

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



جامعة باجي مختار – عنابة

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY

Faculté : Science de l'ingénierie
Département : Génie mécanique
Domaine : Sciences et techniques
Filière : Génie mécanique
Spécialité : Construction mécanique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**CARACTÉRISATION EN FLEXION TROIS POINTS STATIQUE D'UN
MATÉRIAU COMPOSITE À FIBRES DE VERRE EN SATIN / RÉSINE
ÉPOXYDE**

Présenté par : MEGUEHOUT MAHMOUD

Encadreur : PR BEY KAMEL
ANNABA

Grade Pr- Université Badji Mokhtar

Jury de Soutenance :

LAOUAR	LAKHDAR	PR	Président
BEY	KAMEL	PR	Encadrant
BOUARICHA	AMOR	MCB	Examinateur

Année Universitaire : 2020/2021

Remerciement

Nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements à ALLAH « Tou

Puissant » pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces longues années d'étude pour que nous puissions arriver à ce jour.

En premier lieu, je tiens à remercier vivement mon encadreur Pr Bey Kamel , pour la qualité d'encadrement, son soutien et les conseils qu'il a bien voulu me prodiguer.

Je tiens également à remercier les membres du jury

Pour avoir accepté d'évaluer mon travail.

Je remercie aussi les membres de l'unité de recherche UMA/CRTI d'avoir nous aider à accomplir le travail expérimentale.

Mes remerciements aussi à mes parents et mes parents et mes amis qui m'ont soutenu et encourager jusqu'à aujourd'hui.

Résumé :

Le présent mémoire est structuré en trois(3) chapitres plus une introduction générale et une conclusion générale.

Le premier chapitre traite d'une recherche bibliographique sur les matériaux composites présentant leurs caractéristiques aussi que leurs modes d'obtention.

Le deuxième chapitre traite de la théorie des plaques stratifiées et leurs comportements en flexion trois (3) points statiques.

Le troisième et dernier chapitre traite d'une partie expérimentale relative aux essais de flexion 3 point statique d'un matériau composite stratifié.

Dans cette partie une caractérisation du matériau étudié a été réalisée en appliquant la loi des mélanges laquelle a donné différents modules théorique, suivi d'une expérimentation en flexion 3 points statique donnant deux caractéristiques ; la contrainte de flexion σ et le module d'élasticité longitudinal E lesquels sont vérifiées par un calcul analytique.

Enfin des observations sur microscope optique ont été réalisées pour déterminer les mécanismes de rupture de ce matériau.

Table des matières

Introduction générale.....	9
1 Chapitre :1.....	10
Etude Bibliographique	10
1.1 GENERALITES SUR LES COMPOSITES.....	11
1.1.1 Introduction	11
1.1.2 Définition.....	11
1.1.3 Caractéristiques générales.....	11
1.2 Classification des matériaux composites	13
1.2.1 Classification suivant la forme des constituants.....	13
1.2.2 Classification suivant la nature des constituants.....	14
1.2.3 Classification suivant le type de matériau composite	15
1.3 Fractions volumiques et massiques	15
1.3.1 Fractions volumiques	15
1.3.2 fractions massiques.....	16
1.3.3 Relations entre fractions volumiques et fractions massiques	16
1.4 Eléments constituants d'un matériau composite	17
1.4.1 Introduction :	17
1.4.2 Matrice	17
1.4.3 Charges et additifs	25
1.4.4 Renforts (fibres et tissus)	26
Différentes natures de renfort :.....	27
1.5 Procédés de mise en œuvre.....	35
1.5.1 Moulage au contact	35
1.5.2 Projection simultanée	36
1.5.3 Moulage au sac sous vide	37
1.5.4 Drapage autoclave	37
1.5.5 Procédé RTM.....	38
1.5.6 Compression thermodurcissable SMC :(Sheet Molding Compound)	39
1.5.7 L'injection des thermoplastiques renforcés TPR.....	40
1.5.8 Transformation par centrifugation	41
1.5.9 L'enroulement filamentaire	42
1.6 ARCHITECTURE DES MATERIAUX COMPOSITES.....	43
1.6.1 Monocouche :	43

1.6.2	Stratifiés:	43
	Désignation $[30^0/90_2^0/45^0/0^0/45^0]$	44
	figure1.18. 1 Désignation du stratifié [1]	44
1.6.3	Sandwichs:	49
2	Chapitre : 2.....	54
	Théorie des poutres stratifiées et analyse du comportement mécanique	54
2.1	Equation du comportement mécanique d'un stratifié	55
2.1.1	Equation constitutive	55
2.1.2	Matrice de rigidité.....	55
2.2	Stratifié symétrique	56
2.3	Flexion des poutres	56
2.3.1	Théorie classique des stratifiés	56
2.3.2	Flexion trois-points	58
2.4	Analyse du comportement mécanique.....	60
2.4.1	Concept d'homogénéisation	60
2.4.2	Détermination des modules d'élasticité du composites et approches théoriques.....	61
2.5	Endommagement et rupture des stratifiés	66
2.5.1	Microfissuration, décohésion fibre/matrice	67
2.5.2	Fissuration matricielle.....	68
2.5.3	Le délaminage	68
3	CHAPITRE 3 :	70
	PARTIE EXPERIMENTALE ESSAI EN FLEXION (3) POINTS STATIQUE.....	70
3.1	Position du problème.....	71
3.2	Présentation du matériau	71
3.3	Pyrolyse du matériau composite étudié	71
3.3.1	Découpage des échantillons avant pesage	71
3.3.2	Pesage et calcination des échantillons	72
3.3.3	Calcul des fractions massiques et volumiques.....	74
3.4	Détermination des modules d'élasticité.....	75
3.4.1	Modules des fibres et de la matrice.....	75
3.4.2	Modules du composite.....	77
3.5	Essai de flexion trois points statiques	79
3.5.1	Présentation du banc d'essai	79
3.5.2	Principe et conditions d'essai.....	80

3.5.3	Déroulement de l'essai	81
3.5.4	Éprouvettes après déformation.....	81
3.5.5	Courbes de comportement en flexion trois points statique.....	81
3.5.6	Interprétation des courbes	84
3.5.7	Résultats obtenus des courbes et des essais.....	84
3.6	Calcul analytique des caractéristiques mécaniques du matériau étudié	85
3.6.1	Calcul de la contrainte élastique maximale	86
3.6.2	Calcul du module d'élasticité longitudinal.....	86
3.6.3	Analyse des résultats	88
3.7	Observation des faciès de rupture après essais de flexion trois points statique	88
3.7.1	Interprétation des résultats au point de vue endommagement	90
	Conclusion générale.....	91

Tableaux 1. 1.	Les avantages et les inconvénients des résines polyesters[1]:	20
Tableaux 1. 2.	Les avantages et les inconvénients des résines phénoliques [1]:	21
Tableau 1. 3.	Les avantages et les inconvénients des résines époxydes [1].....	23
Tableau 1. 4.	Caractéristiques des résines polypropylènes et polyamides[1].....	24
Tableaux 1. 5	Caractéristiques moyennes des fibres et renforts [3]	31
Tableau 1. 6	Matrices les plus utilisées dans les peux des sandwiches [13].	50

Tableau 2. 1	Différentes ruptures du stratifié	66
--------------	---	----

tableau3. 1	Caractéristiques de la résine époxyde.....	71
tableau3. 2	Caractéristiques de la fibre de verre.....	71
tableau3. 3	Résultats du pesage	74
tableau3. 4	Fractions massiques du renfort et de la matrice	74
tableau3. 5	Caractéristiques mécaniques théoriques du matériau étudié	79
tableau3. 7	Dimensions des éprouvettes	80
tableau3. 8	Résultats expérimentaux des essais	85
tableau3. 9	Résultats des caractéristiques mécaniques du matériau étudié.....	87

figure1. 1 Différentes familles du renfort.	27
figure1. 2 Différentes formes de présentation de la fibre.	28
figure1. 3 Tissage cylindro-conique [10]	29
figure1. 4Tissu multidirectionnels [10]	30
figure1. 5 Fibre de verre tissé. figure1. 6 Fibre de verre mat.	33
figure1. 7 Fibre de carbone.	33
figure1. 8 Moulage au contact	36
figure1. 9 Projection simultanée.....	36
figure1. 10 Moulage au sac sous vide.	37
figure1. 11 Schéma du moulage par drapage autoclavage.	38
figure1. 12 Procédé RTM	39
figure1. 13 Compression thermodurcissable SMC[1]	40
figure1. 14 Le procédé TPR.	40
figure1. 15 Moulage par centrifugation [12].	41
figure1. 16 Moulage par enroulement Procédé filamenteux [12].	42
figure1. 17 Couche de composite [1].....	43
figure1. 18 Constitution d'un stratifié[1]	44
figure1. 19 Poutre en stratifié sollicitée en flexion [1]	49
figure1. 20 Matériaux sandwichs à âmes pleines	49
figure1. 21 Sandwich avec âme en mousse	51
figure1. 22 Sandwich avec âme Blasa	51
figure1. 23 Sandwich avec âme nulle d'abeille	52
figure2. 1 Homogénéisation d'un matériau hétérogène.	60
figure2. 2 Représentation schématique de l'arrangement réel des fibres.	61
figure2. 3 Cellule élémentaire cylindrique d'un composite unidirectionnel.	62
figure2. 4 Schéma simplifié d'une traction longitudinale.	63
figure2. 5 Schéma des différents endommagements dans la stratifié	67
figure2. 6 Décohésion fibre- matrice	68
figure2. 7 Fissure matricielle formée à partir de la coalescence des décohésions et microfissures matricielles.....	68
figure2. 8 Délaminage dans le stratifié	69
figure3. 1 Echantillons d'éprouvettes	72
figure3. 2 Microbalance	72
figure3. 3 Four type Nabertherm.....	73
figure3. 4 Structure des fibres du stratifié.....	73
figure3. 5 Machine universelle MTS 4.....	79
figure3. 6 Eprouvtes d'essais	80
figure3. 7 Emplacement de l'éprouvette.....	80

figure3. 8 Eprouvettes après essais de flexion statique	81
figure3. 9 Courbes de comportement d'essais de flexion 3 points statique de chaque éprouvette ...	84
Figure 3. 10 Microscope optique	89
Figure 3. 11 Photos microscopiques des faciès de rupture de trois éprouvettes	90

Introduction générale

Le choix du matériau joue un rôle très important dans les divers domaines de la mécanique, le matériau est choisie selon ces divers propriétés à fin de reprendre aux besoins des utilisateurs ou des constructeurs, c'est pour ça que les spécialistes dans ce domaine ne saisse de menait des recherches pour le développement des différents matériaux (métalliques, polymères, céramique, alliages....etc.)

Le développement des matériaux composites est né de la volonté d'allier les qualités techniques au besoin d'allègement dans un même matériau, qui par la suite doit s'adapter aux solutions technologiques des problèmes à résoudre.

Un matériau composite résulte de l'association de deux matériaux différents aussi bien par leur forme que par leurs propriétés mécaniques ou chimiques pour tenter d'accroître leurs performances. Les deux constituants du composite sont la matrice et le renfort, qui en se combinant donnent un matériau hétérogène souvent anisotrope, c'est-à-dire dont les propriétés diffèrent suivant les directions. Les matériaux constituant le composite sont généralement choisis en fonction de l'application que l'on souhaite en faire par la suite. Les critères de choix peuvent être, par exemple, les propriétés mécaniques ou physiques requises, la résistance à la chaleur, aux agressions chimiques ou même la méthode de mise en œuvre. Plus particulièrement, les matériaux composites à matrice organique et à renfort fibres de verre ou carbone trouvent de plus en plus d'applications dans la réalisation de pièces structurales de dimensions diverses dans de nombreux secteurs industriels tels que l'aéronautique (où l'utilisation de ces matériaux s'est imposée et ne cesse de croître rapidement), la construction automobile (pour réduire la consommation d'énergie ; en raison du coût élevé de ces matériaux, un effort particulier est fait en direction d'une réduction des coûts de fabrication), le bâtiment, l'industrie chimique, pétrochimique.....etc. Ces secteurs se sont tournés vers cette alternative pour leurs applications pour plusieurs raisons. En effet le remplacement des matériaux métalliques par ces matériaux composites a été motivé par l'allègement des structures à propriétés mécaniques égales voire supérieures à celles des pièces métalliques, le coût global modéré (matière première, mise en œuvre...).

Dans cette étude nous allons mener une recherche bibliographique sur les matériaux composites en général et sur les stratifié en particulier, les résultats d'une expérience de solliciter en flexion 3 points statique un stratifié a fibres de verre armé en satin avec la résine époxyde et l'observation des faciès de rupture du matériau étudié.

1 Chapitre :1

Etude Bibliographique

1.1 GENERALITES SUR LES COMPOSITES

1.1.1 Introduction

Il existe différentes familles de matériaux utilisés dans la technologie, les trois principaux sont : les métaux, les plastiques, les composites, etc. ...

Les matériaux composites sont des matériaux à très hautes performances mécaniques, qui peuvent être façonnés à volonté au gré du concepteur, de manière à obtenir des propriétés souhaitées en faisant un choix approprié des constituants. Ainsi la possibilité de façonner à la carte les matériaux composites modifie considérablement l'approche conventionnelle du dimensionnement des structures habituellement utilisée pour les matériaux traditionnels. Les matériaux composites se développent aujourd'hui dans pratiquement tous les domaines et sont à l'origine de formidables challenges dans diverses réalisations de hautes technologies.

Le développement de l'utilisation des matériaux composites nécessite de mettre en place les outils nécessaires à la modélisation du comportement mécanique des matériaux composites et à l'analyse de leur différentes structures.

1.1.2 Définition

Dans un sens large, le mot «composite» signifie «constitué de deux ou plusieurs parties différentes», mais dans le sens technique c'est un matériau constitué de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau hétérogène dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément [1].

1.1.3 Caractéristiques générales

Un matériau composite consiste dans le cas le plus général d'une ou de plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue, dans le cas de plusieurs phases discontinues de nature différentes, le composite est dite hybride. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée la matrice. La phase discontinue est appelée

renfort ou matériau renforçant. Une exception importante est faite à la description précédente est le cas des polymères modifiés par des élastomères, pour lesquels une matrice polymère rigide est chargée avec des particules élastomères. Pour ce type de matériaux, les caractéristiques statiques du polymère (module d'Young, contrainte à la rupture, etc.) ne sont pratiquement pas modifiées par l'adjonction de particules élastomères, alors que les caractéristiques au choc sont améliorées.

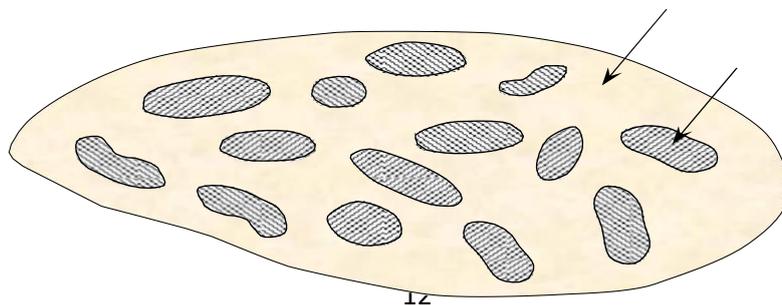
Les propriétés des matériaux composites résultent :

- Des propriétés des matériaux constituants
- De leur distribution géométrique,
- De leur interaction etc.

Ainsi, pour accéder à la description d'un matériau composite, il sera nécessaire de spécifier :

- La nature des constituants et leurs propriétés
- La géométrie de renfort, sa distribution
- La nature de l'interface matrice-renfort

La géométrie du renfort sera caractérisé par : sa forme, sa taille, la concentration du renfort, sa disposition (son orientation), etc. la concentration du renfort est habituellement mesurée par la fraction volumique (fraction en volume) ou par la fraction massique (fraction en masse). La concentration du renfort est un paramètre essentiel déterminant des propriétés du matériau composite [1].



1.2 Classification des matériaux composites

Les composites peuvent être classés suivant la forme des composant, suivant la nature des composant et suivant le type de matériau composite [1].

1.2.1 Classification suivant la forme des constituants

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

1.2.1.1 Composites à fibres

Un matériau composite est un composite à fibre si le renfort se trouve sous forme de fibre. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes, etc. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de moduler à la carte les propriétés des matériaux composites, pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotrope à des matériaux isotropes dans un plan. Le concepteur possède donc là un type de matériau dont il peut modifier et moduler à volonté les comportements mécanique et physique en jouant sur la nature des constituants, la proportion des constituants et l'orientation des fibres suivant le cahier des charges imposées. L'importance des matériaux composites à fibres justifié une étude exhaustive de leurs comportements mécaniques. Notre travail pratique sera essentiellement consacré à l'étude de ce type de matériau.

1.2.1.2 Composites à particules

Un matériau composite est un composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition aux fibres ne possède pas de dimensions privilégiées. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc. Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charge pour réduire le coût du matériau, sans en diminuer les caractéristiques. Le choix de l'association matrice-particules dépend des propriétés souhaitées. Par exemple des inclusions de plomb dans des alliages de cuivre augmenteront leur facilité d'usinage. Les cermets sont des exemples de composites métal-céramique à particules, adaptés à des utilisations à température élevées, comme les cermets à base

d'oxydes sont utilisés pour les outils de coupe à vitesse élevée, et pour les protections à haute température.

1.2.2 Classification suivant la nature des constituants

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés suivant des composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale. Divers renfort sont associés à ces matrices. Seuls certains couples d'associations ont actuellement un usage industriel, d'autre faisant l'objet d'un développement dans les laboratoires de recherche. Parmi ces composites, nous pouvant citer :

1.2.2.1 Composites à matrice organique (résine, charge), avec :

- Des fibres minérales : verre, carbone, etc.
- Des fibres organiques : Kevlar, polyamides, etc.
- Des fibres métalliques : bore, aluminium, etc.

1.2.2.2 Composites à matrice métallique (alliages légers et ultralégers d'aluminium, de magnésium, de titane), avec :

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

1.2.2.3 Composites à matrice minérale (céramique), avec :

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

Les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans le domaine des températures ne dépassant pas 200 à 300°C, alors que les matériaux à matrice métallique ou minérale sont utilisés au-delà : jusqu'à 600°C pour une matrice métallique, jusqu'à 1000°C pour une matrice minérale.

1.2.3 Classification suivant le type de matériau composite

En fonction des performances mécaniques souvent rapportées à la densité. On a ainsi introduit la notion de composite grande diffusion et de composites hautes performances

1.2.3.1 Composites de grande diffusion

Ils représentent 95 % des matériaux composites utilisés. En général, ce sont des plastiques armés ou des plastiques renforcés dont le taux volumique de renfort avoisine 30 %. Les principaux constituants de base sont les résines polyesters (résines thermodurcissables) avec des fibres de verre. Les demandeurs les plus importants sont l'industrie des transports (Automobile, ferroviaire) et la construction électrique, destinés à des fabrications en grande série, souvent très automatisés [2].

1.2.3.2 Composites de haute performance

Ils sont principalement utilisés dans l'aéronautique, leurs propriétés mécaniques, résistance et rigidité, sont largement supérieures à celles des métaux. Les constituants sont des résines époxydes renforcées par des fibres longues de verre, mais surtout de carbone ou d'aramide, le taux de renfort est supérieur à 50 %. Contrairement aux composites GD. Les demandeurs, intéressés par leurs caractéristiques mécaniques et thermiques élevées, mais aussi par des séries de productions très faibles, sont l'industrie aéronautique et spatiale, l'automobile sportive, les chantiers navals.

1.3 Fractions volumiques et massiques

Un des facteurs les plus importants qui déterminent les caractéristiques mécaniques d'un matériau composite est la proportion relative de matrice et de renfort. Cette proportion peut être exprimée soit en fraction massique facile à mesurer lors de l'élaboration du matériau, ou en fraction volumique qui intervient directement dans les modèles théoriques décrivant le comportement mécanique des matériaux. Il est donc nécessaire de savoir passer de l'une à l'autre, comme le cas de notre étude [1].

1.3.1 Fractions volumiques

Considérons un volume (v_c) de matériau composite, composé d'un volume (v_f) de fibres et d'un volume (v_m) de matrice [1].

$$v_c = v_f + v_m, \quad (1.1)$$

La fraction volumique de fibres est :

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \quad (1.2)$$

Avec $V_m = 1 - V_f$, $V_c = V_f + V_m$, (1.3), (1.4)

La fraction volumique de matrice est :

$$V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (1.5)$$

1.3.2 fractions massiques

Elles sont déterminées de la même manière à partir des masses : m_f, m_m, m_c [3].

La fraction massique de fibres est : $M_f = \frac{m_f}{m_c}$ (1.6)

m_f : Masse renfort (fibres)

m_m : Masse matrice

m_c : Masse composite

1.3.3 Relations entre fractions volumiques et fractions massiques

Les relations entre les fractions volumiques et massiques font intervenir les masses volumiques : ρ_c, ρ_f, ρ_m respectives du matériau composite, de la Fibre et de la matrice.

Les masses et les volumes sont liés par les relations :

$$m_f = \rho_f * v_f, \quad m_m = \rho_m * v_m, \quad m_c = \rho_c * v_c \quad (1.7), (1.8), (1.9)$$

En introduisant les relations (1.7), (1.8), (1.1), dans la relation (1.2) en déduit :

$$V_f = \frac{\frac{M_f}{\rho_f}}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}} \quad [3] \quad (1.10)$$

*Présence de porosités :

Il peut arriver que ρ calculée ne coïncide pas avec ρ_{exper} . Dans ce cas quand la différence est grande, cet écart est attribué à la présence de porosités. Ainsi la fraction volumique (V_p) de porosités est donnée par l'expression [1] :

$$V_p = \frac{\rho_{c.théo} - \rho_{c.expér}}{\rho_{c.théo}} \quad (1.11)$$

1.4 Eléments constituant d'un matériau composite

1.4.1 Introduction :

Un matériau composite est généralement constitué d'une matrice et d'un renfort constitué de fibres.

- La matrice elle-même est composée d'une résine (polystyrene, époxyde, ect ...) et des charges dont le but est d'améliorer les caractéristiques de la résine tout en diminuant le coût de production (d'un point de vue mécanique l'ensemble résine-charge se comporte comme matériau homogène) et matériau composite est considéré comme constitué d'une matrice et d'un renfort.

- Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques élevées alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations extérieures et de protéger les fibres des agressions extérieures.

Le type d'association matrice-renfort dépend des contraintes imposées au concepteur : caractéristiques mécaniques élevées, tenue en température, résistance à la corrosion, etc. [1]

1.4.2 Matrice

1.4.2.1 Introduction

La matrice est l'un des constituants de base des matériaux composites. C'est un matériau organique léger, facilement déformable, qui revêt trois fonctions principales : la répartition de la charge mécanique sur tous les renforts, la cohésion des fibres pour une meilleure homogénéisation de l'ensemble et la protection des renforts vis à vis du milieu extérieur (chocs thermiques ou mécaniques). La matrice doit avoir une masse volumique faible afin de conserver au composite des caractéristiques mécaniques élevées. Les résines polymères les

plus employées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables (TD) et les résines thermoplastiques ([4] [5]).

(TP). Il existe d'autres catégories de résines : les résines thermostables et les polymères thermoplastiques qui peuvent résister à des sollicitations thermiques continues de 200°C et même plus. Toutefois l'usage de ces résines reste spécifique ce qui limite leur fabrication.

1.4.2.2 Résines thermodurcissables

Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont par ordre décroissant en tonnage :

- les résines polyester insaturé : polyester condensés, vinylesters, dérivés allylique, etc.
- les résines de condensation : phénoliques, aminoplastes, furaniques, etc.
- les résines époxydes

1.4.2.2.1 Résines polyester

Les résines polyester insaturés viennent de très loin en tête dans la mise en œuvre des matériaux composites. C'est la résine la plus utilisée dans l'application composite de grande distribution. Une résine de polyester insaturé contenant un monomère (généralement le styrène) est réticulée à température ambiante par addition d'un catalyseur de type peroxyde organique et d'un accélérateur. Elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible. 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. 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 ([6] [7]) .Il existe différents types de résines [7][8] :

- Orthophtalique : la plus courante;
- Isophtalique: qui donne une meilleure tenue à l'humidité;
- Chlorée : apportant une autoextinguibilité;

- Bisphénol: possédant de bonnes caractéristiques chimiques et thermiques.

Suivant le module d'élasticité, les résines polyesters sont classées en : résines souples, résines semi-rigides et résines rigides. Les résines habituellement utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont de type rigide, et nous retiendrons pour ces résines durcies les Caractéristique suivantes [1] :

- Masse volumique..... 1200Kg/m³
- Module d'élasticité en traction 2,8à3,5 GPa
- Module d'élasticité en flexion 3à 4,5 GPa
- Contrainte à la rupture en traction 50à 80MPa
- Contrainte à la rupture en flexion 90à 130 MPa
- Allongement à la rupture en traction..... (2 à5) %
- Allongement à la rupture en flexion (7 à9) %
- Resistance en compression 90à 200MPa
- Resistance au cisaillement..... 10à 20 MPa[1]

Tableau 1. 1. Avantages et les inconvénients des résines polyesters[1]:

<u>Avantages</u>	<u>Inconvénient</u>
<ul style="list-style-type: none"> • Une bonne rigidité résultante d'un module d'élasticité assez élevé; • Un bonne <u>stabilité dimensionnelle</u>; • Une bonne mouillabilité des fibres et des tissus ; • La facilité de mise en œuvre; • <u>Une bonne tenue chimique</u>; • Un faible coût de production; 	<ul style="list-style-type: none"> • Une tenue médiocre en température: inférieur à 120°C en service continu ; • Une sensibilité à la fissuration, essentiellement dans le cas de chocs; • Un retrait important de l'ordre de 8 à10 % ; • Un mauvais comportement à la vapeur, à l'eau bouillante avec risque d'hydrolyse, d'où la nécessité de recouvrir les matériaux composites à résine polyester d'une couche de « <u>gel-coat</u> » de manière à les rendre étanches; • <u>Une inflammabilité</u>;

1.4.2.2.2 Résines de condensations

Les résines de condensation comportent les résines phénoliques, les aminoplastes et les résines furaniques [1].

1. Les résines phénoliques sont les plus anciennes des résines thermodurcissables dont la plus connue est la bakélite. Les caractéristiques de ces résines sont les suivantes:

- Masse volumique..... 1200Kg/m³

- Module d'élasticité en flexion 3GPa
- Contrainte à la rupture en traction 40MPa
- Allongement à la rupture en traction..... 2,5 %
- Contrainte à la rupture en flexion.... 90MPa
- Résistance en compression 250 MPa [1]

Tableau 1. 2. Avantages et les inconvénients des résines phénoliques [1]:

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Une excellente stabilité dimensionnelle; • Une bonne tenue à la <u>chaleur</u> <u>tau fluage</u>; • Une bonne résistance aux agents chimiques; • Un <u>faible retrait</u>; • De <u>bonnes caractéristiques mécaniques</u>; 	<ul style="list-style-type: none"> • Une mise en œuvres sous <u>pression</u> <u>donc à faible cadences</u>; • Des couleurs foncées des résines; • Un non adaptation à des utilisations alimentaires.

2. Les résines phénoliques seront donc utilisées dans le cas de pièces nécessitant une tenue élevée en température ou une bonne résistance chimique.
3. Les caractéristiques des résines aminoplastes sont voisines de celles des résines phénoliques. Aux avantages de ces résines, il faut ajouter:

- a. La possibilité d'utilisations alimentaires,
 - b. La possibilité de colorer les résines.
4. Les résines furaniques sont assez peu utilisées à cause de leur coût, trois fois plus élevé que les résines polyester. Parmi leurs avantages:
- a. Un durcissement plus rapide que les résines phénoliques,
 - b. Une grande inertie vis-à-vis des agents chimiques corrosifs.

Cette dernière caractéristique conduit à utiliser les résines furaniques dans le cas de matériaux devant résister aux produits chimiques: citernes, tuyaux, bacs, etc.[1]

1.4.2.2.3 Résines époxydes

Elles sont les plus utilisées après les résines polyesters insaturées, préférentiellement utilisées pour les composites hautes performances. Elles possèdent d'excellentes propriétés mécaniques, thermiques (130 à 180°C) et un bon comportement chimique et généralement utilisées sans charges. Par contre elles sont sensibles à l'humidité ainsi qu'aux rayons UV et ont un coût encore très élevées[1].

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont les suivantes :

- Masse volumique.....1100 à 1500 Kg/m³
- Module d'élasticité en traction.....3 à 5 GPa
- Contrainte à la rupture en traction.....60 à 80 MPa
- Contrainte à la rupture en flexion...100 à 150 MPa
- Allongement à la rupture.... (2 à 5) %
- Résistance au cisaillement..... 30 à 50 MPa

Les résines époxydes conduisent donc à un ensemble de performances élevées. Toutefois, pour bénéficier de ces performances, il est nécessaire d'avoir des durées de transformation

et surtout de recuisons très longues (de plusieurs heures à plusieurs dizaines d'heures), à des températures relativement élevées (50 à 100°C).

Tableau 1. 3 .Avantages et les inconvénients des résines époxydes [1]

<u>Avantages</u>	Inconvénient
<ul style="list-style-type: none"> • De bonnes propriétés mécaniques (en traction, flexion, compression, choc, fluage, etc.) ; • Une bonne tenue en température : 150 à 190°C en service continu ; • <u>Une excellente résistance chimique</u> ; • Un faible retrait au moulage (0,5 à 1%). • Une très bonne mouillabilité des renforts ; • <u>Une excellente adhérence aux matériaux</u> 	<ul style="list-style-type: none"> • Un temps de polymérisation long ; • <u>Un coût élevé</u> • La nécessité de prendre des précautions lors de la mise en œuvre • <u>Une sensibilité à la fissuration</u>

1.4.2.3 Résines thermoplastiques (TP)

Ce sont des résines qu'on appelle communément les plastiques, fréquemment utilisées sans renfort et qui possèdent la propriété de pouvoir être mises en forme plusieurs fois par chauffage et refroidissement dans un intervalle de température spécifique au polymère étudié.

De plus, elles présentent une aptitude à l'état liquide à se mouler facilement par plasticité. Leur mise en œuvre se fait en général par injection à haute pression pour obtenir des objets moulés, ou par extrusion pour obtenir des films, des plaques, des tubes des profilés, etc. Les principales résines thermoplastiques sont à base de polyamide, polyéthylène, polycarbonate et polychlorure de vinyle (PVC), le polypropylène (PP), etc.

Tableau 1. 4.Caractéristiques des résines polypropylènes et polyamides[1]

Caractéristiques physicomécaniques	Polypropylène	Polyamide
<ul style="list-style-type: none"> • Masse volumique (Kg /m³) • Contrainte à la rupture (MPa) • Module d'élasticité (GPa) 	<ul style="list-style-type: none"> • 900 • 20 à 35 • 1,1 à 1,4 	<ul style="list-style-type: none"> • 1140 • 60 à 85 • 1,2 à 2,5

1.4.2.4 Résines thermostables

Les résines thermostables se distinguent des autres résines, précédemment considérées, essentiellement par leurs performances thermiques qui conservent leurs propriétés mécaniques pour des températures plus élevées que 200 °C. Dans la pratique nous retrouvons pour ces résines les deux grandes familles des résines thermoplastiques et thermodurcissables. Elles sont surtout développées dans les domaines de l'aviation et de l'espace, où les laboratoires cherchent à mettre au point de nouvelles résines. Parmi les résines thermodurcissables, les résines bismaléides et polyimides sont les plus utilisées [1].

1.4.3 Charges et additifs

1.4.3.1 Introduction

Différents produits peuvent être incorporés à la résine pour lui conférer des caractéristiques particulières ou en réduire le coût [1]. L'addition de ces produits a pour fonction soit d'améliorer les caractéristiques mécaniques et physiques du produit fini, soit de faciliter la mise en œuvre.

1.4.3.2 Charges

a) Charges renforçantes :

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

- Charges sphériques;
- Charges non sphériques.

b) Charges non renforçantes:

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

1.4.3.3 Additifs

Les additifs sont ajoutés en faible quantité (quelques % et moins) et intervient comme:

- Lubrifiants et agents de démoulage,
- Pigments et colorants,

- Agents anti-retrait,
- Agents anti-ultraviolets.
- Accélérateur
- Catalyseur

1.4.4 Renforts (fibres et tissus)

Le renfort a pour rôle de supporter l'essentiel de l'effort mécanique appliqué au matériau composite grâce à ses caractéristiques mécaniques élevées (modules et limite d'élasticité, résistance mécanique...) [3].

Il se présente sous forme fibreuse ou particulaire selon les utilisations. La recherche de renforts performants s'oriente dans le cas des renforts fibreux, à quelques exceptions près, vers les verres, carbone, etc., du fait de leurs hautes performances mécaniques et de la relative maîtrise quant à leur élaboration.

D'autres fibres sont également commercialisées mais restent peu utilisées du fait de leur mise en œuvre plus complexe et de leur coût plus élevé : fibres multibrins de carbure de silicium, d'alumine et de silice,....

Les fibres de renforcements des matériaux composites proviennent de deux origines :

- Les fibres minérales: fibre de verre, de carbone , céramiques,
- Les fibres organiques.

Les qualités importantes recherchées lors de l'introduction de fibres dans une matrice sont en premier lieu un module de Young élevé, une résistance à la rupture élevée et tous deux reliés à la légèreté du matériau.

Différentes natures de renfort :

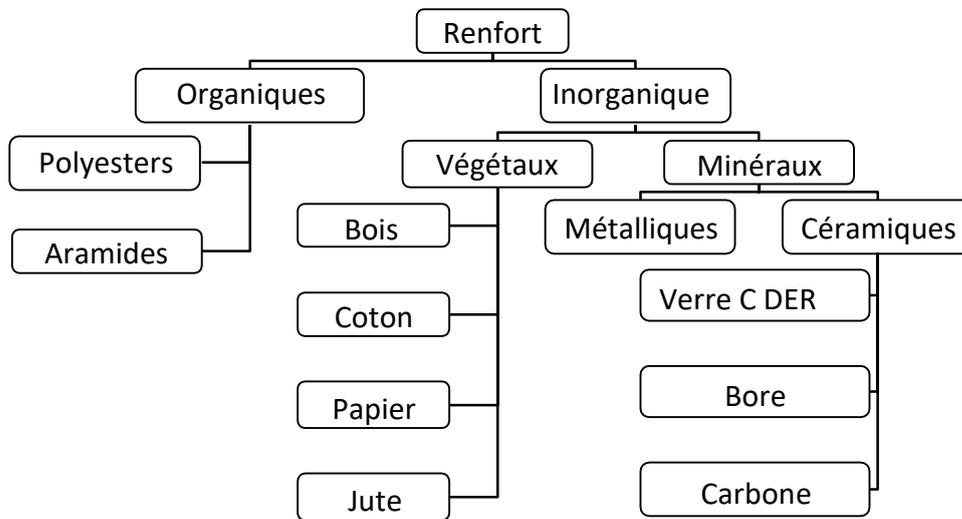


figure1. 1 Différentes familles du renfort.

Les renforts constituent une fraction volumique du matériau composite généralement comprise entre 0,3 à 0,7. Les structures composites sont anisotropes. La plupart des renforts travaillent bien en traction, mais offrent de moins bonnes performances en compression et cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée. Il existe différentes géométries et textures de renforts [3][9][10] :

- Sous forme linéique (fils, mèches, etc.) ;
- Sous forme de tissu surfacique (tissus simples ,mats, etc.);
- Sous forme multidirectionnelle (tresses, tissuscomplexes, etc.).

a) La forme linéique :

Une fibre (diamètre environ de 10 μm) est trop petite pour l'utilisation unitaire. On trouve en général, des fils ou mèches qui sont assemblés à partir de plusieurs fibres. L'unité de

masse linéique est le tex (1 tex = 1 g/km). Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère.

b) Les formes surfaciques:

Des ensembles linéaires décrits précédemment on peut réaliser les formes surfaciques suivantes:

- 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 ruban:

Ensemble de fils, stratifils ou mèches réalisé sur un métier à tisser, composé d'une chaîne et d'une trame.

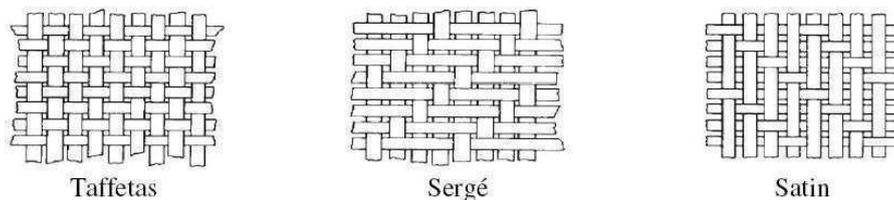


figure1. 2 Différentes formes de présentation de la fibre.

c) Les formes multidirectionnelles:

- Tresses et préformes :

Tissage cylindrique ou conique avec des entre croisements 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 des fibres de révolution très résistantes ayant un diamètre variable le long de l'axe.

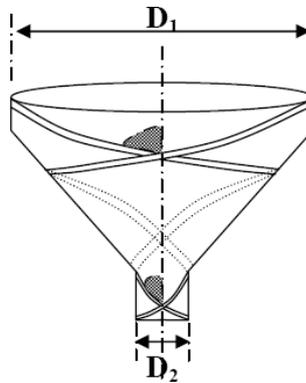
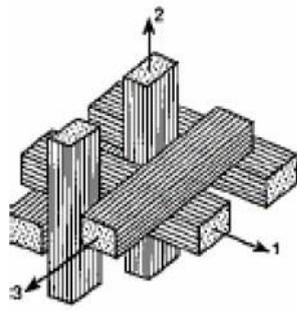


figure1. 3 Tissage cylindro-conique [10]

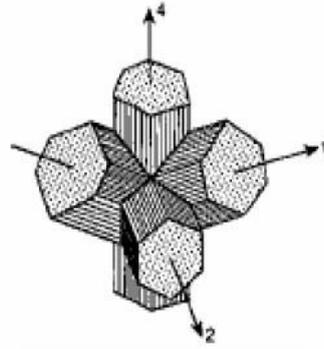
- Tissus multidirectionnels:

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 la figure(1.4).



(a) : tissage 3D



(b) : tissage 4D

figure1. 4Tissu multidirectionnels [10]

Tableau 1. 5 Caractéristiques moyennes des fibres et renforts [3]

Type de renfort	VerreE	VerreR	CarboneHM	CarboneHR	Kevlar49	Polyéthylène
Diamètre du filament (μm)«d»	16	10	6.5	7	12	-
Masse volumique (kg/m^3)« M_V »	2600	2500	1800	1750	1450	960
Module d'élasticité longitudinal(MPa)) «E»	74000	86000	390000	230000	130000	100000
Module de cisaillement (MPa) «G»	30000	-	20000	50000	120000	-
Coefficient de Poisson	0.25	0.2	0.35	0.3	0.4	-
Contrainte de Rupture en traction(MPa)« K»	2500	3200	2500	3200	2900	3000
Allongement à la rupture(%)«A»	3.5	4	0.6	1.3	2.3	-

1.4.4.1 *Fibres de verres*

Les fibres les plus employées sont les fibres de verre. Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elles sont obtenues à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore).

On distingue trois types de fibres de verre [7]:

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

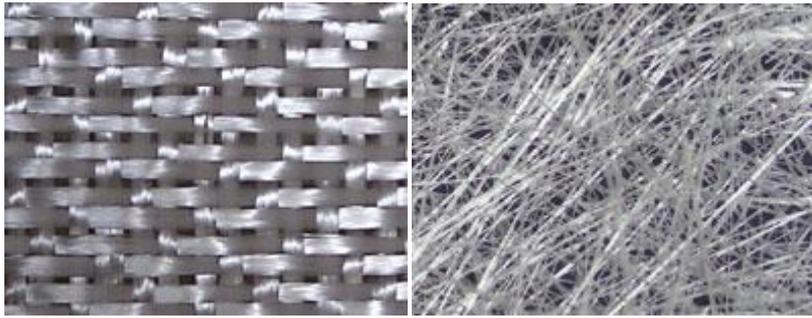


figure1. 5 Fibre de verre tissé.

figure1. 6 Fibre de verre mat.

1.4.4.2 *Fibres de carbone*

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres:

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



figure1. 7 Fibre de carbone.

1.4.4.3 *Fibres d'aramides*

Souvent appelée KEVLAR, la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes:

- Les fibres de bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles [7];
- Les fibres de haut module: employées dans le renforcement pour les composites hautes performances.

1.4.4.4 *Interface fibre-matrice*

Les propriétés d'un matériau composite résultent des propriétés de ses constituants. Les bonnes qualités des constituants ne suffisent pas pour obtenir un composite, cependant une bonne interface qui assure la compatibilité renfort matrice est indispensable.

En effet la résine doit transmettre régulièrement et presque intégralement aux fibres les efforts supportés par le matériau, ce qui nécessite une bonne mouillabilité de la fibre dans la résine.

La mouillabilité caractérise la relation physique d'un liquide en contact avec un solide, elle dépend d'une adhésion fibre résine.

Il y a deux types principaux d'adhésion:

- L'adhésion physico-chimique: qui est un assemblage par liaisons intermoléculaires entre des éléments de la résine et de la fibre telle que cette adhésion peut être expliquée par la diffusion mutuelle des molécules des plans superficiels de la fibre et de la résine, ou bien par la création des liaisons de type électrostatique par polarité des groupements négatifs et positifs de part et d'autre des constituants.
- L'adhésion mécanique : elle est définie par un accrochage de la résine dans les aspérités existant, ou créées spécialement à la surface de la fibre. Dans le cas d'un mauvais mouillage de la fibre, la résine n'imprègne pas toutes les aspérités et crée à certains endroits des défauts par rétention d'air après sa polymérisation.

1.5 Procédés 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 [3].

De nombreuses méthodes de fabrication ont été développées pour répondre aux besoins, et leurs choix dépend surtout des caractéristiques mécaniques dérivées et de la géométrie du produit, et l'importance des séries [11] [7].

Généralement le choix d'un procédé de moulage se fait en fonction de certains paramètres à savoir :

- Imprégnation du renfort par le système résineux.
- Mise en forme à la géométrie de la pièce.

- Durcissement du système:
 - soit par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables,
 - soit par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.

1.5.1 Moulage au contact

Le moulage au contact est utilisé pour les composites « grandes diffusions » ; le procédé consiste à disposer dans un moule les renforts (sous forme de mat ou de tissu) imprégnés manuellement d'une matrice, formant des couches ou plis composite. L'ensemble de ces plis forme un empilement dont la séquence est préalablement définie. La première couche a pour fonction de protéger la pièce à l'aide d'un « gel-coat ». Ensuite, les plis sont stratifiés par imprégnation des renforts (mats ou tissus) à l'aide d'une résine accompagnée de son système catalytique [12].

Pour chaque pli, un compactage manuel au rouleau est nécessaire afin de chasser l'excédent d'air et garantir une bonne imprégnation des renforts.

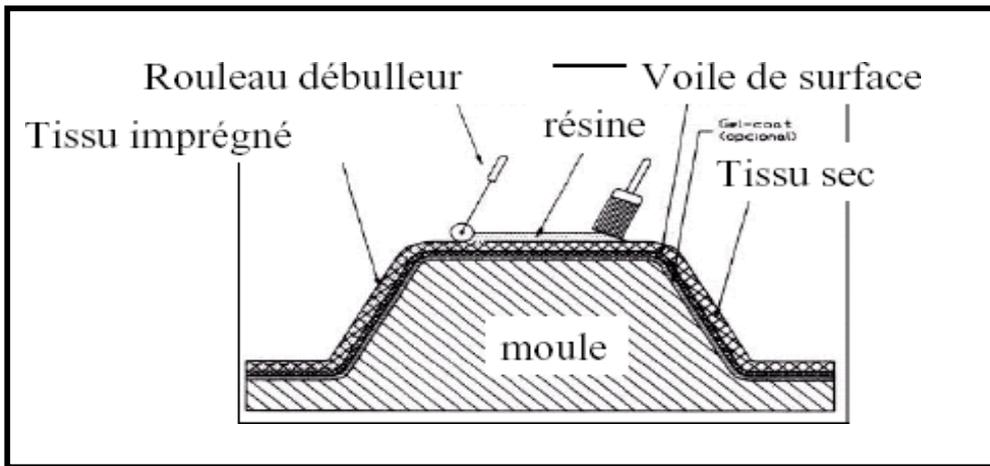


figure1. 8 Moulage au contact

1.5.2 Projection simultanée

La projection simultanée, qui est une variante du moulage au contact, permet de déposer simultanément sur le moule la résine catalysée et les fibres de renforts coupées. Cette opération s'effectue au moyen d'un pistolet et peut être automatisée. La matière projetée (résine et fibres) abouti à un renforcement de type mat qui nécessite souvent un compactage au rouleau comme pour le moulage au contact.

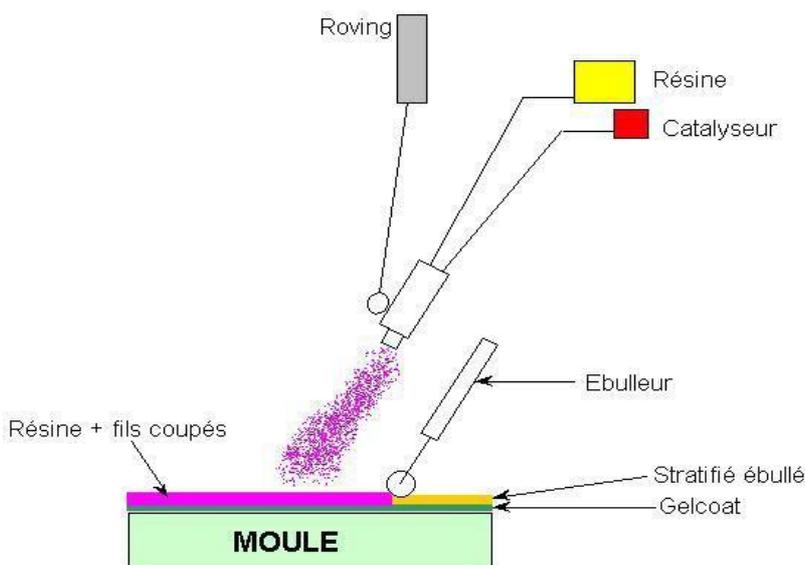


figure1. 9 Projection simultanée

Les principaux avantages de ces procédés en moule ouvert sont le faible coût de l'outillage, la facilité de mise en œuvre et la possibilité d'effectuer des structures de grandes dimensions. Cependant il y a un certain nombre d'inconvénients comme des cadences faibles, l'obtention d'un taux de renforcement modeste, une répartition irrégulière des épaisseurs, une mauvaise imprégnation des fibres et l'inclusion de bulles d'air (mauvais compactage). Ces techniques de transformation en moule ouvert conduisent aussi à des émissions importantes de styrène [12].

1.5.3 Moulage au sac sous vide

Les techniques de moulage sous vide permettent d'avoir un bon aspect des deux côtés de la pièce et un débullage soigné ; conditions non satisfaites par les procédés de moulage au contact ou en projection. Le stratifié est confectionné au contact ou en projection sur un moule, après un débullage succinct, on applique sur le stratifié une feuille simple auto-démoulante et on aspire le vide avec un appareil à dépression et enfin on laisse la pièce se polymériser à température ambiante [12]

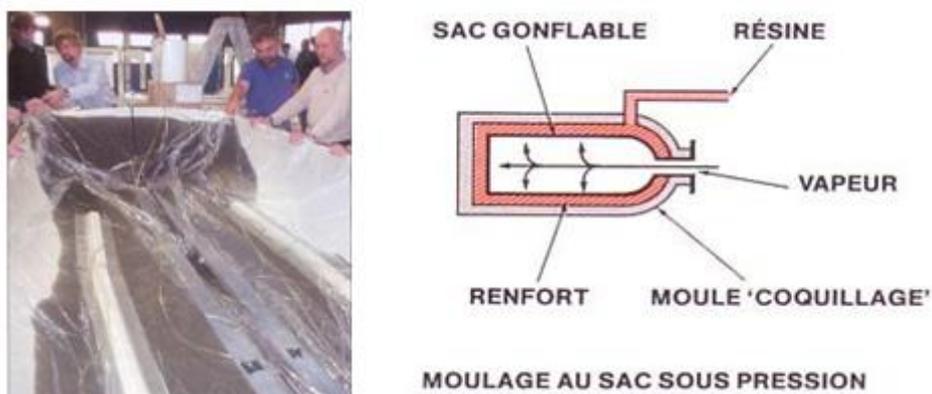


figure1. 10 Moulage au sac sous vide.

1.5.4 Drapage autoclave

Réservé aux composites « hautes performances », est devenu très industrialisé (en particulier en aéronautique) grâce au développement de machine à draper ; les étapes de la fabrication sont les suivantes:

- Déposer des tissus ou nappes pré-imprégnés préalablement découpés à la forme voulue, par plis successifs (phase de dragage) ;

- Couverture de l'ensemble par une membrane souple et étanche et mise sous vide pour éliminer les solvants par assîtes;

L'ensemble est porté en autoclave à haute température (>200°C) et haute pression (15 bars) pour la polymérisation (phase d'autoclavage) [12].

1-Moule

2-Renfort imprégné

3-Membrane en caoutchouc

4-Autoclave

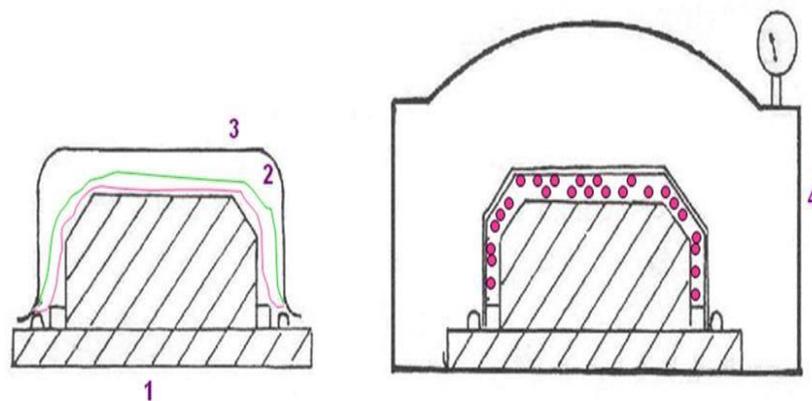


figure1. 11 Schéma du moulage par drapage autoclavage.

1.5.5 Procédé RTM

Le moulage par injection de résine liquide RTM (Résine Transfert Molding) s'effectue entre moule et contre-moule rigides. Le renfort (mats, préforme, éventuellement tissus) est disposé dans l'interface 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 [12].

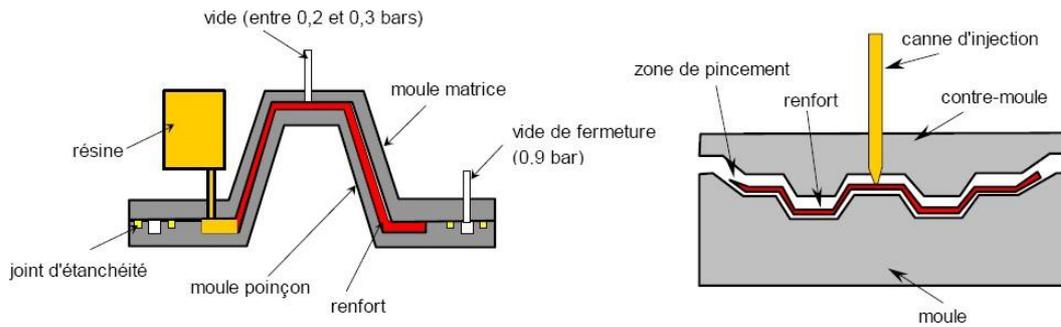


figure1. 12 Procédé RTM

1.5.6 Compression thermodurcissable SMC :(Sheet Molding Compound)

Le principe consiste à déposer des feuilles de pré-imprégnés dans un contre moule chauffé, de comprimer le matériau avec un moule chauffé, polymérisation puis éjection de la pièce. Le mat pré-imprégné SMC (Sheet Molding Compound) est constitué d'une nappe de fils coupés ou continus, imprégnée par un mélange de résine polyester, de charges et d'adjuvants spécifiques divers. Découpé en flans de masse et dimensions déterminées, le mat pré-imprégné est moulé à chaud (140 à 160°C) par compression entre un moule et un contre-moule en acier usiné.

La pression (50 à 100 bars) entraîne le fluage de la matière et le remplissage de l'empreinte. Le temps de durcissement très court (en fonction de l'épaisseur) permet un démoulage rapide

Les avantages: coût matière, propriétés mécaniques et thermiques. Les limites sont l'aspect, le dimensionnement des presses et la finition [1].

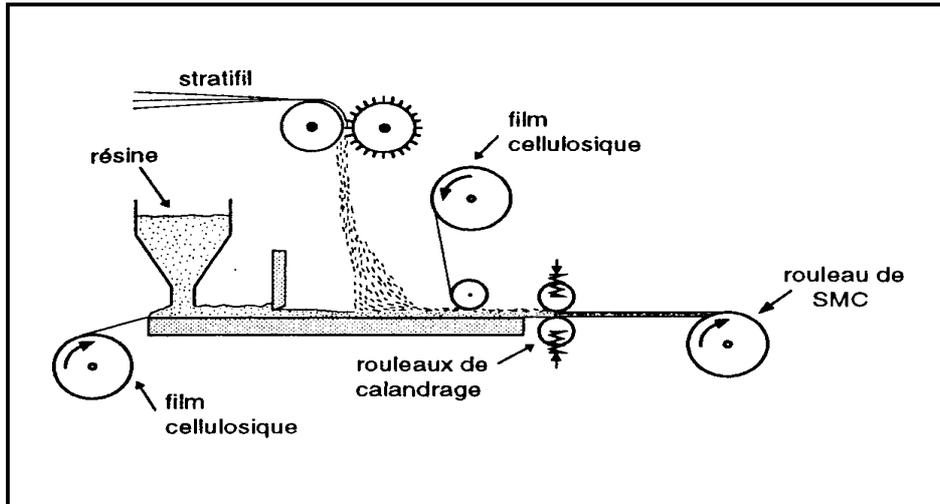


figure1. 13 Compression thermodurcissable SMC[1]

1.5.7 L'injection des thermoplastiques renforcés TPR

L'injection des thermoplastiques renforcés est utilisée pour la production des composites thermoplastiques, le produit obtenu a des propriétés mécaniques limitées [1].

Le procédé consiste à introduire des plastiques sous forme de granulés vers un moule métallique en deux parties:

- À haute température (entre 200et 300°C),
- Sous haute pression (entre 300et1.000bars).

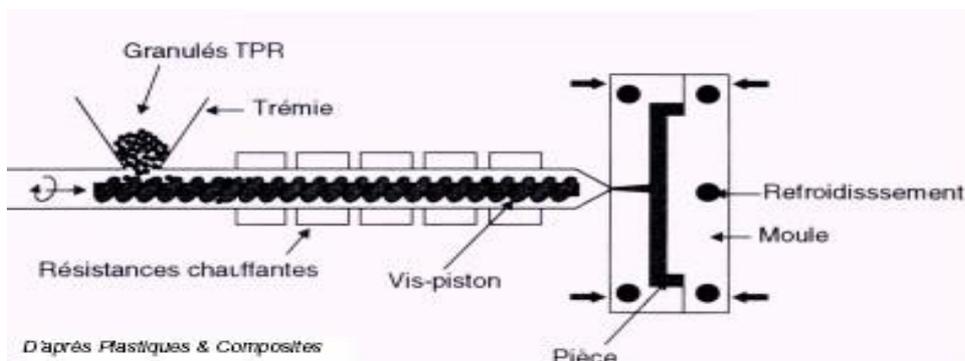


figure1. 14 Le procédé TPR.

1.5.8 Transformation par centrifugation

Procédé de moulage limité aux enveloppes cylindriques. A l'intérieur d'un moule cylindrique en rotation à basse vitesse, on dépose des fils coupés à partir de roving (ou du mat), de la résine catalysée et accélérée et éventuellement des charges granulaires. Puis, on augmente la vitesse de rotation du moule pour densifier et débuller la matière.

Après durcissement de la résine, éventuellement accélérée par un apport thermique, on peut extraire très facilement la pièce du moule. Leurs principales utilisations sont les suivantes:

- Production de tuyau (écoulement gravitaire et basse pression)
- Production de grandes viroles (moulage par rotation: centrifugation basse vitesse)[12].

1. Mandrin en rotation.
2. Entraînement de la rotation.
3. Fibres de verre.
4. Dispositif de coupe et de projection des fibres de verre.
5. Résine catalysée.

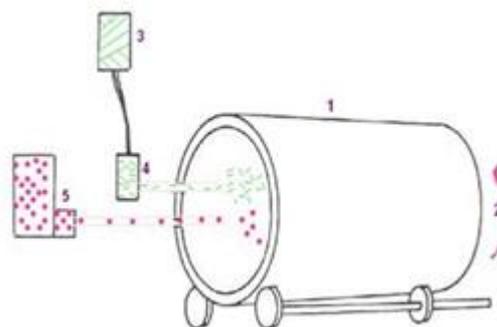


figure1. 15 Moulage par centrifugation [12].

1.5.9 L'enroulement filamentaire

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.

Par la suite, le 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. Les principales applications de ce procédé sont les suivantes:

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

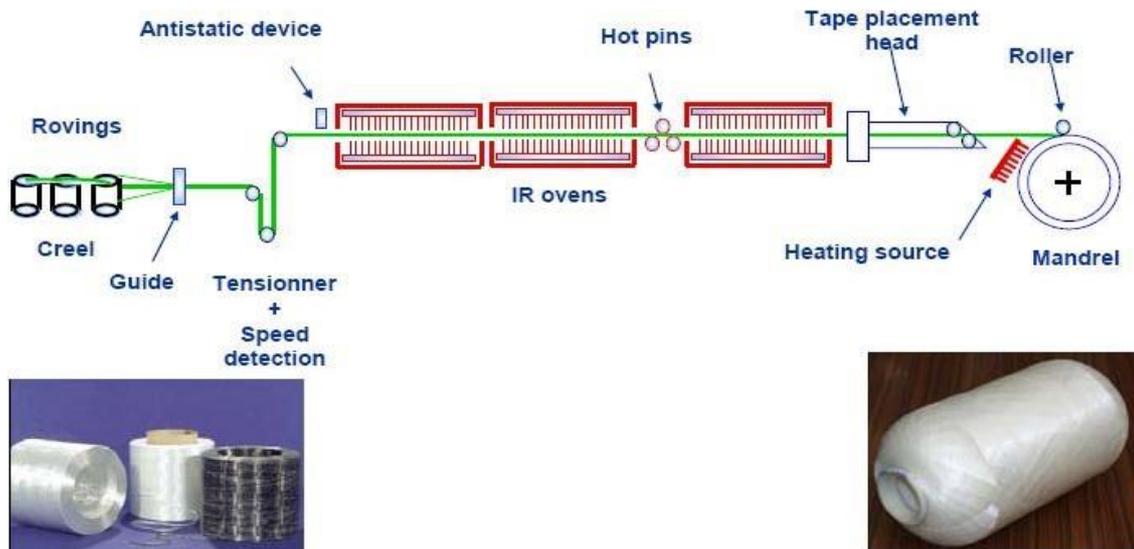


figure1. 16 Moulage par enroulement Procédé filamentaire [12].

1.6 ARCHITECTURE DES MATERIAUX COMPOSITES

1.6.1 Monocouche :

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres continue, à fibres courtes, fibres tissés et mat [1].

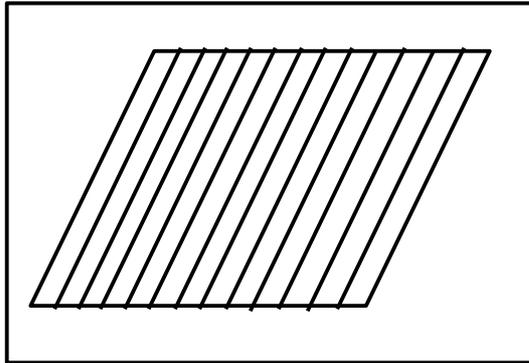


figure1. 17 Couche de composite [1]

1.6.2 Stratifiés:

Les stratifiés sont constitués de couches successives (appelées parfois plis) de renforts (fils, stratifiles, mat, tissus, etc.) imprégnés de résines[1].

1.6.2.1 *Stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels*

Les stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels constituent un type de stratifié de base auquel peut se ramener en théorie tout autre type de stratifié. Ces stratifiés sont constitués (**figure1.18**) de couches de fils ou de tissus unidirectionnels, dont la direction est décalée dans chaque couche [1].

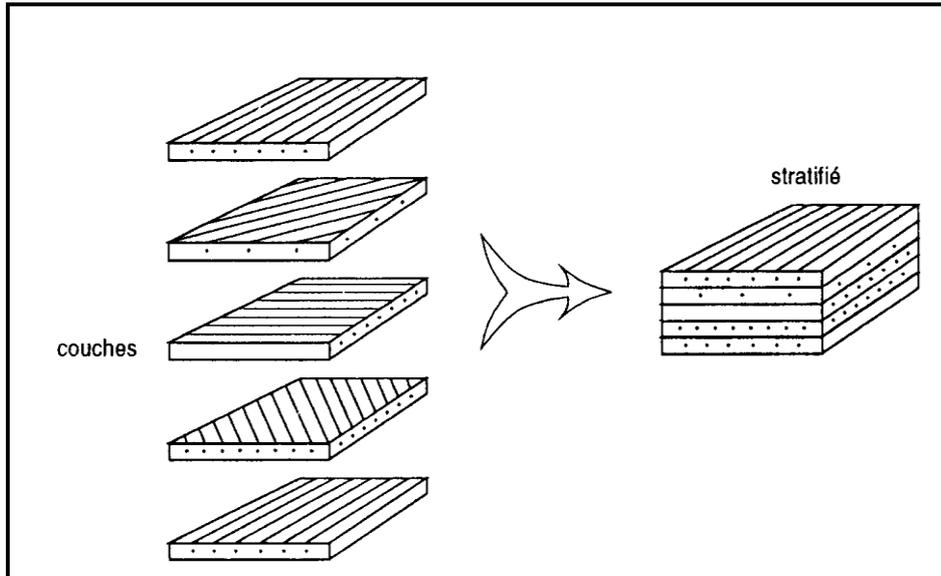
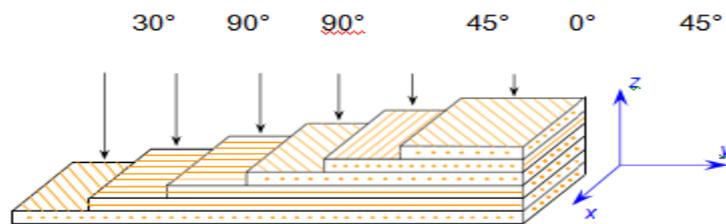


figure1. 18 Constitution d'un stratifié[1]



Désignation $[30^0/90_2^0/45^0/0^0/45^0]$

figure1.18. 1 Désignation du stratifié [1]

La désignation de ces stratifié est généralement effectuée selon le code suivant :

1-Chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degrés de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe x de référence.

2-Les couches successives sont séparées par un (/) si leurs angles sont différents.

3-Les couches successives de même orientation sont désignées par un indice numérique

4-Les couches sont nommées successivement en allant d'une face à l'autre. Des crochets (ou parenthèses) indiquent le début et la fin du code.

5-La désignation dépend du système d'axes choisi. Un exemple est représenté par la figure précédente (1.18.1) [1]

1.6.2.2 Angles positifs et négatifs

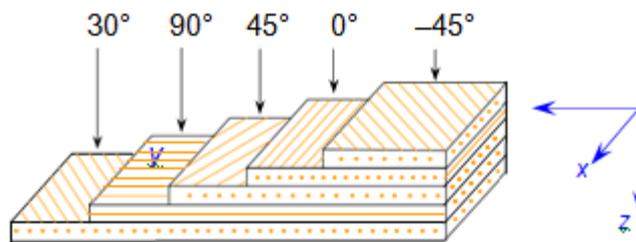
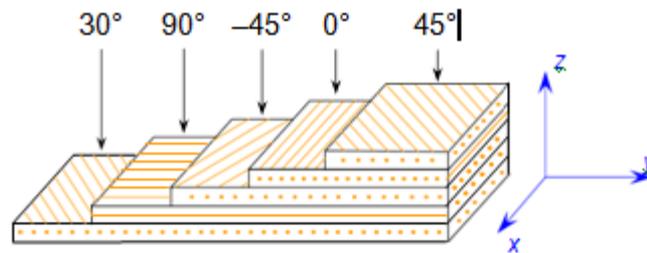


figure1.18. 2 Angles désignés du stratifié[1]

Lorsque des couches sont orientées à des angles égaux en valeurs absolues, mais de signes opposés, les signes + ou – sont utilisés. La convention pour les angles positifs ou négatifs dépend du système d'axes choisi : une inversion peut apparaître suivant le choix effectué

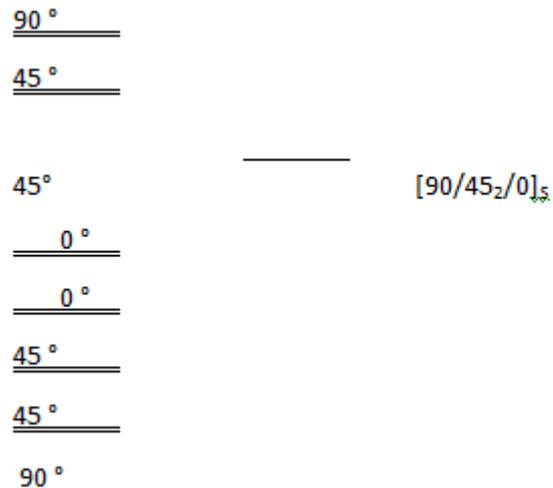
Nous donnons ci-après quelques exemples de désignation de stratifiés [1].

1.6.2.3 Stratifiés symétriques

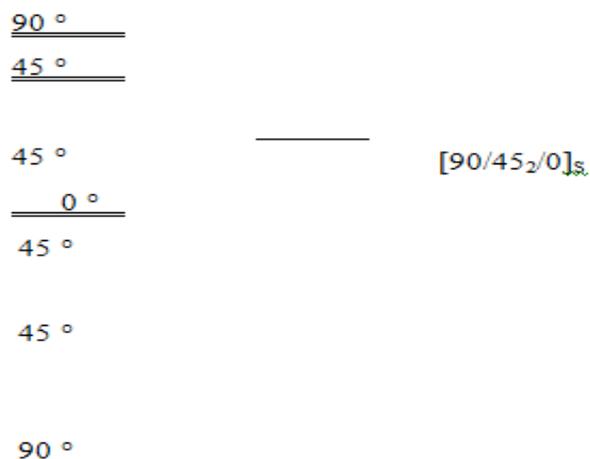
Un stratifié est symétrique si son plan moyen est plan de symétrie. Sa désignation ne nécessite alors que la moitié des couches successives.

Si le stratifié a un nombre pair de couches, la désignation débute sur une face pour finir au plan

de symétrie. Un indice **S** indique que le stratifié est symétrique. [1] Par exemple :



Si le stratifié comporte un nombre impair de couches, la désignation est semblable à la précédente, la couche centrale étant surlignée. Par exemple :



1.6.2.4 Séquences

La répétition des séquences peut être indiquée par un indice indiquant le nombre de fois où une séquence est successivement répétée [1]. Par exemple :

0°	
45°	
90°	[(0/45/90) ₂] _s
0°	
45°	ou [0/45/90] _{2s}
90°	
90°	
45°	
0°	
90°	
45°	
0°	

1.6.2.5 Stratifiés hybrides

Les stratifiés hybrides sont constitués de couches successives comportant des fibres de natures différentes. Il sera alors nécessaire de les mentionner dans la désignation. [1] Par exemple, pour des stratifiés avec la même résine :

<u>0° V</u>	
<u>45° C</u>	
<u>-45° C</u>	
90° C	[0 _v /±45 _c /90 _c] _s
<u>90° C</u>	
<u>-45° C</u>	
<u>45° C</u>	
0° V	
<u>0° K</u>	
<u>0° K</u>	
<u>45° V</u>	
90° V	[0 _{2c} ((45/90) _{sv} /0 _{2k})]
<u>45° V</u>	
<u>0° C</u>	
0° C	

Avec V : verre, C : carbone, K : Kevlar

1.6.2.6 Structure générale d'un stratifié

Dans le cas général, le renfort de chaque couche sera de natures diverses : fils, stratifils, mats, tissus, fibres de verre, fibres de carbone, etc. Chaque couche doit alors être désignée par l'indication de la nature des fibres, du type de renfort : fils, mat, tissu avec indication de la proportion de fibres suivant le sens chaîne et trame.

Le choix de la nature et de la séquence des couches dépendra de l'utilisation du matériau composite, en l'adaptant au mieux au champ des contraintes imposé:

- les couches unidirectionnelles ont de bonnes performances mécaniques dans la direction des fibres;
- les mats sont peu résistants en traction et devront être réservés aux zones comprimées : par exemple (Figure 1.19) couches unidirectionnelles dans la zone de traction, mat dans la zone de compression d'une poutre sollicitée en flexion;
- une stratification croisée sera sensible au délaminage inter-laminaire;
- une stratification avec au moins trois directions de fibres sera nécessaire pour avoir une pseudo-isotropie dans le plan du stratifié.

Enfin, il est intéressant de noter qu'une stratification symétrique garantira généralement une bonne planéité du stratifié après démoulage [1].

1.6.2.7 Stratifiés hybrides

Les stratifiés hybrides permettent d'être plus performants en utilisant au mieux les propriétés des divers fibres disponibles. Parmi les différents hybrides, on peut distinguer :

- des *hybrides intercouches*, constitués d'une suite de couches, chacune de nature différente;
- des *hybrides intracouches*, constitués par une séquence de couches identiques, chaque couche étant constituée de renforts différents;
- des couches métalliques peuvent également être intercalées entre les couches [1]

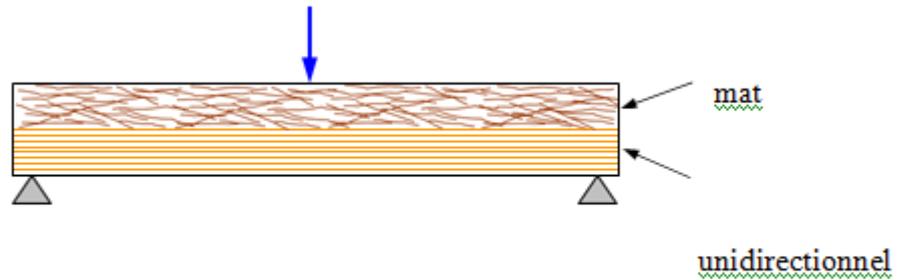


figure1. 19 Poutre en stratifié sollicitée en flexion [1]

1.6.3 Sandwichs:

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande rigidité en flexion et c'est un excellent isolant thermique [3].

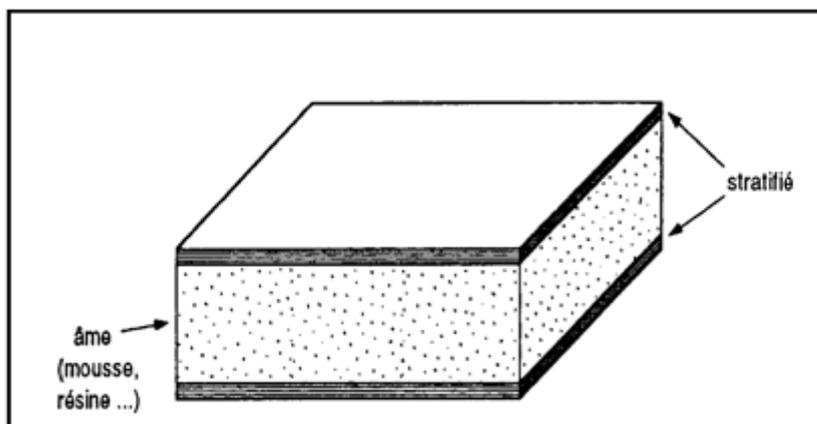


figure1. 20 Matériaux sandwichs à âmes pleines

1.6.3.1 Composition :

1.6.3.1.1 L'âme :

L'âme transmet par cisaillement les actions mécaniques d'une peau à l'autre. L'âme peut être en :

mousse à cellules ouvertes ou fermées composée de polyéther sulfone, de polychlorure de vinyle, de polyuréthane, de polyéthylène, de polystyrène, de bois de balsa, de métal ou de mousses syntactiques ; structure de nids d'abeilles en alliage d'aluminium, en papier

kraft imprégné, en tissu de verre imprégné de résines en polyester insaturé, en tissu d'aramide imprégné de résines phénoliques ou en polypropylène. Parfois, la structure en nid d'abeilles est remplie d'autres mousses pour plus de résistance. Structure ondulée, c'est le cas par exemple du carton ondulé [13]..

1.6.3.1.2 les deux peaux :

Les peaux peuvent être en bois, en tôle métallique (aluminium, titane ou acier) ou en matériaux composites stratifiés.

Les matériaux composites stratifiés peuvent être des thermoplastiques ou principalement des thermodurcissables renforcés de fibres[13].

Les matrices les plus utilisées sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau 1. 6 Matrices les plus utilisées dans les peaux des sandwiches [13].

Matrice	Principales fibres	Coût	Besoin de chauffer lors de la fabrication	Propriétés mécaniques
Polyesters insaturés	Fibres de verre	Plus faible	Peu	Plus faibles
Poly époxydes	Fibres de carbone	Plus élevé	Oui	Plus élevées

Les renforts peuvent être des fibres de verre, de carbone ou d'aramide. Ces fibres peuvent être utilisées sous forme de :

- nappes unidirectionnelles ou broyée :
- textiles filés, tissés, non tissés, tricotés ou en rubans.

1.6.3.2 Association peau-âme

L'âme est liée aux deux peaux par collage grâce à la capacité adhésive intrinsèque des peaux ou grâce à un adhésif ou plus rarement par soudage. Elle peut être réalisée avec les matériaux suivants :

- **Mousses** : ces matériaux légers, peu onéreux, facilement usinables, ont cependant de très faibles caractéristiques mécaniques ; à cause du problème lié au flambage local, ils ne permettent pas de profiter pleinement des matériaux constituant les semelles ;

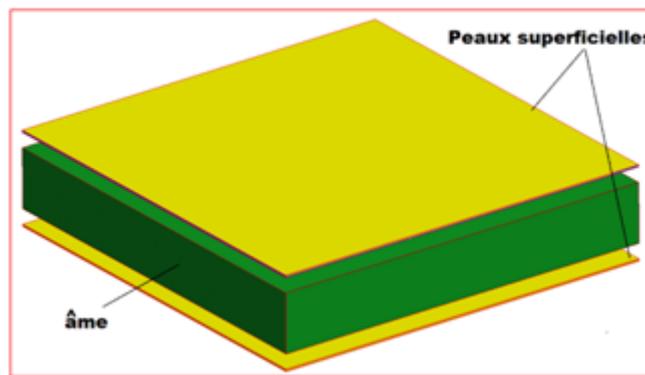


figure1. 21 Sandwich avec âme en mousse

- **Balsa** : pour utiliser pleinement ce matériau, il sera souhaitable d'orienter les fibres dans la direction z (bois debout) ;

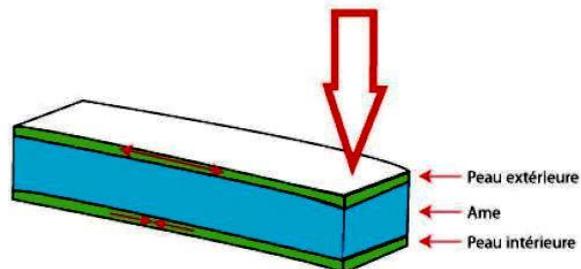


figure1. 22 Sandwich avec âme Balsa

- **Nid d'abeille** : cette structure est réalisée généralement à partir de matériaux en plaques minces (alliage d'aluminium, papier polyamide) ; des raies de colle sont disposées en bandes régulières sur les plaques qui sont collées entre elles pour former un bloc ; ce bloc est coupé en tranches, puis ces tranches sont transformées en planches de *nida* (nid d'abeille) par expansion ; le matériau obtenu est fortement anisotrope

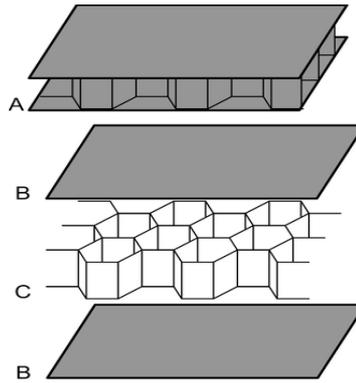


figure1. 23 Sandwich avec âme nille d'abeille

1.6.3.3 Fabrication

Les procédés de fabrication des matériaux sandwichs peuvent être les mêmes que ceux utilisés pour les autres matériaux composites ou des procédés spécifiques.

Les moulages par voie humide (imprégnation directe) les plus utilisés sont le moulage au contact, le moulage sous vide, le moulage par compression, le moulage par projection simultanée, le moulage par infusion sous vide et le moulage par transfert de résine.

Les moulages par voie sèche en utilisant des pré-imprégnés peuvent aussi être utilisés.

Les procédés spécifiques aux matériaux sandwichs peuvent être réalisés en :

Collant ensemble en continu ou en discontinu des peaux et des âmes préfabriquées ;

Fabriquant in-situ l'âme sous forme d'une mousse entre deux peaux déjà installées dans un moule, on parle alors de moussage [13].

1.6.3.4 Contrôle

Les différents composants du sandwich et le sandwich lui-même peuvent être contrôlés par différentes méthodes.

Les peaux stratifiés sont contrôlées en déterminant leur masse volumique, leur taux de fibres, leur taux de porosité, leur taux de polymérisation ou de réticulation et leur résistance à la flexion trois points.

Les âmes sous forme de mousse rigide sont contrôlées en déterminant leur masse volumique, leur conductivité thermique, leur pourcentage de cellules fermées, leur stabilité dimensionnelle linéaire et volumétrique et leur résistance aux flammes. Les propriétés mécaniques des âmes en

général sont surtout contrôlées en déterminant leur résistance à la compression et au cisaillement.

L'adhérence entre l'âme et les peaux est testée surtout en déterminant la résistance de l'assemblage à la traction et au pelage.

Les propriétés mécaniques des matériaux sandwichs sont surtout testées en déterminant leur résistance à la traction et à la compression [13].

2 Chapitre : 2

Théorie des poutres stratifiées et analyse du comportement mécanique

2.1 Equation du comportement mécanique d'un stratifié

2.1.1 Equation constitutive

L'équation constitutive d'une plaque stratifiée exprime les résultantes et moments en fonction des déformations en membrane et des courbures

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Cette équation constitutive peut également être écrite sous forme contractée suivante :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N} \\ \mathbf{M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_m \\ \mathbf{K} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Les termes introduits A, B et D peuvent être exprimés, en introduisant l'épaisseur e_k et la cote z_k du centre de la couche k , sous forme :

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n (Q'_y)_{ij} \quad (2.3)$$

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^n (Q'_y)_{ij} e_k z_k \quad (2.4)$$

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^n (Q'_y)_{ij} \left(e_k z_k^2 \frac{e_k^3}{12} \right) \quad (2.5)$$

Les coefficients A_{ij} B_{ij} D_{ij} de l'équation constitutive (2.1) d'un stratifié s'expriment donc à partir des constantes de rigidité réduites des couches, obtenues, pour chaque couche.

- Q'_y : représente les constante de rigidité réduite dans un état de contraintes planes

$$Q'_y = \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{bmatrix}$$

2.1.2 Matrice de rigidité

La matrice intervenant dans l'expression (2.1) est la matrice de rigidité du stratifié, décrivant le comportement élastique macroscopique du stratifié au point $M_0(x, y) = M_0(x, y, 0)$

A : est la matrice de rigidité en membrane

D : est la matrice de rigidité en flexion

B : est la matrice de couplage membrane-flexion-torsion

Le couplage *membrane-flexion-torsion* existe même si les matériaux des couches sont isotropes. Il résulte de la structure en couches de matériaux de caractéristiques mécaniques différentes.

Le couplage est nul ($\mathbf{B} = \mathbf{0}$) seulement dans le cas où stratifié est symétrique. La symétrie implique une symétrie des propriétés des couches, de leurs côtes et d leurs orientations.

2.2 Stratifié symétrique

Un stratifié est symétrique si le plan moyen est un plan de symétrie .Deux couches symétriques ont :

- La même matrice de rigidité réduite $[Q'_y]_k$
- La même épaisseur e_k
- Des cotes opposées z_k et $-z_k$

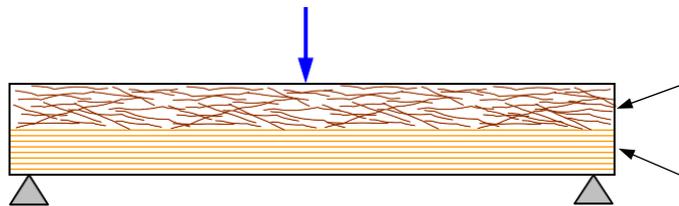
Il en résulte que les coefficients B_{ij} de la matrice de rigidité du stratifié son nuls. L'équation constitutive est de la forme général :

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & 0 & 0 & 0 \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & 0 & 0 & 0 \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ 0 & 0 & 0 & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ 0 & 0 & 0 & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Il n'existe pas de couplage *membrane-flexion* dans le cas des stratifiés symétriques, l'analyse du comportement est donc plus simple.

2.3 Flexion des poutres

L'importance de développer une analyse sur le comportement en flexion des poutres est liée d'une part à l'utilisation des poutres comme élément de base dans la réalisation des structures, et d'autre part à la caractérisation des propriétés mécaniques des matériaux stratifiés et des matériaux sandwiches à partir d'essais de flexion réalisés sur des éprouvettes en forme de poutres. Nous étudions la flexion des poutres, constituées de stratifiés ou sandwiches symétriques pour lesquels il y a absence de couplage *membrane-flexion*. L'axe (x) sera suivant la longueur de la poutre et l'épaisseur de la poutre sera notée h.



2.3.1 Théorie classique des stratifiés

2.3.1.1 Expressions générales

Dans le cas d'une flexion pur d'un stratifié symétrique, l'équation constitutive se réduit à :

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Où :

$$K_x = -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}(x, y), \quad K_y = -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}(x, y), \quad K_{xy} = -2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y}(x, y) \quad (2.8)$$

D'où on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11}^* & D_{12}^* & D_{16}^* \\ D_{12}^* & D_{22}^* & D_{26}^* \\ D_{16}^* & D_{26}^* & D_{66}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Où : D_{ij}^* sont les éléments de la matrice inverse de D_{ij}

La théorie des poutres fait l'hypothèse que, dans le cas d'une flexion suivant l'axe x , les moments de flexion et torsion M_x et M_y sont nuls : $M_x = 0$, $M_y = 0$

Les relations (2.8) et (2.9) conduisent donc à :

$$K_x = -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} = D_{11}^* M_x \quad (2.10)$$

Enfin, la théorie des poutres fait l'hypothèse supplémentaire que la flèche n'est fonction que de x .

$$w_0 = w_{0x} \quad (2.11)$$

En effet les équations (2.9) et (2.10) montrent que les courbures K_y, K_{xy} sont fonction du moment de flexion M_x soit :

$$K_y = -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} = D_{12}^* M_x, \quad K_{xy} = -2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} = D_{16}^* M_x \quad (2.12)$$

Ces relations montrent que la flèche w_0 dépend a priori de la variable y . Cet effet est particulièrement important dans le cas d'éprouvettes de flexion de laboratoire, de forme plus proche d'une lame que d'une poutre. Il en résulte que de la flexion et torsion induites par les termes D_{12}^* et D_{16}^* dans les équations (2.12) tendent à produire un décollement partiel de la poutre sur ses supports. Cet effet est toutefois négligeable dans le cas où le rapport longueur sur largeur est suffisamment élevé. Dans cette hypothèse l'équation (2.10) s'écrit :

$$\frac{d^2 w_0}{dx^2} = -D_{11}^* M_x \quad (2.13)$$

Il est usuel d'écrire cette équation sous la forme :

$$\frac{d^2 w_0}{dx^2} = -\frac{M}{E_x I} \quad (2.14)$$

En introduisant :

-le module E_x de flexion de la poutre :
$$E_x = \frac{12}{h^3 D_{11}^*} \quad (2.15)$$

- le moment quadratique I de la section droite de la poutre par rapport au plan (x, y) :

$$I = I_{xy} = \frac{bh^3}{12} \quad (2.16)$$

-le moment de flexion : $M = bM_x$ (2.17)

Compte tenu des hypothèses faites, l'équation de flexion des plaques se réduit à :

$$\frac{d^2 M_x}{dx^2} + q = 0 \quad (2.18)$$

En tenant compte de (2.13) et (2.14), cette équation s'écrit :

$$\frac{d^4 w_0}{dx^4} = D_{11}^* q \quad (2.19)$$

Où : $\frac{d^4 w_0}{dx^4} = \frac{P}{E_x I}$ (2.20)

Avec : $P = bq$ (2.21)

2.3.2 Flexion trois-points

Nous considérons une poutre en flexion trois-points .La symétrie du problème conduit à ne considérer qu'une moitié de poutre. Le moment de flexion s'exprime par la relation :

$$M = -\frac{Px}{2} \quad , \quad 0 \leq x \leq \frac{L}{2} \quad (2.22)$$

Où p est la charge totale exercée au milieu de la poutre. En reportant cette expression dans (2.14), il vient :

$$\frac{d^2 w_0}{dx^2} = \frac{Px}{2E_x I} \quad , \quad 0 \leq x \leq \frac{L}{2} \quad (2.23)$$

Dans le cas d'appuis simples les conditions aux frontières pour $x = 0$ sont :

$$M = 0 \quad , \quad w_0 = 0 \quad (2.24)$$

D'autre part, la symétrie impose que pour $x = \frac{L}{2}$:

$$\frac{dw_0}{dx} = 0 \quad (2.25)$$

L'intégration de (2.23) associé aux conditions (2.24) et(2.25) conduit à :

$$w_0 = -\frac{Pl^2}{48E_x I} x \left[3 - \left(\frac{2x}{L} \right)^2 \right] \quad (2.26)$$

La flèche w_c au centre de la poutre ($x = \frac{L}{2}$) s'écrit :

$$w_c = \frac{PL^3}{48E_x I} = \frac{PL^3}{48b} D_{11}^* \quad (2.27)$$

Cette relation peut être utilisée pour déterminer soit le module de flexion de la poutre (section rectangulaire) soit le coefficient D_{11}^* , connaissant la flèche w_c au centre pour une charge imposée P :

$$E_x = \frac{PL^3}{48Iw_c} = \frac{PL^3}{4bh^3w_c} \quad (2.28)$$

$$D_{11}^* = \frac{48bw_c}{PL^3} \quad (2.29)$$

Les contraintes dans la couche k s'écrivent :

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^k &= -6a_{xx}^k \frac{P}{bh^3} xz \\ \sigma_{yy}^k &= -6a_{yy}^k \frac{P}{bh^3} xz \\ \sigma_{xy}^k &= -6a_{xy}^k \frac{P}{bh^3} xz \end{aligned} \quad (2.30)$$

Ces contraintes sont maximales pour ($x = \frac{L}{2}$), soit :

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^k &= -3a_{xx}^k \frac{P}{bh^3} z \\ \sigma_{yy}^k &= -3a_{yy}^k \frac{P}{bh^3} z \\ \sigma_{xy}^k &= -3a_{xy}^k \frac{P}{bh^3} z \end{aligned} \quad (2.31)$$

Dans le cas d'une poutre en matériau homogène isotrope : $a_{xx} = 1$ et la contrainte normale s'écrit :

$$\sigma_{xx} = -\frac{3PL}{bh^3} z \quad (2.32)$$

La contrainte de traction maximale est atteinte sur la face inférieure ($z = -h/2$), et s'écrit :

$$\sigma_{xx} \max = \sigma_0 = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (2.33)$$

Les contraintes dans la couche k d'un stratifié peuvent donc s'écrire sous la forme :

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}^k &= -2a_{xx}^k \sigma_0 \frac{z}{h} \\ \sigma_{yy}^k &= -2a_{yy}^k \sigma_0 \frac{z}{h} \\ \sigma_{xy}^k &= -2a_{xy}^k \sigma_0 \frac{z}{h}\end{aligned}\tag{2.34}$$

2.4 Analyse du comportement mécanique

2.4.1 Concept d'homogénéisation

A une échelle suffisamment fine, tous matériaux sont hétérogènes, même les matériaux dites homogènes. Pour s'en convaincre il suffit de partir à l'échelle des atomes et des molécules. Si les matériaux usuels de l'ingénieur devaient être caractérisés à cette échelle d'observation la tâche serait insurmontable. Pour contourner cette difficulté l'ingénieur introduit l'hypothèse de continuité de la matière. Une fois le modèle de continuité admis, le concept d'homogénéité s'en déduit, un milieu homogène est alors caractérisé par des propriétés identiques en chaque point.

Au niveau de l'ingénieur le caractère d'hétérogénéité intervient chaque fois que les propriétés physiques ou mécaniques du matériau sont fonction du point. Les variations des propriétés peuvent être de deux types : soit continues, soit discontinues comme dans le cas des matériaux composite.

IL existe généralement une échelle de dimension δ à laquelle les propriétés du matériau peuvent être moyennées avec une bonne approximation, ceci signifie que dans ce cas les propriétés mesurées sur un échantillon de dimension δ sont indépendantes de l'endroit « point » du matériau où a été prélevé l'échantillon. Dans le cadre d'un tel concept le matériau peut alors considérer comme étant effectivement homogène, on parle donc d'homogénéité macroscopique ou statique. Le concept de rendre « homogène » un matériau « hétérogène » est appelé le concept d'homogénéisation [2].

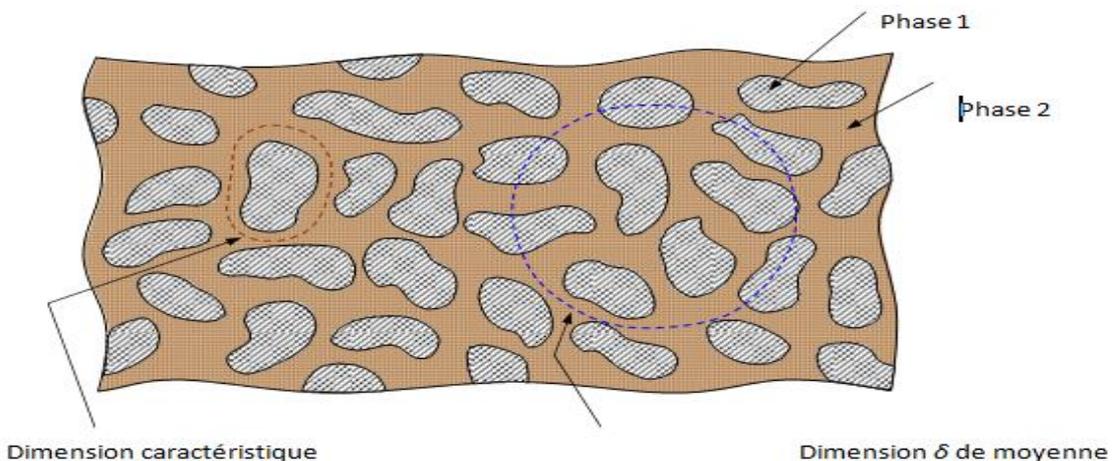


figure2. 1 Homogénéisation d'un matériau hétérogène.

2.4.2 Détermination des modules d'élasticité du composites et approches théoriques

Le problème de la détermination des modules d'élasticité d'un composite unidirectionnel consiste à rechercher les expressions de ces modules (5 modules indépendants) en fonction des caractéristiques mécaniques et géométriques des constituants : modules d'élasticité de la matrice et de la fibres, fraction volumique des fibres, longueur des fibres, etc. Nous nous limiterons dans ce chapitre à l'étude des composites à fibres continues. Les propriétés mécaniques des fibres et de la matrice seront caractérisées par leurs modules d'élasticité (modules d'Young et coefficient de Poisson), notés respectivement E_f, ν_f, E_m, ν_m . D'une part La résolution du problème posé n'est pas simple, et d'autre part la solution n'est pas unique.

La complexité du problème peut être illustrée simplement en considérant le problème de la détermination de l'arrangement des fibres dans le composite unidirectionnel. En effet, ce matériau est constitué de fibres continues parallèles dont la proportion est imposée et caractérisée par la fraction volumique V_f de fibres. Dans la pratique, il n'existe pas qu'une seule possibilité d'arrangement des fibres, mais une infinité de possibilités. Par exemple, si les fibres sont réparties régulièrement, elles pourront être réparties suivant une maille hexagonale, une maille carrée, une maille carrée décalée, etc. Dans la pratique, lors de la fabrication d'un matériau composite unidirectionnel, les fibres sont le plus souvent réparties d'une manière aléatoire, plutôt que suivant un arrangement régulier.

La répartition observée peut alors être schématisée par la représentation de la figure 2.2 : certaines fibres sont entièrement entourées de matrice, alors que d'autres peuvent se toucher.

L'ensemble des considérations précédentes montre donc les difficultés qui interviennent lors de l'approche théorique relative à la détermination des modules. Les méthodes utilisées peuvent être classées suivant trois types :

- **Recherche de bornes** (expressions limites) en utilisant les théorèmes de variation de l'énergie,
- **Recherche des solutions exactes (analytique),**
- **Approches simplifiés.**

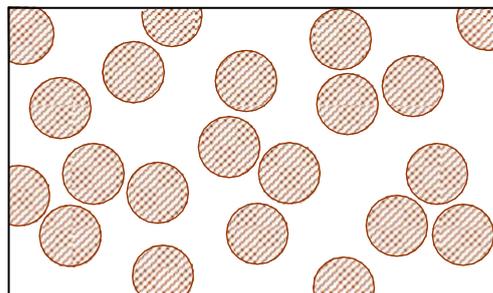


figure2. 2 Représentation schématique de l'arrangement réel des fibres.

2.4.2.1 Borne sur les modules d'élasticités

La détermination de bornes sur les modules d'élasticité utilise les théorèmes variationnels de l'énergie. Dans une approche déplacement, le théorème de l'énergie potentielle totale permet de trouver les bornes supérieures, alors que le théorème d'énergie potentielle complémentaire permet, dans le cadre d'une approche contraintes, d'accéder aux bornes aux bornes inférieures [14].

Parmi les divers travaux effectués dans ce cadre, nous citerons d'une part les travaux de Z.Hashin[15]et Hill R.[16],effectues dans le cas de fibres de différents diamètres reparties au hasard mais avec une proposition donnée en volume. D'autre part, Z.Hashin et Rosen B.W. [17] ont effectués des travaux analogues dans le cas de fibres de diamètres identiques reparties suivant un arrangement hexagonal. L'écriture des expressions trouvées est facilitée en introduisant *les modules de compression latéral (sans déformation longitudinale) K_m et K_f* respectivement de la matrice et des fibres.

2.4.2.1.1 Module de compression latérale

Ces modules sont liés aux modules de compressibilité (k_m et k_f) et aux modules de cisaillement (G_m , G_f) qu'on les déterminerons ultérieurement. Ils sont déterminés par les expressions :

$$K_i = k_i + \frac{G_i}{3}, \quad i = m, f \quad (2.35)$$

Les modules (k_m et k_f) et (G_m , G_f) s'expriment eux même a l'aide des modules d'Young (E_m, E_f) et coeficient de Poisson (ν_m, ν_f) de la matrice et des fibres

2.4.2.1.2 Module de cisaillement

Il est déterminé selon l'expression :

$$G_i = \frac{E_i}{2(1+\nu_i)}, \quad i = m, f \quad (2.36)$$

2.4.2.1.3 Module de compressibilité

Il est déterminé selon l'expression : $k_i = \frac{E_i}{3(1-2\nu_i)}, \quad i = m, f \quad (2.37)$

2.4.2.2 Solutions exactes

La recherche de solutions exactes s'effectue, dans le cas d'arrangements particuliers de fibres, par l'une des approches classiques de la mécanique des solides déformables. Nous présentons dans ce paragraphe une approche analytique (de type déplacements)du problème d'une cellule élémentaire cylindrique soumise à une traction. Le modèle géométrique retenu pour la cellule élémentaire (figure I.26) est une fibre cylindrique de rayon r_f entourée d'un cylindre de matrice r_m . Ces rayons sont liés à

la fraction volumique V_f de fibres par la relation : $V_f = \frac{r_f^2}{r_m^2} \quad (2.38)$

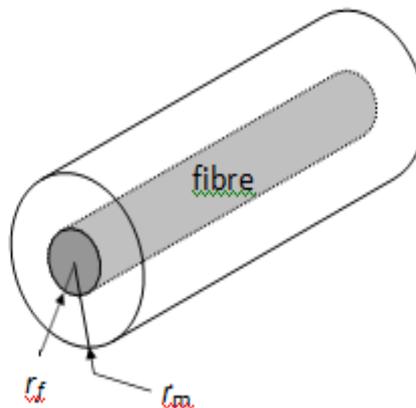


figure2. 3 Cellule élémentaire cylindrique d'un composite unidirectionnel.

2.4.2.3 Approches simplifiées

Des expressions simplifiées et pratiques des modules peuvent être obtenues en faisant une approche très simplifiée du comportement mécanique de la cellule élémentaire du matériau composite unidirectionnel. Nous développons ces expressions dans le présent paragraphe.

Module d'Young longitudinal

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

L'Hypothèse simplificatrice est de supposer une déformation uniforme est identique dans la fibre et dans la matrice. Si Δl est l'allongement de la cellule, la déformation longitudinale imposée à celle-ci est :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

Où l est la longueur de la cellule considérée. L'identité des déformations dans la matrice et dans la fibre impose :

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_l \quad (2.39)$$

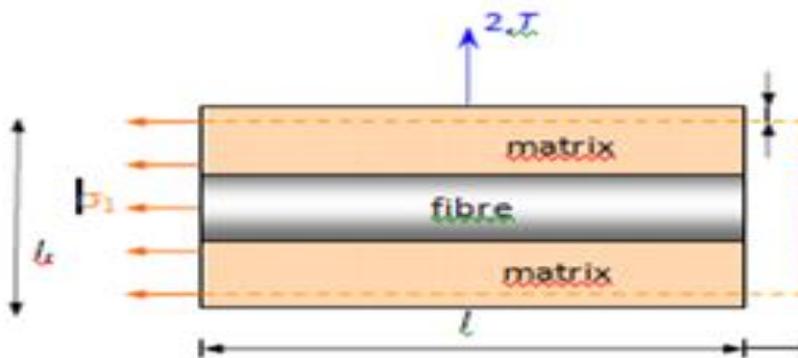


figure2. 4 Schéma simplifié d'une traction longitudinale.

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

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_l \quad (2.40)$$

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_l$$

La charge totale appliquée est:

$$F = \sigma_f S_f + \sigma_m S_m \quad (2.41)$$

Où S_f et S_m sont respectivement les aires des sections droites de la fibre et de la matrice. Si S est l'aire de la section droite de la cellule moyenne, la contrainte moyenne $\sigma_1 = F_1 / S$ s'écrit :

$$\sigma_1 = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \quad (2.42)$$

Cette contrainte moyenne est liée à la déformation de la cellule par le module d'Young longitudinal

$$\sigma_1 = E_l \varepsilon_l \quad (2.43)$$

La combinaison des relations (2.40) à (2.43) conduit à l'expression du module d'Young longitudinal :

$$E_l = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (2.44)$$

Par la méthode de l'approche précédente qui exprime à la fin le module d'Young longitudinal en fonction de la fraction volumique des fibres, module de cisaillement de la matrice (G_m), et des modules d'Young (E_m, E_f), module de compressibilité latérale (E_m, E_f), et coefficients de Poisson (ν_m, ν_f) de la matrice et des fibres. Le module d'Young longitudinal s'écrit :

$$E_L = E_f V_f + E_m (1 - V_f) + \frac{4V_f(1 - V_f)(\nu_f - \nu_m)^2}{\frac{V_f}{K_m} + \frac{1 - V_f}{K_f} + \frac{1}{G_m}} \approx E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

Coefficient de Poisson

Pour déterminer le coefficient de Poisson longitudinal ν_{LT} , nous reprenons le schéma précédent dans lequel le composite unidirectionnel est schématisé par couches successives.

Comme les fibres et la matrice subissent des déformations identiques, il en résulte que les déformations transverses dans la matrice et dans les fibres s'écrivent :

$$\varepsilon_{2m} = -\nu_m \varepsilon_1 \quad (2.45)$$

$$\varepsilon_{2f} = -\nu_f \varepsilon_1$$

L'allongement transversal de la cellule élémentaire est :

$$\Delta l_t = -\nu_m \varepsilon_1 h_m - \nu_f \varepsilon_1 h_f \quad (2.46)$$

Et la déformation transverse s'écrit :

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta l_t}{h_f + h_m} = -[\nu_m(1 - V_f) + \nu_f V_f] \varepsilon_1 \quad (2.47)$$

D'où l'expression du coefficient de Poisson :

$$\nu_{LT} = \nu_f V_f + \nu_m(1 - V_f) \quad (2.48)$$

Cette expression est la **loi des mélanges pour le coefficient de Poisson longitudinal**. La variation de ν_{LT} en fonction de la fraction volumique de fibres est linéaire entre ν_m et ν_f . Dans la pratique les valeurs de ν_m et ν_f sont assez proches (voisines de 0.3). Le coefficient de Poisson ν_{LT} restera donc également proche de cette valeur.

Par la méthode de l'approche précédente qui exprime à la fin le coefficient de Poisson en fonction de la fraction volumique des fibres, module de cisaillement de la matrice (G_m), module de compressibilité latérale (k_m, k_f), et coefficients de Poisson (ν_m, ν_f) de la matrice et des fibres. Le coefficient de Poisson s'écrit :

$$\nu_{LT} = \nu_f V_f + \nu_m(1 - V_f) + \frac{V_f(1 - V_f) \left(\frac{1}{k_f} + \frac{1}{k_m} \right) (\nu_f - \nu_m)^2}{\frac{V_f}{k_m} + \frac{1 - V_f}{k_f} + \frac{1}{G_m}} \approx \nu_f V_f + \nu_m(1 - V_f)$$

{Les expressions théoriques obtenues par la loi des mélanges (2.48) et (2.44) pour le module d'Young longitudinal E_L , et le coefficient de Poisson longitudinal ν_{LT} sont valables et donnent des valeurs assez proches des valeurs expérimentales}

Cependant pour les quatre autres modules ils seront calculés par des relations obtenues par des méthodes analytiques et des méthodes de l'approche et solution exacte.

Module de cisaillement G_{LT}

$$G_{LT} = G_m \frac{G_f(1 + V_f) + G_m(1 - V_f)}{G_f(1 - V_f) + G_m(1 + V_f)} \quad (2.49)$$

Module de compressibilité latérale

$$K_L = K_m + \frac{V_f}{\frac{1}{k_f - k_m} + \frac{1}{3}(G_f - G_m)} + \frac{1 - V_f}{k_m + \frac{4}{3}G_m} \quad (2.50)$$

Module de cisaillement transversal

$$G_{TT} = G_m \left(1 + \frac{V_f}{\frac{G_m}{G_f - G_m} + \frac{k_m + \frac{7}{3}G_m}{2k_m + \frac{8}{3}G_m} (1 - V_f)} \right) \quad (2.51)$$

Module d'élasticité transversal

$$E_T = \frac{2}{\frac{1}{2K_L} + \frac{1}{2G_{TT}} + 2 \frac{\nu_{LT}^2}{E_L}} \quad (2.52)$$

Où :

(G_m) , module de cisaillement de la matrice

(G_f) , module de cisaillement de la fibre

(E_m) , module d'Young de la matrice

(E_f) , module d'Young de la fibre

(k_m) , module de compressibilité latéral matrice

(k_f) , module de compressibilité latéral fibre

(ν_m) , coefficient de Poissons de la matrice

(ν_f) , coefficient de Poissons de la fibre

(V_f) , la fraction volumique des fibres

2.5 Endommagement et rupture des stratifiés

La ruine des matériaux composites est un phénomène très complexe où plusieurs mécanismes d'endommagement différents apparaissent et interagissent. Ces phénomènes prennent naissance à l'échelle microscopique (micro fissuration matricielle, apparition de micro -vides) et conduisent à des mécanismes macroscopique (délaminage, macro fissures matricielles, décohésion fibre -matrice, rupture des fibres). Chaque constituant (fibre, matrice) ou interface peut être affecté par un mécanisme d'endommagement.

Tableau 2. 1 Différentes ruptures du stratifié

Fibre	Matrice	Interfaces	
		Inter-ply	Fibre-matrice
Rupture des fibres	Micro fissuration Micro vide macro fissuration	Délaminage	Décohésion fibre-matrice

Ces phénomènes sont schématisés dans la **Figure(2.5)** De nombreux facteurs ont une influence sur l'apparition puis l'évolution des différents mécanismes d'endommagement. Ces facteurs peuvent être, le type de sollicitation, la direction du chargement, le type d'empilement, la température, l'humiditéetc.

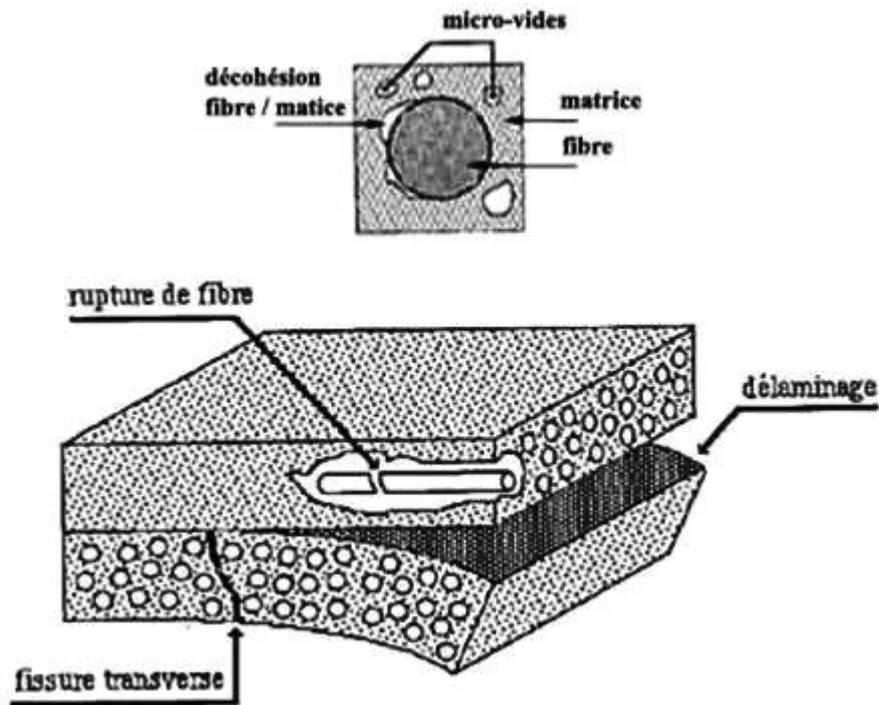


figure2. 5 Schéma des différents endommagements dans la stratifié

2.5.1 Microfissuration, décohésion fibre/matrice

La microfissuration et la décohésion fibre / matrice sont les premiers endommagements qui apparaissent si la matrice subit un chargement important. Ces défauts à l'échelle microscopique sont le lieu privilégié pour l'amorçage des endommagements à l'échelle supérieure, notamment des macro-fissures, par coalescence [7]. Les causes de ces décohésions sont variées. On peut citer, par exemple, la présence de micro défauts au niveau de l'interface fibre-matrice (comme des micro-vides) qui entraîne l'amorçage des décohésions, mais aussi les contraintes d'origine thermique (pendant la cuisson) ou l'état de contrainte local induit par la répartition aléatoire des fibres[8].

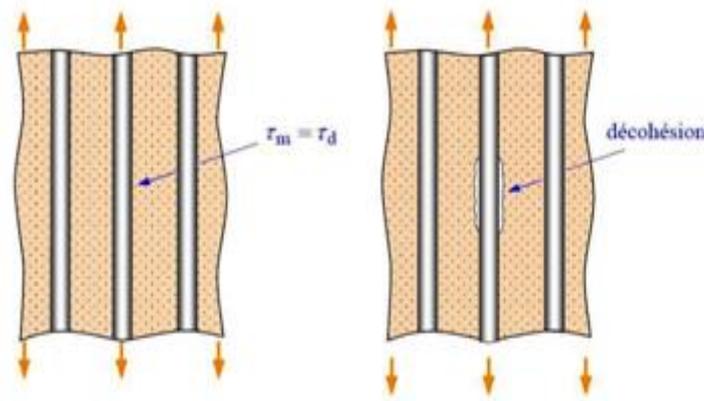


figure2. 6 Décohésion fibre- matrice

2.5.2 Fissuration matricielle

La fissuration matricielle est la principale cause de ruine de la matrice, sans être le mécanisme directement le plus nocif, il peut être à l'origine d'autres phénomènes plus endommageant. Ce mode de dégradation consiste en l'apparition progressive de l'orientation de la fissuration est fortement liée à l'architecture du matériau et à sa forte anisotropie.

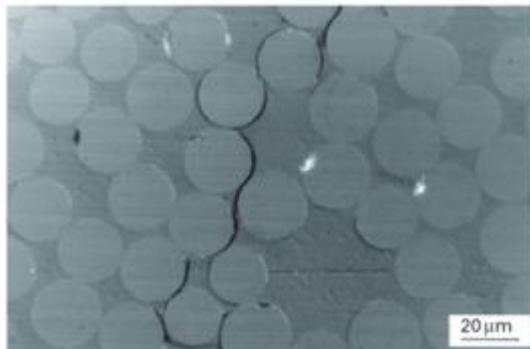


figure2. 7 Fissure matricielle formée à partir de la coalescence des décohésions et microfissures matricielles.

2.5.3 Le délaminage

La fissuration matricielle, déjà assez complexe, interagit avec un autre type d'endommagement :

Le délaminage. On peut définir le délaminage comme la rupture des interfaces existant entre des plis différents, on distingue trois types de délaminage : micro-délaminage, le délaminage diffus, le macro délaminage. On ne considéra que le délaminage des stratifié parce que dans la mesure où l'entrecroisement des fibres présent dans le composite bobiné peut agir comme une barrière aux délaminages massifs qui n'existe pas dans le cas des stratifiés.

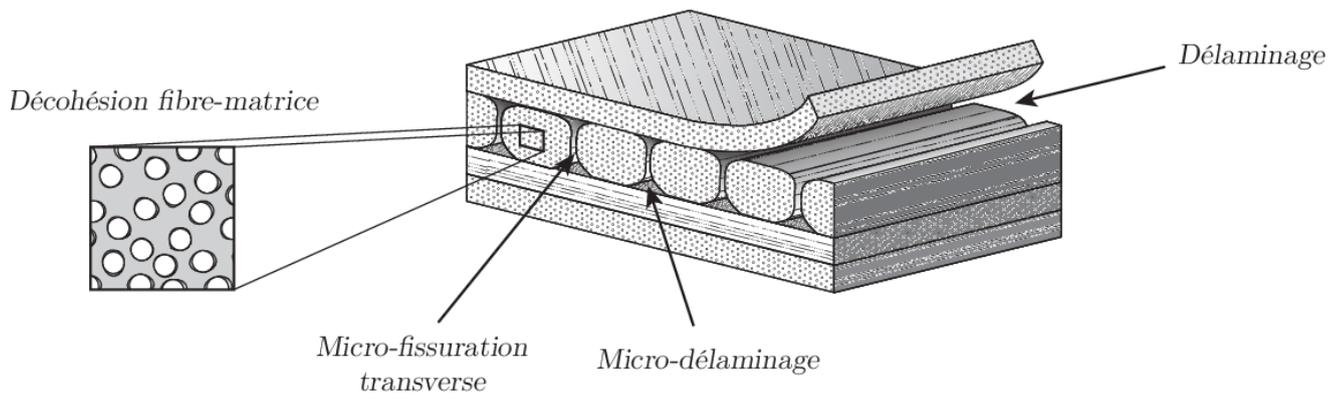


figure2. 8 Délaminage dans le stratifié

2.5.3.1 *Micro délaminage et délaminage diffus.*

Le micro délaminage naît à partir des fissures matricielles qui sont stoppées à l'interface entre deux plis. Provoquent une analyse de l'interaction entre ces deux modes d'endommagement. En pointe de fissure, les concentrations de contraintes induites sont telles que du délaminage peut apparaître entre les deux plis adjacents. Ce micro délaminage est le responsable de l'état saturé de la fissuration matricielle et son apparition annonce la rupture finale par localisation des endommagements.

Les contraintes interlaminaires peuvent également être à l'origine de l'apparition et de la propagation du délaminage, notamment à partir des bords libres qui induisent des singularités. Le développement de cet endommagement entraîne la diminution de la rigidité du matériau. L'augmentation de la densité de fissuration matricielle provoque la coalescence des micro délaminages en formant des macro délaminages qui affecteront d'une façon très importante l'intégrité structurelle, notamment sous chargements hors plan. À une échelle inférieure, on trouve le délaminage diffus qui, avec la microfissuration matricielle et la décohésion fibre matrice, fait partie de l'endommagement diffus typique des états de cisaillement. Cet endommagement est provoqué par l'apparition de micro-vides

2.5.3.2 *Macro délaminage.*

Le macro-délaminage a une étendue beaucoup plus importante que le micro délaminage décrit préalablement. Il peut être provoqué par la coalescence des micros-délaminages formés par les fissures matricielles stoppées à l'interface du pli, par un chargement de type hors plan ou, sur un bord libre, par les différences de coefficients de Poisson dans les plis. Cet endommagement induit une perte de rigidité dans la structure qui sera plus ou moins importante selon le type de chargement. Par exemple, on constate des pertes de raideur en traction après l'apparition du délaminage mais avec une propagation très stable (coalescence des microdélaminages). Par contre, cette propagation devient très instable dès que les chargements sont de nature hors plan comme, par exemple, les sollicitations en flexion ou sur des cornières. Dans ce type d'essais, Laurin et Al ont montré une influence non négligeable de la fissuration matricielle sur l'amorçage et la propagation du délaminage.

3 CHAPITRE 3 :

**PARTIE EXPERIMENTALE ESSAI EN
FLEXION (3) POINTS STATIQUE**

3.1 Position du problème

Un matériau composite est soumis à la flexion (3) points statique pour déterminer son module d'élasticité et sa contrainte à la rupture. L'importance de développer une analyse sur le comportement en flexion des poutres est liée d'une part à la simplicité de l'essai par rapport aux autres essais (traction par exemple), et d'autre part à l'utilisation des poutres comme élément de base dans la réalisation des structures.

3.2 Présentation du matériau

Dans notre étude nous allons caractériser un matériau composite stratifié à fibres de verre et résine époxyde sous forme d'éprouvettes d'essai (éprouvettes d'essai) à partir de plusieurs étapes.

tableau3. 1 Caractéristiques de la résine époxyde

Module de Young (Gpa)	Module d'élasticité transversale (Gpa)	Masse Volumique ρ (Kg/m^3)	Coefficient de Poisson ν
4.5	1.607	1200	0.4

tableau3. 2 Caractéristiques de la fibre de verre

Module de Young (Gpa)	Module d'élasticité transversale (Gpa)	Masse Volumique (Kg/m^3)	Coefficient de Poisson ν
74	29.6	2600	0.25

3.3 Pyrolyse du matériau composite étudié

Afin de vérifier les taux volumiques de résine et de fibres et connaître la disposition des plis et la structure du renfort, nous devons passer tout d'abord par une technique appelée pyrolyse [18]. La pyrolyse est la décomposition thermique de la matière organique en l'absence d'oxygène ou en atmosphère pauvre d'oxygène.

Le principe de la pyrolyse est donné par la norme NF EN ISO 1172. Elle montre qu'on doit découper l'éprouvette en échantillons, peser ces échantillons pour déterminer leurs masse ; leurs faire la Calcination puis les repeser pour déterminer les masses restantes des fibres et déduire celle de la résine. Les échantillons sont alors fixés dans un four à renouvellement d'air enflammé portés à une température de 800°C pendant 8 heures. La teneur de la matière non combustible (fibres de verre) est obtenue par pesée de l'échantillon avant et après calcination. Après calcul des fractions massiques par la méthode précédente on déduit les fractions volumiques (teneurs en volume) qui sont principalement utilisées après dans les modèles micromécaniques pour calculer les différentes caractéristiques théoriques du matériau composite.

3.3.1 Découpage des échantillons avant pesage

Sur une tronçonneuse nous avons recouru à la découpe d'une éprouvette d'essais en 5 échantillons de mêmes dimensions géométriques. La figure (3.1) illustre les échantillons après découpage.



figure3. 1 Echantillons d'éprouvettes

3.3.2 Pesage et calcination des échantillons

Le pesage des échantillons est effectué en utilisant une microbalance électronique (balance de haute précision KERN) avec une précision de 1/1000. Les échantillons sont pesés l'un après l'autre.



figure3. 2 Microbalance

Pour l'opération de calcination on utilise un four à moufle type «Nabertherm » disponible au de notre département de génie mécanique à l'atelier G19. La température a été réglée à 800°C pendant 8 heures ce qui assure la calcination totale de la résine du composite.



figure3. 3 Four type Nabertherm

Les échantillons pesés et numérotés seront défournés selon le même ordre pour pouvoir après les repeser après refroidissement et calculer la différence de masse de chaque échantillon.

On remarque la calcination totale de la résine (matrice organique). Cette opération nous a permis aussi de déterminer les séquences d'empilement du stratifié (la déposition des plis) et la structure du renfort.

On observe que ce matériau est un **stratifié à fibres de verre en trois plis de SATIN et quatre plis de MAT** avec la **résine époxyde**.



figure3. 4 Structure des fibres du stratifié

Résultat du pesage avant et après calcination :

tableau3. 3 Résultats du pesage

Echantillons	Masse avant Calci.=masse totale du matériau en (g)	Masse après Calci.= masse renfort en (g)	Différence = Masse résine en (g)
1	4.662	2.341	2.321
2	5.006	2.456	2.550
3	5.368	2.632	2.736
4	5.109	2.482	2.627
5	4.756	2.426	2.330

3.3.3 Calcul des fractions massiques et volumiques

a) Fractions massiques

En utilisant la formule (1.6) : $M_f = \frac{mf}{mc}$ où : $mf = \text{masse du renfort}$

Exemple : échantillon 1 : $M_f = \frac{2.341}{4.662} = 0.502$ $mc = \text{masse composant (totale)}$

$M_m = \frac{mm}{mc}$ M_m : Fraction massique de la matrice

$M_f = \frac{2.321}{4.662} = 0.497$ M_f : Fraction massique des fibres

$mm = \text{masse matrice (résine)}$

Résultats des fractions massiques du renfort et de la matrice

tableau3. 4 Fractions massiques du renfort et de la matrice

Echantillons	Fractions massiques fibres	Moyenne des Fractions massiques fibres	Fractions massiques matrice (résine)	Moyenne des Fraction smassiques matrice
1	0.5021		0.4978	
2	0.4906	0.4974 = 49.74%	0.5093	0.5036 = 50.36%
3	0.4903		0.5096	
4	0.514		0.5114	
5	0.4899		0.4899	

$$M_{fmoy} = \frac{M_{f1} + M_{f2} + M_{f3} + M_{f4} + M_{f5}}{5},$$

$$M_{mmoy} = \frac{M_{m1} + M_{m2} + M_{m3} + M_{m4} + M_{m5}}{5}$$

On obtient donc : $M_{f\text{moy}} = 0.4974 = 49.74\%$

Et $M_{m\text{ moy}} = 0.5036 = 50.36\%$

b) Fractions volumiques

En utilisant la formule (1.10) :

$$V_f = \frac{\frac{M_f}{\rho_f}}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}}, \quad V_m = \frac{\frac{M_m}{\rho_m}}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}}$$

$$V_f = \frac{\frac{0.4974}{2600}}{\frac{0.4974}{2600} + \frac{0.5036}{1200}} = 0.3131, \quad V_m = \frac{\frac{0.5036}{1200}}{\frac{0.4974}{2600} + \frac{0.5036}{1200}} = 0.6869$$

$$V_f = 0.3131 = 31.31\%$$

$$V_m = 0.6869 = 68.69\%$$

3.4 Détermination des modules d'élasticité

Les propriétés mécaniques de ce matériau constitué de couches stratifiées de fibres de verre et de résine époxyde seront déterminés par des modèles micromécaniques à partir :

-De la fraction volumique des fibres

-Du module d'élasticité et du coefficient de Poisson de la fibre de verre et de la résine époxyde,

Sachant respectivement :

$$E_f = 74 \text{ GPa}$$

$$\nu_f = 0.25$$

$$E_M = 4.5 \text{ GPa}$$

$$\nu_m = 0.4$$

3.4.1 Modules des fibres et de la matrice

En considérant les équations du chapitre précédent (2.44) et de (2.48) à (2.52) on a :

a) Pour les fibres

- Module de cisaillement

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

$$G_f = \frac{74}{2(1 + 0.25)}$$

$$G_f = 29.6 \text{ GPa}$$

- Module de compressibilité

$$k_f = \frac{E_f}{3(1 - 2\nu_f)}$$

$$k_f = \frac{74}{3(1 - 2 \times 0.25)}$$

$$k_f = 49.33 \text{ GPa}$$

- Module de compression latéral

$$K_f = \frac{G_f}{3} + k_f$$

$$K_f = \frac{29.6}{3} + 49.33$$

$$K_f = 59.199 \text{ GPa}$$

b) Pour la matrice

- Module de cisaillement

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)}$$

$$G_m = \frac{4.5}{2(1 + 0.4)}$$

$$G_m = 1.607 \text{ GPa}$$

- Module de compressibilité

$$k_m = \frac{E_m}{3(1 - 2\nu_m)}$$

$$k_m = \frac{4.5}{3(1 - 2 \times 0.4)}$$

$$k_m = 7.5 \text{ GPa}$$

- Module de compression latéral

$$K_m = \frac{G_m}{3} + k_m$$

$$K_m = \frac{1.607}{3} + 7.5$$

$$K_m = 8.035 \text{ GPa}$$

3.4.2 Modules du composite

1/ Module d'élasticité longitudinal E_L

$$E_L = E_f V_f + E_m (1 - V_f) + \frac{4V_f(1-V_f)(\nu_f - \nu_m)^2}{\frac{V_f}{K_m} + \frac{1-V_f}{K_f} + \frac{1}{G_m}} \approx E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

$$E_L = 74 \times 0.31 + 4.5(1 - 0.31) + \frac{4 \times 0.31(1 - 0.31)(0.25 - 0.4)^2}{\frac{0.31}{8.035} + \frac{1-0.31}{59.19} + \frac{1}{1.607}}$$

$$E_L = 26.289 \text{ GPa}$$

2/ Coefficient de Poisson ν_{LT}

$$\nu_{LT} = \nu_f V_f + \nu_m (1 - V_f) + \frac{V_f(1-V_f)\left(\frac{1}{K_f} + \frac{1}{K_m}\right)(\nu_f - \nu_m)^2}{\frac{V_f}{K_m} + \frac{1-V_f}{K_f} + \frac{1}{G_m}} \approx \nu_f V_f + \nu_m (1 - V_f)$$

$$\nu_{LT} = 0.25 \times 0.31 + 0.4(1 - 0.31) + \frac{0.31(1-0.31)\left(\frac{1}{59.19} + \frac{1}{8.035}\right)(0.25-0.4)^2}{\frac{0.31}{8.035} + \frac{1-0.31}{59.19} + \frac{1}{1.607}}$$

$$\nu_{LT} = 0.347$$

3/ Module de cisaillement G_{LT}

$$G_{LT} = G_m \frac{G_f(1+V_f) + G_m(1-V_f)}{G_f(1-V_f) + G_m(1+V_f)}$$

$$G_{LT} = 1.607 \frac{29.6(1+0.31)+1.607(1-0.31)}{29.6(1-0.31)+1.607(1+0.31)}$$

$$G_{LT} = 2,82 \text{ GPa}$$

4/ Module de compressibilité latérale

$$K_L = K_m + \frac{V_f}{\frac{1}{k_f - k_m + \frac{1}{3}(G_f - G_m)} + \frac{1 - V_f}{k_m + \frac{4}{3}G_m}}$$

$$K_L = 8.035 + \frac{0.3131}{\frac{1}{49.33 - 7.5 + \frac{1}{3}(29.6 - 1.607)} + \frac{1 - 0.3131}{7.5 + \frac{4}{3} \times 1.607}}$$

$$K_L = 9.209 \text{ GPa}$$

5/ Module de cisaillement transversal

$$G_{TT'} = G_m \left(1 + \frac{V_f}{\frac{G_m}{G_f - G_m} + \frac{k_m + \frac{7}{3}G_m}{2k_m + \frac{8}{3}G_m} (1 - V_f)} \right)$$

$$G_{TT'} = 1.607 \left(1 + \frac{0.3131}{\frac{1.607}{29.6 - 1.607} + \frac{7.5 + \frac{7}{3} \times 1.607}{2 \times 7.5 + \frac{8}{3} \times 1.607} (1 - 0.31)} \right)$$

$$G_{TT'} = 2.705 \text{ GPa}$$

6/ Module d'élasticité transversal

$$E_T = \frac{2}{\frac{1}{2K_L} + \frac{1}{2G_{TT'}} + 2 \frac{\nu_{LT}^2}{E_L}}$$

$$E_T = \frac{2}{\frac{1}{2 \times 9.209} + \frac{1}{2 \times 2.705} + 2 \times \frac{0.347}{26.289}}$$

$$E_T = 8.055 \text{ GPa}$$

tableau3. 5 Caractéristiques mécaniques théoriques du matériau étudié

Fraction volumique fibres V_f	Fraction volumique matrice V_m	Module d'élasticité longitudinale E_L (GPa)	Module d'élasticité transversale E_T (GPa)	Module de cisaillement G_{LT} (GPa)	Module de cisaillement transversale G_{TT} (GPa)	Module de compressibilité latérale K_L (GPa)	Coefficient de Poisson ν_{LT}
0.3131	0.6869	26.289	8.0557	2.862	2.7054	9.209	0.347

3.5 Essai de flexion trois points statiques

3.5.1 Présentation du banc d'essai

Dans notre étude les essais de flexion trois points statique sont réalisés sur une machine d'essais universelle **MTS Criterion MODEL 43** dotée d'un capteur de force et pilotée par un ordinateur contenant un logiciel **Testexpert V9.01**.

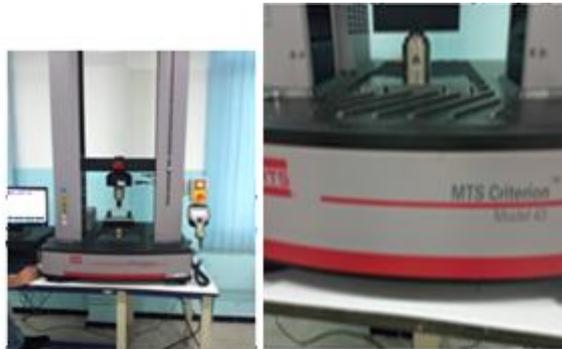


figure3. 5 Machine universelle MTS 4

3.5.2 Principe et conditions d'essai

Cinq essais sont réalisés sur nos cinq éprouvettes de forme parallélépipédique obtenue à partir de la découpe d'une plaque stratifiée.



figure3. 6 Epreuves d'essais

La flexion de chaque éprouvette est réalisée avec une vitesse de 5 mm/min, à une température ambiante de 23°C. L'éprouvette est placée comme le montre la figure (3.7)

La distance entre les appuis est choisie selon la norme ASTM. La charge est appliquée au centre de l'éprouvette verticalement vers le bas, jusqu'à la rupture de l'éprouvette, la cellule de charge est reliée à une chaîne d'acquisition qui permet l'enregistrement simultané du temps du déplacement, de la charge et de la déformation. Les informations sont stockées et traitées par ordinateur à l'aide du logiciel cité précédemment.



figure3. 7 Emplacement de l'éprouvette.

tableau3. 6 Dimensions des éprouvettes

Dimensions Éprouvettes	Longueur L(mm)	Largeur b(mm)	Epaisseur h(mm)
1	144	15.5	8
2	144	14.3	7.89
3	144	14.4	7.54
4	144	14.5	7.5
5	144	14.76	7.93

3.5.3 Déroulement de l'essai

Au centre de l'éprouvette, une charge croissante est appliquée jusqu'à la rupture de celle-ci en enregistrant sur l'ordinateur l'intervalle de temps. Pour chaque temps donné il est indiqué : la force, le déplacement de la force (la flèche), la déformation et la contrainte.

3.5.4 Éprouvettes après déformation

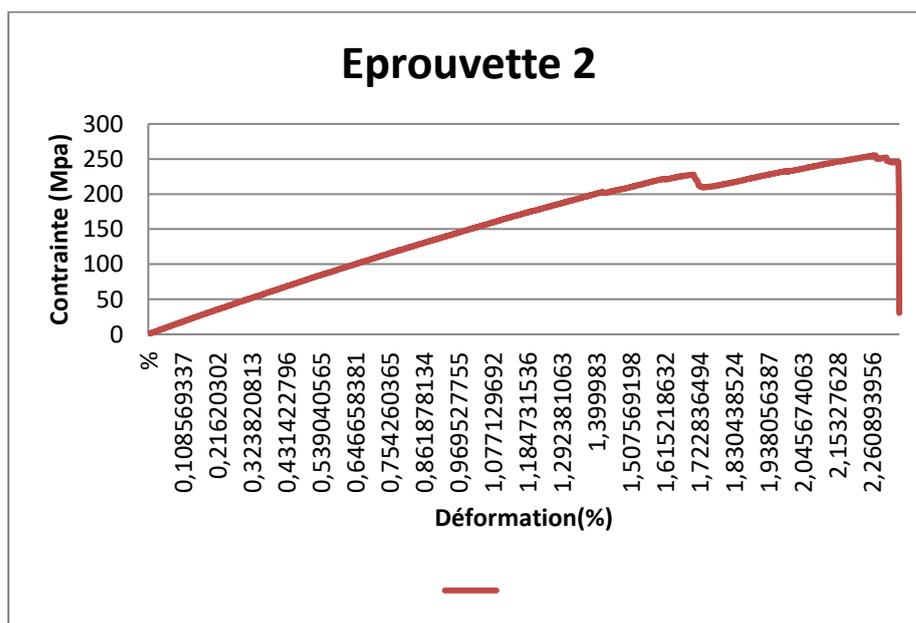
Les figures ci-dessous montrent les éprouvettes après déformation



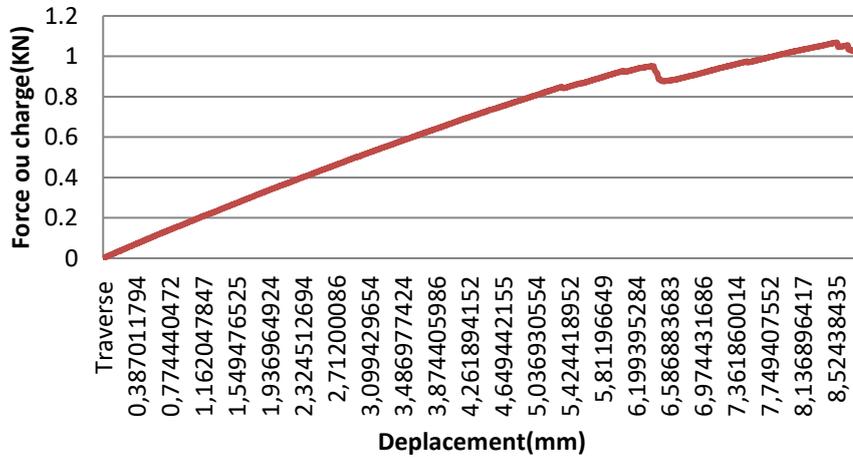
figure3. 8 Eprouvettes après essais de flexion statique

Note : L'essai sur la première éprouvette (1) n'est pas réussi à cause d'un problème d'électricité qui a interrompu le déroulement de ce dernier.

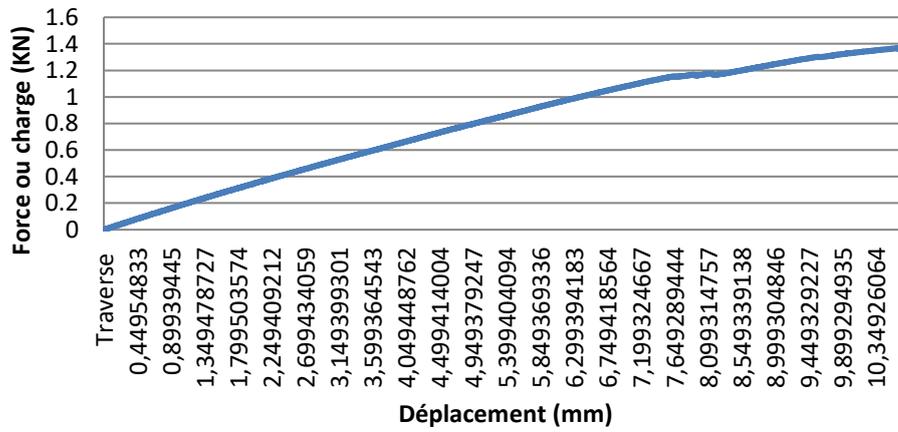
3.5.5 Courbes de comportement en flexion trois points statique



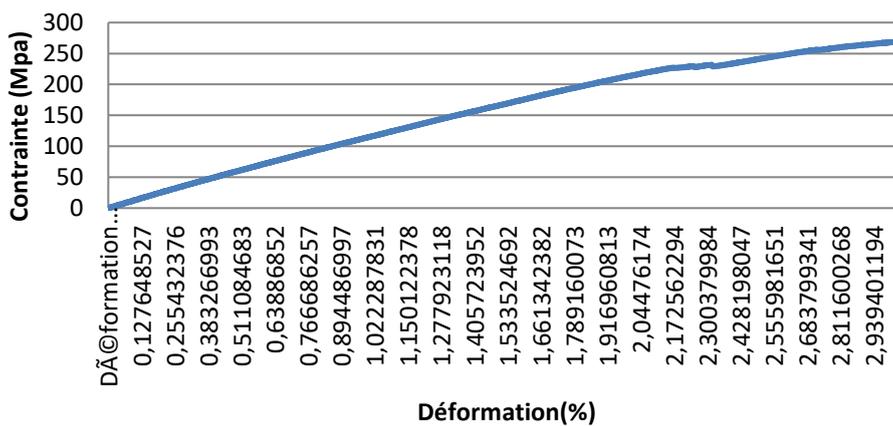
Eprouvette2



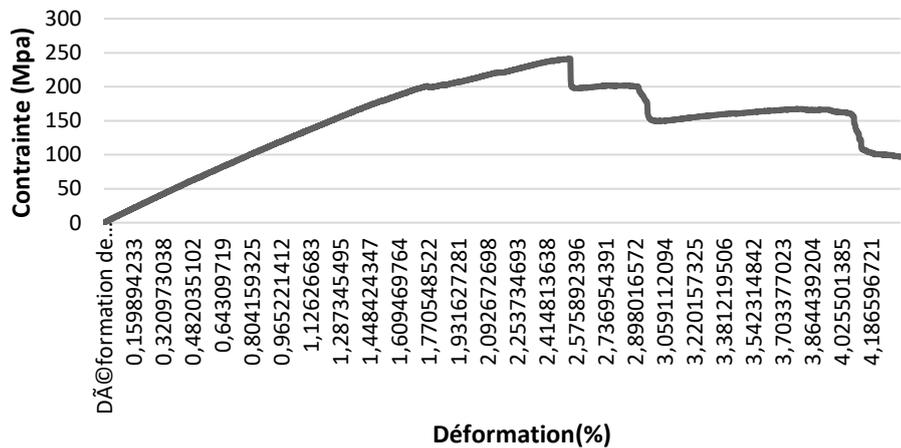
Eprouvette 3



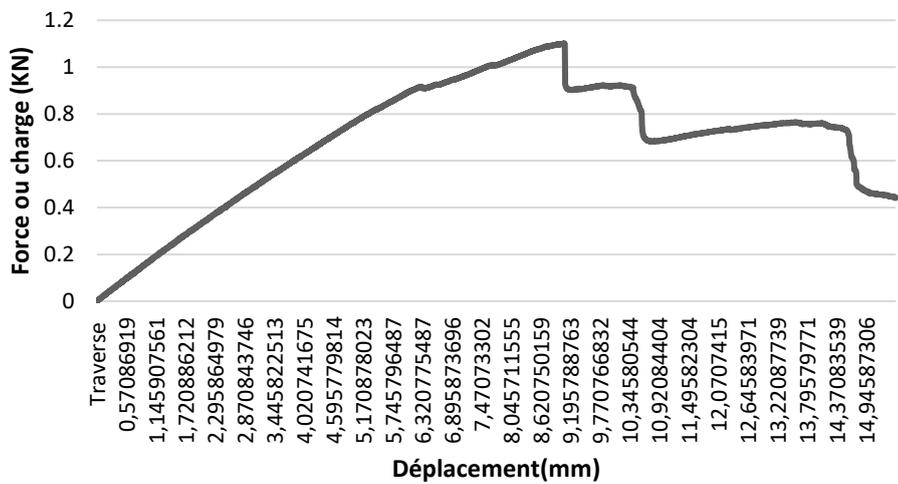
Eprouvette 3



Eprouvette 4



Eprouvette 4



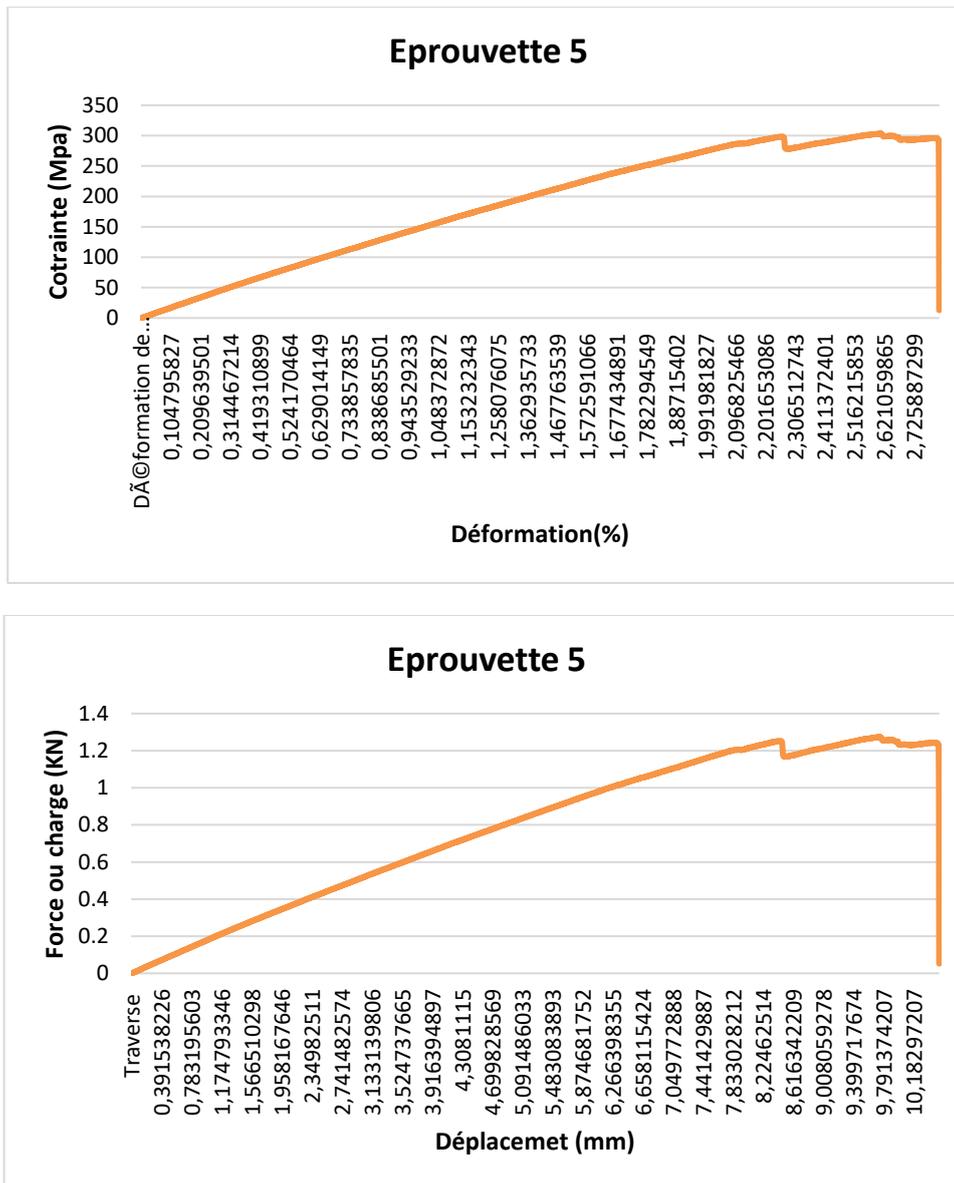


figure3. 9 Courbes de comportement d'essais de flexion 3 points statique de chaque éprouvette

3.5.6 Interprétation des courbes

Dans tous les cas de la figure précédente le comportement en flexion trois points est presque similaire et peut se décomposer en trois principales phases :

- La première phase correspond à une augmentation linéaire de la charge appliquée avec la flèche (déplacement) ou bien la contrainte avec la déformation. Cette phase se termine avec une petite diminution brusque de la charge appliquée sans déformation du matériau.
- La deuxième phase de comportement non linéaire dans laquelle la charge maximale est atteinte.
- La troisième phase est où l'on observe la chute brutale de la charge avec le même déplacement.

3.5.7 Résultats obtenus des courbes et des essais

tableau3. 7 Résultats expérimentaux des essais

Eprouvettes	2	3	4	5	Moyenne
Caractéristiques					
Longueur L (mm)	144.000	144.000	144.000	144.000	144.000
Largeur b (mm)	14.500	15.500	14.300	14.400	14.675
Epaisseur h (mm)	7.500	8.000	7.890	7.54	7.732
Distance entre appuis l (mm)	120.000	128.00	126.400	120.640	123.76
Vitesse de déformation (mm /min)	5				
Charge maximale (KN)	1.068	1.368	1.102	1.275	1.203
Résistance à la flexion (MPa)	227.4	224.230	205.600	280.300	234.382
Module de flexion (MPa)	8924.696	6343.856	6600.768	8112.060	7495.343

Les résultats représentés dans le tableau ci-dessus sont calculés par le logiciel **Test expert V9.01** à partir des courbes de comportement.

-La distance entre les appuis est calculée suivant la norme ASTM.

-La résistance à la flexion est la contrainte atteinte à la fin de la ligne droite de la courbe contrainte-déformation (la fin du comportement élastique du matériau).

- le module de flexion (module d'élasticité) est obtenu par le calcul de la moyenne des tangentes entre chaque deux points de la droite de la courbe contrainte-déformation.

3.6 Calcule analytique des caractéristiques mécaniques du matériau étudié

Le calcul des caractéristiques mécaniques en flexion trois points statiques est basé sur les relations (2. 33) et (2.28), la première permet de déterminer la valeur de la contrainte dans la limite élastique en flexion σ_f et la deuxième permet de déterminer la valeur du module d'élasticité longitudinal en flexion E_f .

$$E_f = \frac{Pl^3}{4bh^3w_c} \text{ . Dans notre cas ça devient } E_f = \frac{l^3 \Delta P}{4bh^3 \Delta w_c}$$

$$\sigma_f = \frac{3Pl}{2bh^2}$$

Avec : - P La charge (force) maximal appliquée (N) - b la largeur de l'éprouvette (mm)

- l La distance entre appuis (mm) - h L'épaisseur de l'éprouvette (mm)

3.6.1 Calcul de la contrainte élastique maximale

En utilisant la relation (2. 33), on calcule la contrainte pour chaque éprouvette et on calcule après la moyenne de ces dernières.

Exemple de calcul : cas de l'éprouvette 2

$$\sigma_f = \frac{3Pl}{2bh^2}$$

$$\sigma_{f2} = \frac{3 \times 1068 \times 120}{2 \times 14.5 \times 7.5^2}$$

$$\sigma_{f2} = 235.762 \text{ MPa} = 0.235762 \text{ GPa}$$

La même méthode est suivie pour les autres éprouvettes :

$$\sigma_{f3} = 264.813 \text{ MPa} ; \sigma_{f4} = 234.327 \text{ MPa} ; \sigma_{f5} = 281.176 \text{ MPa}$$

Et le calcul de la moyenne se calcule comme suite :

$$\sigma_{f \text{ moy}} = \frac{\sigma_{f2} + \sigma_{f3} + \sigma_{f4} + \sigma_{f5}}{4}$$

$$\sigma_{f \text{ moy}} = \frac{235.762 + 264.813 + 234.327 + 281.176}{4}$$

$$\sigma_{f \text{ moy}} = 254.012 \text{ MPa}$$

3.6.2 Calcul du module d'élasticité longitudinal

En utilisant la relation (II.28), on calcule le module d'élasticité longitudinal pour chaque éprouvette et on calcule après la moyenne de ces derniers.

Exemple de calcul : cas de l'éprouvette 2

$$E_f = \frac{l^3 \Delta P}{4bh^3 \Delta w_c}$$

$$E_{f2} = \frac{120^3 \times (653.9 - 268.1)}{4 \times 14.5 \times 7.5^3 (3.9577 - 1.5203)}$$

$$E_{f2} = 11180.358 \text{ MPa} \approx 11.180 \text{ GPa}$$

Pour ΔP (la charge appliquée) et Δw_c (la flèche au centre ou le déplacement de la force) sont obtenues entre deux points de la ligne droite de la courbe force-déplacement. On a aussi :

$$\Delta P = p_2 - p_1$$

$$\Delta w_c = w_{c2} - w_{c1}$$

La même méthode est suivie pour les autres éprouvettes :

$$E_{f3} = 9843.73 \text{ MPa} \approx 9.843 \text{ GPa}$$

$$E_{f4} = 10926.817 \text{ MPa} \approx 10.926 \text{ GPa}$$

$$E_{f5} = 10615.934 \text{ MPa} \approx 10.616 \text{ GPa}$$

Et le calcul de la moyenne est déterminé comme suit :

$$E_{f \text{ moy}} = \frac{E_{f2} + E_{f3} + E_{f4} + E_{f5}}{4}$$

$$E_{f \text{ moy}} = \frac{11180.358 + 9843.73 + 10926.817 + 10615.934}{4}$$

$$E_{f \text{ moy}} = 10641.7098 \text{ MPa}$$

$$E_{f \text{ moy}} \approx 10.642 \text{ GPa}$$

tableau3. 8 Résultats des caractéristiques mécaniques du matériau étudié

Eprouvette	2	3	4	5	Moyenne
$F_{max}(N)$	1068.3	1368.2	1101.6	1274.7	1203.125
$\sigma_f \text{ calculée}$ (MPa)	235.762	264.813	234.327	281.176	254.012
$\sigma_f \text{ exp}$ (MPa)	227.4	224.23	205.6	280.3	234.382
$E_f \text{ cal}$ (GPa)	11.180	9.843	10.926	10.616	10.642
$E_f \text{ exp}$ (GPa)	8.924	6.343	6.600	8.112	7.495
$E_f \text{ théorique}$ (GPa)	26.289				

3.6.3 Analyse des résultats

Les résultats obtenus ont montré que ce matériau a un comportement linéaire élastique qui se termine par des petites ruptures, entrant ainsi dans une zone non-linéaire où la contrainte et la charge maximales sont atteintes, finissant ensuite par une rupture brutale causée par la coalescence des microfissures provoquant directement la ruine des éprouvettes par des phénomènes d'endommagement qu'on analysera après.

La variation des pentes des courbes de comportement obtenues pour ce matériau présente une variation du module d'élasticité en flexion qui amène aussi à des différentes contraintes à la rupture.

Ceci est dû essentiellement aux défauts des modes d'obtention et d'élaboration de ce matériau stratifié (bulles, porosités, adhérence fibres-matrice) et à la découpe des éprouvettes (découpés de plusieurs endroits différents de la plaque stratifiée).

La différence entre la contrainte de flexion calculée et celle expérimentale est dû au mode d'obtention des éprouvettes (moulage) et de la découpe.

La légère différence entre le module d'élasticité calculé et celui expérimental est expliqué comme suit :

- Dans l'expérimental le calcul donné par le logiciel prend en compte la moyenne des tangentes entre deux points de la droite de la courbe contrainte-déformation.

Il y a un écart considérable entre le module d'élasticité expérimental et théorique parce qu'on prend plusieurs simplifications pour écrire les relations des modèles micromécaniques pour le calcul théorique (plis unidirectionnels, parfaite adhérence entre fibres-matrice,.....)

3.7 Observation des faciès de rupture après essais de flexion trois points statique

Les faciès de rupture des éprouvettes endommagées ont été observés au sein du laboratoire de la mécanique industrielle au bloc C par un microscope optique type Falcon Vision engineering CNC pour étudier les mécanismes d'endommagement.



Figure 3. 10 Microscope optique

Le mécanisme de rupture le plus général de ce matériau se caractérise par :

- Délaminage des plis du stratifié
- Rupture des fibres
- Rupture de la matrice

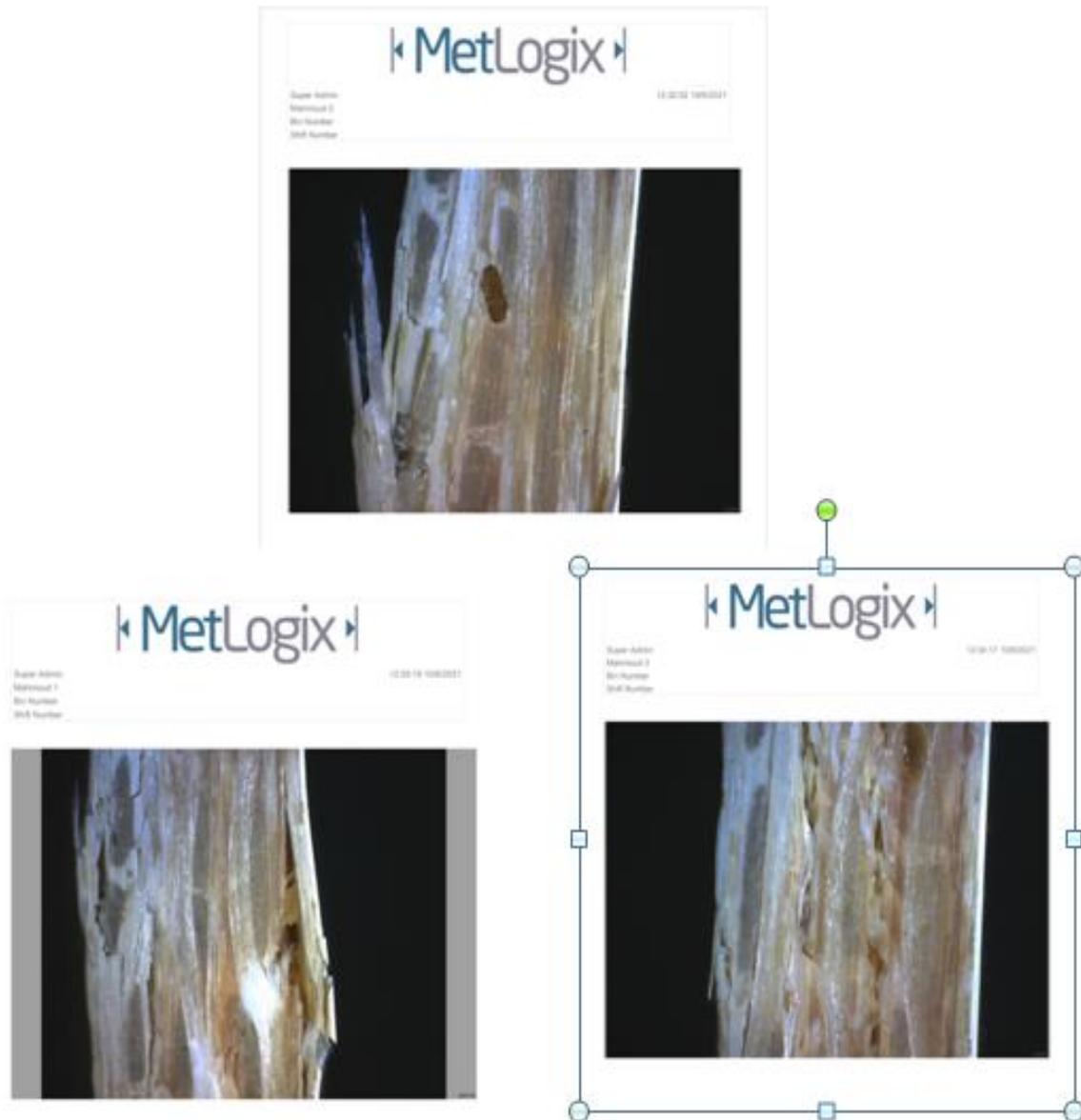


Figure 3. 11 Photos microscopiques des faciès de rupture de trois éprouvettes

3.7.1 Interprétation des résultats au point de vue endommagement

Après avoir vu les faciès de rupture par le microscope optique on remarque les dommages suivants :

- Fissuration de la matrice (résine époxyde)
- Rupture locale des fibres de verre
- Décohésion fibre /matrice qui engendre avec la microfissuration matricielle le délaminage diffus.

Conclusion générale

Le matériau étudié est un stratifié composite constitué de sept plis de fibre de verre qui se compose de trois plis de satin et quatre plis de mat déposés alternativement avec la résine époxyde.

Ce stratifié a subi une pyrolyse pour déterminer les fractions massiques des fibres et de la résine. En utilisant la loi des mélanges, on a pu déduire les fractions volumiques et les modules de l'ingénieur.

Des éprouvettes du matériau étudié sont soumises à la flexion 3 points statique afin de déterminer leurs caractéristiques mécaniques d'une part et d'identifier leurs mécanismes d'endommagement.

Il s'en est suivi les conclusions suivantes :

- Les courbes de comportement mécanique contrainte/déformation ont mis en évidence un comportement élastique suivi d'une rupture brutale pour toutes les éprouvettes. Ceci est dû essentiellement à la nature de la matrice laquelle est thermodurcissable.

- Les résultats obtenus pour le module d'élasticité calculé analytiquement et celui expérimental donné par le logiciel de la machine sont très proches par contre, on note un écart important entre le module d'élasticité expérimental et celui théorique donné par la loi des mélanges. Cette dernière utilise des modèles micromécanique supposant une parfaite adhérence entre les fibres et la matrice.

- L'observation des faciès de rupture par microscope optique a mis en évidence un mode d'endommagement multiples où l'on observe une fissuration de la matrice (résine époxyde) suivie d'une rupture locale des fibres de verre entrecroisées et se terminant par un délaminage des plis

Références bibliographiques

- [1] :Jean-Marie Berthelot« Matériaux composite comportement mécanique et analyse des structures » 5^e édition ,2012
- [2] :Abderrezak Gharbi «Analyse des fissurations des matériaux composites et détermination de leur délaminage utilisant des capteurs piézoélectrique» thèse de magister Université Mentourie-Constantine 2005
- [3] :Daniel Gay « Matériaux composites » 4^e .Hermès Paris 1997.
- [4] :Haudin J.M., « Structures et morphologies des polymères semi-cristallins », Introduction à lamécanique des polymères, ed. C. G'Sell, J.M. Haudin, Institut national polytechnique de lorraine, p. 97-115, 1995.
- [5] : KELLY A., ZWEBEN C., « Comprehensive composite materials : polymer matrix composites », Vol. 2, Elsevier, 2000.
- [6] : KAUSCH H.H, HEYMANS N., PLUMMER C.J., DECROLY P., « Matériaux polymères : propriétés mécaniques et physiques », Traité des matériaux, vol. 14. Presses polytechniques et universitaires romandes, p. 195-199, 2001.
- [7] :Site web : www.google.fr «Glossaire des matériaux composites», Centre d'animation régionalen matériaux avancés, 2006.
- [8] : P. ROSIER, « Résines polyester (guide N°5", 2000 internet) ».
- [9]:R. Gibson, «Principles of Composite Material Mechanics», McGrawHill Inc.ISBN: 0 07 023451 5.
- [10]:Tsai, S.W and Hahn, «Introduction to Composite Materials», H.T., Technomic Publishing Co, Lancaster, P.A (1980).
- [11] : Matériaux composites : Introduction à l'usage des ingénieurs et des techniciens. ENSAM Bordeaux, SEP, TEKNEA, 1989, 288 p.
- [12] :PDF [http //dSPACE.univ-bouira.dz](http://dSPACE.univ-bouira.dz) de B HAMI 2010« Généralités sur les matériaux composites».
- [13] : WWW. GOOGLE.COM /WEKEPIDIA
- [14] : Cristensen R.M (1979). Mechanics of Composite materials. John Wiley et Sons , Nwe York
- [15] : Hshin Z.(1965) . on elastic behaviour of fibre reinforced materials of arbitrary transverse plane geomatry.J.Mech.Phys.Solid 13 :119
- [16] :Hill R.(1964). Theory of machanical proprieties of fibre-strengthened matrials :I.Elastic behavior.J.Mech.Phys.solids,12 :199
- [17] : Z.Hashin et Rosen B.W.(1964) The elasdtic moduli of fibre-reinforced materials.J.Appl.Mech(juin) :223-232
- [18] :M.Geir, 'manuel qualité des composites' Technique et documentation,Lavoisier1989,France

[Tapez le titre du document]

[Sélectionnez la date]