



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE
ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE BOUIRA



FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES APPLIQUEES
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

MEMOIRE PREPARER POUR L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER II EN GENIE CIVIL

OPTION
Ingénierie des Matériaux de Construction

THEME

**Détermination des propriétés physico mécaniques
d'un matériau composite stratifié.**

Présenté par :

BRAHIMI Smail

BOUCHENEBS Samir

Encadré par :

M. HAMI Brahim

Devant le jury :

Président : M. KENNOUCHE Salim

Examineurs : M. ARIBI Chouaib

Examineurs : M. MESBOUA Nouredine

Soutenu le 13 / 07 / 2016

2015/2016

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, eux dont les encouragements m'ont insufflé une ardeur nouvelle.

A ma très chère grande mère que Dieu la garde dans son vaste paradis.

A mon cher père qui à tout fait pour que je réussisse.

A ma chère mère pour le sacrifice énorme qu'elle a toujours éprouvé.

A mes sœurs et frères.

A tout les membres de ma famille.

A tous mes professeurs sans exception, mon binôme samir dont la disponibilité et la courtoisie ont été constantes à mon égard.

Smail

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A ma chère mère pour ses grands sacrifices, pour sa patience sans limite, et à qui je souhaite un rétablissement rapide.

A mon cher père qui m'a tout donné, et à qui je souhaite une langue vie.

A ma femme, à mes sœurs et à mon frère.

A mon binôme Smail pour sa gentillesse et son courage.

A mon ami le Dr. SAMIR LAADJOUZI pour son grand soutien.

Samir.

Remerciements

Au terme de ce travail nous tenons à remercier en premier lieu notre seigneur Dieu le tout puissant qui nous a donné la volonté et le courage pour achever ce travail.

Nous remercions vivement notre promoteur M. HAMI Brahim pour ses encouragements, ses conseils, sa disponibilité, sa gentillesse, sa patience, et son aide précieux qu'il nous a offert dans la réalisation de ce travail.

Nous tenons à remercier M. KENNOUCHE Salim, le chef de département de génie civil et le président de jury, d'avoir accepté de présider notre soutenance et pour nous avoir ouvert ses bras.

Nos vifs remerciements s'adressent également à M. ARIBI Chouaib pour avoir examiné notre travail.

Nos vifs remerciements s'adressent également à M. MESBOUA N. pour avoir examiné notre travail.

Nos remerciements s'adressent au personnel administratif du département de Génie Civil ainsi qu'à tous les enseignants qui ont participé à notre formation.

Aussi, nos vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Sommaire

Sommaire :
Chapitre I : Etudes bibliographique

Introduction	2
I-1. Définition	2
I-2. Les éléments constituant d'un composite	2
I-2-1. La matrice	2
I.2.1.2. Les résines hermodurcissables	3
a) Les matrices époxydes	5
b) Constituants de la résine époxyde	6
I.2.1.3. Les résines thermostables	7
I-2-2. Les renforts	7
I.2.2.1. Renfort en fibres discontinues	7
I.2.2.2. Renfort en fibres continu	7
I-2-2-3. Divers types de renforts fibreux commercialisés	7
a) Formes linéiques	8
b) Formes surfaciques	8
c) Structures tissées multidirectionnelles	9
I-2-2-4. Les principales fibres	9
a) Les fibres de verre	9
b) les fibres de Carbone	10
c) Les fibres aramides	10
d) Les fibres céramiques	10
e) Les fibres de bore	10
f) Les fibres de silice	11
I-2-3. Les charges et additifs	11
a) Les charges organiques	11
b) Les charges minérales	11
c) Le verre	12
d) Le carbone	12
I-3. Classifications des matériaux composites	12
I-3-1. Classification suivant la forme des constituants	12
a) Composites à fibres	12
b) Composites à particules	12

I-3-2. Classification suivant la nature des constituants	13
I-3-3. Classification suivant leurs structures	13
I.3.3.1. Les monocouches	13
I.3.3.2. Les stratifiées	13
I.3.3.3. Les sandwichs	14
I-4. Caractéristiques générales des matériaux composites	16
I-5. Procédés de mise en œuvre des composites	16
1.5.1. Moulage au contact	16
1.5.2. Moulage par projection simultanée	17
1.5.3. Injection thermo durcissable BMC (Bulk Molding Compound).....	17
1.5.4. Compression thermo durcissable SMC (Sheet Molding Compound).....	17
1.5.5. Pultrusion	17
1.5.6. Enroulement filamentaire (ou bobinage).....	17
Conclusion	18

Chapitre II : Principaux essais appliqués sur les composites

II.1. Introduction.....	19
II.2. Analyse physique de la structure du composite.....	20
II.2.1. Taux de fibres et de matrice.....	20
II.2.2. Taux de porosité.....	21
II.3. Essais sur éprouvettes planes et barreaux.....	21
II.3.1. Fabrication des éprouvettes	21
II.3.2. Détermination du comportement mécanique	22
II.3.2.1. Essais de traction	22
II.3.2.2. Essais de flexion.....	25
II.3.2.3. Essais de cisaillement plan et interlaminaire	29
II.3.2.4. Essais de compression	30
II.3.2.5. Comportement au choc.....	33
II.3.2.5.1. Introduction	33
II.3.2.5.2. Les différents types d'essais de choc	34
a) Les méthodes pendulaires	34
1) Méthode par flexion trois points (Charpy)	35
2) Méthode par flexion à simple encastrement	37
3) Méthode par choc-traction	38
b) Méthodes de choc multiaxial par chute de masses	40

II.5. Conclusion	42
------------------------	----

Chapitre III : Partie expérimentale

Introduction.....	43
III.1. Matériels et produits utilisés.....	43
III.1.1. Le matériel.....	43
III.1.2. Matières premières utilisées.....	43
a) Résine époxyde.....	43
b) La fibre de verre (tissé).....	44
III.2. Elaboration des éprouvettes.....	44
a) La résine époxyde.....	44
b) La fibre de verre tissé.....	45
c) Le stratifié.....	45
III.3. Caractérisation physico-mécanique des différentes variantes.....	46
III.3.1. Caractérisation physique des éprouvettes.....	46
III.3.2. Calcul de la teneur du renfort et de la matrice.....	46
III.3.3. Essai de calcination.....	46
III.3.4. Principe de l'essai.....	46
III.3.5. Matériel utilisé pour l'essai de calcination.....	47
III.3.6. Déroulement de l'essai.....	47
a) Calcul du taux des différents matériaux (fibre/résine).....	48
b) Calcul du module de Young pour le stratifié (Six plis, Huit plis).....	49
III.3.7. Analyse des résultats.....	49
III.4. Caractérisation mécanique des éprouvettes.....	50
III.4.1. Description du dispositif expérimental.....	50
III.4.2. Essai de traction.....	50
a) La résine époxyde.....	50
b) La fibre de verre tissé.....	51
c) Le matériau composite stratifié verre / époxy.....	51
III.4.2.1. Principe de l'essai de traction.....	52
III.4.2.2. Présentation des résultats et interprétations.....	53
III.4.2.2.1. La résine époxyde.....	53
a) Caractéristiques de la résine époxyde.....	53
b) Interprétation des résultats.....	55
III.4.2.2.2. La fibre de verre (tissé).....	55

a) Caractéristiques de la fibre de verre (tissé).....	55
b) Interprétation des résultats.....	56
III.4.2.2.3. Le stratifié fibre de verre (tissé)/ résine époxyde.....	56
a) Caractéristiques du stratifié verre/époxy.....	56
b) Interprétation des résultats.....	57
III.4.3. Essai de flexion trois points	58
III.4.3.1. Préparation des éprouvettes.....	58
III.4.3.2. Principe de l'essai de flexion 3 points.....	58
III.4.3.3. Présentation et interprétation des résultats.....	59
a) Les graphes de la résine époxyde.....	59
b) Caractéristiques du stratifié.....	60
c) Interprétation des résultats.....	62

Liste des tableaux

Liste des tableaux :
Chapitre I : Etude bibliographique

Tableau I.1. Caractéristiques des résines thermoplastiques [6].....	3
Tableau I.2. Tableau comparatif entre les résines thermodurcissables [11].....	4
Tableau I.3. Caractéristiques des résines thermodurcissables [6].....	5

Chapitre II : Principaux essais appliqués sur les composites

Tableau. II. 1. Éprouvettes de traction, selon ISO 527-4 et -5.....	22
Tableau. II. 2. Des éprouvettes de flexion trois pannes, selon EN ISO 14125.....	27
Tableau. II. 3. Éprouvettes de flexion « hors normes » selon EN ISO 14125.....	28
Tableau. II. 4. Éprouvettes de flexion « hors normes » selon EN ISO 14125.....	28
Tableau. II. 5. Éprouvettes de compression, selon EN ISO 14126.....	31

Chapitre III : Partie expérimentale

Tableau III.1. Caractéristiques de la résine époxyde.....	44
Tableau III.2. Les dimensions des éprouvettes haltères selon la norme NF EN ISO 527-4.....	45
Tableau III.3. Résultats de calcination sur des éprouvettes testées en traction.....	48
Tableau III.4. Récapitulatif des résultats du module de Young.....	49
Tableau III.5. Le type de machine utilisé pour effectuer les essais sur les matériaux.....	50
Tableau III.6. Dimensions des éprouvettes de la résine époxyde.....	51
Tableau III.7. Dimensions des éprouvettes du stratifié.....	51
Tableau III.8. Dimensions des éprouvettes du stratifié.....	51
Tableau III.9. Caractéristiques de la résine époxyde.....	54
Tableau III.10. Caractéristiques des éprouvettes de la fibre de verre (tissé).....	55
Tableau III.11. Caractéristiques du stratifié verre / époxy de la variante 01 à la traction.....	56
Tableau III.12. Caractéristiques du stratifié verre/ époxy de la variante 02 à la traction.....	57
Tableau III.13. Dimensions recommandées des éprouvettes.....	58
Tableau III.14. Caractéristiques du stratifié variante 01 à la flexion trois points.....	60
Tableau III.15. Caractéristiques du stratifié variante 02 à la flexion trois points.....	61

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : Etude bibliographique

Figure I.1. Les constituants des matériaux composites	2
Figure I.2. organigramme- différents types de matrice	3
Figure I.3. Les structures chimiques de DGEBA n=2, MHHPA, APTES et de TEOS	6
Figure I.4. Organigramme - différents types de renforts	8
Figure I.5. Chaîne et trame	8
Figure I.6. Structures de renfort en multidirectionnelles	9
Figure I.7. De gauche à droite - fibre de verre, de carbone et d'aramide	10
Figure I.8. Composite monocouche.....	13
Figure I.9. Composite stratifié.....	14
Figure I.10. Composite sandwichs.....	16
Figure I.11. Procédés du moulage au contact	17

Chapitre II : Principaux essais appliqués sur les composites

Figure.II.1. Géométrie des éprouvettes de traction de type I et II, selon ISO 527-4et 5.....	23
Figure.II.2. Géométrie des éprouvettes de traction de type III, selon ISO 527-4et 5.....	24
Figure.II. 3. Essai de flexion trois pannes, selon EN ISO 14125.....	25
Figure. II. 4. Essai de flexion quatre pannes, selon EN ISO 14125.....	27
Figure. II. 5. Essai de flexion quatre pannes, selon EN ISO 14125.....	29
Figure. II. 6. Principes des différents modes de chargement.....	30
Figure. II. 7. Schéma d'éprouvette de compression, selon EN ISO 14126. en compression...31	31
Figure. II. 8. Essais de compression : modes de rupture, selon EN ISO 4126.....	33
Figure. II. 9. Machine d'essai de choc pendulaire (d'après norme ASTM D 256.....	35
Figure. II. 10. Dispositif d'essai de choc Charpy (d'après norme ISO 179).....	36
Figure. II. 11. Principe du choc Charpy (d'après norme ISO 179).....	36
Figure. II. 12. Dispositif d'essai de choc Izod (d'après norme ISO 180).....	38
Figure. II. 13. Dispositif d'essai de choc-traction et éprouvette à double épaulement (d'après norme NF EN ISO 8256).....	39
Figure. II. 14. Dispositif d'essai de choc multiaxial par chute de masse (d'après norme ISO 6603).....	40

Chapitre III : Partie expérimentale

Figure III.1 Fibre de verre tissé.....	44
Figure III.2 dimensions de l'éprouvette haltère.....	44
Figure III.3. Le moule.....	45
Figure III.4. Elaboration du matériau composite.....	46
Figure III.5. Matériau composite après essai de calcination.....	47
Figure III.6. Four utilise pour essai de calcination.....	47
Figure III.7. Four utilise pour essai de calcination.....	48
Figure III. 8. Machine universelle.....	50
Figure III.9. Dimensions de l'éprouvette pour essai de traction.....	52
Figure III.10. Eprouvettes pour l'essai de traction.....	52
Figure III.11. Eprouvette avant l'essai.....	52
Figure III.12. Eprouvette après essai.....	52
Figure III.13. Comportement en traction de la résine époxyde.....	53
Figure III.14. Calcul du module de YOUNG pour l'essai de traction.....	54
Figure III.15. Comportement en traction de la fibre de verre (tissé).....	55
Figure III.16. Comportement en traction de la variante 01 (gauche) et variante 02 (droite) du stratifié.....	56
Figure III. 17. Exemple des éprouvettes du stratifié verre/ époxy.....	58
Figure III.18. Dispositif pour l'essai de flexion à trois points.....	59
Figure III.19. Principe de l'essai de flexion à trois points.....	59
Figure III.20. Comportement du stratifié variante 02 (gauche) et variante 01(droite) à l'essai de flexion trois points.....	60

Introduction générale

Introduction générale

Le développement de l'industrie et des pratiques technologiques sont accompagnés par de nouvelles générations de matériaux. Parmi ces matériaux, les composites, qui sont souvent présentés comme des matériaux d'avenir et avancés en raison du potentiel d'innovation qu'ils véhiculent. L'emploi de ces matériaux a connu un développement important vu les avantages qu'ils présentent par rapport aux matériaux métalliques : légèreté, résistance à la fatigue mécanique, insensibilité à la corrosion, facilité et possibilités de mise en œuvre et faible coût.

Notre étude porte sur la détermination des propriétés physico-mécaniques d'un matériau composite de type stratifié à base de fibre de verre et de la résine époxyde.

Dans le premier chapitre de ce mémoire, nous présentons une étude bibliographique sur les matériaux composites (matrices/ renforts), on abordera les éléments constituant les matériaux composites, les caractéristiques mécaniques générales, la classification et la mise en œuvre de ces matériaux composites.

Le deuxième chapitre concernera les principaux essais appliqués sur le matériau composite stratifié fibre de verre / résine époxyde, dont lequel nous allons parler des propriétés physiques des matériaux composites à savoir le taux de renfort et de résine, de taux de porosité et des propriétés mécaniques, telles que l'essai de traction, l'essai de flexion trois et quatre points, l'essai de compression et en fin nous allons aborder le comportement au choc des matériaux composites.

On terminera par le troisième chapitre qui sera consacré d'abord à l'élaboration des matériaux composites stratifié à base de fibres de verre et de résine époxyde, puis on procède à la détermination des caractéristiques physiques du matériau composite stratifié fibre de verre/ résine époxy, on déterminera en deuxième lieu les caractéristiques mécaniques à la traction de la résine époxyde seule, puis celles de la fibre de verre seule et on terminera notre étude par la détermination des caractéristiques mécaniques à la traction et à la flexion à trois points du composite stratifié fibre de verre / résine époxy.

Premier chapitre

Introduction :

L'étude bibliographique dans ce chapitre présente dans un premier temps les matériaux composites et leurs constituants (renfort et matrice). Ensuite nous avons abordé la classification de ces matériaux suivant différentes manières, enfin nous donnons une idée sur les propriétés générales et la mise en œuvre des matériaux composites.

I-1. Définition :

Un matériau composite peut être défini comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante matériaux composites des arrangements de renforts (appelés aussi charges) qui sont noyés dans une matrice [2].

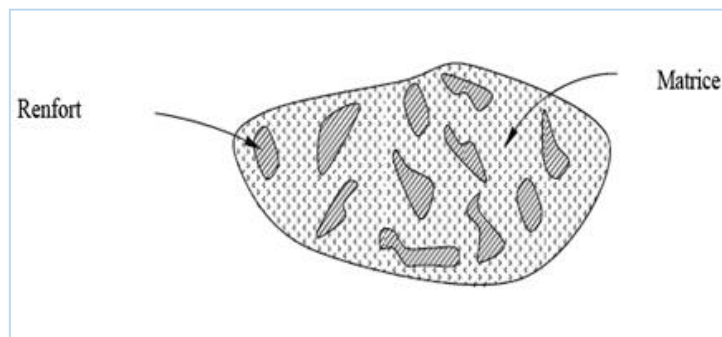


Figure I.1. Les constituants des matériaux composites [1].

I-2. Les éléments constituant d'un composite :

Un matériau composite, suivant notre étude, est constitué d'une matrice continue renforcée par des fibres. La matrice elle-même composée d'une résine et de charges, elle assure la cohésion et l'orientation du renfort. Le matériau ainsi obtenu est très hétérogène et souvent anisotrope. Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques élevées, alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures [1].

I-2-1. La matrice :

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère, elle permet de lier et de maintenir les fibres entre elles, répartie les efforts (résistance à la compression ou à la flexion) et assure la protection chimique des fibres. Le schéma suivant, présente les différentes familles des matrices [6].

Les résines utilisées dans les matériaux composites doivent être assez déformables et présenter une bonne compatibilité avec les fibres et doivent aussi avoir une masse volumique faible de manière à conserver au matériau composite des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées [1].

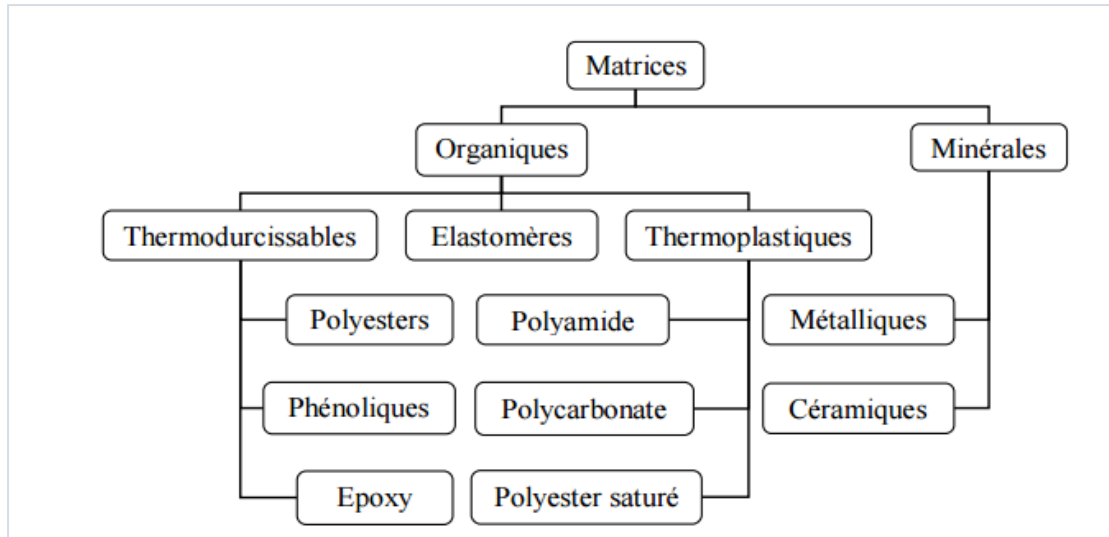


Figure I.2. organigramme- différents types de matrice [7].

Deux grandes familles de résines polymères existent : les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables [6]:

I.2.1.1. Les résines thermoplastiques : Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température et possèdent la propriété de pouvoir être mise en forme plusieurs fois par chauffage et refroidissements successifs. Elles peuvent donc être récupérées et facilement recyclées. Ce type de résine peut être séparé en plastique de grande diffusion et plastique technique.

Les plastiques de grande diffusion sont mis en œuvre soit par interjection pour obtenir des objets moulés, soit par extrusion pour obtenir des films, des plaques des tubes, des profiles, etc. les plastiques techniques sont généralement mis en œuvre par injection.

Parmiles résines thermoplastiques nous citerons : le polychlorure de vinyle (PVC), les polyéthylènes, le polypropylène, le polystyrène, le polycarbonate polyamide, etc.

Le tableau suivant présente les caractéristiques de certaines de ces résines thermoplastiques :

Tableau I.1. Caractéristiques des résines thermoplastiques [6].

Résine	T_f ($^{\circ}\text{C}$)	ρ (Kg/m ³)	σ_t (MPa)	E (GPa)
Polyamide	65 à 100	1140	60 à 85	1.2 à 2.5
polypropylène	900	1200	20 à 35	1.1 à 1.4

I.2.1.2. Les résines thermodurcissables :

Les résines thermodurcissables sont mises en forme qu'une seule fois et se polymérisent selon la forme souhaitée avec une transformation irréversible, possèdent des propriétés mécaniques

et surtout thermo- mécaniques plus élevées que les résines thermoplastiques. Elles ont une stabilité thermique beaucoup plus élevée en comparaison avec les matériaux thermoplastiques, un grand avantage pour des applications d'une demande très élevée.

Des remplisseurs ou charges sont employés en polymères pour une variété de raisons, à savoir réduire le coût, améliorer le traitement, la densité de commande, conductivité thermique, dilatation thermique, propriétés électriques, propriétés magnétiques, retard de flamme, et pour améliorer les propriétés mécaniques [10]. En général, les remplisseurs peuvent changer l'exécution des composés de polymère en changeant la couleur, viscosité, propriétés de barrière, les propriétés électriques et thermiques, la finition de surface, le rétrécissement, etc...

Les résines thermodurcissables principalement utilisées sont les suivantes :

- Résines époxydes : font l'objet de notre étude.
- Résines phénoliques : sont obtenues par la polycondensation du phénol et du formol ; elles présentent une très bonne tenue au feu, sans fumée, c'est pour cette raison qu'on les utilise dans les des transports ferroviaires. Elles sont fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à mettre en œuvre.
- Résines polyamides.
- Résines polyesters : se présentent sous la forme d'une solution polyacide + polyalcool qui se rigidifient sous l'action d'un catalyseur et de l'action de la chaleur. Elles présentent le grand défaut d'émettre des vapeurs de styrène au cours de la polymérisation et d'être difficile à stocker.

Le Tableau I.2, représente une comparaison entre ces types de résines :

Tableau I.2. Tableau comparatif entre les résines thermodurcissables [11].

	Polyesters	Phénolique	Époxydes	Polyamides
Caractéristiques mécaniques	Moyenne	Faible	Très bonne	Excellentes
Tenue aux chocs	Très bonne	Très faible	bonne	Très bonne
Tenue en fatigue	Faible	faible	Moyenne	Bonne
Pouvoir adhésif	Moyenne	Moyenne	Très bonne	Très bonne
Température maxi d'utilisation	140°C	130°C	190°C	260°C
Tenue au feu	Mauvaise	Bonne	Moyenne	Très bonne
retrait	Important	faible	Très faible	Très faible
Durée de polymérisation	Courte	Courte	Longue	Moyenne
Mise en œuvre	Très faible	Difficile	Facile	Difficile

Le tableau I.3 représente certaines caractéristiques des résines thermodurcissables :

Tableau I.3. Caractéristiques des résines thermodurcissables [6].

résine	T_f ($^{\circ}\text{C}$)	ρ (Kg/m ³)	ϵ_t (MPa)	σ_t (MPa)	σ_c (MPa)	E (GPa)
Polyesters	60 à 100	1140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2.8 à 3.6
Phénoliques	120	1200	2.5	40	250	3 à 5
époxydes	290	1100 à 1500	2 à 5	60 à 80	250	3 à 5

Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont [1] :

- les résines polyesters insaturées, polyesters condensés, vinylesters, dérivés allyliques, etc.
- les résines de condensation : phénoliques, aminoplastes, furanique.
- les résines époxydes.

➤ Les matrices époxydes

L'époxy ou scientifiquement nommé polyépoxyde est un thermodurcissable composé d'une résine dite prépolymère qui contient des monomères dont les fonctions époxydes sont les groupements réactifs de la résine, et le durcisseur permettant l'ouverture du cycle époxy et la liaison entre les monomères [12]. Pour cela, les durcisseurs doivent posséder au moins deux fonctions pouvant réagir avec le prépolymère en déclenchant la copolymérisation (réaction de polycondensation) de la résine et en formant un réseau tridimensionnel, non cristallin et infusible. Ce sont souvent des amines ou des anhydrides.

D'autres ajouts peuvent être additionnés et sélectionnés selon le domaine d'application de la résine, tels que les diluants qui sont utilisés dans la formulation de la résine époxy pour réduire la viscosité ou éliminer les solvants. Ces ajouts permettent à la résine époxyde d'être la famille la plus polyvalente des résines, (peuvent être facilement modifiées) pour avoir des propriétés différentes. Cette modification peut être réalisée par :

- La sélection d'un prépolymère approprié ou une combinaison de différentes familles de prépolymère.
- La sélection d'un agent de durcissement et de mécanisme de réaction associé.
- L'addition simple des charges organiques ou inorganique et les composantes [13].

➤ Constituants de la résine époxyde

a) **Prépolymère** : D'une façon générale, les prépolymères sont caractérisés par les facteurs suivants :

n : est le degré de polymérisation qui dépend du rapport molaire entre l'épichlorhydrine et le diphénylpropane (les deux produits pour la synthèse de monomère).

Suivant sa valeur, la molécule est plus ou moins longue, et la viscosité du produit est alors modifiée :

- ✓ Si $0 < n < 1$: le prépolymère est liquide ;
- ✓ Si $1 < n < 1,5$: le prépolymère est très visqueux ;
- ✓ Si $n > 1,5$: le prépolymère est sous forme solide.

Mn (g/mol) : représente la masse molaire du prépolymère : $Mn = 340 + 248n$;

L'indice époxyde (IE) : est le nombre d'équivalents d'époxydes, c'est-à-dire de moles d'époxydes contenues dans un kilogramme de prépolymère (équivalent époxyde / kg de résine ou mol/kg), avec $IE = 2000/Mn$;

Le poids équivalent d'époxydes (EP) : c'est la quantité de résine en grammes contenant un équivalent d'époxyde.

Selon le nombre de fonctions époxydes que possède le prépolymère (2, 3 ou 4), celui-ci est bi, tri ou tétra-fonctionnel. Il existe de nombreux prépolymères époxydes, le plus connu d'entre eux étant la DGEBA ou DiGlycidyl Ether du Bisphénol A. C'est le premier prépolymère époxyde apparu sur le marché et le plus répandu puisqu'il constitue à lui seul 95 % de la production mondiale [14]. Sa structure chimique est présentée dans la figure I.7 [15].

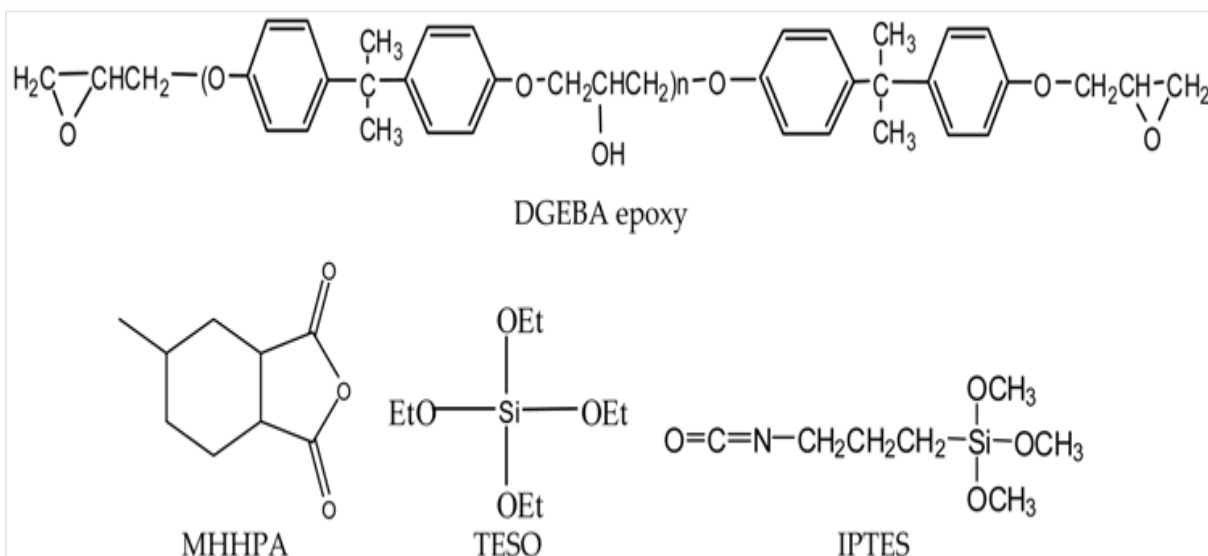


Figure I.3. Les structures chimiques de DGEBA $n=2$, MHHPA, APTES et de TEOS [16].

La résine époxy (Figure I.7) à été durcie avec 2,4 méthylhexahydrophthalique anhydride (MHHPA). Les alcoxydes, 4,3-isocyanatopropyltriéthoxysilane (IPTES) et le tétraéthoxysilane (TEOS),

I.2.1.3. Les résines thermostables [1] :

Ces types de résines se distinguent des autres résines par leurs performances thermiques qui conservent leurs propriétés mécaniques pour des températures plus élevées que 200 °C. Parmi les résines thermostables les plus utilisées, les résines bismaleimides et polyimides.

I-2-2. Les renforts :

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet de résistance orientée.

I.2.2.1. Renfort en fibres discontinues

Des fibres courtes, ou particules (charges sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écaillés ou de poudre), permettent d'améliorer certaines propriétés de la matrice (résistance à l'usure, propriétés thermiques, poids). Celle-ci reste l'élément de base et on obtient alors un « polymère renforcé ».

I.2.2.2. Renfort en fibres continu

Sous forme de fibres longues qui sont généralement utilisées pour des composites HP. Cette forme fibreuse offre une résistance à la rupture et souvent un module d'élasticité beaucoup plus élevée que ceux du même matériau massif, avec une augmentation de la longueur de 10000 fois, ou bien pour le même volume, la surface est multiplié par 100 dans le cas des fibres de verre. [19].

Ces renforts ont le rôle d'assurer la bonne tenue mécanique des composites et sont disposés au sein du matériau en fonction des propriétés recherchées. Pour créer une structure résistante adaptée aux contraintes mécaniques, il existe plusieurs architectures de renforts : unidirectionnelle (nappes ou roving), bidirectionnelle (tissus ou complexes 2D), tridimensionnelle (fibres orientées suivant trois directions).

I-2-2-3. Divers types de renforts fibreux commercialisés :

Les renforts fibreux se présentent sous diverses formes commerciales [1]:

- sous forme linéique (fils, mèches,...);
- sous forme de tissus surfaciques (tissus simples, mats,...);
- sous forme multidirectionnelle :(tresses, tissus complexes,...).

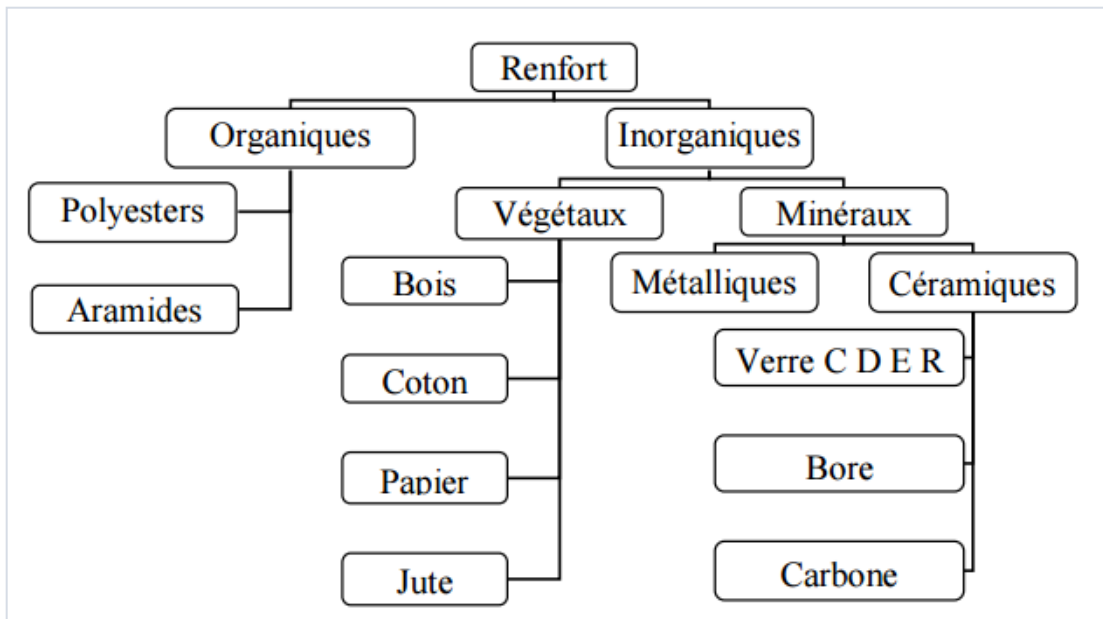


Figure I.4. Organigramme - différents types de renforts [7].

a) Formes linéiques :

Dans ces matériaux, les fibres sont toutes alignées dans une même direction. Ils présentent d'excellentes propriétés mécaniques dans la direction des fibres. Cette structure trop anisotrope, présente peu d'intérêt pratique.

b) Formes surfaciques :

Les fils peuvent être utilisés pour réaliser des formes surfaciques de divers types: mats, tissus ou rubans, essentiellement développés dans le cas de fibres de verre. La forme surfacique, dite aussi structure bidirectionnelle (2D), est la structure typique pour des pièces en formes de plaques ou de coques. Il s'agit d'un assemblage de fibres sous forme de mèches, orientées suivant deux directions généralement perpendiculaires, soit par couches successives (stratifiés, soit par tissage. Les tissus peuvent être superposés avec des désorientations entre les directions principales, ce qui confère à la structure des propriétés axisymétriques.

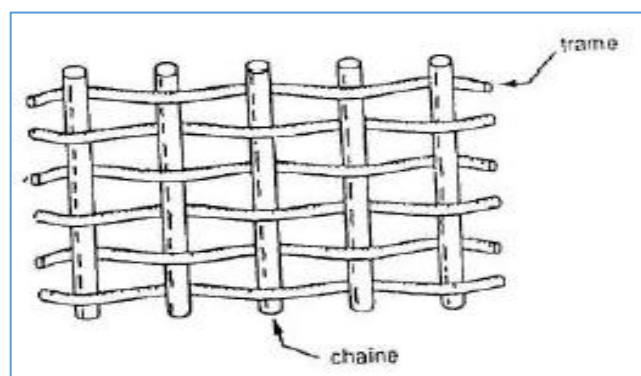


Figure I.5. Chaîne et trame [1].

c) Structures tissées multidirectionnelles :

En plus des tissages plans, il est possible de réaliser des tresses ou préformes par tissage cylindrique ou conique d'un tissu tubulaire. Les fils s'entrecroisent en hélice, dont la variation du pas permet d'ajuster la tresse à la forme qu'elle doit recouvrir.

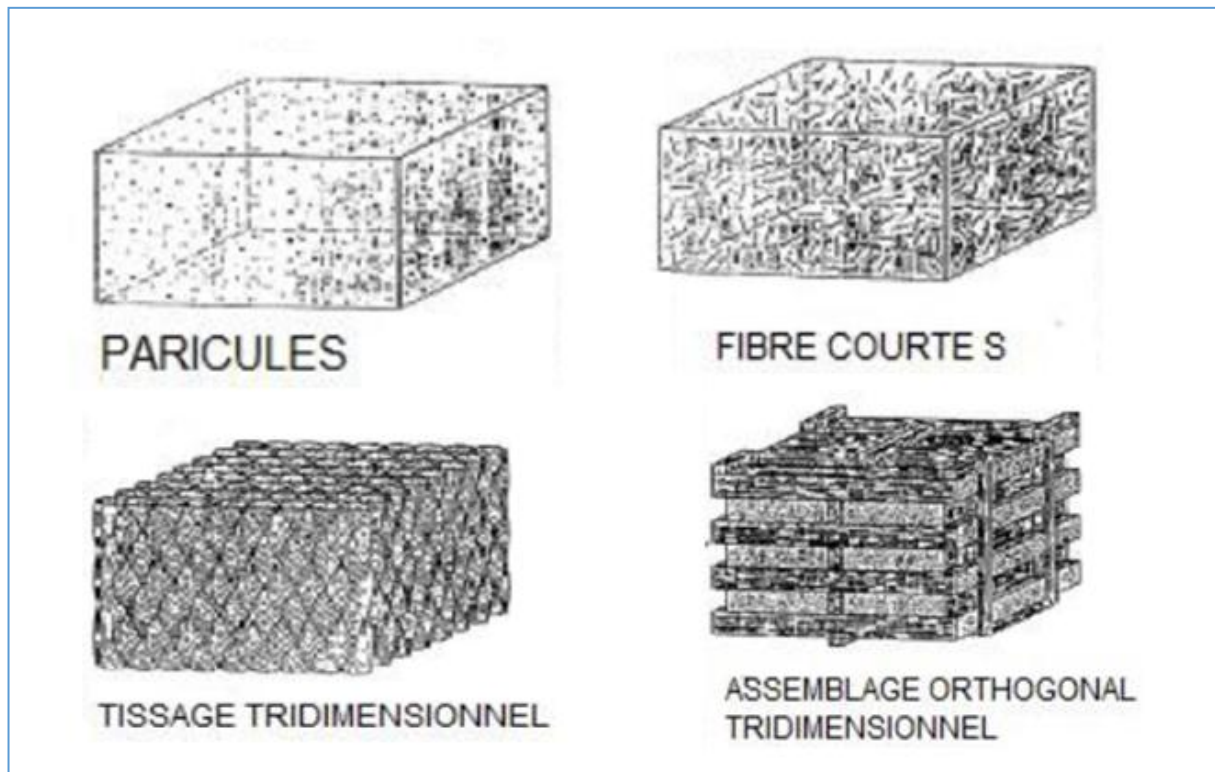


Figure I.6. Structures de renfort en multidirectionnelles [1].

I-2-2-4. Les principales fibres [1] :

a) Les fibres de verre :

Le verre élaboré sous forme de fibres de faible diamètre, possède de bonnes caractéristiques mécaniques. Les fibres de verres sont réalisés à partir d'un verre filable, appelé verre textile qui leur confèrent un excellent rapport performances/prix, et les placent au premier rang des renforts les plus utilisés actuellement dans les matériaux composites.

Dans la pratique, différents types de verres filables peuvent être obtenus :

- Les verres de type E constituent la presque totalité du tonnage de verre textile produit actuellement.
- Les verres de type D, à haute propriétés diélectriques.
- Les verres de type C, résistant aux agents chimiques.
- Les verres de types R et S, utilisés pour la réalisation de structures à hautes performances mécaniques.

b) les fibres de Carbone :

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. Actuellement, les fibres précurseur utilisées sont des fibres acryliques élaborées à partir du polyacrylonitrile (PAN). La qualité des fibres de carbone finales dépend fortement des qualités du précurseur.



Figure I.7. De gauche à droite -fibre de verre, de carbone et d'aramide [5].

c) Les fibres aramides :

Les fibres d'aramides ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbones mais leurs résistances à la compression est faible. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour y remédier, des enzymages des fibres peuvent être utilisé. L'utilisation de composites à fibres hybrides permet également de remédier aux faiblesses des composites à fibres aramides. Des renforts hybrides de type verre-kevlar ou carbone-kevlar sont largement utilisés dans le domaine des loisirs (ski, raquette de tennis).

d) Les fibres céramiques :

Les matériaux composites de type céramiques sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée entre 500°C et 2 000°C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs d'avions. Quelques exemples de fibres céramiques :

- fibres de Carbure de Silicium
- fibres de Bore
- fibres de Bore carbure de silicium

e) Les fibres de bore :

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

f) Les fibres de silice :

Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée.

I-2-3. Les charges et additifs :

Les charges et les additifs sont incorporés à la résine pour lui conférer des caractéristiques particulières ou en réduire son coût. Permet également d'améliorer les caractéristiques mécaniques et physiques du produit fini et de faciliter sa mise en œuvre.

Elles sont le plus souvent minérales : carbonate de calcium, mica, talc, carbone (noir de fumée) qui modifie la conductivité électrique et a une influence sur les charges statiques, le graphite colloïdal, le disulfure de molybdène. La silice finement divisée est utilisée pour rendre les liquides thixotropes. On l'utilise dans les peintures, mais aussi dans les gelscoats, c'est-à-dire dans les revêtements de la surface des moules avec une résine colorée (UP, EP) que l'on retrouve à la surface de l'objet au moment du démoulage. La thixotropie conférée par la charge de silice facilite la mise en place de la résine qui est fluide pendant l'enduction du moule et devient ensuite visqueuse et ne coule pas avant de durcir. L'utilisation d'un voile de surface améliore la tenue du gel coat.

Les charges peuvent être plus rarement métalliques : aluminium et fer qui permettent d'augmenter la conductivité thermique des résines ; or ou argent qui augmentent la conductivité électrique (encres conductrices) [4].

a) Les charges organiques :

Charges cellulosiques, utilisées en tant que charges des résines thermodurcissables (phénoplastes et aminoplastes).

Les avantages de ces matières cellulosiques sont leur coût peu élevé et leur faible densité.

- ◆ Farines de bois
- ◆ Farines d'écorces de fruit et de noyaux
- ◆ Fibres végétales
- ◆ Pâtes de cellulose
- ◆ Amidons

b) Les charges minérales :

La silice (SiO_2), à l'état pur ou combinée avec des oxydes métalliques, est utilisée comme charge sous différentes formes, suivant son origine, sa cristallinité, sa dureté et la taille des particules.

Les talcs sont utilisés pour améliorer l'isolation thermique et la résistance à l'eau, et faciliter l'opération de moulage. Oxydes et hydrates métalliques

L'alumine, les oxydes de zinc, de magnésium, de titane et d'antimoine sont utilisés sous forme de poudres fines comme charges du polypropylène, des compositions polyvinyliques, des résines époxydes, des polyesters insaturés.

c) Le verre :

Une nouvelle variété de poudre de verre de granulométrie 13 μm est apparue sur le marché et son incorporation confère aux thermodurcissables de meilleures résistances à l'abrasion et à la compression ; elle permet par ailleurs d'obtenir un retrait plus faible et plus homogène des pièces moulées.

Les billes de verre creuses, de densité comprise entre 0,1 et 0,5, sont obtenues par chauffage de billes de verre contenant un agent gonflant.

d) Le carbone :

Le noir de carbone est utilisé depuis très longtemps dans l'industrie des plastiques, à la fois comme colorant.

Le noir de carbone améliore la résistance à la chaleur du polyéthylène réticulé par irradiation. La conductivité thermique augmente avec le taux de charges, indépendamment de la taille des particules [5].

I-3. Classifications des matériaux composites :

I-3-1. Classification suivant la forme des constituants :

Suivant la formes des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes : les matériaux composites à particules et les matériaux composites à fibres [1] :

a) Composites à fibres :

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

b) Composites à particules :

Un matériau composite est un composite à particule lorsque le renfort se trouve sous la forme de particules. Une particule par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension privilégiée. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices. Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charges pour réduire le cout du matériau sans en diminuer les caractéristiques.

I-3-2. Classification suivant la nature des constituants :

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés suivant :

a) 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.

D) 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 (BorSiC).

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

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

I-3-3. Classification suivant leurs structures [8] :

I.3.3.1. Les monocouches :

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 longues (unidirectionnelles 1D, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes.

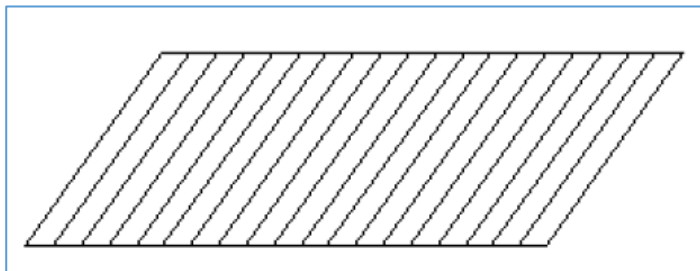


Figure I.8. Composite monocouche.

I.3.3.2. Les stratifiées :

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié.

Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques.

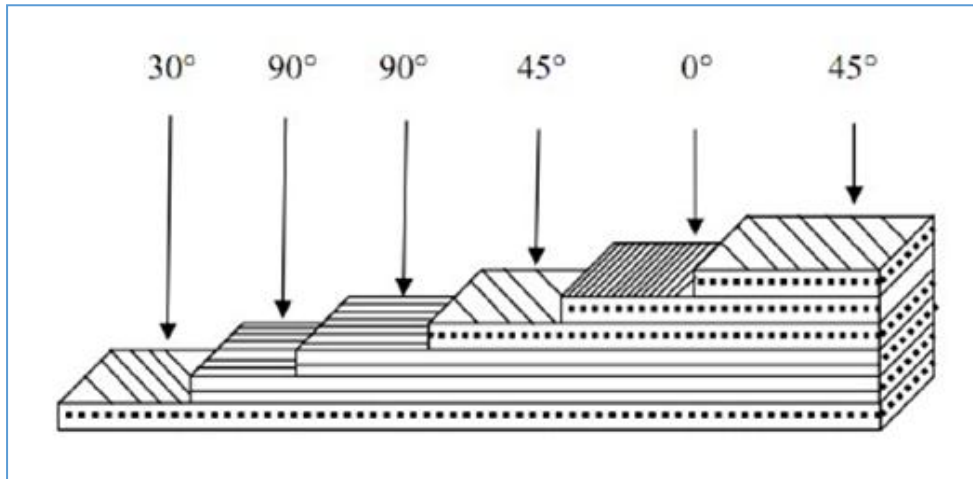


Figure I.9. Composite stratifié [9].

I.3.3.3. Les sandwichs :

Les matériaux composites de types sandwichs sont principalement constitués de deux composants nommés : peau et noyau (Fig.14). Les propriétés de ce type de matériaux dépendent de celles du noyau et des peaux, de leurs épaisseurs et des caractéristiques de liaison entre elles.

- **Le noyau :**

Le rôle principal de l'âme dans le matériau sandwich est de résister aux efforts de cisaillement. Par ailleurs, l'âme doit pouvoir supporter des charges localisées de poinçonnement. Dans les faits, c'est le constituant de l'âme qui permet de classer les différentes structures en matériau sandwich. Il existe un grand nombre de matériaux qui peuvent être utilisés comme noyau. Ces matériaux sont divisés en trois classes :

- Matériaux solide à faible densité : balsa et d'autres types de bois.
- Matériaux à haute densité augmentés en forme cellulaire : nid d'abeilles.
- Matériaux à haute densité augmentés sous la forme ondulée : feuilles ondulées.

Parmi les âmes les plus utilisées, citons celles en mousse, en nid d'abeilles et en bois de balsa :

- Les mousses : ce sont les plus fréquemment utilisées, elles sont produites à partir de polychlorure de vinyle, polystyrène, polyuréthane ou d'autres polymères synthétiques. Elles sont thermoformables et permettent donc de réaliser des pièces de formes complexes. Leurs propriétés mécaniques sont bonnes, elles adhèrent bien à la résine et absorbent peu d'eau.

Néanmoins, leur point faible réside dans une faible résistance à l'impact.

- Le bois : il est utilisé pour sa très bonne résistance à la compression notamment pour les supports d'accastillage. Le bois le plus utilisé comme matériau d'âme est le balsa. Les âmes en balsa ont été utilisées pour la première fois dans les années 1940 sur des hydravions. Le

bois de balsa est aussi un isolant thermique mais pour conserver cette propriété, il doit être traité avec un produit hydrofuge puisqu'il est très hygroscopique.

– Le nid d'abeilles : l'âme en nid d'abeilles, connue sous le nom « Nida », est un matériau structural souple constitué de mailles hexagonales. Elle est réalisée à partir de différents matériaux comme par exemple le papier ou l'aluminium. Le Nida étant une structure anisotrope, ses propriétés varient selon le sens transversal ou longitudinal des alvéoles (taille de mailles). De plus, la taille de celles-ci, l'épaisseur des parois du Nida et la méthode de mise en œuvre sont des paramètres qui influencent la résistance au cisaillement transversal et longitudinal du Nida. Les variétés les plus courantes sont le Nomex et le Korex et sont fabriquées à partir du Kevlar. [17]

- **La peau :**

Le but des peaux est de reprendre les efforts dans le plan. De bonnes propriétés de raideur et de résistance en traction et compression sont donc nécessaires.

De plus, la résistance à l'impact, la finition de surface, la résistance à l'environnement et la résistance à l'usure peuvent être des propriétés importantes selon les applications. Deux principaux types de peaux peuvent être envisagés : métalliques et non-métalliques. Dans la catégorie non-métallique, les matériaux les plus intéressants sont les composites à base de fibres. En effet, ils peuvent offrir de bonnes propriétés de raideur et de résistance pour une masse moins importante que les matériaux métalliques. Ils sont anisotropes : l'orientation des fibres permet de reprendre les efforts dans une ou plusieurs directions préférentielles. Les types de fibres les plus utilisés sont les fibres de verre, les fibres d'aramide (souvent connues sous le nom commercial Kevlar®) et les fibres de carbone. Les fibres de verre ont l'avantage d'être peu coûteuses, mais ont un module d'élasticité moins élevé et une masse volumique plus importante que les autres fibres utilisées couramment. Les fibres d'aramide ont une faible masse volumique, un module et une résistance élevés. Cependant, leur résistance à l'usure les rend difficiles à usiner. Les fibres de carbone sont très rigides et résistantes, mais sont coûteuses. Elles sont largement utilisées dans les applications aérospatiales. [18]

Une large variété de matériaux est utilisée comme peau, par exemple : les feuilles de métaux comme l'aluminium, le titane,...etc. Le choix des matériaux utilisés comme peau est important du point de vue de l'environnement de travail, car la présente partie entre en contact direct avec ce dernier [14].

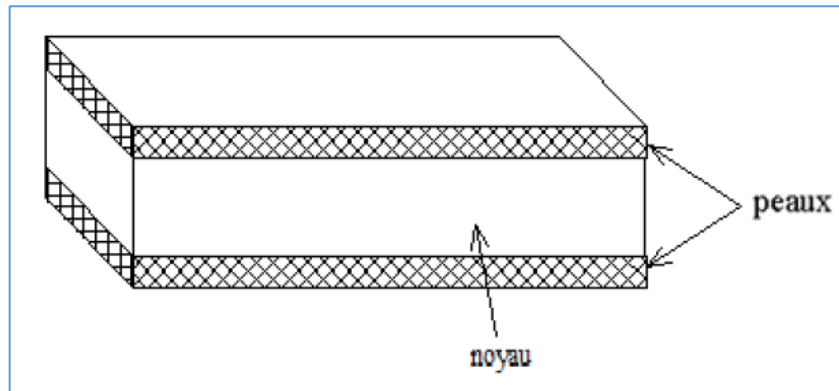


Figure I.10. Composite sandwichs.

I-4. Caractéristiques générales des matériaux composites :

La description d'un matériau composite, nécessite la connaissance de [1] :

- La nature des constituants et des propriétés de chacun
- La géométrie du renfort et sa distribution
- La nature de l'interface matrice- renfort.

a) La géométrie du renfort sera caractérisée par sa forme, sa taille, la concentration du renfort, sa disposition (son orientation), etc.

b) La concentration du renfort est un paramètre déterminant des propriétés du matériau composite, elle est mesurée par la fraction volumique ou par la fraction massique.

c) La distribution du renfort dans le volume du composite est également un paramètre important pour une concentration donnée. Une distribution uniforme du renfort assurera une homogénéité du matériau : les propriétés du composite seront indépendantes du point de mesure. Dans une distribution non uniforme du renfort, la rupture du matériau sera initiée dans les zones pauvres en renfort, diminuant ainsi la résistance du matériau composite.

I-5. Procédés de mise en œuvre des composites [8] :

De nombreuses méthodes de mise en œuvre ont été développées pour répondre aux besoins, et leurs choix dépendent surtout des caractéristiques mécaniques et de la géométrie du produit, ainsi que l'importance des séries. Les procédés de mise en œuvre les plus importants sont :

1.5.1. Moulage au contact :

Technologie de réalisation de pièces prototypes ou dissimulation. Le principe consiste à imprégner manuellement les renforts disposés dans un moule. C'est peu onéreux et des pièces de formes quelconques peuvent être réalisées mais cadence très faible.

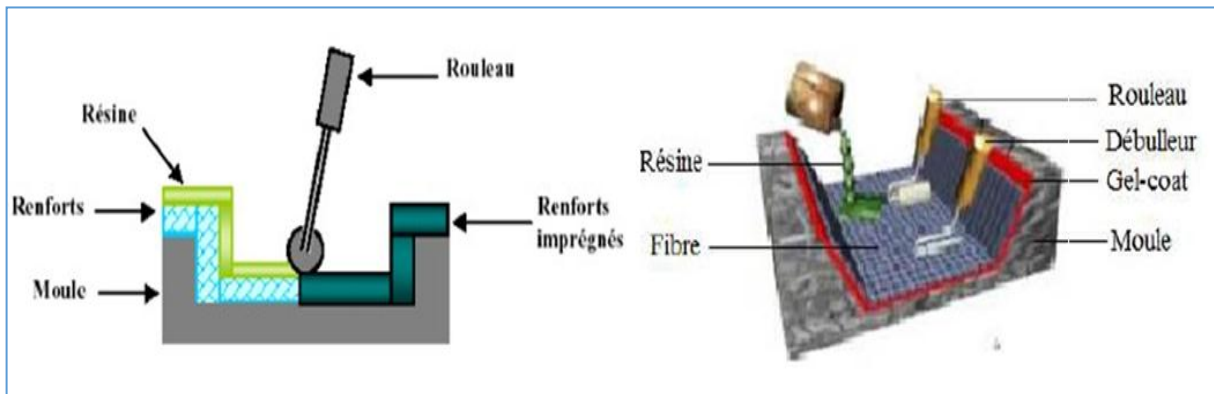


Figure I.11. Procédés du moulage au contact [9].

1.5.2. Moulage par projection simultanée :

Technologie similaire mais les fibres coupées sont projetées au pistolet.

1.5.3. Injection thermodurcissable BMC (Bulk Molding Compound):

Procédé discontinu haute pression (100 bars). Alimentation et dosage du Compound, Injection-pression, maintien et polymérisation, puis éjection.

Les avantages sont : réalisation de grande série, faible coût matière, peu de finition, temps de cycle. Les limites sont : le taux et la longueur des renforts et les propriétés mécaniques du composite obtenu.

1.5.4. 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. Avantages : coût matière, propriétés mécaniques et thermiques.

Les limites sont l'aspect, le dimensionnement des presses et la finition.

1.5.5. Pultrusion :

Utilisation pour les composites hautes performances industrielles. Le principe est : tirage, mise en forme et polymérisation de fibres continues imprégnées. Les avantages sont la production en continue, possibilité de réaliser des sections très complexes, et d'avoir un taux de renfort élevé. Les limites sont la lenteur du procédé, uniquement des profilés droits à section constante.

1.5.6. Enroulement filamentaire (ou bobinage):

Technologie pour les HP. Le principe consiste en un enroulement sous tension sur un mandrin tournant autour de son axe de fibres continues préalablement imprégnées d'un liant. Les avantages sont la disposition optimale des renforts, les très bonnes propriétés mécaniques, possibilité de réaliser des pièces de grandes dimensions avec des surfaces internes lisses. Les limites sont que formes uniquement convexes et investissements importants.

Conclusion :

A travers ce premier chapitre d'étude bibliographique sur les matériaux composites, où nous avons présenté les notions de base théoriques sur les constituants des matériaux composite qui a mis en évidence l'importance du choix du renfort et de la résine dans l'élaboration d'un matériau composite stratifié suivant les exigences imposées.

Deuxième chapitre

II. Principaux essais appliqués sur les composites

II.1. Introduction

La connaissance des caractéristiques mécaniques d'un matériau composite et sa structure permettent de comprendre, voir de prédire son comportement en service. Afin de caractériser son comportement dans des conditions bien précises, nous avons recours à un certain nombre d'essais. Car toute conception d'une nouvelle structure nécessite une connaissance du comportement mécanique des matériaux utilisés ainsi que leurs propriétés mécaniques (limite d'élasticité, charge de rupture, limite d'endurance en fatigue, etc.). Parmi les moyens utilisés pour avoir accès à ces données, la caractérisation passe donc par des essais sur chaque type de composite utilisé. Ces essais sont classés en plusieurs types :

- **Essais mécaniques sur le composite**

Les propriétés du composites doivent satisfaire le cahier des charges (calculs de résistance et durabilité). Le contrôle du taux de renfort et de la température de transition permet de situer la qualité du produit. Les essais non destructifs permettent la mise en évidence des défauts de structure qui initient l'endommagement ainsi que l'évolution du processus de rupture.

Essais statiques

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

Essais dynamiques

- Essai de compression dynamique ; [20]
- Essai au choc .
- Essai de fatigue.

- **Essais mécaniques sur l'interface fibre-matrice**

- Essai sur éprouvettes modèles (Essai Pull-out, essai de fragmentation ...) [21],
- Essai sur produit fini (essai de micro-indentation, essais de cisaillement inter laminaire, par flexion ou par traction...)

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

- Vieillessement (absorption d'eau, tenue en température,), dilatation thermique...

Essais sur les composants : le renfort et la matrice (la résine) ...etc.

II.2. Analyse physique de la structure du composite

La caractérisation de la structure physique du matériau composite fabriqué, sur la base d'une détermination des taux de renfort, de charges et de porosité permet de suivre la constance d'une fabrication et, en outre, de mesurer les paramètres nécessaires au calcul des matériaux multicouches.

II.2.1. Taux de fibres et de matrice

Dans le cas de composites à fibres de verre, un essai de **calcination** (essai dit de perte au feu) à 625 °C avec pesées d'échantillons avant et après passage au four (**NF T 57-102** et **ISO 1172**) permet de mesurer le taux massique de charges non volatiles à la température d'essai, donc le taux de verre massique « φ_p » s'il n'y a pas d'autre charge, minérale et pulvérulente, par exemple :

- 1) D'identifier chaque couche (tissus, mats, stratifils unidirectionnels), d'en mesurer la masse au mètre carré [grammage : **NF ISO 10352** (T 57-111), **ISO 3374**] et l'orientation ;
- 2) De séparer les charges pulvérulentes minérales ;
- 3) De définir le degré d'homogénéité du composite en utilisant des échantillons de volumes différents, prélevés en plusieurs points.

La méthode est également étendue aux différents renforts de fibre de verre : préimprégnés, tissus, fils... (**T 57-518**, **T 57-557**, **NF T 57-571**). Dans le cas de composites dont les fibres ne supportent pas la calcination, l'utilisation d'une méthode d'**extraction par dissolution et décantation** (**T 57-608**, **future ISO 11667-3**) permet d'accéder aux mêmes résultats, tout en étant cependant plus délicate à mettre en œuvre.

En outre, la connaissance des masses volumiques de la matrice (ρ_m) et du renfort (ρ_r) permet de calculer le **taux de renfort volumique** (φ_v) qui intervient dans les calculs des caractéristiques des composites :

$$\frac{1}{\varphi_v} = \frac{\rho_r}{\rho_m} \left(\frac{1}{\varphi_p} - 1 \right) + 1$$

Ainsi que la masse volumique théorique (ρ_t) :

$$\rho_t = \varphi_v \rho_r + (1 - \varphi_v) \rho_m$$

II.2.2. Taux de porosité

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

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

En pratique, le taux de porosité des pièces industrielles se situe entre 1 et 10 %, selon le procédé de mise en œuvre choisi. Un taux de porosité élevé se traduit essentiellement par des chutes de propriétés mécaniques importantes (jusqu'à 50 % pour un taux volumique de vide de 5 %), surtout à la rupture en cisaillement et dans la direction perpendiculaire aux fibres [22].

L'influence sur le comportement mécanique à long terme, notamment en milieu humide, est en revanche encore mal connue.

Les méthodes de mesure du taux de porosité, disponibles actuellement, se divisent en **méthodes non destructives** non normalisées (ultrasonores, radiographique, micro-ondes...) et **méthodes destructives normalisées** (mesures de densités, désintégration mécanique, comptage statistique).

II.3. Essais sur éprouvettes planes et barreaux

II.3.1. Fabrication des éprouvettes

Les éprouvettes sont soit moulées directement, soit découpées dans des plaques échantillons, soit découpées dans des structures.

Pour les matières thermodurcies, le découpage est effectué, suivant les cas, par fraisage ou sciage avec un disque diamanté. Les plaques échantillons sont réalisées, suivant les normes :

- 1) **T 57-151** (plaques à renfort unidirectionnel pour éprouvettes avec talons moulés) ;
- 2) **NF ISO 9291** (plaques planes bobinées à renfort unidirectionnel) ;
- 3) **NF T 57-153** (plaques à renforts de tissus et/ou de mats) ;
- 4) **T 57-300** (plaques à renfort carbone tissu et nappes préimprégnées, moulées à la presse, au sac, ou à l'autoclave) ;
- 5) **NF ISO 9353** (T 57-154) (plaques d'essai à renfort unidirectionnel par moulage au sac) ;
- 6) **ISO 9291** (plaques d'essai à renfort unidirectionnel par enroulement).

II.3.2. Détermination du comportement mécanique

II.3.2.1. Essais de traction

Essais de base comme pour les plastiques homogènes, ils permettent de déterminer la loi de comportement contrainte-déformation dans une direction donnée ([23], [24]).

Les caractéristiques habituelles que l'on en déduit sont le **module d'Young**, le **coefficient de Poisson**, ainsi que la contrainte et l'allongement relatifs aux points singuliers de la loi de comportement (**limite de linéarité, coude, charge maximale, rupture**, etc.).

Les différents documents normatifs relatifs aux essais de traction spécifiques aux composites (**ASTM D 5083, ASTM D 3039**) renforcés de fibres de verre (**NF T 57-101, NF T 57-151**) ou de carbone (**T 57-301**) ou intégrant plastiques et composites (**NF T 51-034, ASTM D 638, NF EN ISO 527**) préconisent différentes géométries d'éprouvettes selon le type de composite testé (tableau. II.1).

Le tableau suivant présente les dimensions des différents types d'éprouvettes à la traction :

Tableau. II.1. Éprouvettes de traction, selon ISO 527-4 et -5

Dimensions en (mm)	TYPE IB	TYPE II	TYPE III	TYPE IIIA	TYPE IIIB
L₃ : longueur minimale	150	250	250	250	250
La : distance initiale entre mors	115 ± 1	150 ± 1	136	136	136
L₀ : longueur de référence (extensomètre)	50 ± 0,5	50 ± 1	50 ± 1	50 ± 1	50 ± 1
L₁ : longueur de partie calibrée	60 ± 0,5	/	/	/	/
L₂ : distance entre talons	/	/	150 ± 1	150 ± 1	150 ± 1
b₂ : largeur aux extrémités	20 ± 0,2	/	/	/	/
b₁ : largeur de la partie calibrée	10 ± 0,2	25 ou 50 ± 0,5	25 ou 50 ± 0,5	15 ± 0,5	25 ± 0,5
h : épaisseur	2 à 10	2 à 10	2 à 10	1 ± 0,2	2 ± 0,2
L_T : longueur minimale des talons	/	/	50	50	50
h_T : épaisseur des talons	/	/	1 à 3	0,5 à 2	0,5 à 2
D : diamètre des trous de centrage	/	3 ± 0,25	3 ± 0,25	/	/
R : rayon minimal	60	/	/	/	/

Le choix du type d'éprouvette (figures II.1) dépend du type de renfort (unidirectionnel, tissu, mat) et de son orientation, voire du procédé de mise en œuvre retenu.

Ces facteurs influent en effet directement sur les résistances en traction et en cisaillement des composites obtenus, grandeurs dont le rapport gouverne les phénomènes de rupture dans les mors par cisaillement que l'on essaie d'éviter en utilisant des éprouvettes à talons ou sous forme d'haltères.

Le but d'un usinage des éprouvettes en haltères est d'augmenter la section des têtes donc de réduire les contraintes à l'intérieur de celles-ci, et cela par rapport à celles régnant dans la partie calibrée, afin de compenser ainsi les concentrations de contraintes locales dues aux efforts de serrage des mors. La rupture peut ainsi être confinée dans la partie calibrée de l'éprouvette.

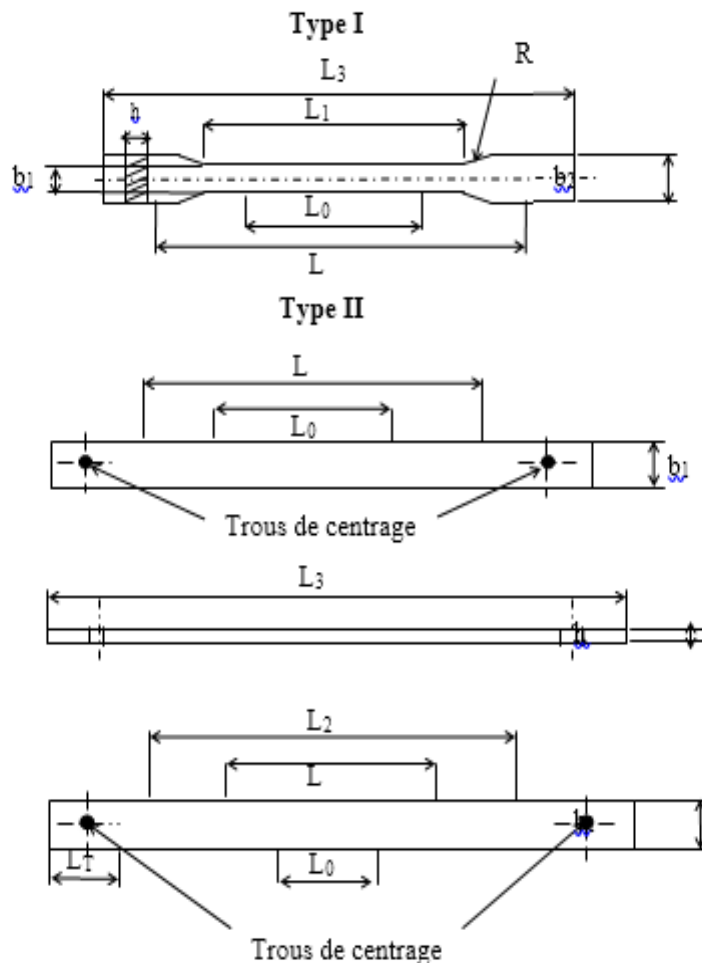


Figure.II.1. Géométrie des éprouvettes de traction de type I et II, selon ISO 527-4 et 5

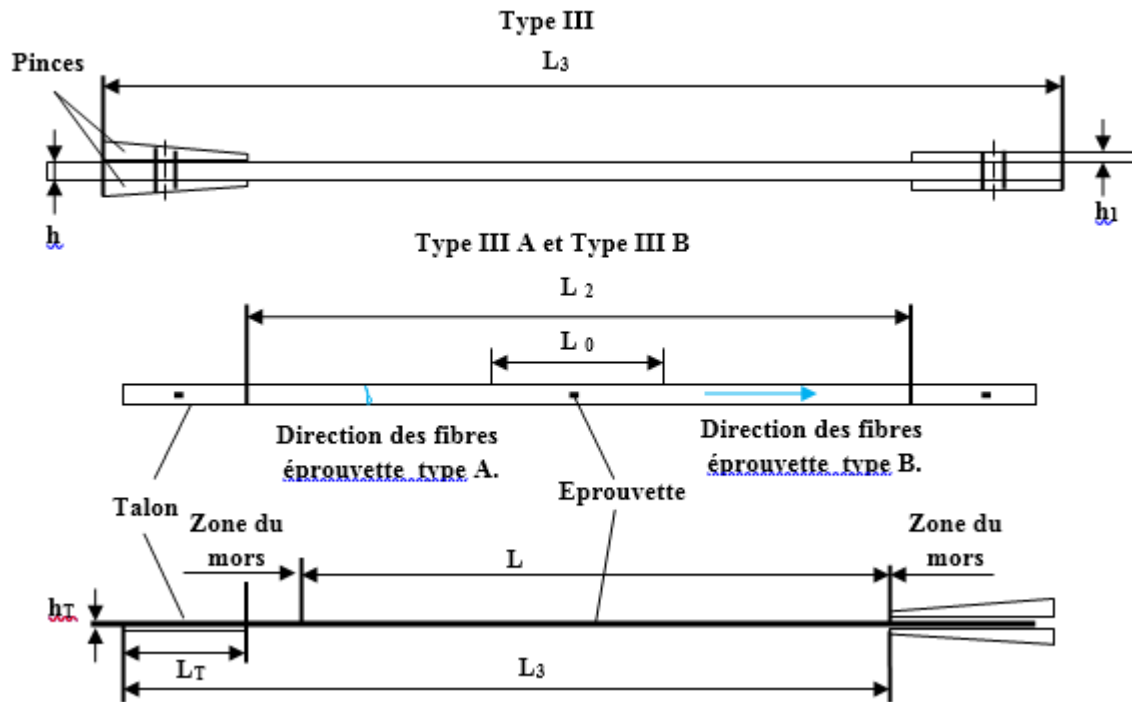


Figure.II.2. Géométrie des éprouvettes de traction de type III, selon ISO 527-4 et 5

Enfin dans le cas particulier des talons biseautés intégrés, les surépaisseurs dans les têtes sont brutes de moulage et obtenues en intercalant des couches de tissus entre deux nappes unidirectionnelles successives (Norme de fabrication NF T 57-151). Cette technique permet d'obtenir une continuité des fibres, même dans les épaulements des éprouvettes, ce qui évite les ruptures par cisaillement dans les têtes.

En conséquence, il est possible de retenir des éprouvettes :

- 1) De type I, en forme d'haltère, pour les matières thermoplastiques renforcées de fibres coupées et certains composites à base de mats ou de tissus très peu résistants ;
- 2) De type II, rectangulaire pour les matières thermodurcies armées avec des mats ou des tissus à faible résistance ;
- 3) De type III, rectangulaire, avec talons rectangulaires pour les matières thermodurcies armées avec des tissus résistants, ou avec des fibres unidirectionnelles continues ;
- 4) De type IV, rectangulaire, avec talons biseautés pour les renforcements à fibres continues unidirectionnelles.

Les vitesses de déplacement sont faibles, de 1 à 10 mm/min suivant les cas. On utilise le plus souvent des **extensomètres à couteau** du type inductif, ou des **jauges de déformation** à 90° pour les mesures de déformation. Les mors utilisés pour le serrage des éprouvettes sont, soit de type hydraulique, soit de type mécanique (autoserrant).

Les mors auto-serrant mécaniques ont l'avantage d'appliquer des efforts de serrage directement proportionnels à l'amplitude de la force de traction : leur fonctionnement est indépendant de l'opérateur. La force de serrage dépend de l'angle des coins de serrage (10° environ).

Il convient enfin de signaler certains essais de traction spécifiques réalisés sur éprouvettes dotées d'un trou. Leur raison d'être est que certaines structures en composites sont assemblées par boulonnage ou rivetage, ce qui engendre des modes de ruine particuliers.

Ainsi la norme **ASTM D 5766** et le projet **Pr EN 6035** précisent-ils les modalités de détermination de la **résistance en traction « trouée »**.

II.3.2.2. Essais de flexion

Les essais de flexion sur composites font l'objet des normes **T 57-105**, **T 57-302**, **ASTM D 790**, **JIS K 7074** ou future norme **EN ISO 14125**. Ces essais sont largement utilisés dans les milieux industriels en raison de leur simplicité. Cependant, la flexion n'engendre pas un état de contrainte simple (ou pur) au sein des matériaux testés : les contraintes de traction sont maximales dans la partie convexe, les contraintes de compression sont maximales dans la partie concave et les contraintes de cisaillement sont maximales sur l'axe neutre de l'éprouvette. De ce fait, en fonction de l'élanement de l'éprouvette (rapport de l'épaisseur sur la distance entre appuis), qui gouverne le rapport contraintes normales (traction/compression) / contraintes de cisaillement, et en fonction des résistances en traction, compression et cisaillement du matériau, l'un ou l'autre des trois modes de rupture peut être obtenu. Deux configurations peuvent être retenues pour les essais : la flexion trois pannes et la flexion quatre pannes.

- 1) Les essais de **flexion trois pannes** sont menés dans des conditions précisées figure II.2 et sur des barreaux rectangulaires dont les dimensions préconisées sont données dans le tableau II.2.

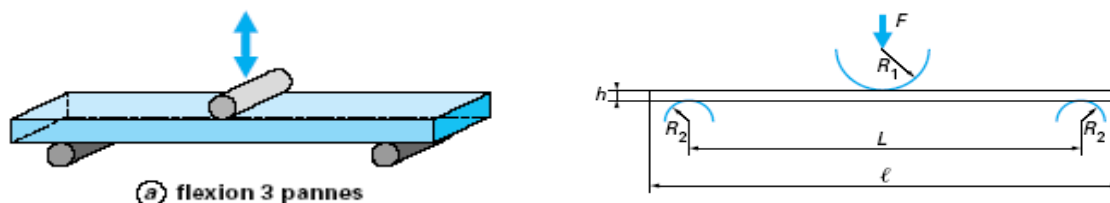


Figure. II. 3. Essai de flexion trois pannes, selon EN ISO 14125.

Ou : h : épaisseur de l'éprouvette.

$$R_1 = 5 \pm 0,2 \text{ mm}$$

$$R_2 = 2 \pm 0,2 \text{ mm, pour } h \leq 3 \text{ mm}$$

$$R_2 = 5 \pm 0,2 \text{ mm, pour } h > 3 \text{ mm}$$

Dans ces conditions, la **théorie des poutres** permet d'exprimer :

- La contrainte normale en flexion :
$$\sigma_F = \frac{3FL}{2bh^2}$$
- La contrainte de cisaillement interlaminaire maximale :
$$\tau_{13} = \frac{3F}{4bh}$$
- Le module de flexion :
$$E_F = \frac{L^3}{4bh^3} \frac{F}{W}$$
- La déformation en surface :
$$\varepsilon = 6 \frac{Wh}{L^2}$$

Avec : F : charge (en newtons) ;

L : distance entre appuis ;

h : épaisseur ;

b : largeur ;

W : flèche de l'axe neutre.

Le tableau suivant présente les dimensions des éprouvettes à la flexion :

Tableau. II.2. Des éprouvettes de flexion trois pannes, selon EN ISO 14125

Matériau	Longueur(l) (mm)	Distance entre appuis (L) (mm)	Largeur(b) (mm)	Epaisseur(h) (mm)
I. Thermoplastiques renforcés de fibres coupés	80 ± 1	64 ± 1	10 ± 0.5	4 ± 0.2
II. Composites à base de DMC, BMC, SMC, et TRE renforcé de mats, tissus et mixtes.	80 ± 1	64 ± 1	15 ± 0.5	4 ± 0.2
III. Composites UD (90°), Composites UD (0°) et multidirectionnels avec $5 < E_f/G_{13} \leq 15$	60 ± 1	40 ± 1	15 ± 0.5	2 ± 0.2
IV. Composites UD (0°) et multidirectionnels avec $15 < E_f/G_{13} \leq 50$	100 ± 1	80 ± 1	15 ± 0.5	2 ± 0.2

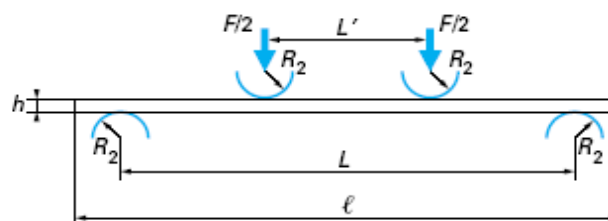
E_f : module de flexion dans le sens des fibres.
 G_{13} : module de cisaillement interlaminaire.

2) Pour éviter l'influence des contraintes de cisaillement (sur la déformée et le mécanisme de rupture) qui se superposent aux contraintes normales de flexion, on utilise quelquefois la méthode de **flexion quatre pannes** pour laquelle l'effort tranchant est nul dans la zone des contraintes maximales.

La figure ci-après présente le montage d'essai utilisé, sachant que les diamètres des appuis sont les mêmes que ceux retenus en flexion trois pannes et que la géométrie préconisée par les éprouvettes est précisée sur le tableau. II.3.

3) Comme précédemment pour la flexion trois pannes, la contrainte, le module et la déformation s'expriment par :

$$\sigma_F = \frac{FL}{bh^2} \quad ; \quad E_F = \frac{0,21L^3}{bh^3} \frac{F}{W} \quad ; \quad \varepsilon = 4,7 \frac{Wh}{L^2}$$

**Figure. II. 4.** Essai de flexion quatre pannes, selon EN ISO 14125.

Avec les mêmes notations que précédemment. Bien que cet essai semble séduisant a priori, d'autant plus que la charge est répartie en deux points au lieu d'un seul, ce qui réduit les risques de poinçonnage, il présente certains inconvénients :

- Il nécessite d'utiliser un capteur de déplacement pour mesurer la flèche (la mesure du déplacement du plateau mobile de la machine ne convient pas) ;
- Les flèches à la rupture sont très importantes (1 à 2 cm), ce qui nécessite une correction pour le calcul des contraintes ;
- La rupture intervient apparemment dans la zone centrale par délaminage, ce qui semble contradictoire puisqu'il n'y a pas d'effort tranchant ; en fait, ce type de rupture, qui apparaît surtout pour les renforts unidirectionnels, est dû à un flambement des fibres dans la partie comprimée.

Que ce soit en flexion trois pannes ou quatre pannes, lorsqu'il n'est pas possible de prélever des éprouvettes aux dimensions préconisées tableau.II.3, on cherchera à respecter pour le moins les contraintes précisées dans le tableau II.4.

Tableau. II.3. Éprouvettes de flexion « hors normes » selon EN ISO 14125.

Classe du matériau	Flexion trois pannes		Flexion quatre pannes	
	L / h	ℓ / h	L / h	ℓ / h
I	16	20	16,5	20
II	16	20	16,5	20
III	20	30	22,5	30
IV	40	50	40,5	50

Tableau. II. 4. Éprouvettes de flexion « hors normes » selon EN ISO 14125.

Épaisseur nominale	Classe I	Classe II à IV
1 < h ≤ 3	25	15
3 < h ≤ 5	10	15
5 < h ≤ 10	15	15
10 < h ≤ 20	20	30
20 < h ≤ 35	35	50
35 < h ≤ 50	50	80

II.3.2.3. Essais de cisaillement plan et interlaminaire :

Ils sont très importants pour ces matériaux sensibles aux contraintes de cisaillement, mais sont malheureusement souvent difficiles à mettre en oeuvre et à exploiter. Il y a lieu de distinguer le **cisaillement perpendiculaire au plan des couches** (interlaminaire) et le **cisaillement dans le plan des couches** (interlaminaire).

- **Délaminage en flexion trois pannes :**

Les plastiques armés, le plus souvent obtenus par empilement de couches, sont sujets au délaminage qui se traduit par une **décohésion des couches**. La résistance au délaminage est de l'ordre de 20 à 60 MPa ; elle dépend de la nature de la résine, de la liaison renfort-matrice, du type et du pourcentage de renfort.

On rappelle que c'est une caractéristique technologique fondamentale dont on doit toujours tenir compte dans les calculs de structures soumises à des efforts tranchants ; c'est souvent un point faible de ces matériaux.

Pour apprécier quantitativement la résistance au délaminage, on peut appliquer des contraintes de cisaillement dans un plan perpendiculaire au plan des couches, par flexion trois pannes entre des appuis rapprochés : il s'agit de l'essai de cisaillement sur poutre courte SBS (Short Beam Shear) ou essai de résistance au cisaillement interlaminaire ILSS : Interlaminar Shear Strength).

Une diminution de la distance entre appuis conserve, en effet, l'effort tranchant, donc les contraintes de cisaillement, alors qu'elle réduit proportionnellement les contraintes normales. Comme il ne s'agit pas de cisaillement pur, la rupture peut intervenir selon différents modes (figure II.4) :

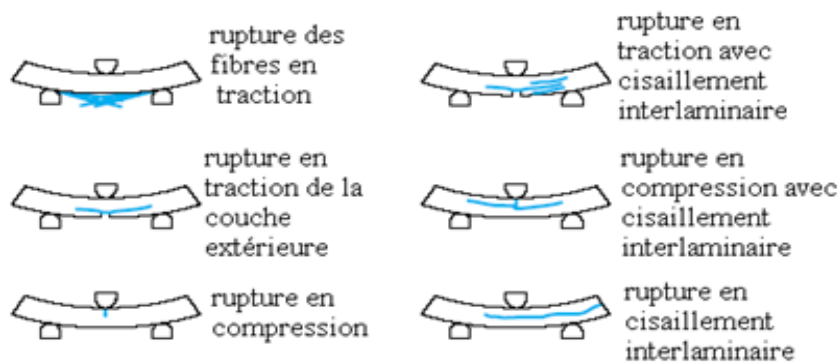


Figure. II. 5. Essai de flexion quatre pannes, selon EN ISO 14125.

- a) Soit par délaminage, auquel cas la **résistance au délaminage** est donnée par la relation ;
où : F : est la force de rupture et b et h respectivement la largeur et l'épaisseur de l'éprouvette ;
- b) Soit sous l'action des contraintes normales de flexion (seules ou couplées avec du cisaillement), auquel cas la résistance au délaminage sera considérée comme supérieure à $3 F / (4 bh)$.

Les normes qui définissent cet essai sont référencées **NF ISO 4585** (T 57-104) ou future norme **EN ISO 14130** pour les échantillons plans, **ASTM D 2344** pour les échantillons présentant une certaine courbure. Le montage utilisé est celui de flexion trois pannes. La vitesse de sollicitation est de 1 mm/min.

La distance entre appuis est fixée à 5 fois l'épaisseur ($5 h$). Les dimensions des éprouvettes sont $10 h$ pour la longueur et $5 h$ pour la largeur (une épaisseur de 2 mm est préconisée).

Deux principales critiques peuvent être opposées à cet essai :

1. La contrainte de cisaillement n'est pas uniforme au sein de l'éprouvette (variation parabolique) ;
2. Les contraintes normales de flexion sont toujours présentes (quoique réduites par les appuis rapprochés), ce qui signifie que si la résistance en traction ou compression du matériau n'est pas suffisante, la rupture en cisaillement ne pourra pas être atteinte.

Enfin, dans la mesure où la distance entre appuis est très faible, il est très difficile en pratique de mesurer la flèche de l'éprouvette : en conséquence, module de cisaillement et déformation de cisaillement à rupture ne peuvent être déterminés.

II.3.2.4. Essais de compression :

Les essais de compression ont fait l'objet de nombreux documents normatifs faisant apparaître de nombreuses variantes en termes de méthodes [chargement en bout, par cisaillement, mixtes (figure II.5) ou en flexion], de montages [Celanese, IITRI (Illinois Institute of Technology Research Institute), Boeing, de dimensions d'éprouvettes.

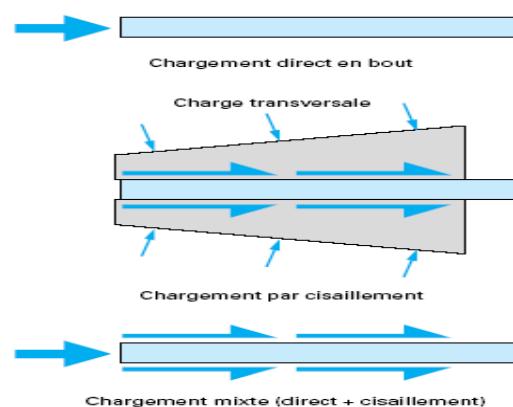


Figure. II. 6. Principes des différents modes de chargement en compression.

La future norme **EN ISO 14126** cherche à rationaliser la situation en proposant, pour déterminer les propriétés en compression dans des directions parallèles au plan de stratification, deux types d'éprouvettes (A et B) et deux méthodes de chargement (par cisaillement et en bout), laissant toute liberté pour le choix des combinaisons éprouvette/méthode et du type de montage (Celanese, IITRI, **ASTM D 695** et bloc d'encastrement).

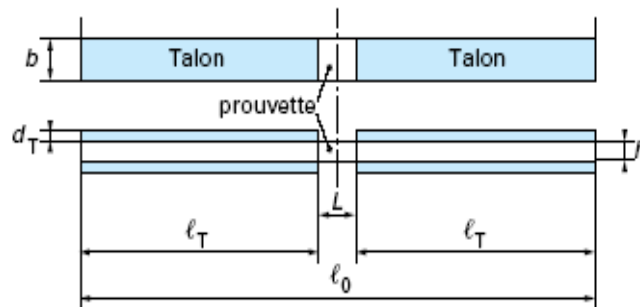


Figure. II. 7. Schéma d'éprouvette de compression, selon EN ISO 14126.

Tableau. II.5. Éprouvettes de compression, selon EN ISO 14126.

Dimensions (mm)	Type A	Type B1	Type B2
Longueur totale minimale l_0	110 ± 1	110 ± 1	125 ± 1
Épaisseur h	$2 \pm 0,2$	$(2 \text{ à } 10) \pm 0,2$	> 4
Largeur b	$10 \pm 0,5$	$10 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$
Distance entre talons L	10	10	25
Longueur minimale des talons l_T	50	50	50
Épaisseur des talons d_T	1	0,5 à 2	0,5 à 2

La vitesse retenue pour les essais est de 1 mm/min. La mesure des déformations se fait soit au moyen d'extensomètres appropriés soit au moyen de jauges de déformation (longueur maximale de 3 mm). Deux jauges (une sur chaque face de l'éprouvette) sont nécessaires pour détecter une éventuelle flexion des éprouvettes. Un **flambement** est mis en évidence si la déformation sur une face s'inverse (décroît) lorsque la déformation sur la face opposée s'accroît rapidement.

La qualité des résultats obtenus dépend en partie du soin apporté dans la fabrication, la découpe et l'usinage des éprouvettes :

- A. Les talons sont fixés sur l'éprouvette à $\pm 45^\circ$, toutefois si une rupture des talons se produit à fortes charges aux extrémités, un collage des talons à $0/90^\circ$ est autorisé ;
- B. Les éprouvettes sont usinées aux extrémités de manière à garantir un bon parallélisme des faces entre elles, une bonne symétrie par rapport aux axes de symétrie de l'éprouvette et une bonne perpendicularité par rapport à l'axe longitudinal de l'éprouvette ;
- C. La qualité de découpe des éprouvettes doit être vérifiée visuellement (pas d'amorces, d'entailles, de marque...) et au moyen de micromètres et d'équerres (pas de torsion, paires de côtés parallèles et perpendiculaires).

L'enregistrement des lois de comportement permet de calculer la **contrainte de compression** σ_{Cmax} et le module de compression E_C :

$$\sigma_{Cmax} = \frac{F_{max}}{bh} \text{ et } E_C = \frac{\sigma'' - \sigma'}{\varepsilon'' - \varepsilon'}$$

Avec : F_{max} : charge maximale,

b : Largeur ; h : Epaisseur ;

ρ' : Contrainte de compression pour un allongement de : $\varepsilon' = 0.0025$

ρ'' : Contrainte de compression pour un allongement de : $\varepsilon'' = 0.0005$

Une légère flexion de l'éprouvette est admissible dans la mesure où, tout au long de l'essai, les déformations longitudinales sur les faces a et b de l'éprouvette respectent l'inéquation suivante :

$$\left| \frac{\varepsilon_{11\beta} - \varepsilon_{11\alpha}}{\varepsilon_{11\beta} + \varepsilon_{11\alpha}} \right| \geq 0$$

ε_{11a} et ε_{11b} étant les déformations longitudinales sur les faces opposées de l'éprouvette.

Il est à noter que **différents modes de rupture** peuvent survenir qu'il convient d'identifier.

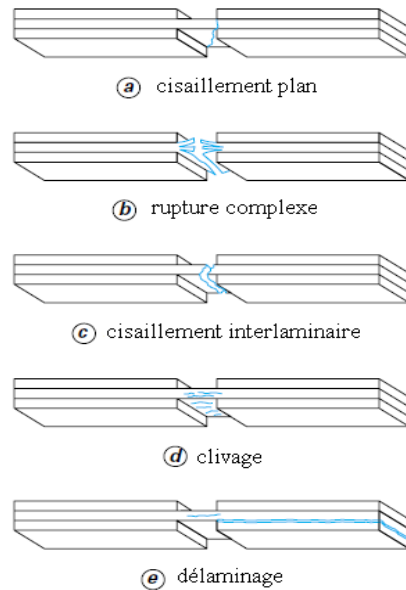


Figure. II. 8. Essais de compression : modes de rupture, selon EN ISO 4126.

II.3.2.5. Comportement au choc

II.3.2.5.1. Introduction

Les ruptures en service sont extrêmement coûteuses : lorsqu'elles surviennent, si par bonheur elles n'entraînent pas de pertes de vie humaine, en plus du remplacement des équipements détériorés, il convient de compter les heures et les productions perdues, l'image de marque abîmée, les marchés disparus... À titre d'exemples, la rupture de boulons du système de commande du gouvernail de l'Amoco Cadiz a provoqué son naufrage le 16 mars 1978 et la marée noire dont on se souvient ; la rupture de la cloison étanche de la queue du Boeing 747 du vol 123 de Japan Airlines a entraîné le 12 août 1985 la perte du contrôle de l'appareil et la mort de 120 personnes.

Ces ruptures surviennent sous l'effet des sollicitations que supportent les pièces excédant la résistance à la rupture des matériaux dont elles sont constituées. Il importe évidemment de connaître le mieux possible cette dernière propriété, qui dépend de divers facteurs : température, vitesse de déformation, environnement [25].

Aussi de nombreux essais ont-ils été imaginés pour évaluer la résistance à la rupture des matériaux et certains d'entre eux sont depuis longtemps couramment pratiqués dans l'industrie. Pour en bien apprécier la portée et les limites, il est nécessaire de comprendre les mécanismes de rupture qui interviennent. Cela permet d'apprécier l'intérêt des **essais de choc sur éprouvettes entaillées** mis au point notamment par Georges Charpy il y a une centaine d'années [22].

Ces essais procurent des données précieuses pour évaluer la résistance à la rupture des matériaux sous forme de la **résilience**, énergie absorbée lors du choc. Ils permettent, tout particulièrement, de déterminer le risque de rupture fragile des aciers.

Le choc résulte de l'application d'une sollicitation mécanique à grande vitesse (plusieurs mètres par seconde) et à énergie élevée, engendrant la rupture d'une éprouvette en une fraction de seconde. Il permet de juger, dans des conditions expérimentales données, de la **fragilité** d'un ensemble matériau-éprouvette, la fragilité étant davantage synonyme de faible allongement que de faible énergie de rupture.

Il permet au-delà de définir et de qualifier la **zone de transition ductilité-fragilité** (brusque ou progressive), lorsque varient les conditions d'utilisation par exemple.

Ce type de comportement peut être analysé dans la continuité des essais de traction ou de flexion, sous réserve de disposer de machines spéciales qui, compte-tenu de leurs coûts d'achat et de fonctionnement sont encore peu répandues.

Ce mode d'analyse est certainement le plus précis, car il permet d'étudier l'évolution des lois de comportement contraintes-déformations en fonction de la vitesse.

II.3.2.5.2. Les différents types d'essais de choc

Les deux principaux types d'essais pratiqués en milieu industriel et différant par l'appareillage et le mode de sollicitation sont développés ci-après ([26], [27])

- Les méthodes **pendulaires** pour sollicitations **uniaxiales** ;
- Les méthodes par **chutes de masses** pour sollicitations **multiaxiales**.

c) Les méthodes pendulaires :

La **résistance au choc** caractérise l'énergie absorbée au cours de la rupture d'un barreau lisse ou entaillé, sous l'action d'un percuteur doté d'une énergie cinétique suffisante. L'impact est généré par une masse à mouvement pendulaire. L'angle de remontée du pendule après le choc permet de calculer l'énergie de rupture.

L'appareil utilisé porte le nom de **mouton-pendule**, il est constitué d'un bâti rigide et massif, d'un support d'éprouvette, d'une masse oscillante comportant un percuteur et d'un dispositif de repérage de l'énergie absorbée.

Chaque appareil est généralement équipé de plusieurs pendules interchangeables, correspondant à divers niveaux d'énergie. Une gamme de 0,5 à 50 J s'applique à l'ensemble des plastiques.

Afin de limiter l'influence de la vitesse du percuteur au moment de l'impact, il est recommandé de travailler à **hauteur de chute constante**. La vitesse au point d'impact est de

3 à 4 m/s. La géométrie du percuteur dépend du mode de sollicitation, sachant que l'on distingue trois grandes méthodes : Charpy, Izod ou Dynstat et choc-traction.

Les caractéristiques des appareils de choc pendulaires doivent être vérifiées conformément aux normes NF A 03-508 ou ISO 13802.

D'une manière générale les différentes normes d'essai signalent également la nécessité d'effectuer certaines corrections, de frottement par exemple, notamment lorsque les énergies mesurées sont faibles.

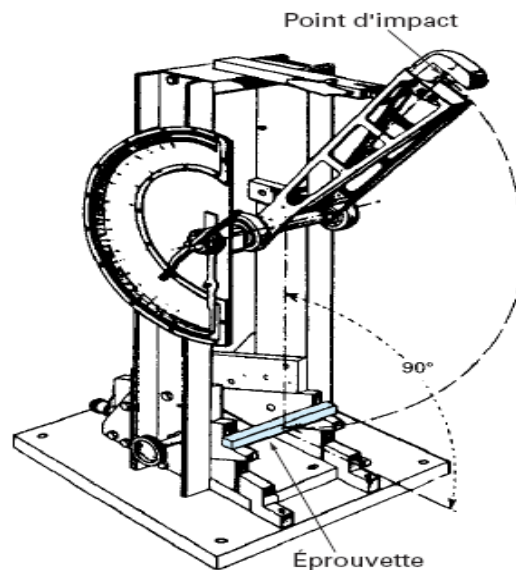


Figure.II. 9. Machine d'essai de choc pendulaire d'après norme ASTM D 256

1) Méthode par flexion trois points (Charpy)

Le principe du choc Charpy est celui de la flexion d'une éprouvette (avec ou sans entaille) reposant sur deux appuis simples avec charge centrale. Cet essai fait l'objet des normes NF EN ISO 179, ISO 179-1 et -2, ASTM D 5942 et D 6110 ou, dans le cas de tubes thermoplastiques, ISO 9854.

Dans le cas des plastiques ne présentant pas de rupture en cisaillement interlaminaire (c'est-à-dire essentiellement les polymères non renforcés), la norme internationale (ISO 179-1) spécifie un type d'éprouvette (type 1) de dimensions ($L = 80$ mm, $b = 10$ mm, $h = 4$ mm) avec trois types d'entailles en « V » possibles A, B ou C différant par leur rayon en fond d'entaille (respectivement 0,25 mm, 1 mm ou 0,1 mm). Les entailles sont en général usinées mais des éprouvettes comportant des entailles moulées peuvent également être utilisées lorsque les normes spécifiques aux matériaux testés le prescrivent.

Les détails géométriques du montage d'essai sont reproduits sur la **figure II.9**. Deux sens de percussion sont possibles. La configuration généralement utilisée est de type « debout », c'est-à-dire avec une direction de percussion parallèle à la largeur b et un impact sur la surface longitudinale étroite $L \times h$ de l'éprouvette (**figure II.10**).

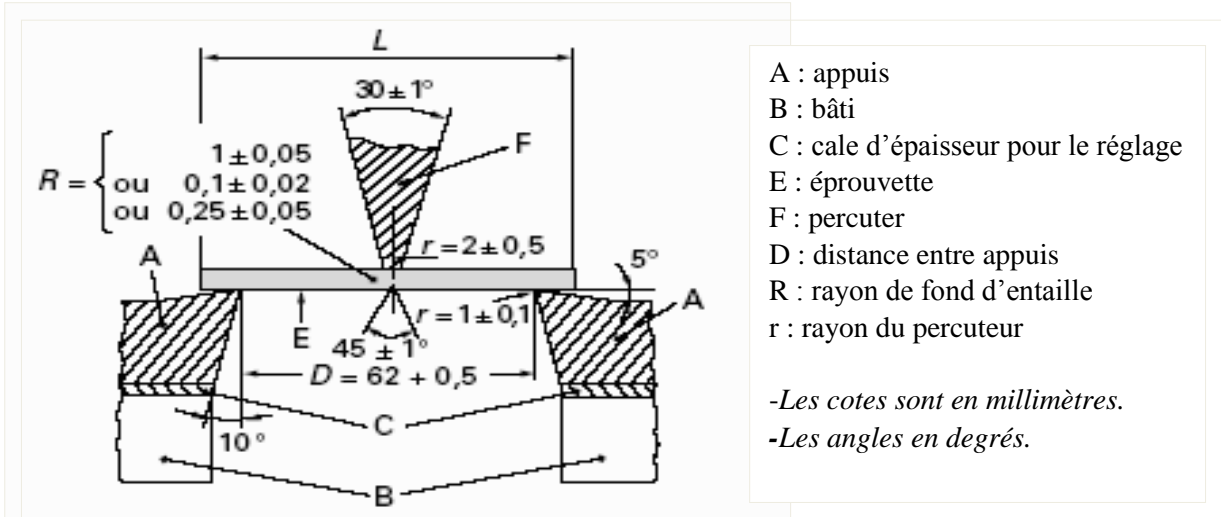


Figure II. 10. Dispositif d'essai de choc Charpy (d'après norme ISO 179)

Une configuration « à plat » est également recommandée (**figure II.10**) mais elle est surtout utilisée sur éprouvettes sans entailles ou avec double entaille pour étudier les effets de surface. On notera que l'essai de choc Charpy est également pratiqué sur matériaux composites. Dans ce cas, la direction de percussion (normale ou parallèle) par rapport au plan de renforcement des stratifiés est également précisée.

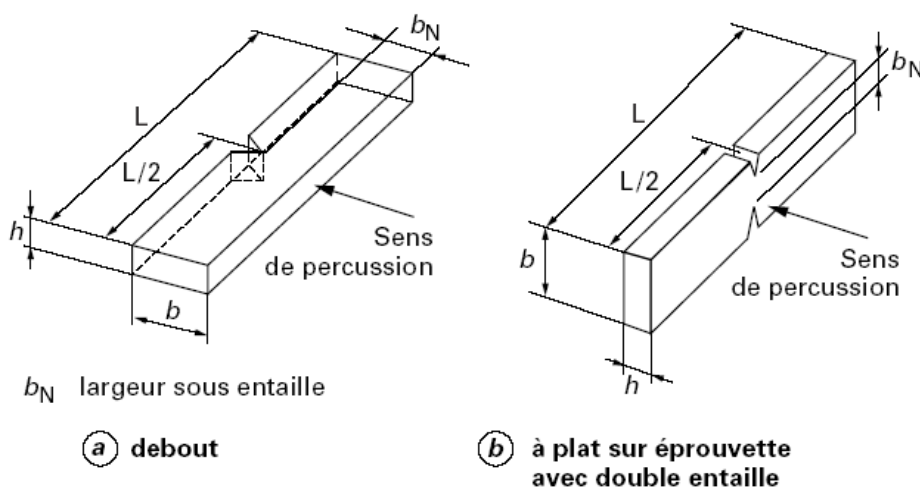


Figure II. 11. Principe du choc Charpy (d'après norme ISO 179)

Différents types de rupture sont distingués pour les plastiques : rupture totale, charnière, partielle ou pas de rupture. La résistance au choc Charpy est exprimée sous forme de **résilience**, énergie absorbée rapportée à la section, sous entaille si elle existe (résilience transversale en J/m^2), ou parfois rapportée à un volume contraint (résilience volumique en J/m^3).

L'insuffisance physique d'une telle caractéristique rend la notion de résilience largement dépendante de la géométrie, en particulier du rapport d'effilement D/h où D est la distance entre appuis et h l'épaisseur ; la résilience augmente avec D/h .

Plus récemment a été développée (ISO 179-2) la méthode de **choc Charpy instrumenté**, qui permet de déterminer le comportement au choc des plastiques à partir de diagrammes force-flèche. Le principe de l'essai, la géométrie des éprouvettes et des entailles, le sens de percussion sont les mêmes que dans le cas du choc Charpy non instrumenté. En revanche, la loi de comportement force-flèche est enregistrée pendant toute la durée de l'essai. Le percuteur est pour ce faire équipé de jauges de déformation ou d'un transducteur de charge piézoélectrique permettant de mesurer les efforts résultant du choc.

2) Méthode par flexion à simple encastrement

Dans cet essai, l'éprouvette (entaillée ou lisse), encastree verticalement en porte-à-faux, est rompue en flexion par une oscillation du mouton-pendule.

La méthode la plus courante est connue sous la référence Izod (NF EN ISO 180, ASTM D 256 et D 5941). Elle est très utilisée aux États-Unis mais limitée en France à la caractérisation des polystyréniques.

Les détails géométriques du montage d'essai sont reproduits sur la figure 4. La géométrie et les dimensions des éprouvettes et de l'entaille en V sont analogues à celles des éprouvettes Charpy, avec cependant seulement deux rayons de fond d'entaille possibles (0,25 et 1 mm). La configuration d'essai usuelle dans le cas du choc Izod est du type « debout » avec percussion de la face entaillée de l'éprouvette pour les plastiques non renforcés et de type « debout parallèle » pour les composites (Les positions « à plat » et « normale » ne sont pas pratiquées). Dans certains cas (ASTM D 256) une variante avec entaille inversée est utilisée (percussion sur la face opposée à l'entaille). La résilience, ou **résistance au choc**

Izod, est exprimée en énergie par unité de surface (J/m^2) de la même manière que pour le choc Charpy et avec la même typologie de rupture.

Une méthode similaire, mais avec des éprouvettes plus petites, est utilisée en France pour la caractérisation des matières thermo durcies chargées à usages électriques (T 51-017). Aux États-Unis, des variantes de la méthode Izod existent également qui font appel à des éprouvettes non entaillées (ASTM D 4812) dont certaines de petite taille (ASTM D 4508).

Il n'existe pas de version instrumentée de cet essai qui soit actuellement normalisée.

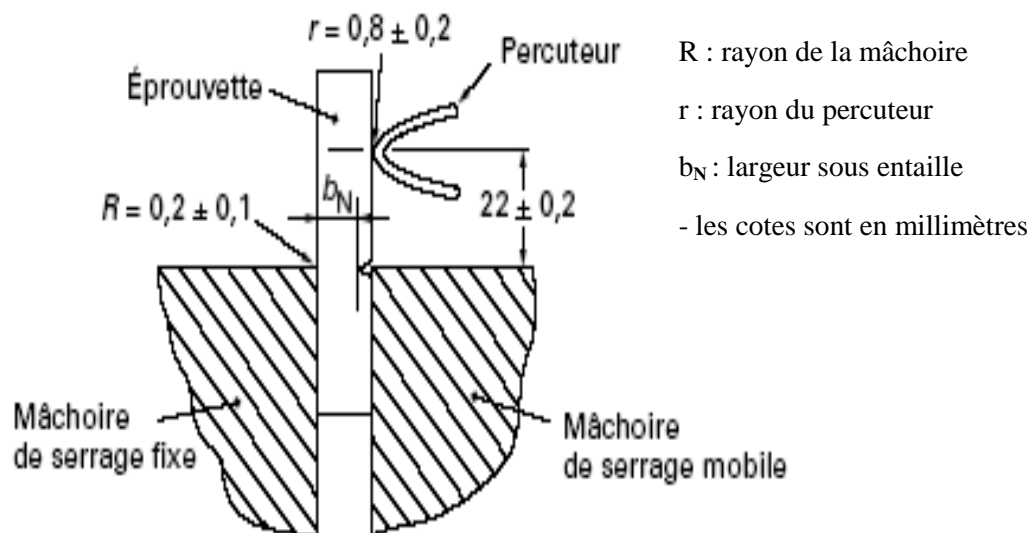


Figure. II. 12. Dispositif d'essai de choc Izod (d'après norme ISO 180).

3) Méthode par choc-traction

La méthode a été utilisée bien après la méthode Charpy (NF EN ISO 8256 et ASTM D 1822) pour l'analyse de certains défauts de transformation ou du vieillissement de polymères rigides.

Le classement obtenu avec cette méthode ne concorde pas nécessairement avec celui établi en choc-flexion. Les taux de déformation impliqués dans l'essai de choc-traction sont en effet intermédiaires entre ceux, élevés, du choc-flexion et ceux, faibles, de la traction standard. Cet essai nécessite l'utilisation d'un mouton-pendule équipé d'un percuteur en fer à cheval venant frapper symétriquement le mors mobile de traction d'une éprouvette (**figure II.12**).

Les géométries recommandées par la norme NF EN ISO 8256 sont de type éprouvettes à double épaulement, haltères (3 variantes) ou rectangulaires à double entaille.

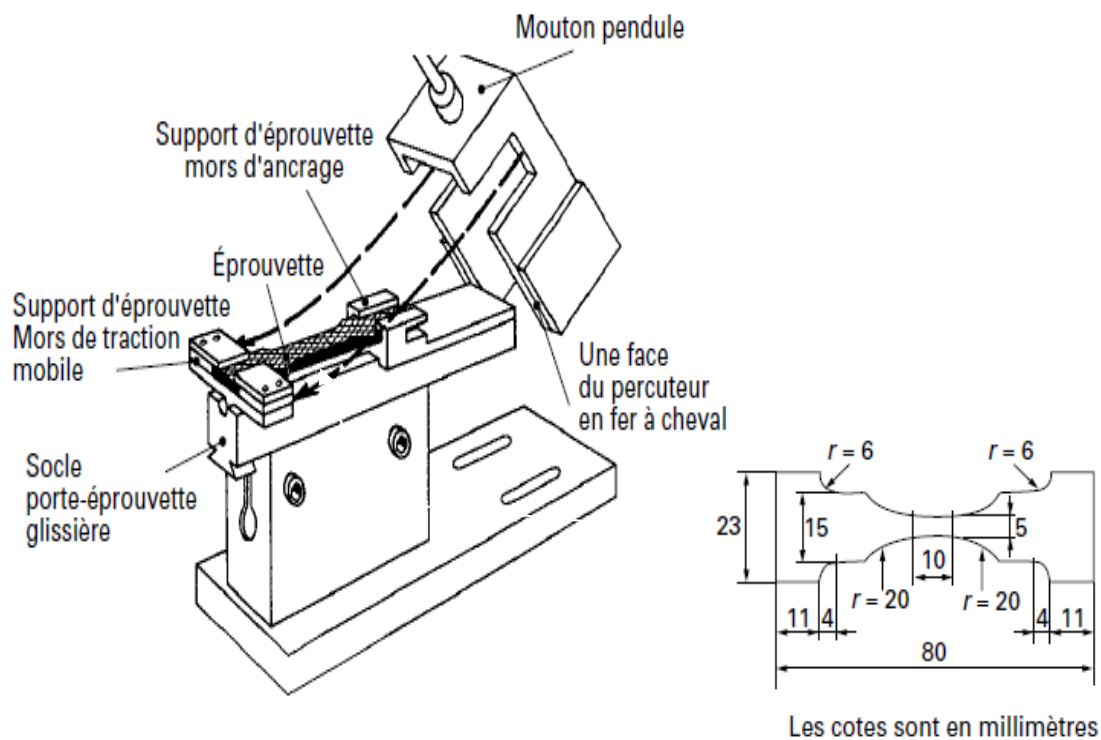


Figure. II. 13. Dispositif d'essai de choc-traction et éprouvette à double épaulement (d'après norme NF EN ISO 8256).

La norme ASTM D 1822 autorise quant à elle deux tailles d'éprouvettes. Le type « long » (partie calibrée augmentée de 10 mm) génère des allongements élevés, tandis que le type « court » induit comparativement des allongements plutôt faibles, des ruptures plutôt fragiles et des résultats plus reproductibles avec en contrepartie une moins bonne aptitude à différencier les matériaux entre eux.

Pour tenir compte de l'entraînement du mors mobile, une correction d'énergie cinétique est à faire en plus de la correction de frottement.

d) Méthodes de choc multiaxial par chute de masses

Le succès de la méthode est dû au fait que les résultats obtenus présentent une bonne concordance avec la réalité, à la différence des chocs Charpy et Izod [28]. Le principe général de cet essai, encore appelé parfois choc bi axial ou essai de perforation, est de laisser tomber une masse d'une hauteur donnée perpendiculairement à un film, une plaque ou un objet et à caractériser le type de défaillance ou de comportement obtenu pour une énergie cinétique appliquée donnée (**figure II.13**).

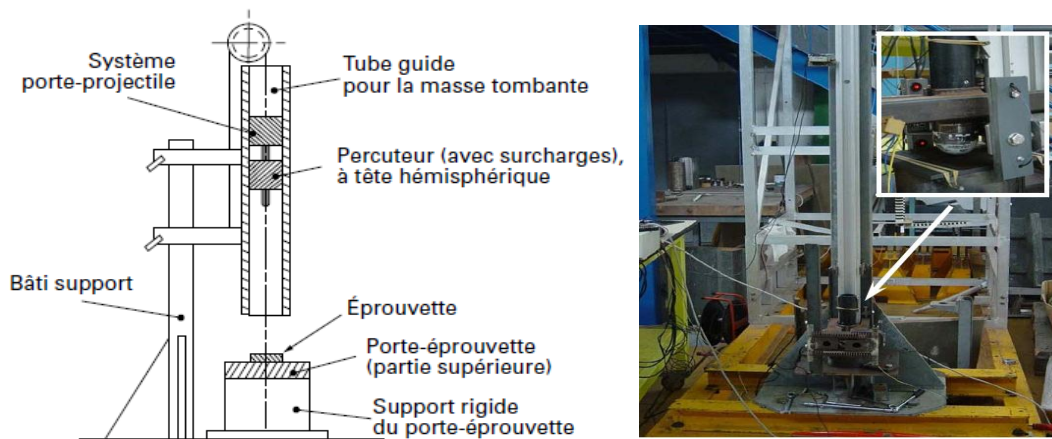


Figure. II. 14. Dispositif d'essai de choc multiaxial par chute de masse (d'après norme ISO 6603).

Le choc par chute de masse ou de projectile est pratiqué en version non instrumentée ou instrumentée.

1) **Le choc multiaxial non instrumenté** est largement pratiqué et a été appliqué à l'étude de la fragilité :

- Des tubes (T 54-093, ASTM D 2444, ISO 11173) ;
- Des drains annelés en PVC (NF U 51-154) ;
- Des profilés et produits de construction en PVC (ASTM D 4226 et D 4495) ;
- Des films et feuilles (T 54-109 et T 54-116, ISO 7765-1 et -2, ASTM D 1709, D3420, D 4272 et D 5420) ;
- Des plaques en plastiques rigides (NF EN ISO 6603-1 et -2, ASTM D 5628).
- On parle de choc non instrumenté lorsque le comportement à l'impact des matières plastiques n'est caractérisé qu'en termes d'énergie de défaillance, cette dernière pouvant être de type craquelure, rupture, pénétration, éclatement ou indentation.

L'énergie d'impact peut être modulée soit à hauteur de chute variable et masse constante, soit à masse variable et hauteur de chute constante, ces dernières conditions étant préférables dans la mesure où la vitesse de percussion, facteur d'influence important, est maintenue constante.

Des niveaux d'énergie croissants (méthode statistique) ou fonction de la défaillance ou non-défaillance (méthode en escalier) sont appliqués pour calculer l'énergie moyenne provoquant la défaillance de 50 % des éprouvettes. Ce mode de calcul résulte du fait que l'état de contrainte multiaxial induit par le choc est relativement complexe.

Cet essai nécessite une grande quantité d'éprouvettes pour obtenir des résultats statistiques cohérents qui intègrent l'influence des multiples paramètres liés au matériau, à la préparation des éprouvettes, à la géométrie, à la température, à la vitesse, etc.

2) **Le choc multiaxial instrumenté** a été quant à lui développé plus récemment et fait l'objet des normes ISO 6603-2 et ASTM D 3763. Dans ce cas la caractérisation du comportement à l'impact repose sur les relations force-déformation ou force-temps à vitesse nominale de percuteur constante au cours du choc.

Il est ainsi possible de caractériser le mode d'endommagement du matériau de manière plus fine qu'une simple énergie de rupture, la finalité étant de proposer une interprétation des mécanismes qui se produisent en chaque point des lois de comportement.

Les conditions générales d'essai (éprouvettes, percuteur) restent analogues à celles précédemment exposées.

La source d'énergie peut être de type hydraulique (machine d'essai à haute vitesse) ou de type masse d'inertie (machines à masse tombante ou pendulaire) mise en mouvement avec l'assistance d'un ressort, d'un organe pneumatique ou sous l'effet de la pesanteur. L'enregistrement des lois de comportement nécessite en outre, à l'image du choc Charpy instrumenté, la mise en place de jauges de déformation ou d'un transducteur de charge piézoélectrique au voisinage de la pointe du percuteur et la mesure directe (via un transducteur électronique) ou le calcul de la flèche à partir des courbes force-temps.

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les essais appliqués sur les composites, à savoir les essais statiques : la traction, la flexion 3 et 4 points, les essais de cisaillement plan et interlaminaire, les essais de compression, ainsi que le comportement au choc.

La connaissance de l'état d'endommagement d'une structure travaillante en matériaux composites est une nécessité largement reconnue, et ce tant pour des raisons de fiabilité, et par conséquent de sécurité.

Si on considère le cycle de vie d'un matériau, on s'aperçoit qu'à chaque étape de sa vie, il est soumis obligatoirement à différentes conditions d'exposition au cours de laquelle ce matériau voit ses propriétés initiales décroître en totalité ou en partie jusqu'à atteindre un seuil minimal qui définit la durée de vie du matériau ou sa durabilité.

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

Le dernier chapitre de ce mémoire sera consacré à la partie expérimentale, dont laquelle nous allons étudier dans un premier lieu les constituants des matériaux composites stratifiés, par la suite nous allons élaborer le matériau composite stratifié. Dans un dernier lieu nous allons caractériser les stratifiés obtenus par des essais physico-mécaniques.

Troisième chapitre

Introduction :

Dans cette partie, on s'intéresse principalement à l'étude purement expérimentale. Cette étude s'articule sur trois grands axes, premièrement nous allons élaborer les différentes variantes de résine époxy et du matériau composite à base de résine et de fibre de verre (tissé), deux types de matériaux composites stratifié seront réalisés dans cette étude, ils seront constitués respectivement avec six et huit couches de fibres de verre tissé. La deuxième étape consiste à caractériser les matériaux constituant le matériau composite stratifié (à savoir la résine époxy et la fibre de verre tissé) par des essais mécaniques en traction. La dernière étape consiste à élaborer les deux types de stratifiés par la méthode de moulage au contact et caractériser les matériaux obtenus avec des essais physiques pour déterminer la teneur en fibres et en matrice, enfin nous allons caractériser les différentes variantes avec des essais mécaniques (traction, flexion 3 points).

III.1. Matériels et produits utilisés :**III.1.1. Le matériel :**

Le matériel ainsi que les matières premières nécessaires à la réalisation des plaques sont données ci-dessous :

- Moule ;
- Pinceaux ;
- Débulleur ;
- Agitateur,
- Masque protecteur jetable ;
- Gants jetables.

III.1.2. Matières premières utilisées :**c) Résine époxyde :**

L'époxy ou scientifiquement nommé polyépoxyde est un thermodurcissable composé d'une résine dite monomère qui contient des monomères dont les fonctions époxydes sont les groupements réactifs de la résine, et le durcisseur permettant l'ouverture du cycle époxy et la liaison entre les monomères [1]. La résine utilisée dans notre étude est de type STR, destinée à la stratification sous température ambiante 200 C et se présente sous forme de kit pré dosé de deux éléments :

- 1 kg de l'élément A : résine.
- 0.666 de l'élément B : durcisseur.

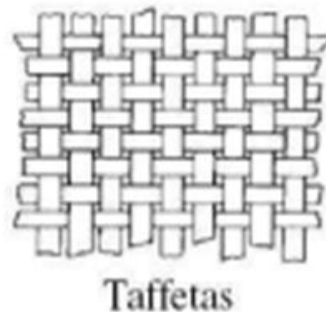
Le tableau suivant présente quelques caractéristiques de la résine époxyde :

Tableau III.1. Caractéristiques de la résine époxyde.

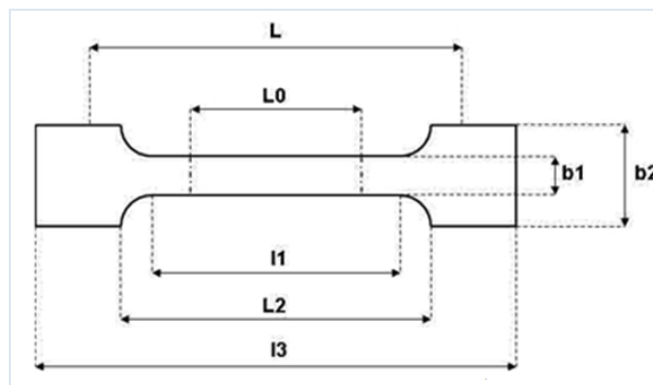
Densité (ISO 458)	1.1+-0.05
Résistance a la compression (NA 427)	>70 Mpa
Resistance à traction (NFP 18 858)	>3 Mpa

d) La fibre de verre (tissé) :

Nous avons utilisé la fibre de verre tissé de type E avec une armure de type Taffetas (figure III.1), les fils de chaîne et de trame s'entrecroisent alternativement, conduisant à un tissu très plats, stable, et peu déformable. Cette armure confère au tissu des propriétés mécaniques sensiblement identiques dans les deux directions (0^0 et 90^0) chaîne et trame.

*Figure III.1.* Fibre de verre tissé.**III.2. Elaboration des éprouvettes :****d) La résine époxyde :**

Les éprouvettes de la résine ont été élaborées à l'aide d'un moule métallique conçu spécialement pour la réalisation des éprouvettes à base de résine seulement, ces dernières ont les dimensions en forme d'haltère conformément à la norme NF EN ISO 527-4 type 2 (voir l'annexe 01) indiquée par la figure suivante :

*Figure III.2.* dimensions de l'éprouvette haltère.

Le tableau III.2 présente les dimensions des éprouvettes haltères selon la norme NF EN ISO 527-4.

Tableau III.2. Les dimensions des éprouvettes haltères selon la norme NF EN ISO 527-4.

Symboles	Les différentes dimensions	Les valeurs en « mm »
L3	Longueur totale	≥ 150
L1	Longueur de la partie étroite parallèle	$60 \pm 0,5$
R	Rayon	≥ 60
b ₂	Largeur aux extrémités	$20 \pm 0,2$
b ₂	Largeur de la partie étroite	$10 \pm 0,2$
h	Epaisseur	2 à 4
L ₀	Longueur de référence	50 ± 2
L	Distance initiale entre mors	115

a) La fibre de verre tissé :

La fibre de verre utilisée dans notre étude est un produit finis. On commence d'abord par le découpage des couches du renfort (fibre de verre tissé : voir figure III.1) dont la longueur correspond à celle des éprouvettes prévues et dont la largeur convient au nombre de trois (06) éprouvettes. Puis, nous avons procédé au découpage des bandes rectangulaires de matériau à la longueur et à la largeur requise pour les talons.

b) Le stratifié :

Pour les besoins de notre travail pratique, nous avons réalisé un moule avec deux plaques en bois, sur lesquelles nous avons fixé du papier en cellophane pour faciliter le démoulage du matériau composite après durcissement.

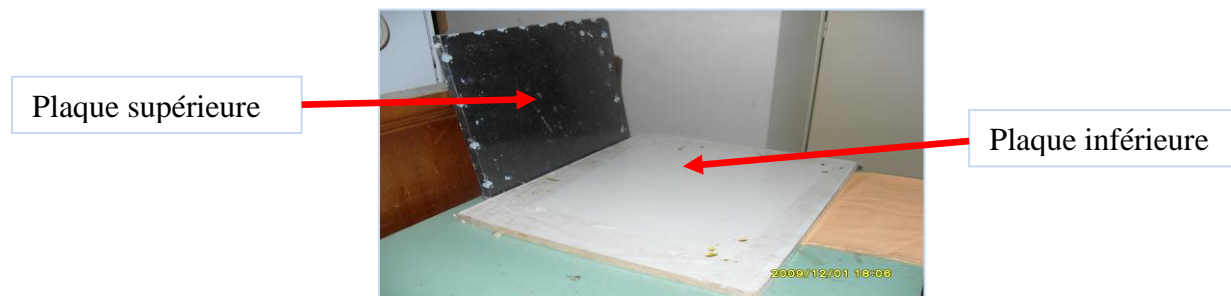


Figure III.3. Le moule.

Les stratifiés ont été obtenus avec la méthode de moulage au contact, On mélange la résine soigneusement afin d'éviter la formation de bulles d'air.

Ensuite on verse une quantité de résine sur la plaque du moule, et ensuite on étale la résine sur toute la surface à l'aide d'ébulleur.

Et puis on dépose sur la couche de résine un pli de fibre tissé, et on ajoute une couche de résine et puis un pli de fibre tissé, et ainsi de suite jusqu'à obtenir le nombre de plis voulu, par la suite la plaque supérieure de moule y est déposée et pressée avec une pression de 100 Kgf/cm² à l'aide d'une presse hydraulique de type SIMI.

Le démoulage se fait après 24 heures, une fois les plaques durcies et polymérisées dans une étuve de séchage à 80°C pendant 8 heures, elles sont découpées en éprouvettes normalisées à l'aide d'une scie circulaire diamantée pour obtenir les dimensions 80*10 mm pour les essais de flexion, et 250*25 mm pour les essais de traction (figure III.10).

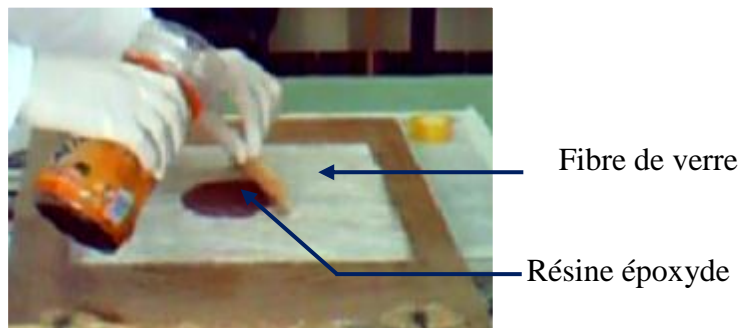


Figure III.4. Elaboration du matériau composite.

III.3. Caractérisation physico-mécanique des différentes variantes :

III.3.1. Caractérisation physique des éprouvettes :

A travers ces essais physiques, nous avons déterminé la densité et le taux de matrice et de renfort, deux variantes sont à considérer, la première variante composée de trois éprouvettes de la fibre de verre, la deuxième variante est composée aussi de trois éprouvettes effectuées pour la résine époxyde.

III.3.2. Calcul de la teneur du renfort et de la matrice :

Nous avons déterminé le taux de renfort (fibres de verre) avec la méthode de calcination selon la norme «NF T 57-102 ».

III.3.3. Essai de calcination :

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

III.3.4. Principe de l'essai :

Nous avons effectué des essais de perte au feu pour les deux variantes (6 plis et 08 plis).

Les échantillons ont été pesés à sec et placés dans des creusets préalablement pesés, le tout est placé dans un four. L'essai est réalisé à 600°C, température pour laquelle la résine est entièrement calcinée (environ 120 mn), l'ensemble est alors mis dans le dessiccateur, pour refroidissement pendant 30 min. Les fibres de verre récupérées après calcination ont été pesées. Le taux massique de la matrice est calculé comme suit :

III.3.5. Matériel utilisé pour l'essai de calcination

- Un four dont la température est réglée à 650° C, (figure III.6).
- Creuset pour mettre les échantillons dedans, (figure III.5).
- Une balance de précision 10-4 g, (figure III.7).

III.3.6. Déroulement de l'essai

Nous pesons à vide les creusets, en suite nous les pesons avec les échantillons et on les met dans un four réglé à une température suffisante pour la calcination entière de la résine, soit 600° C, pendant 120 min environ. Après le refroidissement, on fait la pesée des fibres restante dans chaque creuset et cela nous permet de calculer toutes les fractions massiques des fibres et celle de la résine avec les lois ci-dessous.

La figure III.5 représente les creusets utilisés pour la réalisation de l'essai de calcination.



Figure III.5. Matériau composite après essai de calcination

La figure III.6 représente le four utilisé pour la réalisation de l'essai de calcination.



Figure III.6. Four utilise pour essai de calcination

La figure III.6 représente la balance utilisée pour la réalisation de l'essai de calcination.



Figure III.7. Four utilise pour essai de calcination

b) Calcule le taux des différents matériaux (fibre/résine) :

$$\triangleright T_f = (m_f * 100) / m_s$$

$$\triangleright T_R = (m_R * 100) / m_s$$

Avec :

T_f : taux de fibre.

T_R : taux de fibre

m_s : masse de stratifié.

m_f : masse de fibre.

m_R : masse de la résine.

Le tableau III.3 représente les résultats de l'essai de calcination appliqué sur les deux types de stratifiés.

Tableau III.3. Résultats de calcination sur des éprouvettes testées en traction.

	Echantillons							
	(Six plis)				(Huit plis)			
	1	2	3	Moy	1	2	3	Moy
La masse du stratifié (ms) (avant la calcination)	2.0680	2.0430	2.0750	2.0620	2.9137	2.9129	2.9151	2.9139
La masse du stratifié (ms) (après la calcination)	1.0231	0.9995	1.0323	1.0183	1.5019	1.5029	1.5021	1.5023
La masse de fibre (mf)	1.0231	0.9995	1.0323	1.0183	1.5019	1.5029	1.5021	1.5023
La masse de la résine (mR)	1.0449	1.0435	1.0427	1.0437	1.4118	1.41	1.413	1.4116
Taux de Fibre (Tf) en (%)	49.47	48.92	49.75	49.38	51.54	51.56	51.55	51.55
Taux de Résine (TR) en (%)	50.53	51.08	50.25	50.62	48.46	48.41	48.48	48.45

b/ Calcul du module de Young pour le stratifié (Six plis, Huit plis) :

La formule suivante s'applique pour le cas des stratifiés dont l'orientation des fibres sont unidirectionnel, **ce qui ne correspond pas à notre cas** :

$$E_s = (T_f * E_f) + (T_r * E_r)$$

Avec : E_s : Module de Young pour le stratifié. E_r : Module de Young pour la résine. E_f : Module de Young pour la fibre. T_f : Taux de fibre. T_r : Taux de la résine.*Tableau III.4. Récapitulatif des résultats du module de Young.*

	Six plis	Huit plis
Taux (moyenne) de fibre (T_f)	0,4938	0,5155
Taux (moyenne) de la résine (T_r)	0,5062	0,4845
Module de Young pour la fibre (E_f) : (déterminer par l'essai de traction)	30400	
Module de Young pour la résine (E_r) : (déterminer par l'essai de traction)	2581,66	
Module de Young pour le stratifié (E_s) en MPa : (calculer par l'essai de calcination)	16318,35	16922,01
Module de Young pour le stratifié (E_s) en MPa : (calculer par l'essai de traction)	13333,33	13920

III.3.7. Analyse des résultats

D'après l'essai de calcination et suite aux résultats du tableau III.3, On remarque que le taux de fibres pour le stratifié avec 6 plis de fibres de verre est de **49.38 %** et le taux de résine est de **50.62 %**, pour le stratifié à 8 plis de fibres de verres, nous avons trouvé **51.55 %** de taux de fibres et **48.45 %** de taux de résine. D'après ces résultats on constate que le taux de fibres dans le stratifié à 8 plis est plus élevé de **2,17 %** par rapport au stratifié avec 6 plis de fibres de verre, ces résultats sont conformes aux normes, qui exigent dans le cas du moulage au contact un taux de résine et de fibres de 50 %.

D'après le tableau III.4, on remarque que le module de Young calculé avec les taux de résine et de la fibre pour le stratifié à 6 plis est de **16318,35 MPa**, par contre celui déterminé expérimentalement par l'essai de traction est de **13333,33 MPa**, cela peut être dû à l'hétérogénéité des échantillons (éprouvettes) et aussi à la mise en œuvre des éprouvettes, qui a été réalisée manuellement par la méthode de moulage au contact.

III.4. Caractérisation mécanique des éprouvettes :

III.4.1. Description du dispositif expérimental :

Les essais mécaniques de traction et de flexion trois points sur les différentes éprouvettes sont effectués sur des machines universelles pilotée par ordinateur ; équipé de logiciel testXpert V12 et munie d'un capteur de force 250 KN pour les essais sur fibres et stratifiés et d'un capteur de 10 KN pour les essais de traction effectué sur résine. Celle-ci est reliée à une chaîne d'acquisition qui permet l'enregistrement simultané de la contrainte et de la déformation.

Le tableau suivant montre les différents types de machine employée pour effectuer les essais de traction et les essais de flexion à trois points sur les matériaux :

Tableau III.5. Le type de machine utilisé pour effectuer les essais sur les matériaux.

Type de machine	Essai de traction			Flexion à trois points
	Résine époxyde	Fibre de verre tissé	Composite stratifié	Composite stratifié
Zwick de type Z250		x	x	x
Zwick de type Z10	x			



Capteur de force

Figure III.8. Machine universelle.

III.4.2. Essai de traction :

Nous intéressons à la détermination des propriétés mécaniques usuelles telles que le module de déformation longitudinal (E), la contrainte maximale et à la rupture (σ_{\max} et σ_{rup}) et la déformation maximale à la rupture (ϵ_{rup} et ϵ_{rup} sur des éprouvettes des matériaux suivants :

d) La résine époxyde :

Nous avons effectué six (06) essais de traction sur des éprouvettes normalisées (NF EN ISO 527-4 type 2 - voir annexe 01) de la résine époxyde, dont les dimensions sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.6. Dimensions des éprouvettes de la résine époxyde.

Eprouvette	1	2	3	4	5	6
Épaisseur en mm	4.48	4.54	4.61	4.12	4.24	4.45
Largeur en mm	9.92	10.07	10.07	9.94	9.96	9.94
Longueur en mm	50	50	50	50	50	50

e) La fibre de verre tissé :

Même chose que la résine, trois (03) éprouvettes de la fibre de verre (tissé) ont été soumis aux essais de traction dont les dimensions normalisées (NF ISO 4606 - voir annexe 02) sont portées dans le tableau suivant :

Tableau III.7. Dimensions des éprouvettes du stratifié.

Eprouvette	1	2	3	4	5	6
Longueur en mm	250	250	250	250	250	250
Largeur en mm	25	25	25	25	25	25

f) Le matériau composite stratifié verre / époxy :

Les plaques du composite obtenues sont découpées suivant la norme international ISO 527-5 (voir annexe 03,) aux nombres de onze (11) éprouvettes, et sont divisées en deux (02) variantes suivant le nombre de plis que compose le stratifié fibre de verre/ résine époxy comme suit :

- Variante 01 : contient six (06) éprouvettes composées de six (06) plis.
- Variante 02 : contient cinq (05) éprouvettes composées de huit (08) plis.

Les dimensions des éprouvettes sont portées dans le tableau suivant :

Tableau III.8. Dimensions des éprouvettes du stratifié.

Symboles	Les différentes dimensions	Les valeurs en « mm »
L3	Longueur totale	250
L2	Distance entre talons	150 ± 1
b1	Largeur moyenne	25
h	Epaisseur	4,00
L0	Longueur recommandée pour les extensomètres	50 ± 1
L	Distance initiale entre mors	136
LT	Longueur des talons	≥ 50
hT	Epaisseur des talons	0,5 à 2

Les figures III.9 et III.10 représentent les dimensions des éprouvettes utilisées pour les essais de traction.

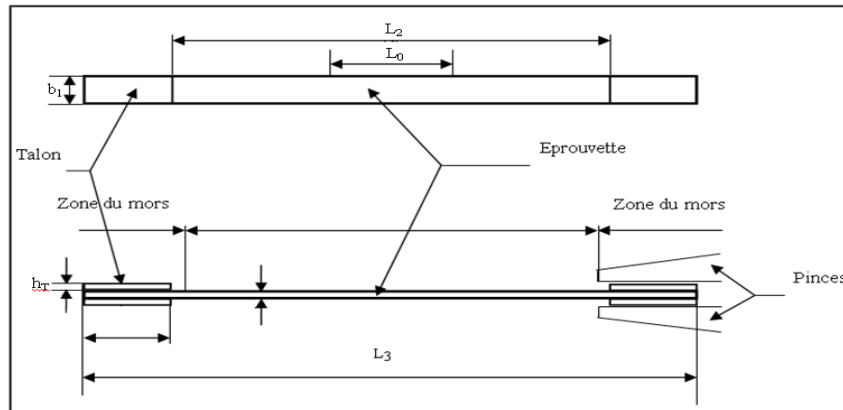


Figure III.9. Dimensions de l'éprouvette pour essai de traction.

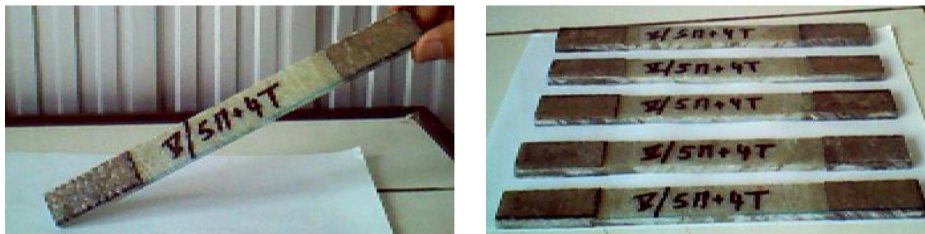


Figure III.10. Éprouvettes pour l'essai de traction.

III.4.2.1. Principe de l'essai de traction :

Le principe de l'essai est de placer l'éprouvette normalisée entre les mors de la machine, et puis nous fixons les extensomètres au centre de l'éprouvette ; une force est appliquée sur l'éprouvette avec une vitesse de 2 mm/mn. La machine est pilotée par un ordinateur équipé du logiciel testXpert V9.0, munie d'un capteur de force de 250KN et elle est reliée à une chaîne d'acquisition qui permet l'enregistrement simultané de la contrainte en et de 'allongement. N/mm² et de la déformation relative en %.



Figure III.12. Éprouvette après l'essai.



Figure III.11. Éprouvette avant essai.

III.4.2.2. Présentation des résultats et interprétations :

Les résultats enregistrés par la machine universelle sont représentés sous forme de courbes, tracé à l'aide du logiciel **KaleidaGraph** (voir annexe 04).

III.4.2.2.1. La résine époxyde :

La Figure suivante représente la contrainte de traction en fonction de la déformation de la résine époxyde.

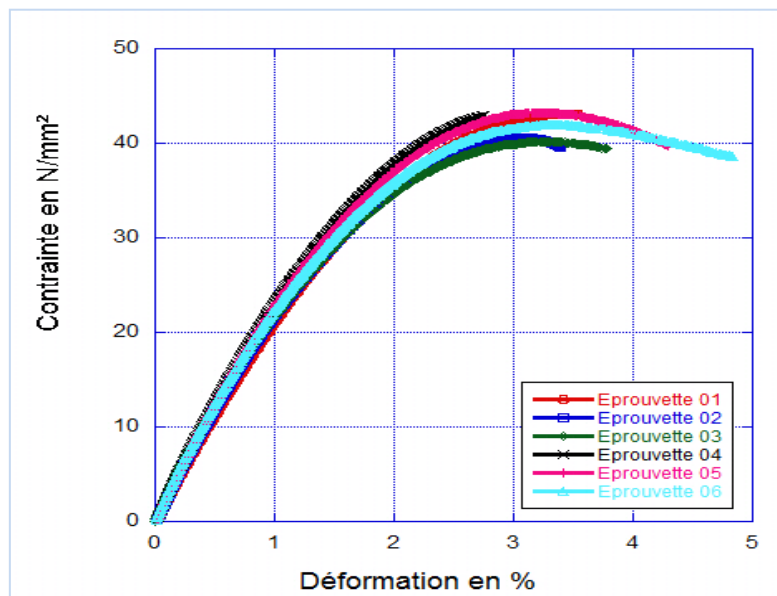


Figure III.13. Comportement en traction de la résine époxyde.

a) Caractéristiques de la résine époxyde :

- **Calcul du module de YOUNG :**

Le calcul du module de déformation longitudinal se fait suivant la norme internationale NF EN ISO 527-5. Par l'application de la formule suivante :

$$E = \frac{\sigma'' - \sigma'}{\varepsilon'' - \varepsilon'}$$

Avec :

ε' et ε'' : déformation relative longitudinale. Deux valeurs à utiliser d'après la norme NF EN ISO 527-4 ($\varepsilon''=0.0025$ et $\varepsilon'=0.0005$).

σ'' et σ' : contrainte de traction en N/mm², pris directement du graphe (figure III.11), valeurs correspondant à deux valeurs proche de $\varepsilon''=0.0025$ et $\varepsilon'=0.0005$.

Voir la figure ci-dessous :

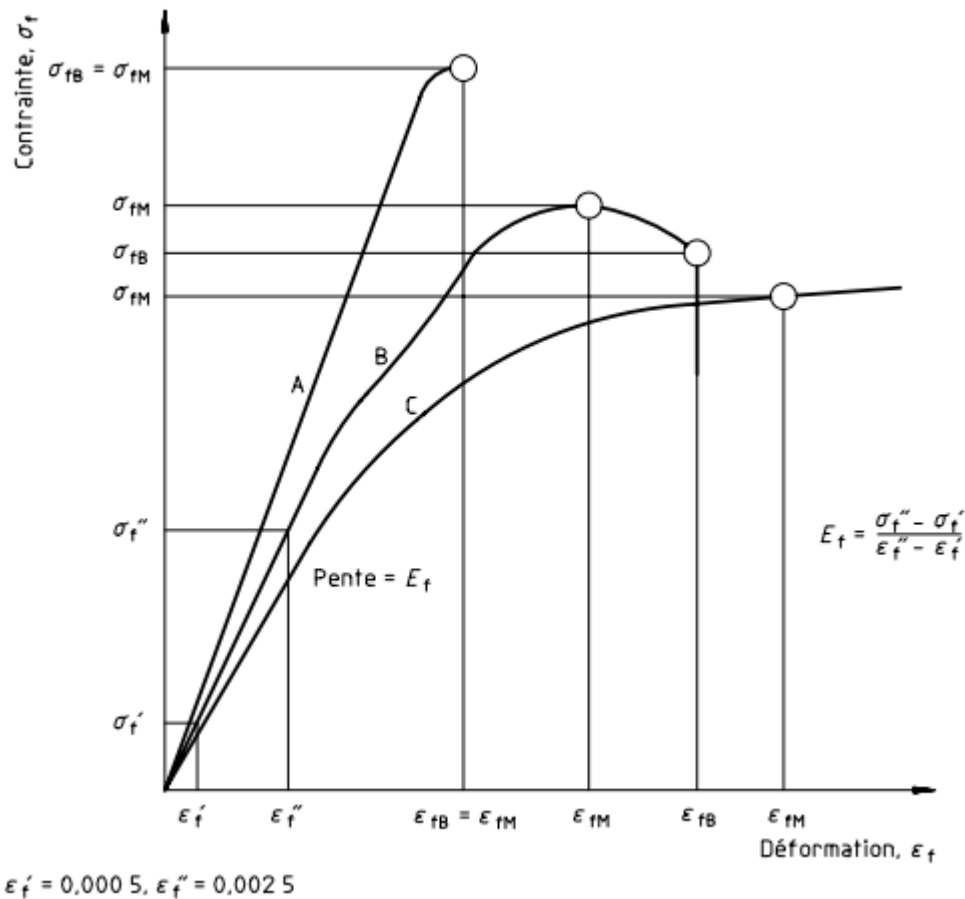


Figure III.14. Calcul du module de YOUNG pour l'essai de traction.

• Exemple de calcul :

La valeur la plus proche de $\epsilon' = 0.0005$ est : $\epsilon' = 0.00049$

De la figure III.13, la contrainte qui correspond à $\epsilon' = 0.00049$ est : 0.9932 N/mm^2

La valeur la plus proche de $\epsilon'' = 0.0025$ est : $\epsilon'' = 0.00251$

De la figure III.13, la contrainte qui correspond à $\epsilon'' = 0.00251$ est : 5.781 N/mm^2

$$E = (5.781 - 0.9932) / (0.00251 - 0.00049) = 2370.$$

Les caractéristiques de la résine époxyde sous l'essai de traction pour toutes les éprouvettes sont portées dans le tableau ci- dessous :

Tableau III.9. Caractéristiques de la résine époxyde.

N° de l'éprouvette	1	2	3	4	5	6	Moyenne
Module de YOUNG en (MPa)	2370	2610	2540	2710	2610	2650	2581.667
Contrainte maximale en (MPa)	43.12	40.526	40.128	42.892	43.219	41.91	41.966
Déformation en (%)	3.49	3.053	3.2239	2.753	3.248	3.325	3.182

b) Interprétation des résultats :

Le figure III.13 représente l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation longitudinale, laquelle montrent une faible fluctuation entre les différentes éprouvettes ce qui traduit l'homogénéité du matériau résine utilisé dans cette étude.

On constate aussi que le module de YOUNG obtenu expérimentalement 2.6 GPa est un peu faible par rapport aux valeurs théorique (autour 3 à 5 GPa).

III.4.2.2.2. La fibre de verre (tissé) :

La figure suivante illustre la variation de la contrainte en fonction de la déformation pour la fibre de verre tissé.

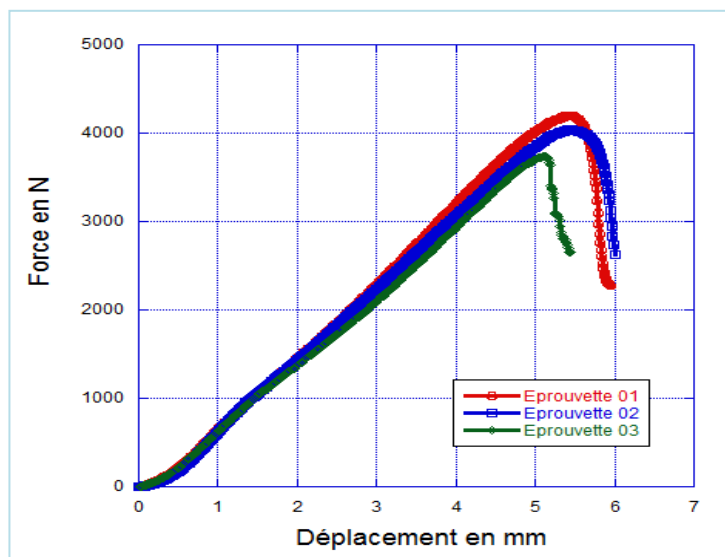


Figure III.15. Comportement en traction de la fibre de verre (tissé).

c) Caractéristiques de la fibre de verre (tissé) :

Les caractéristiques de la fibre de verre (tissé) se calculent de la même méthode que celles de la résine époxyde, les résultats sont portés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.10. Caractéristiques des éprouvettes de la fibre de verre (tissé).

N° de l'éprouvette	1	2	3	Moyenne
Force maximale en (mm)	4200	4040	3730	3990
Déplacement en (%)	5.44	5.47	5.14	5.35

d) Interprétation des résultats :

On remarque que le comportement de la fibre de verre (tissé) en traction (figure III.15) est linéaire jusqu'à une contrainte maximale moyenne de 3990 MPa dont la déformation moyenne correspondante est de 5.35%, au-delà de cette valeur il y a rupture des éprouvettes en fibres de verre, avec une contrainte de rupture moyenne de 2500 MPa qui correspond à une déformation moyenne de 5.7%. On constate aussi que le module de YOUNG obtenu expérimentalement est 30.4 GPa.

III.4.2.2.3. Le stratifié fibre de verre (tissé)/ résine époxyde :

La figure suivante illustre la variation de la contrainte en fonction de la déformation en traction pour le matériau composite stratifié verre/époxy suivant deux variantes, la variante 01 à gauche (composée de 6 plis) et la variante 02 à droite (composée de 8 plis) :

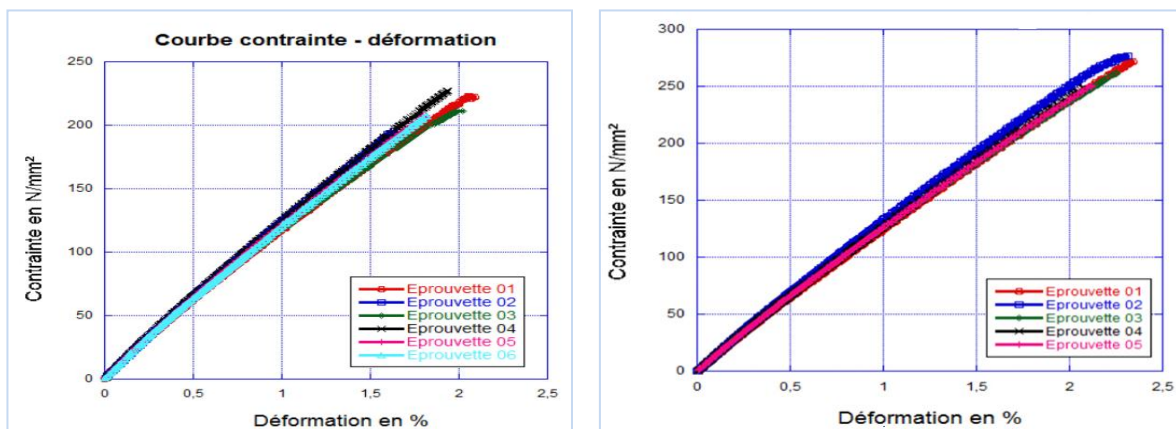


Figure III.16. Comportement en traction de la variante 01 (gauche) et variante 02 (droite) du stratifié.

c) Caractéristiques du stratifié verre/époxy :

La même méthode de calcul pour la résine époxyde est utilisée pour la détermination des caractéristiques du stratifié fibre de verre /résine époxyde à la traction, les résultats sont portés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.11. Caractéristiques du stratifié verre / époxy de la variante 01 à la traction.

N° de l'éprouvette	1	2	3	4	5	6	Moyenne
Module de YOUNG en (MPa)	13000	13400	13100	13600	13400	13500	13333.333
Contrainte maximale en (MPa)	222.691	195	211.094	226.932	208.201	207.711	211.772
Déformation en (%)	2.056	1.627	1.993	1.938	1.809	1.823	1.874

Le tableau suivant présente les caractéristiques mécaniques (module de YOUNG, contrainte maximale et déformation relative) du stratifié *verre/ résine* variante 02 à la traction :

Tableau III.12. *Caractéristiques du stratifié verre/ époxy de la variante 02 à la traction.*

N° de l'éprouvette	1	2	3	4	5	Moyenne
Module de YOUNG en (MPa)	13600	14500	13800	14000	13700	13920
Contrainte maximale en (MPa)	272.18	276.954	262.602	249.414	250.610	262.352
Déformation en (%)	2.340	2.305	2.247	2.084	2.116	2.218

d) **Interprétation des résultats :**

La figure III.16 représente l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation longitudinale, laquelle montre une faible fluctuation entre les différentes éprouvettes de chaque variante, ce qui traduit l'homogénéité du matériau stratifié. Même chose, On note aussi que les courbes du stratifié (figure III.16 variante 01 et variante 02), présentent clairement une déformation élastique, caractérisée par un comportement linéaire de toute les éprouvettes jusqu'à la rupture ce qui indique que le matériau stratifié fibre /résine a une rupture fragile.

En comparant les contraintes maximales de la variante 01 et 02 (figure III.16), on constate que la contrainte maximale de la variante 02 (autour de 262.352 N/mm²) est supérieure à la contrainte maximale de la variante 01 (autour de 215 N/mm²), ceci se traduit par le nombre de plis de fibres de verre tissé que contient la variante 02, cette dernière est réalisée avec 8 plis de fibres de verre tissé, par contre la variante 01 est réalisée avec 6 plis, par ce que c'est la fibres qui assure la tenue mécanique du matériau composite stratifié, donc en augmentant le nombre de plis la résistance mécanique du matériau composite stratifié augmente.

On constate aussi que le module de YOUNG du stratifié de la variante 01 et 02 (autour de 13.5 GPa) est 5 fois plus supérieur aux valeurs de la résine époxy (autour de 2.6 GPa) et 3 fois inférieur aux valeurs de la fibre de verre (tissé) (autour de 41GPa). Cela est le résultat de la combinaison de deux matériaux différents qui sont la résine époxyde et la fibre de verre.

La résine a pour rôle de maintenir la fibre de verre dans sa position initial, et lui transmis les charges extérieures d'une manière uniforme. De son coté la fibre de verre, apporte au stratifié la résistance mécanique.

III.4.3. Essai de flexion trois points :

III.4.3.1. Préparation des éprouvettes :

Les plaques obtenues sont découpées en éprouvettes selon la norme internationale ISO 178 (voir l'annexe 05) à l'aide d'un disque diamanté. La figure suivante montre des exemples des éprouvettes préparées pour l'essai de flexion à trois points.

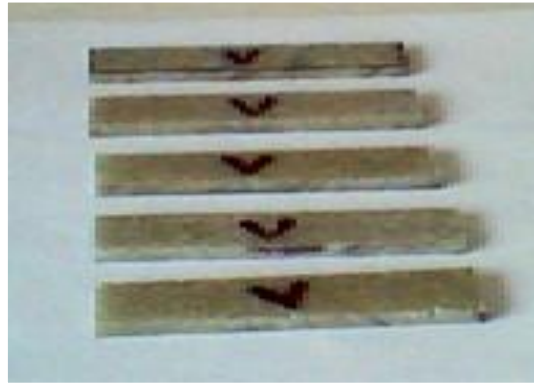


Figure III. 17. Exemple des éprouvettes du stratifié verre/ époxy.

Les éprouvettes du stratifié verre / époxy sont aux nombres de quatorze (14), divisées en deux variantes selon le nombre de plis :

- La variante 01 composée de six (06) éprouvettes structurés en six plis chacune.
- La variante 02 est composée de six (06) éprouvettes structurés en huit plis chacune.

Les dimensions des éprouvettes du stratifié fibre de verre (tissé)/ résine époxyde pour l'essai de flexion à trois points sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.13. Dimensions recommandées des éprouvettes.

	Symbole	Dimensions
Longueur en mm	L	80±2
Largeur en mm	b	10±0.2
Épaisseur en mm	e	4±0.2

III.4.3.2. Principe de l'essai de flexion 3 points :

Le principe de cet essai est de mesurer la flèche δ qu'engendre une force F appliquée à mi-travée d'une éprouvette supportée comme une poutre (suivant la norme ISO 178) à une vitesse constante jusqu'à la rupture de cette éprouvette. Les appuis de la machine de flexion sont de forme hémisphérique de diamètre 36 mm pour les deux appuis inférieurs et 10 mm pour le poinçon ; la vitesse d'essai est de 2 mm/mn. La figure suivante montre le dispositif de l'essai de flexion à trois points.

La figure III.18 représente le dispositif pour l'essai de flexion à trois points.

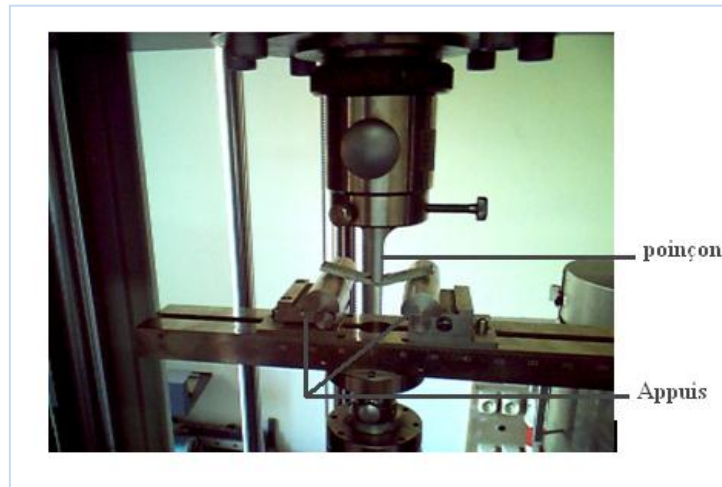


Figure III.18. Dispositif pour l'essai de flexion à trois points.

La figure III.19 représente le principe de l'essai de flexion à trois points.

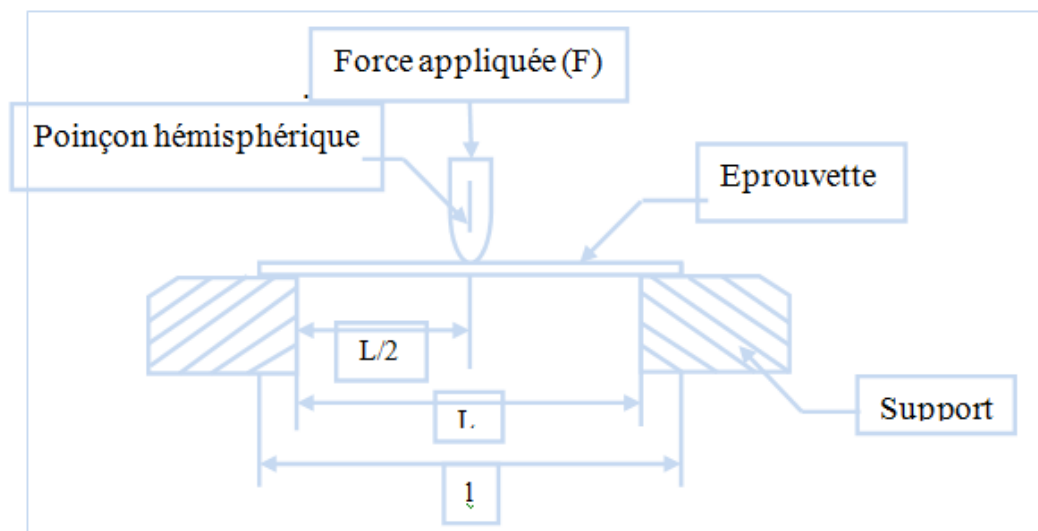


Figure III.19. Principe de l'essai de flexion à trois points.

III.4.3.3. Présentation et interprétation des résultats :

a) Les graphes de la résine époxyde :

Les deux graphes suivants (figure III.20) illustrent la variation de la force en fonction de la flèche pour l'essai de flexion à trois points de la variante 01 à gauche (composée de 6 plis) et la variante 02 à droite (composée de 8 plis) du stratifié verre /époxy :

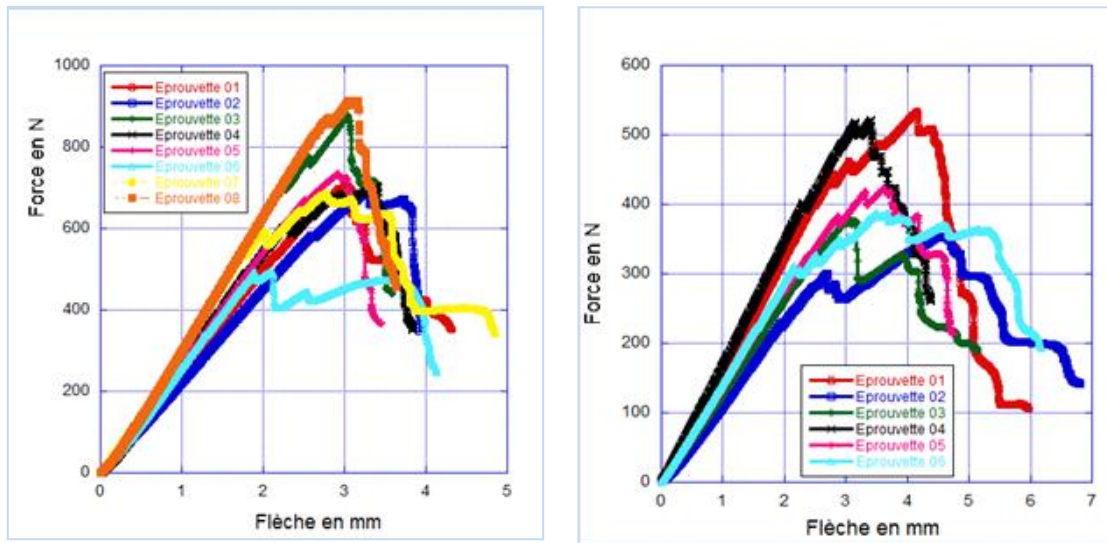


Figure III.20. Comportement du stratifié variante 02 (gauche) et variante 01 (droite) à l'essai de flexion trois points.

b) Caractéristiques du stratifié :

Les caractéristiques du stratifié verre/époxy : flèche maximale et flèche à la rupture seront tirés directement des deux graphes précédents (Figure III.20), les contraintes maximales et les contraintes à la rupture se calculent par la méthode exposée dans la norme ISO 178, comme suit :

Le tableau suivant, représente les caractéristiques (forces maximales et flèches) du stratifié verre/ époxy variante 01 :

Tableau III.14. Caractéristiques du stratifié variante 01 à la flexion trois points.

N° de l'éprouvette	1	2	3	4	5	6	Moyenne
Force maximale en (MPa)	532.644	354.128	378.559	520.98	422.347	388.017	432.78
Flèche en mm	4.16	4.543	3.071	3.411	3.656	3.509	3.72

Le tableau suivant, représente les caractéristiques (modules de YOUNG, forces maximales et flèches) du stratifié *verre/ époxy* variante 02 à la flexion 3 points :

Tableau III.15. *Caractéristiques du stratifié variante 02 à la flexion trois points.*

N° de l'éprouvette	1	2	3	4	5	6	7	8	Moyenne
Force maximale en (MPa)	706.62	694.75	877.50	704.73	734.68	493.86	697.88	914.48	728.06
Flèche en mm	3.02	3.29	3.04	3.40	2.92	2.09	2.78	3.58	3.01

c) Interprétation des résultats :

En comparant les résultats des deux graphes (figure III.20), la force maximale moyenne de la variante 02 est presque le double de la force maximale moyenne de la variante 01 avec une flèche moyenne de 3.01 mm pour la variante 02 qui se rapproche de la flèche moyenne de la variante 01 avec 3.7 mm, cela s'explique par les deux plis que la variante 02 possède en plus par rapport à la variante 01.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de cette étude a été l'élaboration et la caractérisation physico-mécanique d'un matériau composite stratifié à base de fibres de verre tissé et de résine époxyde.

Dans le premier chapitre de ce mémoire, nous avons mis l'accent sur les matériaux composites et leurs constituants. Dans le deuxième chapitre nous avons abordé les principaux essais appliqués sur le matériau composite stratifié fibre de verre / résine époxyde et le dernier chapitre de ce mémoire est consacré à la partie pratique, dont laquelle nous avons caractérisé les matériaux constituants les stratifiés, à savoir la fibre de verre tissé et la résine époxyde. Puis nous avons élaboré deux types de matériaux composites stratifiés, le premier est composé par six plis de fibres de verre tissé et le second est constitué avec huit plis de fibres de verre tissé.

L'étude consacrée aux propriétés mécaniques des matériaux composites stratifiés élaborés à partir de résine époxyde et de fibre de verre conduit aux conclusions suivantes :

- a) On a remarqué que le module de YOUNG obtenu expérimentalement sur des éprouvettes à base de résine époxyde est de 2.6 GPa, il est un peu faible par rapport aux valeurs théorique, qui sont autour 3 à 5 GPa.
- b) On a constaté que le comportement mécanique de la fibre de verre (tissé) en traction est linéaire jusqu'à une contrainte maximale moyenne de 3990 MPa dont la déformation moyenne correspondante est de 5.35%, au-delà de cette valeur il y a rupture des éprouvettes en fibres de verre. On a constaté aussi que le module de YOUNG obtenu expérimentalement sur la fibre de verre tissé est de l'ordre de 30.4 GPa.
- c) En comparant les contraintes maximales de la variante 01 et 02, on a constaté que la contrainte maximale de la variante 02, qui est autour de 262.352 N/mm² est supérieure à la contrainte maximale de la variante 01, qui est égale à 215 N/mm², ceci peut être expliqué par le nombre de plis de fibres de verre tissé que contient la variante 02, cette dernière est réalisée avec 8 plis de fibres de verre tissé, par contre la variante 01 est réalisée avec 6 plis.

Les résultats obtenus montrent que le stratifié renforcé par huit plis de fibres de verre de type tissé présente de meilleures caractéristiques mécaniques en traction et en flexion 3 points, par ce que c'est la fibre qui assure la tenue mécanique du matériau composite stratifié, donc en augmentant le nombre de plis, la résistance mécanique du matériau composite stratifié augmente.

Référence bibliographique

Référence bibliographique :

- [1] : Matériaux composites « comportement mécanique et analyse des structures », Jean-Marie Berthelot, édition Lavoisier, 637pages, 2012.
- [2] : Etude du comportement mécanique d'un matériau composite thermoplastique/ verre : effet de différentes milieu, Safia Sahri, mémoire de magistère, UMMTO.
- [3] : Matériaux composites - Architecture, mise en œuvre, propriétés et applications industrielles- Claude Bathias et coll, 2^eeditiondunod, 509 pages, 2009.
- [4] : Matériaux composites présentation générales, Michel Chatin, techniques de l'ingénieur
- [5] : "glossaire des matériaux composites," centre d'animation régional en matériaux avancés, 2006.
- [6] : Généralités sur les matériaux composites, Laurent Gornet, Ecole d'ingénieur, 49pages 2008.
- [7] : Généralités sur les matériaux composites, Djebbloun Youcef,
- [8] : Cours Matériaux composites, Nadia Bahlouli sur le site web : <http://www-ipst.ustrasbg.fr/nadia/courcomp/>
- [9] : Etude du comportement de matériaux composites à matrice polymère en fatigue (effet du vieillissement), mémoire de magistère, UMMTO.
- [10] : Jean-Robert Yersin, Détermination des propriétés et applications des composites. Gymnase Auguste Picard Lausanne, 2009.
- [11] : ROUAM Kamila, Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles. Mémoire de Magister, Université de Boumerdes, 2013 ;
- [12] : A. RASKIN, Les résines composites. Support de cours. Université médicale virtuelle francophone ; 2009.
- [13] : S. BOUKAIS, Comportement mécanique et dureté de la résine époxyde renforcée de charges. 9^{ième} congrès de mécanique FS, Senlalia. Marrakeche 2009.
- [14] : S. Grishchuk, Structure, thermal and fracture mechanical properties of benzoxazine-modified amine-cured DGEBA epoxy resins. Express Polymer letters Vol. 5, No. 3 (2011) 273-282.
- [15] : Amar Boudefel, propriétés dielectriques des polymers composites et leurs applications en microelectronique. Thèse de doctorat, Université BM-Annaba. 2009.

[16] : Cheng-Fu Yang et al, Characterization and curing kinetics of epoxy / silica nano hybrids. *Materials* 2015 Article, 8 (10) 7032-7040.

[17] : Moustafa IDRIS, Analyse expérimentale et par éléments finis du comportement statique et vibratoire des matériaux composites sandwichs sains et endommagés. Thèse de doctorat, Université de Maine.

[18]: D. ZENKERT, *The Handbook of sandwich construction*. Engineering Materials Advisory services Ltd, ISBN-10: 0947817964; 1997.

[19] : Yamina AIMANE, Hyper-élastique pour la simulation des renforts fibreux en grandes transformations. Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2007

[20] Béatrice LARGE-TOUMI Etude du comportement en fatigue de composites carbone/époxy : rôle de l'interface.

Thèse de doctorat, école centrale de Lyon, 1994.

[21] Ourahma Ali Etude de comportement en fatigue de composites à fibres de verres discontinus Renforçant une matrice en polypropylène.

Tèse doctorat, Ecole centrale de Lyon 2003-2004.

[22] KRAWCZAK (P.) et PABIOT (J.). "La mesure des porosités dans les composites industriels et leur incidence sur les propriétés mécaniques". *Composites*, n° 3, mai-juin 1991, p 291- 295, 8 fig. 19 réf. bibl., Centre de Promotion des Composites, Paris (F).

[23] Thionnet A., "Prévision d'endommagement sous chargements quasi-statiques et cycliques des structures composites stratifiées", ONERA-N.T 1991-4, Thèse de doctorat, Paris VI, 1991.

[24] M. Hildebrand "Amélioration de la résistance des stratifiés pour bateaux", Technical Research Centre of Finland, Ship Laboratory, colloques sur La construction navale en composites. Paris, 7-9 décembre 1992.

[25] Allix O., Ladevèze P., Ledantec E., "Modélisation de l'endommagement du pli élémentaire des composites stratifiés", in : JNC 7, Lyon, ed. G. Fantozzi, P. Fleischmann, Pluralis, pp. 715-724, 1990.

[26] Aussedat-Yahia E., "Comportement et endommagement du composite tissé carbone/PMR15 soumis à des chargements mécaniques et thermiques", Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 1997.

[27] Petitpas E., “Comportement et endommagement des matériaux composites stratifiés”, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 1993.

[28] Rozycki P., “Contribution au développement de lois de comportement pour matériaux composites soumis à l’impact”, Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2000.

Annexe

ANNEXE 01

ISBN 0335-3931

norme européenne
norme française

NF EN ISO 527-4
Juillet 1997

Indice de classement : T 51-034-4

ICS : 83.080.01

Plastiques

Détermination des propriétés en traction

Partie 4 : Conditions d'essai pour les composites plastiques renforcés de fibres isotropes et orthotropes

E : Plastics - Determination of tensile properties - Part 4 : Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites
D : Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften- Teil 4 : Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe

Norme française homologuée

par décision du Directeur Général de l'AFNOR le 20 juin 1997 pour prendre effet le 20 juillet 1997.

Remplace, en partie, la norme annulée NF T 51-034, de décembre 1986, et remplace la norme homologuée NF T 57-101, de juin 1977 : norme européenne EN 61.

Correspondance

La norme européenne EN ISO 527-4:1997 a le statut d'une norme française. Elle reproduit intégralement la norme internationale ISO 527-4:1997.

Analyse

Le présent document se réfère aux principes généraux de détermination des propriétés en traction décrits dans la partie 1 de la norme NF EN ISO 527. Il adapte les définitions, l'appareillage, la préparation des éprouvettes plastiques renforcés de fibres isotropes et orthotropes.

Descripteurs

Thésaurus International Technique : plastique, plastique renforcé, thermoplastique, thermodurcissable, matériau de renforcement, fibre de verre, fibre de carbone, fibre aramide, essai de traction, détermination, propriété tensorielle, conditions d'essai.

Modifications

Par rapport aux documents remplacés, reprise de la norme internationale ISO 527-4 en norme européenne.

Corrections

Éditée et diffusée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), Tour Europe 92049 Paris La Défense Cedex
Tél. : 01 42 91 55 55 - Tél. international : + 33 1 42 91 55 55

© AFNOR 1997

AFNOR 1997

1^{er} tirage 97-07

ANNEXE 02

	ISSN 0335-3931
norme française	NF ISO 4606 Octobre 1996
	Indice de classement : B 38-203
	ICS : 59.100.10
Verre textile	
Tissus	
Détermination de la force de rupture en traction et de l'allongement à la rupture par la méthode de la bande	
<p>E : Textile glass — Woven fabric — Determination of tensile breaking force and elongation at break by the strip method D : Textilglas — Gewebe — Bestimmung der Höchstzugkraft und Dehnung durch den Streifenzugversuch</p>	
<hr/>	
Norme française homologuée	
<p>par décision du Directeur Général de l'AFNOR le 5 septembre 1996 pour prendre effet le 5 octobre 1996. Remplace la norme enregistrée NF B 38-203, de décembre 1983.</p>	
<hr/>	
Correspondance	Le présent document reproduit intégralement la norme internationale ISO 4606:1995.
<hr/>	
Analyse	Le présent document prescrit une méthode de détermination de la force de rupture en traction de l'allongement de rupture de bandes de tissu en verre textile effilochées, qui ont été conditionnées dans une atmosphère normale d'essai, au moyen d'une machine à vitesse constante de déplacement de la pince mobile (1 et 2).
<hr/>	
Descripteurs	Thésaurus International Technique : verre textile, tissu de verre textile, essai, essai de traction, force de rupture, allongement à la rupture.
<hr/>	
Modifications	Par rapport à la norme remplacée, reprise de la norme internationale ISO 4606:1995 en norme française.
<hr/>	
Corrections	
<hr/>	
Éditée et diffusée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), Tour Europe 52049 Paris La Défense Cedex — Tél. : (1) 42 91 55 55	
© AFNOR 1996	AFNOR 1996
	1 ^{er} tirage 96-10



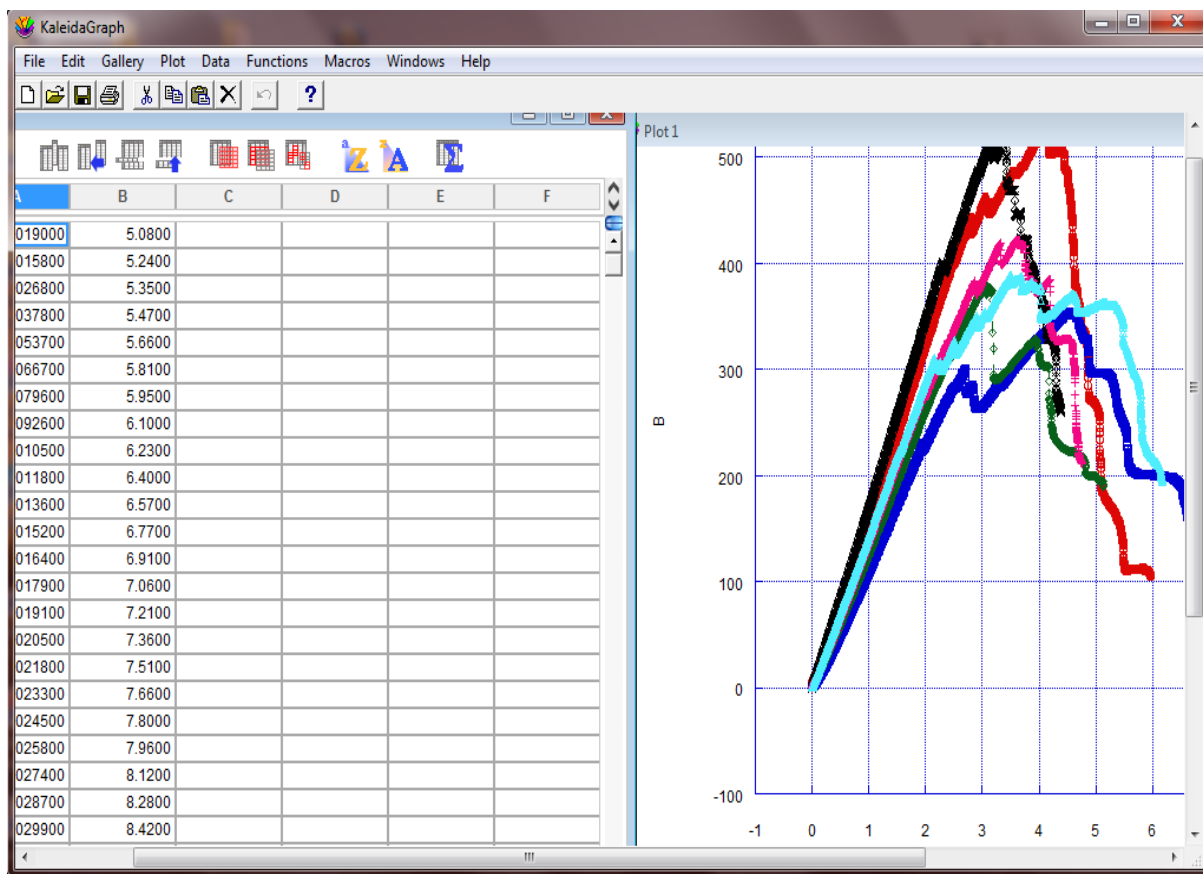
ANNEXE 03

ISSN 0255-2921	
norme européenne	NF EN ISO 527-5
norme française	Juillet 1997
Indice de classement : T 51-034-4	
ICS : 83.080.01	
<p>Plastiques</p> <p>Détermination des propriétés en traction</p> <p>Partie 4 : Conditions d'essai pour les composites plastiques renforcés de fibres isotropes et orthotropes</p> <p>EN Plastics - Determination of tensile properties - Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites</p> <p>Q Kunststoff - Bestimmung der Zugbeiwerte - Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und orthotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe</p>	
<p>Norme française homologuée</p> <p>par décision du Directeur Général de l'AFNOR le 20 juin 1997 pour prendre effet le 20 juillet 1997.</p> <p>Remplace, en partie, la norme annulée NF T 51-034, de décembre 1986, et approuve la norme homologuée NF T 57-101, de juin 1977 : norme européenne EN 61.</p>	
Correspondance	La norme européenne EN ISO 527-4:1997 a le statut d'une norme française. Elle approuve intégralement la norme internationale ISO 527-4:1997.
Analyse	Le présent document se réfère aux principes généraux de détermination des propriétés en traction décrits dans la partie 1 de la norme NF EN ISO 527. Il approuve les définitions, l'appareillage, la préparation des éprouvettes plastiques renforcées de fibres isotropes et orthotropes.
Descripteurs	Thésaurus International Technique : plastique, plastique renforcé, thermoplastique, thermodurcissable, matériau de renforcement, fibre de verre, fibre de carbone, fibre aramide, essai de traction, détermination, propriété tensorielle, conditions d'essai.
Modifications	Par rapport aux documents remplacés, reprise de la norme internationale ISO 527-4 en norme européenne.
Corrections	
<p>Édité et diffusé par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), Tour Europe 62042 Paris La Défense Cedex</p> <p>Tél. : 01 42 21 55 65 - Tél. (jeepjeep) : +33 1 42 21 55 65</p>	
© AFNOR 1997	AFNOR 1997
	1 ^{er} tirage 97-07

© AFNOR 1997 - Tous droits réservés



ANNEXE 04



ANNEXE 05

NORME INTERNATIONALE

ISO 178:1993(F)

Plastiques — Détermination des propriétés en flexion

1 Domaine d'application

1.1 La présente Norme internationale prescrit une méthode pour la détermination des propriétés en flexion des plastiques dans des conditions définies. Une éprouvette normalisée est décrite mais des paramètres sont inclus pour d'autres dimensions d'éprouvettes lorsque l'usage est approprié. Une gamme de vitesses d'essais est incluse.

1.2 La méthode est utilisée pour l'étude du comportement en flexion des éprouvettes et pour la détermination de la résistance en flexion, du module en flexion et d'autres aspects des relations entre la contrainte et la déformation en flexion dans des conditions définies. Elle s'applique uniquement à une poutre simple, supportée sans contrainte, chargée au milieu de sa portée (méthode des trois points).

1.3 La méthode est applicable à la gamme des matériaux suivants:

- matières thermoplastiques pour moulage et extrusion, y compris les compositions chargées et renforcées en plus des types non chargés; feuilles thermoplastiques rigides;
- matières thermodurcissables pour moulage, y compris les compositions chargées et renforcées; feuilles thermodurcissables, y compris les stratifiés;
- composites thermoplastiques et thermodurcissables renforcés de fibres comportant des renforts unidirectionnels et multidirectionnels tels que mat, tissu, tissu stratifié, fils de base coupés, combinaison de renforcements et hybrides, stratifiés et fibres broyées, feuilles réalisées à partir de matières préimprégnées (prepreg);
- polymères de cristaux liquides thermotropes.

La méthode ne convient normalement pas à l'utilisation de matériaux alvéolaires rigides et de structures sandwich contenant des matériaux alvéolaires.

NOTE 1 Pour certains types de plastiques renforcés avec des fibres textiles, un essai de flexion en quatre points est recommandé. Ceci est en cours d'étude à l'ISO.

1.4 La méthode est adaptée à l'utilisation d'éprouvette qui sont, soit moulées aux dimensions choisies, soit usinées à partir de la partie centrale de l'éprouvette à usages multiples (voir ISO 3167) ou usinées à partir de produits finis et semi-finis, tels que pièces moulées, stratifiées et feuilles extrudées ou couléées.

1.5 La méthode prescrit les dimensions recommandées pour les éprouvettes. Des essais réalisés avec des éprouvettes de dimensions différentes peuvent donner des résultats qui ne sont pas comparables. D'autres facteurs, tels que la vitesse d'essai et le conditionnement des éprouvettes peuvent également avoir une répercussion sur les résultats. En conséquence, lorsque des résultats comparatifs sont nécessaires, ces facteurs devront être soigneusement contrôlés et enregistrés.

1.6 Les propriétés en flexion ne peuvent être utilisées que pour des études d'ingénierie pour les matériaux ayant un comportement contrainte-déformation linéaire. Pour les matériaux à comportement non linéaire, les propriétés en flexion ne sont que nominales. L'essai de flexion devra être utilisé préférentiellement avec des matériaux fragiles, étant donné qu'ils sont difficiles à soumettre à l'essai de traction.

2 Références normatives

Les normes suivantes contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui en est faite, constituent des dispositions valables pour la présente Norme internationale. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Toute norme est sujette à révision et les parties prenantes des accords fondés sur la présente Norme internationale sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des normes indiquées ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur à un moment donné.

Résumé

Résumé : Ce travail a pour objet d'élaborer un matériau composite stratifié à base de fibres de verres et de résine époxyde et étudier ses caractéristiques mécaniques en flexion 3 points, et en traction. L'étude des caractéristiques mécaniques a permis de voir l'effet de fibre de verre (tissé) sur la qualité du matériau composite. L'analyse des résultats des essais menés sur deux types de stratifiés montre que la meilleure variante qui donne les performances mécaniques les plus élevées est le stratifié renforcé avec huit plis de fibres de verres, c'est-à-dire l'augmentation de nombre de plis augmente la résistance mécanique à la traction et à la compression du matériau composite stratifié.

Mots clés : Matériaux composites stratifiés, flexion 3 points, traction, fibres de verre (tissé), résine époxyde.

Abstract: This work has the aim of studying the mechanical characteristics in inflection 3 points, traction; in statics. The study of the mechanical characteristics made it possible to see the effect of the type of glass fibers (woven) like their associations on the quality of composite material obtained. The analysis of the results of the tests carried out on three types of laminates shows the best alternative which gives the mechanical performances highest.

Key words: laminated composite materials, inflection 3 points, traction, glass fibers (woven), resin epoxide.

الملخص : هذا العمل يهدف إلى دراسة الخصائص الميكانيكية في الانحناء لثلاثة نقاط ، والشد لمادة مركبة من طبقات مصفحة ومكونة من مادة الألياف الزجاجية (منسوجة) و مادة الغراء . دراسة هذه الخصائص الميكانيكية جعلت من الممكن أن نرى تأثير الألياف الزجاجية (منسوجة) على نوعية المواد المركبة التي نحصلنا عليها. تحليل نتائج التجارب التي أجريت على النوعين من الشرائح يظهر المركب الأفضل الذي يعطي التأثيرات الميكانيكية الاعلى و كان المركب الذي يحتوي على ثمانية طبقات هذا يعني انه كلما ارتفع عدد الطبقات ترتفع المقاومة الميكانيكية في حالة الشد و في حالة الضغط للمادة المركبة من طبقات .

الكلمات الرئيسية : المواد المركبة دو الطبقات، الانحناء لثلاثة نقاط ، الشد ، الألياف الزجاجية (منسوجة) ، الغراء.