

## Introduction générale

# Introduction générale

L'usage des matériaux composites à matrice organique, en particulier les stratifiés, ne cesse de croître dans les domaines les plus variés. 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.

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans divers domaines tels que l'aérospatial, naval, automobile... La nature de ces matériaux fait qu'ils ont une très grande adaptabilité à chaque domaine et il est possible de choisir pour chaque structure le meilleur compromis coût – poids - tenue mécanique.

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 et fraisage, ainsi que l'importance de leur étendue.

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 correcte et les réglages corrects dépendent de la composition du matériau composite.

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

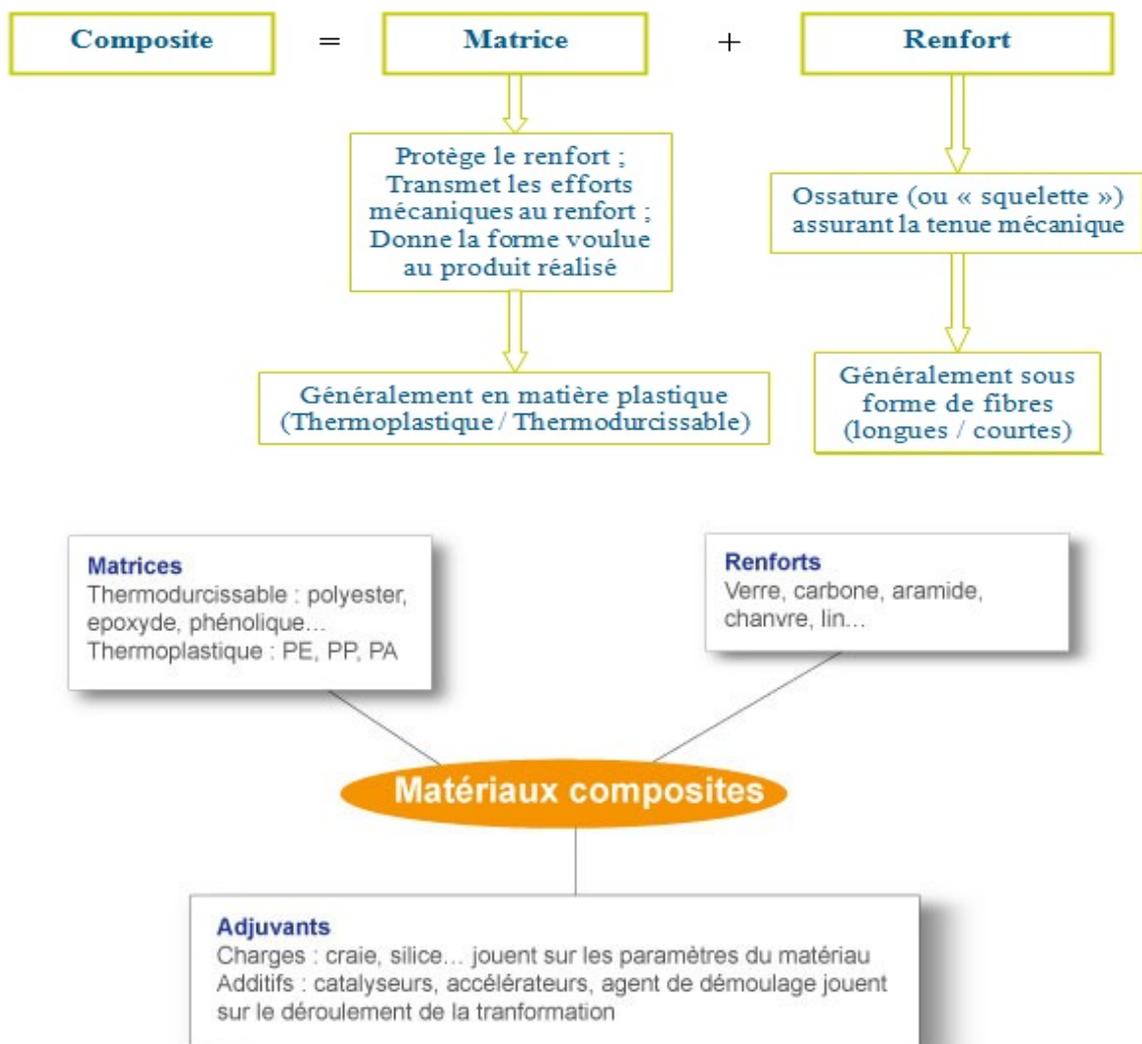
## **I.1. Définition des matériaux composites**

La définition générale des matériaux composites est : « un matériau composite est constitué de l'assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles (mais ayant une forte capacité d'adhésion) et de natures différentes, se complétant et permettant d'obtenir un matériau dont les performances globales sont améliorées, vis-à-vis d'un besoin spécifique, par rapport à celles de ses constituants élémentaires ». Un matériau composite est constitué de différentes phases nommées « renforts » et « matrice ». Chacun des deux constituants jouent un rôle particulier dans la tenue mécanique du matériau. La matrice assure la cohésion entre les renforts de manière à recevoir toutes les sollicitations et répartir les efforts dans tout le matériau afin de protéger le renfort. Les renforts se présentent sous forme de fibres continues ou discontinues, leur rôle est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts, et confère 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].

## **I.2. Les constituants du matériau composite**

Nous présentons les différents types d'éléments constituant un matériau composite employés dans l'industrie. Pour un matériau composite plastique c'est l'association de deux constituants qui sont les renforts et les matrices.

Le renfort se présente sous forme de fibres continues ou discontinues dont le rôle est d'assurer la résistance mécanique du matériau composite. La matrice assure la protection chimique et la répartition de la charge mécanique appliquée à la structure. Ces deux éléments constituant principaux reçoivent des additifs ou charges qui sont des produits qui peuvent être incorporés à la résine pour lui conférer des caractéristiques particulières ou en réduire le coût (catalyseur, durcisseur etc....) [2]



**Figure I.1** : Constituants d'un composite

### I.2.1. Les renforts

Les renforts sont tout produit qui permet d'améliorer les propriétés de la matrice (mécanique, thermique, chimique...) et assurer les meilleures propriétés mécaniques du matériau composite à élaborer.

Les fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tridirectionnel ou plus). [2]

### I.2.1.1. 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 travail nous avons utilisé les fibres de verre.



Figure I.2 : Bobine de fibre de verre

#### ❖ **Fibres de verre**

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance-prix. C'est les renforts les plus utilisés actuellement dans la construction de structures composites. On distingue trois types de fibres de verre [1] :

- ✓ Verre E : pour les composites à grande diffusion.
- ✓ Verre S : pour les applications d'électricité.
- ✓ Verre R : pour les composites à haute performance.

#### ❖ **Avantages de la fibre de verre**

- ✓ Compatibilité avec les matrices organiques.
- ✓ Bonnes propriétés diélectriques.
- ✓ Faible coût.

#### ❖ **Inconvénients de la fibre de verre :**

- ✓ Faible module d'élasticité (par rapport aux fibres de carbone et l'aramide).
- ✓ Vieillissement au contact de l'eau.

Tableau I.1 : Caractéristiques des fibres de verre [3]

Caractéristiques	Verre E	Verre A	Verre S
Résistance à la rupture (MPa)	3400 à 3500	4400	4600
Module d'Young (GPa)	73	86	87
Allongement a la rupture (%)	4.6 à 4.8	5.2	5.4
Masse volumique.....(g/cm <sup>3</sup> )	2.54	2.55	2.54

#### ❖ Fibres de carbone [7]

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile).



Figure I.4 : Bobine de fibre carbone.

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.
- **Avantages de la fibre de carbone**
  - ✓ Bonnes propriétés mécaniques.
  - ✓ Dilatation thermique très faible.

- ✓ Faible densité.
- **Inconvénients de la fibre de carbone**
- ✓ Prix très élevé.
- ✓ Fragilité au choc.
- ✓ Adhésion difficile avec les résines.

❖ **Fibres d'aramide :**

Les fibres d'aramide sont des fibres synthétiques à base de polyamide aromatiques dont les premières applications reviennent à l'année 1972. Ces fibres sont généralement développées pour renforcer les pneumatiques. Ils en existent deux types principaux :

- ✓ La fibre haute module Kevlar 49 et Twaron HM.
- ✓ La fibre standard Kevlar 29 et Twaron HM 50.

Les fibres d'aramide présentent la même particularité que les fibres de carbone. Elles ont un coefficient de dilatation linéique négatif dans le sens axial [3].



Figure I.5 : Bobine de fibre d'aramide.

❖ **Avantages de la fibre d'aramide**

- ✓ 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.

❖ **Inconvénients de la fibre d'aramide**

- ✓ Tenue limitée en compression.
- ✓ Reprise d'humidité importante.

- ✓ Prix élevé.
- ✓ Adhésion difficile avec les résines.

**Tableau 1.2** : Caractéristiques des fibres d'aramides [3].

Caractéristiques	Haut module	Standard
Résistance à la rupture.....(Mpa)	> 3000	> 2760
Module d'Young.....(Gpa)	120 à 130	60 à 70
Allongement a la rupture..... (%)	1,9 à 2,5	4 à 4,4
Masse volumique.....(g/cm <sup>3</sup> )	1,45	1,44

### ❖ Fibres de 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 fil 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 [2]. Les types de fibres céramiques sont :

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

#### I.2.1.2. Différentes formes de fibres

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.3).

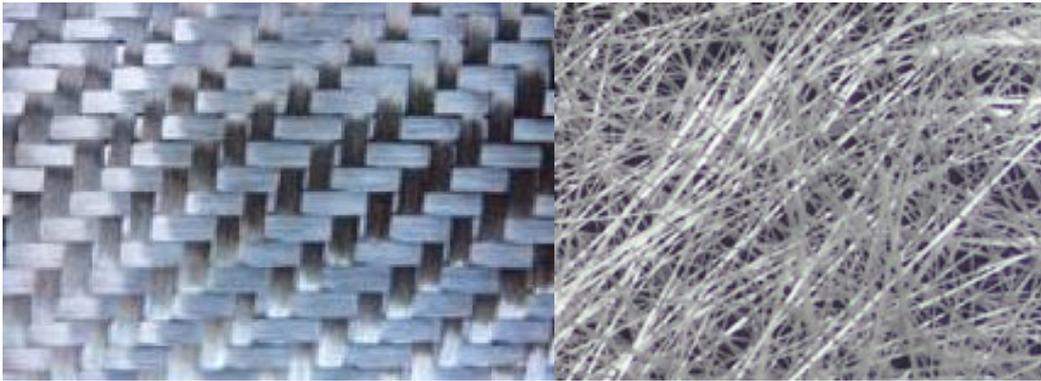


Figure I.3 : Différentes architectures des fibres de verre

### I.3.1.2. Présentation commerciale des fibres

Suivant l'utilisation des matériaux composites les renforts peuvent se présenter sous plusieurs formes.

### I.3.1. Les matrices :

Le rôle de la matrice est de transmettre les efforts mécaniques aux fibres (résistance à la flexion ou à la compression) et d'assurer leurs protections chimiques et de donner la forme au produit réalisé [1]. On distingue différents types de matrices (Figure 1.4) :

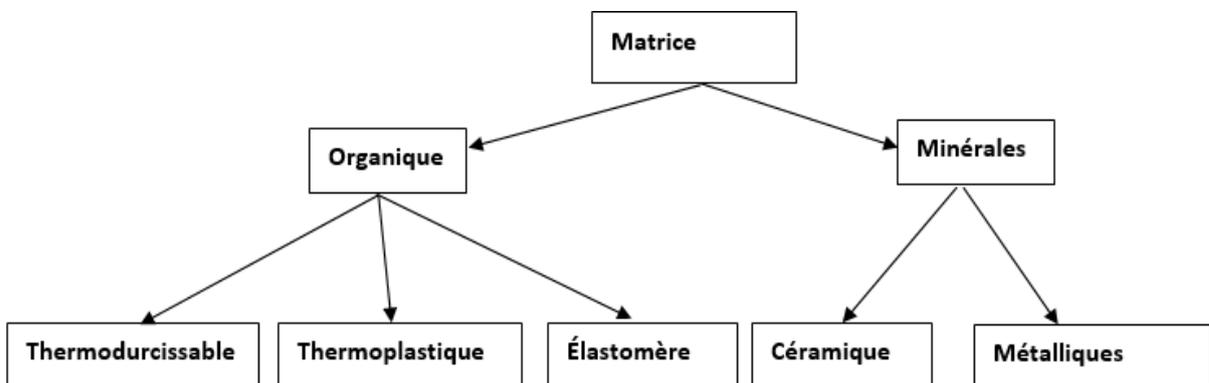


Figure I.6 : Différents types de matrices

## I.3.1.1. Les matrices 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. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. On distingue donc trois types de matrices thermodurcissables [4] :

- ✓ Les résines polyesters.
- ✓ Les résines de condensation.
- ✓ Les résines époxydes.

Les matrices thermodurcissables sont les plus utilisées, dans ce présent travail nous avons utilisé la matrice thermodurcissable « polyester insaturé ».

Tableau I.3 : Caractéristiques des matrices thermodurcissables [7]

Matrice TD	Epoxyde	Phénolique	Polyester	Polyester	Polycarbonate	Vinylester	Silicone
Masse volumique (Kg /m3)	1200	1300	1200		1200	1150	1100
Module d'élasticité longitudinal (MPa)	4500	3000	4000		2400	3300	2200
Module de cisaillement (MPa)	1600	1100	1400		/	/	/
Coefficient de Poisson	0.4	0.4	0.4		0.35	/	0.5
Contrainte de rupture (Traction) MPa	130	70	80		60	75	35
Allongement à rupture %	2	2.5	2.5		/	4	/
Coefficient de dilatation thermique °C <sup>-1</sup>	11*10 <sup>-5</sup>	1*10 <sup>-5</sup>	8*10 <sup>-5</sup>		6*10 <sup>-5</sup>	5*10 <sup>-5</sup>	/

**I.3.1.2. Les matrices 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 [4]. On cite les exemples suivants :

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

Tableau I.4: Caractéristiques des matrices thermoplastiques [7]

<b>Matrice Tp</b>	<b>PP</b>	<b>PPS</b>	<b>PA</b>	<b>PES</b>	<b>PEI</b>	<b>PEEK</b>
<b>Caractéristiques</b>						
<b>Masse volumiques (Kg /m3)</b>	900	1300	1100	1350	1150	1300
<b>Module d'élasticité longitudinal (Mpa)</b>	1200	4000	2000	3000	3300	4000
<b>Coefficient de Poisson</b>	0.4	/	0.35	/	/	/
<b>Coefficient de dilation thermique (C-1)*105</b>	9	5	8	6	6	5
<b>Contrainte de ruptures en traction (Mpa)</b>	30	65	70	85	105	90
<b>Allongement à la rupture (%)</b>	20 à 400	100	200	60	60	50

❖ **Définition du polyester insaturé :**

C'est la résine la plus utilisée dans l'application composite de grande distribution. Une résine de polyester insaturé contenant un monomère (généralement le styrène) est réticulée à température ambiante par addition d'un catalyseur de type peroxyde

organique et d'un accélérateur. Elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible.

La réaction est exothermique et la température de la résine augmente progressivement depuis le gel jusqu'à un maximum pour redescendre ensuite lentement à la température ambiante. 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 [8]:

- ✓ 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.
- ❖ **Caractéristiques :**

**Tableau I.5 : Caractéristiques de la matrice Polyester insaturé [8]**

Matrice	$\rho$ Kg/m <sup>3</sup>	E MPa	G MPa	N	$\sigma$ MPa	A%	a <sub>10-5</sub> °C-1	T <sub>max</sub> °C
<b>Polyester insaturé</b>	1200	4000	1400	0.4	80	2.5	8	60 à 200

❖ **Avantages**

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

#### I.3.2.1 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 [8].

#### I.3.2.2 Les adjuvants

Un des additifs de grande importance est l'agent d'interface qui assure la cohésion et l'adhérence entre les différents constituants. Cet agent est en général déposé sur les fibres de renfort (ensimage du verre) ou sur les charges (carbonate de calcium enrobé) [8].

Les additifs se trouvent en faible quantité et interviennent comme :

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

### I.3.3 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) [8].

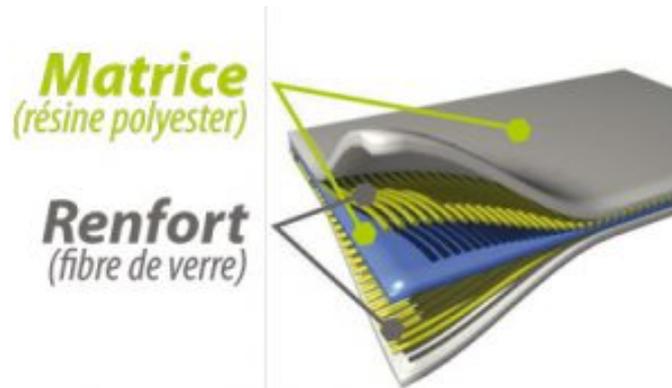


Figure I.7 : renfort/matrice

#### 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

Les stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels constituent un type de stratifié de base auquel peut se ramener en théorie tout autre type de stratifié. Ces stratifiés sont constitués de couches de fils ou de tissus unidirectionnels, dont la direction est décalée dans chaque couche (figure I.8).

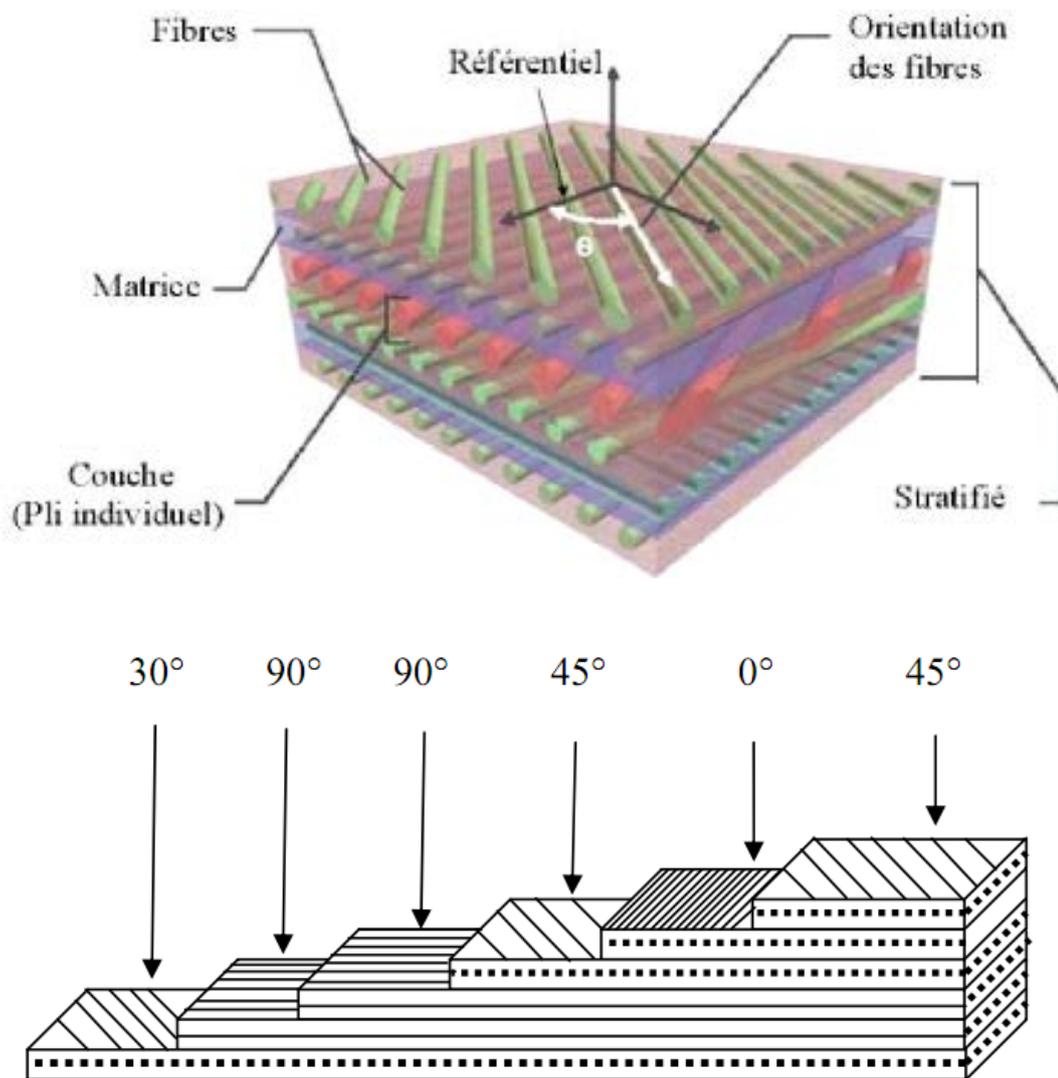


Figure I.8 : Désignation d'un stratifié.

On distingue différents types de stratifiés [1] :

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

#### I.4.2 Composites sandwichs

Selon Laurent Gornet [2], Une structure sandwich est composée d'une âme et de deux peaux en matériaux composites (figure I.10). L'assemblage est réalisé par collage à l'aide d'une résine compatible avec les matériaux en présence. Les âmes

les plus utilisées sont de type nid d'abeilles, âme ondulée ou mousse. Les peaux sont généralement constituées de structures stratifiées.

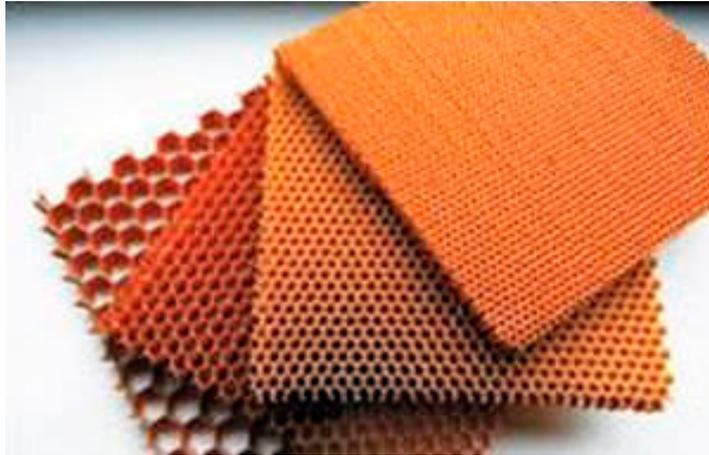


Figure I.9 : Nid d'abeilles.

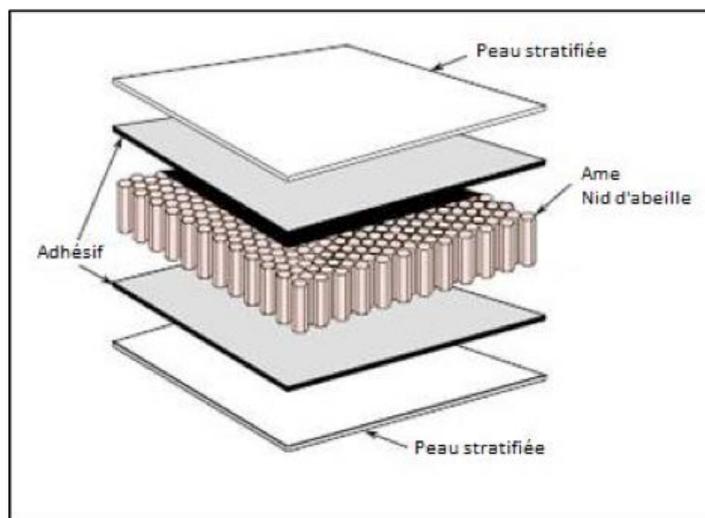


Figure I.10: Structure de sandwich.

#### 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 [8] :

- ✓ Technologies manuelles de transformation

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

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

### I.5.1. Moulage à Basse pression

#### I.5.1.1. Moulage au contact.

C'est un procédé manuel pour la réalisation des pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression (figure I.11).

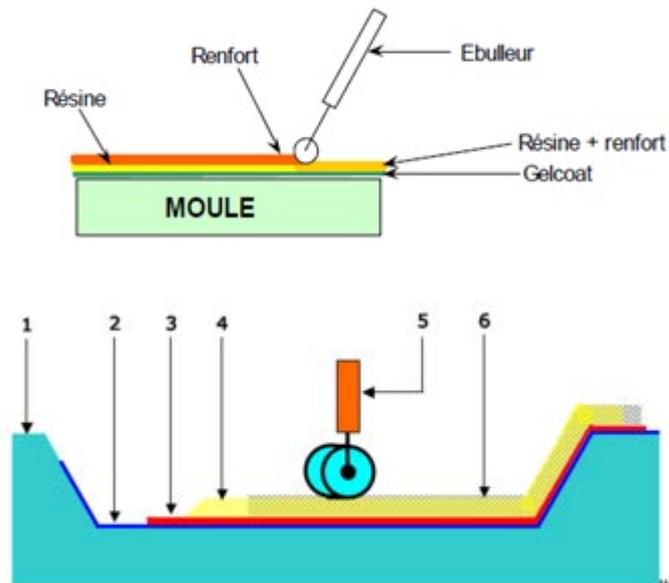


Figure I.11: Principe du moulage au contact [7]

1. moule
2. gel-coat
3. résine
4. renfort
5. ébulleur
6. renforts imprégnés

Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérées et catalysées. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée. Ce procédé

est utilisé pour les petites séries, de 1 à 1000 pièces/année et pour la construction de pièces de grandes dimensions ainsi que pour les revêtements sur des supports divers [7].

**Avantages**

- ✓ Très larges possibilités de forme.
- ✓ Pas de limite dimensionnelle,
- ✓ 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.

**❖ Limites**

- ✓ 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 éléments assemblés
- ✓ Outillages à mains : ciseaux, pinceaux, ébulleurs, pistolet à peinture ou gel-coateuse

**❖ Domaines d'application**

- ✓ Nautisme
- ✓ Piscine
- ✓ Génie chimique
- ✓ Transport, carrosserie (petites séries)

- ✓ Bâtiment, travaux public (coffrage)

### I.5.1.2. Moulage par projection simultanée.

Le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée sur un moule (figure I.12). L'équipement à projeter est constitué d'une machine à couper le stratifié et d'un pistolet projetant la résine et les fibres coupées, l'ensemble fonctionnant par air comprimé. La couche de fibres imprégnées de résine est ensuite compactée et débarrassée des bulles au rouleau cannelé [1].



Figure I.12 : Principe du moulage par projection simultanée

#### **Avantages [7]**

- ✓ 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 [7]**

- ✓ 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.5.1.3. Moulage sous vide.

Le moulage sous vide s'effectue entre moule et contre-moule rigide, semi-rigide ou souple suivant la technologie de la mise en œuvre (figure I.13). Le renfort sous forme de mat, tissu, ou préforme est placé à l'intérieur du moule, la résine catalysée est versée sur le renfort.

On utilise la pression qui s'exerce sur le moule lors de la mise sous vide pour répartir la résine et imprégner le renfort. La résine peut également être injectée par l'aspiration consécutive au vide [7].



Figure I.13 : Principe du moulage sous vide

## I.5.2. Moulage par compression

### I.5.2.1. Moulage par injection de résine

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 (figure I.14). 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 [1].

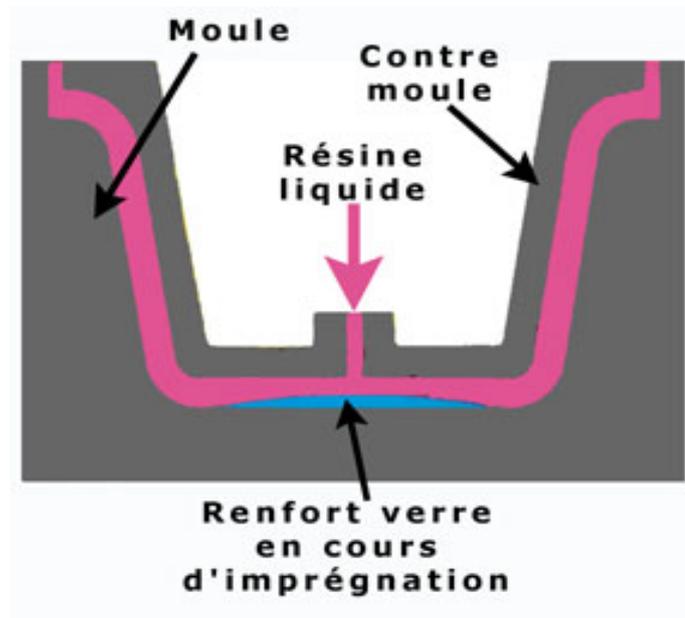


Figure I.14 : Principe du moulage par injection de résine [1].

#### I.5.2.2. Moulage par compression à froid de résine

Ce procédé convient pour les moyennes séries de productions de 500 à 5000 unités (figure I.15).

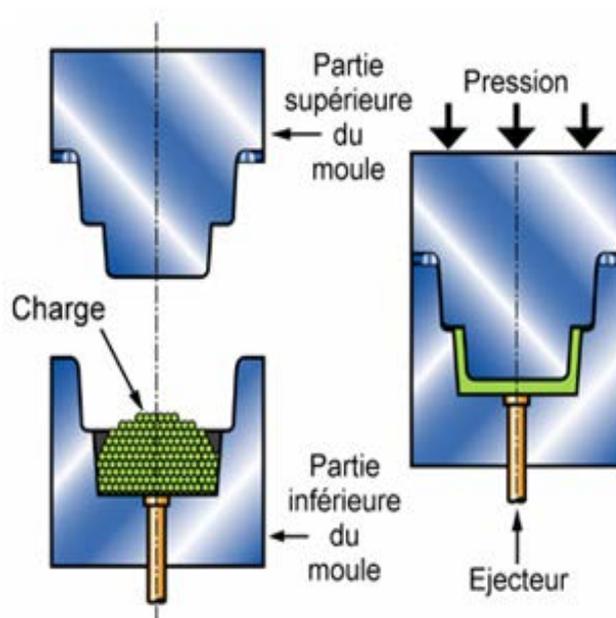


Figure I.15 : Principe du moulage par compression à froid de résine [7].

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 [7].

### I.5.2.3. Moulage par compression à chaud de résine

Ce procédé est utilisé pour les grandes séries de production, 15 à 30 pièces par heure (figure 1.16).

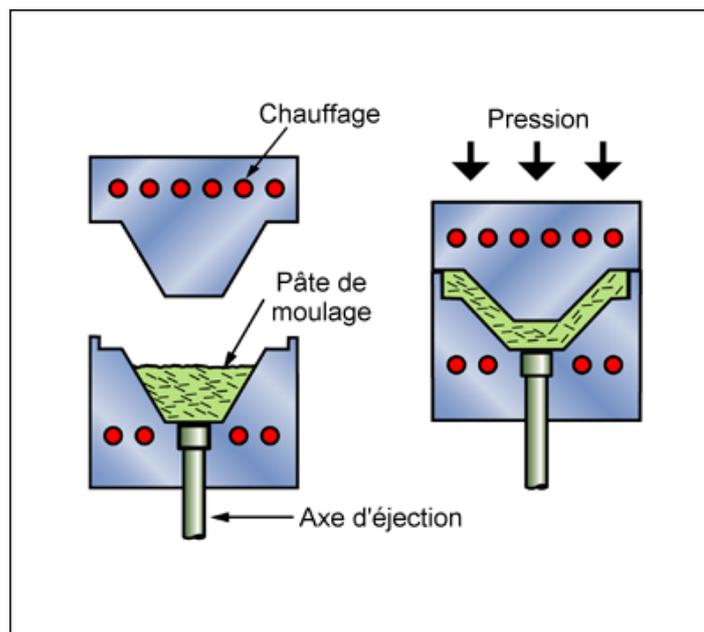


Figure 1.16 : Principe du Moulage par compression à chaud de résine [7].

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 [1].

### I.5.2.4. Moulage par injection de mélange (résine renfort)

Généralement cette technique est utilisée pour obtenir les matériaux du type « plastiques renforcés » (figure 1.15). 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) [1].

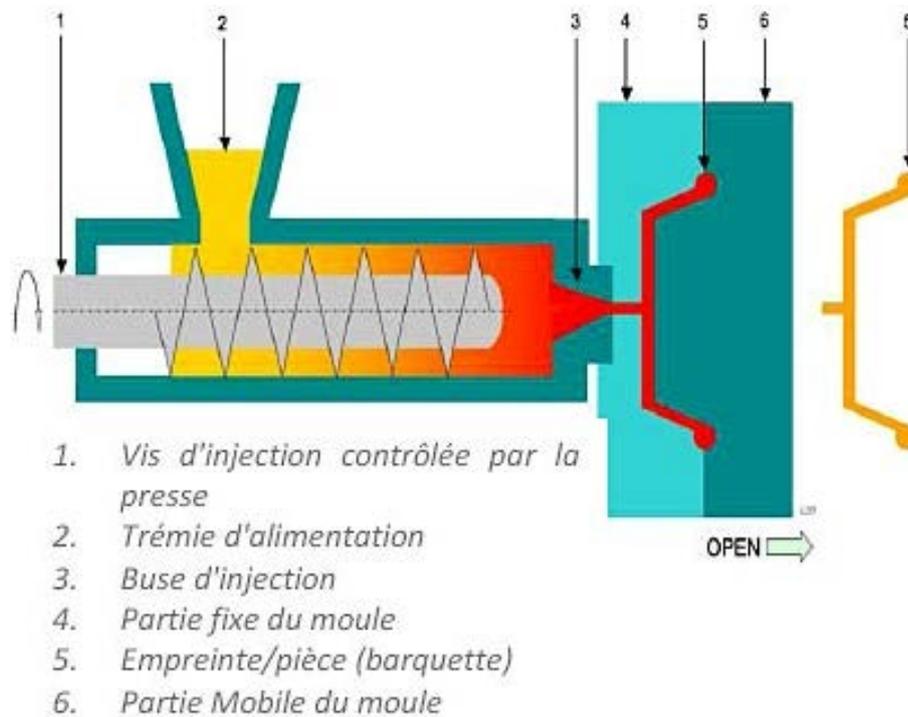


Figure 1.17 : Principe du moulage par injection de mélange (résine renfort)

## II.1 Définition

L'opération d'usinage en perçage est de loin la plus utilisée comme opération de parachèvement des structures en matériaux composites. Elle permet entre autres de réaliser des orifices nécessaires à l'assemblage des éléments, ou permettant le passage de câbles.

Perçer 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).

## II.2. Type du perçage des matériaux composites :

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

Le perçage est l'un des plus vieux procédés d'usinage par enlèvement de matière, facile à utiliser mais difficile à maîtriser. Parmi les difficultés propres au perçage des composites, on peut citer :

- 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 tridimensionnelle.
- 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 fiabilité de l'opération de perçage. Une optimisation du procédé et de 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, et 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'efforts globaux lors d'un perçage en plein matière ou partiels lors de perçages de tubes ou sur avant-trous par exemple. La géométrie évolutive et les importantes variations de la 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 du 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 [12].

### II.2.2. Usinage par jet d'eau

Ce procédé est relativement récent puisque les premiers brevets, déterminants pour développer l'emploi d'un jet fluide hyperbare pour découper la matière, remontent aux débuts des années 1970 (sociétés américaines Flow Systems et

Ingersoll Rand). Depuis, d'autres fournisseurs de pompes hyperbares sont apparus et des constructeurs d'installation complète se sont développés en parallèle. L'utilisation de cette technique s'applique à des divers matériaux : alimentaire, bois, cartons, cuirs, textiles, métaux, plastiques, céramiques, etc.

Cette technique utilise l'action mécanique d'un jet fin du liquide à forte pression et à grande vitesse. Le matériau est découpé par dépassement de sa limite élastique. Industriellement, le procédé ne permet que la découpe et le perçage [9].



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

Le jet d'eau a toujours été comparé au laser qui est utilisé également comme outil de coupe dans l'industrie depuis quelques décennies.

**Ses avantages sont :**

- ✓ Aucun apport thermique donc pas de chaleur, ni échauffement ;
- ✓ Aucune pollution car utilisation par la possibilité de coupler plusieurs têtes de découpe
- ✓ Une facilité de mise en œuvre (contrairement au laser)
- ✓ Une évacuation des débris de coupe par le jet
- ✓ L'obtention d'une coupe franche et nette (comme le laser)
- ✓ Pas ou peu de déformations
- ✓ Plusieurs têtes sur la même pompe
- ✓ La possibilité de couper des matériaux souples ou très durs
- ✓ La possibilité d'intervenir dans tout secteur d'activité (au contraire du laser)

**Ses inconvénients sont**

- ✓ 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
- ✓ Très bruyant (à cause des chocs)
- ✓ Coût d'exploitation élevé par une faible durée de vie de certains composants (usure des buses)
- ✓ Projections d'eau et humidité ambiante
- ✓ Délaminage possible.

**II.2.3. Découpe au laser**

Le principe du L.A.S.E.R. (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) 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. La focalisation du rayon donne un diamètre de foyer d'environ 0,1 à 0,3 mm, correspondant approximativement à l'épaisseur du trait de coupe. De manière générale, il y a les lasers à gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), à flux rapide, à flux lent ou à flux transversal.



Figure II.3 : Perçage par laser

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 [9]. 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 [9].

**Ses avantages sont :**

- ✓ Grande vitesse, travail précis ;
- ✓ Forme de découpe non limitée ;
- ✓ Pas ou peu de déformation ;
- ✓ Pas d'usure.

**Ses inconvénients sont :**

- ✓ Emission de gaz toxique ;
- ✓ Peut affecter thermiquement la matière ;
- ✓ Coût élevé de l'installation ;
- ✓ Certaines fibres ne peuvent être coupées (réflexion).

#### II.2.4. Les outils de perçage des matériaux composites

Le perçage des pièces en matériaux composites ont besoin d'un grand savoir-faire et de solutions d'outillage adaptées à ces matériaux.

On cherche à percer en donnant une bonne qualité de surface, mais on diminue la résistance mécanique du matériau, et de plus on provoque des endommagements au voisinage de la zone usinée (arrachement des fibres, délaminage extérieur ou interne - séparation de couches).

Il est nécessaire d'appliquer des techniques adaptées qu'on appelle morphologie des outils.

Les outils 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 parce que la perte d'acuité peut entraîner des endommagements importants dans la pièce (arrachement, délaminage, etc.) Les matériaux d'outil existants utilisés industriellement sont présentés dans les paragraphes suivants par ordre croissant de dureté :

#### II.2.4.1. Outils à aciers rapides

Ils sont les moins chers à l'achat mais ils ont une durée de vie moins longue, surtout avec les matériaux renforcés de fibres de verre. Leur qualité de coupe est bonne à moyenne. L'acier rapide est un acier allié comportant du carbone, du chrome et du tungstène, parfois du molybdène, du vanadium et du cobalt [11].



Figure II.4 : Outils à aciers rapide

#### II.2.4.2. Outils à carbures de tungstène (WC)

Ces matériaux, issus de la technique des poudres avec un liant métallique, permettent, grâce aux grains de carbure et de tungstène, d'obtenir une dureté à chaud et une résistance à l'abrasion nettement supérieure aux aciers rapides [10]. Pour améliorer encore leurs performances, ils peuvent être revêtus de dépôts ioniques obtenus essentiellement par procédés :

- ✓ PVD (Physical Vapor Deposition).
- ✓ CVD (Chemical Vapor Deposition) :

Une grande diversité de revêtements est déposable ( $TiN$ ,  $TiCN$ ,  $TiAlN$ ,  $Al_2O_3$ , etc.) avec un bon accrochage sur le substrat.



**Figure II.5 :** Outils à carbures de tungstène

#### II.2.4.3. Outils à nitrure de bore cubique (CBN)

Il se présente sous formes très variées [10] :

- ✓ en dépôt électrolytique sur plaquettes en carbure de tungstène.
- ✓ en insert de CBN fritté et brasé sur la plaquette en carbure métallique.
- ✓ en insert directement fritté sur plaquette en carbure de tungstène.



Figure II.6 : Outils à nitrures de bore cubiques (source : site amazon.fr).

#### II.2.4.4. Outils à diamant

C'est le plus dur des matériaux, il se présente sous plusieurs formes :

- ✓ Le diamant synthétique (ou naturel) en cristaux déposés sur un support métallique ou carbure avec un liant électrolytique (Ni).
- ✓ Le diamant polycristallin (PCD) obtenu par frittage de grains de diamant synthétiques.

Le PCD est souvent lié, lors du frittage, à un support (une plaquette) à base de carbure de tungstène.

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 [10].



Figure II.7 : Types des outils à diamant (source site acadia-ct.fr).

Suivant la géométrie d'outil il existe d'autres types de forets pour les matériaux composites (figure II.8).

- ✓ Foret cylindrique diamanté.
- ✓ Foret avec pointe de centrage (de principe similaire à la mèche à bois).

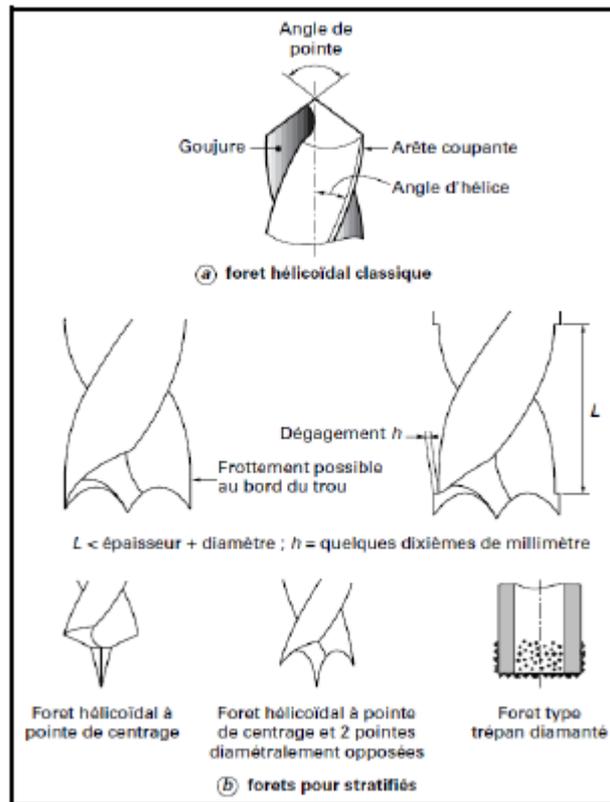


Figure II.8 : Autre type de forets [11]

Il faut spécifiquement prévoir quelques essais préliminaires si le diamètre du perçage est très précis. À cause de l'échauffement au passage du foret, le trou finalement obtenu pourrait avoir un diamètre inférieur après refroidissement de la pièce [11].

### II.2.5. Mécanismes de coupe des composites

La Figure II.9 représente les mécanismes de coupe d'un composite à renforts fibreux, il est le fruit de l'étude de D. H. Wang sur la coupe des composites [13]. Les cas étudiés sont identifiés par l'orientation des fibres par rapport à la direction de coupe. Les phénomènes de formation de copeaux dans le composite sont régis par les modes de propagations des fissures. Ces travaux ont été confirmés par ceux de Zitoune [14].

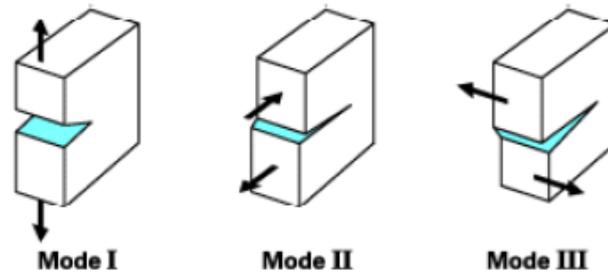


Figure II.9 : Modes de propagation de fissures dans un matériau

Pour une orientation des fibres à  $0^\circ$ , la formation du copeau s'effectue par un chargement en mode I (ouverture de fissure) avec une rupture à l'interface fibre-matrice, combiné à un chargement en mode II (glissement droit) dans la direction d'avance de l'outil. La séparation du copeau est réalisée par la rupture des fibres dans une direction perpendiculaire à leur axe. Dans ce cas, les copeaux auront tendance à être long car l'outil décolle les fibres et les arrache comme un copeau de bois. Si la pointe de l'outil arrive entre deux couches (que ce soit à cause de l'usure ou d'un réglage), l'état de surface sera moins bon.

Pour une orientation des fibres positives jusqu'à  $+75^\circ$ , l'arête de coupe cisaille les fibres (mode II), puis il y a cisaillement à l'interface fibre-matrice (toujours en mode II) jusqu'à la surface libre. Ce type de coupe produit donc de petits débris (notamment pour une inclinaison de  $45^\circ$ ). La surface n'est pas toujours régulière car l'outil ne coupe pas le matériau, mais casse les renforts fibreux, et ce, pas toujours de façon très nette.

Pour une orientation des fibres à  $90^\circ$  ainsi que les orientations négatives, la formation du copeau est initiée par une ouverture en mode I de la matière sous l'arête de coupe en suivant l'interface matrice-fibre, puis une rupture en mode II qui remonte jusqu'à la face libre en cisillant les fibres. Lorsque les fibres sont orientées à  $90^\circ$ , la surface présente un décollement des fibres, elles sont penchées en avant par paquet comme cela est visible sur la Figure II.10. Les fibres fléchissent le plus lorsque les fibres sont à  $-45^\circ$ , l'arrachement est alors le mode de rupture de ces fibres, engendrant un décollement des fibres avec la matrice et il est possible de remarquer des défauts importants se propageant vers l'intérieur de la matière.

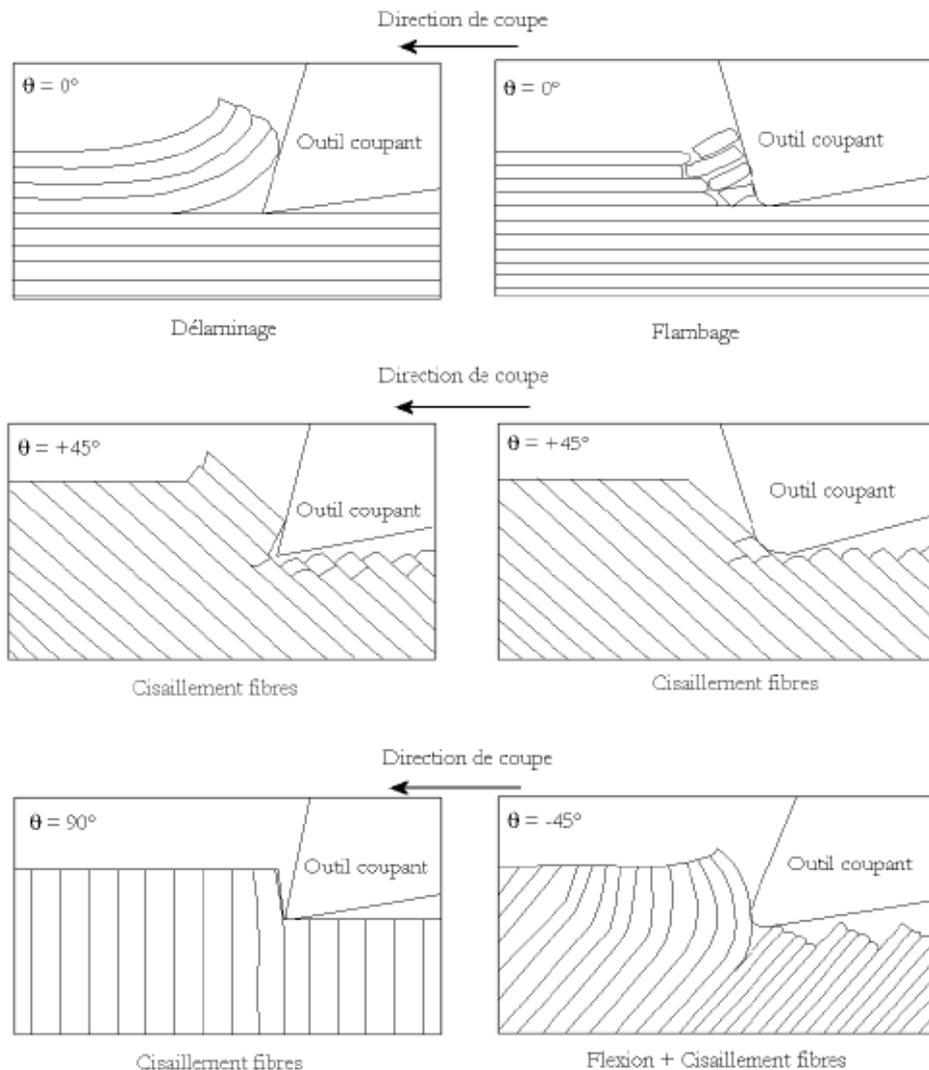


Figure II.10 : Mécanismes de formation du copeau en coupe orthogonale du composite carbone/époxy unidirectionnel, d'après Wang et al. [15]

### II.2.6. Mécanismes d'usure des outils

Les études d'usure des outils dans les matériaux composites ont majoritairement été menées pour des opérations de perçage. Néanmoins à cause de la diversité et la complexité des géométries employées, les critères de quantification usuels de l'usure (usure en dépouille VB, usure en cratère KT) ne sont pas toujours représentatifs de l'usure réelle de l'outil. Le critère d'usure a notamment été complété par un critère de rayon de bec de l'outil utilisé dans les travaux de thèse de D. Iliescu [16].

Plusieurs facteurs ont été relevés comme influant fortement sur l'usure de l'outil, le premier est la vitesse de coupe (plus celle-ci est élevée, plus l'usure est rapide).

De plus Kim et al. [17] ont mis en évidence en tournage l'influence de l'orientation des fibres sur l'usure. Ainsi lorsque le composite passe d'un agencement monodirectionnel à  $0^\circ$  à un stratifié à  $\pm 45^\circ$ , la durée de vie de l'outil carbure (K10) chute de 70 % (pour une vitesse de coupe de 50 m/min).

Le phénomène qui est le principal responsable de l'usure des outils dans le composite est l'abrasion. Les arêtes sont érodées au contact des fibres [18 - 20], ce type d'usure étant proportionnelle à la longueur usinée, une usure triangulaire est observée sur les forets (l'arête proche du centre est moins usée que celle sur l'extérieur) [15].

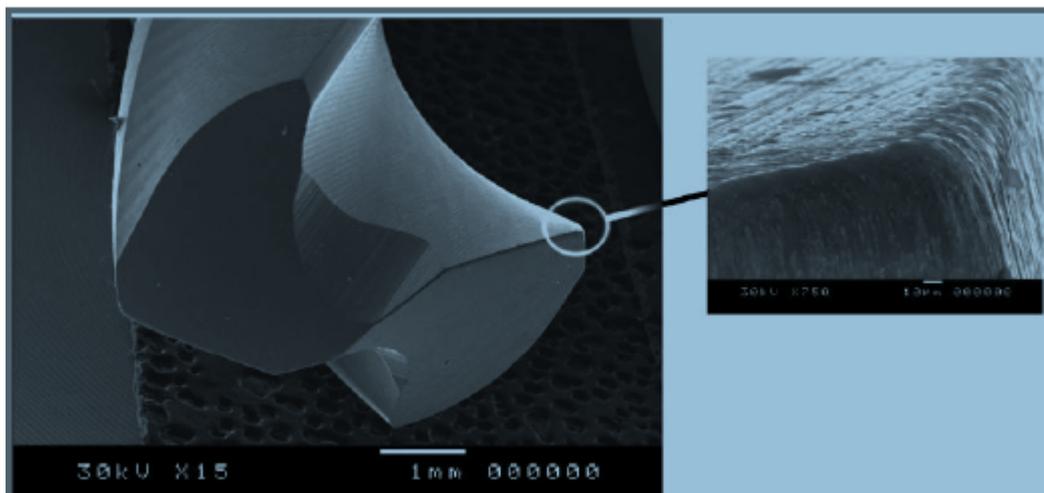


Figure II.11 : Usure de l'arête d'un foret après avoir usiné 180 trous dans un composite à fibre de verre [17]

L'usure par abrasion est caractérisée par un rayonnage de l'arête de coupe et surtout par la présence de bandes striées dans la direction de contact avec la surface usinée de la pièce ou la direction d'écoulement du copeau. Ces marques sont donc visibles (Figure II.11) à la fois sur la face de coupe (mais sur une très courte distance à cause de la taille des copeaux) et sur la face de dépouille. Les stries sont causées par les particules dures du matériau, dans le cas d'un composite à fibres de carbone, ces particules sont les fibres [15].

Des phénomènes d'adhérence sur la face de coupe sont parfois relevés, notamment sur des essais de rabotage, dans les zones entre les plis.

## II.3. Caractérisation et quantification des défauts de perçage

### II.3.1. Localisation des défauts

Les défauts résultants des opérations de perçage par l'utilisation d'un foret hélicoïdal sont classés suivant leur localisation, en entrée de trou, sur la paroi de trou et en sortie de trou.

#### ❖ Le défaut situé en entrée de trou

A l'entrée du foret dans la matière, l'angle d'hélice du foret et l'angle de coupe tendent à arracher le premier pli, pouvant occasionner un délaminage en entrée du trou. Ce défaut est considéré comme l'un des quatre défauts majeurs en perçage selon A.M. Abrão et al. [19].

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, comme cela est visible sur la (Figure II.13). L'une des valeurs retenues pour mesurer la taille du défaut est la mesure du diamètre maximal délaminé, comme le montrent les Figure II.12 et II.13, [20].

#### ❖ Le défaut situé sur la paroi du trou :

On relève :

- le défaut de circularité ;
- le défaut de rugosité ;
- les arrachements localisés de la matrice ;
- les arrachements de fibres ;
- la dégradation thermique de la matrice.

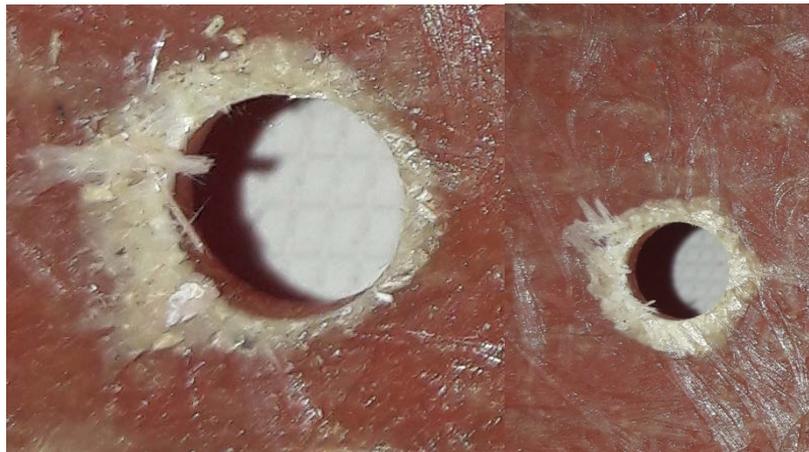


Figure II.12: Défaut en entrée du trou

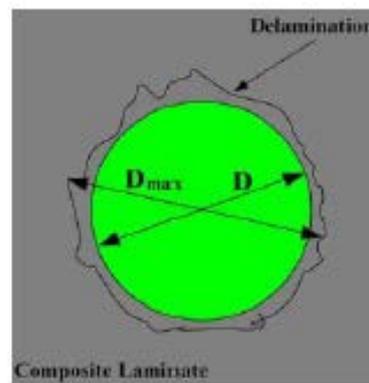


Figure II.13 : Définition du diamètre de délaminage [20]

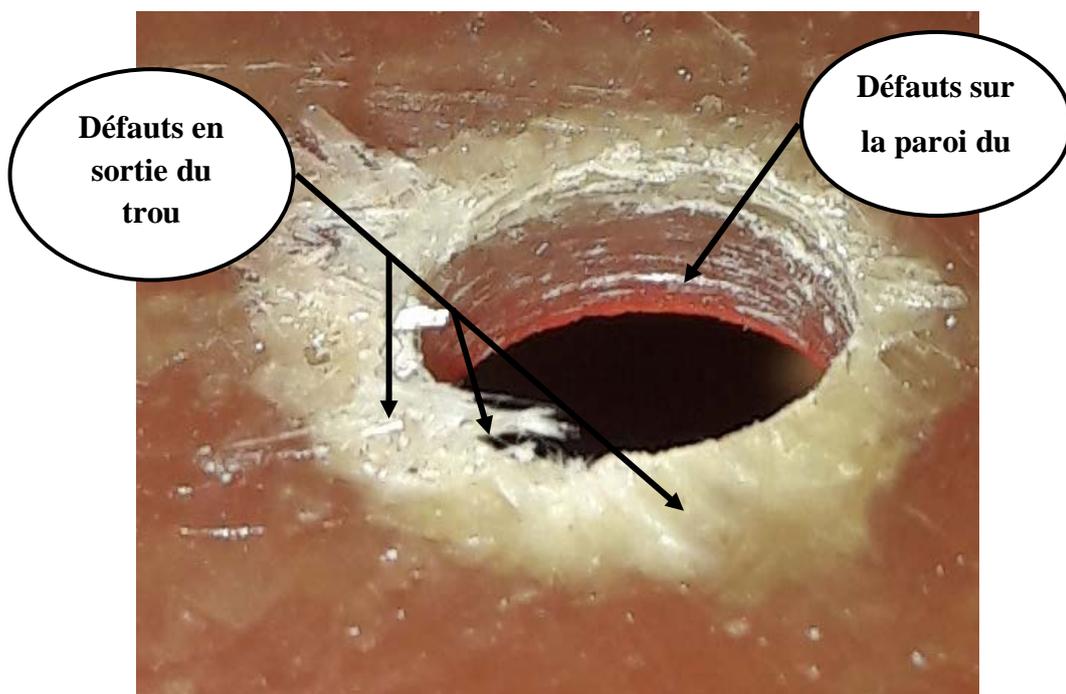


Figure II.14: Localisation des défauts de perçage d'un composite

**❖ Le défaut situé en sortie de trou :**

Le délaminage en sortie de trou est le défaut généralement considéré comme le plus important lors du perçage de composites [15, 19, 21, 22]. Ce phénomène résulte du fait que les derniers plis ne sont plus capables de résister à l'effort de poussée du foret. Lorsque cet effort de pénétration ( $F_z$ ) devient supérieur à la charge de décollement interlaminaire, le délaminage apparaît comme cela est visible sur la (Figure II.15). Le délaminage en sortie du trou est donc directement influencé par l'effort de poussée. Par conséquent tout paramètre influençant cet effort impactera le délaminage en sortie [23 ; 24].

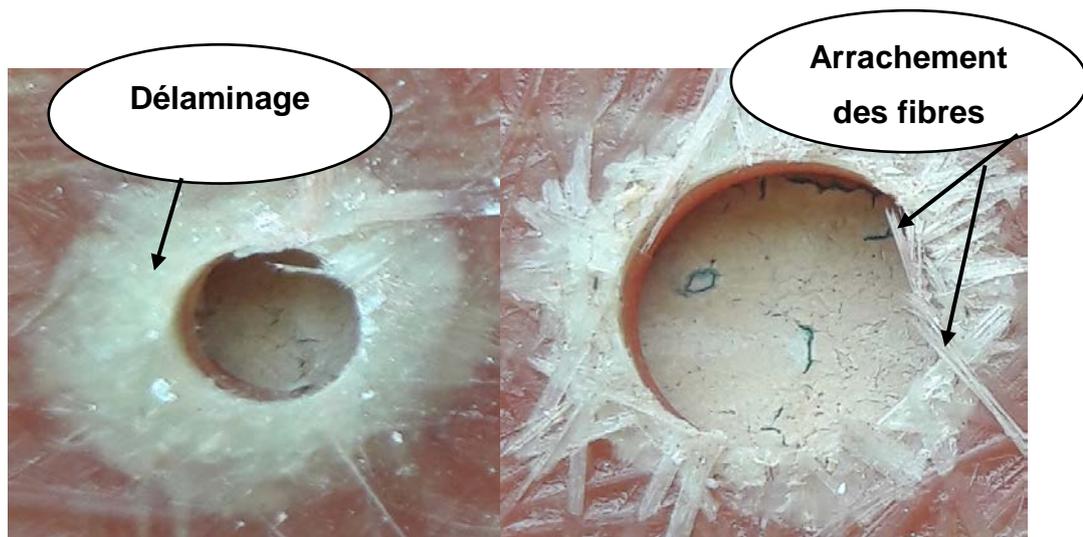


Figure II.15: Défaut en sortie du trou

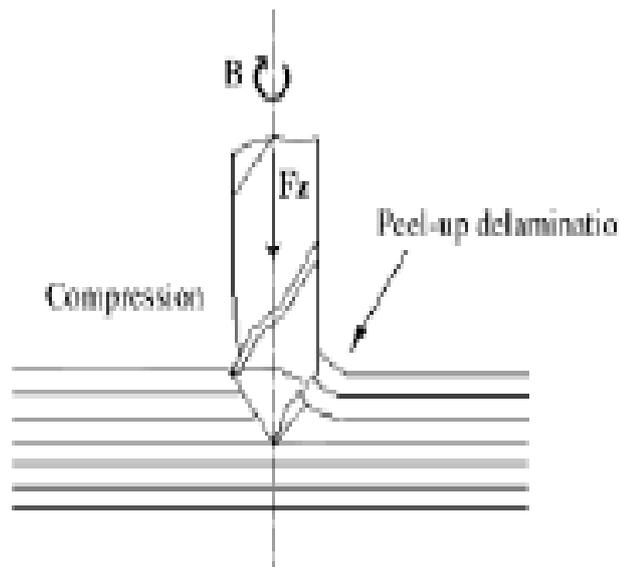
### II.3.2. Les facteurs influençant les défauts

**❖ En entrée du trou :**

Ces facteurs sont liés au matériau à usiner, à la géométrie de l'outil ainsi qu'aux conditions de coupe, il y a un effet de pelage à la périphérie des arêtes de coupes principales du foret hélicoïdal. Ce défaut correspond au décollement du premier pli et est directement lié à l'angle de coupe et à l'angle d'hélice du foret. Cet effet augmente avec l'angle de coupe des deux arêtes principales du foret.

Ce phénomène de décollement intervient dans les premiers temps du perçage lorsque le bec de l'outil atteint l'interface occupée par la matrice entre le pli supérieur et celui juste au-dessous. La périphérie des arêtes de coupe correspond à

l'intersection entre l'arête principale et l'arête secondaire appelée listel. Le copeau en formation tend à remonter sous l'action de la face de coupe principale. Dans cette situation, la seule action qui s'oppose au délaminage du pli supérieur est due à la cohésion de la matrice. Les travaux réalisés par l'utilisation du plan d'expériences, montre que l'étendue du décollement des fibres du premier pli croît avec l'augmentation de la vitesse de coupe et l'avance par tour de l'outil (lors de l'usinage de stratifiés en verre époxy et carbone époxy).



**Figure II.16:** Délaminage à l'entrée du foret hélicoïdal

❖ **Sur la paroi :**

Sous l'action des arêtes de coupe principales du foret, les fibres ont une déformation élastique assimilable à de la flexion avant la rupture fragile.

Sur les fibres coupées, on observe la présence d'une facette inclinée par rapport à la direction de coupe de l'arête secondaire (listel). Le retour élastique des fibres rompues provoque un resserrement du trou sur le foret ce qui a pour conséquence une diminution de diamètre  $D = D_{th} - D_r$  avec  $D < 0$ .

Cette variation négative de diamètre est très peu influencée par l'avance de l'outil, par contre, elle dépend directement de la nature du matériau à outil.

Le perçage d'un trou avec un foret en carbure de tungstène conduit à  $D < 0$ . La même opération du perçage avec outil en diamant produit un  $D > 0$ . L'utilisation d'un foret en diamant polycristallin provoque une valeur de la rugosité beaucoup plus faible que celle obtenue avec un foret de même géométrie en carbure de tungstène.

Ceci est lié à la différence du rayon d'acuité d'arêtes entre les forets de carbure de tungstène et de diamant en plus il y a des outils en carbures revêtus en diamant mais le problème est que le rayon d'arête est plus important. Le resserrement du trou sur le foret provoque une augmentation de la température à l'interface outil/paroi. Cela peut dans certains cas provoquer la dégradation locale de la matrice lorsque la température produite par l'usinage dépasse la température de transition vitreuse  $T_g$ .

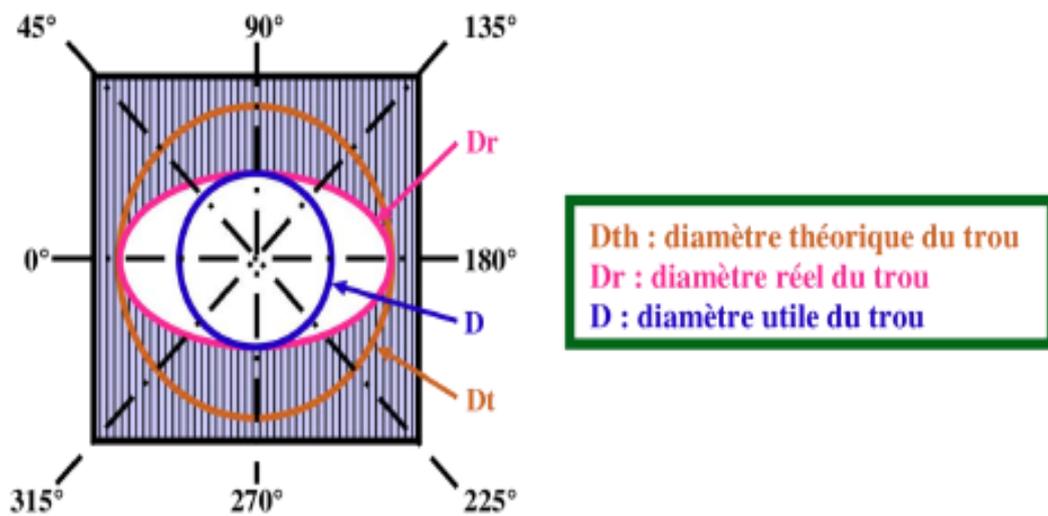


Figure II.17: Schématisation des défauts sur la paroi du trou [5]

**Dr** : diamètre réel du trou ;

**Dth** : diamètre théorique du trou ;

$\Theta$  : angle relatif entre la direction de la vitesse de coupe et la direction des fibres.

Ce phénomène dû aux différentes orientations de fibres et il est d'autant plus intense que le stratifié usiné est globalement isolant et que l'outil est seul en mesure d'évacuer la chaleur produite par l'usinage. L'utilisation d'un outil en diamant permet de réduire les risques de dégradation thermique locale de la matrice grâce à un coefficient de conductivité thermique supérieur à celui du carbure de tungstène.

#### ❖ En sortie du trou :

La vitesse de coupe varie d'un point à l'autre sur chacune des deux arêtes de coupe principales de l'outil et est nulle au centre de l'outil (âme). Donc la matière située devant l'âme de la fraise subit un effort axial résultant de l'avance de l'outil et  $V_c$  de l'âme de la fraise (ça ne coupe pas). Le défaut en sortie de trou apparaît lorsque l'âme de la fraise se trouve en présence du dernier pli. Dans cette situation,

l'épaisseur du matériau non usinée diminue et entraîne une chute de raideur en flexion. L'effort de poussée de la fraise est supérieur à l'effort de cohésion de la matrice à l'interface entre les plis. Au-delà, il y a création puis propagation d'une fissure par délaminage entre deux plis. La décohésion de la matrice engendre la flexion et l'arrachement des derniers plis. Les paramètres principaux qui influencent la valeur de l'effort de poussée  $F_z$  en perçage sont :

- La vitesse d'avance de l'outil (mm/tours) ;
- La vitesse de coupe  $V_c$  ;
- Le matériau constitutif de l'outil ;
- L'état d'usure et d'endommagement de l'outil ;
- Les types d'affûtage concernent la géométrie de la pointe du foret.

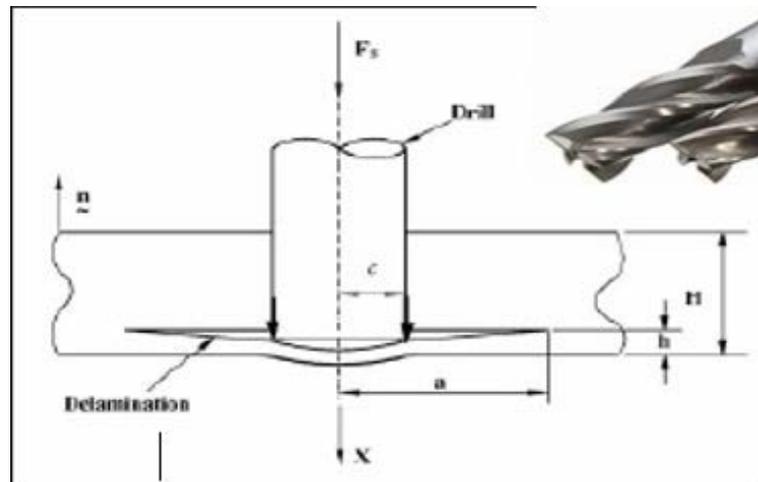


Figure II.18: Schématisation du défaut en sortie du trou [6]

La figure précédente décrit le modèle de délaminage des composites, le centre de la plaque est chargé par la fraise H.S.S de diamètre  $d$  (rayon  $c$ ).  $F_a$  est la force axiale,  $X$  est le déplacement,  $H$  est l'épaisseur de la plaque,  $h$  est l'épaisseur non percée (ou restante) et  $a$  est le rayon du délaminage.

Différentes géométries d'outils ont été élaborées pour réduire le délaminage à la sortie du trou pour cela on a utilisé un foret hélicoïdal.

#### ❖ FORET :

Parmi les outils qui limitent le délaminage en sortie de trou, on a utilisé le foret hélicoïdal est montrée sur la Figure II.19. Cet outil représente la plus grande force critique parmi les outils étudiés.

La figure précédente décrit le modèle de délaminage des composites, le centre de la plaque est chargé par le foret hélicoïdal de diamètre  $d$  (rayon  $c$ ).  $F_a$  est la force axiale,  $X$  est le déplacement,  $H$  est l'épaisseur de la plaque,  $h$  est l'épaisseur non percée (ou restante) et  $a$  est le rayon du délaminage

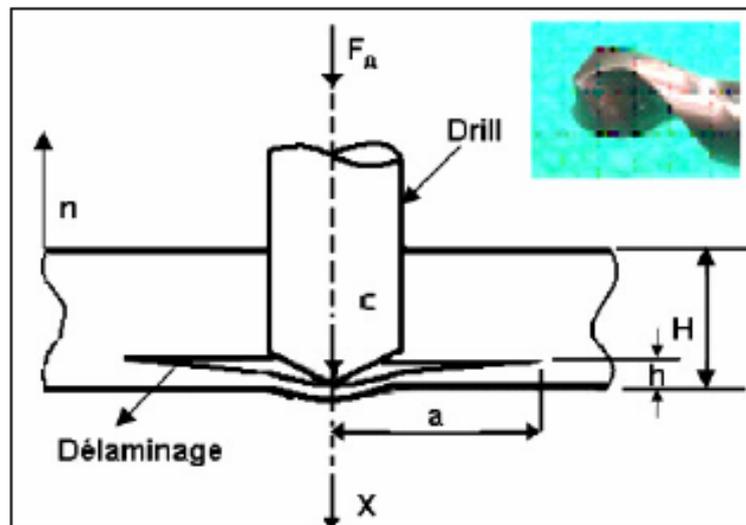


Figure II.19: modèle de délaminage, foret hélicoïdal [6]

Pour éviter aussi le délaminage durant le perçage, la force axiale appliquée ne doit pas dépasser une valeur critique qui est une fonction des propriétés du matériau ainsi que de l'épaisseur restante non percée  $h$ . La force axiale réelle est liée à la vitesse d'avance. Quand l'épaisseur restante non percée diminue progressivement, la force axiale critique diminue également.

La stratégie devrait être alors de percer avec une vitesse d'avance plus petite, car la résistance à la déformation diminue en approchant de la sortie.

### II.3.3. L'effet de la vitesse de rotation sur le délaminage :

Les figures suivantes illustrent l'effet de la vitesse de rotation sur le délaminage (fibre de verre /époxy) à 1000 et 2000 tr/min, avec une fraise et un foret hélicoïdal.

## ❖ Avec Fraise :

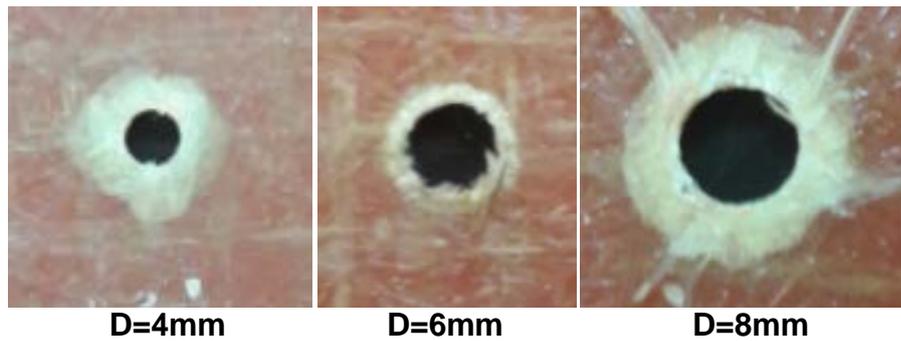


Figure II.20 : perçage à 180 tr/min et vitesse d'avance de 250mm/min avec fraise

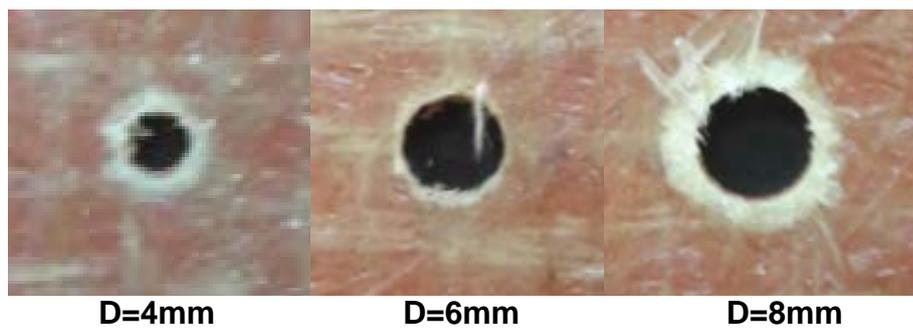


Figure II.21 : perçage à 1000 tr/min et vitesse d'avance de 250mm/min avec fraise

## ❖ Avec foret :



Figure II.22 : perçage à 180 tr/min et vitesse d'avance de 250mm/min avec foret

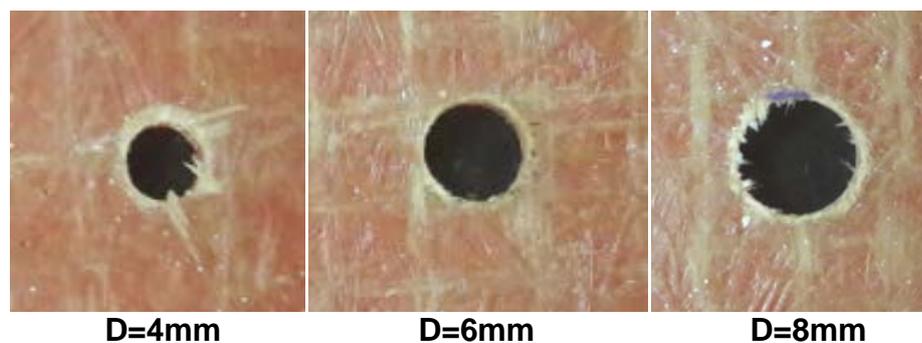


Figure II.23 : perçage à 1000 tr/min et vitesse d'avance de 250mm/min avec foret

Les figures II.20 à II.23 montrent que la taille du délaminage diminue lorsque la vitesse de rotation augmente, et la zone endommagée à la sortie de la fraise est plus importante que celle du foret.

#### II.3.4. L'effet de la vitesse d'avance sur le délaminage

Une campagne d'essais a été faite sur des éprouvettes 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.

Les figures II.24 à II.26 montrent l'effet de la vitesse d'avance sur le délaminage.

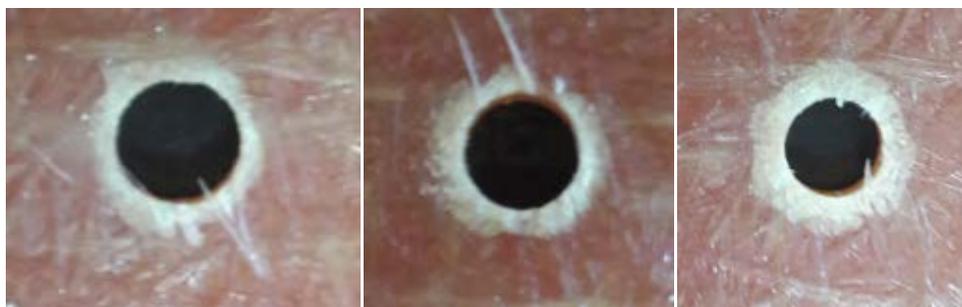


**Va=16mm/min**

**Va=50mm/min**

**Va=250mm/min**

Figure II.24 : perçage à 180 tr/min en variation de vitesse d'avance



**Va=16mm/min**

**Va=50mm/min**

**Va=250mm/min**

Figure II.25 : perçage à 710 tr/min en variation de vitesse d'avance

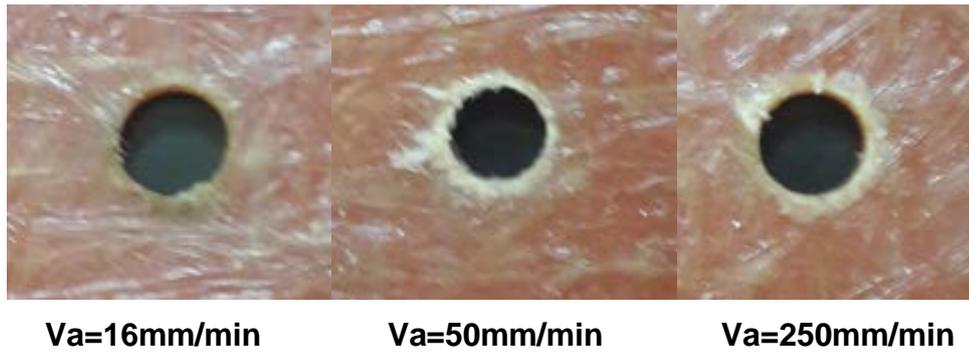


Figure II.26 : perçage à 1000 tr/min en variation de vitesse d'avance

Les figures II.24 à II.26 montrent que la taille du délaminage diminue lorsque la vitesse d'avance diminue.

#### I.4. Modélisation du perçage des matériaux composites

Lors du perçage des composites, le défaut majeur est le délaminage en sortie, ainsi, la majeure partie des simulations sur les composites porte sur ce point. Si ce phénomène est compris globalement, la simulation pour l'ensemble des géométries de forets, paramètres machines et propriétés du composite reste encore très complexe à réaliser. Un certain nombre de simulations se basent sur des essais de poinçonnage, cherchant à déterminer l'effort nécessaire au délaminage en sortie [22 ; 25-27]. D'autres études se font expérimentalement en testant des paramètres avec divers outils afin de déterminer ce qui limite au mieux le délaminage tout en garantissant une qualité de trous suffisante et une usure d'outils correcte [17 ; 29]. Une petite partie des autres modélisations porte sur la modélisation des efforts mécaniques lors du perçage de composites à fibres [28].

En conclusion, le perçage des composites est une opération complexe engendrant de nombreux rebuts, il convient d'y prêter particulièrement attention. Les verrous concernant cette opération sont le contrôle du délaminage en sortie, la qualité de la surface du trou ainsi que le contrôle de l'usure des outils qui peut rapidement devenir catastrophique.

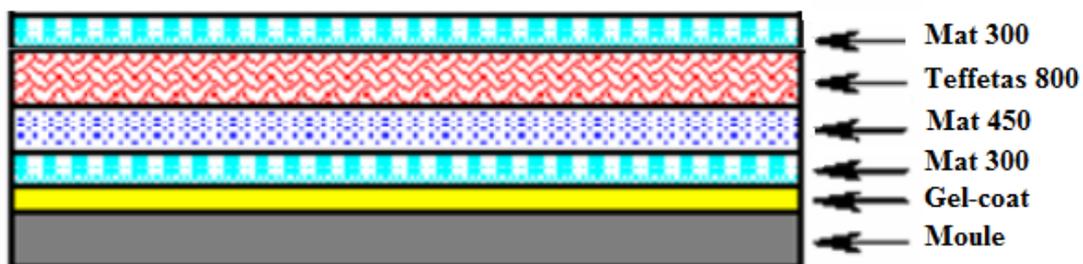
### III.1. Matériaux utilisés pour l'étude

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 III.1). Les constituants de base de ces matériaux (résine et renfort) sont des produits commerciaux de composition complexe.



**Figure III.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 (composée de quatre couches après le gel-coat : mat 300, mat 450, taffetas 800, et mat 300 présentées par la figure III.2).



**Figure III.2:** Stratification utilisée par l'entreprise

#### III. 1.1 Constituants des matériaux

##### ❖ Matrice

Nous avons utilisé une matrice synthétique en polyester insaturé thermodurcissable.

### ❖ Renforts

Nous avons utilisé les fibres de verre type E, sous différentes architectures à savoir : mat 300, mat 450 et taffetas 800 (roving 800) présentées par la figure III.3.



Figure III.3 : Les différents renforts utilisés ; a) Mat 300g/m2 ; b) Mat 450g/m2 c) Taffetas 800g/m2

### III.1.2 Procédé d'élaboration des matériaux

Les plaques de stratifiés 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 III.4).

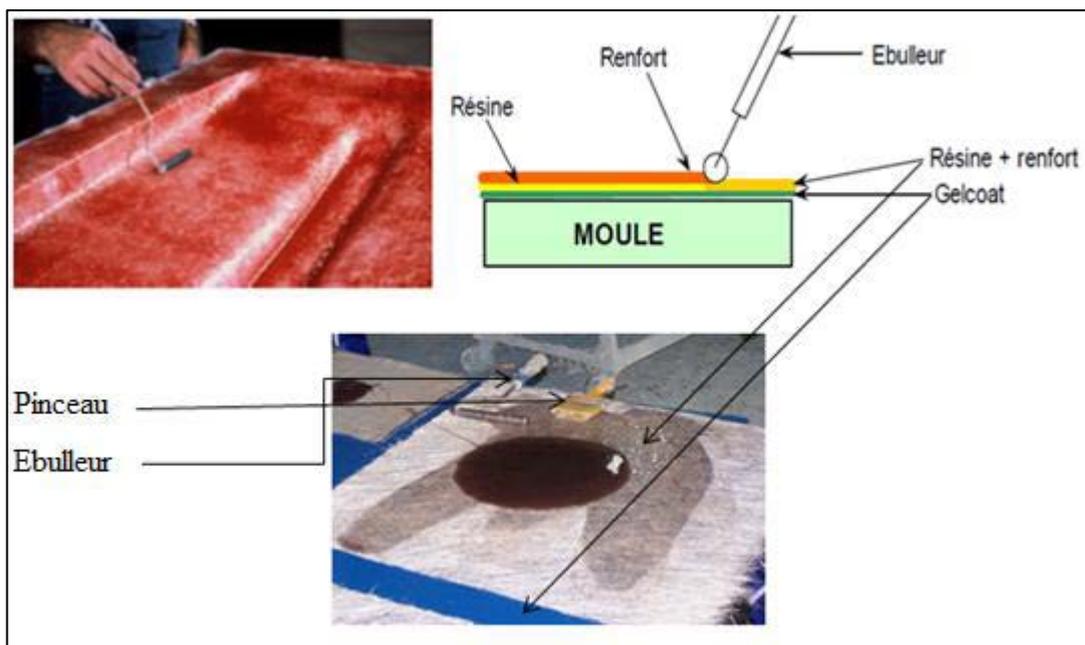


Figure III.4 : Moulage au contact

Le procédé est manuel, il consiste à nettoyer d'abord le moule avec de la cire (norpol FI-180-10) qui sert d'un agent de démoulage puis appliquer une couche colorée de gel-coat d'épaisseur ( $0,28 \pm 0,05$ ) mm sur une plaque lisse et rigide à l'aide d'un pistolet. Après 12 heures environ, on procède à l'empilement des différentes couches imbibées de résine (mélangée à 3% du durcisseur) et les compactées manuellement à l'aide d'un rouleau débulleur 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.

### III.1.3 Matériaux élaborés

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

Tableau III.1 : Différents lots d'éprouvettes d'essais

Lots	Ordre des plis
VG(A)	Gel coat-300-450-800-300

### III.2 Découpage des éprouvettes

Les plaques que nous avons élaborées en composite verre /polyester insaturé sont de dimensions ( $450 \times 450$ ) mm<sup>2</sup>. Les éprouvettes sont découpées des plaques suscitées à l'aide d'une scie à disque diamanté (figure III.5) sous un jet d'eau. Après la découpe, les éprouvettes sont ébavurées par un léger ponçage, puis nettoyées rapidement à l'acétone.



Figure III.5 : Scie à disque diamanté

#### ❖ Géométrie des éprouvettes de flexion

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

$$L = 16h + 20 (\pm 1) \text{ mm};$$

$$10 < b \leq 15 \text{ mm} \quad \text{pour} \quad h \leq 5 \text{ mm}$$

- 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 :

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

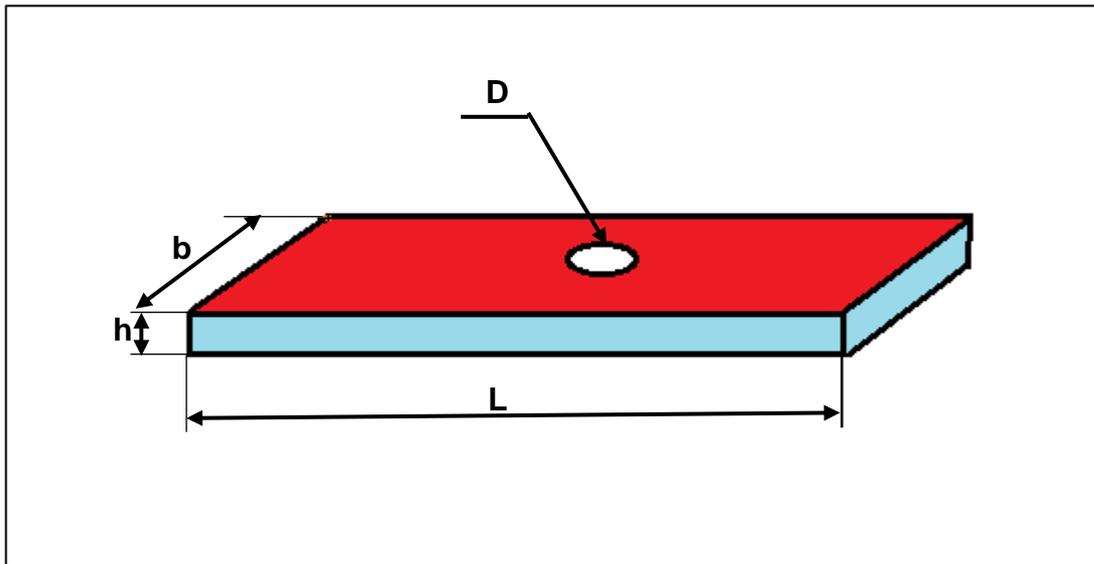


Figure III .6 : Géométrie des éprouvettes



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

### III.3.Perçage

#### III.3.1. Procédés

Nous avons effectué plusieurs trous de 4, 6 et 8 mm sur différentes plaques de 10 sur 15 mm avec 9 vitesses de coupe différentes.

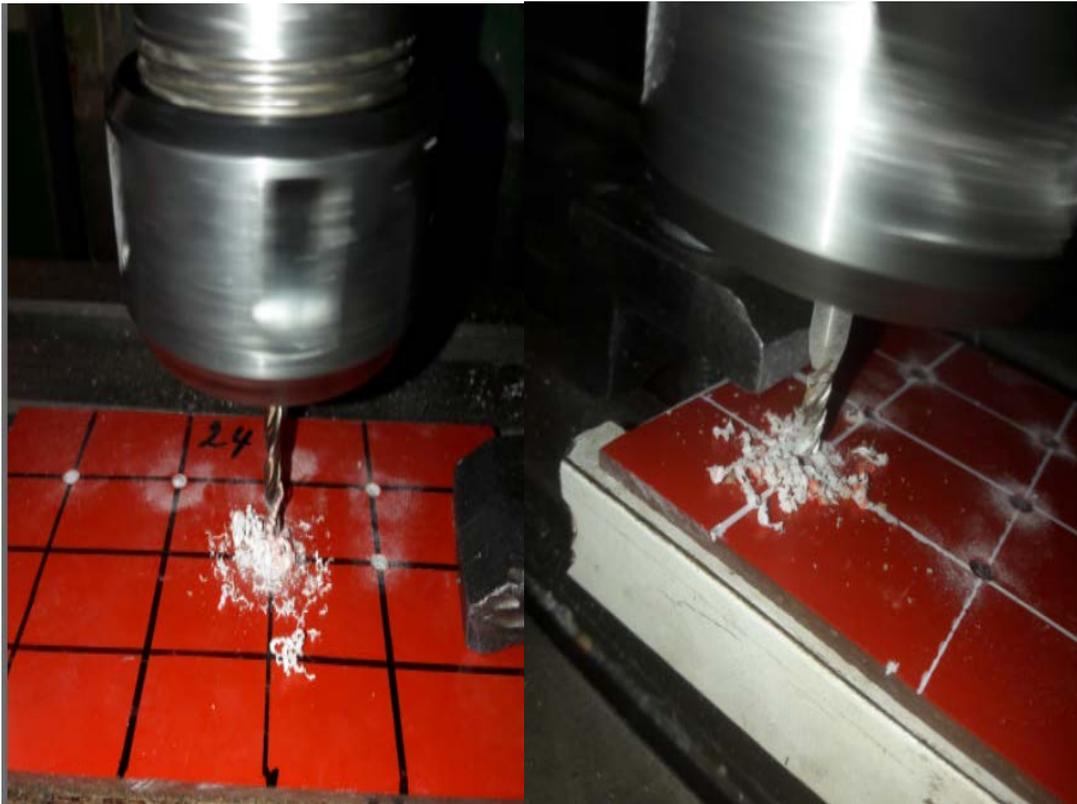


Figure III.8 : perçage du matériau composite avec fraise et foret

### III.3.2. Vitesses et diamètres utilisés

Le protocole expérimental est basé sur trois vitesses d'avance 16, 50 et 250mm/min et 3 vitesses de rotation 180, 710 et 1000tr/min pour les 3 différents diamètres 4, 6 et 8 mm, en fraisage et en perçage.

### III.3.3. Machines et outils utilisés

#### ❖ 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.

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(langage)). 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.



Figure III.9: fraiseuse verticale semi-automatique

### ❖ Outils

Les outils utilisés sont des fraises de diamètres 4, 6 et 8 mm et des forets hélicoïdaux de diamètres 4, 6 et 8 mm.



Figure III.10 : fraises, et forets hélicoïdaux

## III.4. 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.

### ➤ Machine de flexion :

Les essais de flexion sont réalisés sur une machine de flexion de type Z50 (figure III.10). 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 deux vitesses qui sont : 2 et 3 mm/mn en fonction de l'épaisseur de l'éprouvette  $h$ , et à une température ambiante d'environ 20°C.



Figure III.11 : machine de flexion type Z50

Pour accomplir l'essai de flexion à quatre points nous avons fabriqué un dispositif d'application des efforts (figure III.10).

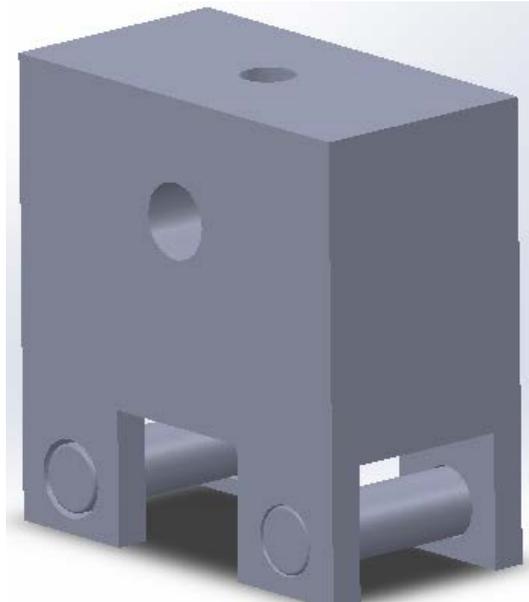


Figure III.12 : dispositif flexion quatre points

#### III.4.1. Résultats obtenus pour l'essai de flexion

Nous avons découpé plusieurs éprouvettes sur lesquelles des trous ont été usinés par chacun des outils (fraise et foret) dans le but d'étudier l'influence de l'outil et des conditions de coupes (Vitesse de rotation et vitesse d'avance) sur le comportement mécanique de la plaque. Ceci pour déceler d'éventuels défauts non visibles causés par les paramètres de coupe. Pour cela, nous avons effectué l'essai de flexion quatre points pour chaque diamètre en fixant d'abord la vitesse de rotation et variant la vitesse d'avance. Les paramètres étudiés pour chaque diamètre sont :

Diamètre du trou (mm): 4, 6 et 8

Type d'outils : Fraise ou foret ;

Vitesse de rotation (tr/min) : 180, 710 et 1000

Vitesse d'avance (mm/min) : 16, 50 et 250

Les résultats obtenus sont résumés par les tableaux et figures suivantes :

## III.4.1.1 Cas du fraisage

Diamètre 4 mm

Vitesse de rotation 180 tr/min

Tableau III.2 : variation de vitesse d'avance

Eprouvette	D(mm)	N(tr/min)	Va(mm/min)	b(largeur)	h(épaisseur)	F max
1-1	4	180	16	15,1	3,12	426,24
2-2	4	180	50	15,12	3,12	412,27
3-1	4	180	250	14,98	3,13	366

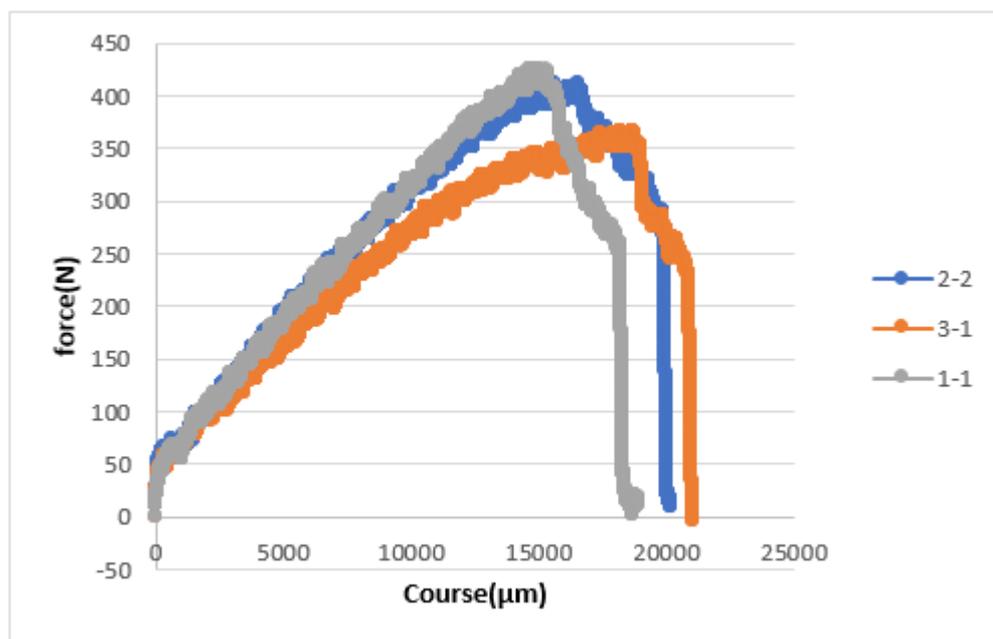


Figure III.13 : comparaison de la résistance à la flexion selon la vitesse d'avance pour N=180tr/min

Nous remarquons que l'éprouvette percée à  $V_a=16\text{mm/min}$  résiste à une force plus grande que celles des éprouvettes percées à  $V_a=50\text{mm/min}$  et  $V_a=250\text{mm/min}$ .

Ceci peut être expliqué par le délaminage et la séparation des plis à chaque fois qu'on augmente la vitesse d'avance

Diamètre 4 mm

Vitesse de rotation 710 tr/min

Tableau III.3 :variation de la vitesse d'avance

Eprouvette	D(mm)	N(tr/min)	Va(mm/min)	b(largeur)	h(épaisseur)	Fmaxi
4-2	4	710	16	15,09	3,13	397,95
5-1	4	710	50	15,15	3,11	365,41
6-1	4	710	250	15,2	3,12	351,25

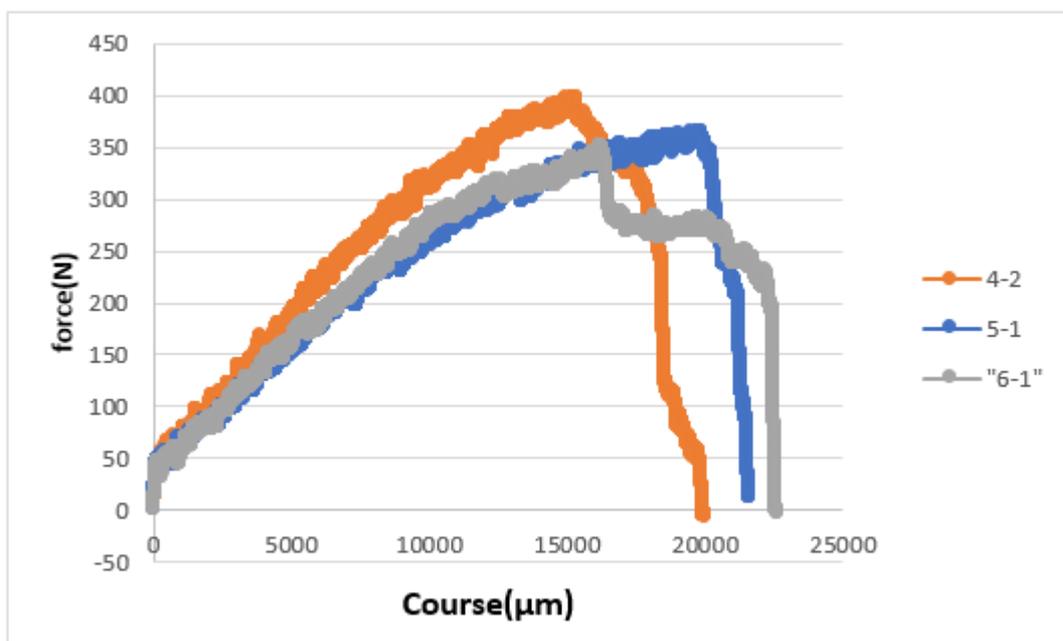


Figure III.14 : comparaison de la résistance à la flexion selon la vitesse d'avance pour  $N=710\text{tr/min}$

Nous constatons comme précédemment que la vitesse d'avance de  $V_a=16\text{mm/min}$  est la plus appropriée pour la vitesse de rotation de  $N=710\text{tr/min}$  car la force maximale est plus grande que dans les deux autres cas de vitesses d'avance. Les forces maximales sont réduites comparativement aux forces maximales obtenues pour la vitesse de rotation de  $N=180\text{tr/min}$ , ceci met en évidence l'influence de la vitesse de rotation de la broche.

Diamètre 4 mm

Vitesse de rotation 1000 tr/min

Tableau III.4 :variation de la vitesse d'avance

Eprouvette	D(mm)	N(tr/min)	Va(mm/min)	b(largeur)	h(épaisseur)	F max
7-2	4	1000	16	15,1	3,13	446,20
8-2	4	1000	50	15,05	3,11	418,89
9-1	4	1000	250	15,15	3,13	329,37

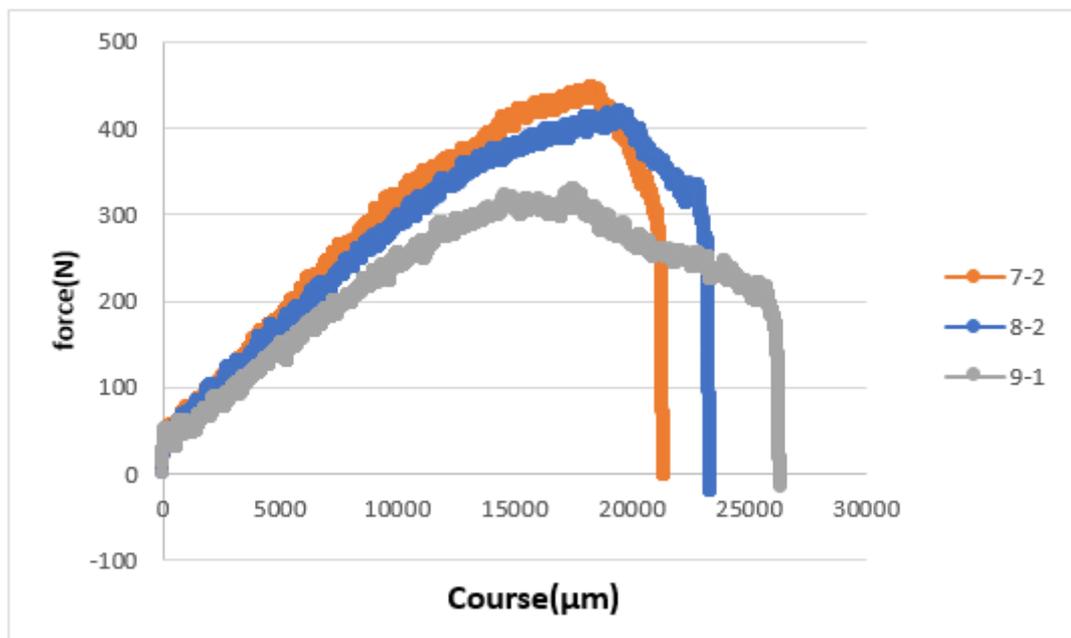


Figure III.15 : comparaison de la résistance à la flexion selon la vitesse d'avance pour  $N=1000\text{tr/min}$

Nous remarquons toujours que la vitesse d'avance de  $V_a=16\text{mm/min}$  est la plus appropriée puisque la force maximale supportée est plus importante. Par contre nous obtenons une meilleure résistance par rapport aux vitesses de rotation de  $180\text{tr/min}$  et  $710\text{tr/min}$ , sauf pour la vitesse d'avance  $V_a=250\text{mm/min}$ .

Nous pouvons conclure pour le diamètre de 4mm que la vitesse de rotation de  $N=1000\text{tr/min}$  et une avance de  $V_a=16\text{mm/min}$  représente la solution la plus adéquate.

Diamètre 6 mm

Vitesse de rotation 180 tr/min

Tableau III.5 :variation de la vitesse d'avance

Eprouvette	D(mm)	N(tr/min)	Va(mm/min)	b(largeur)	h(épaisseur)	Fmax
10-2	6	180	16	15,11	3,12	392
11-3	6	180	50	15,09	3,11	338
12-1	6	180	250	15,15	3,11	285

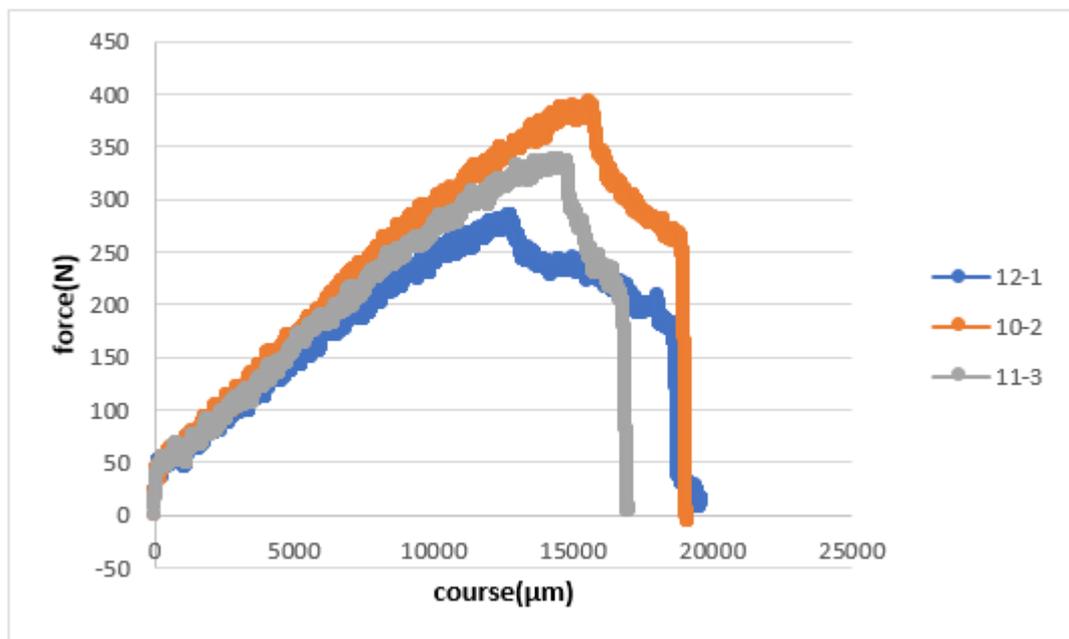


Figure III.16 : comparaison de la résistance à la flexion selon la vitesse d'avance pour  $N=180\text{tr/min}$

Pour le cas de  $N=180\text{tr/min}$ , nous remarquons que la vitesse d'avance joue un rôle important pour l'écart entre les efforts maximaux supportés est important, il reste que la vitesse d'avance appropriée est  $V_a=16\text{mm/min}$ .

Diamètre 6 mm

Vitesse de rotation 710 tr/min

Tableau III.6 :variation de la vitesse d'avance

Eprouvette	D(mm)	N(tr/min)	Va(mm/min)	b(largeur)	h(épaisseur)	F max
13-2	6	710	16	15,13	3,11	327.72
14-3	6	710	50	15,10	3,13	334,78
15-1	6	710	250	15,12	3,12	299,22

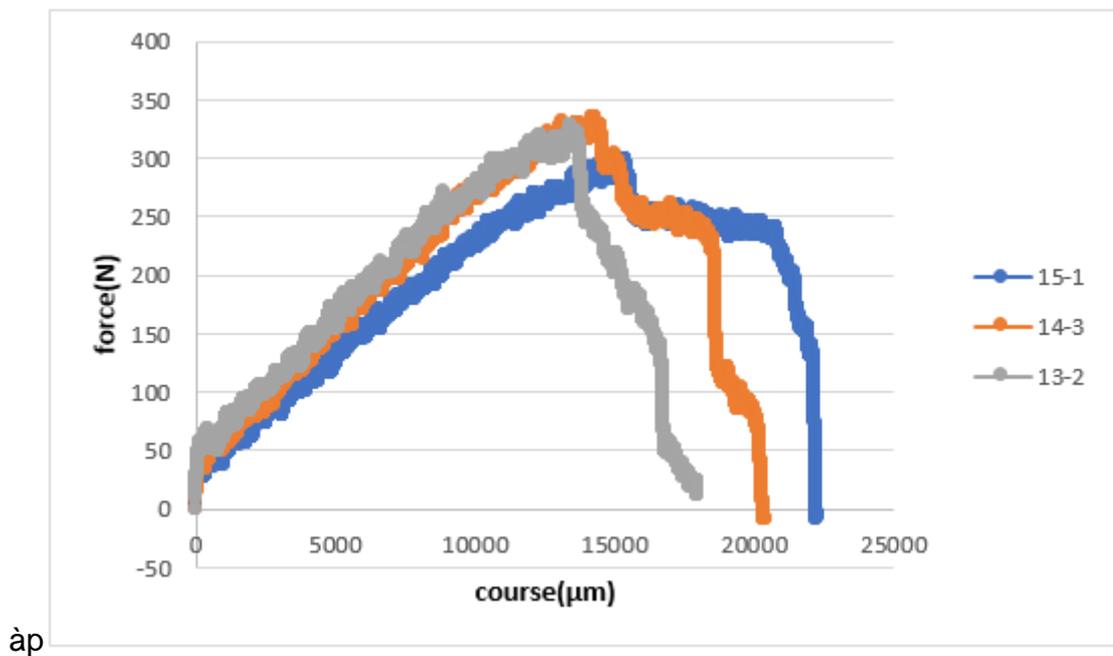


Figure III.17 : comparaison de la résistance à la flexion selon la vitesse d'avance pour N=710tr/min

La vitesse d'avance 16mm/min reste toujours la plus favorable est pour cette vitesse de rotation 710tr/min, il est préférable d'éviter les vitesses 50 et 250mm/min.

Diamètre 6 mm

Vitesse de rotation 1000 tr/min

Tableau III.7 :variation de la vitesse d'avance

Eprouvette	D(mm)	N(tr/min)	Va(mm/min)	b(largeur)	h(épaisseur)	F max
16-3	6	1000	16	15,12	3,12	352,76
17-3	6	1000	50	15,12	3,13	341,52
18-3	6	1000	250	15,14	3,12	331,29

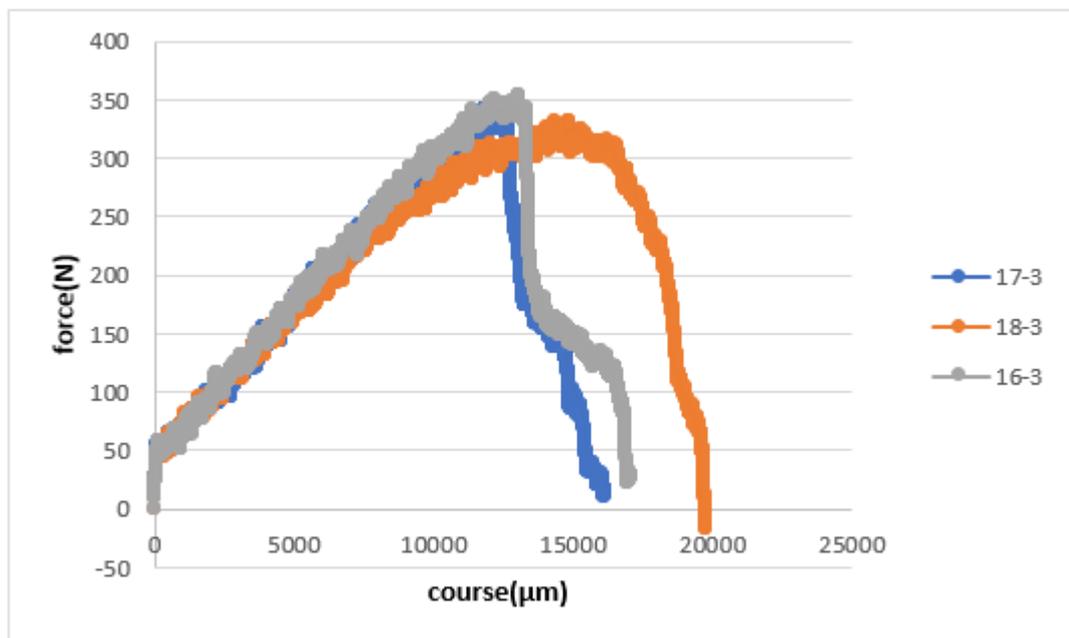


Figure III.18 : comparaison de la résistance à la flexion selon la vitesse d'avance pour N=1000tr/min

Cette figure montre que les trois courbes donnent des valeurs approchées des forces plus élevées par rapport aux forces de la figure III.17 (N=700tr/min) cela est dû à l'augmentation de la vitesse de rotation.

On peut toujours dire que la vitesse 1000tr/min et Va=16mm/min est la plus favorable pour des trous de diamètre 6mm

Diamètre 8 mm

Vitesse de rotation 180 tr/min

Tableau III.8 :variation de la vitesse d'avance

Eprouvette	D(mm)	N(tr/min)	Va(mm/min)	b(largeur)	h(épaisseur)	Fmax
19-3	8	180	16	15,07	3,12	256,24
20-3	8	180	50	15,12	3,13	243,24
21-1	8	180	250	15,11	3,11	232,92

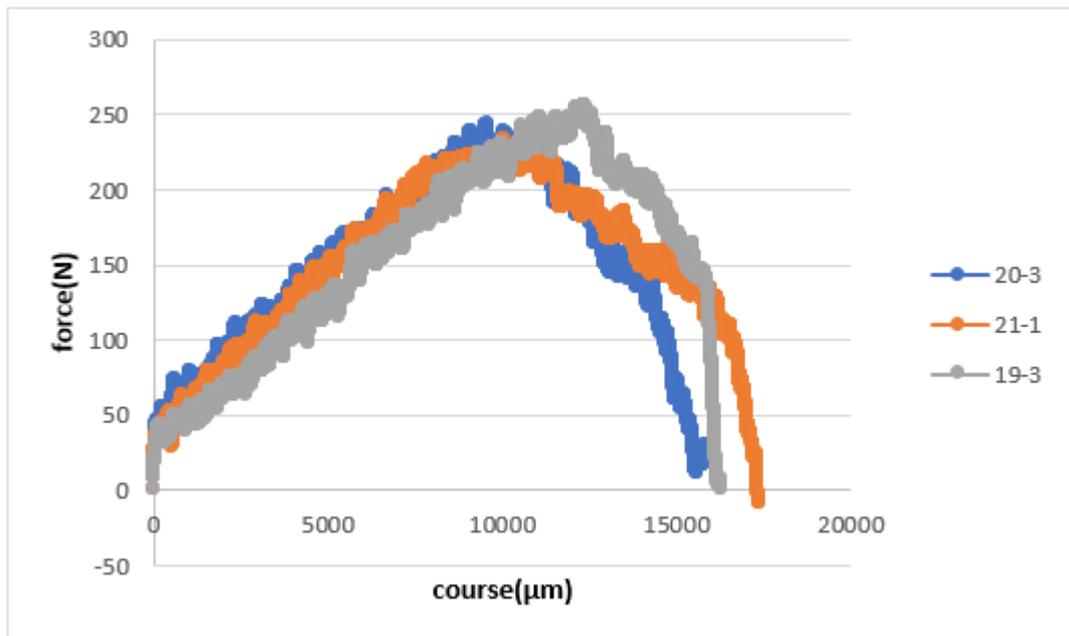


Figure III.19: comparaison de la résistance à la flexion selon la vitesse d'avance pour  $N=180\text{tr/min}$

Dans la figure III.19 nous constatons que les forces maximales supportées par les trois éprouvettes pour l'usinage d'un trou de 8mm sont presque les mêmes.

Nous pouvons conclure pour le diamètre de 8mm que la vitesse de rotation de  $N=180\text{tr/min}$  et les vitesses d'avance 16, 50 et 250mm/min que la surface du délaminage est presque la même.

Diamètre 8 mm

Vitesse de rotation 710 tr/min

Tableau III.9 :variation de la vitesse d'avance

Eprouvette	D(mm)	N(tr/min)	Va(mm/min)	b(largeur)	h(épaisseur)	Fmax
22-3	8	710	16	15,13	3,11	256,95
23-2	8	710	50	15,12	3,14	222,82
24-2	8	710	250	15,15	3,11	204,48

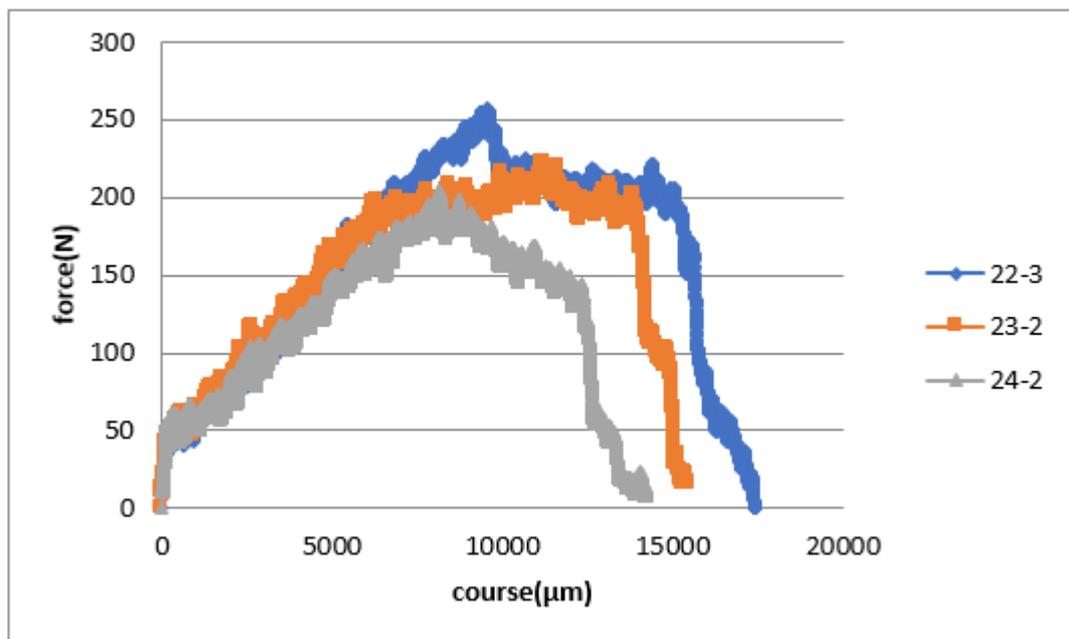


Figure III.20 : comparaison de la résistance à la flexion selon la vitesse d'avance pour  $N=710\text{tr/min}$

Nous constatons dans Les figure III.20 et III.19 que les éprouvettes usinées par la vitesse  $N=710\text{tr/min}$  et la vitesse  $N=180\text{ tr/min}$  résistent presque à la même force pour une vitesse d'avance de  $16\text{mm/min}$ .

Diamètre 8 mm

Vitesse de rotation 1000 tr/min

Tableau III.10 : variation de la vitesse d'avance

Eprouvette	D(mm)	N(tr/min)	Va(mm/min)	b(largeur)	h(épaisseur)	Fmax
25-3	8	1000	16	15,14	3,13	277,04
26-3	8	1000	50	15,15	3,12	270,05
27-1	8	1000	250	15,1	3,11	262,70

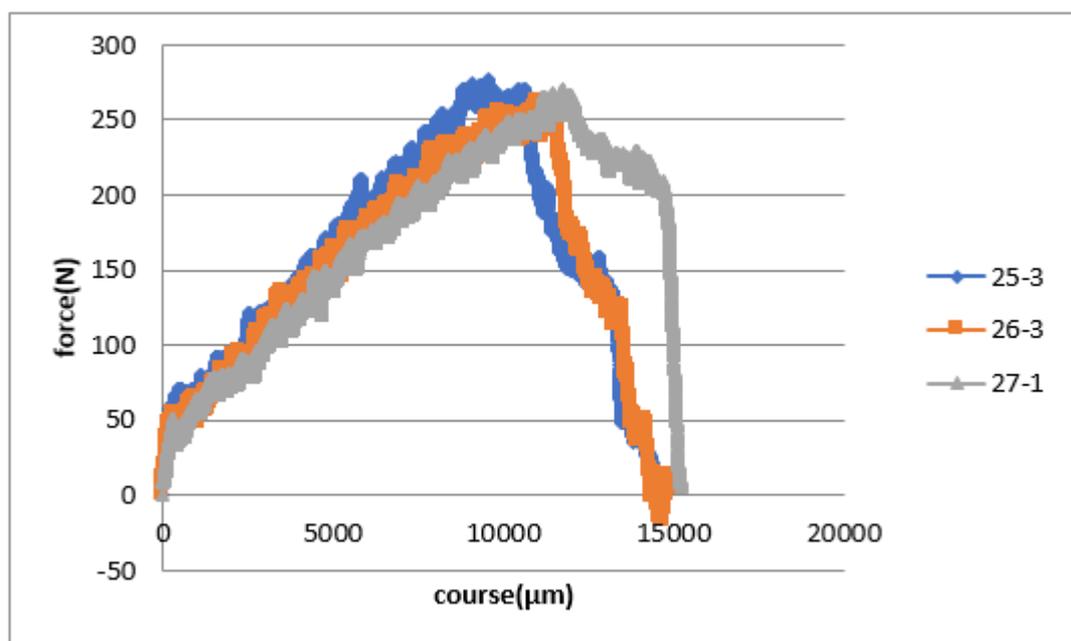


Figure III.21 : comparaison de la résistance à la flexion selon la vitesse d'avance pour  $N=1000\text{tr/min}$

La figure III.21 montre que la vitesse  $N=1000\text{tr/min}$  donne une bonne résistance même avec des vitesses d'avance de 50 et 250mm/min.

On peut dire que la vitesse 1000tr/min convient pour des trous de 8 mm à défaut d'essayer des vitesses de rotation plus grandes.

A chaque fois qu'on augmente la vitesse de rotation et qu'on diminue la vitesse d'avance on obtient une meilleure résistance à la flexion.

## II.5.1.1 Cas du perçage au foret hélicoïdal

Diamètre 4 mm

Vitesse de rotation 180 tr/min

Tableau III.11 :variation de la vitesse d'avance

Eprouvette	D(mm)	N(tr/min)	Va(mm/min)	b(largeur)	h(épaisseur)	Fmax
28-2	4	180	16	15,23	3,13	519,74
29-2	4	180	50	15,13	3,13	447,86
30-2	4	180	250	15,15	3,12	408,27

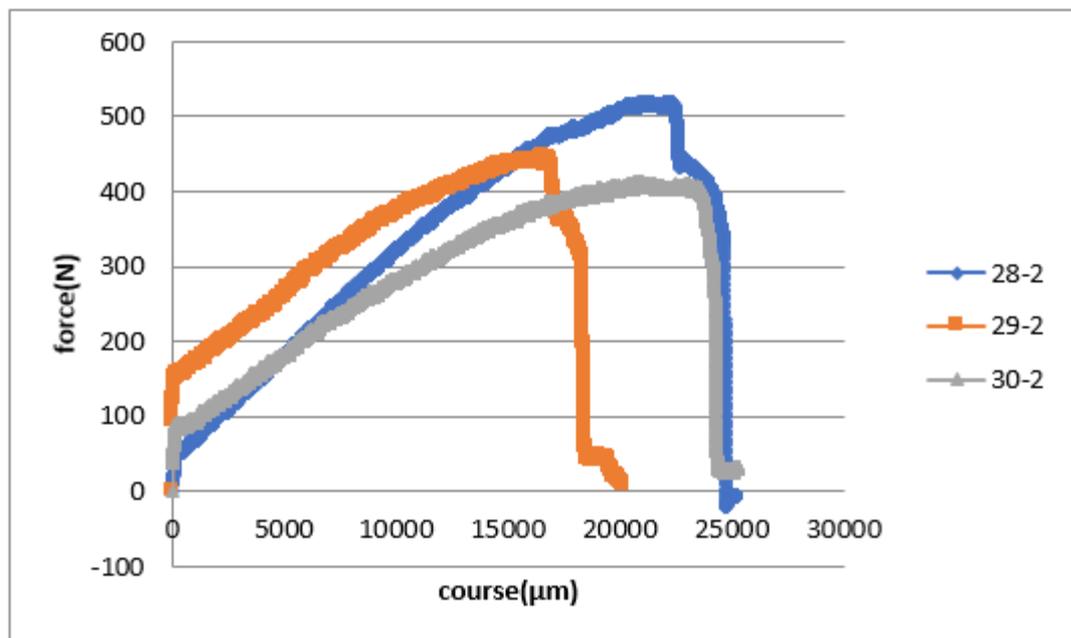


Figure III.22 : comparaison de la résistance à la flexion selon la vitesse d'avance pour  $N=180\text{tr/min}$

Nous constatons que la force maximale supportée dans le cas du perçage est plus importante que celle obtenue en fraisage pour la même vitesse de rotation (tableau II.2, figure III.13). Aussi la vitesse d'avance de  $V_a=16\text{mm/min}$  donne la meilleure solution d'usinage pour  $N=180\text{tr/min}$ .

Diamètre 4 mm

Vitesse de rotation 710 tr/min

Tableau III.12 :variation de la vitesse d'avance

Eprouvette	D(mm)	N(tr/min)	Va(mm/min)	b(largeur)	h(épaisseur)	F max
31-1	4	710	16	15,24	3,14	506,82
32-1	4	710	50	15,15	3,15	477,17
33-2	4	710	250	15,15	3,11	438,86

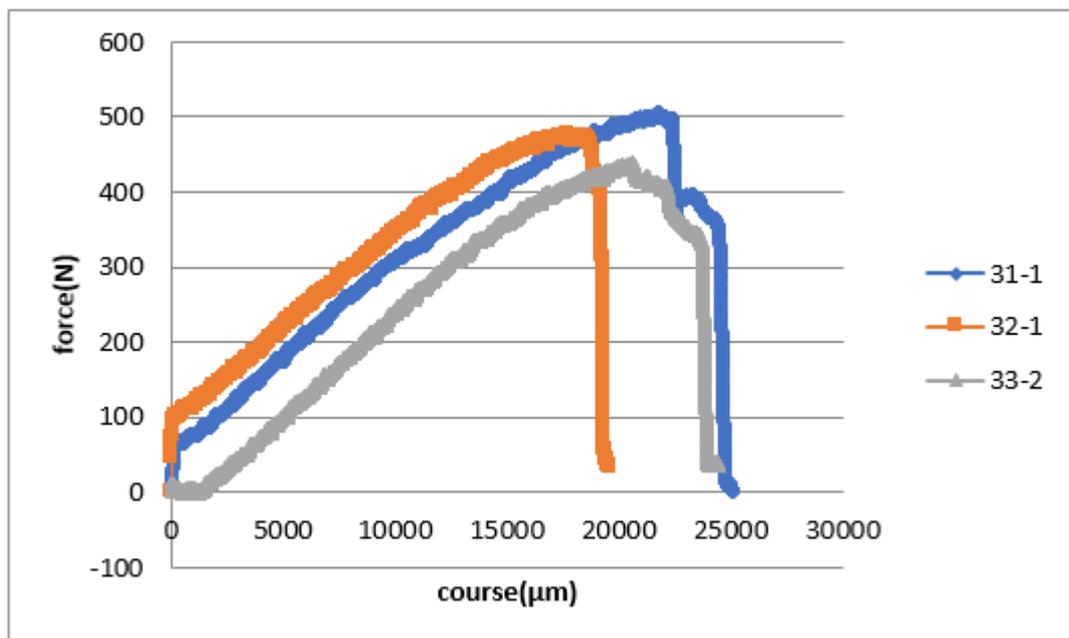


Figure III.23 : comparaison de la résistance à la flexion selon la vitesse d'avance pour N=710tr/min

De même, la vitesse d'avance de 16mm/min est la plus favorable.

Diamètre 4 mm

Vitesse de rotation 1000 tr/min

Tableau III.13 : variation de la vitesse d'avance

Eprouvette	D(mm)	N(tr/min)	Va(mm/min)	b(largeur)	h(épaisseur)	Fmax
34-1	4	1000	16	15,22	3,14	447,17
35-1	4	1000	50	15,11	3,15	440,29
36-1	4	1000	250	15,17	3,11	405,21

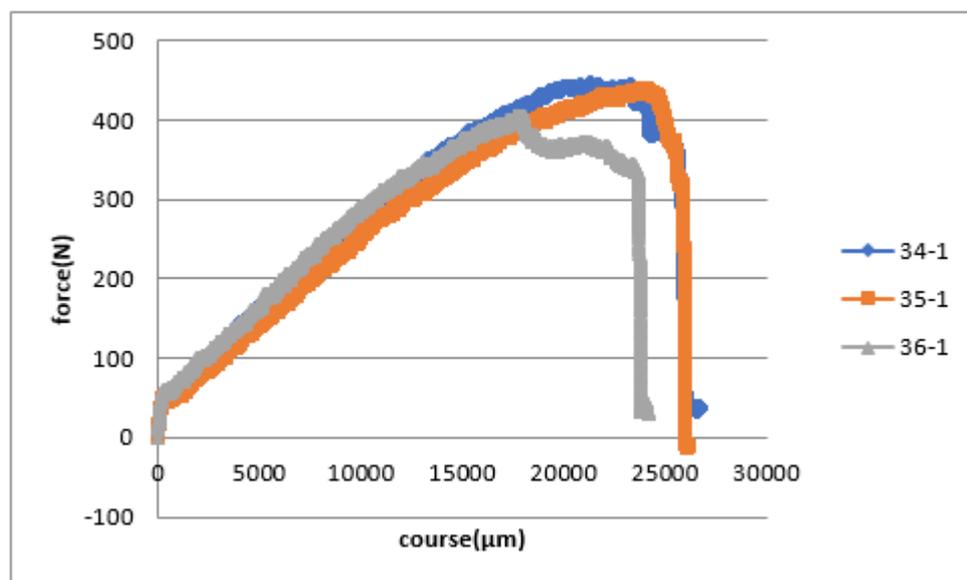


Figure III.24 : comparaison de la résistance à la flexion selon la vitesse d'avance pour  $N=1000\text{tr/min}$

Comme dans le cas du fraisage, nous remarquons que pour une vitesse de rotation de 1000tr/min les deux premières vitesses d'avance donnent des efforts maximaux proches mais une légère différence par rapport au cas de la vitesse d'avance de 250mm/min.

Nous pouvons dire que le délaminage est moins important pour une vitesse de rotation assez grande.

Diamètre 6 mm

Vitesse de rotation 180 tr/min

Tableau III.14 : variation de la vitesse d'avance

Eprouvette	D(mm)	N(tr/min)	Va(mm/min)	b(largeur)	h(épaisseur)	Fmax
<b>37-3</b>	6	180	16	15,2	3,14	390,18
<b>38-3</b>	6	180	50	15,1	3,15	385,53
<b>39-2</b>	6	180	250	15,17	3,11	322,57

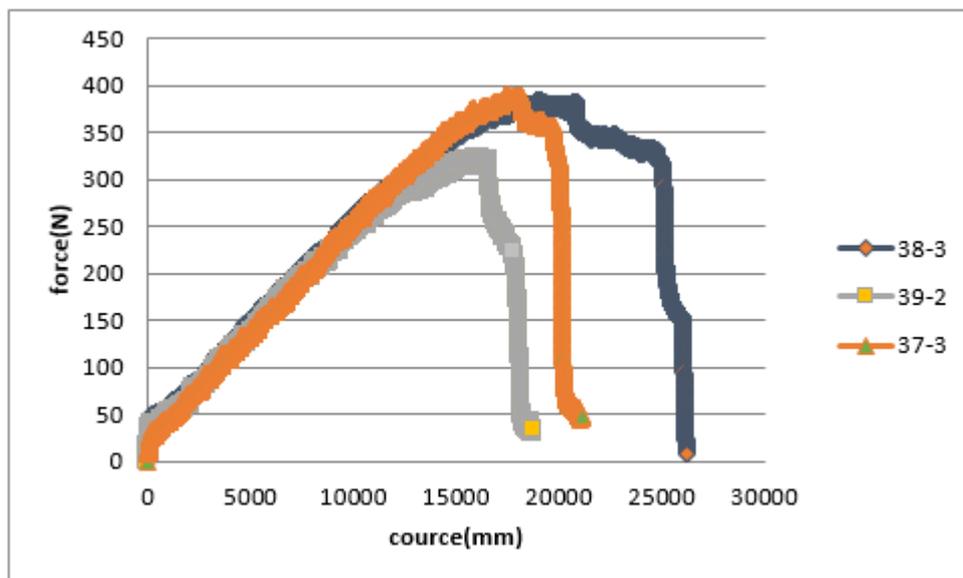


Figure III.25 : comparaison de la résistance à la flexion selon la vitesse d'avance pour  $N=180\text{tr/min}$

Dans le cas de l'usinage à 180tr/min, nous constatons que les vitesses d'avance de 16 et 50mm/min donnent pratiquement la même force maximale.

Diamètre 6 mm

Vitesse de rotation 710 tr/min

Tableau III.15 : variation de la vitesse d'avance

Eprouvette	D(mm)	N(tr/min)	Va(mm/min)	b(largeur)	h(épaisseur)	F max
40-3	6	710	16	15,2	3,14	441,45
41-1	6	710	50	15,1	3,15	355,79
42-1	6	710	250	15,17	3,11	348,81

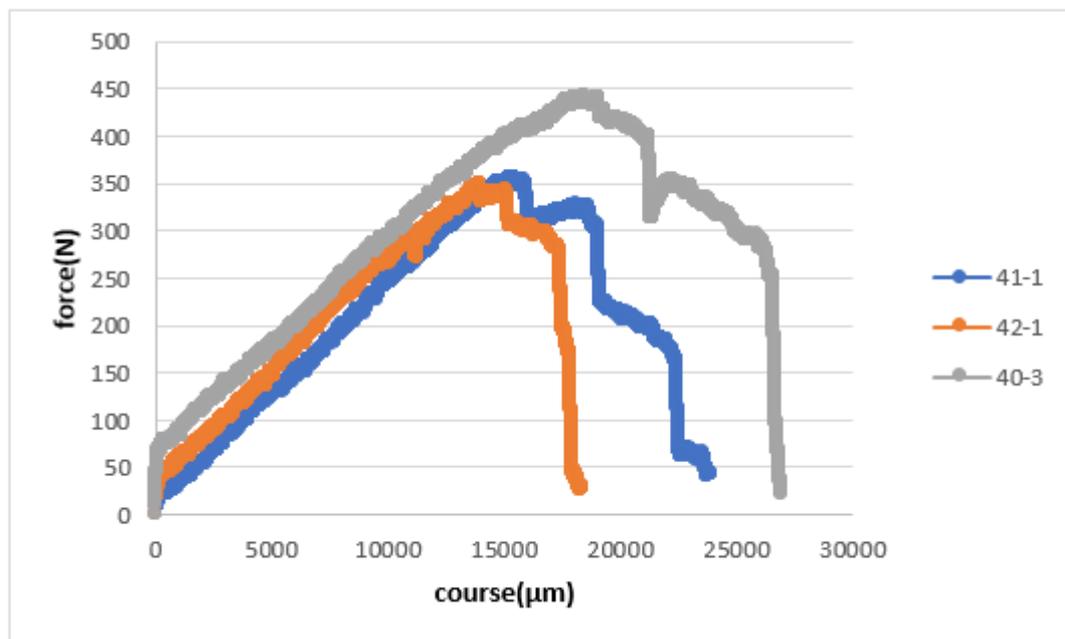


Figure III.26 : comparaison de la résistance à la flexion selon la vitesse d'avance pour  $N=710\text{tr/min}$

Nous constatons comme précédemment (dans le fraisage) que la vitesse d'avance  $V_a=16\text{mm/min}$  est la plus appropriée pour la vitesse de rotation de  $N=710\text{tr/min}$  car la force maximale est plus grande que dans les deux autres cas de vitesses d'avance.

Contrairement au cas du fraisage Les forces maximales ont augmenté comparativement aux forces maximales obtenues pour la vitesse de rotation de  $N=180\text{tr/min}$ , ceci met en évidence l'influence de la vitesse de rotation de la broche.

Diamètre 6 mm

Vitesse de rotation 1000 tr/min

Tableau III.16 :variation de la vitesse d'avance

Eprouvette	D(mm)	N(tr/min)	Va(mm/min)	b(largeur)	h(épaisseur)	Fmax
43-2	6	1000	16	15,2	3,14	373,92
44-2	6	1000	50	15,1	3,15	312,45
45-1	6	1000	250	15,17	3,11	301,15

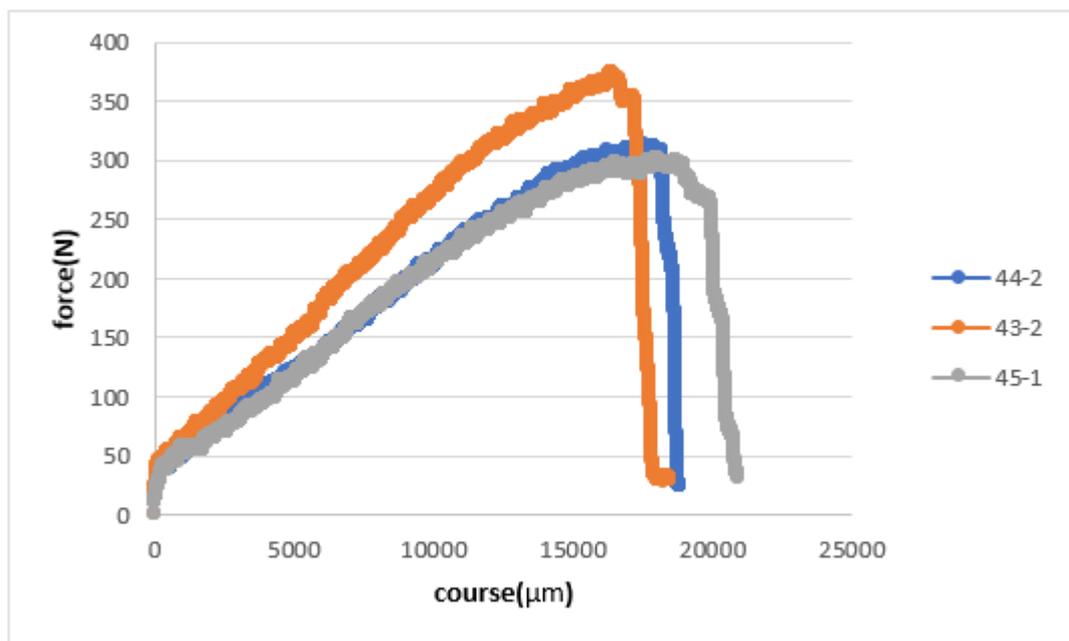


Figure III.27 : comparaison de la résistance à la flexion selon la vitesse d'avance pour  $N=1000\text{tr/min}$

Nous constatons que la force maximale supportée est inférieure à celles obtenues pour les vitesses de rotation de 180 et 710tr/min.

Diamètre 8 mm

Vitesse de rotation 180 tr/min

Tableau III.17 : variation de la vitesse d'avance

Eprouvette	D(mm)	N(tr/min)	Va(mm/min)	b(largeur)	h(épaisseur)	Fmax
46-2	8	180	16	15,2	3,14	368,44
47-2	8	180	50	15,1	3,15	374,71
48-2	8	180	250	15,17	3,11	267,77

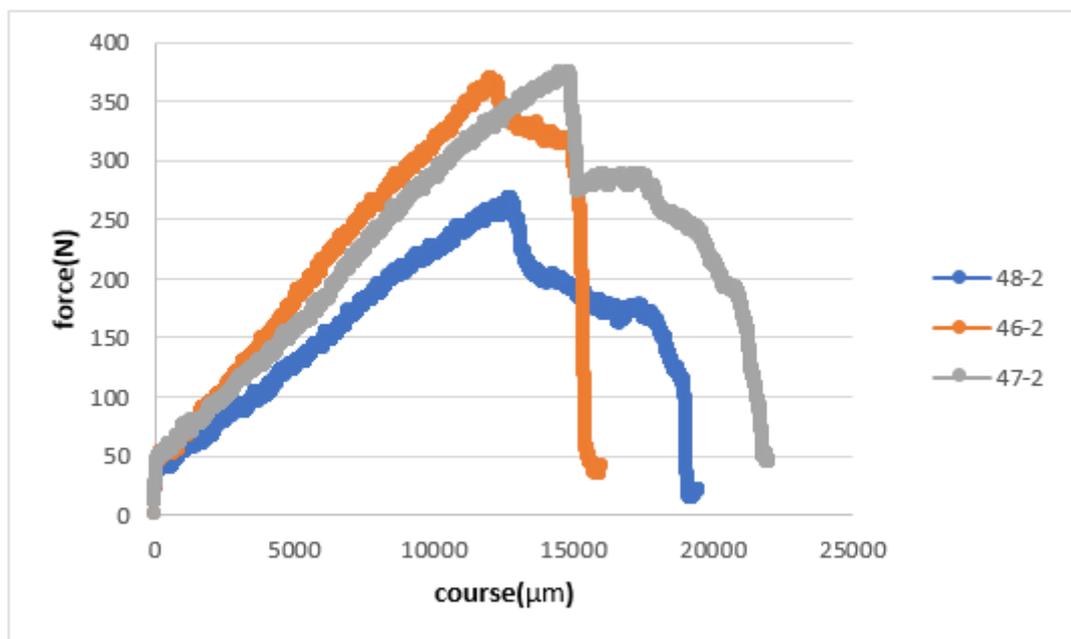


Figure III.28 : comparaison de la résistance à la flexion selon la vitesse d'avance pour  $N=180\text{tr/min}$

Pour des trous de diamètre 8mm et plus nous pouvons dire que les vitesses d'avance de 250mm/min et plus sont à éviter.

Diamètre 8 mm

Vitesse de rotation 710 tr/min

Tableau III.18 :variation de la vitesse d'avance

Eprouvette	D(mm)	N(tr/min)	Va(mm/min)	b(largeur)	h(épaisseur)	Fmax
49-2	8	710	16	15,2	3,14	294,69
50-3	8	710	50	15,1	3,15	299,59
51-1	8	710	250	15,17	3,11	304,17

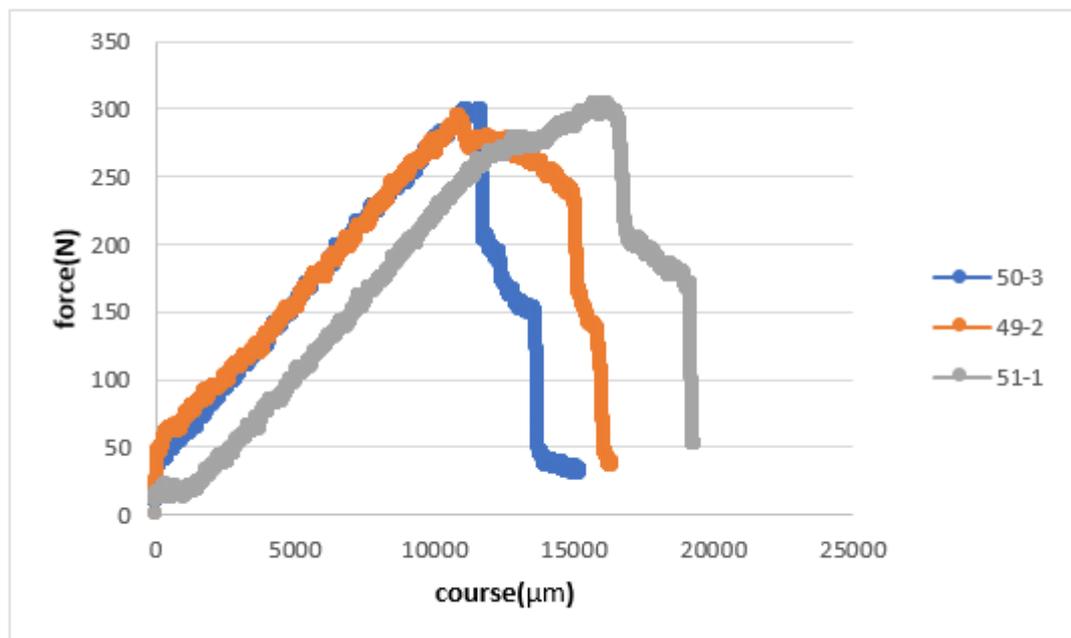


Figure III.29 : comparaison de la résistance à la flexion selon la vitesse d'avance pour  $N=710\text{tr/min}$

Pour une vitesse de rotation de 710tr/min, les trois vitesses d'avance donnent des forces maximales très proches.

Diamètre 8 mm

Vitesse de rotation 1000 tr/min

Tableau III.19 : variation de la vitesse d'avance

Eprouvette	D(mm)	N(tr/min)	Va(mm/min)	b(largeur)	h(épaisseur)	Fmax
52-1	8	1000	16	15,2	3,14	376,49
53-1	8	1000	50	15,1	3,15	336,19
54-3	8	1000	250	15,17	3,11	286,58

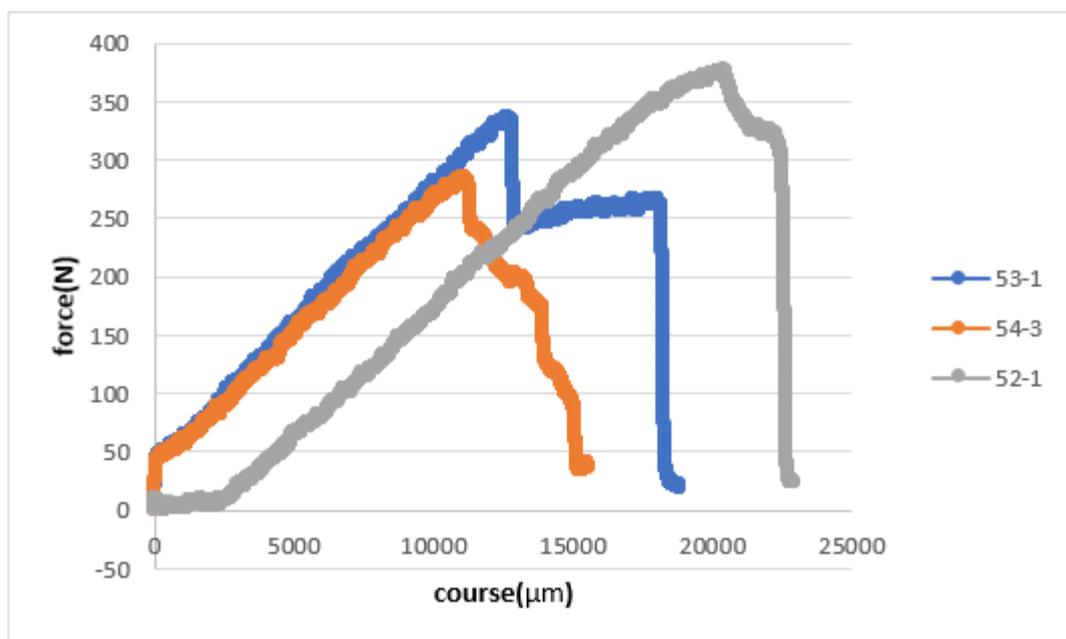


Figure III.30 : comparaison de la résistance à la flexion selon la vitesse d'avance pour  $N=1000\text{tr/min}$

Finalement, nous pouvons dire que la solution adéquate pour l'usinage des trous de diamètre 4 à 8mm est une vitesse de rotation de 1000tr/min et une avance de 16mm/min, ce qui est le même résultat que dans le cas du fraisage. Par contre nous remarquons que l'opération de perçage donne de meilleurs résultats que le fraisage. Ceci peut être confirmé par la troisième partie de notre étude.

### III.5.1. Comparaison de la force de résistance à la flexion en fonction de l'outil

Après avoir étudié l'influence de la vitesse d'avance et de la vitesse de rotation sur la résistance de l'éprouvette à la flexion on passe à l'étude de l'influence de l'outil de coupe sur la résistance de l'éprouvette à la flexion. Cette étude comparative porte donc sur le choix de l'opération d'usinage du trou en fraisage ou en perçage pour conclure.

Nous avons constaté dans l'étude expérimentale précédente que pour les petites vitesses de rotation (180 et 710tr/min) seule la vitesse d'avance de 16mm/min est acceptable car les autres vitesses d'avance provoquent des défauts de délaminage principalement. Pour la vitesse de rotation de 1000tr/min, deux vitesses d'avance peuvent être considérées 16 et 50mm/min pour la même raison.

A titre indicatif et pour des raisons pédagogiques nous reproduisons ici les courbes comparatives pour toutes les vitesses d'avance et toutes les vitesses de rotation (ceci peut être assimilé au cas de l'usinage en présence de petits défauts d'élaboration du matériau).

Les figures sont présentées dans l'ordre suivant : Diamètre – Vitesse de rotation – Vitesse d'avance (3 pages par diamètre, 3 figures par vitesse de rotation et une figure pour chaque vitesse d'avance)

Diamètre 4mm : figures III.31 à III.39, pages 71 à 73

Diamètre 6mm : figures III.40 à III.48, pages 74 à 76

Diamètre 8mm : figures III.49 à III.57, pages 77 à 79

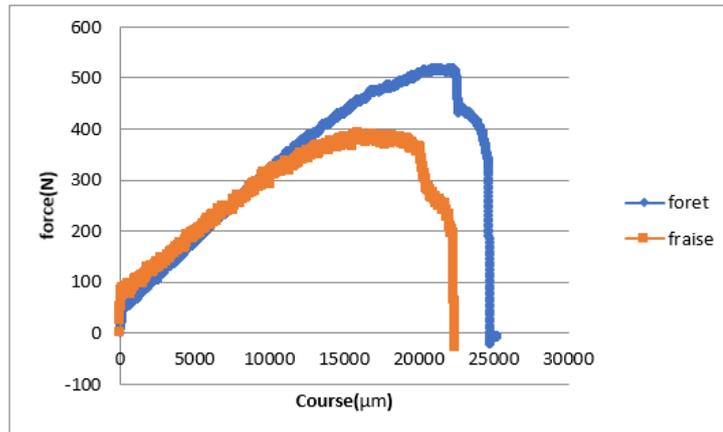


Figure III.31 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 4mm N180tr/min Va16mm/min

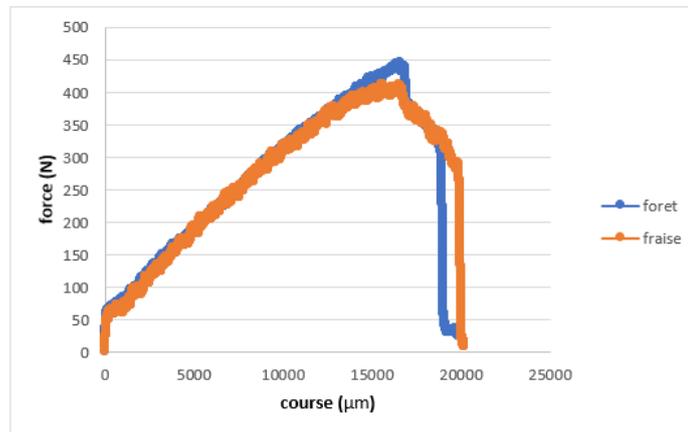


Figure III.32 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 4mm N180tr/min Va50mm/min

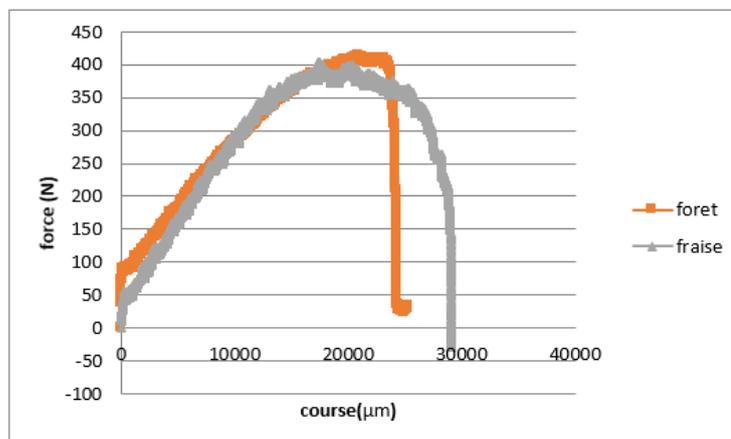


Figure III.33 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 4mm N180tr/min Va250mm/min

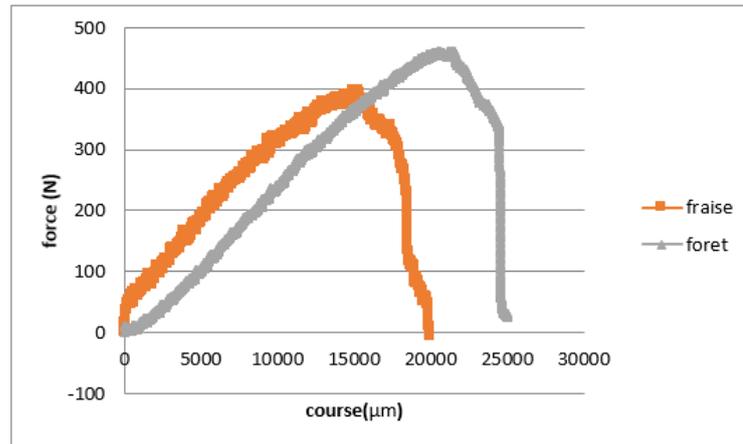


Figure III.34 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 4mm N710tr/min Va16mm/min

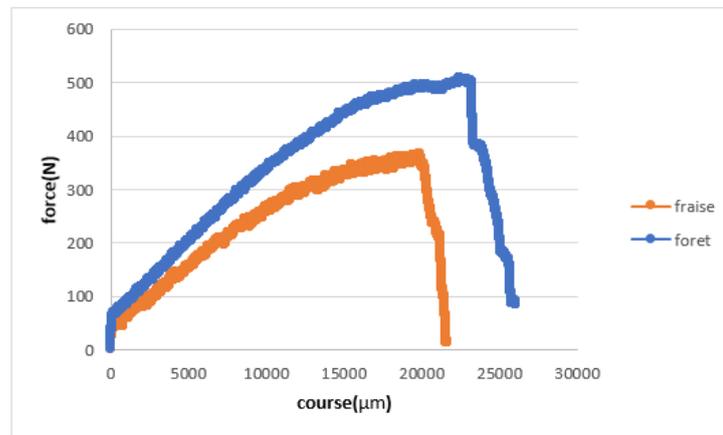


Figure III.35 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 4mm N710tr/min Va50mm/min :

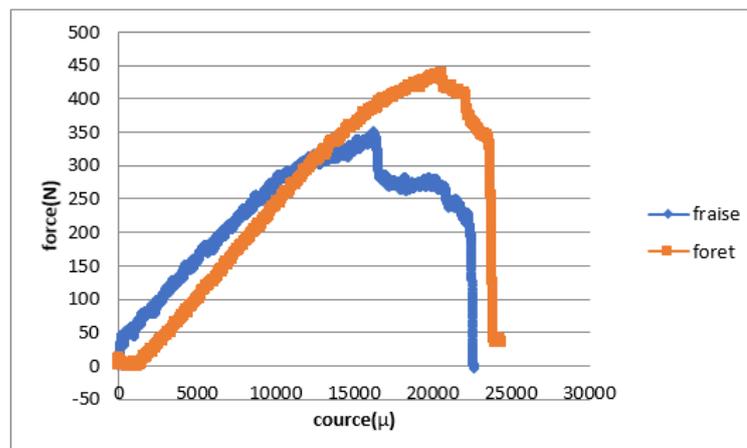


Figure III.36 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 4mm N710tr/min Va250mm/min

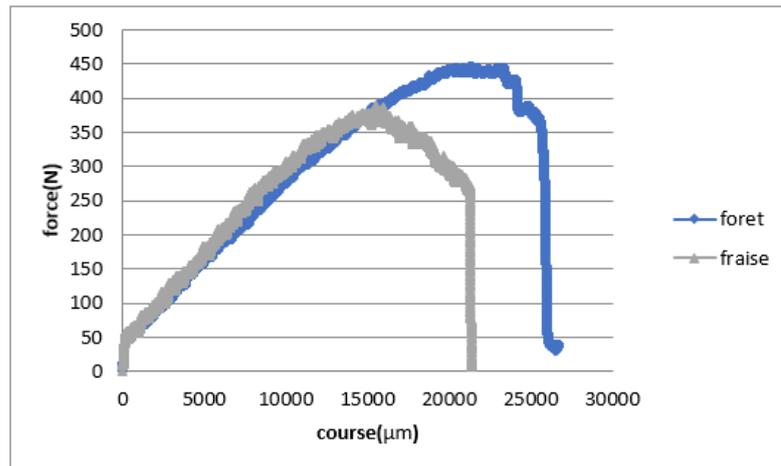


Figure III.37 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 4mm N1000tr/min Va16mm/min

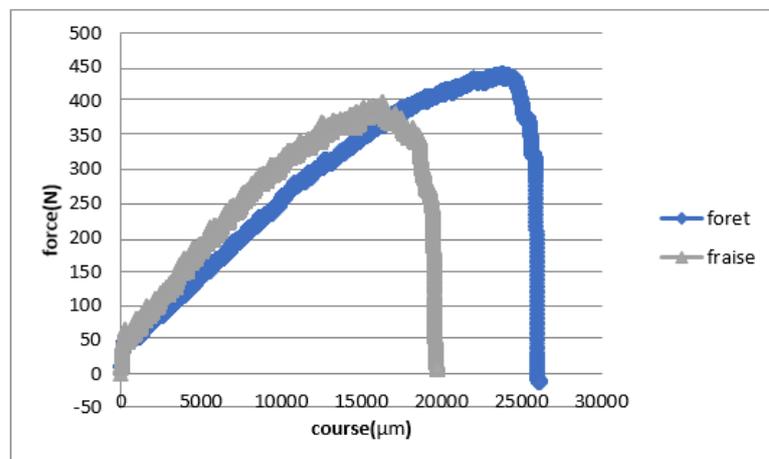


Figure III.38 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 4mm N1000tr/min Va50mm/min

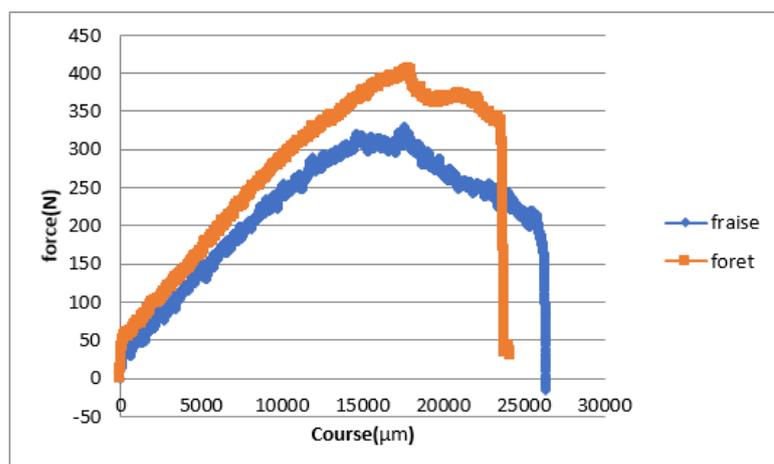


Figure III.39 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 4mm N1000tr/min Va250mm/min

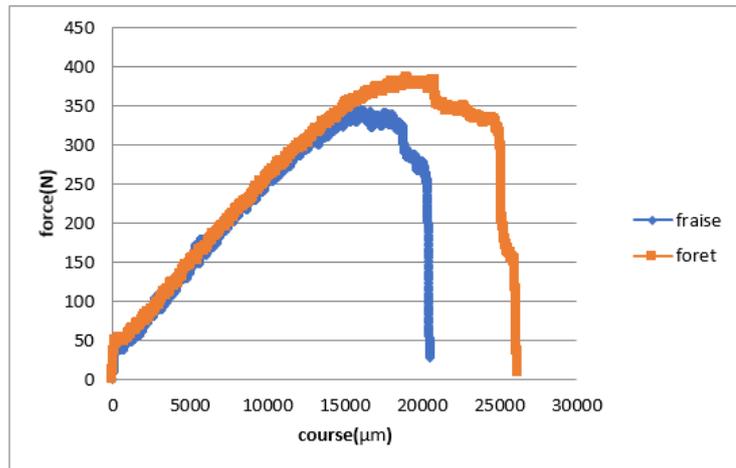
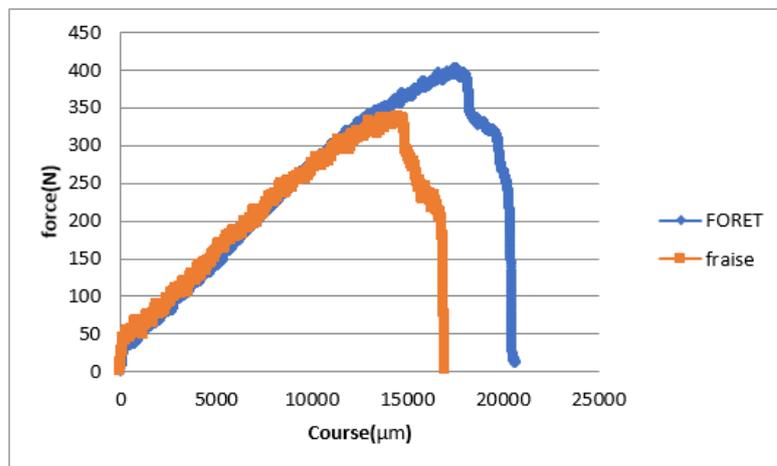


Figure III.40 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 6mm N180tr/min Va16mm/min



à

Figure III.41 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 6mm N180tr/min Va50mm/min

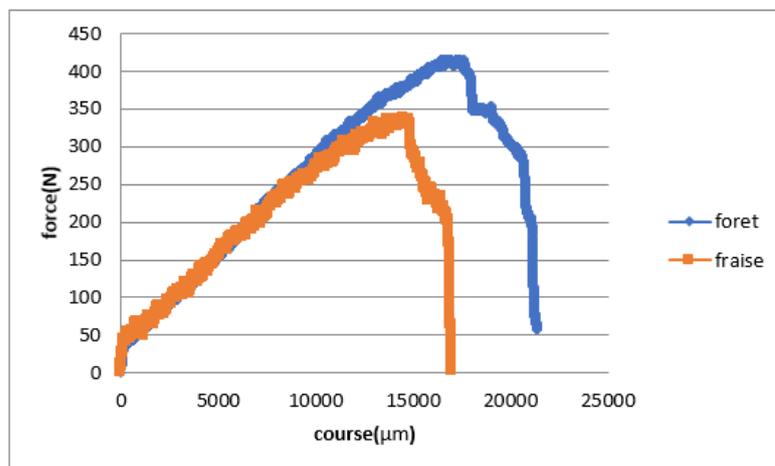


Figure III.42 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 6mm N180tr/min Va250mm/min

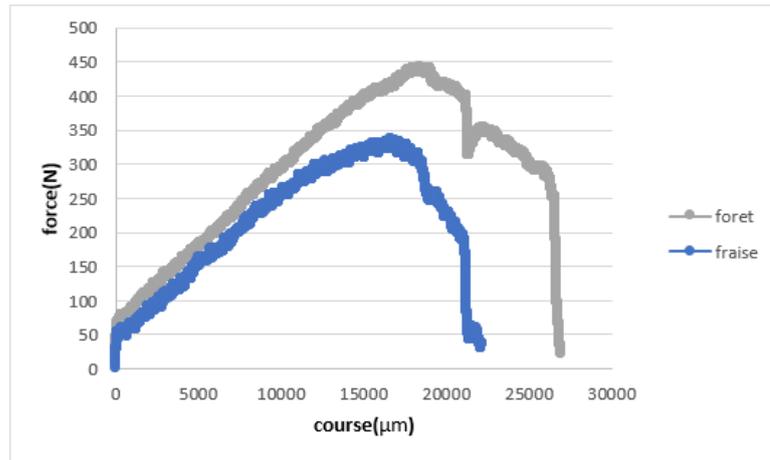


Figure III.43 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 6mm N710tr/min Va16mm/min

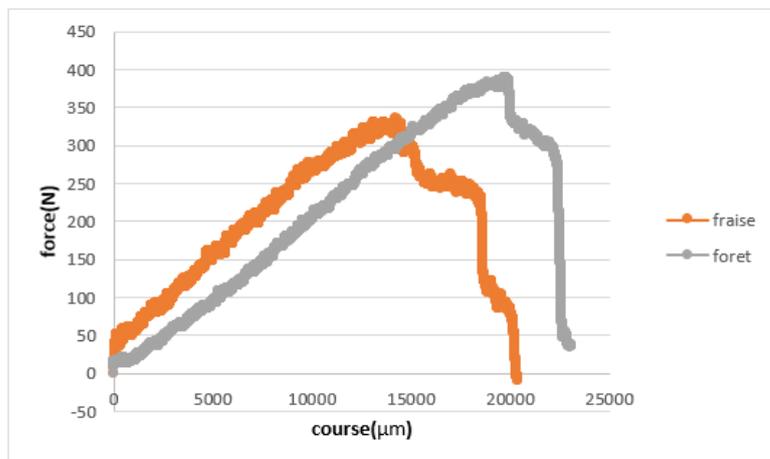


Figure III.44 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 6mm N710tr/min Va50mm/min :

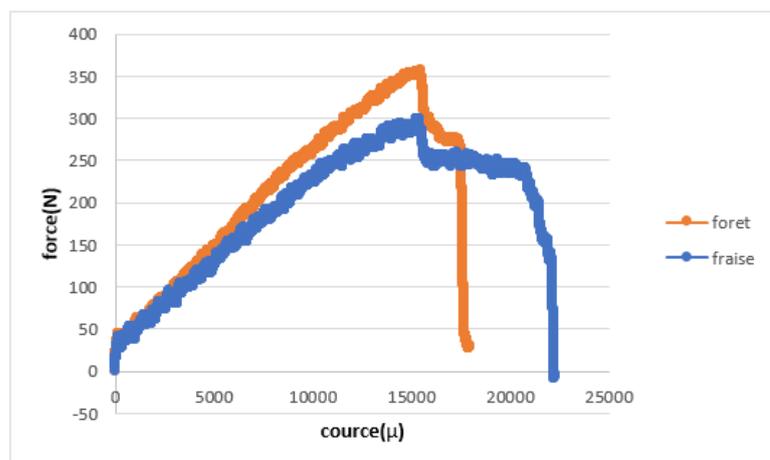


Figure III.45 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 6mm N710tr/min Va250mm/min :

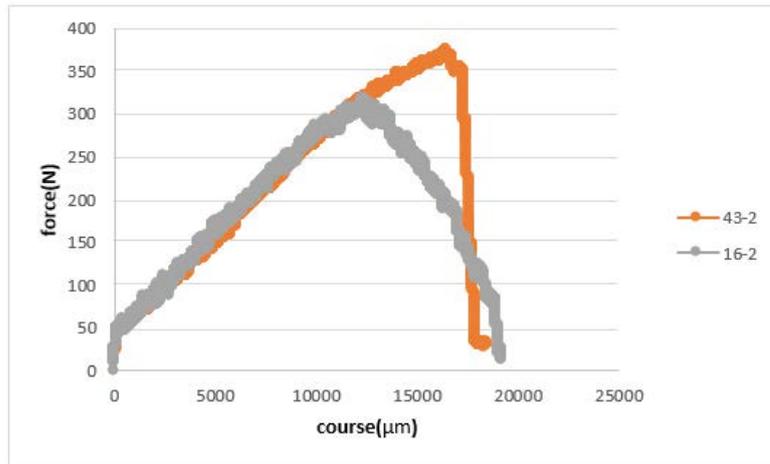


Figure III.46 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 6mm N1000tr/min Va16mm/min

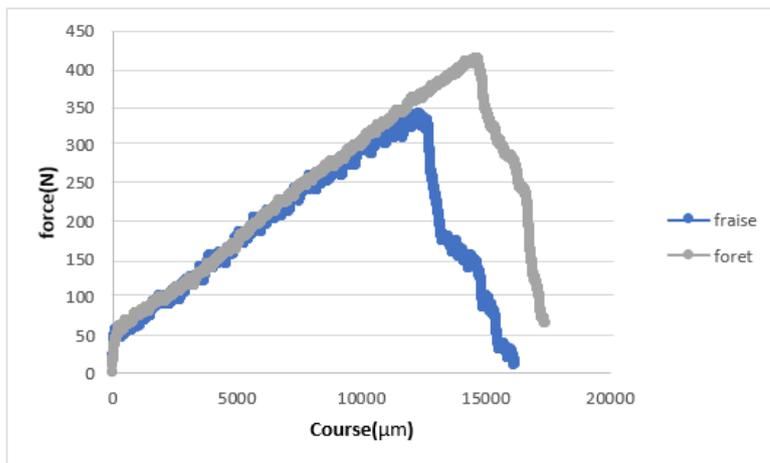


Figure III.47 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 6mm N1000tr/min Va50mm/min

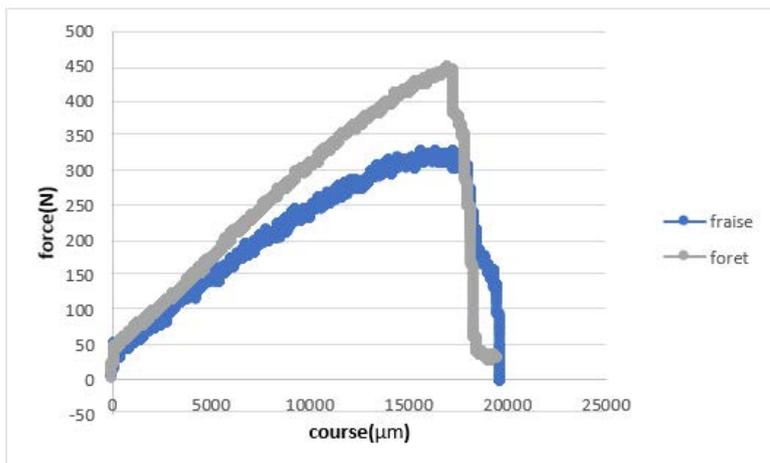


Figure III.48 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 6mm N1000tr/min Va250mm/min

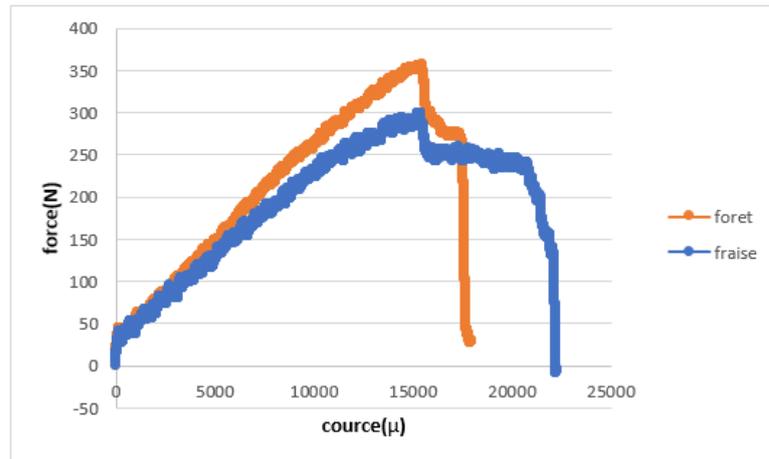


Figure III.49 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 8mm N180tr/min Va16mm/min

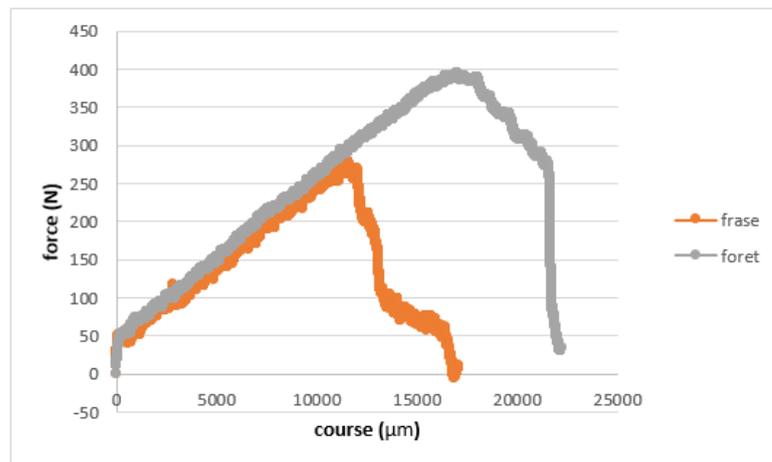


Figure III.50 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 8mm N180tr/min Va50mm/min :

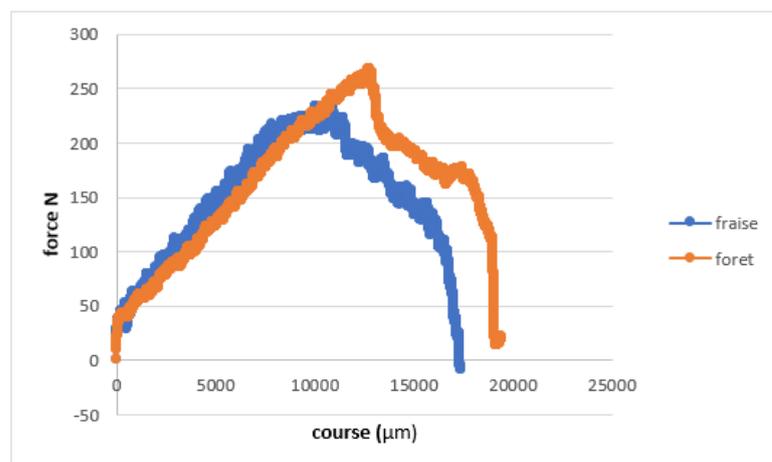


Figure III.51 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 8mm N180tr/min Va250mm/min

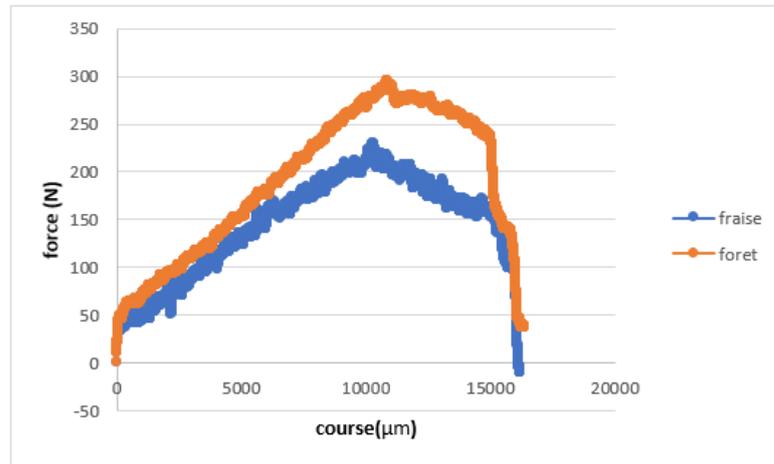


Figure III.52 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 8mm N710tr/min Va16mm/min :

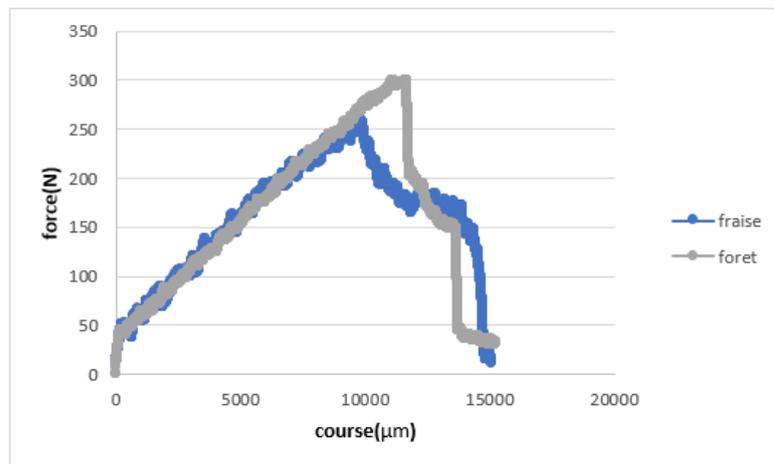


Figure III.53 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 8mm N710tr/min Va50mm/min

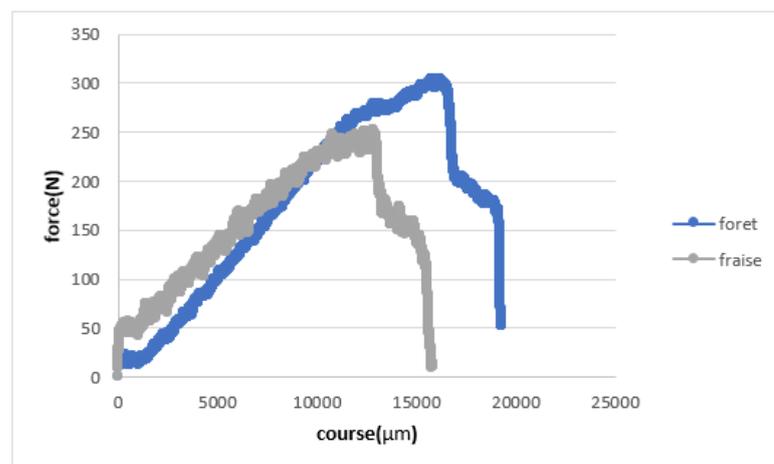


Figure III.54 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 8mm N710tr/min Va250mm/min

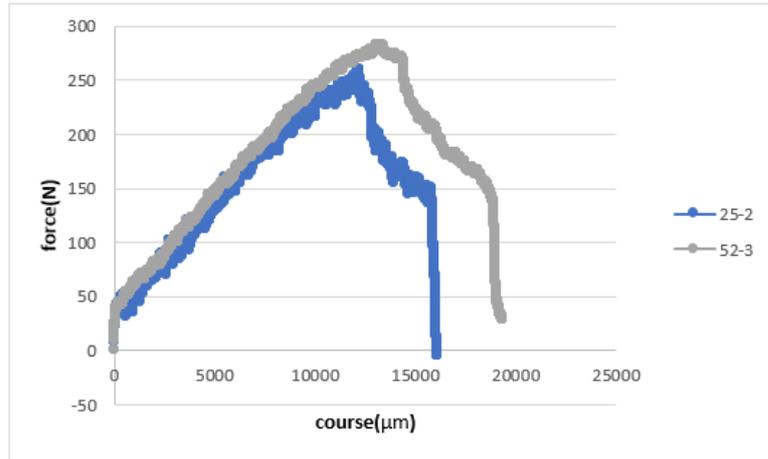


Figure III.55 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 8mm N1000tr/min Va16mm/min

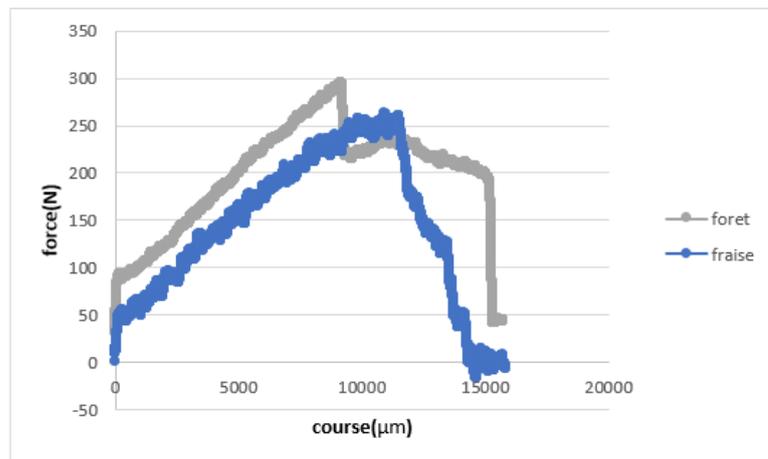


Figure III.56 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 8mm N1000tr/min Va50mm/min

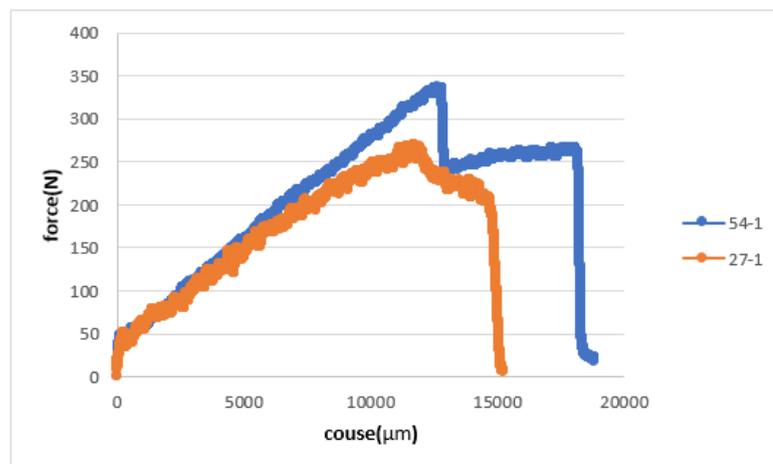


Figure III.57 : Comparaison entre éprouvette usinée avec foret et fraise, diamètre 8mm N1000tr/min Va250mm/min

A la lecture de ces figures, nous constatons que dans tous les cas l'opération de perçage supporte des forces plus importantes et par conséquent produit moins de défauts.

Cela est dû aux efforts d'avance de la fraise qui sont plus importants que ceux du foret.

Les efforts de poussée sont supérieurs à l'effort de cohésion de la matrice à l'interface entre les plis, au-delà, il y a propagation d'une fissure par délaminage entre deux plis. La décohésion de la matrice engendre la flexion et l'arrachement des derniers plis.

## **Conclusion générale**

Ce travail est mené dans le but de connaître mieux le comportement des matériaux composite lors du perçage des plaques et l'influence de changement des vitesses de coupe et des vitesses d'avance sur la qualité des trous à l'entrée et à la sortie ainsi que leur résistance à la flexion, en effet la présence des trous provoque un phénomène dangereux appelé phénomène de la concentration des contraintes qui provoque un affaiblissement de la structure qui peut endommager toute la structure.

Dans la première partie, une étude bibliographique a été menée sur les types et les différents procédés de fabrication et de mise en œuvre des matériaux composites, et les domaines d'utilisation dans la vie quotidienne et les différents éléments utilisés pour la fabrication des matériaux composites. Ensuite quelques techniques de perçage des matériaux ont été présentées.

L'étude expérimentale a porté sur l'influence des paramètres d'usinage des trous sur le comportement mécanique des éprouvettes. Il s'agit de fixer les éprouvettes sur notre dispositif et d'appliquer deux charges à coté 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 d'entamer une étude paramétrique. Les effets suivants sont pris en compte par cette étude paramétrique :

- ✓ L'effet du diamètre des trous circulaire.
- ✓ Type d'opération (fraisage, perçage)
- ✓ La vitesse de coupe.
- ✓ La vitesse d'avance.

En conclusion nous pouvons affirmer que l'usinage des trous de petit diamètre dans le matériau composite VG(A) Gel coat-300-450-800-300 objet de cette étude, il est plus indiqué de choisir une grande vitesse de rotation  $N=1000\text{tr/min}$  et une vitesse d'avance moyenne (équivalente à une utilisation manuelle et sans efforts d'une perceuse).

L'étude comparative effectuée durant notre stage de master dont la partie usinage s'est effectuée au hall de technologie d'Oued-Aissi a été limitée à trois vitesses de

## **Conclusion générale**

rotation 180, 710 et 1000tr/min. Cette étude mérite donc d'être élargie aux vitesses d'avance de 1200, 1500 et 2000tr/min.

Enfin et pour compléter le travail, il est aussi utile pour l'entreprise ISELMAN d'étendre cette étude aux autres matériaux composites utilisés.

## Références Bibliographiques

- [1]. Berthelot J-M. *Matériaux composites*. Editions Eyrolles, 2010.
- [2]. Gornet L. *Généralité sur les matériaux composites*. ECN, Centre Nantes, 2011.
- [3]. Rigal J-C. Negrier A, *Présentation des matériaux composites*. Plastiques et composites, *Technique de l'ingénieur*, 1991.
- [4]. 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.
- [5]. Lachaud F, Piquet R, Collombet F, Surciln L. *Drilling of composite structures*. *Composite Structures* 52 (2001) 511-516
- [6]. Rahme P. *thèse assemblage aéronautique boulonnée - Usinage des trous de rivets ou boulons*. Université Paul Sabatier
- [7]. *Glossaire Matériaux Composites*. Carma Actualisation octobre 2006.
- [8]. Zaidi A. *Etude du comportement de matériaux composites à matrice polymère en fatigue (effet du vieillissement)*. Mémoire de Magistère, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
- [9]. Bendjabllah D. *Analyse des plaques composites Carbone/Epoxyde sous l'effet des efforts de perçage*. Mémoire de Magistère, Université Mentouri Constantine, 2009.
- [10]. Iliescu D. *Approches expérimentale et numérique de l'usinage a sec des composites carbone/époxy*. Thèse de doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, France, 2008. 182
- [11]. Dessarthe A. *Usinage des composites à matrice polymère*. *Usinage des matériaux non métalliques*. *Technique de l'ingénieur*, 1999.
- [12]. M John Le Dref. *Contribution à la Modélisation du perçage assisté par vibration et a l'étude de son impact sur la qualité d'alésage*. Application aux empilages multi matériaux ". Thèse de doctorats, Université de Toulouse. France, 2014.
- [13]. 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
- [14]. 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.

- [15]. Iliescu D. 2008 *Approche expérimentale et numérique de l'usinage à sec des composites carbone/époxy*. Thèse de doctorat, Arts et Métiers ParisTech ParisTech - Centre de Bordeaux.
- [16]. Kim K.S, Lee D.G, Kwak Y.K, Namgung S. 1992 *Machinability of carbon fiber-epoxy composite materials in turning*. *Journal of Materials Processing Technology* 32, 553–570.
- [17]. Abrão A.M, Rubio J.C.C, Faria P.E, Davim J.P. 2008 *The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite*. *Materials & Design* 29, 508–513.
- [18]. Bonnet C. 2010 *Compréhension des mécanismes de coupe lors du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite fibre de carbone*. Thèse de doctorat, Arts et Métiers ParisTech - Centre de Cluny.
- [19]. Abrão A.M, Faria P.E, Rubio J.C.C, Reis P, Davim J.P. 2007 *Drilling of fiber reinforced plastics: A review*. *Journal of Materials Processing Technology* 186, 1–7.
- [20]. 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.
- [21]. Rahme P. 2008 *Contribution à l'étude de l'effet des procédés Perçage - Alésage sur l'apparition du délaminage dans les structures composites épaisses*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III.
- [22]. Zitoune R, Collombet F. 2007 *Numerical prediction of the thrust force responsible of delamination during the drilling of the long-fibre composite structures*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 38, 858–866
- [23]. Langella A, Nele L, Maio A. 2005 *A torque and thrust prediction model for drilling of composite materials*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 36, 83–93.
- [24]. Tsao C.C, Hocheng H. 2003 *The effect of chisel length and associated pilot hole on delamination when drilling composite materials*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43, 1087–1092.
- [25]. Bonnet C, Benmohammed B, Poulachon G, Rech, J, Girard, Y. 2011 *CFRP Drilling Model: Fiber Orientation Influence on Mechanical Load and Delamination*. *Advanced Materials Research* 223, 111–121.

- [26]. Hocheng H, Tsao C.C. 2005 *The path towards delamination-free drilling of composite materials. Journal of Materials Processing Technology* 167, 251–264.
- [27]. Tsao C.C, Chen W.C. 1997 *Prediction of the location of delamination in the drilling of composite laminates. Journal of Materials Processing Technology* 70, 185–189.
- [28]. Fernandes M, Cook C, Alici G. 2005 *Empirical modelling of force profiles produced during drilling of carbon composites. CIRP international workshop on modeling of machining operations* 8, 251–258.
- [29]. Khashaba U.A. 2004 *Delamination in drilling GFR-thermoset composites. Composite Structures* 63, 313–327.