

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou**

**Faculté de Génie de la Construction**

**Département De Génie Mécanique**



## **Mémoire de fin d'études**

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

**Fabrication Mécanique et Productique**

**Thème :**

**Analyse de la qualité des perçages des  
matériaux composites utilisés dans la  
construction navale**

**Dirigée par :**

*Mr : ZAIDI Ali*

*Mr : ASMA Farid*

**Réalisé par :**

*- KAOUANE Omar*

*- SAAD Ahmed*

**Promotion : 2018/2019**

## *Remerciements*

*Le plus grand merci revient toujours à DIEU tout puissant qui nous a comblé des bienfaits de l'islam et de la science.*

*Nos vifs remerciements et profondes gratitudee sont exprimés à notre encadreur **Mr A. ZAIDI**, pour son aide précieux, ses encouragements et son soutien favorable pour l'aboutissement de ce mémoire.*

*Nous remercions vivement **Mr F. ASMA** professeur à l'UMMTO pour son aide et ses orientations durant la réalisation de ce travail.*

*Nous tenons à remercier également Messieurs les membres de jury **Mr A. Bouazzouni** Professeur à l'UMMTO ainsi que **Mr R. Djeridi** maître conférences à l'UMMTO, qui nous feront l'honneur de bien vouloir examiner ce travail.*

*À tous les enseignants de L'UMMTO, qui ont contribué à notre formation, on adresse nos remerciements les plus sincères.*

*Nous n'oublions pas nos parents pour leur soutien, leurs encouragements et leur patience toute au long de notre parcours scolaire et universitaire sans eux ne nous serions pas là aujourd'hui.*

*Enfin, à tous ceux, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réalisation de ce travail trouvent ici, l'expression sincères de notre reconnaissances et gratitude.*




## DEDICACE

*À la mémoire de mon père  
À la mémoire de mon frère aîné Hamza  
Que Dieu vous accorde sa clémence et vous  
accueille dans son paradis inchallah*

*À ma très chère mère  
À mes chers frères et Ma sœur  
À toute ma famille KAOUANE et GOURARI  
À tous mes amis  
Je dédie cet humble travail*

*Omar*



*À mes très chers parents qui m'ont toujours  
soutenu Et encouragé dans mes études  
Que dieu les garde et les protège et leurs  
confère une longue vie*

*À ma sœur SARAH et mon frère SMAIL  
À toute ma famille SAAD et Hammouche*

*À tous mes amis*

*Je dédie cet humble travail*

*Ahmed*

## Table des matières

Liste des figures.....	i
Liste des tableaux.....	iv
Résumé	
Abstract	
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>

### Chapitre I : Présentation générale des matériaux composites

I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition des matériaux composites .....	3
I.3 Les constituants du matériau composite .....	4
I.3.1 Les différentes matrices.....	5
I.3.1.1 Résines thermodurcissables.....	6
I.3.1.2 Résines thermoplastiques.....	7
I.3.2 Les différentes fibres (renforts).....	9
I.3.2.1 Les principaux renforts.....	10
I.3.2.2 Différentes formes de fibres.....	16
I.3.3 Les charges et les additifs.....	16
I.3.3.1 Les charges.....	16
I.3.3.2 Les additifs.....	17
I.3.4 Adhésion renforts / matrice.....	17
I.4 Architecture des matériaux composites .....	18
I.4.1 Les stratifiés à base de tissus unidirectionnels .....	18
I.4.2 Composites sandwiches.....	21
I.5 Procédé de mise en œuvre .....	22
I.5.1 Les technologies dites en moule ouvert : .....	23
I.5.1.1 Moulage au contact.....	23
I.5.1.2 Moulage par projection simultanée.....	25
I.5.2 Les technologies dites en moule fermé : .....	26
I.5.2.1 Moulage sous vide.....	26
I.5.2.2 Moulage par injection de résine.....	26
I.5.2.3 Moulage par compression à froid de résine.....	27
I.5.2.4 Moulage par compression à chaud de résine.....	27
I.5.2.5 Moulage par injection de mélange (résine-renfort).....	28
I.6 Conclusion .....	29

## **Chapitre II : Perçage des matériaux composite**

II.1 Définition.....	30
II.2 Type du perçage des matériaux composites.....	30
II.2.1 Perçage par enlèvement de la matière.....	30
II.2.2 Perçage par jet d'eau.....	31
II.2.3 Perçage au laser.....	33
II.3 Problématique du perçage des matériaux composites par outils coupants.....	34
II.3.1 Géométrie d'outils.....	35
II.3.2 Matériaux d'outils.....	35
II.3.2.1 Outils à aciers rapides.....	36
II.3.2.2 Outils à carbures de tungstène (WC).....	36
II.3.2.3 Outils à nitrure de bore cubique (CBN).....	37
II.3.2.4 Outils à diamant.....	37
II.3.3 Conditions communes à tous les matériaux composites.....	39
II.3.4 Mécanismes de coupe des composites.....	39
II.4 Mode d'assemblage des composites en construction navale.....	41
II.4.1 Assemblage par collage.....	41
II.4.1.1 Matériaux à coller.....	41
II.4.1.2 Préparation des surfaces.....	42
II.4.2 Assemblage par rivetage.....	45
II.5 Matériaux composites utilisés dans l'industrie navale.....	46
II.5.1 Le polyester renforcé de verre.....	46
II.5.2 Le panneau- sandwich.....	46
II.6. Conclusion.....	47

## **Chapitre III : Caractérisation et quantification des défauts de perçage**

III.1 Caractérisation et quantification des défauts de perçage lié au perçage des stratifiés....	48
III.1.1 Localisation des défauts.....	48
III.1.1.1 Défauts situés en entrée du trou.....	48
III.1.1.2 Défauts situés sur la paroi du trou.....	50
III.1.1.2 Défauts situés en sortie du trou.....	53

## **Chapitre IV : Partie expérimentale**

IV.1 Fabrication des plaques en matériau composite polyester/fibre de verre.....	55
IV.1.1 Matériaux utilisés pour l'étude.....	55
IV.1.2 Constituants de matériaux composites.....	56

IV.1.3 Procédé d'élaboration des matériaux composites.....	56
IV.1.4 Matériaux élaborés.....	57
IV.2 Fabrication des éprouvettes en matériaux composites.....	58
IV.3 Essai de perte au feu (calcination).....	59
IV.3.1 Principe de l'essai.....	60
IV.3.2 Matériel utilisé.....	59
IV.3.2 Déroulement de l'essai.....	60
IV.4 Perçage.....	61
IV.4.1 Dispositif de perçage.....	61
IV.4.2 Fraiseuse.....	63
IV.5 Microscope optique.....	64
IV.6 L'Influence des conditions de coupe sur le délaminage en sortie de trou.....	64
IV.6.1 L'Influence de la vitesse de rotation.....	64
IV.6.2 L'Influence de la vitesse d'avance.....	67
IV.7 Essai statique en flexion quatre points.....	70
IV.7.1 Machine d'essai.....	70
IV.7.2 Résultats obtenus en essai de flexion.....	72
<b>Conclusion générale et perspectives.....</b>	<b>76</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>78</b>

## LISTE DES FIGURES

### Chapitre I : Présentation générale des matériaux composites

Figure I.1: Représentation schématique d'éléments d'un matériau composite.....	4
Figure I.2: Constituants du matériau composite.....	5
Figure I.3: Différentes familles de matrice.....	6
Figure I.4: Diverses formes et origines de renforts.....	10
Figure I.5: Bobine de fibre de verre .....	10
Figure I.6: Procédé d'élaboration des fibres de verre .....	11
Figure I.7: Fibres longues de carbone : (a) en rouleaux unidirectionnels, (b) en bobines de fils (on distingue les fibres à l'extrémité du fil ; image de l'IFE) ; (c) en rouleaux de tissu 2D équilibré (image de Dexia Composite) .....	14
Figure I.8: Bobine de fibre d'aramide. ....	15
Figure I.9: Différentes architectures des fibres de verre (documentation Ahlstrom) .....	16
Figure I.10: Exemple du plan du drapage d'un composite stratifié. ....	18
Figure I.11: Modélisation par un système de ressorts des propriétés en traction d'un composite stratifié. ....	20
Figure I.12: Modélisation par un système de ressorts des propriétés en flexion d'un composite stratifié .....	20
Figure I.13: Modélisation des bornes d'après la Loi des Mélanges. ....	21
Figure I.14 : Nid d'abeilles. ....	21
Figure I.15: structure de sandwich.....	22
Figure I.16: Principe du moulage au contact.....	23
Figure I.17: Principe du moulage par projection simultanée.....	25
Figure I.18: Principe du moulage sous vide.....	26
Figure I.19: Principe du moulage par injection de résine .....	26
Figure I.20: Principe du moulage par compression à froid de résine .....	27
Figure I.21: Principe du Moulage par compression à chaud de résine.....	27
Figure I.22: Principe du moulage par injection de mélange (résine renfort).....	28

### Chapitre II : Perçage des matériaux composite

Figure II.1: Perçage par enlèvement de matière.....	31
Figure II.2: Perçage par jet d'eau à haute pression.....	32
Figure II.3: Perçage par laser .....	34
Figure II.4: Géométrie d'un foret hélicoïdal ISO 3002/1-1982 .....	35
Figure II.5: Outils à aciers rapides .....	36

Figure II.6: Outils à carbures de tungstène .....	37
Figure II.7: Outils à nitrures de bore cubiques (source : site amazon.fr).....	37
Figure II.8: Différents types d'outils à diamant.....	38
Figure II.9: Autre types de forets .....	38
Figure II.10: Outil revêtu .....	39
Figure II.11: Etude expérimentale de la formation de copeaux pour : (a) $\theta = 0^\circ$ , (b) $\theta = +45^\circ$ , (c) $\theta = +90^\circ$ , (d) $\theta = -45^\circ$ Zitoune [ZIT_22] à gauche et Wang [WAN_21] à droite. ....	40
Figure II.12: Les trois modes de propagation de fissures .....	40
Figure II.13: Utilisation d'un tissu à délaminer pelable au moment du pelage.....	41
Figure II.14: Assemblage par collage en construction navale : pont-coque.....	44
Figure II.15: Assemblages de membrure dans une coque et de cloisons : méthodes pour réduire les concentrations de contraintes .....	44
Figure II.16: Assemblage par rivetage.....	45
Figure II.17: Gros rivets normalisés.....	45
Figure II.18: Modes de rivures courantes en construction navale.....	47

### **Chapitre III : Caractérisation et quantification des défauts de perçage**

Figure III.1 : Défauts liés au perçage du CFRP .....	48
Figure III.2 : Mécanisme d'apparition des défauts à l'entrée du foret lors du perçage d'un composite stratifié .....	49
Figure III.3 : Définition de l'air de délaminage .....	49
Figure III.4 : Défaut en entrée du trou .....	49
Figure III.5 : Critère de circularité.....	50
Figure III.6 : Sollicitations des fibres selon leur angle par rapport à la vitesse de coupe .....	50
Figure III.7 : Fibres à $0^\circ$ par rapport à $V_c$ . a) Illustration de la pénétration de l'arête de coupe Paroi de trou avec des fibres à $0^\circ$ par rapport à $V_c$ .....	51
Figure III.8 : décohésion fibre-matrice observé au microscope optique.....	51
Figure III.9 : Fibres à $-45^\circ$ par rapport à $V_c$ . a) Illustration de la pénétration de l'arête de coupe b) Paroi de trou avec des fibres à $-45^\circ$ par rapport à $V_c$ .....	52
Figure III.10: Arrachement de fibres observé au microscope optique.....	52
Figure III.11 : Rupture de fibres après flexion.....	53
Figure III.12 : Initiation d'un délaminage en sortie du trou .....	54
Figure III.13 : Défaut en sortie du trou.....	54

## Chapitre IV : Partie expérimentale

Figure IV.1 : Domaine d'utilisation du matériau composite.....	55
Figure IV.2 : Stratification utilisée par l'entreprise .....	56
Figure IV.3 : Les différents renforts utilisés.....	56
Figure IV.4 : Préparation des plaques composites par le procédé de moulage au contact....	57
Figure IV.5 : Scie à disque diamanté .....	58
Figure IV.6 : Géométrie des éprouvettes .....	59
Figure IV.7 : éprouvettes avec trous moulée (4, 6 et 8mm) .....	59
Figure IV.8 : (a) Creuset, (b) Four, (c) balance de précision .....	60
Figure IV.9 : a) Echantillons avant calcination, b) Echantillons après calcination .....	60
Figure IV.10 : foret hélicoïdale utilisée .....	62
Figure IV.11 : Dispositif de perçage.....	62
Figure IV.12 : fraiseuse verticale semi-automatique .....	63
Figure IV.13 : microscope-optique .....	64
Figure IV.14 : perçage au diamètre 4mm avec vitesse d'avance $C_{ste} = 250\text{mm/min}$ .....	65
Figure IV.15 : perçage au diamètre 6mm avec vitesse d'avance $C_{ste} = 250\text{mm/min}$ .....	65
Figure IV.16 : perçage au diamètre 8mm avec vitesse d'avance $C_{ste} = 250\text{mm/min}$ .....	66
Figure IV.17 : perçage à 180 tr/min et vitesse d'avance de 250mm/min.....	66
Figure IV.18 : perçage à 1000 tr/min et vitesse d'avance de 250mm/min.....	67
Figure IV.19 : perçage au diamètre 4mm avec $V_c = 180\text{ tr/min}$ .....	67
Figure IV.20 : perçage au diamètre 6mm avec $V_c = 180\text{ tr/min}$ .....	68
Figure IV.21 : perçage au diamètre 6mm avec $V_c = 180\text{ tr/min}$ .....	68
Figure IV.22 : perçage à 180 tr/min en variation de vitesse d'avance.....	69
Figure IV.23 : perçage à 710 tr/min en variation de vitesse d'avance.....	69
Figure IV.24 : perçage à 1000 tr/min en variation de vitesse d'avance.....	69
Figure IV.25 : machine de flexion type HOYTOM.....	71
Figure IV.26 : dispositif de flexion quatre points.....	71
Figure IV.27 : Courbe de flexion 4 points sur l'éprouvette vierge 2 (force/course).....	72
Figure IV.28 : Courbe de flexion 4 points sur l'éprouvette vierge 5 (force/course).....	73
Figure IV.29 : Courbe de flexion 4 points sur l'éprouvette moulée D4-2 (force/course).....	74
Figure IV.30 : Courbe de flexion 4 points sur l'éprouvette moulée D6-3 (force/course).....	74
Figure IV.31 : Courbe de flexion 4 points sur l'éprouvette moulée D8-1 (force/course).....	75

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Les critères essentiels des matrices thermoplastiques et thermodurcissables.....	6
Tableau I.2 : Caractéristiques des matrices thermodurcissables.....	7
Tableau I.3 : Caractéristiques des matrices thermoplastiques.....	8
Tableau I.4 : Caractéristiques de la matrice Polyester insaturé.....	9
Tableau I.5 : caractéristiques mécaniques des fibres de verre.....	13
Tableau I.6 : Synthèse d'utilisation des résines et renforts.....	18
Tableau IV.1 : Lot d'éprouvettes essayées.....	57
Tableau IV.2 : Résultats des essais de perte au feu du lot vierge VG(A).....	61

## Résumé

Notre travail présente une étude sur la qualité des perçages et leurs effets sur le comportement du matériau composite utilisé dans la fabrication des pièces (plaques) dans l'industrie navale (exemple : coque de bateau...). Etant un composite Stratifié, de « caractère hétérogène » nous nous sommes intéressés au comportement des plis à base de fibre de verre. Une étude expérimentale a été menée dans le but d'étudier à travers des essais de flexion, les effets du perçage sur les plis. Deux types d'éprouvettes sont considérés, des éprouvettes vierge et d'autres trouées (moulées), et cela dans le but d'établir une comparaison. L'étude expérimentale est complétée par une analyse morphologique de la rupture à l'échelle macroscopique et microscopique.

Ce travail a pour but d'abord de rechercher toute la littérature concernant les matériaux composites à savoir notamment leurs composants de base avec leurs caractéristiques, leurs modes de fabrication ainsi que leurs domaines d'utilisation et aussi une étude sur l'usinage (perçage) des matériaux composites à fibre de verre/polyester insaturée. Le processus de perçage dépend en grande partie des paramètres de coupe (La vitesse d'avance  $V_a$  : mm/min, La vitesse de rotation  $N$  : tours/min et le diamètre des forêts).

Dans notre étude, une tentative a été faite pour développer une approche rigoureuse pour l'optimisation des réponses multiples dans le perçage d'une plaque stratifiée en composites à fibre de verre/polyester. Une série des trous percés par des forêts de diamètre (4 – 6 et 8 mm) sur une fraiseuse semi-automatique universelle. Une autre série des trous moulée qui ont les mêmes diamètres à celle percés a été obtenue par le procédé de moulage au contact sur une plaque stratifié du même matériau.

L'objectif envisagé dans la partie expérimentale est l'étude du comportement mécanique du matériau composite (stratifiés) aux sollicitations statiques par le biais des essais de flexion quatre points, et de voir les différents facteurs qui influent sur la résistance à la flexion des plaques. En adoptant la méthode factorielle pour deux facteurs de coupe ( $N$ ,  $V_a$ ), on a pu obtenir des réponses relatives à la qualité des trous percés. La meilleure qualité relative au meilleur régime de coupe ( $N=1000$  tr/min et  $V_f= 16$  mm/min) a été confirmée par les observations microscopiques optiques.

**Mots Clés** : Matériau composite, Construction navale, Assemblage, Perçage, plan expérimentale, Délaminage, Flexion, microscope optique.

## Abstract

Our work presents a study on the quality of the holes and their effects on the behavior of the composite material used in the manufacture of parts (plates) in the naval industry (example: boat hull ...). Being a Laminated composite, of "heterogeneous character" we are interested in the behavior of plies based on fiberglass. An experimental study was carried out with the aim of studying, through bending tests, the effects of piercing on the folds. Two types of test pieces are considered, blank test pieces and others with holes (molded), for the purpose of comparison. The experimental study is completed by a morphological analysis of the rupture at a macroscopic and microscopic scale.

The aim of this work is firstly to research all the literature concerning composite materials, namely in particular their basic components with their characteristics, their manufacturing methods as well as their fields of use and also a study on machining (drilling) unsaturated fiberglass / polyester composite materials. The drilling process largely depends on the cutting parameters (the feed speed  $V_a$ : mm / min, the rotation speed  $N$ : revolutions / min and the diameter of the forests).

In our study, an attempt was made to develop a rigorous approach for the optimization of multiple responses in the drilling of a laminated sheet of fiberglass / polyester composites. A series of holes drilled by diameter forests (4 - 6 and 8 mm) on a universal semi-automatic milling machine. Another series of molded holes which have the same diameters as those drilled was obtained by the method of contact molding on a laminated plate of the same material. The objective envisaged in the experimental part is the study of the mechanical behavior of composite materials (laminates) to static stresses by means of four-point bending tests, and to see the different factors which influence the bending strength of the plates. By adopting the factorial method for two cutting factors ( $N$ ,  $V_a$ ), we were able to find answers relating to the quality of the drilled holes. The best quality relative to the best cutting speed ( $N = 1000$  rpm and  $V_f = 16$  mm / min) was confirmed by optical microscopic observations.

**Keywords :** Composite material, Shipbuilding, Assembly, Drilling, experimental design, Delamination, Bending, optical microscope.

## Introduction générale

L'usage des matériaux composites à matrice polymère, en particulier les stratifiés, ne cesse de croître dans les domaines les plus variés qu'il s'agisse de la construction automobile, navale ou aéronautique... Les bonnes propriétés mécaniques spécifiques de ces matériaux permettent en effet un allègement des structures qui est très recherché dans les constructions mécaniques des moyens de transport, mais aussi grâce aux nombreux avantages qu'ils présentent, à savoir, la légèreté, le coût, la résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes, la facilité de mise en œuvre... Ainsi, ils permettent de répondre à des besoins parfois contradictoires que les matériaux classiques ne peuvent satisfaire.

Les matériaux composites ont trouvé des domaines d'applications dans l'industrie, dès lors que la performance technique est primordiale, mais aussi lorsque les qualités intrinsèques de ces matériaux apportent efficacité et efficience, Les matériaux composites sont généralement très hétérogènes et anisotropes. Il faut différencier entre les concepts charges et renforts dans la classification des fibres. Les charges, sous forme d'éléments fragmentés, de poudres ou liquide, modifient une propriété de la matière à laquelle on l'ajoute (par exemple la tenue aux chocs, la résistance aux UV, ...). Les renforts, sous forme de fibres longs, contribuent uniquement à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce dans laquelle ils sont incorporés. Un matériau composite est constitué de différentes phases nommées renforts et matrice.

Lorsque le matériau composite est non endommagé, les renforts et la matrice sont parfaitement liés et il ne peut pas y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases. Les propriétés mécaniques de l'interface entre fibres et matrice sont très importantes dans la réalisation d'une structure composite. En effet, il ne doit y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases de la structure pour obtenir de bonnes caractéristiques mécaniques élastiques [5].

Le développement et l'utilisation des matériaux composites sont toujours soumis aux besoins des utilisateurs (constructeurs). Des matériaux plus performants, plus économiques et durables dans le temps ont souvent des exigences aux quelles doit répondre les matériaux composites.

En raison des hautes exigences des matériaux contemporains, les matériaux composites sont très en vogue. Mais quand on doit percer dans une telle matière, de nombreux problèmes surgissent. La question est de savoir quel est l'outil le plus indiqué et comment éviter d'abîmer le matériau. Un aspect est toujours central : Le

choix de l'outil, la vitesse de coupe et les réglages dépendent de la composition du matériau composite.

Le plan de la rédaction de notre travail est composé de quatre chapitres suivi d'une conclusion générale.

Le 1<sup>er</sup> chapitre est une présentation bibliographique touchant des généralités sur les matériaux composites tels que leurs constituants et leurs architectures ainsi que les différents procédés de mise en œuvre et les domaines d'application des matériaux composites.

Le 2<sup>nd</sup> chapitre est articulé en deux parties : la 1<sup>ère</sup> décrit essentiellement le perçage des matériaux composites par les différentes méthodes couramment employées, les divers matériaux d'outil utilisés pour ce genre de matériaux, ainsi qu'une brève démonstration sur les mécanismes de coupe des composites. La 2<sup>ème</sup> partie est consacrée aux modes d'assemblages utilisés dans la construction navale (par collage et rivetage) et les composites utilisés dans ce secteur.

Le 3<sup>ème</sup> chapitre de ce travail porte sur la caractérisation et la quantification des défauts de perçage liés au perçage des stratifiés, il s'agira dans un premier temps de répertorier dans la littérature l'ensemble des défauts spécifiques liés au perçage des structures en composites et de les classer, de les quantifier dans un second temps, afin de comprendre leurs mécanismes d'apparition.

Dans le 4<sup>ème</sup> chapitre nous présentons une étude expérimentale sur les plaques Composites munies de trous circulaires, les plaques en matériaux composites élaborés en matrice polyester insaturé renforcés par des fibres de verre sont conçues par le procédé de moulage au contact. Par la suite, des opérations de perçage ont été réalisées afin de voir l'influence des conditions de coupe sur la qualité des trous. Des éprouvettes trouées (moulée) ont été préparées pour la caractérisation statique du matériau en mettant en lumière leur comportement mécanique par le biais des essais de flexion 4 points et la manière dont ils sont influencés par la présence de ces trous centrés.

Une conclusion générale sur les principaux aspects abordés dans cette étude et les résultats obtenus ainsi que des perspectives proposées dans ce domaine termineront ce travail.

## **I.1 Introduction**

Les matériaux composites sont de plus en plus prisés dans l'industrie. Ces matériaux novateurs présentent une bonne stabilité chimique et de très bonnes propriétés mécaniques tout en ayant une faible densité. C'est par leur capacité à permettre l'obtention de structures plus légères, que ces matériaux ont développé leur popularité. En effet, un gain de poids mène à de meilleures performances et à des réductions énergétiques considérables et indispensables aux enjeux économiques et écologiques actuels.

Les matériaux composites sont aujourd'hui principalement utilisés industriellement pour différentes raisons :

- Excellent rapport masse-rigidité et résistance en comparaison des matériaux métalliques.
- Définition du matériau au besoin exact, c'est-à-dire présentant des propriétés élevées uniquement dans les axes de sollicitation afin d'effectuer des gains de masse supplémentaires.
- Dimensionnement de structure ayant des propriétés particulières, telles que des matériaux à très faibles coefficients de dilatation thermique.
- Utilisation de matériaux multifonctionnels ayant des fonctions structurales, mais également autres telles que de bonnes propriétés acoustiques, transparence aux ondes électroniques et bonne résistance.
- Sensibilité nettement moindre à la fatigue que pour les matériaux métalliques.

## **I.2 Définition des matériaux composites**

Par définition un matériau composite peut être définie d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux non miscibles (mais ayant une forte capacité d'adhésion) et de natures différentes, mais se complétant et permettant d'obtenir un matériau dont les performances globales sont améliorées. On appelle de façon courante « matériaux composites » des arrangements de fibres qui sont noyés dans une matrice.

La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces. Les renforts quant à eux se présentent sous forme de fibres continues ou discontinues, leur rôle étant d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts, et conférant à la matrice des propriétés qu'elle ne possède pas seule. L'arrangement des fibres, leur orientation permet de renforcer les propriétés mécaniques de la structure [1].

Il existe aujourd'hui trois grandes familles de matériaux composites que l'on classe généralement en trois familles en fonction de la nature de la matrice [4] :

- Les composites à matrice organique (CMO) qui constituent, de loin les volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle ;
- Les composites à matrice céramique (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme dans les domaines spatial, nucléaire et militaire, ainsi que le freinage ;
- Les composites à matrice métallique (CMM) intéressent les concepteurs des industries automobiles, électronique et de loisirs pour répondre à des exigences mécaniques spécifiques.

### I.3 Les constituants du matériau composite

En général les constituants principaux d'un matériau composite sont : la matrice, le renfort et l'interface. Dans certains cas, des charges et des additifs peuvent être utilisés. Le renfort est une sorte de squelette, qui assure la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité). Il est de nature filamentaire dans notre cas mais il pourrait être de nature particulaire. La matrice est composée d'une résine thermodurcissable ou thermoplastique. Elle lie les renforts, les protège contre les agressions extérieures et donne la forme au produit réalisé.

L'interface assure la compatibilité renfort-matrice, transfère les efforts de la matrice au renfort et doit être adaptée aux propriétés visées à l'aide d'un ensimage. Les "charges" qui sont des ajouts appropriés servent à diminuer les coûts ; elles confèrent aussi aux matériaux des propriétés particulières ou complémentaires [2].

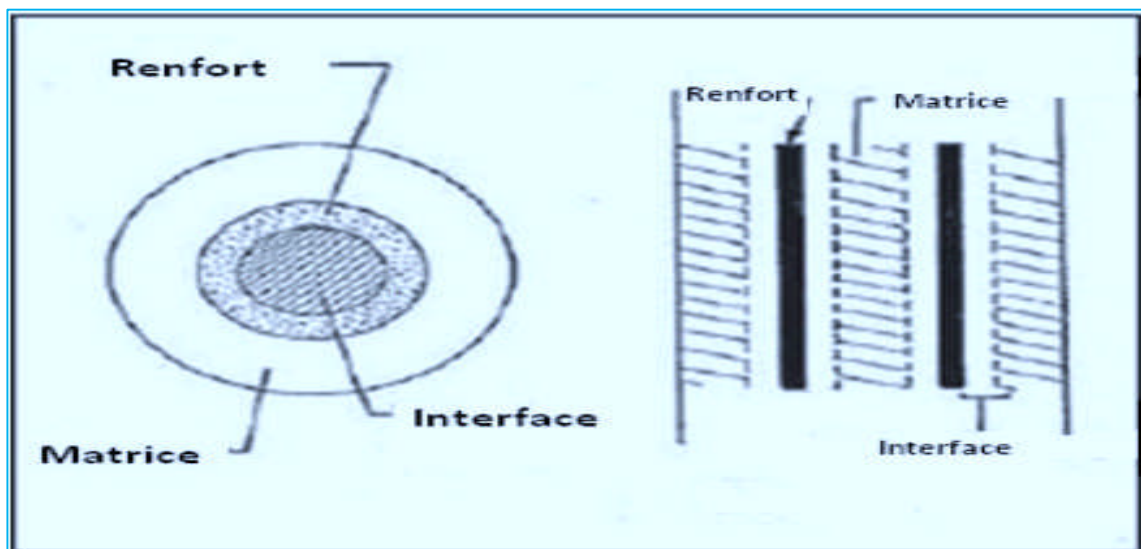


Figure I.1 : Représentation schématique d'éléments d'un matériau composite

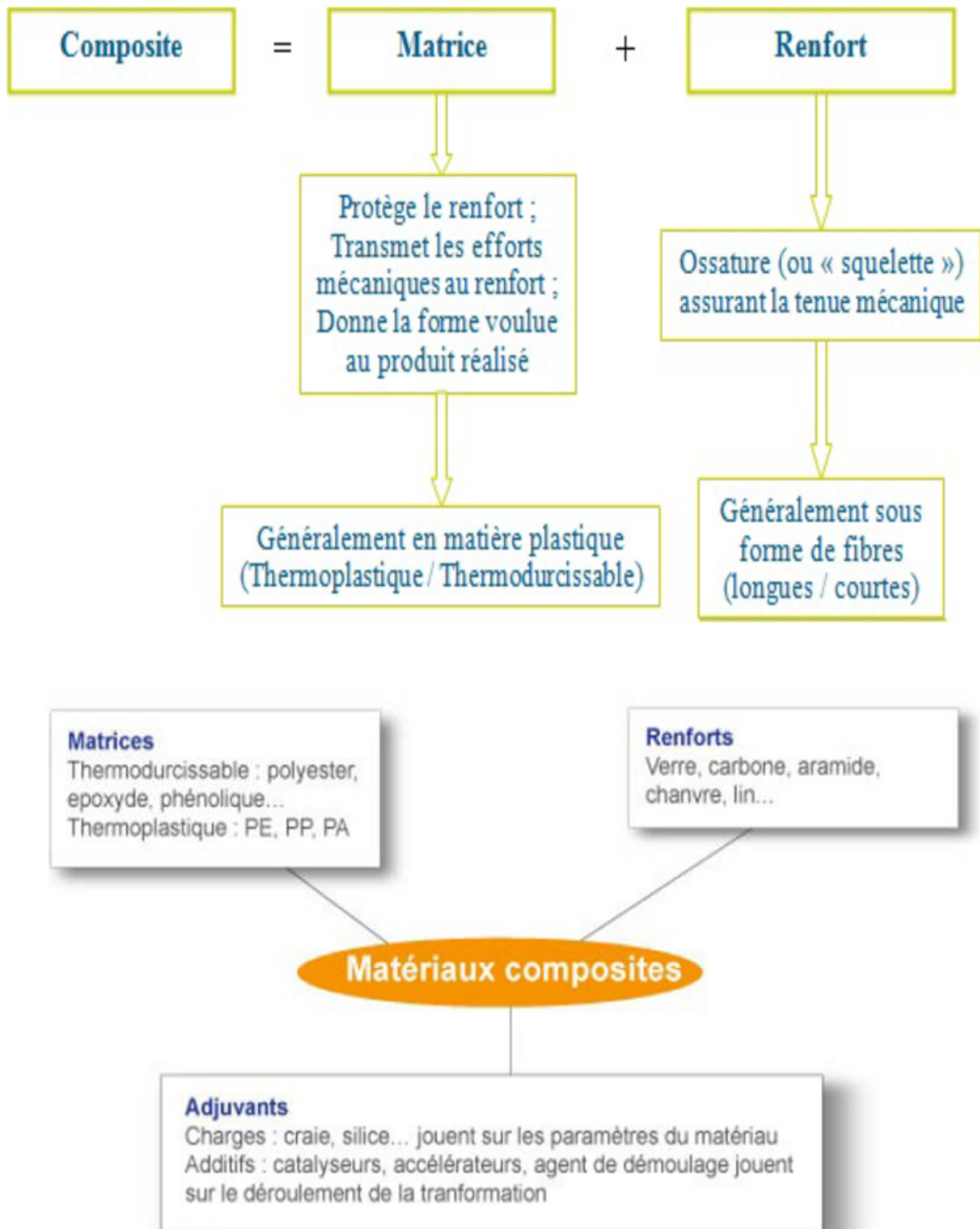
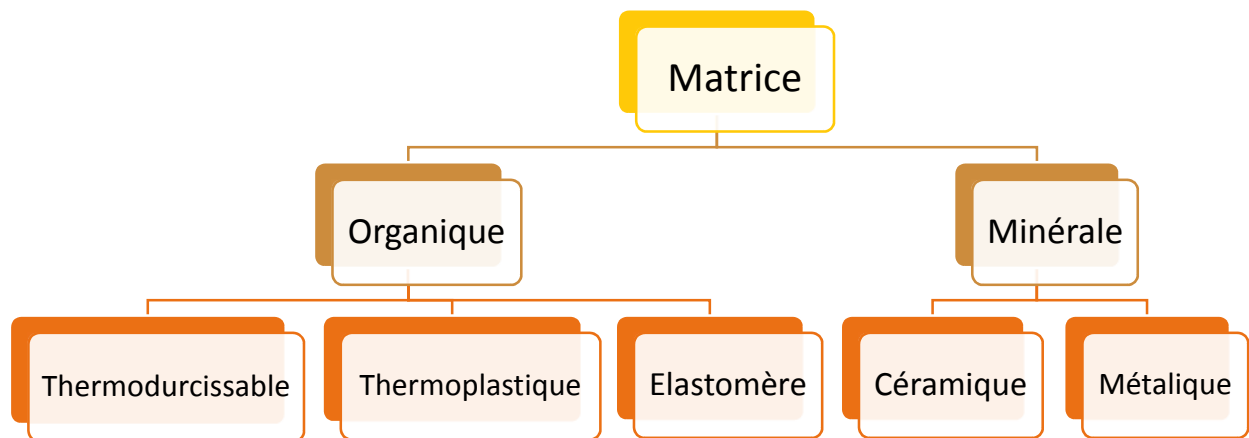


Figure I.2 : Constituants du matériau composite

### I.3.1 Les différentes matrices

La matrice est l'élément qui lie et maintient les fibres, elle répartit les efforts (résistance à la compression ou à la flexion), assure la protection chimique des fibres et donne la forme désirée au produit final.

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



**Figure I.3 :** Différentes familles de matrice.

Les résines les plus employées dans les matériaux composites sont les résines TD « thermodurcissables » et les résines TP « thermoplastiques ». IL y a aussi les élastomères, qui sont utilisés parfois dans l'industrie automobile.

Matrices	Thermodurcissable	Thermoplastique
Etat de base	Liquide visqueux à polymériser	Solide prêt à l'emploi
Stockage	Réduit	Illimité
Mouillabilité des renforts	Aisée	Difficile
Moulage	Chauffage continu	Chauffage + refroidissement
Cycle	Long (polymérisation)	Court
Tenue au choc	Limitée	Assez bonne
Tenue thermique	Meilleure	Réduite (sauf nouveau TP)
Chutes et déchets	Perdus ou utilisés en charges	Recyclables
Conditions de travail	Emanations de solvants	Propreté

**Tableau I.1 :** Les critères essentiels des matrices thermoplastiques et thermodurcissables [13].

### I.3.1.1 Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables présentent et possèdent la propriété de passer de façon irréversible d'un état liquide à un état solide. Elles ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible [7].

Les résines thermodurcissables (**TD**) qui sont, en général, associées avec des fibres longues. Les polymères thermodurcissables ont la forme d'un réseau tridimensionnel ; au cours de la polymérisation, ce réseau se fond (double liaison de polymérisation) et durcit de façon définitive lors du chauffage selon la forme souhaitée. La transformation est irréversible [3].

Matrices TD	Masse volumique (kg.m <sup>-3</sup> )	Module d'élasticité longitudinal (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique °C <sup>-1</sup>
	M <sub>v</sub>	E	G	k	C <sub>r</sub>	A	α
Epoxyde	1 200	4 500	1 600	0,4	130	2	11*10 <sup>-5</sup>
Phénolique	1 300	3 000	1 100	0,4	70	2,5	1*10 <sup>-5</sup>
Polyester	1 200	4 000	1 400	0,4	80	2,5	8*10 <sup>-5</sup>
Polycarbonate	1 200	2 400		0,35	60		6*10 <sup>-5</sup>
Vinylester	1 150	3 300			75	4	5*10 <sup>-5</sup>
silicone	1 100	2 200		0,5	35		
Uréthanne	1 100	700 à 7 000			30	100	
Polyimide	1 400	4 000 à 19 000	1 100	0.35	70	1	8*10 <sup>-5</sup>

**Tableau I.2 :** Caractéristiques des matrices thermodurcissables [2]

### I.3.1.2 Résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques présentent la propriété de passer de façon réversible de l'état solide à l'état pâteux. La mise en œuvre rapide est possible par thermoformage. Elles présentent la possibilité de soudage et de recyclage du fait de la réversibilité [7]. On cite les exemples suivants :

- ✓ Polypropylène (**PP**).
- ✓ Polysulfure de phénylène (**PPS**)
- ✓ Polycarbonate polyamide (**PA**).
- ✓ Polyéther-sulfone (**PES**)
- ✓ Polyéther-imide (**PEI**)
- ✓ Polyéther-éther-cétone (**PEEK**)

L'emploi des polymères thermoplastiques (**TP**), renforcés avec des fibres courtes (et, prochainement, avec des fibres longues) se développe fortement. Les polymères thermoplastiques ont une structure linéaire ; ils sont mis en forme par chauffage (les chaînes se plient), et durcissent au cours du refroidissement (les chaînes se bloquent). La transformation est réversible [3].

Matrices TP	Masse volumique (kg.m <sup>-3</sup> )	Module d'élasticité longitudinal (Mpa)	Module de cisaillement (Mpa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique °C <sup>-1</sup>
	Mv	E	G	k	C <sub>r</sub>	A	α
PP	900	1 200		0.4	30	20 à 400	9*10 <sup>-5</sup>
PPS	1 300	4 000			65	100	5*10 <sup>-5</sup>
PA	1 100	2 000		0.35	70	200	8*10 <sup>-5</sup>
PES	1 350	3 000			85	60	6*10 <sup>-5</sup>
PEI	1 150	3 300			105	60	6*10 <sup>-5</sup>
PEEK	1 300	4 000			90	50	5*10 <sup>-5</sup>

**Tableau I.3** : Caractéristiques des matrices thermoplastiques [2]

Dans le cadre de notre travail nous nous sommes intéressés aux composites à base de résine « polyester insaturé ».

#### ❖ Définition du polyester insaturé [2]

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

La réaction est exothermique et la température de la résine augmente progressivement depuis le gel jusqu'à un maximum pour redescendre ensuite lentement à la température ambiante.

Le durcissement sera d'autant plus rapide ou, si l'on préfère, le temps nécessaire dans le moule sera d'autant plus court que la courbe de température en fonction du temps se rapprochera davantage de la verticale.

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

- Orthophtalique : la plus courante ;
- Isophtalique : qui donne une meilleure tenue à l'humidité ;
- Chlorée : apportant une auto extingüibilité ;
- Bisphénol : possédant de bonnes caractéristiques chimiques et thermiques.

Matrice	$\rho$ Kg/m <sup>3</sup>	E MPa	G MPa	N	$\sigma$ MPa	A%	$\alpha \cdot 10^{-5}$ °C <sup>-1</sup>	Tmax °C
<b>Polyester Insaturé</b>	1200	4000	1400	0.4	80	2.5	8	60 à 200

**Tableau I.4 :** Caractéristiques de la matrice Polyester insaturé

#### ❖ Avantages

- ✓ Bonne accroche sur fibres de verre
- ✓ Bonne résistance chimique
- ✓ Mise en œuvre facile
- ✓ Tenue en température (> 150 °C)
- ✓ Translucidité
- ✓ Prix réduit

#### ❖ Inconvénients

- ✓ Inflammabilité (sauf résines chlorées)
- ✓ Tenue vapeur et eau bouillante
- ✓ Retrait important (6 à 15 %)
- ✓ Durée de conservation en pot limitée
- ✓ Emission de styrène

### I.3.2 Les différentes fibres (renforts)

Les renforts confèrent aux matériaux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc. Ces renforts permettent également d'améliorer certaines propriétés physiques : comportement thermique, tenue en température, tenue au feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, etc. Les caractéristiques recherchées pour les renforts sont : des caractéristiques mécaniques élevées, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec les résines, une bonne facilitée de mise en œuvre, un faible coût...

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

- Sous forme linéique (fils, mèches, etc.),
- Sous forme de tissus surfaciques (tissus simples, mats, etc.),
- Sous forme multidirectionnelle (tresses, tissus complexes, etc.).

Les renforts peuvent être d'origine minérale (verre, bore, céramique...) ou organique (carbone ou aramide). Les plus employées sont les fibres de verre. Les fibres de carbone sont privilégiées [6].

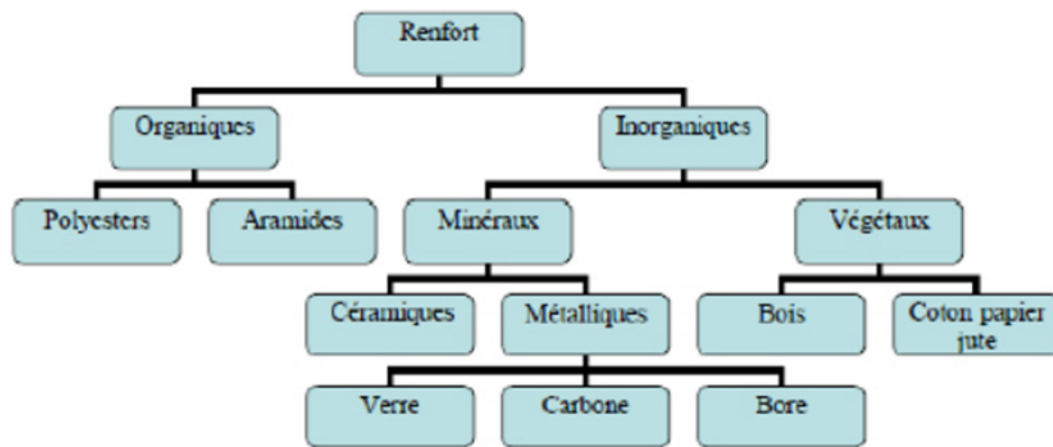


Figure I.4 : Diverses formes et origines de renforts

### I.3.2.1 Les principaux renforts

On peut distinguer cinq classes de fibres à savoir : (i) les fibres de carbone, (ii) les fibres de verre, (iii) les fibres d'aramide, (iv) les fibres céramiques et (v) les fibres végétales. Dans ce présent travail nous avons utilisé les fibres de verre plus précisément de Type « E » qui sont les plus employées.



Figure I.5 : Bobine de fibre de verre

#### ❖ Les fibres de verre

Elle constitue le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). On distingue trois types de fibres [2] :

- Verre E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes.
- Verre R : pour les composites à hautes performances.
- Verre R : pour la fabrication des circuits imprimés (propriété diélectrique).

#### ❖ Elaboration

Les fibres de verre sont élaborées par fibrage du verre fondu à travers des filières, sortes de bacs réalisés en alliage, et percés à leurs bases d'orifices calibrés d'environ 2mm de diamètre. Le verre fondu est maintenu dans les filières chauffées aux environs de 1250°C. A cette température, la viscosité du verre permet un écoulement par gravitation à travers les orifices, sous forme de fibres de quelques dixièmes de millimètres. A la sortie de la filière, le verre en phase plastique est simultanément étiré à grande vitesse et refroidi. Les conditions de refroidissement et de vitesse d'étirage permettent d'obtenir, soit des filaments continus, soit des fibres discontinues.

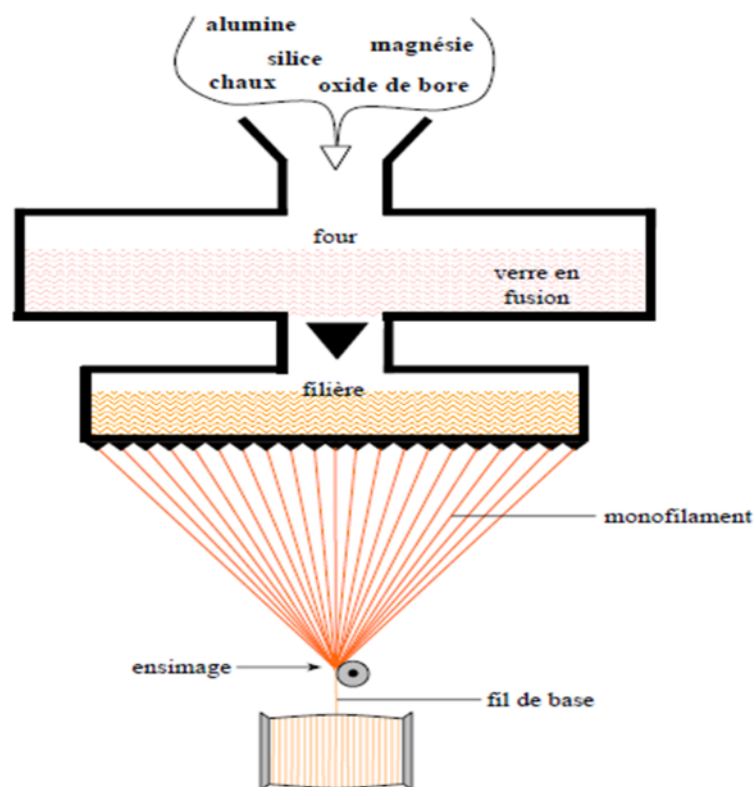


Figure I.6 : Procédé d'élaboration des fibres de verre [1]

L'étirage représente l'étape la plus importante du procédé, elle permet d'abord aux fibres d'atteindre leur diamètre final (de quelques microns), mais surtout d'augmenter la résistance. En effet, c'est l'étirage qui permet au verre d'être plus

résistant que dans sa forme massive, notamment en orientant les défauts le long de la fibre [8]. Il existe deux procédés d'étirage : l'un mécanique et l'autre pneumatique.

➤ **Etirage mécanique**

A la sortie de la filière, les fibres sont étirées par un procédé mécanique. Les mono filaments sont assemblés parallèlement sans torsion, sous forme de fils de base dénommés sillonnes. Ces fils de base sont les plus utilisés comme renforts de verre dans les matériaux composites.

➤ **Etirage pneumatique**

Dans ce procédé, les fibres de verre sont étirées par un système d'aspiration à travers un tambour perforé. Les fibres obtenues, discontinues et de longueur allant de 5 à 80 mm, sont ensuite assemblées parallèlement en un ruban appelé "verranne". Les fibres verranne se distinguent des fibres sillonnes par un aspect pelucheux.

❖ **Ensimage**

Les filaments de verre issus de la filière ne peuvent pas être utilisés directement pour diverses raisons :

- L'absence de cohésion entre les filaments qui s'opposent à la constitution de fils
- La sensibilité du verre à l'abrasion.
- La sensibilité à l'attaque à l'eau.
- La création de charges électrostatiques consécutive aux divers frottements.

Pour pallier à ces défauts, on réalise à la sortie de la filière, une opération dite "ensimage", qui consiste à déposer à la surface des filaments de verre, un produit d'ensimage de composition complexe. A la lumière des défauts évoqués ci-avant, les diverses fonctions essentielles de l'ensimage sont :

- Etablir une cohésion certaine entre les filaments.
- Donner une raideur assez grande aux fils.
- Protéger les filaments contre l'abrasion.
- Eviter l'apparition de charges électrostatiques.
- Faciliter l'imprégnation des filaments par la résine.
- Favoriser la liaison verre-résine dont dépendent les performances mécaniques du composite, mais également son comportement vis-à-vis du vieillissement, de la sensibilité à l'humidité et à la corrosion, etc...

### ❖ Caractéristiques

Les caractéristiques mécaniques des fibres de verre décrites ci-dessus sont résumées dans le Tableau I-5.

Caractéristiques	Type E	Type D	Type C	Type R	Type S
Contrainte à la Rupture (MPa)	3500	2450	2800	4650	4650
Module D'Young (GPa)	73,5	52,5	70	86,5	86,5
Allongement à La rupture (%)	4,5	4,5	4	5,3	5,3

**Tableau I.5 :** caractéristique mécaniques des fibres de verre [2].

Le verre-E est le plus utilisé, notamment pour son faible coût, alors que le verre-R est plus cher, mais donne de meilleures propriétés mécaniques, thermiques et chimiques. D'autres types de verres sont également disponibles proposant des propriétés spécifiques à des applications particulières [9]. Les GFRP (polymère renforcé de fibre de verre) sont appréciés dans de nombreux secteurs. En effet, ces fibres s'adaptent à de nombreux procédés et permettent la fabrication de pièces structurelles à moindre coût, tout en proposant de bonnes propriétés mécaniques et une bonne stabilité chimique telle qu'une excellente résistance à l'oxydation. Les GFRP sont notamment utilisés dans des applications tels que l'éolien, l'automobile ou encore la construction navale [9][11].

#### Avantages :

- ✓ Excellente adhérence entre fibres et résines (matrices).
- ✓ Des propriétés d'isolation électrique acceptables pour la plupart des applications.
- ✓ Bon rapport de performances mécanique/prix.
- ✓ Faible dilatation thermique.
- ✓ Tenue en température élevé.

#### Limite :

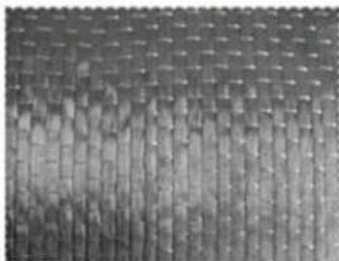
- ✓ Une rigidité insuffisante pour certaines applications comme les pièces de structure primaire en aéronautique.
- ✓ Un vieillissement accéléré au contact prolongé de l'eau, des rayonnements UV ou de températures élevées.

### ❖ Les fibres de carbone

La fibre de carbone est la seconde fibre la plus utilisée après le verre. En effet, celle-ci présente une résistance et une raideur extrêmement élevée tout en ayant une faible densité. Ses propriétés mécaniques hors-normes en font une fibre largement employée dans les secteurs d'activités nécessitant des matériaux hautes performances, tel que dans l'aéronautique, les sports et les loisirs [10]. La forte résistance de ces fibres s'explique notamment par les liaisons covalentes carbone-carbone qui la composent, cette liaison étant l'une des plus fortes connue.

Deux précurseurs sont principalement utilisés pour la fabrication de fibre de carbone, le PAN (poly acrylonitrile) et le brai de mésophase (un résidu de l'industrie pétrolière). Les fibres de carbone ex-PAN sont néanmoins les plus courantes, celles-ci sont plus faciles à produire et de meilleure qualité [11]. Ces fibres sont utilisées en tant que carbone pour les propriétés de cet élément en tant que fibre flexible et qui convient à toutes les formes de produits finis [12]. Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

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



(a)



(b)



(c)

**Figure I.7** : Fibres longues de carbone : (a) en rouleaux unidirectionnels, (b) en bobines de fils (on distingue les fibres à l'extrémité du fil ; image de l'IFE) ; (c) en rouleaux de tissu 2D équilibré (image de Dexia Composite).

#### Avantage :

- ✓ Bonne propriété mécanique.
- ✓ Dilatation thermique très faible.
- ✓ Faible densité.

#### Limites :

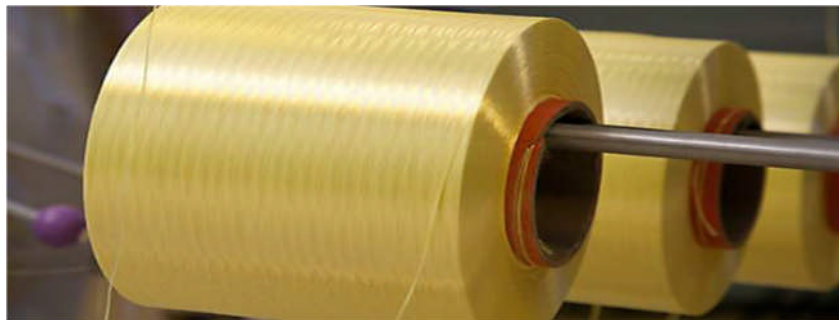
- ✓ Adhésion difficile avec les matrices.

- ✓ Fragilité au choc.
- ✓ Prix très élevé.

#### ❖ Les fibres d'aramide :

Les plus connues sont les fibres issues de la chimie des polyamides aromatiques, connues sous la marque commerciale de "Kevlar". Le comportement des fibres aramides est semblable à celui des métaux car sous faible charge elles sont élastiques et deviennent plastiques quand elles sont soumises à de fortes contraintes. Elles constituent un bon compromis entre les fibres de carbone et celles à base de verre. Les fibres aramides ont une bonne tenue au feu. Par contre, lors de leur renforcement des composites, on observe une faible résistance à la compression et à la flexion, du fait d'une mauvaise adhérence avec les résines.

Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes : les fibres basse module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles ; les fibres haute module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances.



**Figure I.8 :** Bobine de fibre d'aramide.

#### Avantages :

- ✓ Bonne résistance spécifique à la traction.
- ✓ Dilatation thermique nulle.
- ✓ Absorption des vibrations et des chocs.
- ✓ Bonne inertie chimique vis-à-vis des carburants.
- ✓ Faible densité.

#### Limites :

- ✓ Tenue limitée en compression.
- ✓ Reprise d'humidité importante.
- ✓ Prix élevé.
- ✓ Adhésion difficile avec les résines.

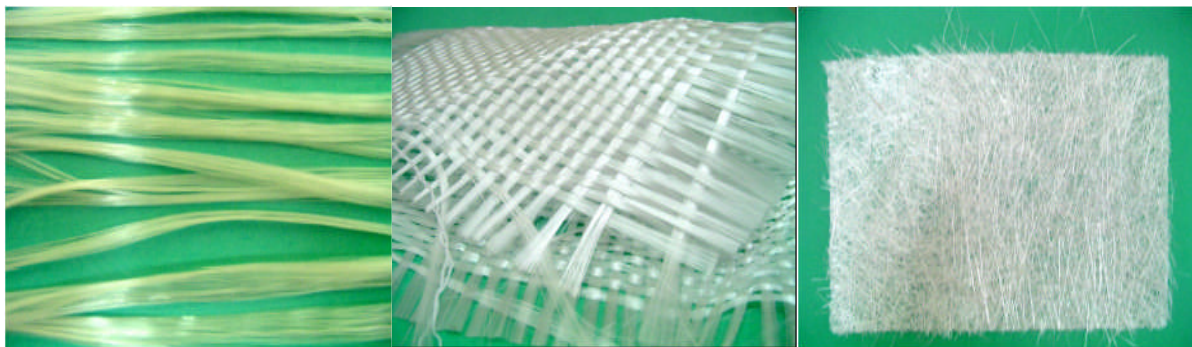
### ❖ Les Fibres céramiques :

Les matériaux composites en céramique sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont fabriquées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fils support. Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée entre 500 °C et 2000 °C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs d'avion [5]. Les types de fibres céramiques sont :

- Les fibres de carbure de silicium.
- Les fibres de Bore.
- Les fibres de Bore carbure de silicium.

#### I.3.2.2 Différentes formes de fibres [13]

Il existe différentes architectures des fibres à savoir : (i) Renfort dispersé (mat) ; (ii) Tissus (taffetas) ; (iii) Renfort unidirectionnel ; (iv) Pli ; (v) couche ; ...etc. Dans le cadre de notre travail, nous avons utilisé les mats et le taffetas.



**Figure I.9 :** Différentes architectures des fibres de verre (documentation Ahlstrom)

### I.3.3 Les charges et les additifs

#### I.3.3.1 Les charges :

Les composites peuvent être renforcés par un autre matériau se présentant sous forme de fines particules, ce sont les charges. Elles ont pour but de modifier les caractéristiques du produit : dureté superficielle, résistance à la contrainte en flexion ou en choc ou encore diminution du pouvoir calorifique, amélioration du comportement au feu et souvent baisse de prix de revient. Les plus employées sont le carbone de calcium pulvérulent (craie broyée), le kaolin, la silice, le mica, l'hydrate d'alumine et les microbilles de verre.

### I.3.3.2 Les additifs :

Un des additifs de grande importance est l'agent d'interface qui assure la cohésion et l'adhérence entre les différents constituants. Cet agent est en générale déposé sur les fibres de renfort (ensimage du verre) ou sur les charges (carbonate de calcium enrobé). Les additifs se trouvent en faible quantité et interviennent comme [3] :

- ✓ Lubrifiants et agents de démoulage,
- ✓ Pigments et colorants,
- ✓ Agents anti-retrait,
- ✓ Agents anti-ultraviolets.

### I.3.4 Adhésion renforts / matrice

Le choix des constituants ne peut se résumer à prendre la « meilleure » matrice et la « meilleure » fibre. Il est nécessaire que l'adhésion entre les fibres et la matrice soit de qualité suffisante pour que les propriétés du matériau composite obtenu soient supérieures à celles de ses constituants. On notera que les fibres de carbone présentent une bonne adhésion avec les matrices époxy suite à un traitement oxygène. Les fibres d'aramide, chimiquement inertes, s'associent difficilement avec les matrices organiques. Enfin, les fibres de verre, après humidification, présentent une tenue inter faciale intéressante avec toutes les matrices organiques.

D'un point de vue physico-chimique, l'adhésion entre les fibres (carbone ou verre) et la matrice (époxy) est généralement due à des liaisons covalentes (mécanisme de liaison le plus tenace).

#### ❖ Principales combinaisons de résines et de renforts [3]

Le tableau ci-dessous présente une synthèse des combinaisons matrices/renfort les plus couramment utilisées donnant lieu à des composites **HP** «hautes performances» ou à des composite **GD** « grande diffusion ».

On notera que les composites (**HP**) se distinguent essentiellement des composites (**GD**) par leurs meilleures propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la traction) et, corollairement, par leur coût plus élevé.

Résines		Fibres de renfort				
		Verre E	Verre D	Verre R	Carbone	Aramide
<b>Thermodurcissables</b> <b>TD</b>	Polyesters	GD	GD			
	Phénoliques	GD				
	Polyuréthannes	GD				
	Epoxy		HP	HP	HP	HP
<b>Thermodurcissables</b> <b>TP</b>	Polypropylènes	GD				
	PA 6 et 6-6	GD		HP		
	PA 12, PEEK			HP	HP	HP

Tableau I.6 : Synthèse d'utilisation des résines et renforts

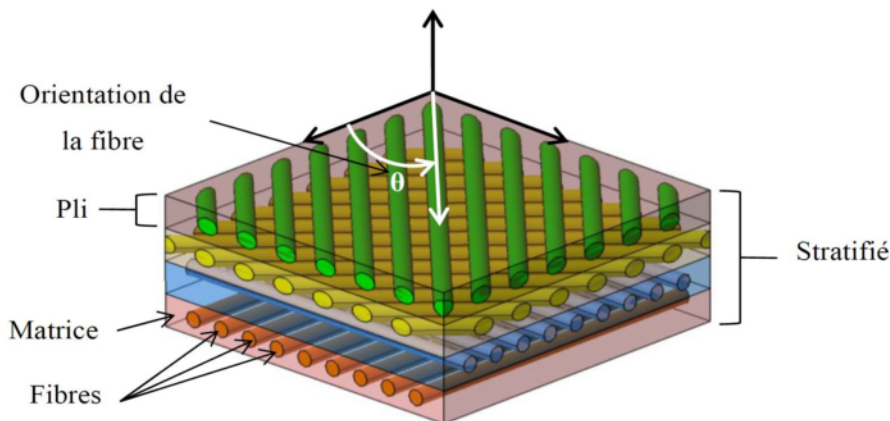
**I.4 Architecture des matériaux composites**

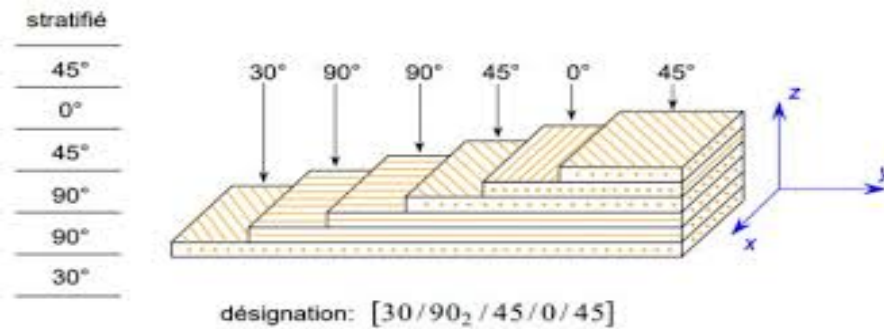
L'ensemble des procédés de mise en œuvre montre la prépondérance de la conception des pièces en matériaux composites :

- Par surface : plaques, coques.
- Par stratification de couches successives.

**I.4.1 Les stratifiés à base de tissus unidirectionnels**

La stratification est une autre structure fréquemment rencontrée dans les pièces composites. Dans un stratifié, les fibres sont agencées en couches fines en quelques dixièmes de millimètre nommées plis (de fils ou de tissus unidirectionnels) dont la direction est décalée dans chaque couche, qui sont empilées les unes sur les autres ; après la mise en forme, ces couches seront liées entre elles par l'intermédiaire de la matrice.





**Figure I.10** : Exemple du plan du drapage d'un composite stratifié.

On distingue différents types de stratifiés [14] :

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

❖ **La loi de mélange pour les composites stratifiés :**

Les déformations des matériaux homogènes et isotropiques peuvent être décrites assez simplement à l'aide des modules d'élasticité et des contraintes de déformation, qui sont les propriétés de base des matériaux bruts. Dans le cas des composites, chaque élément joue un rôle différent et c'est l'association de ces propriétés qui confère au matériau final ses caractéristiques propres. Bien que ces caractéristiques finales soient le résultat d'interactions complexes entre le renfort et la matrice, il est possible d'en donner une estimation simple à l'aide de la Loi des Mélanges [8] appliquée aux composites stratifiés :

$$P_c = \rho_c * V_c = \rho_f * V_f + \rho_m * V_m \quad \text{où} \quad V_f + V_m = 1$$

Avec :

- ✓  $V_f$  = fraction volumique de fibres
- ✓  $V_m$  = fraction volumique de matrice
- ✓  $V_c$  = fraction volumique du composite
- ✓  $P_c$  = poids estimé du composite
- ✓  $\rho_f$  = masse volumique de la fibre
- ✓  $\rho_m$  = masse volumique de la matrice
- ✓  $\rho_c$  = masse volumique du composite

Il s'agit de valeurs théoriques, en réalité la présence de vides fait que  $V_f + V_m \leq 1$ . Par exemple, le module d'élasticité en traction peut être estimé en se basant sur les modules respectifs de la fibre et de la matrice.

$$E_{c,t} = E_{f,t} * V_f + E_{m,t} * V_m$$

Avec :

$E_{c,t}$  = module d'élasticité en traction estimé du composite

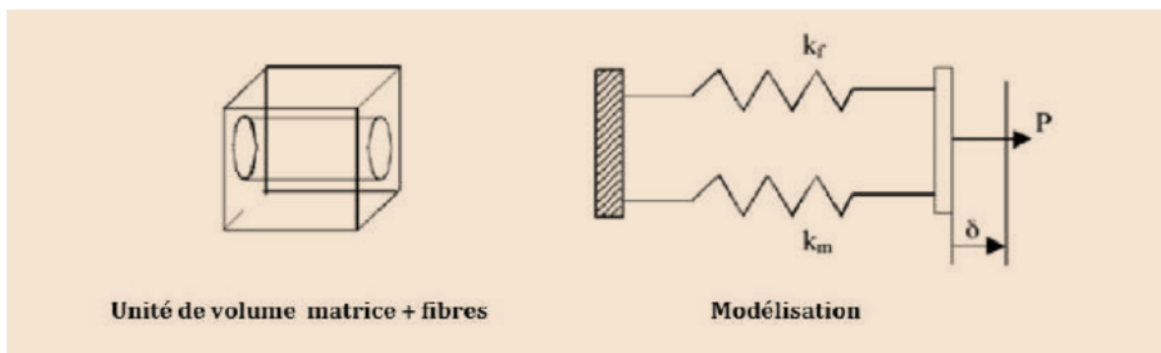
$E_{f,t}$  = module d'élasticité en traction de la fibre

$E_{m,t}$  = module d'élasticité en traction de la matrice

$V_f$  = fraction volumique de fibres

$V_m$  = fraction volumique de la matrice

Cette équation peut être modélisée par un système de ressorts associés en parallèle



**Figure I.11 :** Modélisation par un système de ressorts des propriétés en traction d'un composite stratifié.

Dans le cas du module d'élasticité en flexion, le modèle correspond à une association en série des ressorts (Figure I.12). L'équation correspondante serait alors :

$$E_{c,f} = \frac{E_{f,f} * E_{m,f}}{E_{f,f} * V_m + E_{m,f} * V_f}$$

Avec :

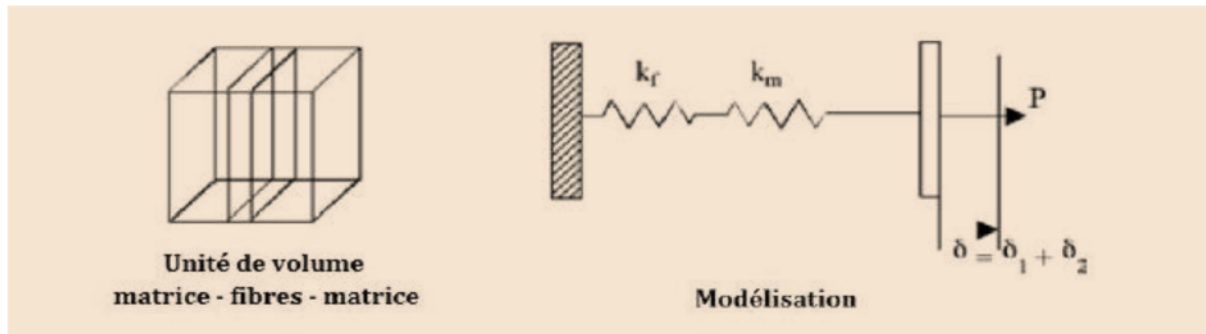
$E_{c,f}$  = module d'élasticité en flexion estimé du composite

$E_{f,f}$  = module d'élasticité en flexion de la fibre

$E_{m,f}$  = module d'élasticité en flexion de la matrice

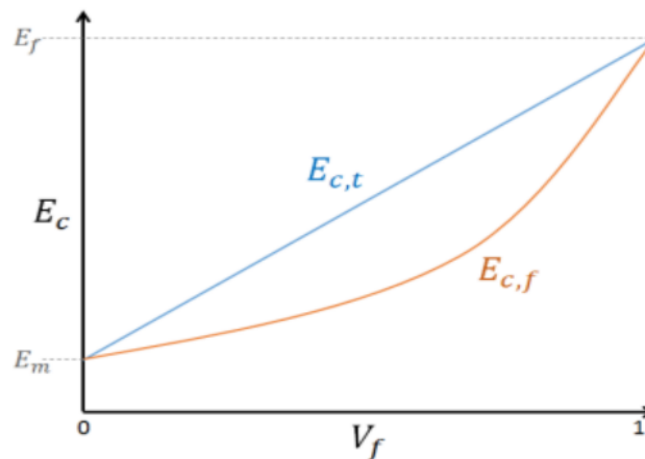
$V_f$  = fraction volumique de fibres

$V_m$  = fraction volumique de la matrice



**Figure I.12** : Modélisation par un système de ressorts des propriétés en flexion d'un composite stratifié

Ces deux équations permettent de déterminer les bornes supérieure ( $E_{c,t}$ ) et inférieure ( $E_{c,f}$ ) au module d'élasticité du composite, modélisées respectivement par une courbe linéaire et par une hyperbole. Le module réel du composite se situe alors entre ces deux courbes.



**Figure I.13** : Modélisation des bornes d'après la Loi des Mélanges.

#### I.4.2 Composites sandwichs

Les pièces composites tissées ou stratifiées sont généralement minces. Par conséquent, elles ne résistent efficacement qu'aux sollicitations en membrane, c'est-à-dire dans leur plan, et résistent mal aux sollicitations hors plan telle que flexion et torsion. Pour concevoir des pièces rigides en flexion et en torsion, une technique couramment employée est celle des structures en sandwich, constituées de deux peaux généralement stratifiées collées sur une âme épaisse, mais légère, comme une mousse de polymères ou un nid d'abeilles, à l'aide d'adhésifs (Figure I.14).

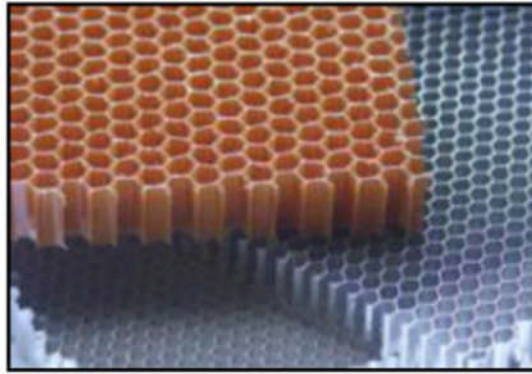


Figure I.14 : Nid d'abeilles.

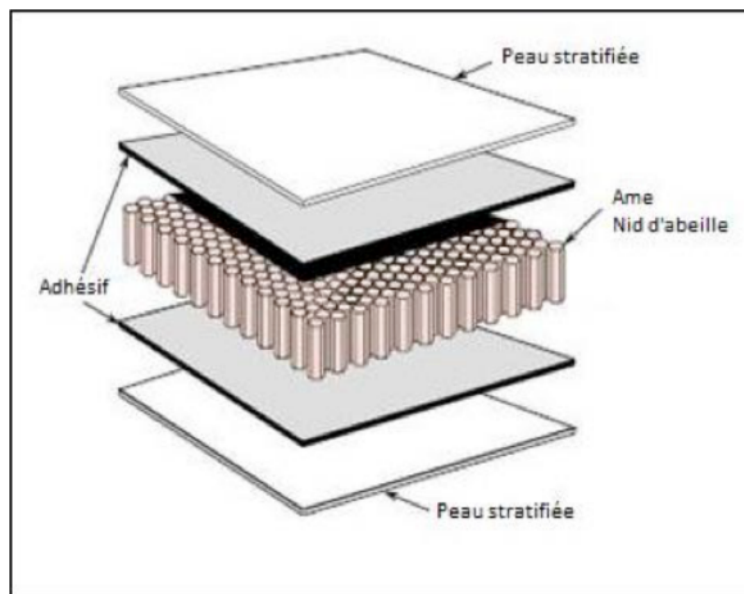


Figure I.15 : structure de sandwich.

L'intérêt de cette disposition est encore une fois de mettre la matière là où elle est nécessaire, lorsqu'un tel sandwich est sollicité en torsion ou en flexion, les peaux travaillent essentiellement en membrane, tandis que l'âme travaille essentiellement en cisaillement hors plan et à des niveaux de contrainte bien plus faibles.

### I.5 Procédé de mise en œuvre

Les techniques de fabrication jouent un rôle considérable dans les composites car chacune des opérations influe de manière irréversible sur le produit fini. De nombreuses méthodes de fabrication ont été développées pour répondre aux besoins, et leurs choix dépendent surtout des caractéristiques mécaniques et de la géométrie du produit, et l'importance des séries. Il existe plusieurs techniques de mise en œuvre à savoir [15] :

- Technologies manuelles de transformation
- Procédés de transformation par moulage

- Procédé de transformation en continu
- Procédés de fabrication des formes de révolution

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

### I.5.1 Les technologies dites en moule ouvert :

#### I.5.1.1 Moulage au contact

Le moulage au contact est l'un des premiers procédés historiquement utilisés, le procédé est manuel, il consiste à nettoyer d'abord le moule avec une cire qui sert d'un agent de démoulage puis passer une fine couche de résine de surface colorée dénommée gel-coat et laisser le tous à température ambiante pendant une certaine durée. Ensuite on dépose successivement le renfort et la couche de résine sur un moule ouvert. À chaque pli déposé, le renfort est imprégné de la résine à l'aide d'un rouleau ou d'un pinceau, L'ensemble est maintenu dans cet état jusqu' à la fin de la gélification, on procède au démoulage une fois la polymérisation terminée. Il ne requiert que peu d'équipement, convient à toutes tailles de pièces et est couramment employé pour de petites séries. Toutefois, la qualité et la répétabilité permises par cette méthode sont très dépendantes du facteur humain [15].

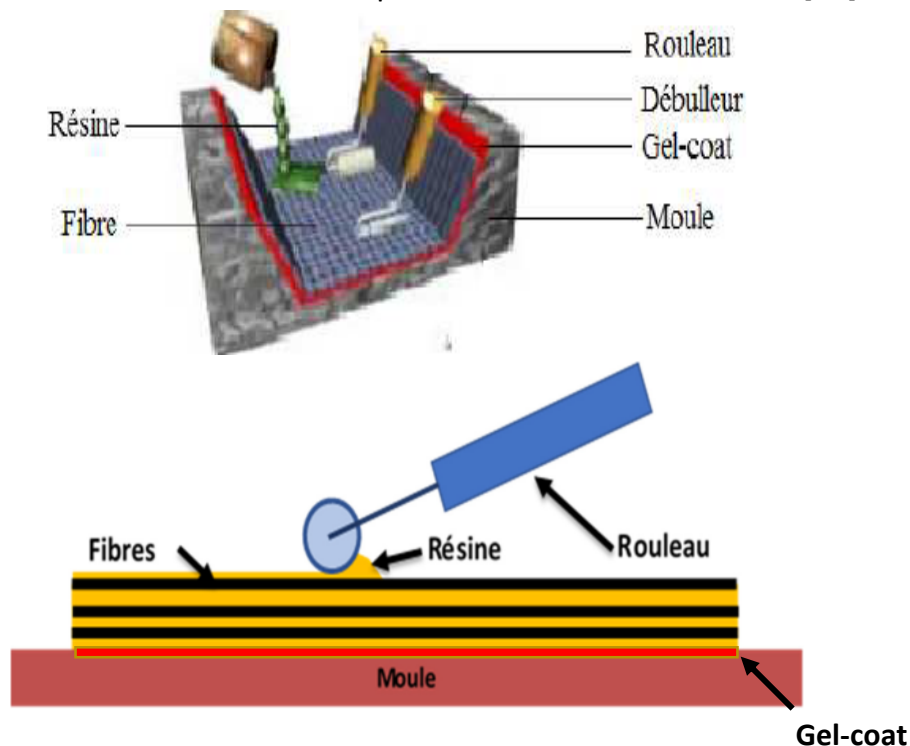


Figure I.16 : Principe du moulage au contact

**Avantage :**

- ✓ Très larges possibilités de forme
- ✓ Pas de limites dimensionnelles
- ✓ Une surface lisse gelotée (aspect, tenue à la corrosion)
- ✓ Propriétés mécaniques moyennes à bonnes.
- ✓ Investissements spécifiques très faibles.
- ✓ Moules simples, peu onéreux, rapides à réaliser en interne.

**Limite :**

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

**Matières premières :**

- Renforts : mats, tissus de fibre de verre, de carbone ou d'aramide (Taux de renfort volumique allant jusqu'à 35 % dans le cas du verre).
- Résines : polyesters, époxy, phénoliques, vinylesters.
- Divers : catalyseur, accélérateur, charges, pigments, agent de démoulage, acétone.

**Matériel :**

- Moule : simple coque généralement en composite, éventuellement en plusieurs élément assemblé
- Outillages à mains : ciseaux, pinces, ébulleurs, pistolet à peinture ou gel-coateuse

**Energie :**

- Electricité : éclairage, ventilation, chauffage
- Air comprimé : motorisation outillage, démoulage

**Domaines d'application :**

- Nautisme
- Piscine
- Transport, carrosserie (petites séries)
- Bâtiment, travaux public (coffrage)

### I.5.1.2 Moulage par projection simultanée

La projection simultanée est une opération manuelle, de fabrication de pièce en matériaux composite dont la forme est relativement ouverte soit en creux, soit en bosse et dont toutes les surfaces peuvent être atteintes en ligne droite à partir du pistolet. On projette simultanément les deux composants de base de ces matériaux ; les renforts sous forme de fibres coupées et la matrice sous forme d'un jet de résine liquide réactive. Ce flux de matières mélangées est dirigé vers l'empreinte d'un moule pour créer une couche compacte.

(a)



**Figure I.17** : Principe du moulage par projection simultanée

**(a)** : Pistolet moderne à mélange interne en action projetant résine polyester et fibres de verre E (doc. Hermex/pistolet GS Manufacturing, Inc.)

**Avantages** : [2]

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

**Limites** : [2]

- Propriétés mécaniques moyennes.
- Une seule face lisse.
- Qualité tributaire de la main d'œuvre.
- Conditions de travail très médiocres si absence d'agencements nécessaires.

## I.5.2 Les technologies dites en moule fermé :

### I.5.2.1 Moulage sous vide [14]

Le moulage sous vide utilise simultanément le vide et la pression atmosphérique. Après enduction du gel Coat, on place le renfort sur un moule rigide, puis on fait couler la matrice, une pompe à vide crée une dépression à travers le moule et le contre-moule poreux, qui étale et débulle la résine, La résine peut également être injectée par l'aspiration consécutive au vide.

Ce procédé de moulage convient pour la fabrication de pièces en petites et moyennes séries. Il permet aussi d'obtenir de bonnes propriétés mécaniques et un bel aspect de surface.

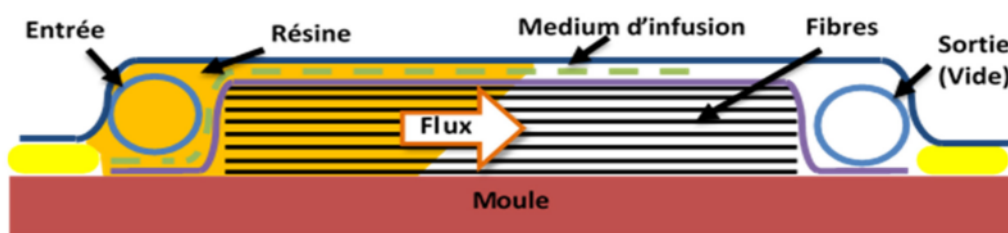


Figure I.18 : Principe du moulage sous vide

### I.5.2.2 Moulage par injection de résine [14]

Le moulage consiste à injecter de la résine sous pression et à imprégner un renfort placé à l'intérieur d'un ensemble moule et contre-moule très rigide et fermé. L'alimentation automatique des résines élimine leur manipulation.

La proportion de renfort peut être élevée, d'où l'obtention de pièces à caractéristiques mécaniques élevées. Ce procédé de moulage convient à la réalisation de pièces profondes et de formes compliquées.

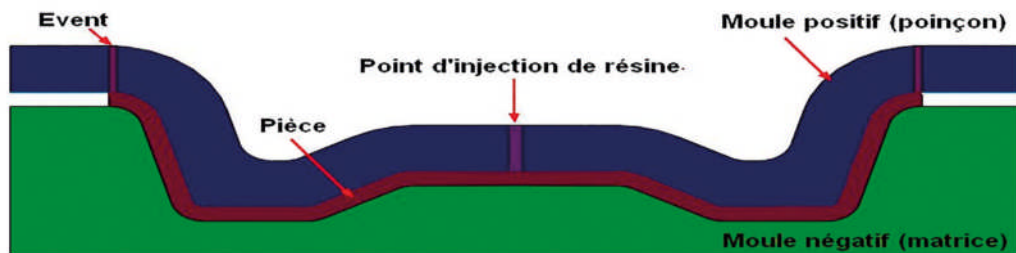


Figure I.19 : Principe du moulage par injection de résine

### I.5.2.3 Moulage par compression à froid de résine [2]

Ce procédé convient pour les moyennes séries de productions de 500 à 5000 unités

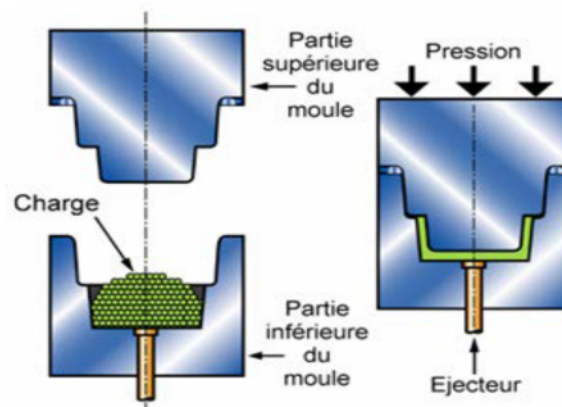
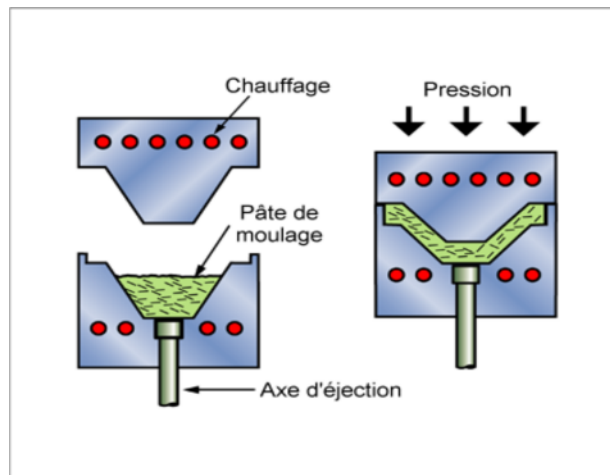


Figure I.20 : Principe du moulage par compression à froid de résine [2]

En utilisant une presse constituée d'un moule et contre-moule solide en matériaux composites à froid, le renfort (mat, mat de fils continus, liant basse solubilité) est posé sur la partie inférieure du moule et de la résine. La fermeture du moule sous pression (2 à 4 bars) entraîne la répartition de la résine dans l'empreinte et l'imprégnation du renfort. Le durcissement de la résine est accéléré progressivement par l'élévation de température du moule due à l'exothermie de la réaction, ce qui permet un démoulage rapide.

### I.5.2.4 Moulage par compression à chaud de résine [2]

Ce procédé est utilisé pour les grandes séries de production, 15 à 30 pièces par heure

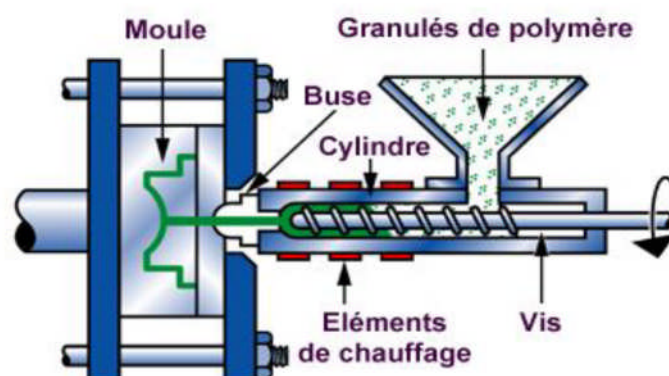


**Figure I.21** : Principe du Moulage par compression à chaud de résine [2]

Ce procédé exige une presse hydraulique et un moule métallique chauffant à la température de l'ordre de 80 à 150°C, et le renfort (mat à fils coupés, fils continus, tissus, préformes). La fermeture du moule se fait sous pression (10 à 50 bars). Ce procédé de moulage permet d'obtenir des proportions importantes de renfort, et par conséquent des pièces de bonnes caractéristiques mécaniques. L'importance de la presse est en fonction des dimensions des pièces.

#### I.5.2.5 Moulage par injection de mélange (résine-renfort) [14]

Généralement cette technique est utilisée pour obtenir les matériaux du type « plastiques renforcés » (figure 1.20). Elle est adaptée pour la production des pièces en très grandes séries. Dans ce procédé exige un malaxeur avec une masse à mouler constituée de résine, de charges et d'adjuvants divers, renfort (fibres courtes, sphères (billes), etc...). Le compound est moulé à chaud (130 - 150°C) par injection (principalement) entre moule et contre-moule en acier usiné. La pression de fermeture du moule est de (50 à 100 bars).



**Figure I.22** : Principe du moulage par injection de mélange (résine renfort)

**I.6 Conclusion**

Bien que de nombreuses méthodes de fabrication ont été développées et sont maintenant bien maîtrisées des industriels, des opérations d'usinage restent tout de même indispensables dans les processus de fabrication telle que le perçage et le détournage qui permettent la découpe et l'assemblage des pièces. Il s'agit dans notre étude d'opération de perçage, c'est ce que nous allons voir dans le chapitre qui suit.

## II.1 Définition

Le perçage est le procédé d'usinage le plus utilisé sur les pièces fabriqués en industrie. En plus d'offrir un potentiel d'économie de poids substantiel, les matériaux composites présentent l'avantage supplémentaire de permettre la fabrication de nombreuses pièces qui étaient auparavant fabriquées séparément puis assemblées. Le perçage est l'opération d'usinage la plus courante sur les pièces composites. Elle permet entre autres de réaliser des orifices nécessaires à l'assemblage des éléments, ou permettant le passage de câbles [17].

## II.2 Type du perçage des matériaux composites

### II.2.1 Perçage par enlèvement de la matière :

Le perçage est l'opération d'enlèvement de matière la plus répandue dans le domaine de l'usinage des matériaux composites. Il est facile à utiliser mais difficile à maîtriser. Percer signifie couper des fibres, ce qui diminue la résistance mécanique du matériau, et de plus peut apporter des endommagements au voisinage de la zone usinée (arrachement de fibres, délaminage extérieur ou interne - séparation de couches). Ainsi, afin de diminuer le nombre de ces défauts, et leur étendue, il est nécessaire d'appliquer des techniques d'usinage adaptées aux constituants du composite (morphologie des outils, méthodologie, ...) et d'élaborer des méthodes de contrôle spécifiques [17].

Parmi les difficultés propres au perçage et à son étude, il peut être cité :

- Une évolution importante et progressive de la vitesse de coupe ( $V_c$ ) selon la position sur l'arête de coupe,
- Une évolution de la géométrie de l'outil avec le rayon,
- Une coupe oblique tri-dimensionnelle,
- Un usinage en espace confiné qui empêche l'évacuation des copeaux et de la chaleur générée dans la zone de coupe.

Cela met en valeur la problématique de la conception d'outils de perçage, pour lesquels un compromis doit être fait entre la rigidité du corps de l'outil et la nécessité d'évacuer les copeaux générés. Ainsi, la problématique de génération et d'évacuation des copeaux en perçage rend difficile la maîtrise et la fiabilisation de l'opération de perçage.

Une optimisation du procédé et la qualité qu'il offre requiert la connaissance et la modélisation des mécanismes de coupe intervenant en perçage. Cependant, le confinement de la zone de coupe constitue également une difficulté importante pour

l'observation de la coupe, des efforts et des températures générés. Ainsi, la température n'est accessible que par une mesure indirecte autour de la zone de coupe accompagnée d'une étude thermomécanique complexe. L'étude des efforts n'est possible qu'avec des mesures d'effort global lors d'un perçage en pleine matière ou partielle lors de perçage de tubes ou sur l'avant-trou par exemple. La géométrie évolutive et les importantes variations de vitesse de coupe le long de l'arête de coupe créent cette répartition inégale de l'effort axial où une partie importante est générée au centre de l'outil sur les premiers millimètres de rayon.



**Figure II.1** : Perçage par enlèvement de matière

L'étude et la modélisation de la coupe en perçage est donc particulièrement complexe. Pour modéliser l'opération de perçage, une simplification est généralement faite en estimant que chaque portion d'arête de l'outil travaille en coupe orthogonale ou en coupe oblique [18].

### **II.2.2 Perçage par jet d'eau froide : [19]**

Cette technique utilise l'action mécanique d'un jet fin de liquide à forte pression et grande vitesse. La principale caractéristique, par rapport aux autres procédés de découpe, est qu'il assure une découpe à froid, sans endommagement ni déformations thermiques du matériau. Le matériau est découpé par dépassement de sa limite élastique. Pour l'instant, ce procédé ne permet que la découpe et le perçage.

Cependant certains Laboratoires se penchent sur des études de fraisage et tournage au jet d'eau.



Figure II.2 : Perçage par jet d'eau à haute pression

**Avantages :**

- La possibilité de couper des matériaux souples ou très durs.
- Aucun apport thermique donc pas de chaleur, ni échauffement.
- Augmentation de la vitesse de coupe.
- Absence de poussière.
- Facilité de mise en œuvre (contrairement au laser).
- L'obtention d'une coupe franche et nette (pareil qu'avec le laser).
- Pas de changement d'outil pour les différents composites, pas de trou de départ nécessaire, faible niveau sonore.

**Inconvénients :**

- Perpendiculairement à son axe, le jet à une stabilité assez faible, déviation à l'intérieur du sillon de coupe.
- Front de coupe courbé selon une direction opposée à la direction d'avance.
- Moins rapide que le laser ou le plasma (environ dix fois moins rapide) car il nécessite des vitesses d'avance inférieures.
- Moins précis que le laser ou le plasma.
- Coût d'exploitation élevé par une faible durée de vie de certains composants (usure des buses).

- Dans le cas d'une avance très rapide, le jet n'érode que les parties douces et saute les fibres.
- Arrachement côté sortie, dû au fait que la capacité d'usinage du jet a été absorbée par les couches supérieures.
- Effet néfaste de l'eau.

### **II.2.3 Perçage au laser :**

Le principe du L.A.S.E.R. **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (Amplification de la lumière par émission stimulée de radiation). C'est la décharge d'électricité de quelques millions de volts qui active, entre deux électrodes, un mélange gazeux (dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> par exemple) à une pression de plusieurs millibars. Le procédé consiste à découper des matériaux à l'aide d'un laser puissant et très précis qui se concentre sur une petite surface du matériau. La focalisation du rayon laser sur la zone réduite, permet d'élever la température de la matière jusqu'à la fusion ou vaporisation. Comme la zone affectée thermiquement par le rayon laser est relativement faible (autour de 0,5 mm), les parties découpées présentent des déformations mineures. En général, un ordinateur est utilisé pour diriger le laser et tracer le chemin de découpe.

D'une manière générale ; il y'a les Lasers à gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), les Lasers YAG dopés au néodyme (Grenat d'aluminium et d'yttrium), les Lasers à fibre...

Les caractéristiques importantes du laser sont le mode, la puissance, la stabilité et la polarisation. Les variables les plus significatives sont la lentille de focalisation, la position focale, la vitesse et le gaz d'assistance. Une installation complète comprend la source laser, la structure de support, le système de déplacement du faisceau, l'armoire de contrôle, le dispositif d'aspiration des fumées, les écrans de protection. Pour les risques liés à l'utilisation du laser, la norme NFC 43-801 établit la classification des lasers en cinq catégories correspondant à des classes de risques. Ceux utilisés pour la découpe sont de la classe 4. Il est recommandé de travailler en cabine fermée en repérant les zones susceptibles d'être atteint par le rayon [19].

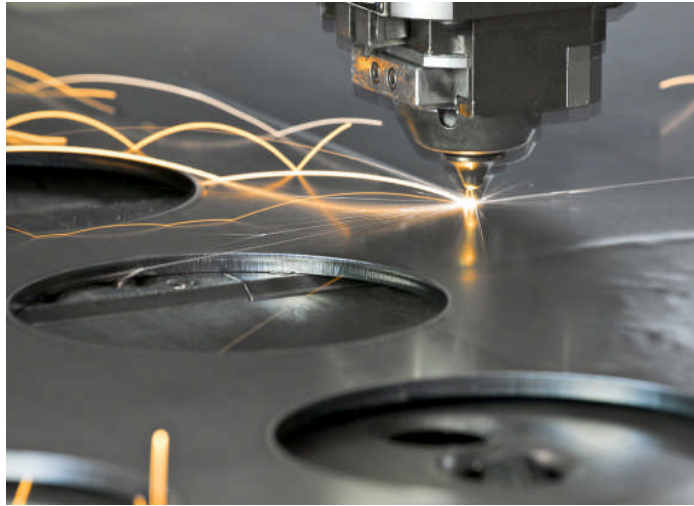


Figure II.3 : Perçage par laser

**Avantages :**

- Un haut niveau de précision à l'ordre de 0,1 mm pour les lasers CO2 jusqu'au micron pour les lasers YAG.
- La découpe de formes très complexes sur des machines 5 axes.
- Une très grande vitesse de coupe rapide dans les matériaux.
- Possibilité de manière non exhaustive, de souder, graver, traiter en surface et braser sur la même machine ce qui permet de faire plusieurs étapes de fabrication d'une pièce sur le même banc.
- Très peu de déformation du matériau.
- Absence d'usure de l'outil de découpe.

**Inconvénients :**

- Création d'une zone affectée thermiquement.
- Décontamination des gaz d'assistance.
- Coût élevé de l'installation.
- Limitation en épaisseur de la pièce à découper.

### II.3 Problématique du perçage des matériaux composites par outils coupants

L'opération de perçage des pièces en matériaux composites est particulièrement complexe, elles nécessitent donc un grand savoir-faire et des solutions d'outillage adapté à ces matériaux.

Le but recherché lors du perçage est d'obtenir des trous avec une bonne qualité de surface, Toutefois on diminue la résistance mécanique du matériau, Cela engendre

également des endommagements au-alentour de la zone usinée (arrachement des fibres, délaminage extérieur ou interne - séparation de couches).

Si les procédés de perçage au laser et par jet d'eau donne des résultats satisfaisant le perçage industriel reste le domaine des forêts, Celle-ci doivent avoir une bonne résistance au frottement et à l'abrasion à l'interface copeau/face de coupe et à l'interface face de dépouille/surface usinée. Un échauffement important dans la pièce à usiner peut engendrer une dégradation thermique de la matrice, donc les outils doivent avoir une bonne dureté à haute température et permettre une bonne dissipation de la chaleur produite par frottement. La résistance de l'arête de coupe à l'usure par abrasion est une caractéristique très importante car la perte d'acuité peut entraîner des endommagements importants dans la pièce (arrachement, délaminage, etc.)

### II.3.1 Géométrie d'outils

Il est fondamental de connaître la géométrie d'un foret hélicoïdal de base (ISO 3002/1-1982) afin de savoir comment se comporte en usinage chaque partie (voir Figure II.4). Ce type de forêt est à la base des améliorations spécifiques qui sont apportées à la géométrie dans le cas de l'usinage des matériaux composites.

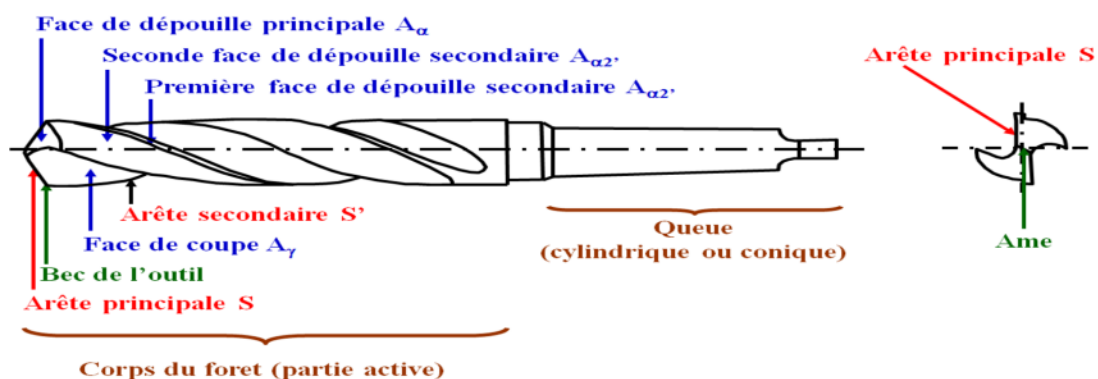


Figure II.4 : Géométrie d'un foret hélicoïdal ISO 3002/1-1982

### II.3.2. Matériaux d'outils

En général, pour usiner les matériaux composites, on utilise des matières très dures qui doivent résister à la nature abrasive des fibres et de la matrice. Les matériaux d'outil existants utilisés industriellement. Elles sont classées dans les paragraphes suivants selon leur dureté par ordre croissant.

#### II.3.2.1 Outils à aciers rapides

Ce sont des aciers alliés de chrome, de tungstène, de molybdène et de vanadium et de cobalt. Ils ont un faible cout mais leur duré de vie et moins longue, ces outils s'usent et s'oxydent très rapidement et rendent le cisaillement des fibres difficile créant ainsi des délaminages en sortie de trou et de mauvais états de surface.



Figure II.5 : Outils à aciers rapide

### II.3.2.2 Outils à carbures de tungstène (WC)

Ces matériaux sont issus de la métallurgie des poudres. Les grains de carbure de tungstène permettent d'obtenir une dureté à chaud et une résistance à l'abrasion nettement supérieures aux aciers rapides. Les états de surface obtenus sont plutôt satisfaisants.

Pour améliorer encore leurs performances, ils peuvent être revêtus de dépôts ioniques obtenus essentiellement par procédés :

- PVD (Physical Vapor Déposition).
- CVD (Chemical Vapor Déposition).

Une grande variété de revêtements est déposable (TiN, TiCN, TiAlN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, etc.) avec un bon accrochage sur le substrat.



Figure II.6 : Outils à carbures de tungstène

### II.3.2.3 Outils à nitrure de bore cubique (CBN)

Le nitrure de bore cubique NBC obtenu par frittage à haute pression et haute température est le constituant le plus dur utilisé en usinage après le diamant. Il présente une structure réticulaire et une dureté similaire à celle du diamant. Il est plus résistant à l'usure que le carbure de tungstène. Il conserve sa dureté à 1000°C et permet non seulement de travailler à des vitesses de coupe très élevées mais surtout d'usiner des matériaux de dureté supérieure à 55 HRC.



Figure II.7 : Outils à nitrures de bore cubiques (source : site amazon.fr).

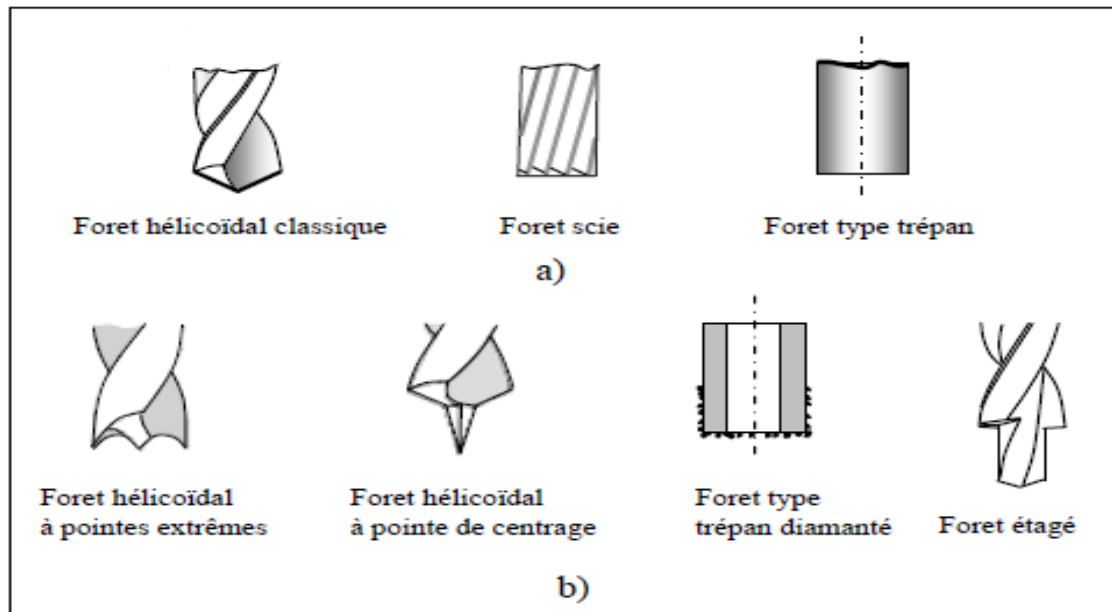
### II.3.2.4 Outils à diamant

Le diamant naturel et le diamant poly cristallin (PCD) obtenu par la métallurgie des hautes pressions et températures comme le Nbc constituent une substance particulièrement dure (HRC 100), la plus résistante à l'abrasion, Il permet des vitesses de coupe très élevées sans usure appréciable, un excellent état de surface et précision dimensionnelle.



Figure II.8 : différents types d'outils à diamant

Il existe à l'heure actuelle, plusieurs types d'outils utilisés pour percer des matériaux composites (Figure II.9). Parmi les différents types d'outils, on distingue : le foret hélicoïdal, le foret scie et le foret type trépan (Figure II.9 a). Ces forets peuvent présenter des géométries plus élaborées, comme par exemple (Figure II.9 b) :

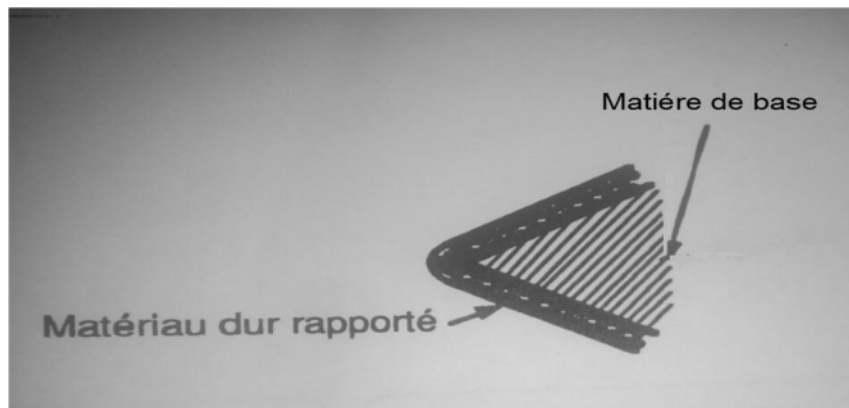


**Figure II.9 :** Autre types de forets

En conclusion, la majorité des travaux sur l'usinage des composites à matrice polymère avec renforcement fibreux en carbone recommandent l'emploi d'outils soit en WC soit en PCD. Le choix des outils PCD est souvent privilégié pour leur bien meilleure résistance à l'usure [20].

### II.3.3 Conditions communes à tous les matériaux composites

L'application d'un revêtement "dur" (ex : TiC ou TiN) sur un outil en acier rapide (substrat) est à l'origine destiné à en améliorer les performances. Cependant, le dépôt implique une augmentation du rayon de l'arête de base (Figure II.8). Ceci a pour conséquence de diminuer les facultés de coupe par cisaillement de l'outil, bien que sa dureté soit plus importante. La rugosité de la surface usinée n'est que plus grande.



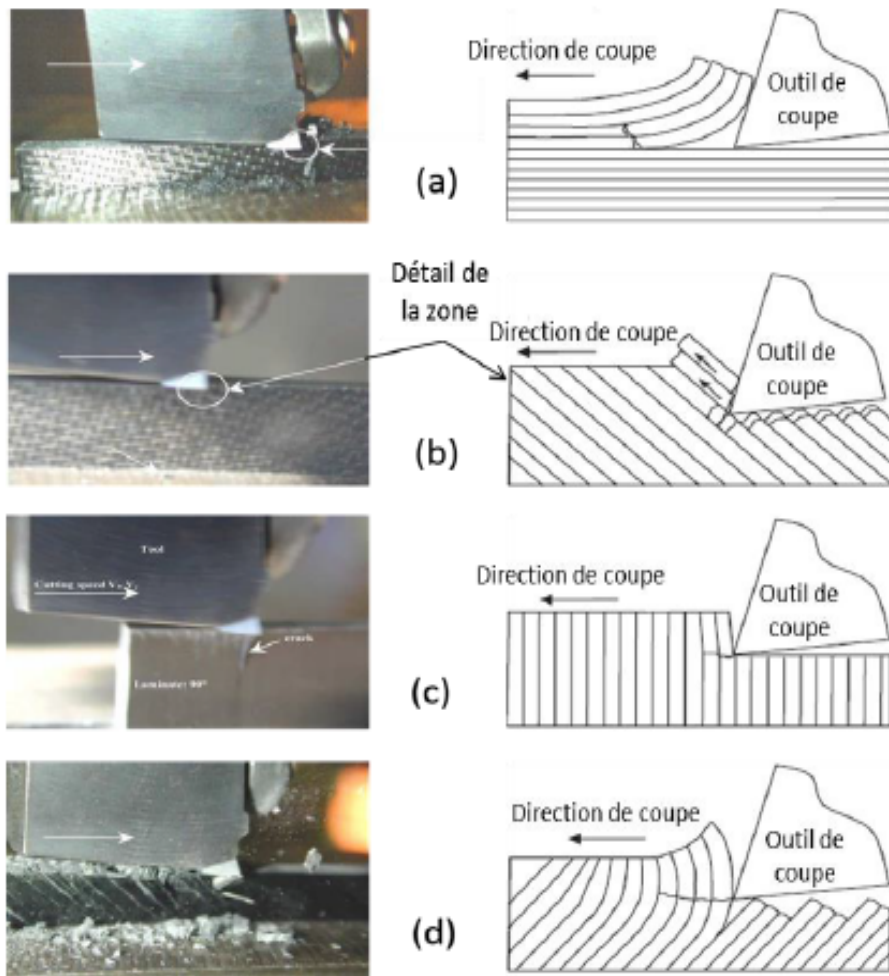
**Figure II.10 :** Outil revêtu

Les outils diamant (PCD) trouvent leur application dans l'usinage de ces matériaux (résistance à la l'usure). Les outils diamants génèrent des surfaces plus lisses que les outils carbures, ceci en raison de la différence existante entre leur rayon d'arête tranchante (diamant : 7-12 $\mu\text{m}$  ; carbure : 10-20  $\mu\text{m}$ ). Cependant, ils ne sont pas souvent utilisés en raison de leur cout.

### **II.3.4 Mécanismes de coupe des composites**

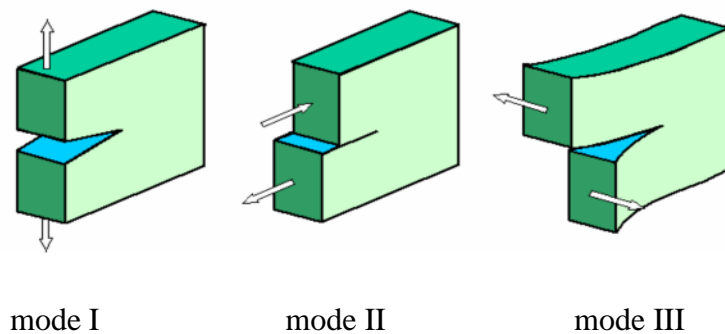
Les travaux de D.H. Wang , Ramul.M et Arola.D [21] sur la coupe des composites ont montré que l'orientation des fibres joue un rôle déterminant dans la formation des copeaux, appuient par la conclusion faite par Zitoune [22].

Quatre types de mécanismes de formation de copeaux ont été observés par les différents auteurs [21] et [22], Figure II.11 :



**Figure II.11** : Etude expérimentale de la formation de copeaux pour : (a)  $\theta = 0^\circ$ , (b)  $\theta = +45$ , (c)  $\theta = +90$ , (d)  $\theta = -45$  Zitoune [22] à gauche et Wang [21] à droite.

En effet, ces auteurs ont démontré une nouvelle fois le rôle clé joué par l’orientation des fibres lors de l’usinage des CFRP-UD. Mais ils ont aussi conclu que l’angle de coupe de l’outil et la nature du matériau composite (matrice et fibre), sont les deux paramètres majeurs influençant la formation des copeaux composites par les modes de propagations des fissures.



**Figure II.12** : Les trois modes de propagation de fissures

## II.4 Mode d'assemblage des composites en construction navale

### II.4.1 Assemblage par collage [16]

L'assemblage de pièces en matériaux composites (composite sur composite, composite sur métal, ...) fait fréquemment appel au collage en raison des avantages qu'il offre par rapport aux autres techniques existantes.

La mise en œuvre de cette technique d'assemblage fait cependant appel à des compétences particulières (conception adaptée des pièces à assembler, préparation des surfaces à assembler, tests des assemblages permettant de déterminer leurs caractéristiques mécaniques, physiques ou chimiques...) et nécessite de connaître les différents types d'adhésifs et leurs caractéristiques afin de sélectionner l'adhésif le mieux adapté à un problème d'assemblage concret.

L'environnement, les contraintes auxquels sont soumis les navires imposent quelques exigences aux assemblages par collage qu'ils comportent [16] :

- Tenue à l'eau de mer : avec un contact fréquent ou permanent au fond du bateau, Les adhésifs devront avoir des résistances à l'eau compatibles avec celles des plastiques renforcés de verre ;
- Résistance à la fatigue et aux sollicitations alternées : dues aux chocs des vagues sur la coque, les adhésifs polyuréthanes (PU), souples, sont plus intéressants que les adhésifs ou mastics polyesters, ou les époxydes rigides ;
- Abaissement du poids des superstructures : afin d'abaisser le centre de gravité ;

#### II.4.1.1 Matériaux à coller [16]

Dans les industries qui utilisent des matériaux composites, on a besoin de coller divers matériaux et diverses pièces, pas uniquement en composites telles que

- Des peaux de panneaux-sandwichs qui peuvent être :
  - En tôles d'aluminium ou d'alliages,
  - En stratifiés therm durcissables (polyester-verre ou graphite- époxyde, ou autres phénolique-verre pour avoir une résistance élevée au feu),
  - En composites thermoplastiques, plus rarement ;
- Des nids d'abeilles divers : aluminium, Nomex (à base de fibres aramides ou Kevlar) ;

- Des pièces composites de formes courbes, raidisseurs, profilés pultrudés, réalisés à partir de pré imprégné thermodurcissables, qui doivent alors être collés ou stratifiés par cuisson (cuisson simultanée de la résine, du composite et de l'adhésif). Il s'agit alors de collages composites sur composite;
- Des pièces composites réalisées avec des polymères thermoplastiques divers (PE, PP, nylon, polycarbonates, PPS, PEEK...) par exemple en mécanique, électroménager... ;
- Des panneaux-sandwichs à assembler et coller sur eux-mêmes, sur des raidisseurs ou sur des cadres ;
- Des pièces métalliques (cadres, attaches, charnières, inserts, renforts) à coller sur les pièces en composites. Ces pièces peuvent être en alliages d'aluminium, ou en titane dans le domaine aéronautique, ou en acier pour l'automobile, en laiton ou duralumin pour les inserts ;
- Éventuellement on peut coller des composites sur bois dans le bâtiment ou en ameublement, sur béton dans le bâtiment..., sur des hublots en verre ou plastique transparent pour la fabrication de hublots.

#### II.4.1.2 Préparation des surfaces [16]

On peut considérer que les composites se traitent et se collent comme le polymère constituant leur matrice. Nous étudierons en détail les modes de préparation des surfaces propres aux matériaux composites.

##### ❖ Élimination des produits de démoulage

Dans la plupart des cas, lors de la fabrication des pièces en composites, un agent de démoulage a été utilisé pour faciliter le démoulage des pièces. Cet agent est un produit anti adhérent (silicone, stéarate ou autre) qui doit donc être éliminé complètement sur la zone à coller. On s'enquerra auprès du fournisseur de produit de démoulage de la nature de celui-ci. Par ailleurs, certains produits de démoulage sont incorporés dans la masse de la formule et sont donc plus difficiles à éliminer.

Pour éliminer les produits de démoulage superficiels, on peut utiliser :

- soit des produits détergents puis réaliser un rinçage très soigné ;
- soit un nettoyage aux solvants (alcool, méthyl-éthyl cétone, solvants de nettoyage chlorés). Bien-sûr, le solvant utilisé ne doit pas attaquer le polymère utilisé comme matrice.

Après nettoyage, il faut laisser sécher complètement les pièces avant de les coller.

### ❖ Abrasion

Afin de rendre la surface rugueuse et plus facile à mouiller par l'adhésif, et d'éliminer la couche superficielle qui contient l'agent de démoulage, on procédera souvent à une abrasion de la surface avec un papier abrasif dont le grain ne doit pas être trop gros car il ne faut pas aller en profondeur jusqu'aux fibres de renfort, celles-ci devant rester enrobées et intactes.

On peut aussi utiliser un tampon abrasif (utilisé pour le récurage par exemple), éventuellement imprégné d'un détergent léger pour éliminer les produits de démoulage.

Après abrasion, on doit bien sûr dépoussiérer et nettoyer soigneusement la surface avec un solvant adapté.

### ❖ Système « *Tear ply* » (ou tissu de délaminage)

Ce dernier peut être utilisé pour obtenir une surface propre. La figure II.13 montre ce système qui consiste à appliquer lors de la fabrication du composite, une feuille de Dacron ou autre textile à la surface externe, dans la couche superficielle de résine. Lorsque l'on doit procéder au collage, il suffit de peler cette feuille pour trouver en dessous un matériau propre, dépourvu de toute pollution ou agent de démoulage.

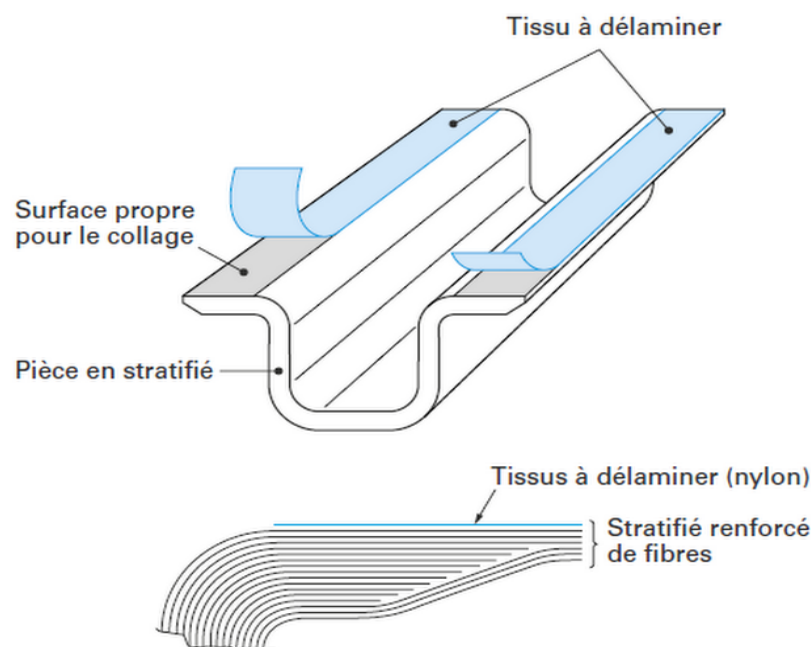


Figure II.13 : Utilisation d'un tissu à délaminier pelable au moment du collage [16].

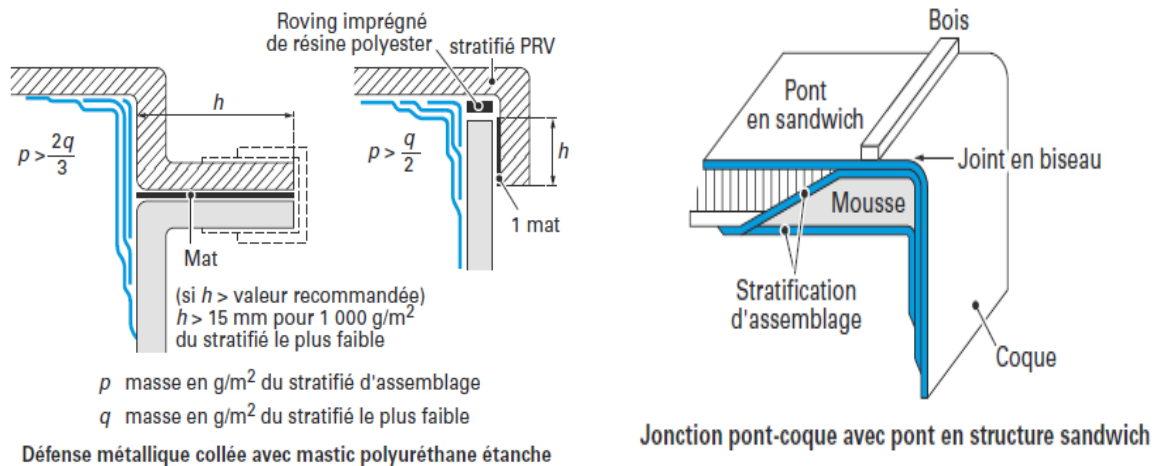


Figure II.14 : Assemblage par collage en construction navale : pont-coque [16].

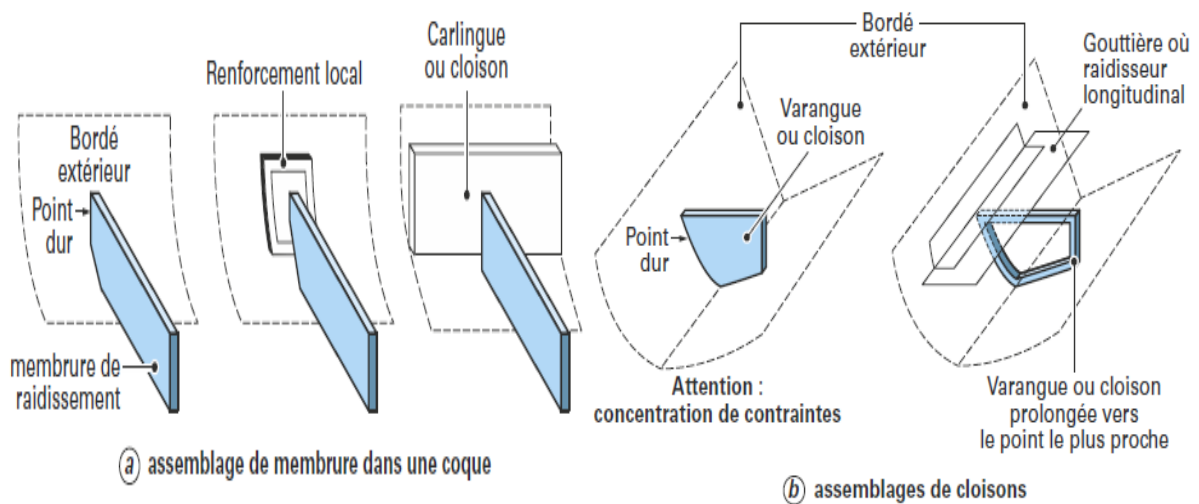


Figure II.15 : Assemblages de membrure dans une coque et de cloisons : méthodes pour réduire les concentrations de contraintes [16]

**Avantage du collage :**

- ✓ Possibilité d’assembler des matériaux différents (métal sur composite ou plastique, métal sur mousse isolante pour réaliser des sandwichs ...etc.)
- ✓ Élargir les possibilités de conception de matériaux composites à tout assemblage.
- ✓ La suppression des rivets, boulons et vis.

**II.4.2 Assemblage par rivetage**

Les rivets sont des éléments de fixation permanents, à l'encontre des organes démontables comme les boulons et les vis. En général, on les utilise pour assembler

des tôles ou des profilés métalliques. Les rivets sont fabriqués en fer forgé, en acier doux, en cuivre et, parfois, en d'autres métaux.

Le rivet est constitué d'une tige cylindrique (fût) qui se termine, à une extrémité, par une tête. La forme variable de la tête donne son nom au rivet. Après la mise en place, l'autre extrémité du rivet est refoulée, ce qui forme la « rivure ».

Afin de réaliser un assemblage par rivetage, il faut d'abord percer des trous (soit par perçage, soit par poinçonnage, soit par poinçonnage et alésage) dont le diamètre est légèrement supérieur au diamètre du fût. Viennent ensuite la mise en place des rivets et le bouterollage, pour façonner la rivure.

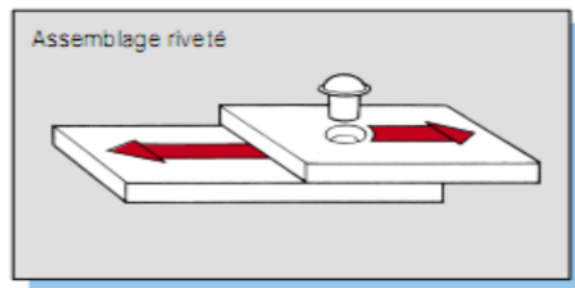


Figure II.16 : Assemblage par rivetage.

Les rivets utilisés dans la construction navale sont les gros rivets, leurs dimensions relatives sont illustrées sur la (figure II.14)

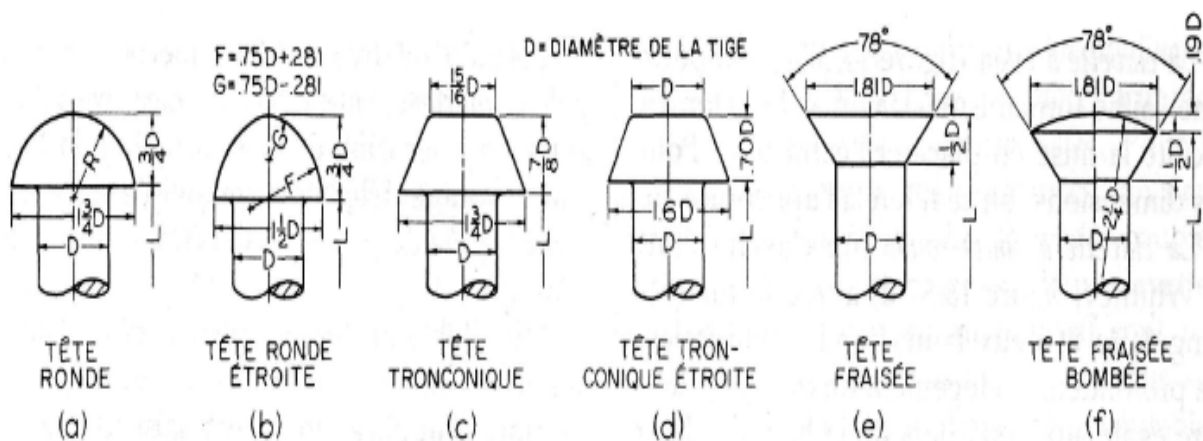


Figure II.17 : Gros rivets normalisés.

Quelques assemblages obtenus par rivetage, appelés aussi rivures, sont illustrés sur la (figure II.15)

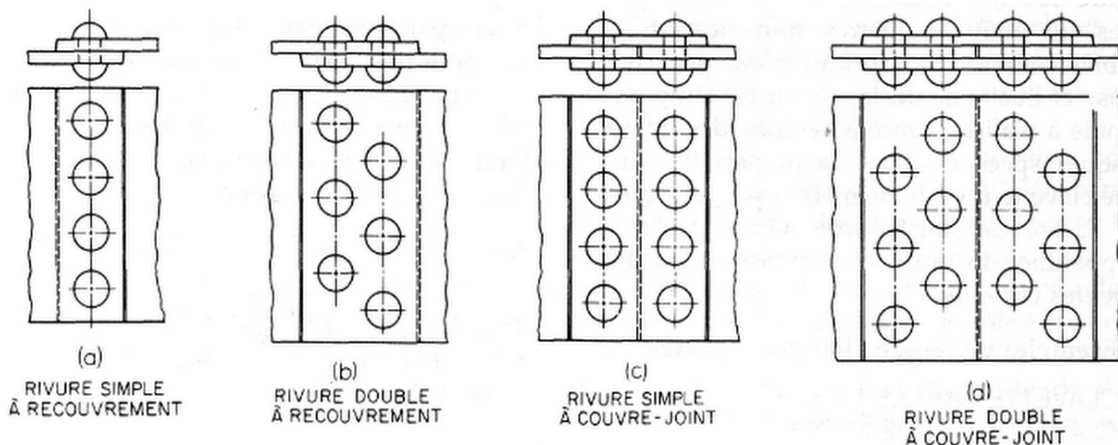


Figure II.18 : Modes de rivures courantes en construction navale.

## II.5 Matériaux composites utilisée dans l'industrie navale

### II.5.1 Le polyester renforcé de verre

Le polyester renforcé de verre (PRV) est le matériau le plus utilisé en construction navale. En effet, par rapport au traditionnel bois, ce matériau a l'avantage d'être insensible à la corrosion marine et à l'eau de mer, tout en assurant une excellente flottabilité.

Pour les bateaux de taille moyenne (bateaux de plaisance, de pêche, grands catamarans de compétition et aussi les petits navires commerciaux qui ne doivent pas avoir de coques métalliques) on construit des coques volumineuses en stratifiés polyester-verre, sur lesquelles on assemble les membrures, les renforts longitudinaux et couples, qui sont aussi réalisés en matériaux composites (pultrudés, ...) qui peuvent être collés ou assemblés par stratification.

### II.5.2 Le panneau- sandwich

C'est un matériau (âme) pris entre deux peaux en fibre. En construction navale, le sandwich est employé pour réduire le poids et pour obtenir de la rigidité.

En construction navale, les peaux sont en fibre, mais il existe aussi des sandwiches avec des peaux en aluminiums utilisées notamment dans l'aviation. Pour les bateaux, les résines utilisées sont du polyester, vinylester ou époxy. Elles sont appliquées au contact (rouleau, pinceau), mais plu souvent aujourd'hui infuser sous vide. Les tissus

qui sont imprégnés de résine sont du verre, carbone, kevlar... L'utilisation de ces différents tissus augmente la résistance notamment au poinçonnement.

Pour l'âme, les matériaux utilisés sont le plus léger possible. Il peut s'agir de mousse (PVC, Corecell...), de balsa (mise en œuvre au contact sous vide) pour la construction de plaisance, ou de nid-d'abeilles (Nomex) pour les bateaux de course.

## **II.6 Conclusion**

L'objectif de réalisation de pièces en matériaux composites n'est naturellement pas de créer des conditions de parachèvement par outils coupants, néanmoins après fabrication, de nombreux éléments en composites nécessitent des opérations d'usinage en perçage ou fraisage. Usiner un matériau composite c'est avant tout couper les fibres de ce matériau et donc entraîner un risque d'endommagement au voisinage de la zone usinée. Il est donc important d'étudier la nature des défauts introduits lors de l'usinage par perçage, ainsi que l'importance de leur étendue.

### III.1 Caractérisation et quantification des défauts de perçage liés au perçage des stratifiés

#### III.1.1 Localisation des défauts

Lors du perçage du CFRP (polymère renforcé de fibre de carbone), le matériau est soumis à diverses actions physiques qui affectent son intégrité. Il en résulte plusieurs types de défauts localisés dans 3 zones du trou :

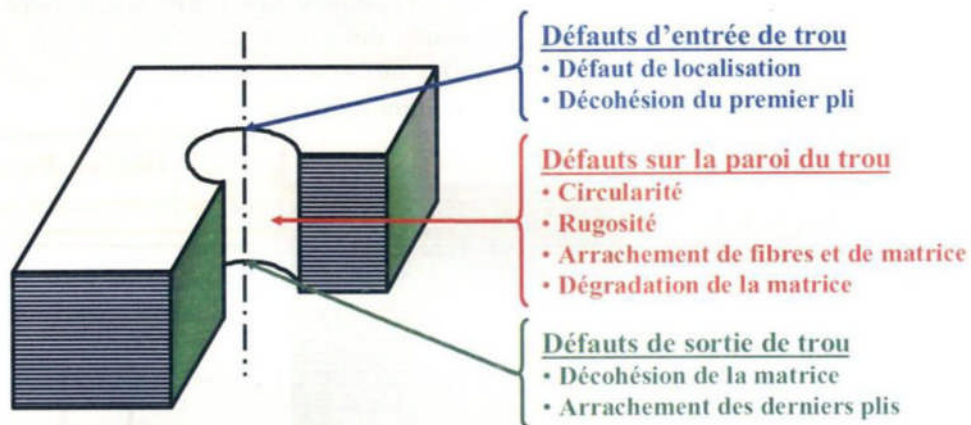


Figure III.1 : Défauts liés au perçage du CFRP [23]

#### III.1.1.1 Défauts situés en entrée du trou :

Lors de la pénétration du foret dans le composite, les arêtes coupantes ont tendance à soulever la première couche du stratifié. Le délaminage en entrée du trou est occasionné par un effet de pelage créé par le bord de l'arête principale de coupe d'un foret [24]. L'effet de pelage est maximum lorsque le bec de l'outil atteint l'interface entre deux plis.

Cet effort de pelage est la cause du délaminage du premier pli, la partie non coupée reste elle maintenue en position par l'effort de poussée  $F_z$  (ou effort de pénétration). En d'autres termes, les défauts en entrée de trou sont initiés par l'effort axial et propagés par l'effort tangentiel. Un angle de coupe très faible permet d'éviter ce type de défaut, mais fragilise l'outil. Néanmoins dans la plupart des cas, une contre-plaque en entrée ainsi qu'un foret avec une bonne acuité d'arête suffisent pour éviter les écaillages en entrée de trou [25].

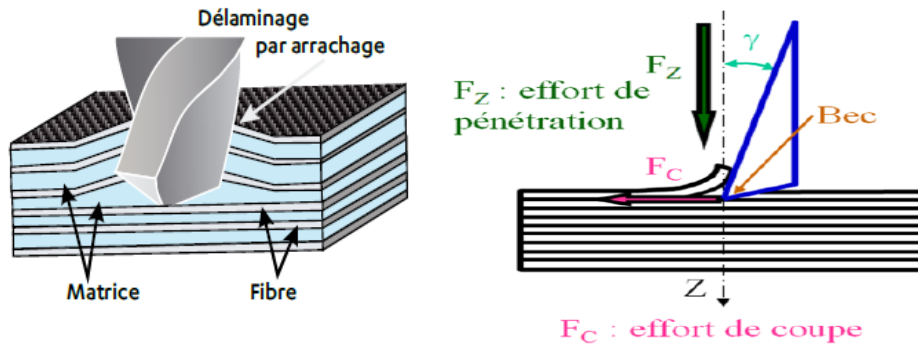


Figure III.2 : Mécanisme d'apparition des défauts à l'entrée du foret lors du perçage d'un composite stratifié [23].

Les méthodes employées pour détecter ce type de défauts peuvent être visuelles (inspection à l'œil ou avec une caméra), mais ce procédé est uniquement fiable pour détecter les délaminages importants et ne permet pas la quantification précise du défaut. Une autre technique permettant de mesurer ce défaut est le scan à l'aide d'ultrasons, L'une des valeurs retenues pour mesurer la taille du défaut est la mesure du diamètre maximal délaminé [26], comme le montrent les Figures III.3 et III.4

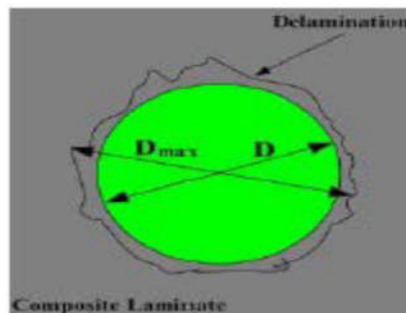


Figure III.3 : Définition de l'air de délaminage

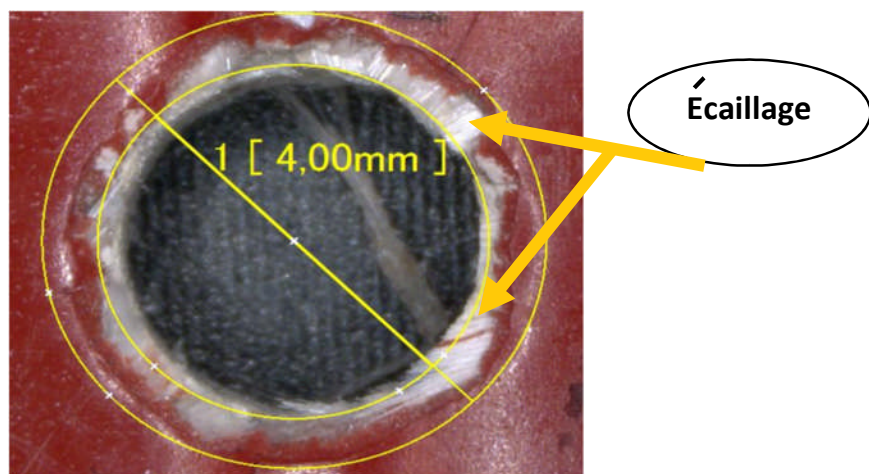


Figure III.4 : Défaut en entré du trou

III.1.1.2 Défauts situés sur la paroi du trou :

On recense ici des délaminages, des arrachements de fibres et de matrice, des défauts de circularité et des dégradations thermiques.

❖ Défauts de circularité des trous

[27] ont remarqué lors du perçage de nappes unidirectionnelles de verre et de carbone (orientées à 0°), que les trous sont ovales.

Les défauts de circularité expriment la précision de forme par le facteur  $d_c$  ( $d_c = \frac{1}{2}(d_2 - d_1)$ ). Les variations de cylindricité gagnent en importance comme critère de qualité en raison de la faible épaisseur de perçage rencontrée souvent dans les composites et de leur anisotropie

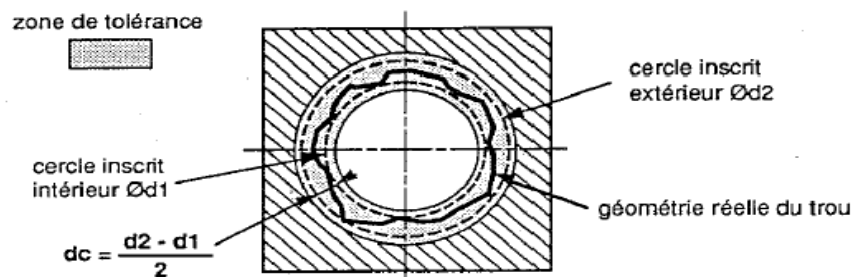
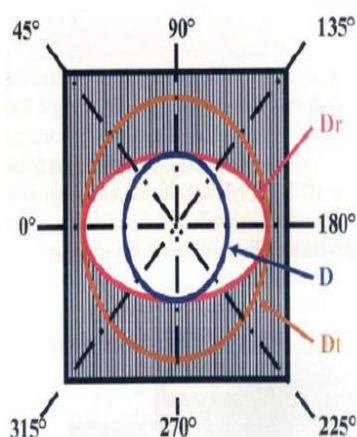


Figure III.5 : Critère de circularité

En effet, le défaut de cylindricité peut créer des problèmes lors de l’installation des fixations mécaniques. Ces défauts sont expliqués par le fait que les arêtes de coupe sollicitent les fibres de différentes manières suivant l’angle qu’elles font par rapport à l’arête de coupe. La Figure III.6 illustre le phénomène :



Dth : diamètre théorique du trou  
 Dr : diamètre réel du trou  
 D : diamètre utile du trou

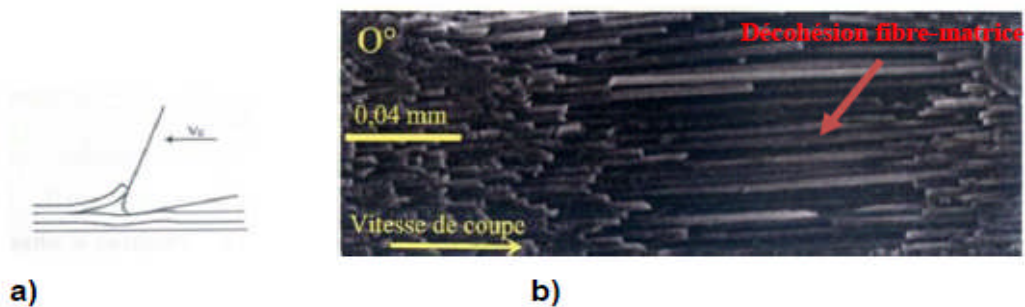
- Entre 0° et 90°, les fibres sont sollicitées en compression et flexion.
- A 90°, les fibres sont sollicitées en flexion (maximale)
- Entre 90° et 180°, les fibres sont sollicitées en traction et flexion
- Entre 180° et 270°, les fibres sont sollicitées en compression et flexion
- Entre 270° et 0°, les fibres sont sollicitées en traction et flexion

Figure III.6 : Sollicitations des fibres selon leur angle par rapport à la vitesse de coupe [28]

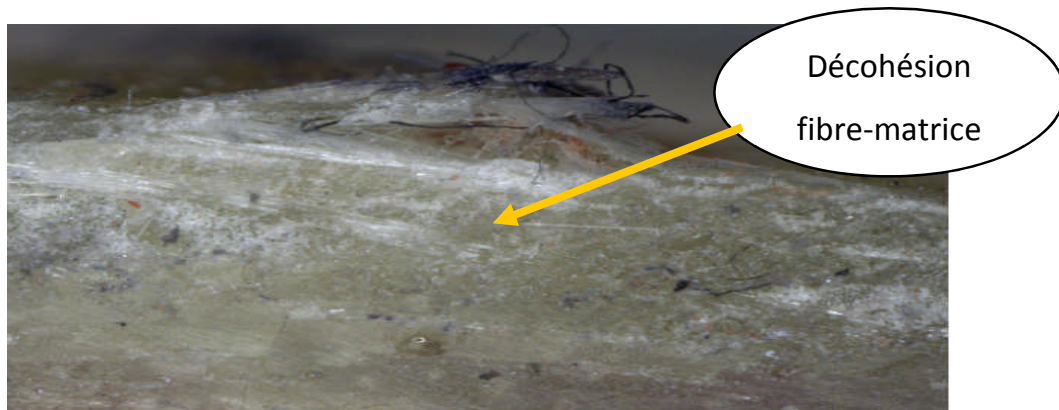
Pour minimiser ce phénomène. [23] proposent un outil possédant entre 3 et 6 arêtes de coupe (3 arêtes principales et 3 arêtes secondaires). Cet outil optimiserait la circularité des trous de par sa rigidité et l'évacuation de la chaleur serait mieux réalisée. De plus, les 3 arêtes secondaires de par leur forme concave permettraient de diminuer Ra (paramètre de rugosité) en réduisant l'effet de matière poussée.

#### ❖ Arrachements de fibres et de matrice :

Les arrachements de fibres et de matrice représentent les principaux défauts de paroi de trou. Les premières études sur les mécanismes d'apparition des défauts d'usinage dans les matériaux composites débutent en 1980 avec les travaux [30] et [31]. Ces études ont donné suite à plusieurs travaux dont ceux de [21], [28] et [29]. Ces travaux permettent d'identifier les principaux mécanismes de formation du copeau en fonction de l'angle entre la direction de la vitesse de coupe et les fibres. Lorsqu'elles se trouvent à  $0^\circ$  par rapport à la direction de la vitesse de coupe (Figure III.7) elles sont « soulevées » par l'arête de coupe (et donc décollées de la matrice). Ensuite, elles peuvent soit subir l'action de l'arête de coupe et être tranchées ou bien se dérober sous l'arête de coupe (ce phénomène est d'autant plus important que le rayon d'acuité de l'arête est grand).

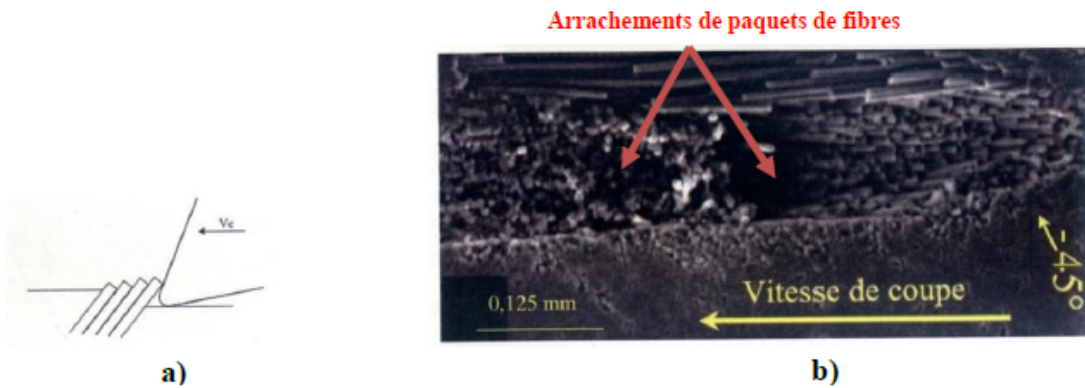


**Figure III.7 :** Fibres à  $0^\circ$  par rapport à  $V_c$ . a) Illustration de la pénétration de l'arête de coupe. b) Paroi de trou avec des fibres à  $0^\circ$  par rapport à  $V_c$  [28]

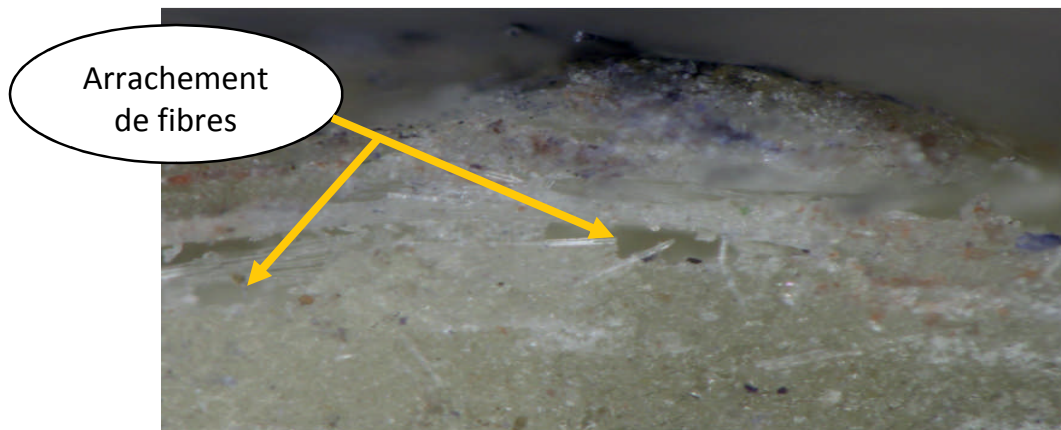


**Figure III.8 :** décohésion fibre-matrice observé au microscope optique

Dans le cas de fibres orientées à  $-45^\circ$  par rapport à la direction de la vitesse de coupe, un fléchissement sous l'arête de coupe est observé. Néanmoins, ce fléchissement est limité par les fibres se trouvant derrière les premières et ainsi de suite. Lorsque la limite de la résistance des fibres au fléchissement est atteinte, l'ensemble finit par céder. On observe alors des arrachements de paquets de fibres.



**Figure III.9 :** Fibres à  $-45^\circ$  par rapport à  $V_c$ . a) Illustration de la pénétration de l'arête de coupe b) Paroi de trou avec des fibres à  $-45^\circ$  par rapport à  $V_c$  [28]



**Figure III.10:** Arrachement de fibres observé au microscope optique

Les fibres orientées à  $90^\circ$  par rapport à la direction de la vitesse de coupe sont soumises à une sollicitation en flexion très élevée. Elles subissent alors une déformation élastique et sont cisailées ensuite par l'arête de coupe. Ce phénomène de coupe entraîne une ovalisation du trou estimée entre  $5\mu\text{m}$  et  $0,2\text{mm}$  selon le rayon d'acuité des arêtes de coupe et l'état d'usure.

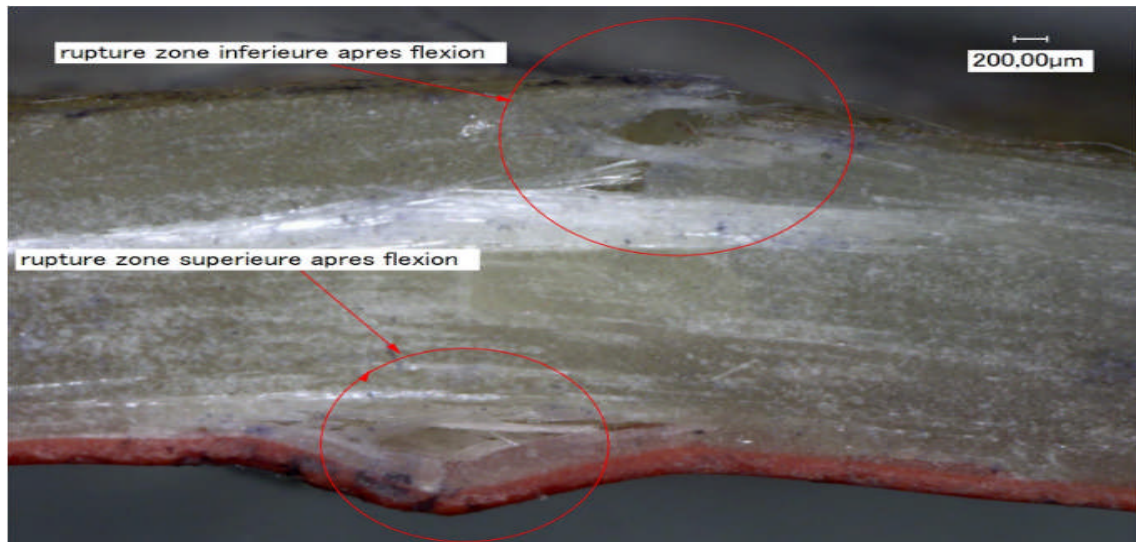


Figure III.11 : Rupture de fibres après flexion

#### ❖ Les dégradations thermiques de la matrice

Elles surviennent lorsque la vitesse de rotation de l'outil est très élevée. Ceci entraîne une surchauffe locale de l'outil et la matrice est alors « brûlée ». Un dépôt sombre est observé alors à la surface du trou. La température du palier de réticulation des matrices époxy est de l'ordre de 180°C. Il est donc important que la température de contact outil/matière lors du perçage ne dépasse pas la température de transition vitreuse de la matrice époxy. Ces défauts sont visibles à l'œil nu. [24] montre que cette dégradation thermique est maximale pour une inclinaison entre l'axe des fibres et la direction de coupe de 110°.

#### III.1.1.2 Défauts situés en sortie du trou :

Ce sont généralement des délaminages qui se produisent en sortie de trou. Ils sont dus à l'effort de poussée du foret. En effet, lorsque le foret s'approche des derniers plis du stratifié, la raideur de ce dernier diminue. Lorsque l'effort de poussée dépasse une valeur critique supérieure à l'effort de cohésion entre les couches, il y a décollage de couches et propagations de fissures dans le stratifié. Une contre-plaque (support suffisamment rigide) en sortie de trou ainsi que des conditions de coupe adaptées permettent d'éviter ce type de défaut.

Plusieurs études proposent de prédire l'effort de poussée critique en fonction des paramètres de coupe ( $V_f$ ,  $N$ ), du matériau à percer et de la géométrie d'outil (diamètre de l'outil, etc...). La plupart des auteurs s'accordent pour dire que le facteur qui influence le plus l'effort de poussée est la vitesse d'avance.

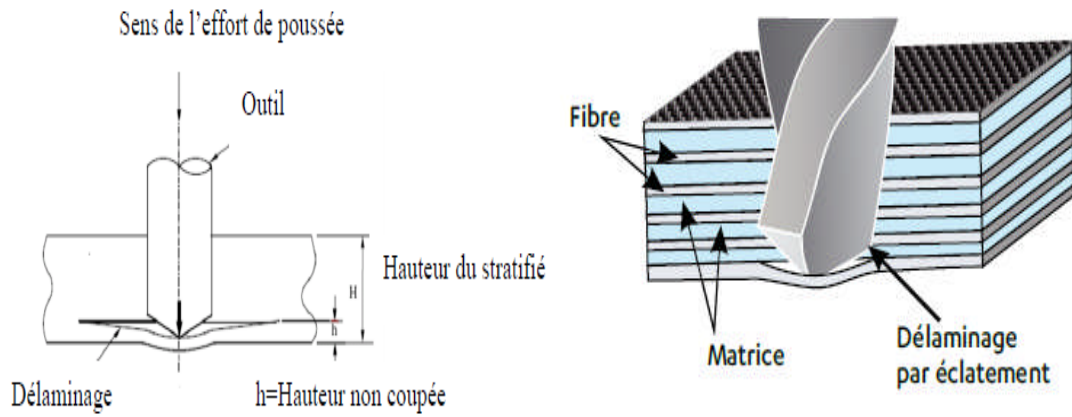


Figure III.12 : Initiation d'un délaminage en sortie du trou

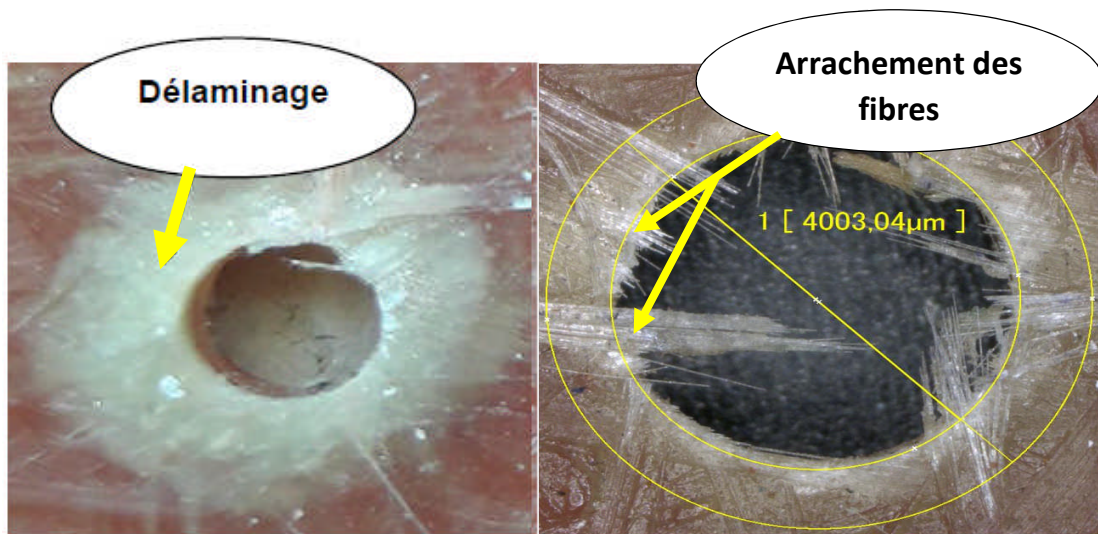


Figure III.13 : Défaut en sortie du trou

Cette étude expérimentale consiste à mettre en évidence des défauts sur le comportement mécanique des plaques composites en la présence des trous moulés préparées par le procédé de moulage au contact. On propose une étude permettant de déterminer respectivement l'influence des conditions de coupe sur la qualité des trous, et l'influence des défauts sur les caractéristiques mécaniques des plaques (résistance à la flexion). Cette étude sera étalée sur les étapes suivantes :

- ✓ Préparation des éprouvettes de flexion en matériau composite pour effectuer des essais de caractérisation statique.
- ✓ Essai de perte au feu (calcination) pour déterminer le taux de fibre.
- ✓ Opération de perçage des trous circulaires sur différentes plaques.
- ✓ L'influence des conditions de coupe sur les défauts (délaminage en sortie des trous)
- ✓ Les essais mécaniques sur les éprouvettes composites munies des trous moulés afin de déterminer leurs comportements mécaniques aux sollicitations statiques par le biais des essais de flexion quatre points.

#### IV.1 Fabrication des plaques en matériau composite polyester/fibre de verre

##### IV.1.1 Matériaux utilisés pour l'étude : [32]

Les matériaux composites utilisés dans cette étude, proviennent de l'entreprise ISELMAN (Ets. AMOKRANE Abdallah). Ils sont principalement destinés à la fabrication des bateaux de pêche et de plaisance (figure IV.1). Les constituants de base de ces matériaux (résine et renfort) sont des produits commerciaux de composition complexe.



**Figure IV.1** : Domaine d'utilisation du matériau composite.

Dans cette étude nous avons gardé la même stratification que celle utilisée par l'entreprise pour la réalisation des coques de bateaux 4,80 m (On utilise quatre plis de renfort de types différents après le gel-Coat : mat 300 g/m<sup>2</sup>, mat 450 g/m<sup>2</sup>, taffetas 800 g/m<sup>2</sup>) comme il est présenté sur la figure IV.2

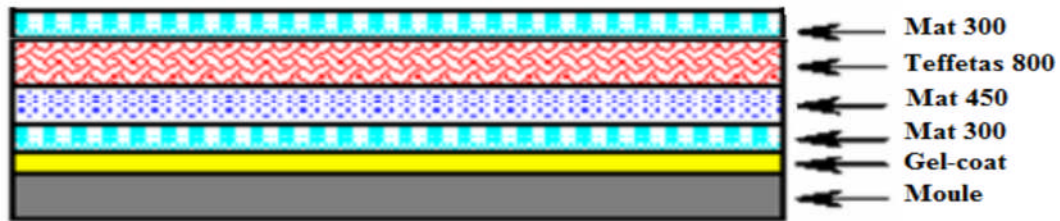


Figure IV.2 : Stratification utilisée par l'entreprise

#### IV.1.2 Constituants de matériaux composites :

Le matériau est constitué d'une matrice de polyester insaturée renforcée par des fibres de verre de type «E».

La résine utilisée de référence industrielle «PRE-63» est préparée préalablement par malaxage avec 2% de catalyseur et 0,006 % d'accélérateur [33]. Pour les renforts, nous avons utilisé les fibres de verre de type E, sous différentes architectures à savoir : mat 300, mat 450 et taffetas 800 (roving 800) qui sont présentés respectivement sur la (figure IV.3). Le taux des fibres est choisi, selon les normes ISO 1268-2, entre le pourcentage de 30 % et 45 %.

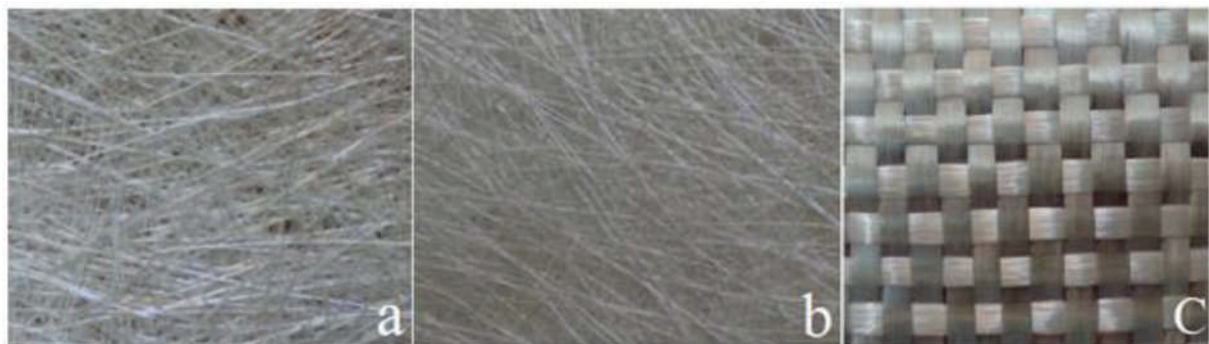
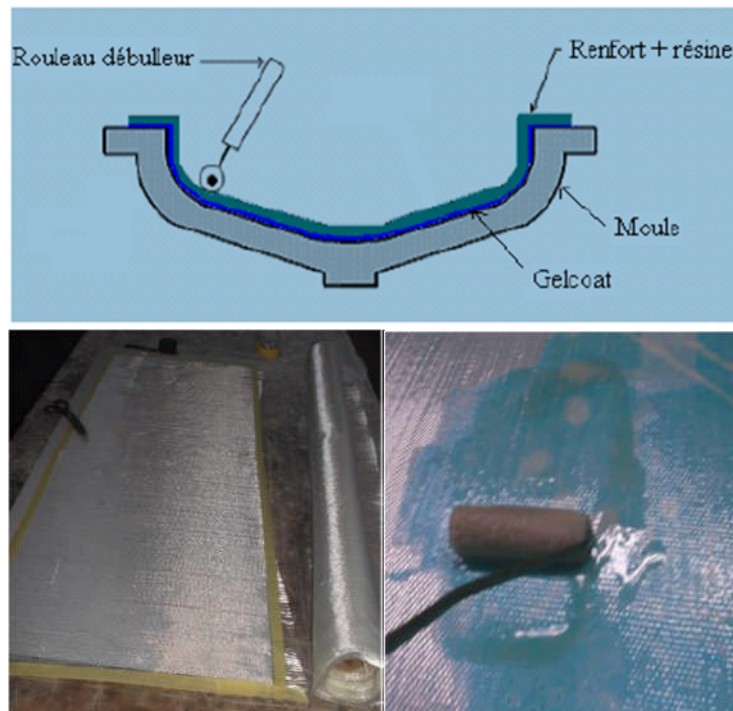


Figure IV.3 : Les différents renforts utilisés

#### VI.1.3 Procédé d'élaboration des matériaux :

Les plaques en matériaux composites ayant servi au découpage des éprouvettes sont obtenues par le même procédé de fabrication que celui utilisé pour les bateaux de pêche, à savoir, le moulage au contact (figure IV.4).



**Figure IV.4 :** Préparation des plaques composites par le procédé de moulage au contact.

Le procédé est manuel, On applique une cire (norpol FI-180-10) sur une plaque lisse et rigide (moule) pour faciliter le démoulage de la plaque. Puis on applique une couche colorée de gel-coat d'épaisseur ( $0,28 \pm 0,05$ ) mm sur le moule à l'aide d'un pistolet. Après 12 heures environ, on étale une première couche imbibée de résine (mélangée à 3% du durcisseur). Les plis sont posés l'un après l'autre, chaque pli est soigneusement imprégné de résine par l'utilisation d'un rouleau d'ébulleur pour chasser les bulles d'air jusqu'à obtention de la séquence désirée. Après conditionnement à température ambiante pendant 24 heures, les plaques sont démoulées et subissent par la suite une post-cuisson à température ambiante.

#### IV.1.4 Matériaux élaborés

Nous avons élaboré les plaques stratifiées telles qu'elles sont présentées dans le tableau IV.1. Les positions des plis sont comme suit : Gel-coat + mat 300 + mat 450 + taffetas 800 + mat 300 (Dénomme VG) : Viège Gel-coat )

Lot	Ordre des plis
VG	Gel coat-300-450-800-300

**Tableau IV.1 :** Lot de l'éprouvette essayé

## IV.2 Fabrication des éprouvettes en matériaux composites

Selon les normes ASTM 5045, il est recommandé d'utiliser le disque en diamant pour découper les plaques en résine renforcée des fibres de verre. Les éprouvettes sont découpées en forme droite à l'aide d'une Scie à disque diamanté sous un jet d'eau. Après la découpe, les éprouvettes sont ébavurées un léger ponçage, puis nettoyées.



Figure IV.5 : Scie à disque diamanté

### ➤ Géométrie des éprouvettes de flexion

Les dimensions des éprouvettes utilisées pour les essais de flexion quatre points (figure IV .6) ont été choisies selon la norme NF EN ISO 178, ASTM D 790 [24]. C'est-à-dire :

$$L = 16h + 20 (\pm 1) \text{ mm}$$
$$10 < b \leq 15 \text{ mm} \quad \text{pour } h \leq 5 \text{ mm}$$

- L : longueur de l'éprouvette.
- b : largeur.
- h : épaisseur.
- D : 4, 6 et 8 mm

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

- $h_m = 1/3(h_1+h_2+h_3)$
- $b_m = 1/3(b_1+b_2+b_3)$
- $L = 16h + 20 (\pm 1) \text{ mm}$
- $D = 4, 6 \text{ et } 8 \text{ mm}$

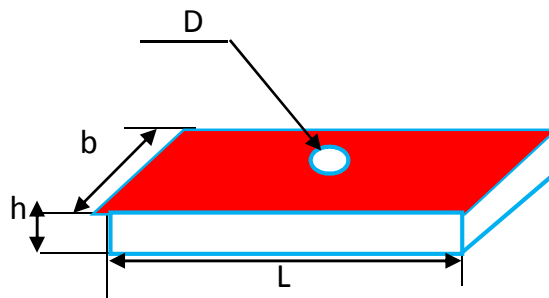


Figure IV.6 : Géométrie des éprouvettes

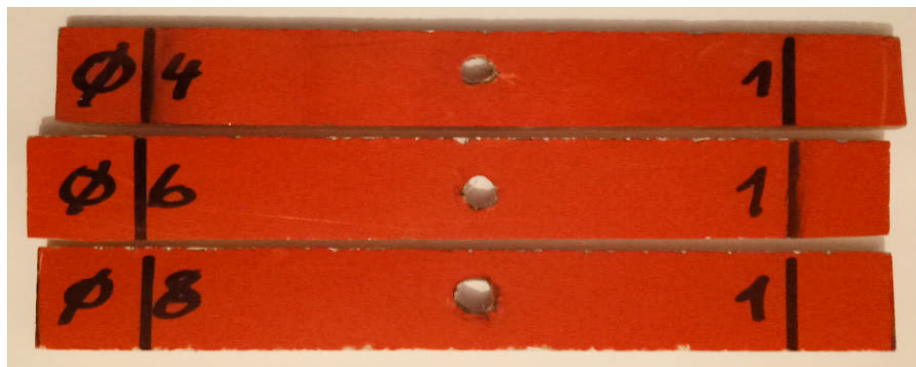


Figure IV.7 : éprouvettes avec trous moulée (4, 6 et 8mm)

### IV.3 Essai de perte au feu (calcination)

La calcination est une technique utilisée dans le but de déterminer le pourcentage de fibres de verre en masse et celui de la résine et permet aussi de voir l'architecture des fibres dans chaque type de matériau composite étudié.

#### IV.3.1 Principe de l'essai :

Nous avons effectué des essais de perte au feu pour le lot VG(A) : Viège Gel coat test « A ». Les échantillons sont pesés à sec et placés dans des creusets préalablement pesés, le tout est placé dans un four dans lequel la température évolue de 25°C à 1100°C. L'essai est réalisé à 650°C, température pour laquelle la résine est entièrement calcinée (environ 30 mn), l'ensemble est alors mis dans le dessiccateur, nous le laissons refroidir pendant 30min. Les creusets et les fibres de verre sont pesés.

#### IV.3.2 Matériel utilisé :

- Creuset pour mettre les échantillons dedans (Figure IV.8.a)
- Un four dont la température est réglé à 650° C (Figure IV.8.b)
- Une balance de précision 10<sup>-4</sup> g (Figure IV.8.c)

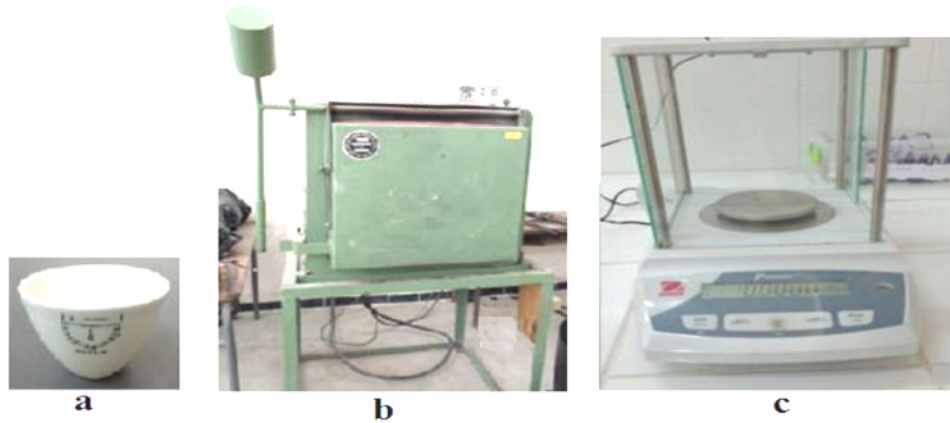


Figure IV.8 : (a) Creuset, (b) Four, (c) balance de précision

### IV.3.2 Déroulement de l'essai

Nous pesons à vide les creusets, en suite nous les pesons avec les échantillons et on les met dans un four réglé à une température suffisante pour la calcination entière de la résine, soit 650° C, pendant 30 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. Après calcination, il restera juste les fibres et la cendre du gel-coat.

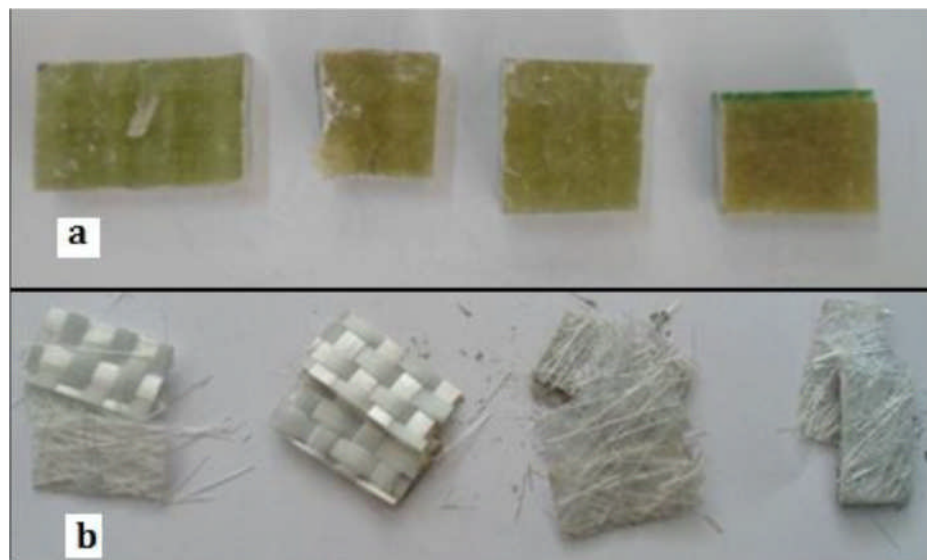


Figure IV.9 : a) Echantillons avant calcination, b) Echantillons après calcination

Le taux massique des fibres et de la matrice est calculé comme suit :

$$Mf(\%) = \left(1 - \frac{Me-mf}{Me}\right) \times 100 \quad (V.01)$$

$$Mm(\%) = \left(\frac{Me-mf}{Me}\right) \times 100 \quad (V.02)$$

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

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

$mf$ : Masse des fibres + la cendre de gel coat .

$Mm(\%)$  : Fractions massique de la matrice

$$Mm(\%) = 100 - Mf(\%) \quad (V.03)$$

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

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

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

<i>Lots</i>	<i>Creuset</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>Moyenne</i>
$VG_{(A)}$	<i>A vide</i>	18,8604	17,4136	14,7403	17,4581	
	<i>Avant calcination</i>	22,6248	21,3918	18,6563	21,3180	
	<i>Après calcination</i>	20,2319	18,8151	16,1616	18,9267	
	$Mf(\%)$	36,4334	35,2295	36,2946	38,0476	36,5013

**Tableau IV.2:** Résultats des essais de perte au feu du lot vierge VG

## IV.4 Perçage

### IV.4.1 Dispositif de perçage

Etant donnée, que l'objectif principal de ce travail est d'étudier les effets du perçage comme étant un élément géométrique de structure. Les paramètres à prendre en compte sont :

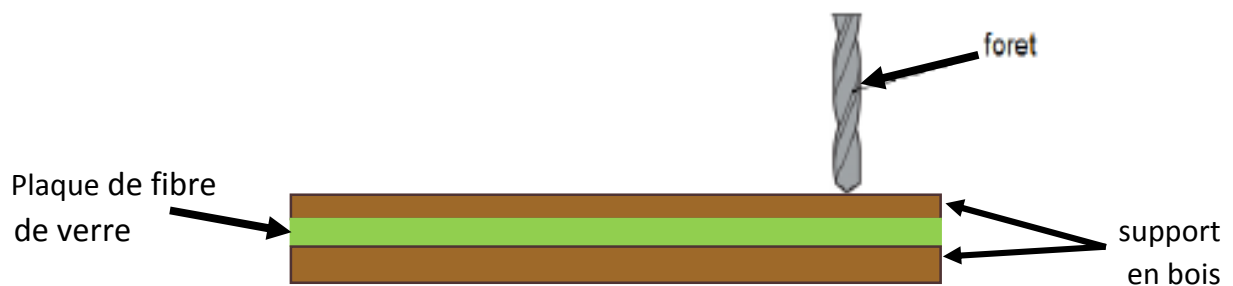
- Diamètre du foret
- Le nombre de tours/min
- Vitesse d'avance

Quant aux forêts (en acier rapide), trois diamètres ont été utilisée 4-6 et 8mm. Le nombre de tours/min et la vitesse d'avance sont des éléments très important dans le paramétrage de l'opération de perçage, trois vitesses de rotation ont été choisi, une vitesse maximale de 1000 tr/min, une vitesse moyenne de 710 tr/min et une vitesse maximale d'une valeur de 180 tr/min. Pour les avances, trois vitesses ont été choisi, une maximale de 250 mm/min, une moyenne de 50 mm/min et une minimale d'une valeur de 16 mm/min.



**Figure IV.10 :** foret hélicoïdale utilisée (acier rapide)

Tenant compte de la sensibilité du composite à l'usinage, et de l'épaisseur très fine des plaques, un dispositif de montage pour perçage a été conçu pour de maintenir la plaque en totalité sans subir une pression localisée ou un serrage qui peuvent endommager la plaque.



**Figure IV.11 :** Dispositif de perçage.

#### IV.4.2 Fraiseuse

Une fraiseuse est une machine-outil utilisée pour usiner tout type de pièces mécaniques, à l'unité ou en série, par enlèvement de matière à partir de blocs ou parfois d'ébauches estampées ou moulées, à l'aide d'un outil coupant nommé fraise. En dehors de cet outil qui lui a donné son nom, une fraiseuse peut également être équipée de foret, de taraud ou d'alésoir.



**Figure IV.12 :** fraiseuse verticale semi-automatique

La fraise munie de dents est mise en rotation et taille la matière grâce à sa rotation et au mouvement relatif de la fraise par rapport à la pièce. La forme de la fraise est variable ; elle peut être cylindrique, torique, conique, hémisphérique ou quelquefois de forme encore plus complexe. La fraise et la pièce sont montées sur des glissières et peuvent se déplacer relativement suivant des coordonnées X Y ou Z (on parle alors de fraiseuse trois axes). Par convention, l'axe Z est l'axe de rotation de la broche, les axes X et Y sont contenus dans un plan perpendiculaire à Z. Les axes de rotation A B et C ont respectivement axes sur X, Y ou Z. Il existe des fraiseuses à quatre axes ou cinq axes. Les caractéristiques physiques de la fraise, sa vitesse de rotation, son avance, dépendent de la matière à usiner, de la profondeur de travail et de la coupe. On utilise principalement le carbure de tungstène recouvert de revêtements résistant à l'abrasion du copeau.

On distingue les fraiseuses manuelles où les mouvements sont commandés par le "fraiseur", les fraiseuses à apprentissage qui peuvent répéter les mouvements donnés une fois par l'opérateur (enregistrement des mouvements) et les fraiseuses à commande numérique où sont enregistrés des ordres de mouvement d'outil pour usiner une pièce complexe (pilotée par un programme informatique en langage ISO).

elles sont équipées d'un organe de contrôle informatique (automate programmable ou base PC) lui-même relié à un réseau. La CAO associée à la fabrication se nomme FAO ou CFAO.

#### IV.5 Microscope optique

Les observations microscopiques ont été menées au moyen d'un microscope optique de type « Keyence VHX-1000 » qui est un outil polyvalent , grâce à son jeu d'optiques très complet (20x-200x, 100x-1000x, 500x-5000x) et à ses différentes configurations possibles (éclairage par réflexion inclinable, fond clair/fond sombre ; éclairage par transmission), permet de faire des images de grande qualité sur des échantillons très variés tels que des matériaux composites, des métaux, des fibres végétales, ou encore des insectes. Il permet également l'analyse de la rugosité de surface et de sa reconstitution tridimensionnelle.

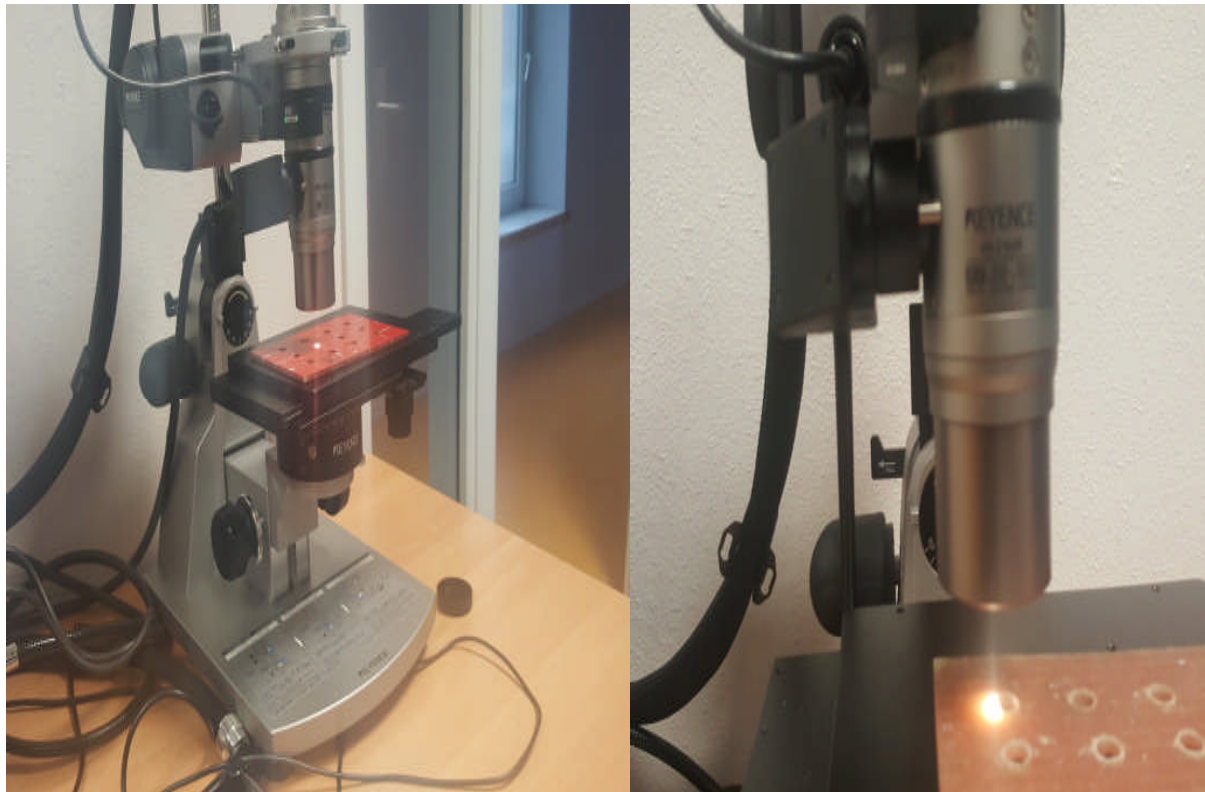


Figure IV.13 : Microscope-optique

## IV.6 L'influence des conditions de coupe sur le délaminage en sortie de trou

### IV.6.1 L'influence de la vitesse de rotation

#### ❖ Observation macroscopique :

Une campagne d'essais a été faite sur des plaques en composite avec trois différentes vitesses de rotation (180, 710 et 1000 tr/min), ces vitesses de rotation sont choisies en fonction de la disponibilité des gammes de vitesse des machines disponibles au niveau du Hall de Technologie de Oued Aissi.

#### ➤ Résultats obtenus :

Les figures suivantes illustrent l'effet de la vitesse de rotation sur le délaminage (fibre de verre /polyester), En variant la vitesse de rotation et en fixant l'avance à  $V_f=250$  mm/min.

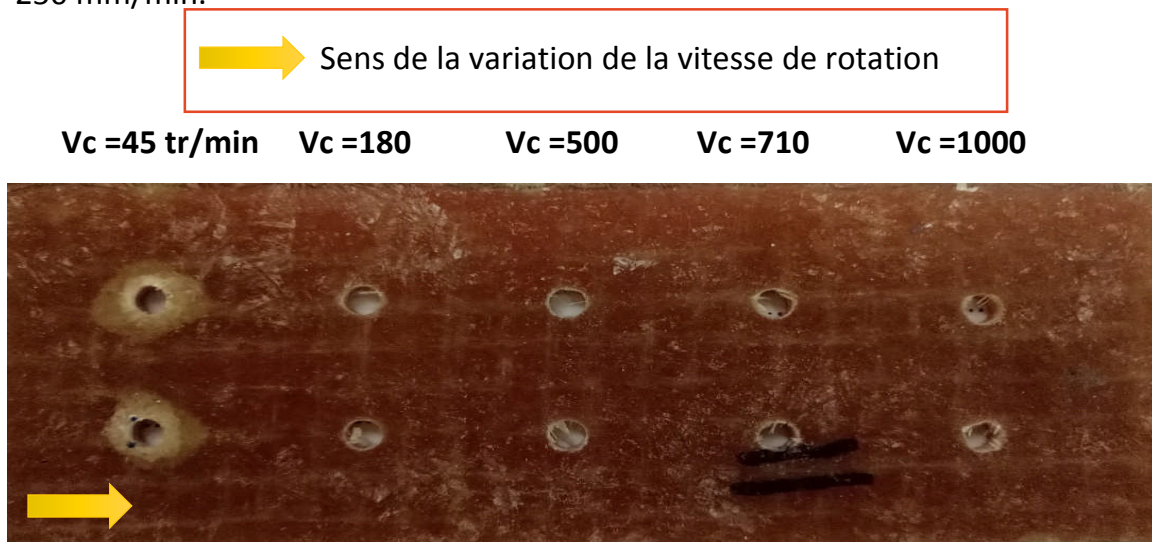


Figure IV.14 : perçage au diamètre 4mm avec vitesse d'avance  $C_{ste} = 250$ mm/min

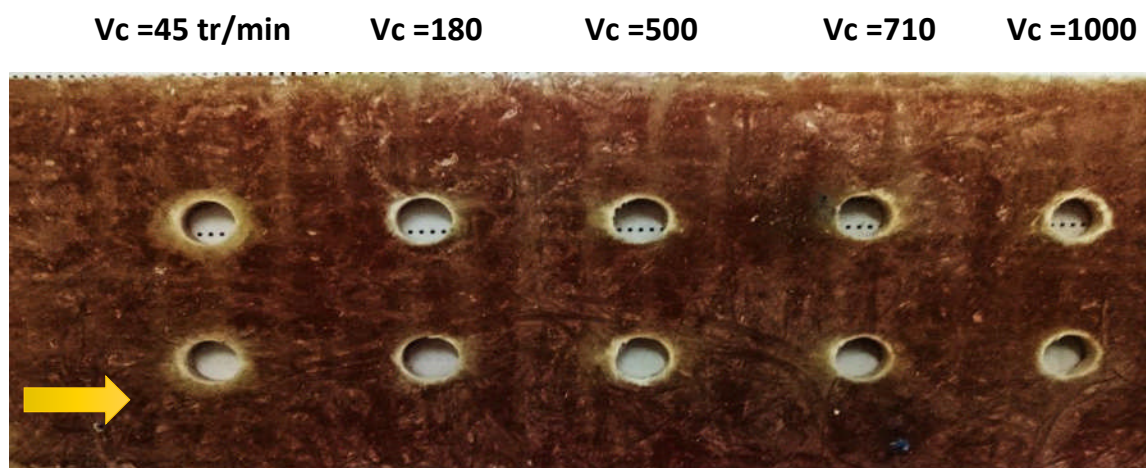
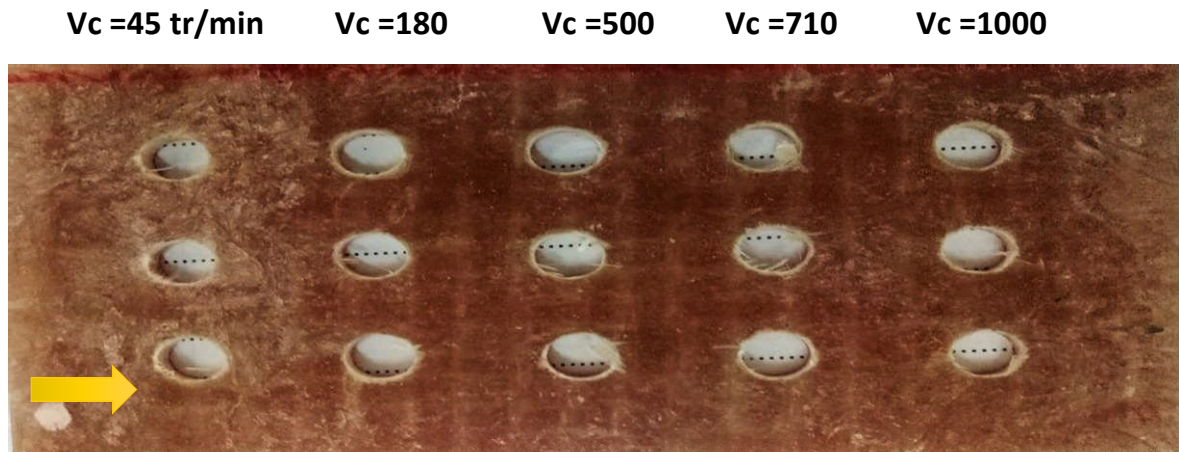


Figure IV.15 : perçage au diamètre 6mm avec vitesse d'avance  $C_{ste} = 250$ mm/min



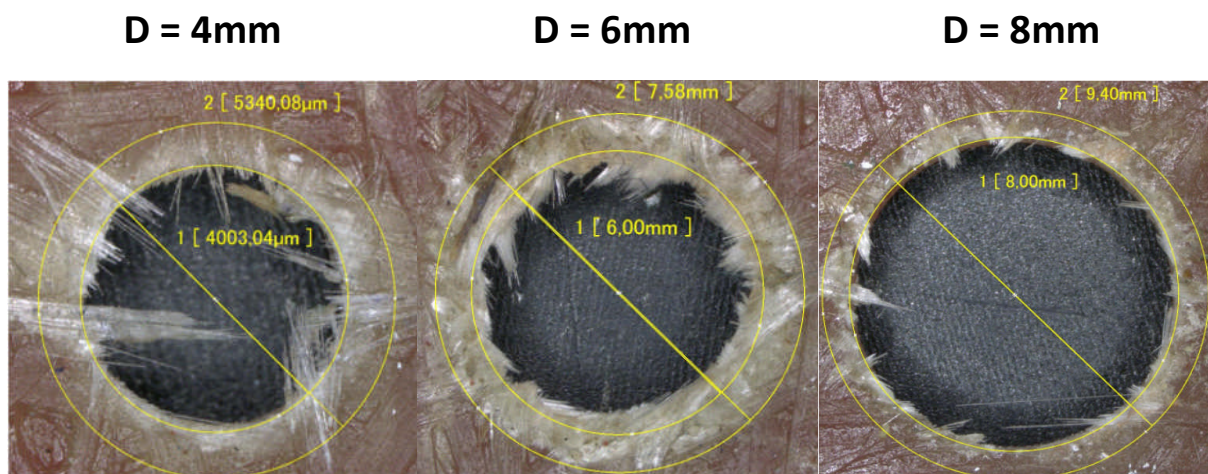
**Figure IV.16** : perçage au diamètre 8mm avec vitesse d'avance Cste = 250mm/min

➤ **Interprétation des résultats obtenus :**

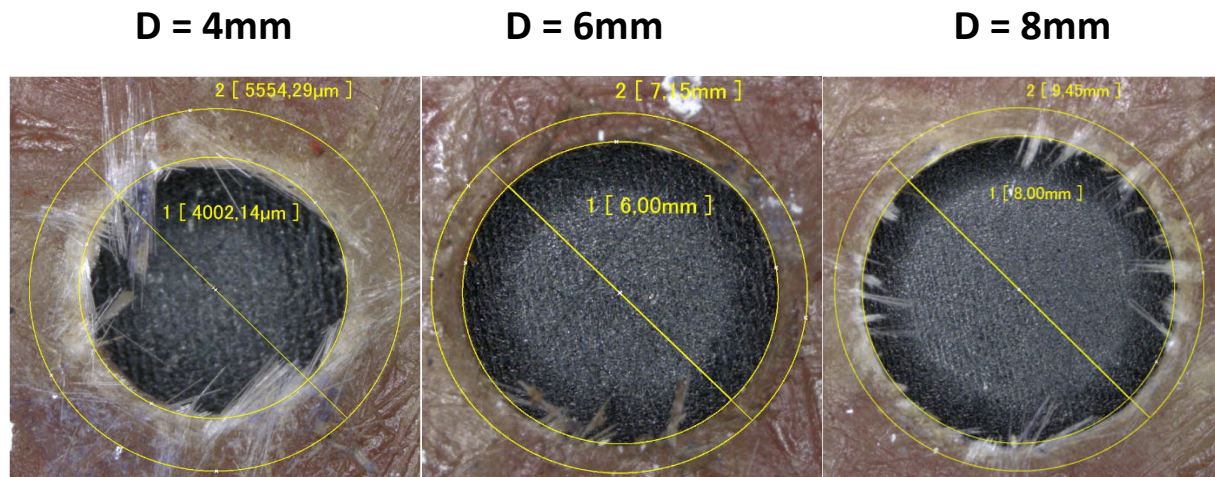
Nous constatons à travers ces précédente plaques percées que la taille du délaminage diminue lorsque la vitesse de rotation augmente, mais aussi le diamètre du trou et ça conséquence non négligeable sur le délaminage, plus celui-ci est grand plus le délaminage est moins important.

❖ **Observation microscopique :**

Les figures suivantes montrent l'effet de la vitesse de rotation sur le délaminage (fibre de verre /polyester) à 180 et 1000 tr/min, avec une un foret hélicoïdal.



**Figure IV.17** : perçage à 180 tr/min et vitesse d'avance de 250mm/min



**Figure IV.18** : perçage à 1000 tr/min et vitesse d'avance de 250mm/min

Les figures IV.17 et IV.18 observée par le microscope optique nous confirme en effet que l'air du délaminage diminue lorsque la vitesse de rotation augmente.

#### IV.6.2 L'influence de la vitesse d'avance

##### ❖ Observation macroscopique :

Les figures suivantes illustrent l'effet de la vitesse d'avance sur le délaminage (fibre de verre /polyester), En variant les vitesses d'avance et en fixant la rotation à  $V_c=180$  tr/min.

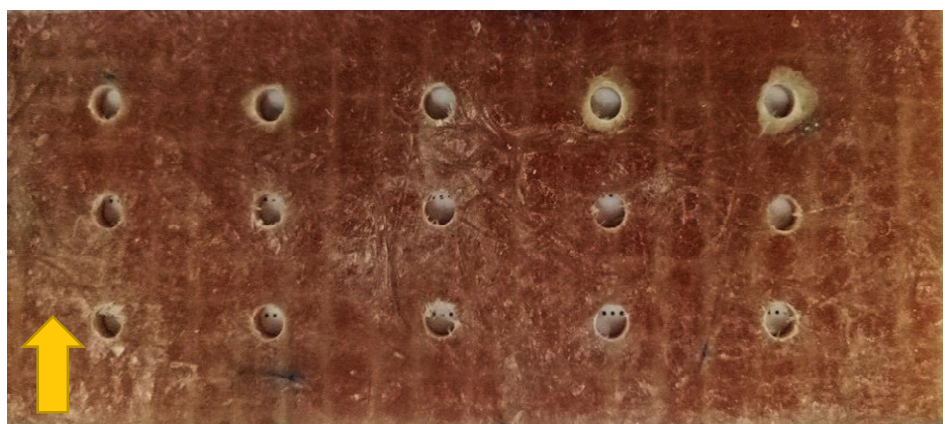


Sens de la variation de la vitesse de d'avance de 16mm/min à 250mm/min

$V_f = 250$  mm/min

$V_f = 50$  mm/min

$V_f = 16$  mm/min



**Figure IV.19** : perçage au diamètre 4mm avec  $V_c = 180$  tr/min

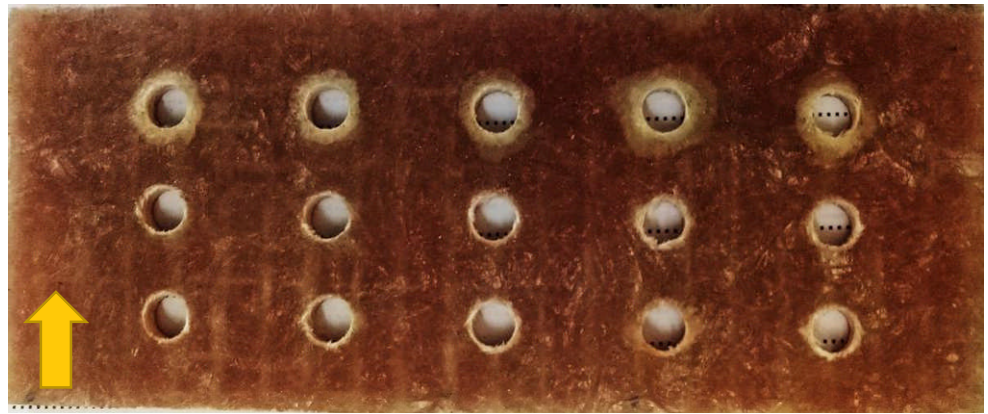
$V_a = 250\text{mm/min}$  $V_a = 50\text{mm/min}$  $V_a = 16\text{mm/min}$ 

Figure IV.20 : perçage au diamètre 6mm avec  $V_c=180$  tr/min

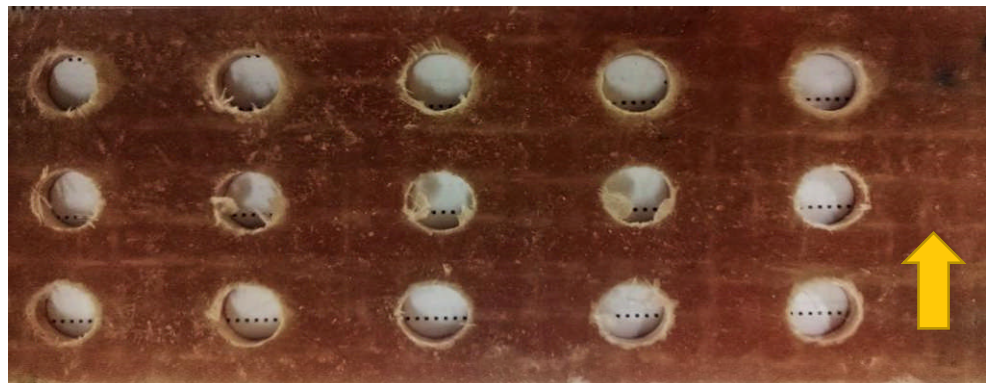
 $V_a = 250\text{mm/min}$  $V_a = 50\text{mm/min}$  $V_a = 16\text{mm/min}$ 

Figure IV.21 : perçage au diamètre 6mm avec  $V_c=180$  tr/min

➤ **Interprétation des résultats obtenus :**

De la même façon, nous constatons ici que la vitesse d'avance est un facteur très important dans le choix des conditions de coupe. En effet, on a déduit que lorsque celle-ci est élevée l'air de délaminage sera plus important.

❖ **Observation microscopique :**

Les figures IV.22 à IV.24 montrent l'effet de la vitesse d'avance sur le délaminage.

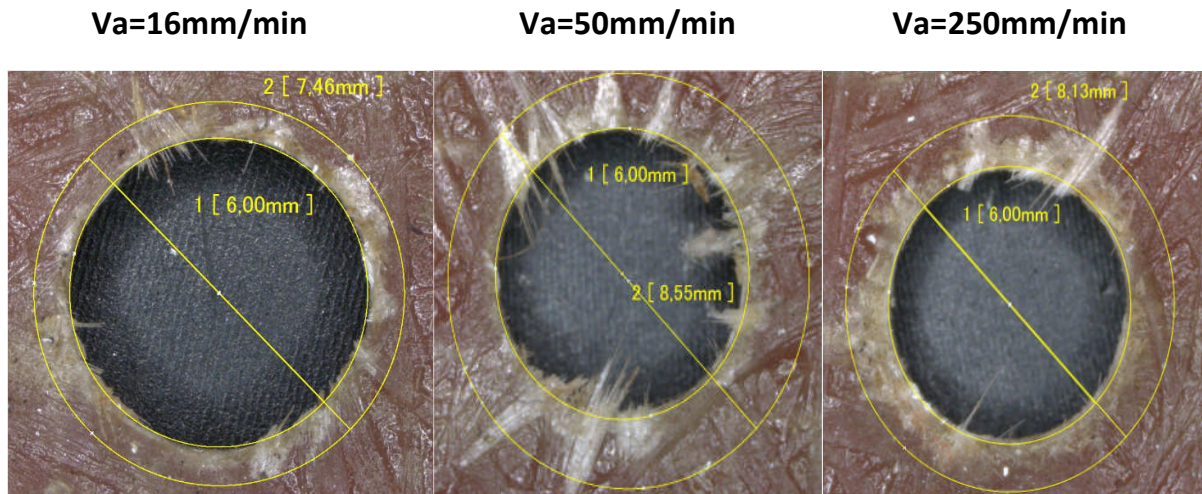


Figure IV.22 : perçage à 180 tr/min en variation de vitesse d'avance

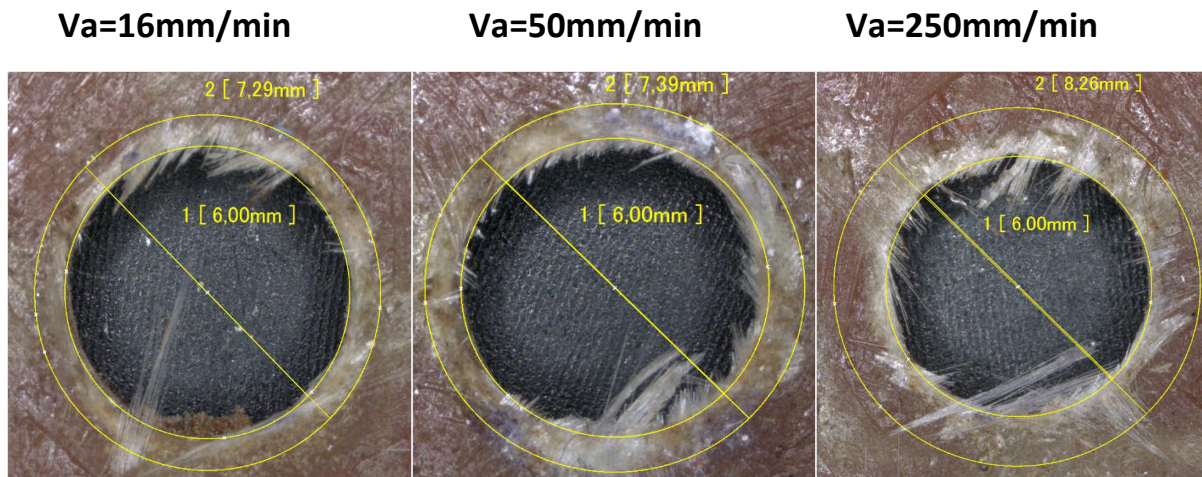


Figure IV.23 : perçage à 710 tr/min en variation de vitesse d'avance

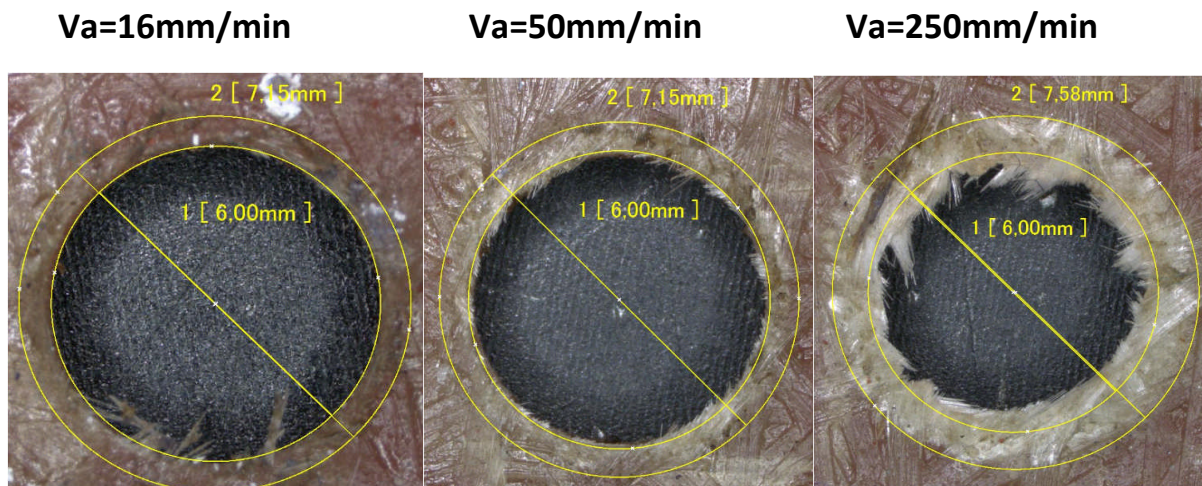


Figure IV.24 : perçage à 1000 tr/min en variation de vitesse d'avance

L'observation microscopique de ces trois figures ci-dessus nous confirme effectivement les résultats discutés auparavant, en effet nous pouvons dire clairement que l'air du délaminage diminue lorsque la vitesse d'avance diminue.

Enfin, nous estimons que la combinaison idéale des conditions de coupe lors du perçage d'un matériau composite de type « verre E / polyester » sont les suivantes, une vitesse de coupe plus ou moins élevée et une vitesse d'avance réduite, en l'occurrence ( $N=1000\text{tr/min}$ ,  $V_a=16\text{mm/min}$ )

### **IV.7 Essai statique en flexion quatre points**

Nous nous intéressons à la détermination des propriétés mécaniques telle que la force maximale  $P_r$ , la flèche à la rupture  $F_r$ , ainsi qu'au profil du comportement du matériau.

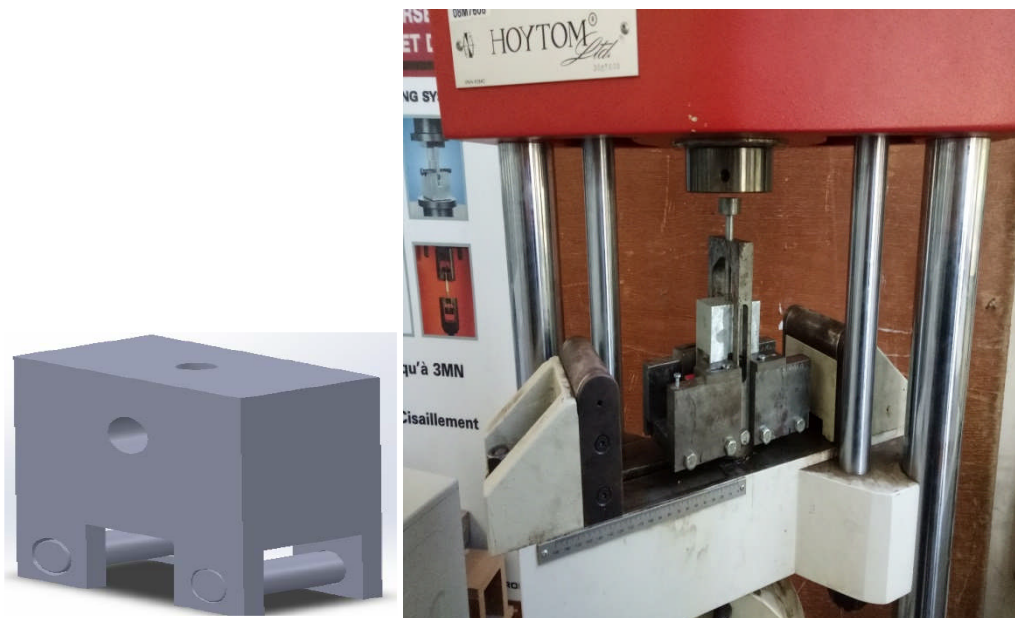
#### **IV.7.1 Machine d'essai :**

Les essais de flexion sont réalisés sur une machine de flexion de type HOYTOM (figure IV.25). C'est une machine universelle qui peut effectuer sans encombre la traction, la compression et la flexion, avec bien sûr changement de mors qui se montent et démontent facilement, elle est dotée d'une cellule de charge d'une capacité de 50 KN, accompagnée par des vitesses de chargement qui varient de 1 à 500 mm/min contrôlées automatiquement. Elle est constituée essentiellement d'une traverse inférieure fixe et d'une traverse supérieure mobile entraînée par deux vis sans fin, misent en rotation par un moteur électrique situé dans le compartiment supérieur sur laquelle se trouvent les capteurs servant à mesurer la force appliquée sur l'éprouvette ainsi que le déplacement au cours de l'essai qui seront projetées directement sur l'écran d'un ordinateur lié à la machine. Sur chacune des traverses se trouvent des mors permettant de fixer l'éprouvette. Nous avons effectué des essais de flexion à trois vitesses qui sont : 3, 4 et 5 mm/min en fonction de l'épaisseur de l'éprouvette  $h$ , et à une température ambiante d'environ 20°C.



**Figure IV.25 :** machine de flexion type HOYTOM

Pour accomplir l'essai de flexion à quatre points nous avons utilisé un dispositif d'application des efforts (figure IV.26).



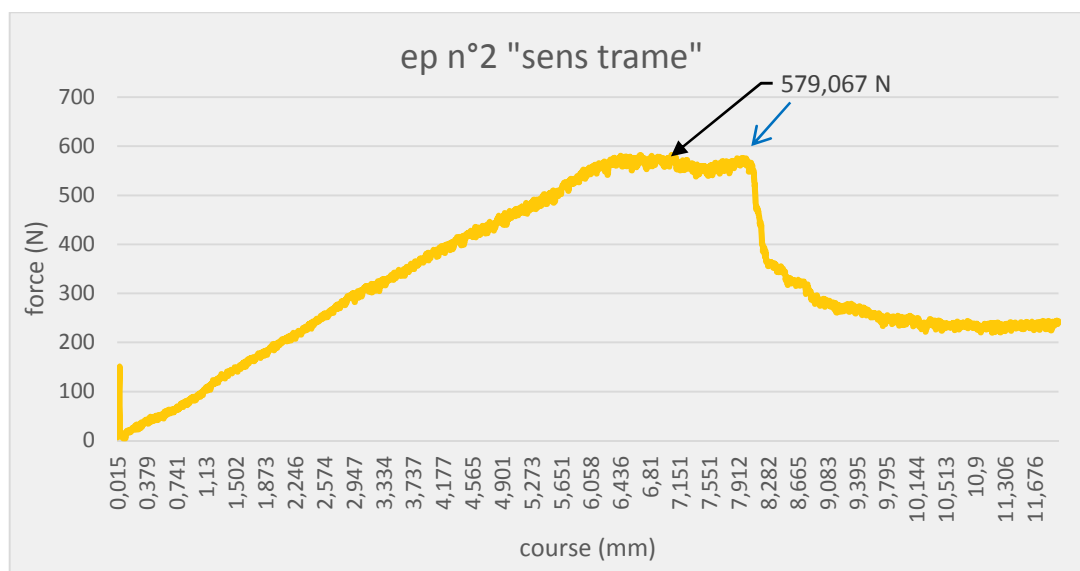
**Figure IV.26 :** dispositif de flexion quatre points

### IV.7.2 Résultats obtenus pour l'essai de flexion

Nous avons découpé plusieurs éprouvettes sur lesquelles des trous ont été moulés dans le but d'établir une comparaison avec des éprouvettes à trous usinés et l'influence sur le comportement mécanique de la plaque. Ceci pour. Pour cela, nous avons effectué l'essai de flexion quatre points pour chaque diamètre (4-6-8mm). Toutefois, nous avons réalisé des essais de flexion sur des éprouvettes vierges (en l'absence de trou) afin d'avoir une référence. Concernant les éprouvettes vierges nous avons effectué des essais de flexion quatre point sur 6 éprouvettes, 3 dont le sens de l'orientation des fibres est dans le sens des trames et 3 autres dont de l'orientation des fibres est dans le sens des chaînes.

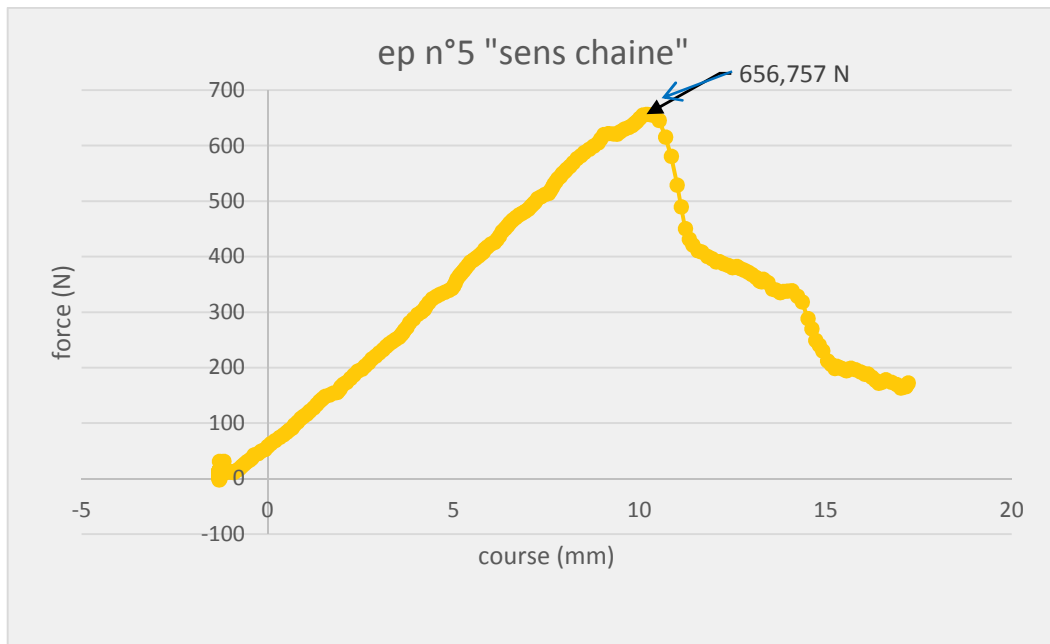
Les résultats obtenus sont présentée par les courbes suivantes :

#### ❖ Éprouvettes vierge (sens d'orientation des fibres : trame/chaîne)



**Figure IV.27** : Courbe de flexion 4 points sur l'éprouvette vierge 2 (force/course)

L'éprouvette n°(2) est soumise à une force de flexion maximale de 579,067 (N), avec une course du vérin de la machine égale à 11,728 (mm) ce qui nous donne une flèche maximale de 5,976 (mm).



**Figure IV.28** : Courbe de flexion 4 points sur l'éprouvette vierge 5 (force/course)

L'éprouvette n°(5) est soumise à une force de flexion maximale de 656,757 (N), avec une course du vérin de la machine égale à 12,641 (mm) ce qui nous donne une flèche maximale de 7,418 (mm).

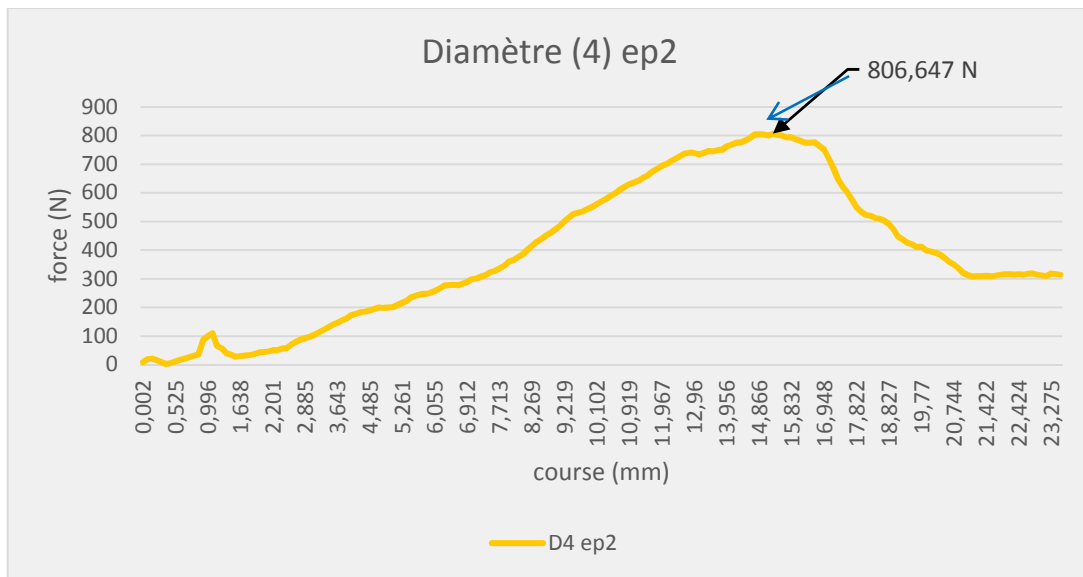
#### ❖ Discussion des résultats

Le comportement mécanique dans le cas des éprouvettes vierge à travers les courbes force-course (figures IV.27 et IV.28) par l'évolution de l'effort en fonction des déplacements présente une tendance globale non linéaire. On observe une grande dispersion au niveau de l'effort de rupture, le déplacement jusqu'à la rupture.

La force maximale correspond à un niveau de chargement qui varie entre 500 et 700 N. Vers la fin, les courbes présentent des pics qui correspondent probablement à propagation des fissures transverses de la matrice, ou de la rupture des interfaces fibres matrices.

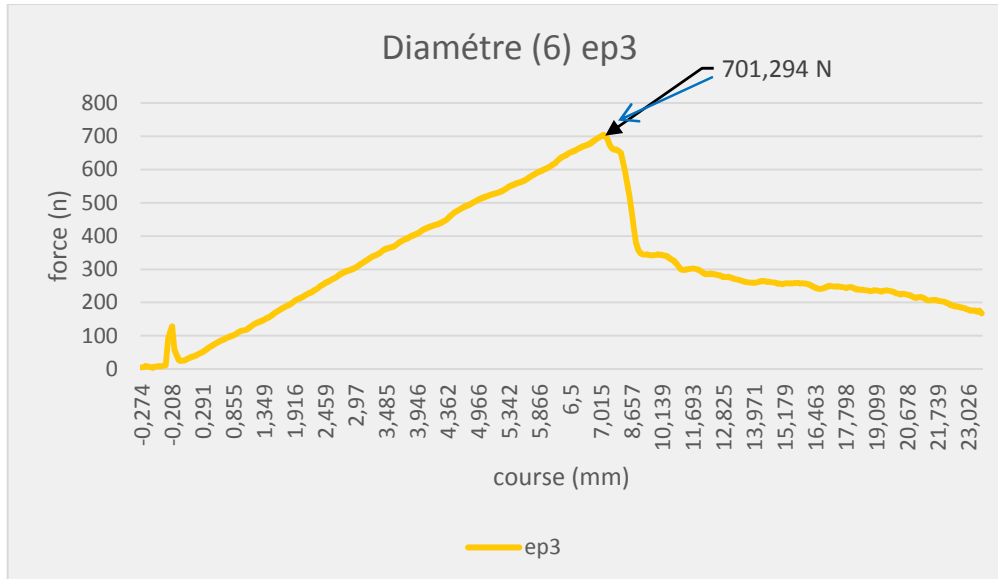
Le comportement non linéaire est typique aux matériaux composites. C'est en général, la conséquence de l'endommagement qui s'opère au sein du matériau, qui engendre des déformations non élastiques. Plusieurs mécanismes d'endommagement sont à considérer, principalement c'est la fissuration de la matrice et la rupture des interfaces fibres/matrice qui conduisent au déchaussement et à la rupture des fibres.

## ❖ Éprouvettes avec trous moulés de diamètre (4-6 et 8 mm)



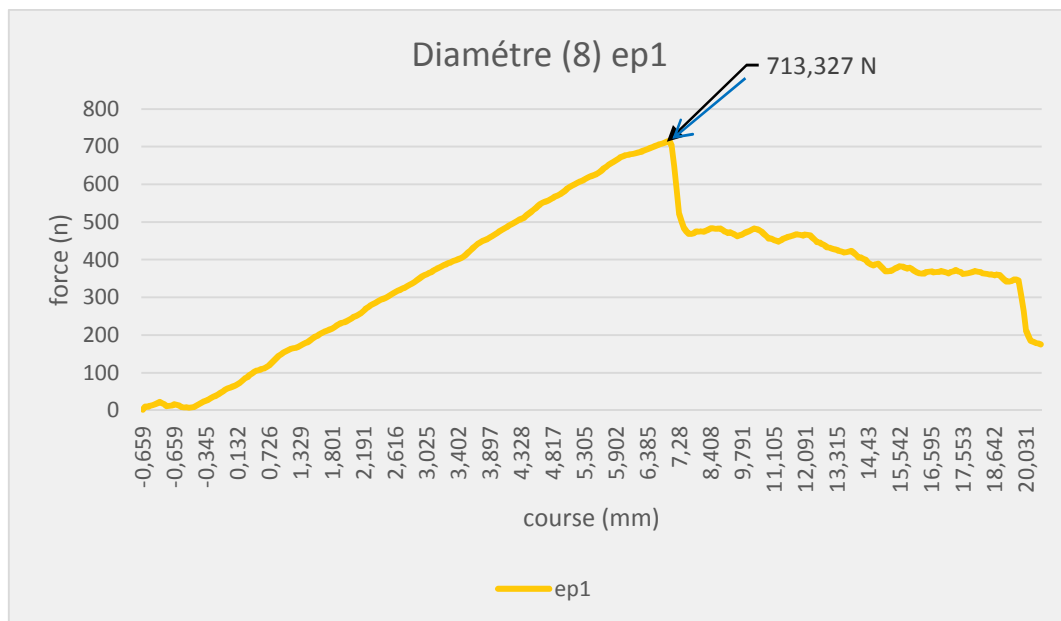
**Figure IV.29 :** Courbe de flexion 4 points sur l'éprouvette moulée D4-2 (force/course)

L'éprouvette (D4-2) est soumise à une force de flexion maximale de 806,647 (N), avec une course du vérin de la machine égale à 23,529 (mm) ce qui nous donne une flèche maximale de 11,058 (mm).



**Figure IV.30 :** Courbe de flexion 4 points sur l'éprouvette moulée D6-3 (force/course)

L'éprouvette (D6-3) est soumise à une force de flexion maximale de 701,294 (N), avec une course du vérin de la machine égale à 23,026 (mm) ce qui nous donne une flèche maximale de 11,067 (mm).



**Figure IV.31 :** Courbe de flexion 4 points sur l'éprouvette moulée D8-1 (force/course)

L'éprouvette (D8-1) est soumise à une force de flexion maximale de 713,327 (N), avec une course du vérin de la machine égale à 20,031 (mm) ce qui nous donne une flèche maximale de 14,706 (mm).

#### ❖ Discussion des résultats

Au cours des essais de flexion sur les éprouvettes avec trous moulés nous avons obtenus différents résultats, on constate bien que les éprouvettes avec trous moulés subissent une contrainte beaucoup plus importante que celles des éprouvettes vierges, à titre d'exemple l'éprouvette vierge a subi une force maximale de 656,757 (N), Alors que les éprouvettes avec trou moulés avec différents diamètres à savoir 4,6 et 8 mm subissent une force maximale qui se situe entre 700 et 800 (N), il est aussi intéressant de rappeler en terme de comparaison que les essais de flexion quatre points faits par [32] sur des éprouvettes issu du même matériau, mais ayant des trous usinée (percée) ont menés à des résultats montrant que la forces maximale supporté par les éprouvettes dans leur cas est environ égal à 500 (N), Ce qui nous ramène à dire que les éprouvettes dont les trous sont obtenus avec moulage ont une résistance à la flexion nettement meilleur que ceux réaliser avec usinage. Cela peut être expliqué par la concentration des fibres aux alentours des trous moulés qui jouent un rôle crucial dans la tenue mécanique lors de ces essais de flexions, l'autre raison est que les fibres dans le cas des trous moulés ne sont pas coupées contrairement aux cas des trous usinés.

## Conclusion générale et perspectives

Le travail de ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'une étude qui vise le comportement mécanique des éprouvettes verre-polyester, notre contribution se résume à l'analyse des effets du perçage sur le comportement en flexion statique du pli à renfort de verre. Ce travail a pour but de rechercher toute la littérature concernant les matériaux composites à savoir notamment leurs composants de base avec leurs caractéristiques, leurs modes de fabrication ainsi que leurs domaines d'utilisation et aussi une étude sur l'usinage (perçage) des matériaux composites à fibre de verre/polyester.

Le processus de perçage dépend en grande partie des paramètres de coupe (avance, nombre de tours/min et diamètre de foret).

En ce qui concerne le perçage des plaques en composite verre E/ polyester, nous avons constaté que deux paramètres fondamentaux sont pris en considération il s'agit de la vitesse de coupe et le vitesse d'avance, néanmoins nous avons utilisé des supports en bois, un support supérieur qui a pour but de guidé le foret agissant tel un canon de perçage et réduire la force d'attaque du bec de l'outil en acier rapide qui risque d'endommager la plaque à l'entrée du trou, un support inférieur est mis en place pour but d'augmenter les rigidité inférieure afin d'éviter le délaminage par éclatement et ainsi permettre les dégagements propres de l'outil

La recherche bibliographique effectuée a permis d'identifier les propriétés mécaniques des constituants et de comprendre les défauts engendrés lors d'opération de perçage des matériaux composites qui se résument généralement à trois zones, Il s'agit de défauts d'entrée, de paroi et de sortie de trou.

L'étude expérimentale est portée sur l'influence des paramètres d'usinage des trous sur le comportement mécanique des éprouvettes. Ainsi que le procédé d'obtention des trous à savoir des éprouvettes pour les essais de flexion avec des trous moulés. Il s'agit de fixer les éprouvettes sur notre dispositif et d'appliquer deux charges à côté du trou à une distance de 45mm entre les deux appuis, puis analyser les différentes forces de flexion supportées par chaque éprouvette (essai de flexion quatre points). Cette analyse a permis de prouver que le procédé de moulage pour

l'obtention des trous est bien meilleur que l'usinage (perçage), ceci est dû principalement à la concentration des fibres (non coupées) au voisinage du trou, ce qui lui confère une résistance supérieure à celle avec des trous usinés.

Les perspectives de ce travail qui peuvent être envisagées vis-à-vis le perçage sont :

- Etude des efforts de coupe à l'aide des machines adaptées (fraiseuse ou perceuse à table dynamométrique).
- L'utilisation des outils dédiés à l'usinage des matériaux composites.
- L'utilisation des lubrifiants spécialement conçus pour les composites, ainsi accroître la durée de vie des outils.
- L'observation des défauts engendrés lors de l'usinage avec un microscope électronique à balayage afin de mieux quantifier ces défauts notamment au niveau de la paroi du trou.
- Optimisation des conditions de coupe pour chaque diamètre.

## Références bibliographiques

- [1]. **Jean-Marie Berthelot**, *Matériaux composites « comportement mécanique et analyse des Structures »*, Édition TEC et DOC, 1999.
- [2]. **Centre d'animation régional en matériaux avancés C.A.R.M.A.** : « *Glossaire des matériaux composites* » actualisation octobre 2006.
- [3]. **L. Berreur, B. d. Maillard, and S. Nosperger**, “ *L’industrie française des matériaux composites*”, *Ministre de l’économie des finances et de l’industrie*, 2002.
- [4]. **B. E. H. LY**, “*Nouveaux matériaux composite thermoformables à base de fibre de cellulose*” *INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRONOBLE*, 2008.
- [5]. **Laurent Gornet**, « *Généralité sur les matériaux composites* », *École Centrale de Nantes*, 2011.
- [6]. **BOUDENNE.A**, « *Etude expérimentale et théorique des propriétés thermo-physiques de Matériaux composites à matrice polymère* », *Université PARISXII*, 2003.
- [7]. **Castanie. B**, *Structure en matériaux composites stratifié*. *Institut Clément Ader, Technique de l’ingénieur*, 2013. *RTM, Thèse de doctorat, Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, 2010. Constantine.*, 2005.
- [8]. **Bathias. C**, “*Matériaux composites, 2ème édition*”, *Édition Dunod-l ’usine nouvelle, Paris*, 2009.
- [9]. **Berthereau, A., & Dallies, E.** (2008). “*Fibres de verre de renforcement*”, *Techniques de L’ingénieur Matériaux composites : présentation et renforts*, (réf. article : am5132).
- [10]. **Swanson, S. R.** “*Introduction à la conception et à l’analyse avec un composite avancé matériaux*”, *Upper Saddle River, N.J Prentice-Hall*, 1997
- [11]. **Caramaro, L.** (2005). “*Fibres et fils à usage technique*”, *Techniques de l’ingénieur Surfaces et structures fonctionnelles* (réf. article : n2510).
- [12]. **LUYCKX, J.** “*Fibre de carbone*”, *Technique de l’Ingénieur*, vol. A2210.
- [13]. **DANIEL. GAY**, *Matériaux composites 3ème Edition revue et augmentée*, *HERMES* 1991.

- [14]. **J.M. Berthelot**, “Matériaux composites”, Editions Eyrolles, 2010.
- [15]. **Berbain, F. & Chevalier, A.** (1997). *Mise en œuvre des composites Méthodes et matériels. Techniques de l'ingénieur, Plasturgie : procédés spécifiques aux composites*, (réf. article : a3720).
- [16]. **Philippe, COGNARD.** *Plasturgie : procédés spécifiques aux composites. Techniques de l'ingénieur, Collage des composites dans diverses industries*, (réf. article : AM5222)
- [17]. **P. GUEGAN , F. LE MAITRE , J.C. HAMANN** “Contribution à l’usinage des matériaux composites”, *La construction navale en composites*, Ecole centrale, Paris, décembre 1992.
- [18]. **M. John Le Dref.** *Contribution à la Modélisation du perçage assisté par vibration et à l’étude de son impact sur la qualité d’alésage. Application aux empilages multi matériaux ”. Thèse de doctorats, Université de Toulouse. France, 2014.*
- [19]. **Driss. BENDJABALLAH,** *Analyse des plaques composites carbone/époxy sous l’effet de perçage. Mémoire de Magistère, Université Mentouri Constantine, 2009.*
- [20]. **Daniel ILIESCU,** *Approches expérimentale et numérique de l'usinage à sec des composites carbone/époxy. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, France, 2008. 182*
- [21]. **Wang D.H, Ramul, M, Arola D.** 1995 *Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: unidirectional laminate. International Journal of Machine Tools and Manufacture 35, 1623–1638*
- [22]. **Zitoune R, Collombet F, Lachaud, F, Piquet R, Pasquet P.** 2005 *Experiment-calculation comparison of the cutting conditions representative of the long fiber composite drilling phase. Composites Science and Technology 65, 455–466.*
- [23]. **PIQUET, R.** “Contribution à l’étude des réparations provisoires structurales aéronautiques; étude du perçage de plaques minces en carbone/époxy”, *Thèse de l’université Paul Sabatier Toulouse, 1999*
- [24]. **GUEGAN, P.** “Contribution à la qualification de l’usinage de matériaux composites à matrice organique”, *Thèse de l’école centrale de Nantes, 1994*

- [25]. **HOCHENG, H. ; DHARAN, C. K. H.** "Delamination during drilling in composite laminates", *Transactions of ASME Journal of Engineering for Industry*, vol. 112, pp. 236–239, 1990
- [26]. **Tsao C.C ; Hocheng H.** 2004 Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 44, 1085–1090.
- [27]. **KOENIG, W. ; GRASS, P.** "Quality definition and assessment in drilling of fibre reinforced thermosets", *Annals of the C.I.R.P.*, vol. 38, pp. 119-124, 1989
- [28]. **SURCIN, L.** "Contribution à l'étude théorique et expérimentale du perçage de plaques composites minces", *Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse III*, 2005
- [29]. **Patrick GHIDOSI**, *Thèse de doctorat "Contribution à l'étude de l'effet des conditions d'usinage d'éprouvettes en composites à matrice polymère sur leur réponse mécanique"*, *École nationale supérieure d'arts et métiers*
- [30]. **KOPLEV, A.** "Cutting of CFRP with single edge tools", *Third international conference on composite materials*, pp. 1597-1605, 1980
- [31]. **KOPLEV, A. ; LYSTRUP, A. ; VORM, T.** "The cutting process, chips and cutting forces in machining CFRP", *Composites*, vol. 14, pp. 371-376, 1983
- [32]. **Seghilani. A, M'Zyene. S** "Etude de l'usinage des trous dans les coques de bateaux de pêche" *Master professionnel en génie mécanique, université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou*, 2017
- [33]. **N. Belloul** , "Procédé de fabrication de structure en composites verre/polyester", *Thèse de magister en polymères et composites de l'université de Boumerdes*, 2007.