paris 2003.

[16] **BOUREGHDA HICHEM, mémoire de magister**

Etude de l'influence de la mise en forme sur la cristallisation et les propriétés physiques des polymères, université Hadj LAKHDAR – BATNA, 2006.

[17] **Claude Duval**

Polypropylène. Article A3 320. Techniques d'Ingénieur.

[18] **Bénédicte BONNET, thèse doctorat**

Comportement au choc de matériaux composites pour application automobiles
docteur de l'école nationale supérieure des Mines de PARIS, Avril 2005.

[19] **J. PAUPERT, A. DAHOUN, C. G'SELL, J.M. HIVER**

Caractérisation du comportement plastique en traction uniaxiale des
polypropylènes chocs. Laboratoire de physique des matériaux (UMR-CNRS
7556) Ecole des Mines de NANCY, septembre 2004.

[20] **Abir AL-MAGHRIBI, thèse doctorat**

Comportement des matériaux composites à fibres courtes :
Applications à l'impact basse vitesse, université Paul SABATIER de TOULOUSE,
Septembre 2008.

[21] **Eric Ségarda, Salim Benmedakhene, Abdel Laksimi et Dawei Lai**

Influence de l'interface fibre/matrice sur le comportement jusqu'à rupture d'un
polypropylène renforcé de fibres de verre courtes.
Mécanique & Industries, AFM, EDP Sciences 2005.

[22] **Patricia KRAWCZAK.**

Essais des plastiques renforcés, Article AM 5 405, Techniques d'Ingénieur.

[23] **TEKLAL Fatiha, Mémoire de magister**

Etude micromécanique des interfaces dans les composites à matrice organique :
cas des éprouvettes modèles, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou,
Février 2010.

[24] **Patricia KRAWCZAK**

Essais mécaniques des plastiques, caractéristiques instantanées,
Article AM3 510, Techniques d'Ingénieur.

[25] **J. Molimard**

Cours de mécanique expérimentale. Ecole nationale supérieure des mines de Saint-Etienne, 2005.

[26] **Patricia KRAWCZAK**

Essais mécaniques des plastiques, caractéristiques à long terme et ténacité
Article AM 3 511, Techniques d'Ingénieur.

[27] **G. CAILLETAUD, M. TIJANI, M. BLETRY, E. HERIPRE, A. ROUABHI;**

Mécanique des matériaux solides, Ecole nationale supérieur des mines de PARIS, 1^{ère} année, Mars 2007.

[28] **Sylvie Pommier**

Science des matériaux (LA 314), 2005-2006.

[29] **Bruno MORTAIGNE,**

Vieillessement des composites mécanismes et méthodologie d'étude
Article AM 5 320, Techniques d'Ingénieur.

[30] **Yves Perrot, thèse doctorat**

Influence des propriétés de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites verre/polyester utilisés en construction navale de plaisance - cas des résines polyester limitant les émissions de styrène.
Novembre 2006.

[31] **Jean-François LEBEL, thèse doctorat**

Etude des effets de l'humidité sur les composites recouverts de Gelcoat, Ecole polytechnique de MONTRÉAL, Septembre 1999.

[32] **Khedoudja LAOUBI, mémoire de magister**

Etude du vieillissement d'un matériau composite en verre/polyester insaturé utilisé dans la fabrication des bateaux de pêche et de plaisance,
Université m'Hand BOUGARA de BOUMERDES, 2009.

[33] **Caroline MONTER**

Modélisation de la cinétique de diffusion de l'eau dans les polymères, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers (ENSAM), laboratoire de transformation et de vieillissement des polymères, PARIS ,2000

[34] **Julien MERCIER, thèse doctorat**

Prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans le dimensionnement de structures en matériaux composites, Novembre 2006.

[35] **Lucien FIORE, thèse doctorat**

Contribution à l'étude du comportement en fatigue de matériaux composites à renfort verre unidirectionnel, Ecole de centrale de LYON, Novembre 1988.

[36] **Jean-Claude Charmet.**

Mécanique du solide et des matériaux, ESPCI - Laboratoire d'Hydrodynamique et Mécanique Physique.

[37] **Mohamad JABBADO, thèse doctorat**

Fatigue polycyclique des structures métalliques : durée de vie sous chargement variables, Ecole polytechnique, ALGER, Mars 2006.

[38] **J.P. BOEHLER, P. HAMELIN & G. VERCHERY**

Comportement des composites à renfort tissus comportement dynamiques des composites, éditions PLURALIS 1990.



Annexes

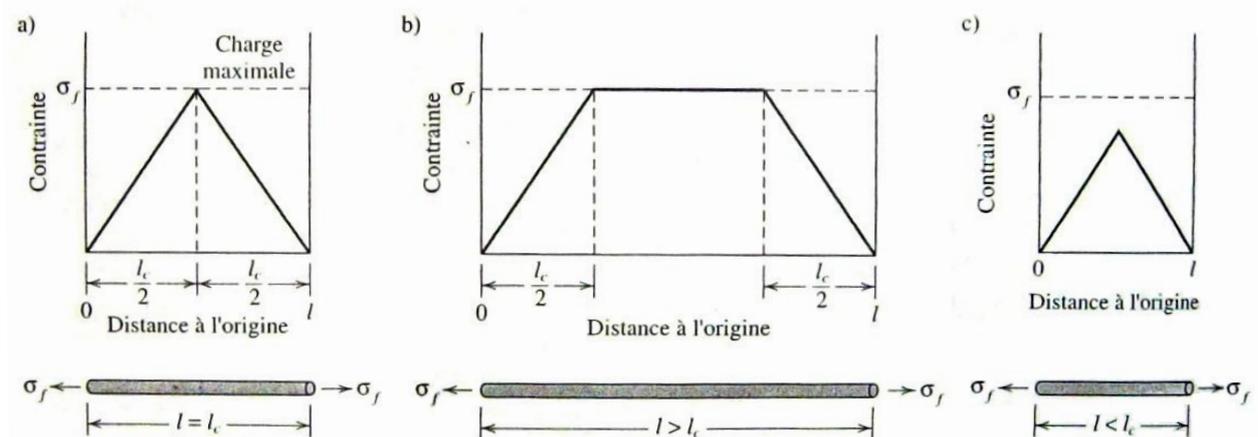


ANNEXE 1

La longueur critique de la fibre dépend de son diamètre d et de sa résistance à la rupture σ_f . Elle dépend également de τ_c , qui représente la plus petite des deux grandeurs suivantes : la résistance de la liaison fibre-matrice ou la limite d'élasticité en cisaillement de la matrice. L'équation suivante définit la relation entre tous ces paramètres :

$$l_c = \frac{\sigma_f \cdot d}{4\tau_c}$$

La figure (a) indique la répartition du transfert de charge sur l'axe d'une fibre de longueur l_c soumise à une contrainte σ_f . La charge est maximale au centre axial de la fibre. Si la longueur de la fibre augmente, le renforcement du composite croît, comme le montre la courbe de la figure (b), dans laquelle la contrainte appliquée est toujours σ_f mais la longueur l de la fibre est supérieure à l_c . A la figure (c), la longueur de la fibre est inférieure à l_c .



Si la longueur des fibres est nettement supérieure à l_c ($l > 15 l_c$, en général), les fibres sont dites continues ou longues. Sinon, elles sont dites discontinues ou courtes. Si la longueur des fibres est sensiblement inférieure à l_c , la matrice se déforme autour de la fibre, le transfert de charge est presque nul et le renforcement est faible, semblable à celui qu'on peut obtenir par des particules. Seules des fibres continues renforcent sensiblement le composite.

ANNEXE 2

Le principe du modèle consiste à déformer l'éprouvette en flexion trois points dans le domaine élastique.

Modèle de Fisher

Fisher et al a proposé les formules suivantes afin de déterminer les modules d'élasticité et de cisaillement.

Cette méthode consiste à prendre 2 élancements

$$E_{11} = \frac{K_1 K_2}{4 \cdot b} \left| \frac{C}{B} \right|$$

$$G_{12} = - \left(\frac{3}{8} \right) \left(\frac{K_1 K_2}{b} \right) \left| \frac{C}{A} \right|$$

Avec

$$A = K_1 \ell_1^3 - K_2 \ell_2^3$$

$$B = K_1 \ell_1 - K_2 \ell_2$$

$$C = \ell_1 \ell_2^3 - \ell_2 \ell_1^3$$

ℓ : élancement

$$K_1 = \frac{P_1}{Y_1}$$

$$K_2 = \frac{P_2}{Y_2}$$

		Transversal		Longitudinal	
Elancement		E11	G12	E11	G12
10	16	3582,17	496,47	10208,1	417,68
	20	4606,93	470,47	10064,77	434,57
	25	4630,04	455	10254,16	412,63
	30	4767,09	382,89	10751,43	367,08
	35	4917,17	329,1	10918,94	354,69
	40	4599,93	475,39	10686,32	372,24
16	10	3582,17	496,47	10208,1	417,68
	20	6675,88	49,84	9913,97	526,83
	25	5283,44	75,03	10273,76	399,84
	30	5182,34	78,76	10891,86	290,38
	35	5231,02	76,9	11042,74	273,38
	40	4756,8	102,55	10744,74	309,67
20	10	4606,93	470,47	10064,77	434,57
	16	6675,88	49,84	9913,97	526,83
	25	4648,59	356,21	10518,05	290,44
	30	4855,45	190,43	11210,32	199,65
	35	5026,94	140,35	11266,64	195,02
	40	4585,72	494,84	10853,89	236,55
25	10	4630,04	455	10254,16	412,63
	16	5283,44	75,03	10273,76	399,84
	20	4648,59	356,21	10518,05	290,44
	30	5038,92	102,56	11856,32	126,81
	35	5185,2	82,76	11583,36	141,69
	40	4571,45	772,27	10941,8	202,09
30	10	4767,09	382,89	10751,43	367,08
	16	5182,34	78,76	10891,86	290,38
	20	4855,45	190,43	11210,32	199,65
	25	5038,92	102,56	11856,32	126,81
	35	5315,77	62,68	11400,3	176,52
	40	4410,7	138,71	10655,77	503,15
35	10	4917,17	329,1	10918,94	354,69
	16	5231,02	76,9	11042,74	273,38
	20	5026,94	140,35	11266,64	195,02
	25	5185,2	82,76	11583,36	141,69
	30	5315,77	62,68	11400,3	176,52
	40	3846,15	23,33	10091,75	272,04
40	10	4599,93	475,39	10686,32	372,24
	16	4756,8	102,55	10744,74	309,67
	20	4585,72	494,84	10853,89	236,55
	25	4571,45	772,27	10941,8	202,09
	30	4410,7	138,71	10655,77	503,15
	35	3846,15	23,33	10091,75	272,04

La méthode de Fisher modifiée

La déformation en flexion des matériaux composites, dans le cas général, comporte une part non négligeable due au cisaillement transverse. Il est de ce fait nécessaire d'intégrer cette contribution dans le comportement élastique du composite.

Modèle de Fisher inverse:

Le principe du modèle consiste à déformer l'éprouvette en flexion trois points.

- Calcul de la flèche :

On a d'une part la flèche due à la flexion pure qui s'exprime par :

$$f_e = \frac{P_e.L^3}{48EI} = \frac{P_e.L^3}{48E \frac{bh^3}{12}} = \frac{P_e.L^3}{4Ebh^3} = \frac{P_e.\beta^3}{4Eb} \quad 1$$

Où:

P : charge appliquée,

E : module de résistance apparent de flexion,

b : largeur d'éprouvette

$\beta = L/h$: élancement.

D'autre part la flèche totale avec prise en compte du cisaillement transverse, s'exprime comme suit :

$$f_T = \frac{P.L^3}{4bh^3.E} \left[1 + \alpha \left(\frac{E}{G} - \nu \right) \frac{1}{\beta^2} \right] \quad 2$$

Où :

P : charge appliquée,

E : module de Young,

G: module de cisaillement,

L, b, h : dimensions d'éprouvette,

ν : coefficient de Poisson,

α : coefficient d'anisotropie.

$$\alpha = \frac{12+11\nu}{10(1+\nu)} \quad 3$$

On a pour les matériaux composites :

$$\nu \ll \frac{E}{G}$$

$$f_T = \frac{P.L^3}{4bh^3.E_{11}} \left(1 + \alpha \frac{E_{11}}{G_{12}} \cdot \frac{1}{\beta^2} \right) \quad 4$$

$$f_T = \underbrace{\frac{P.\beta^3}{4bE_{11}}}_1 + \underbrace{\frac{P.\beta^3}{4bE_{11}} \cdot \frac{\alpha E_{11}}{G_{12}} \cdot \frac{1}{\beta^2}}_2 \quad 5$$

1 : contribution du fléchissement.

2 : contribution du cisaillement

Avec :

E_{11} : module de Young longitudinal du composite remplace E

G_{12} : module de cisaillement transversal, remplace G.

$\nu_{12} \cong 0.2$ à 0.3 pour $V_f = 0.5$ à 0.6 .

pour $\nu_{12} = 0.25$, on trouve :

$$f_T = \frac{P \cdot \beta^3}{4bE_{11}} \left(1 + 1.18 \frac{E_{11}}{G_{12}} \cdot \frac{1}{\beta^2} \right) \quad 6$$

pour un même élanement, les deux flèches données par les relations (1) et (6) sont égales :

$$\frac{P.\beta^3}{4bE_{app}} = \frac{P.\beta^3}{4bE_{11}} \left(1 + 1.18 \frac{E_{11}}{G_{12}} \cdot \frac{1}{\beta^2} \right) \quad 7$$

D'où :

$$\frac{1}{E_{app}} = \frac{1}{E_{11}} + \frac{1.18}{G_{12}} \cdot \frac{1}{\beta^2} \quad 8$$

l'équation 8 est de la forme : $y = Ax + B$ avec $A = 1.18/G_{12}$, $B = 1/E_{11}$.

En faisant varier l'élanement pour la même éprouvette, on calcule le module de résistance en flexion qui lui est associé.

On construit la droite d'équation :

$$\frac{1}{E_{app}} = f \left(\frac{1}{\beta^2} \right) \quad 9$$

- théoriquement on identifie :
 $1.18/G_{12}$: pente de la droite 9,
 $1/E_{11}$: l'ordonnée à l'origine

En pratique à partir d'une certaine valeur de β , la courbe tend vers une valeur fixe de $1/E_{app}$. Ceci s'explique par le fait que pour des élancements importants, le cisaillement transverse est négligeable et le matériau se comporte en flexion pure.

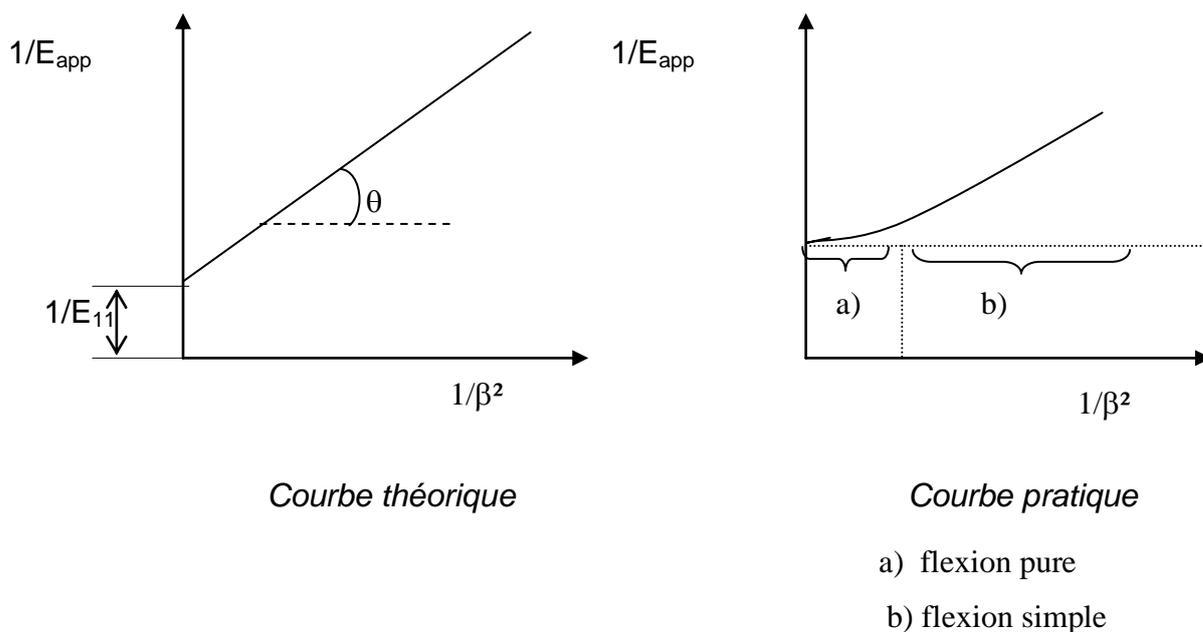


Figure : Courbe $1/E_{app} = f(1/\beta^2)$

Dans notre expérimentation ce modèle est utilisé pour le calcul des deux caractéristiques, E et G.

Remarque : La question de la détermination exacte du palier reste posée car elle n'est point facile à exprimer, parce que cela entraîne la détermination du degré d'anisotropie du matériau.

ANNEXE 3

On considère que la contrainte de traction égal à celle de compression

$$\sigma_c = \sigma_t$$

On prend $\sigma_t = \sigma_A$

$$\sigma_t = \frac{M_f}{W_f}$$

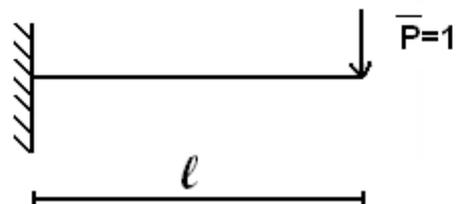
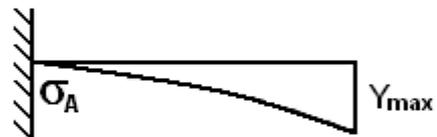
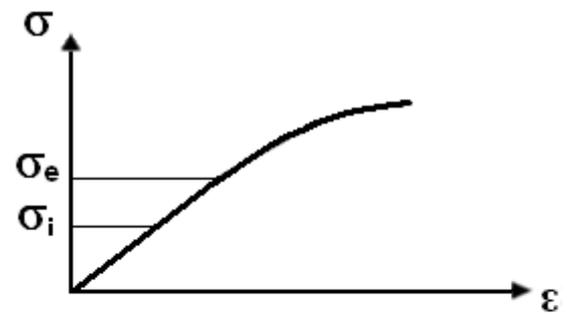
Avec $W_f = \frac{bh^2}{6}$ et $M_f = Pl$

On aura :

$$\sigma_t = \frac{6Pl}{bh^2} \Rightarrow P_t = \frac{\sigma_t bh^2}{6l}$$

$$\delta = \frac{1}{E_{app} I} \int_0^l M_f \bar{M} dx$$

$$Y = \frac{4PL^3}{E_{app} bh^3}$$



ANNEXE 4

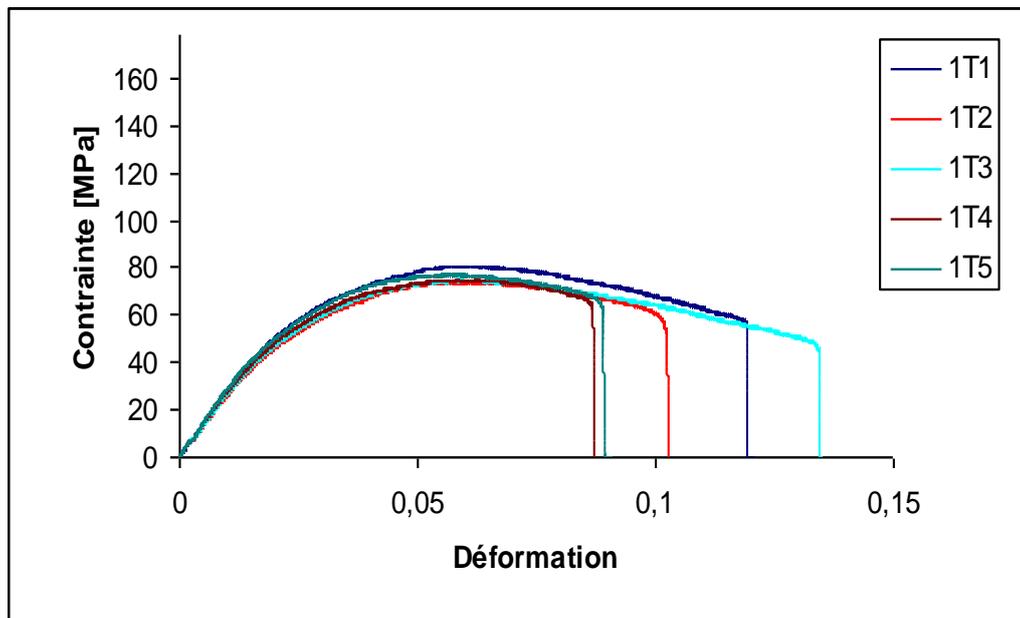


Figure 1: Courbes d'évolution contraintes / déformations du FCT.

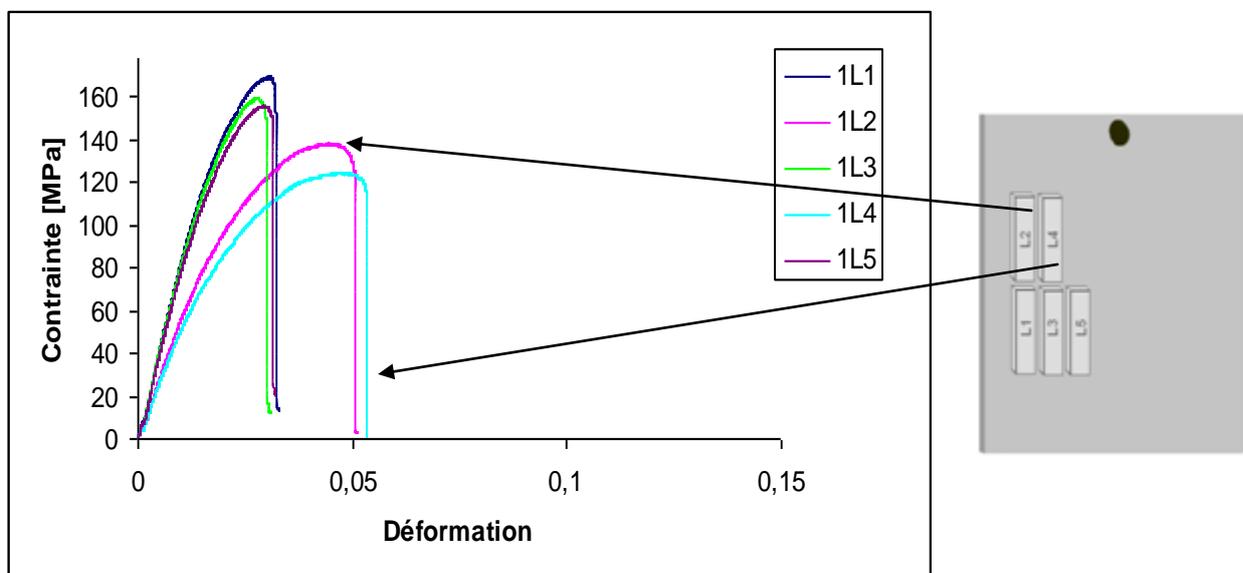


Figure 2: Courbes d'évolution contraintes / déformations du FCL.

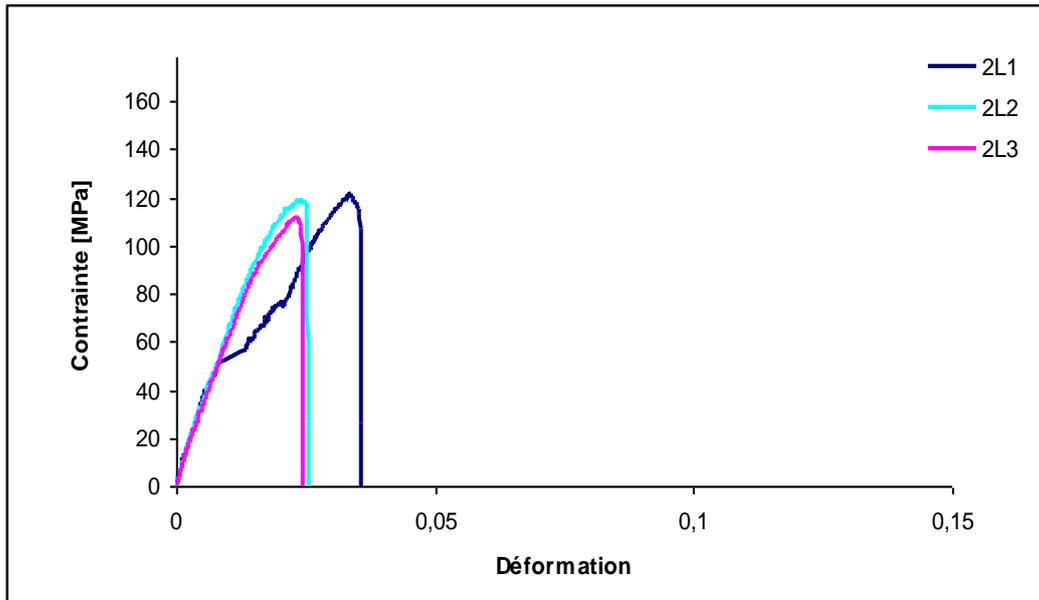


Figure 3 : Courbes d'évolution contraintes / déformations du FCL saturées.

ANNEXE 5

Taux de fibres auprès de trou d'injection

	poids creuset vide(g) (A)	poids creuset+échantillon(g) (B)	B - A	poids final(g) (C)	C - A		%
N°1	17,4584 (2E-4)	24,6536 (1E-4)	7,1953	20,2833 (4E-4)	2,8247		39,2575
N°2	17,4137 (0,027)	22,2899 (1E-4)	4,8764	19,1965 (3E-4)	1,7829		36,5618
N°3	18,8607 (1E-4)	25,9152 (1E-4)	7,0545	21,5961 (3E-4)	2,7352		38,7724
N°4	14,7403 (1E-4)	19,7208 (1E-4)	4,9806	16,6825 (8E-4)	1,9417		38,9852
						moyenne(%)	38,3942 (1,072)

ANNEXE 6

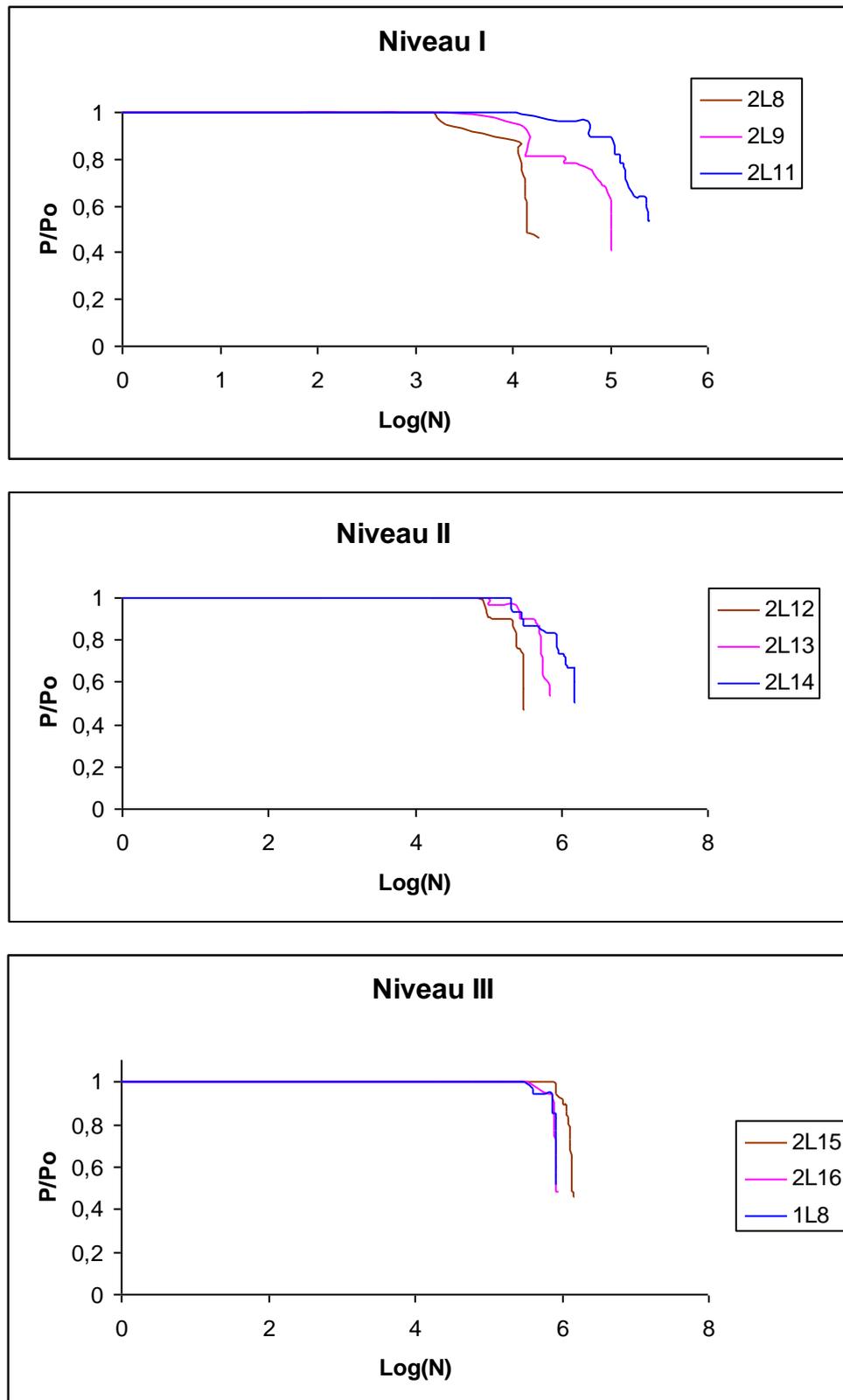


Figure 1 : Evolution de la charge (P/P_0) en fonction du nombre de cycles pour les niveaux de chargement à l'état initial

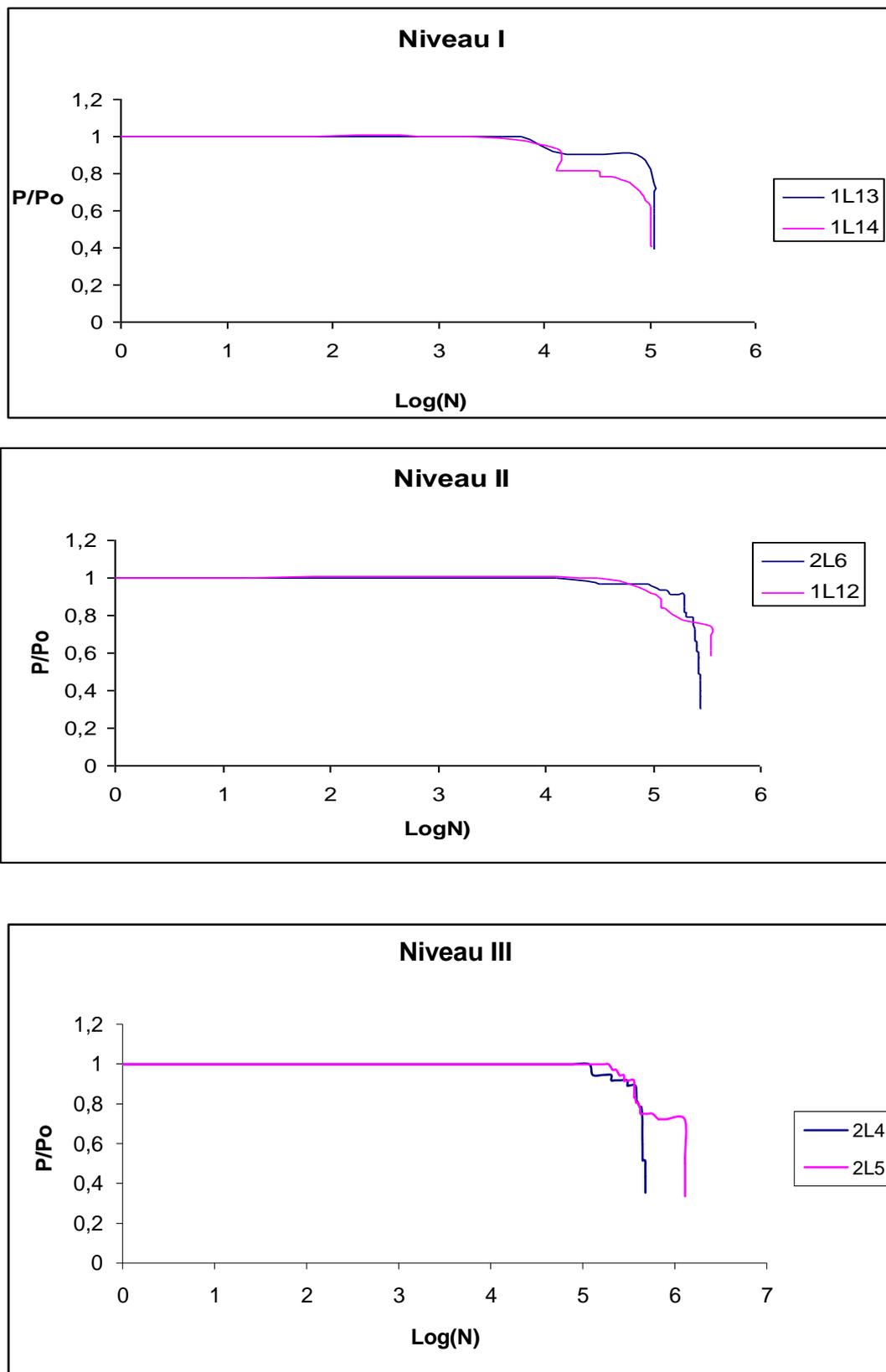


Figure 2 : Evolution de la charge (P/P_0) en fonction du nombre de cycles pour les niveaux de chargement à l'état vieilli.

ANNEXE 7

