

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE



**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**



**BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA**

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

**PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER
INTITULE**

**Optimisation des facteurs de coupe (N, f) pour le
perçage d'un matériau composite à fibre de
verre/époxyde**

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : CONSTRUCTION MECANIQUE

PRESENTE PAR : **LACHOURI ALLA EDDINE**

ENCADREUR DE MEMOIRE : **Pr. BEY KAMEL**

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : **Pr. BEY K.**

MEMBRES : **Pr. HAIAHEM A.**

Dr. BENAMIRA M.

Dr. CHEMAMI A.

Dr. BOUARICHA A.

Année : 2018-2019

C'est la conscience que ce qui nous fait le plus défaut est, non la connaissance de ce que nous ignorons mais l'aptitude à penser ce que nous savons.

Edgar Morin

La connaissance s'acquiert par l'expérience, tout le reste n'est que de l'information.

Albert Einstein

C'est le devoir de chaque homme de rendre au monde au moins autant qu'il en a reçu.

Albert Einstein

Savoir que l'on sait ce que l'on sait et savoir que l'on ne sait pas ce que l'on ne sait pas : voilà la véritable science.

Confucius

C'est par l'expérience que la science et l'art font leur progrès chez les hommes.

Aristote

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

*Mes parents pour tous les sacrifices consentis pour leur soutien
durant toutes mes années d'études.*

Tous mes chers frères

Tous ma familles L.A.C.H.O.U.P.I et D.A.H.O.U.I

Tous mes amis.

A toute personne m'ayant encouragé ou aidé au long de mes études.

REMERCIEMENT

Je tiens à remercier avant tout notre dieu ALLAH, qui nous a donné la santé, le courage, la volonté et la passion de réaliser ce travail.

En premier lieu, je tiens aussi à exprimer ma gratitude à mon encadreur Pr. BEY KAMEL, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant de diriger ce travail de master et la qualité d'encadrement, son soutien et les conseils qu'il a bien voulu me prodiguer.

Je tiens également à remercier tous les professeurs et le personnel de laboratoire de recherche surtout le Pr. M.A. BOUCHELACHEM et le Pr. H. HAMADACHE ainsi que le Dr. N. MOKAS pour les efforts qu'ils ont faits pour moi.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous mes enseignants, le personnel du département de génie mécanique ainsi que tous les étudiants et amis qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

Je remercie également le chef de département de génie mécanique. Je tiens à remercier également le président et les membres de jury de qui n'ont pas hésité à examiner le contenu de cet ouvrage.

Mes remerciements les plus vifs s'adressent à ma mère et mon père qui se sont beaucoup sacrifiés pour que puisse atteindre mon but, celui de réaliser ce travail.

Je remercie enfin tous mes proches et amis, qui m'ont toujours encouragé.

Merci à tous et à toutes.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

Introduction Générale

Chapitre I Etude bibliographique

I.1	Introduction	3
I.2	Généralités sur les matériaux composites.....	3
I.2.1	Définition de matériau composite	3
I.2.2	Les éléments constitutifs.....	4
I.2.3	Types de matériaux composites	10
I.2.4	Élaboration et mode d'obtention des matériaux composites	10
I.2.5	Domaines d'utilisation des matériaux composites :.....	14
I.2.6	Avantage des matériaux composites :.....	15
I.2.7	Inconvénients des matériaux composites :.....	16
I.2.8	Matériaux composites à fibre de verre	16
I.3	Etat de l'art dans l'usinage des matériaux composite.....	18
I.3.1	Comportement des composites en usinage	19
I.4	L'usinage par outil coupant en général.....	20
I.4.1	Composites à fibre de verre ou de carbone	20
I.4.2	Composites à fibre d'aramide	20
I.4.3	Conditions communes à tous les matériaux composites.....	20
I.5	Perçage des matériaux composites	21
I.5.1	Introduction.....	21
I.5.2	Qualité de surface et défauts d'usinage liés au perçage de matériaux composites	22
I.5.3	Etat géométrique	23
I.5.4	Autres défauts	23

I.6	Cas d'un facteur propre aux composites : la répartition des fibres.....	23
-----	---	----

Chapitre II Matériau et Techniques expérimentales

II.1	Présentation du problème	23
II.2	Matériau de l'étude.....	23
II.2.1	Pyrolyse.....	23
II.3	Banc d'essai.....	31
II.3.1	Dispositif de perçage :.....	31
II.3.2	Perceuse à colonne universelle.....	32
II.3.3	Microscope Falcon CNC.....	34
II.3.4	Matériau composite de l'étude	35
II.3.5	Outil de coupe utilisé.....	35
II.4	Technique expérimentale.....	36
II.4.1	Introduction aux plans d'expériences	36
II.4.2	Méthodologie expérimentale.....	37
II.5	Détermination de la circularité des trous usinés	41
II.5.1	La circularité.....	41
II.5.2	Interprétation des résultats obtenus	50

Chapitre III Analyse des résultats

III.1	Introduction	51
III.2	Effet de l'avance (f) sur la circularité.....	51
III.3	Effet du nombre de tours (N) sur la circularité.....	52
III.4	Plan d'expériences.....	53
III.5	Calcul des coefficients.....	55
III.5.1	Les réponses avec les facteurs codés.....	55
III.5.2	Les réponses avec les unités légales.....	56

III.6	Effets des paramètres de coupe.....	56
III.6.1	L'effet du facteur 1	56
III.6.2	L'effet du facteur 2	56
III.6.3	Interprétation	57
III.7	Effet de l'interaction des paramètres de coupe sur la circularité	58
III.7.1	Interprétation	58
III.8	Notion de surface 3D de réponse.....	59
	Conclusion Générale.....	61
	Référence bibliographiques.....	62

Liste des figures

Chapitre I

- Figure I.1.** : Forme des matériaux composites.
- Figure I.2.** : Les composants des matériaux composites.
- Figure I.3.** : Principaux matériaux de renforts.
- Figure I.4.** : Différents types de fibres de verre.
- Figure I.5.** : Différents types de fibres de carbone.
- Figure I.6.** : Différents types de fibres d'aramide
- Figure I.7.** : Principales familles de matrices.
- Figure I.8.** : Principe du moulage au contact
- Figure I.9.** : Principe du moulage par projection simultanée
- Figure I.10.** : Principe de moulage par infusion
- Figure I.11.** : Principe du moulage par injection de résine
- Figure I.12.** : Principe du moulage par centrifugation
- Figure I.13.** : Secteur d'application
- Figure I.14.** : Fibre de verre
- Figure I.15.** : Domaine d'application des composites à fibres de verre
- Figure I.16.** : Outil revêtu
- Figure I.17.** : Opération de perçage

Chapitre II

- Figure II.1.** : Balance électronique
- Figure II.2.** : Les échantillons avant la calcination
- Figure II.3.** : Four à moufle
- Figure II.4.** : Les échantillons après la calcination
- Figure II.5.** : Foret utilisé (12mm)
- Figure II.6.** : Dispositif de perçage.

Figure II.7. : Perceuse à colonne universelle

Figure II.8. : Microscope Falcon CNC

Figure II.9. : Stratifié en taffetas

Figure II.10. : Vocabulaire de base des plans d'expérience

Figure II.11. : Représentation du domaine d'étude par les sommets A, B, C, D

Figure II.12. : Résultat de l'action de perçage

Figure II.13. : Pièce percée

Figure II.14. : Observation des trous

Figure II.15. : Observation des trous au microscope optique

Chapitre III

Figure III.1. : Influence de l'avance sur la circularité (trou de 5 à 10)

Figure III.2. : Influence du nombre de tours sur la circularité (trous de 11 à 18)

Figure III.3. : Effets des paramètres de coupe sur la circularité

Figure III.4. : Effet de l'interaction des paramètres de coupe sur la circularité

Figure III.5. : Influence de la vitesse d'avance et du nombre de tours sur la circularité

Liste des tableaux

Chapitre I

- Tableau I.1. :** Domaines d'utilisation des matériaux composites
Tableau I.2. : Caractéristique mécanique

Chapitre II

- Tableau II.1. :** Résultats obtenus de la pyrolyse du stratifié
Tableau II.2. : Module des fibres et de la matrice
Tableau II.3. : Modules de la fibre et matrice
Tableau II.4. : Caractéristiques physiques du matériau étudié
Tableau II.5. : Caractéristiques de la machine outil (perceuse)
Tableau II.6. : Matrice d'expérience
Tableau II.7. : Facteurs codés en perçage
Tableau II.8. : Matrice d'expérience
Tableau II.9. : Détails des paramètres d'usinage
Tableau II.10. : Performances observées pendant l'expérience

Chapitre III

- Tableau III.1. :** Effet de l'avance sur la circularité
Tableau III.2. : Effet de Le nombre de tours sur la circularité
Tableau III.3. : Facteurs codés
Tableau III.4. : Matrice des essais
Tableau III.5. : Tableau des effets

Résumé

Ce travail a pour but d'abord de rechercher toute la littérature concernant les matériaux composites à savoir notamment leurs composants de base avec leurs caractéristiques, leurs modes de fabrication ainsi que leurs domaines d'utilisation et aussi une étude sur l'usinage (perçage) des matériaux composites à fibre de verre/époxyde.

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

Dans notre étude, une tentative a été faite pour développer une approche rigoureuse pour l'optimisation des réponses multiples dans le perçage d'une plaque stratifiée en composites à fibre de verre/époxyde. Une série des trous percés au nombre de 18 a été réalisé par un foret de diamètre 12 mm sur une perceuse universelle. En adoptant la méthode factorielle du plan d'expérience pour deux facteurs de coupe (N , f), on a pu obtenir des réponses relatives à la circularité des trous percés (Δr). La meilleure circularité relative au meilleur régime de coupe ($N = 710$ tr/min et $f = 1.8$ mm/tr) a été confirmée par les observations microscopiques optiques.

Mots Clés : matériau composite, perçage, plan d'expérience, microscope optique.

Introduction générale

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux. L'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. La plupart du temps, les composites sont constitués de deux matériaux principaux, une matrice qui présente des propriétés intéressantes mais dont certaines ont besoin d'être améliorées par un renfort. De nos jours, les matériaux composites sont présents dans tous les secteurs de technologie avancée tels que la construction navale, l'automobile ou encore l'aéronautique. Dans la structure d'un composite chacun des constituants a une fonction bien spécifique :

- La matrice lie les fibres aux renforts, répartit les efforts (résistance à la compression ou à la flexion), assure la protection chimique des renforts. Bien que les propriétés mécaniques de la matrice soient très faibles devant celles des renforts, les performances générales du composite (matrice/renfort) sont très dépendantes du choix de la matrice. Le rôle de la matrice devient très important pour la tenue mécanique à long terme (fatigue, fluage). Deux grandes familles de matrices en résines polymère sont déjà largement connues : les résines thermoplastiques (TP) et les résines thermodurcissables (TD).

- Le renfort est une armature, un squelette, qui assure la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité). Il est souvent de nature filamentaire (des fibres organiques ou inorganiques)

. Nous nous intéressons dans notre étude aux matériaux composites plus « modèles » à base de résine thermodurcissable de type époxyde renforcée de fibres de verre.

Le perçage des fibres de verre par les méthodes classiques est un processus d'usinage compliqué, qui permet de réaliser des trous de bonne qualité. De même, les revêtements en composite sont considérés comme difficiles à usiner.

Pour un changement de qualité persistant et un contrôle qualité efficace, une stratégie d'expérimentation a été choisie (planification d'expériences) avec des paramètres de régime de coupe tels que le nombre de tours, l'avance et le diamètre de foret.

CHAPITRE I
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I. CHAPITRE I Etude bibliographique

I.1 Introduction

Un matériau composite peut être défini comme une combinaison macroscopique d'au moins deux matériaux différents. Généralement utilisé pour ses propriétés structurales, on peut le définir comme un matériau qui contient des renforts (fibres et/ou particules) liés par une matrice (résines). Un matériau composite a pour fonction principale de permettre la réalisation de pièces ou de produits directement à la forme désirée, avec des propriétés bien précises (résistance mécanique, densité). La première partie de ce chapitre est réservée aux matériaux composites et la présentation des différents constituants des matériaux composites. La seconde partie est consacrée à l'état de l'art dans l'usinage des matériaux composites. Dans la dernière partie, on va présenter les techniques de Perçage des matériaux composites.

I.2 Généralités sur les matériaux composites

I.2.1 Définition de matériau composite

Le concept clé des composites est l'assemblage d'au moins deux matériaux de base différents non miscibles. On obtient un matériau hétérogène. Un matériau seul n'a pas de bonne qualité mais qui, une fois uni à un ou des autres matériaux, ont d'excellentes propriétés (l'union fait la force). La matrice et les fibres sont des composants du matériau composite. [6]

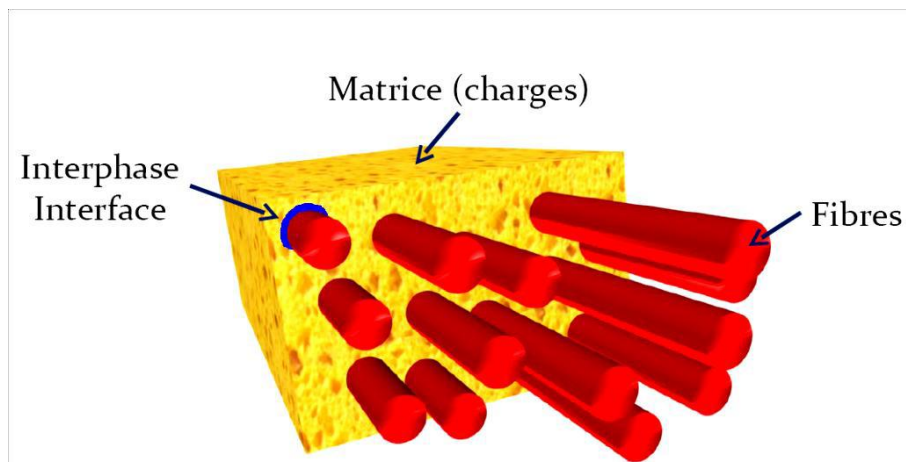


Figure I.1. : *Forme des matériaux composites.*

I.2.2 Les éléments constitutifs

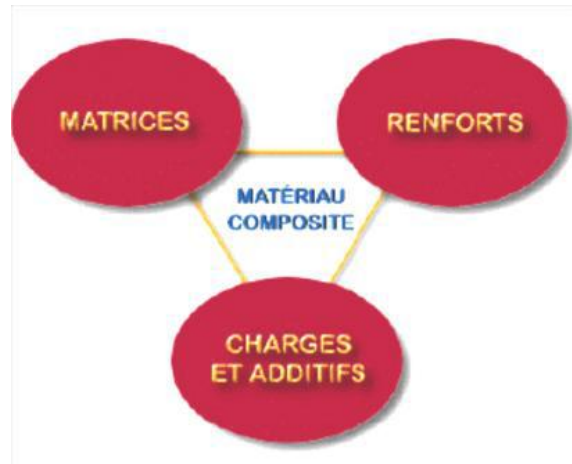


Figure I.2. : Les composants des matériaux composites.

- **Les fibres de renfort** : armature ou squelette, qui assure la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité), c'est-à-dire des propriétés mécaniques nettement meilleures. Souvent de nature filamentaire (des fibres organiques ou inorganiques). [7]
- **La matrice** : « emballage » elle lie les fibres renforts, elle répartie les efforts (résistance à la compression ou à la flexion), elle assure la protection chimique. Par définition, c'est un polymère ou une résine organique.

En plus de ces deux constituants de base, il existe : une interface qui assure la compatibilité renfort-matrice, qui transmettant les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif. Des produits chimiques entrent aussi dans la composition du composite, l'interphase etc. ... qui peuvent jouer sur le comportement mécanique, mais n'interviennent pratiquement jamais dans le calcul de structure composite. [7]

- **Entre le renfort et la matrice** : existence d'une zone de liaison appelée interface (interphase).
- **Charges et additifs** : Les charges et additifs sont incorporés dans un matériau composite pour :

- Modifier la couleur ;
- Modifier sensiblement les propriétés mécanique, électrique ou thermique ;
- Réduire le coût ;
- Résister au feu ;
- Diminuer le retrait ;
- Faciliter le démoulage ;
- Améliorer la résistance au vieillissement ;
- Modifier la densité du matériau.

I.2.2.1 Les renforts

Ils peuvent se présenter sous de nombreuses formes : fibres courtes ou fibres continues (tissus ou textures multidirectionnelles) en fonction de l'application envisagée. Les fibres possèdent généralement une bonne résistance à la traction mais une résistance à la compression faible.

Les composites artificiels sont souvent renforcés soit par des fibres, soit par des composants fabriqués à base de fibres (torons, assemblage de fibres tordues ensemble, tissus ; mats, ou nappes). Chacune d'entre elles s'impose dans une application particulière en raison de ses propriétés spécifiques et de son prix.

Les principaux matériaux de renforts, sont résumés dans l'organigramme suivant :

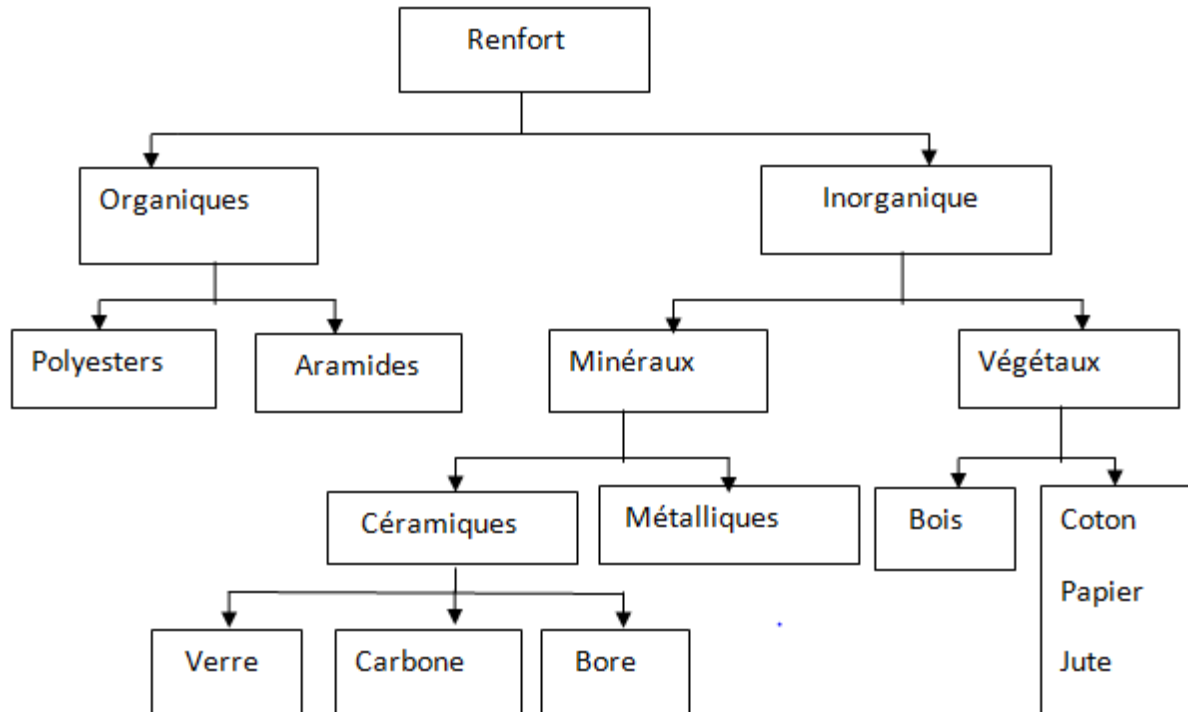


Figure I.3. : Principaux matériaux de renforts.

Parmi les différents types de renforts, on peut citer [8] :

Les fibres de verre : sont les plus anciennes (1940) et les moins chères (environ 1 euro/kg) des fibres du marché, et celles dont on réalise le plus fort tonnage. Elles sont fabriquées par extrusion du verre au travers d'une filière percée de trous de 1 à 2mm de diamètre, puis étirées jusqu'à obtenir des diamètres de 5 à 15mm, enduites et bobinées. Il existe différentes variétés (E, R, S) selon la proportion de chaque composant (SiO_2 , Al_2O_3 , B_2O_3 , CaO , MgO) (figure 1.4) :

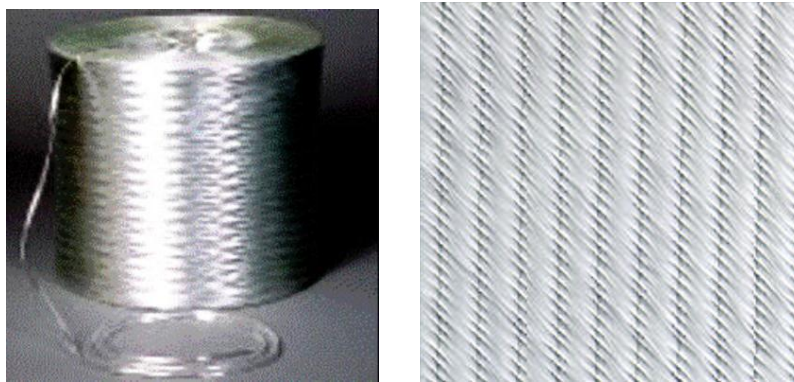


Figure I.4. : Différent type de fibre de verre.

E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;

R : pour les composites hautes performances ;

S : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).

Les meilleures propriétés étant obtenues pour les plus fortes proportions de silice (verre S, 65%).

Les fibres de carbone : doivent leurs propriétés à la très forte anisotropie des cristallites de graphite qui les composent. Elles sont fabriquées à partir de fibres de polymère (par exemple poly acrylonitrile) préalablement tissées, et carbonisées sous tension en plusieurs étapes, oxydation (100 à 200 C°), puis pyrolyse (1500-2500 C°). On distingue deux types de fibres (figure 1.5) :

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

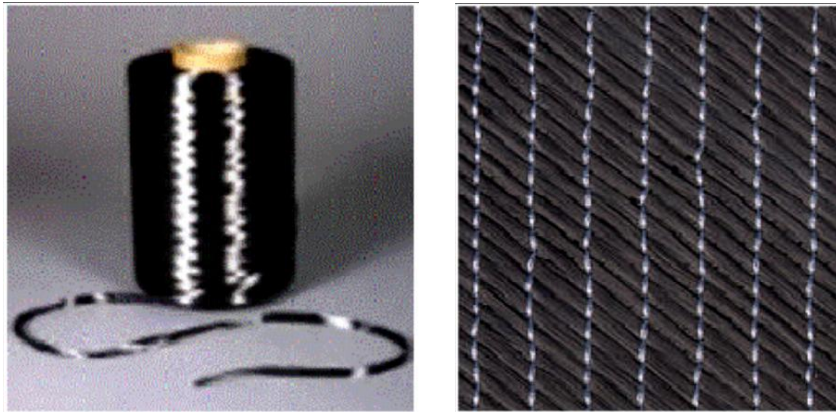


Figure I.5. : Différents types des fibres de carbone.

Les fibres d'aramide : Souvent appelée KEVLAR de prix élevé (20 euros/kg), la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes (figure 1.6) :

- Les fibres bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles ;
- La fibre haute module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances

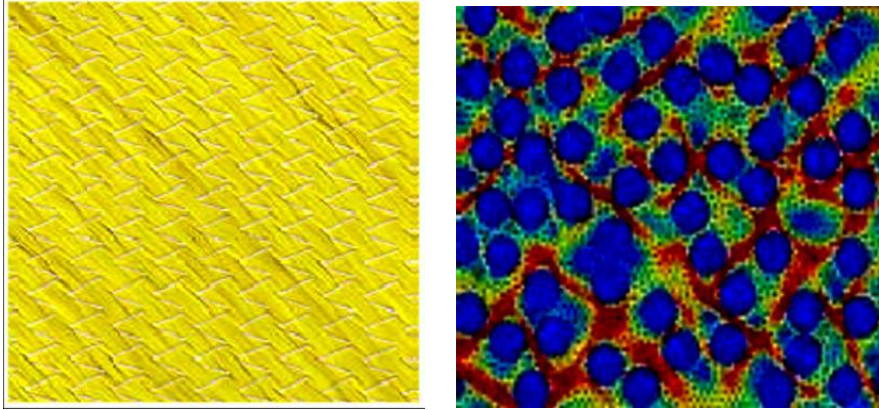


Figure I.6. : Différents types des fibres d'aramide.

I.2.2.2 Les matrices

La matrice a pour rôle de lier les fibres renforcés, répartir les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit. Il existe différents types de résines (figure I-7) on utilise actuellement surtout des résines thermodurcissables (TD) que l'on associe à des fibres longues, mais l'emploi de polymères thermoplastiques (TP) renforcés de fibres courtes se développe fortement. [8]

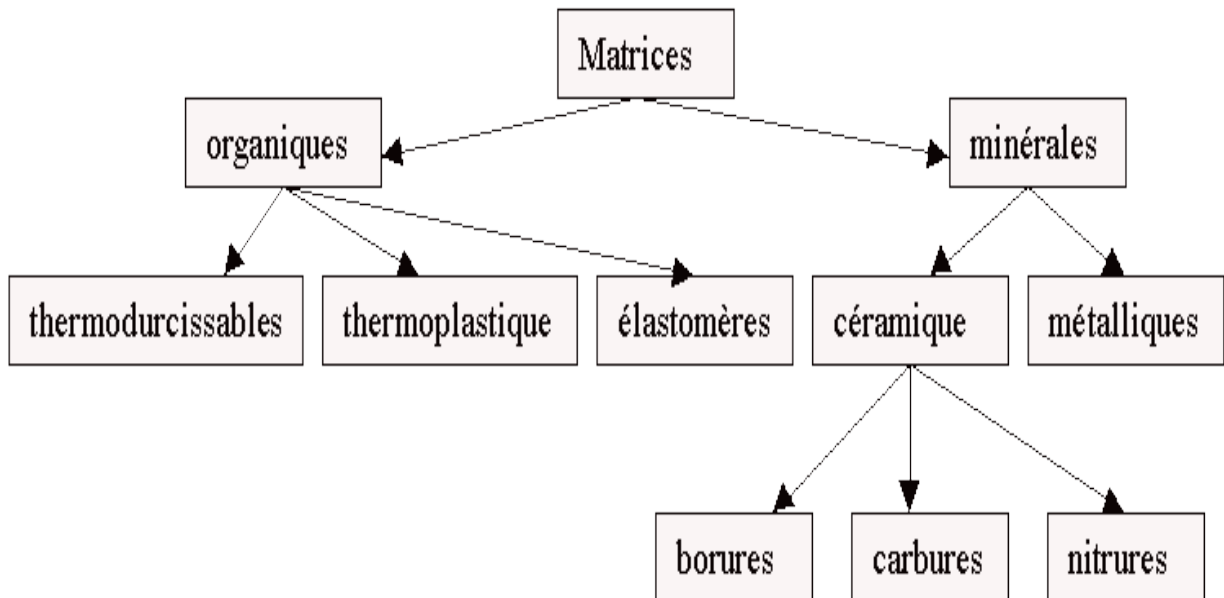


Figure I.7. : Principaux Familles de Matrices.

Il est important de bien situer les différences fondamentales de ces deux types de matrices. La structure des TP se présente sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme (les chaînes se plient alors), et les refroidir pour les fixer (les chaînes se bloquent). Cette opération est réversible.

La structure des TD a la forme d'un réseau tridimensionnel qui se pont (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme de façon définitive, lors d'un échauffement. La transformation est donc irréversible. [8]

a) Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées (traitement thermique ou physico-chimique). Ces résines ont donc la particularité de ne pouvoir être mises en forme qu'une seule fois. Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont par ordre décroissant en tonnage : les résines polyesters insaturées, les résines de condensation, les résines époxydes [4]

b) Résines thermoplastiques

Ce sont des polymères pouvant être alternativement ramollis par chauffage et durcis par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. Les résines thermoplastiques présentent l'aptitude à l'état ramolli, de se mouler aisément par plasticité. [4]

Matrice organique

Elle se caractérise par deux familles de résines : thermodurcissables et thermoplastiques. Les Résines thermodurcissables sont les produits les plus employés actuellement dans la mise en œuvre des matériaux composites à cause de leurs propriétés mécaniques élevées, et comme leur nom l'indique, ces produits durcissent après un cycle de chauffage, appelé cycle de polymérisation ou cycle de réticulation.

Les matrices de ce type sont le plus souvent des résines polyesters, époxydes, phénoliques, silicones, élastomères et caoutchoucs.

Matrice métallique

Parmi les matériaux métalliques utilisés pour constituer la matrice des matériaux composites, sont l'Aluminium et ses alliages, le Nickel, le Titane et le Magnésium. Un avantage essentiel apporté par une matrice métallique réside dans la possibilité d'utiliser le composite à des températures élevées, avec en plus de bonne conductibilité électrique et thermique et de bonnes

caractéristiques mécaniques transverses ; ce qui n'est pas le cas pour les composites à matrice organique.

Matrice en céramique

Les céramiques sont utilisées pour la réalisation des pièces en matériaux composites et qui doivent supporter des températures excessivement hautes. Ainsi, ils sont utilisés pour la fabrication d'éléments de machines à combustions, des organes d'engins spatiaux très exposés aux contraintes d'origines thermiques. La matrice de ce type est très difficile puisqu'elle nécessite des manipulations à des températures très élevées d'où l'intervention de main d'œuvre très qualifiée [4]

I.2.3 Types de matériaux composites

Généralement, les composites sont employés sous forme de corps bidimensionnels, plaques ou coques, et en ce qui concerne leur comportement mécanique et l'usage structurel, peuvent être distingués en

- Composites à fibres courtes : les fibres sont dispersées aléatoirement dans une matrice isotrope ; le comportement mécanique macroscopique est isotrope ;
- Composites à fibre longues : les fibres sont disposées de façon ordonnée et orientée dans une matrice isotrope ; le comportement mécanique macroscopique est globalement anisotrope.

Ces matériaux sont normalement assemblés pour constituer des macro-matériaux composites, qui sont essentiellement de deux types :

- Stratifiés : obtenus par empilement de couches en composite orientées de façon différente ; le comportement mécanique macroscopique doit être conçu ;
- Sandwich : panneaux utilisés pour des usages en flexion ; généralement le comportement macroscopique est isotrope dans le plan. [2]

I.2.4 Élaboration et mode d'obtention des matériaux composites**I.2.4.1 Moulage au contact :****➤ Principe**

Procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée.

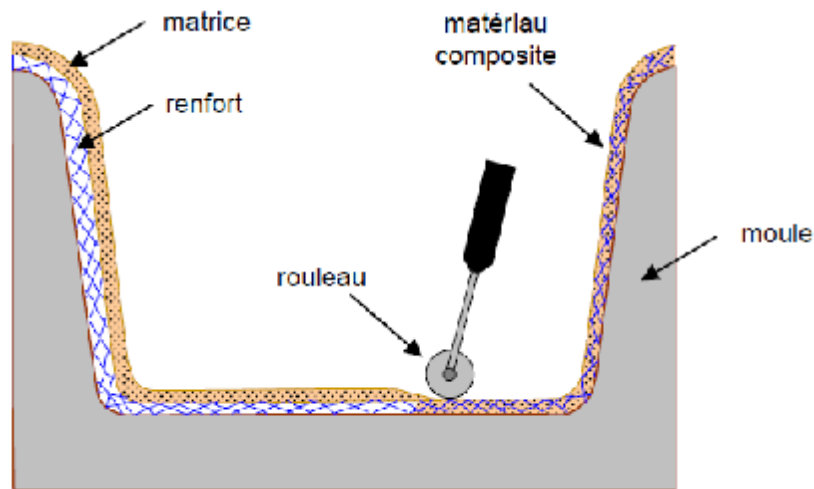


Figure I.8. : Principe du moulage au contact

I.2.4.2 Moulage par projection simultanée :**➤ Principe**

Procédé manuel ou robotisé permettant la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables à température ambiante et sans pression. Les matières premières sont mises en œuvre à l'aide d'une machine dite "de projection" comprenant :

Un dispositif de coupe - projection du renfort (fibre)

Un ou deux pistolets projetant simultanément la résine

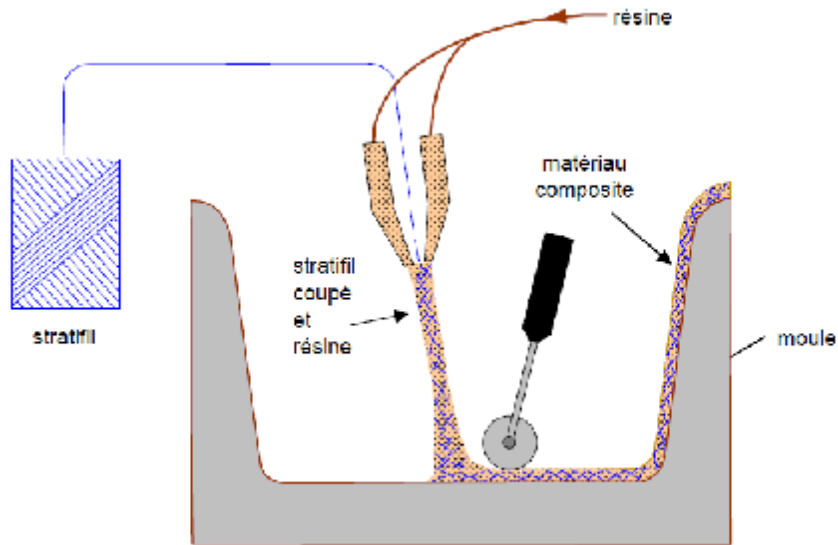


Figure I.9. : Principe du moulage par projection simultanée

I.2.4.3 Moulage sous vide :

➤ Principe

Le moulage sous vide s'effectue entre moule et contre-moule rigide, semi-rigide ou souple suivant la technologie de mise en œuvre.

Le renfort (mat, tissu, 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

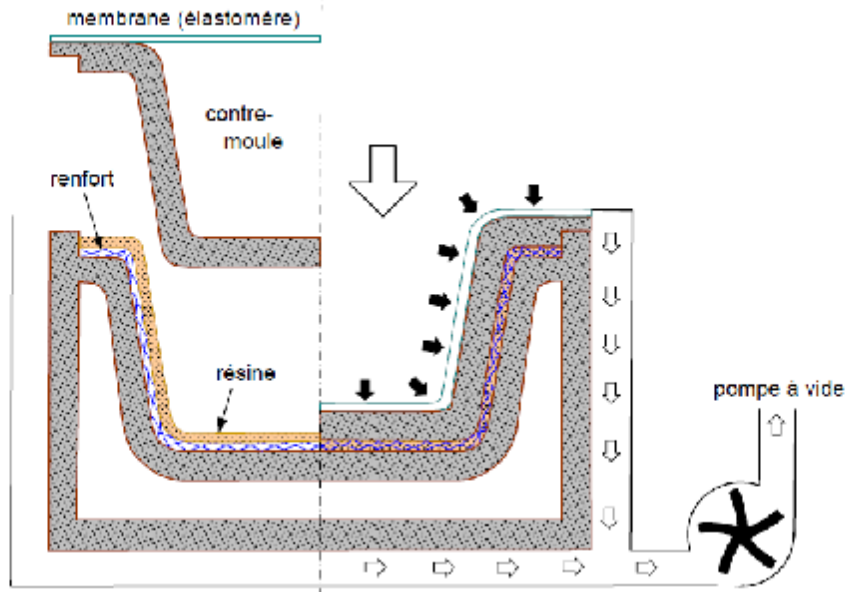


Figure I.10. : Principe de moulage par infusion

Avantages et inconvénients :

➤ Avantages:

- Taux de renfort pouvant atteindre 65 %.
- Bon compactage des tissus
- Bonne imprégnation

➤ Inconvénients:

- Difficulté de mise en œuvre et de la gestion des paramètres
- Matériel non réutilisable

I.2.4.4 Moulage par projection de résine :

➤ Principe:

Le moulage par injection de résine RTM (Résine Transfert Molding). Une nappe de fibre (Tissus, mats) est déposée dans un moule fermé étanche et la résine est injectée à basse

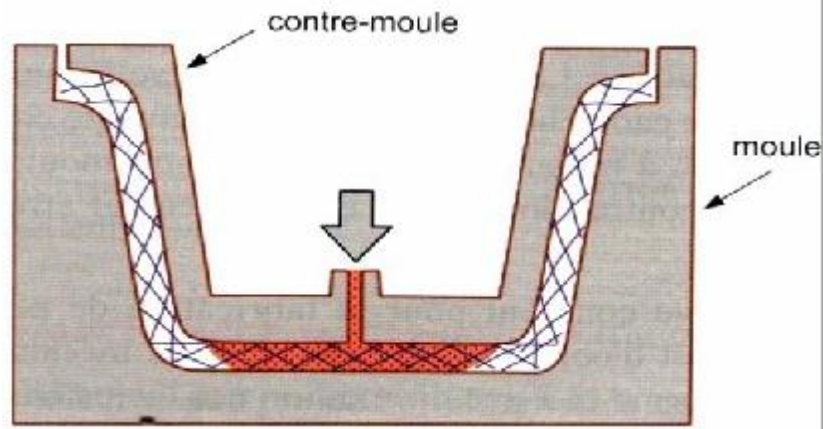


Figure I.11. : Principe de moulage par injection de résine

I.2.4.5 Moulage par centrifugation :

➤ Principe:

Procédé de moulage limité aux enveloppes cylindriques. Le renfort (fibres longues coupées) et la résine sont déposés dans un moule cylindrique chauffé tournant à grande vitesse. [12]

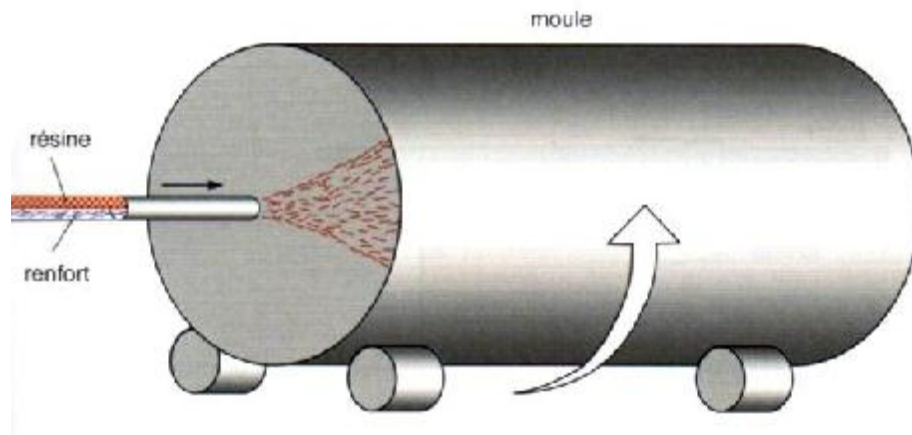


Figure I.12. : Principe de moulage par centrifugation

I.2.5 Domaines d'utilisation des matériaux composites :

Le tableau représente les différents matériaux composites constituants et domaine d'utilisation

Type de composite	Constituants	Domaines d'application
<p><i>1. Composites à matrice Organique</i></p> <p>Papier, carton</p> <p>Panneaux de particules</p> <p>Panneaux de fibres</p> <p>Toiles enduites</p> <p>Matériaux d'étanchéité</p> <p>Pneumatiques</p> <p>Stratifiés</p> <p>Plastiques renforcés</p>	<p>Résine/charges/fibres cellulosiques</p> <p>Résine/copeaux de bois</p> <p>Résine/fibres de bois</p> <p>Résines souples/tissus</p> <p>Elastomères/bitume/textiles</p> <p>Caoutchouc/toile/acier</p> <p>Résine/charges/fibres de verre, de carbone, etc.</p> <p>Résines/microsphères</p>	<p>Imprimerie, emballage, etc.</p> <p>Menuiserie</p> <p>Bâtiment</p> <p>Sports, bâtiment</p> <p>Toiture, terrasse, etc.</p> <p>Automobile</p> <p>Domaines multiples</p>
<p><i>2. Composites à matrice Minérale</i></p> <p>Béton</p> <p>Composite carbone-carbone</p> <p>Composite céramique</p>	<p>Ciment/sable/granulats</p> <p>Carbone/fibres de carbone</p> <p>Céramique/fibres céramiques</p>	<p>Génie civil</p> <p>Aviation, espace, sports, Biomédecine, etc.</p> <p>Pièces thermomécaniques</p>
<p><i>3. Composites à matrice métallique</i></p>	<p>Aluminium/fibres de bore</p> <p>Aluminium/fibres de carbone</p>	<p>Espace</p>
<p><i>4. Sandwiches</i></p> <p>Peaux</p> <p>Ames</p>	<p>Métaux, stratifiés, etc.</p> <p>Mousses, nids d'abeilles, balsa,</p> <p>Plastiques renforcés, etc.</p>	<p>Domaines multiples</p>

Tableau I.1. : Domaines d'utilisation des matériaux composites

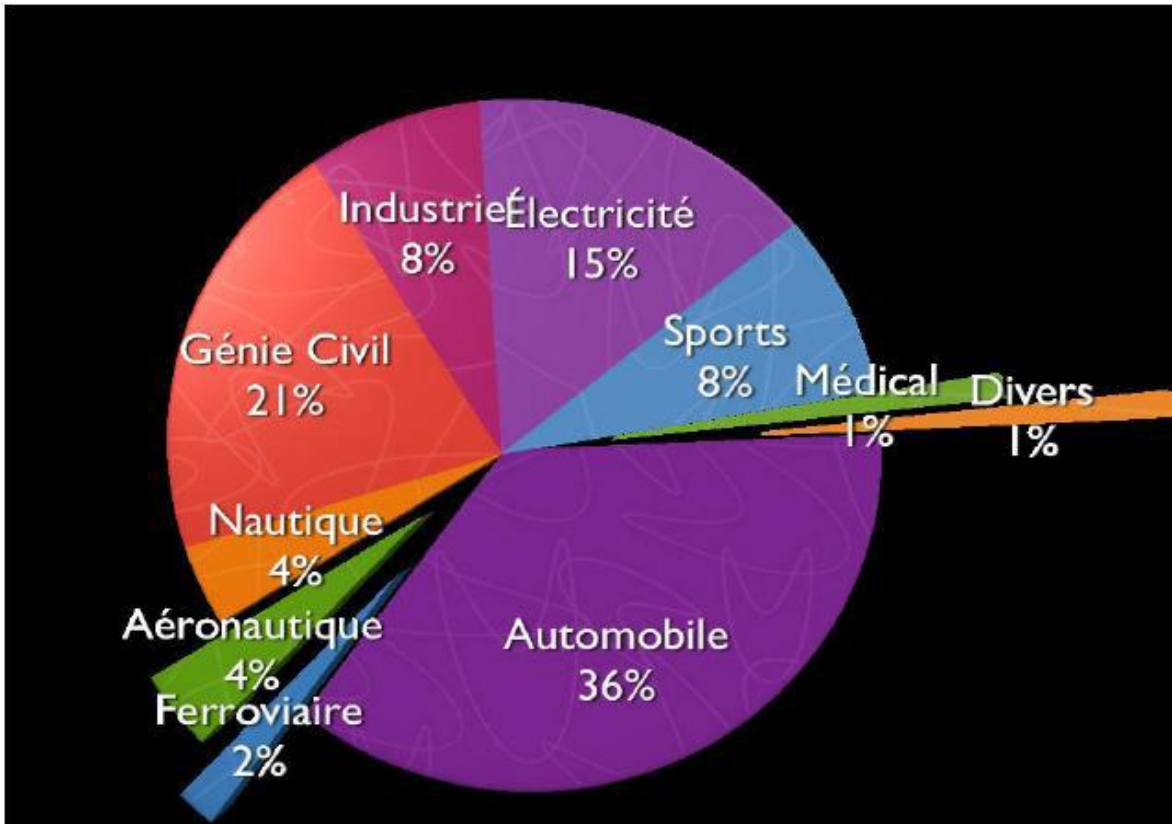


Figure I.13. : Secteur d'application

I.2.6 Avantage des matériaux composites :

- Gain de masse
- Mise en forme de pièces complexes (principe du moulage) et réduction du nombre d'interfaces (boulonnage, rivetage et soudure sur structures métalliques)
- Grande résistance à la fatigue
- Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion (sauf en cas de contact entre de l'aluminium et des fibres de carbone)
- Insensibles aux produits chimiques "mécaniques " comme les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvants, pétrole

I.2.7 Inconvénients des matériaux composites :

- Vieillissement sous l'action de l'eau et de la température
- Attention aux décapants de peinture qui attaquent les résines époxydes
- Tenue à l'impact moyenne par rapport aux métalliques
- Meilleure tenue au feu que les alliages légers mais émission de fumées parfois toxiques pour certaines matrices.
- Coût parfois prohibitifs (temps et coût études et mise en œuvre), le gain en coût est surtout valable pour des grandes séries. [10]

I.2.8 Matériaux composites à fibre de verre**I.2.8.1 Histoire**

La fibre de verre a été inventée en 1836 par Ignace Dubus-Bonnell, un négociant de Lille. Il déposa une demande de brevet portant sur le "tissage du verre rendu malléable par la vapeur, pur ou mélangé avec la soie, laine, coton ou lin".

Les tissus de Dubus-Bonnell ont été primés à l'Exposition de 1839 mais, malgré son succès, cette nouvelle fibre est ensuite tombée dans l'oubli en raison de son coût de fabrication élevé.

C'est beaucoup plus récemment que ce matériau, aujourd'hui très utilisé pour ses qualités mécaniques et optiques, a révolutionné l'industrie verrière.

Les matériaux renforcés de fibres de verre ont fait leur première apparition en tant que matériaux de pointe dans l'aéronautique, le sport et l'automobile de compétition.

Ils ont notamment permis de meilleures performances dans les domaines du saut à la perche ou des courses nautiques. [11]

I.2.8.2 Introduction

Le verre sous forme massive est caractérisé par une très grande fragilité, attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration. En revanche, élaboré sous forme de fibres de faibles diamètres (quelques dizaines de micromètres), le verre perd ce caractère et possède alors de bonnes caractéristiques mécaniques. Les fibres de verre sont élaborées à partir d'un verre filable, appelé verre textile, composé de silice, alumine, chaux, magnésie, etc. ces produits peu coûteux, associés de procédés assez simple d'élaboration, confèrent aux fibres de verre un excellent rapport

performances/prix, qui les place de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans les matériaux composites. [4]

Les fibres de verre sont de tout temps insensibles aux acides chimiques et aux bases alcalines ; ensuite enrobage supplémentaire, la protection cathodique, et des additifs anti-retrait ne sont pas nécessaires. Les fibres de verre augmentent essentiellement la durée de vie des structures lorsque la corrosion est une préoccupation majeure.



Figure I.14. : Fibre de verre

I.2.8.3 Application de fibre de verre

La fibre de verre est extrêmement flexible en raison de son poids léger, de sa qualité intrinsèque, de sa résistance inhérente, de son achèvement respectueux du climat. L'avancement des polymères renforcés de fibres pour une utilisation commerciale a été largement examiné dans les années 1930. C'était digne de mention pour l'industrie du vol. Au milieu de la Seconde Guerre mondiale, la fibre de verre a supplanté le contreplaqué moulé utilisé dans les dirigeables. Sa première application fondamentale de personnel non militaire était, construction de pontons et de carrosseries de voitures de jeux, son utilisation a récemment été étendue aux secteurs de l'automobile et des engins de sport et à la production de dirigeables. La fibre de verre est également utilisée dans le secteur des télécommunications pour recouvrir les câbles radio, en raison de sa faible propriété d'atténuation du signal et de sa perméabilité RF. Différentes utilisations incluent les séparateurs électriques à structure en feuille et les composants structurels que l'on trouve généralement dans les produits de l'industrie de l'énergie.

Les principales utilisations de ces matériaux composites sont, par ordre d'importance :

- les bâtiments et les infrastructures (29%)

- les transports (25%) : avions, TGV
- l'électricité et l'électronique (16%)
- les sports et loisirs (14%) : perches d'athlétisme, skis et planches de surf
- les équipements industriels (11%).



Réservoirs en fibre de verre dans un aéroport



dôme maison en fibre de verre à
Davis, California

Figure I.15. : Domaine d'application des composites à fibres de verre

I.3 Etat de l'art dans l'usinage des matériaux composite

Dans l'analyse des travaux relatifs à l'usinage des matériaux composites, nous considérons en premier lieu le comportement du matériau en usinage d'après la nature des composites :

-Matrice : résine thermodurcissable

Résine thermoplastique

-Fibres : Verre

Carbone

Aramide

A la suite de cette analyse, nous mettrons l'accent sur l'aspect qualitatif de l'opération d'usinage, et sur les moyens d'étude analytique. [15]

I.3.1 Comportement des composites en usinage**I.3.1.1 La matrice**

La principale différence en usinage résidant entre les résines thermodurcissables et thermoplastique est liée à leur mode de dégradation thermique : les résines thermoplastiques fondent alors que les résines thermodurcissables se vaporisent sous l'action de la chaleur dégagée au cours de l'usinage.

Les résines thermodurcissables

Le caractère fragile de ces résine, associé au mode de dégradation thermique ne procure pas de difficultés particulières en usinage, si ce ne sont des risques d'écaillage sur les arêtes vives de pièces.

Les résines thermoplastiques

Un problème est posé par l'importante ductilité à chaud de cette famille de résine. Au-dessus de leur température de transition vitreuse, leur structure se modifie (de cristalline à amorphe), leurs caractéristiques mécaniques en sont considérablement affectées. Le matériau fondu adhère à la surface en dépouille des outils, intensifiant la friction entre la partie active de l'outil et la surface usinée.

I.3.1.2 Les fibres

Les fibres présentent des propriétés mécaniques différentes, que conduisent de la sorte à des comportements particuliers en usinage de l'une à l'autre. [15]

On considère les 3 types de fibres les plus utilisées :

- Fibres de verre E
- Fibres de carbone HT
- Fibre d'aramide HM

I.4 L’usinage par outil coupant en général

I.4.1 Composites à fibre de verre ou de carbone

En raison du comportement en usinage de leurs fibres, les conditions générales de travail des matériaux métallique peuvent être utilisées pour les composites à fibre de verre et de carbone. Néanmoins, les outils devront être particulièrement résistants à l’usure en raison de l’abrasivité des résines et de certaines fibres, ils seront généralement en carbure de tungstène ou diamant polycristallin (PCD).

I.4.2 Composites à fibre d’aramide

La fibre d’aramide est non abrasive et sa structure n’est pas cristalline, contrairement aux fibres de verre et de carbone.

	Poids spécif. (g/cm ³)	Ø Fibre (µm)	R Traction (N/mm ²)	E Traction Long. (N/mm ²)	E Traction Transv. (N/mm ²)	R spécif.au nœud coulant	R Spécif. Au nœud	Mode de défaut. Par rupt.
Verre E	2.5	10	1800	74000	74000	0.4	0.15	Fragile
Carbone HT	1.75	7	2800	235000	17000	-	-	Fragile
Aramide	1.45	12	2700	133000	7000	0.55	0.38	Fragile

Tableau I.2. : Caractéristique mécanique

Comme le montre le tableau, le caractère ductile de la fibre rend difficile à couper par l’outil. De plus, elle a le désavantage de mal adhérer avec la résine. Ainsi, pour la plupart des opérations d’usinage, les outils destinés à usiner des composites contenant ces fibres de verre ou de carbone. A juste titre, cette propriété de matériau difficile à couper, déchirer et usiner, ouvre des domaines d’application spécifique à la fibre d’aramide (protection balistique, gants et jambières de protection, ...)

I.4.3 Conditions communes à tous les matériaux composites

L’application d’un revêtement ‘‘dur’’ (ex : TiC ou TiN) sur un outil en acier rapide (substrat) est à l’origine destiné à en améliorer les performances. Cependant, le dépôt implique une

augmentation du rayon de l'arête de base (figure I.16). Ceci a pour conséquence de diminuer les facultés de coupe par cisaillement de l'outil, bien que sa dureté soit plus importante. La rugosité de la surface usinée en n'est que plus grande. [15]

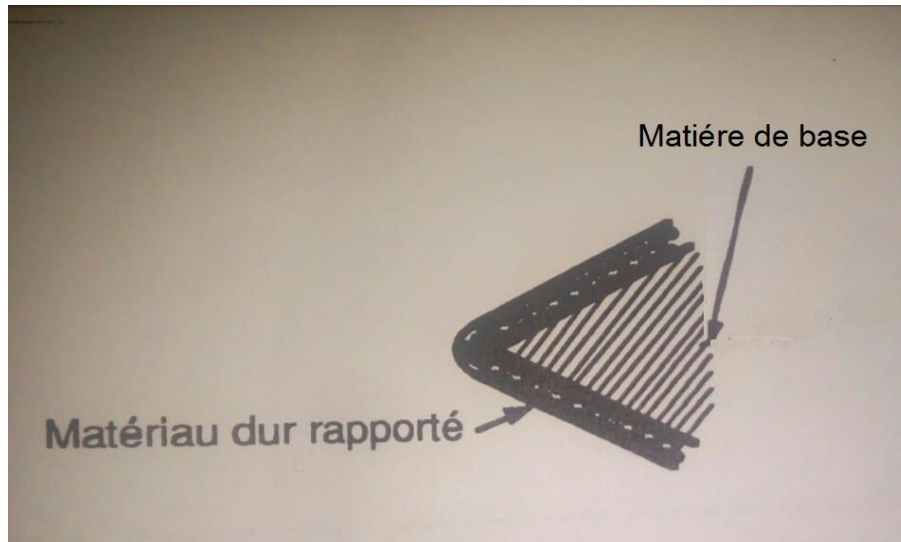


Figure I.16. : Outil revêtu

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

I.5 Perçage des matériaux composites

I.5.1 Introduction

En plus d'offrir un potentiel d'économie de poids substantiel, les matériaux composites présentent l'avantage supplémentaire de permettre la fabrication de nombreuses pièces qui étaient auparavant fabriquées séparément puis assemblées. 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.

. La consolidation partielle entraîne une réduction significative du nombre de trous de fixation à percer, ce qui se traduit par une réduction des coûts, mais ce nombre reste considérable. Le perçage est l'opération d'usinage la plus courante sur les pièces composites d'aéronefs. Comme pour toutes les techniques d'usinage traditionnelles, l'usure sévère des outils, détérioration de la

qualité de la finition de surface de la pièce et les vitesses réduites font partie des problèmes rencontrés lors du perçage. Des recherches approfondies ont été menées pour déterminer la combinaison appropriée de la conception de l'outil et des conditions de fonctionnement nécessaires pour produire des trous de haute qualité. [5]

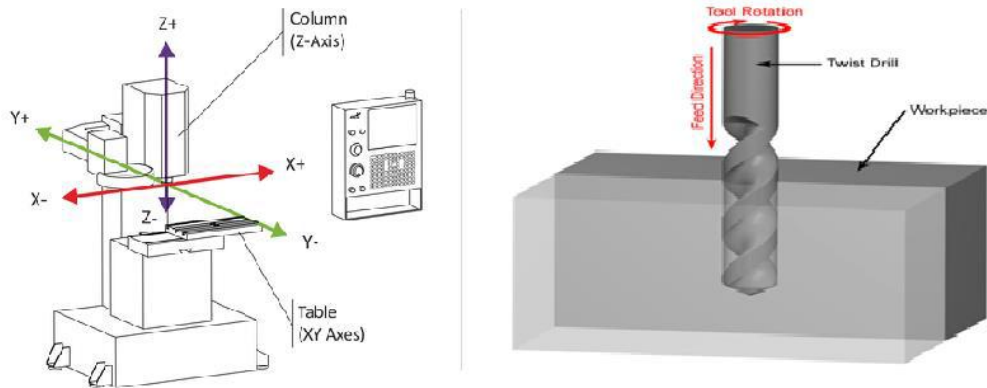


Figure I.17. : Opération de perçage

I.5.2 Qualité de surface et défauts d'usinage liés au perçage de matériaux composites

Comme dans tout usinage il peut apparaître des défauts dans la fibre de verre. Cependant, ces défauts ne sont pas comparables à ceux rencontrés lors de l'usinage des matériaux métalliques. Cette partie de l'étude va se consacrer essentiellement sur les défauts pouvant être rencontrés lors du perçage. Ces défauts sont listés ci-dessous :

a). Délaminage et écaillage dans le cas du perçage : Le délaminage et l'écaillage des stratifiés sont des défauts pouvant se retrouver à l'entrée comme à la sortie de plaques percées. L'écaillage est une rupture fragile de la matrice en surface entraînant avec elle un ensemble de fibres. Ce défaut est donc visible sur la face libre de la plaque. A l'inverse du délaminage qui est une fissuration au niveau des interfaces entre les plis de composites.

b). Caractérisation de l'état de surface La qualité de l'état de surface est souvent jugée et quantifiée à l'aide du critère de rugosité Ra. Ce critère est défini sur le profil de rugosité filtré à partir du profil de la surface mesurée. En gardant pour critère la rugosité Ra, les travaux récents

se sont concentrés sur la prévision et la création d'un modèle permettant de prévoir l'état de surface obtenu sur la paroi du trou en perçage dans les composites. Ils s'accordent pour dire que la rugosité dépend de trois facteurs principaux qui sont les conditions de coupe, la géométrie de l'outil et l'anisotropie du matériau par l'orientation des fibres.

I.5.3 Etat géométrique

Dans un premier temps, les auteurs décomposent les caractéristiques géométriques valables pour tous les trous, quelle que soit la nature du matériau percé.

- L'évaluation de la microgéométrie de la surface est obtenue par les paramètres de rugosité standards (R_t , R_p , R_a , ...).
- La précision dimensionnelle est basée sur la variation ΔD du diamètre nominal d du trou.
- Les défauts de circularité expriment la précision de forme par le facteur f_k . Les variations de cylindricité gagnent de l'importance comme critère de qualité en raison de la faible épaisseur de perçage rencontrée souvent dans les composites et de leur anisotrope.

I.5.4 Autres défauts

On observe une dégradation thermique de la surface usinée, caractérisée par décomposition de la matrice sur la paroi du trou.

On discerne également l'apparition de fissures sur la surface usinée. [5]

I.6 Cas d'un facteur propre aux composites : la répartition des fibres

La répartition des fibres affecte leur inclinaison relative par rapport à l'arête de coupe. Ce facteur affecte l'ensemble des états géométriques et des défauts énoncés précédemment. L'inclinaison angulaire des fibres est définie suivant la zone considérée de la surface usinée. Dans le cas du perçage, l'inclinaison passe successivement de 0 à 180^0 (et non de 0 à 360^0 en raison de la symétrie dans le développement de la surface usinée). Ainsi, les arêtes du foret découpent des fibres dont l'inclinaison diffère à tout instant. [9]

I.6.1 Endommagement du matériau lors du perçage

Les fibres de verre et de carbone ont une rupture à caractère fragile. Elles sont usinables avec les conditions employées pour les matériaux métalliques. Toutefois, il faut ajuster les paramètres d'usinage (avance, vitesse de coupe) pour améliorer la qualité de l'usinage.

CHAPITRE II
Matériau et Techniques
expérimentales

II. Chapitre II Matériau et Techniques expérimentales

II.1 Présentation du problème

Le problème actuel réside principalement sur la bonne maîtrise de la caractérisation des défauts résultants des usinages (définition de critères de qualité), et de leur quantification. C'est ainsi, qu'en raison de la constitution des matériaux composites, il est recommandé de diminuer le nombre d'opérations d'usinages. Mais, la réalisation de pièces dans ces types de matériaux nécessite souvent, après la mise en forme globale, des opérations de parachèvement à l'outil coupant (ex : passage de rivet donc perçage, ébavurage donc fraisage, ...).

Dans ce chapitre nous discuterons la technique de pyrolyse pour calcul démodules de l'ingénieur. Et aussi nous présentons le banc d'essais, les matériaux étudiés et les appareils utilisés pour la mesure de la circularité des trous usiner. Nous détaillant également le plan d'expérience élaboré, les méthodes d'analyse et les résultats obtenus.

II.2 Matériau de l'étude

II.2.1 Pyrolyse

La pyrolyse, est la décomposition chimique d'un composé organique par une augmentation importante de sa température pour obtenir d'autres produits (gaz et matière) qu'il ne contenait pas. L'opération est réalisée en l'absence d'oxygène ou en atmosphère pauvre en oxygène pour éviter l'oxydation et la combustion.

Les propriétés mécaniques des composites dépendent principalement des quantités de fibre constituants les composites d'où la nécessité de vérifier les quantités des fibres et résine après leurs fabrications.

Les échantillons sont enfournés dans un four a renouvellement d'air enflammé portés à une température de 600°C pendant 10 heures.

La teneur en matière non combustible est obtenue par pesée de l'échantillon avant et après calcination et on obtient les fractions massiques de la fibre et de la résine nécessaire pour calcul démodules de l'ingénieur.

II.2.1.1 Pesage des échantillons avant la calcination :

L'opération de pesage se déroule au niveau de l'unité de recherche en matériaux avancés (URMA/CRTI). On utilise pour cette opération une balance électronique d'une précision de quatre chiffres après la virgule.



Figure II.1. : Balance électronique

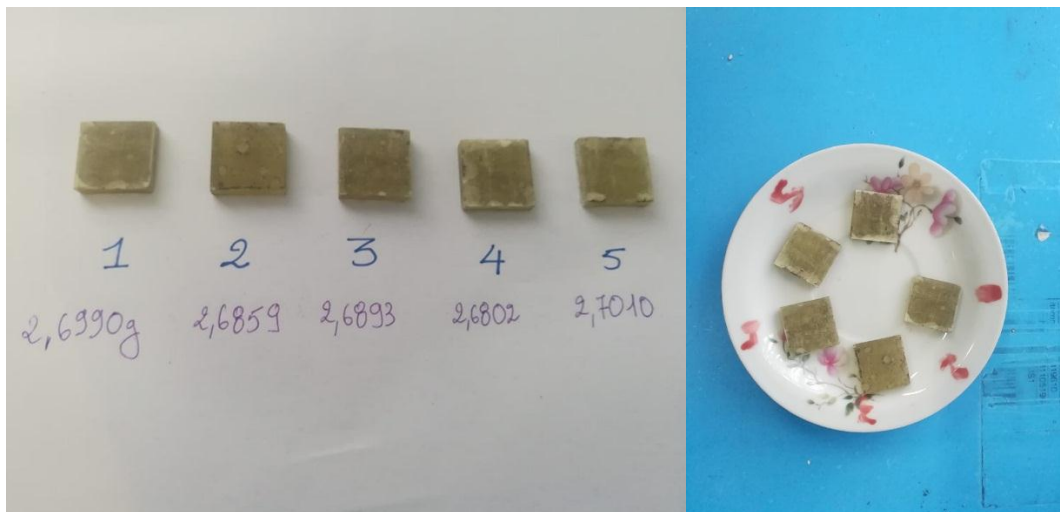


Figure II.2. : Les échantillons avant la calcination

II.2.1.2 Calcination des échantillons :

L'échantillon est pesé avec une précision de 0.001g et placé ensuite dans un creuset préalablement pesé. L'ensemble est placé dans un four à une température de 625°C jusqu'à ce que la résine soit entièrement calcinée (10 heures). Le creuset est mis ensuite dans un dessiccateur jusqu'à refroidissement complet. Finalement, l'ensemble creuset et cendres sont pesés



Figure II.3. : Four à moufle

Le défournement des échantillons s'est fait après refroidissement.



Figure II.4. : Les échantillons après la calcination

-L'échantillon est pesé une masse M_1 en gramme avant la calcination.

-L'échantillon est pesé une masse M_2 en gramme après la calcination (masse de résidu de fibre de verre).

La masse de résine par calcination est :

$$M = M_1 - M$$

Le taux de résine en pour cent est donc

$$R\% = M/M_1 * 100$$

Le taux de fibre de verre en pour cent est

$$F\% = 100 - R$$

Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau :

Matériau	N° Echant	Poids(g)				Fraction massique			
		Avant la calcination	Après la calcination	Masse de fibre	Masse de résine	Fibre %	Moyen Fibres %	Résine %	Moyen Résine %
Stratifié en taffetas	1	2.6990	1.5747	1.5747	1.1243	58.4	57.7	41.6	42.3
	2	2.6859	1.5410	1.5410	1.1449	57.4		42.6	
	3	2.6893	1.5162	1.5162	1.1731	56.4		43.6	
	4	2.6802	1.5746	1.5746	1.1056	58.8		41.2	
	5	2.7010	1.5555	1.5555	1.1455	57.6		42.4	

Tableau II.1. : Résultats obtenus de la pyrolyse du stratifié

II.2.1.3 Détermination de la fraction volumique :

Le taux de fraction volumique se calcule avec la formule suivante :

$$V_{\text{fibre}} = \frac{\frac{M_{\text{fibre}}}{\rho_{\text{fibre}}}}{\frac{M_{\text{fibre}}}{\rho_{\text{fibre}}} + \frac{M_{\text{matrice}}}{\rho_{\text{matrice}}}}$$

V_{fibre} : fraction volumique de fibre de verre dans le composite

M_{fibre} : la masse de fibre

ρ_{fibre} : la masse volumique de fibre

M_{matrice} : la masse de résine

ρ_{matrice} : la masse volumique de la résine

Où :

$$V_f = \frac{M_f \cdot \rho_m}{\rho_f \cdot M_f - M_f(\rho_f - \rho_m)} \text{ avec } V_m = 1 - V_f$$

M_f Et M_m : fraction massique de la fibre et de la matrice en (%).

V_f et V_m : fraction volumique de la fibre et de la matrice en (%).

ρ_m, ρ_f : la masse volumique de la matrice et de la fibre (g/cm³).

II.2.1.4 Détermination des modules d'élasticités :

Le module d'élasticité et le coefficient de poisson de fibre et de la matrice époxyde sont respectivement :

$$E_f = 73 \text{ Gpa} \quad E_m = 2.8 \text{ Gpa} \quad \nu_f = 0.22 \quad \nu_m = 0.3$$

Module des fibres et de la matrice :

	Pour les fibres	Pour la matrice
Module de cisaillement	$G_f = \frac{E_f}{2(1+\nu_f)}$	$G_m = \frac{E_m}{2(1+\nu_m)}$
Module de compressibilité	$k_f = \frac{E_f}{3(1-2\nu_f)}$	$k_m = \frac{E_m}{3(1-2\nu_m)}$
Module de la compression latéral	$K_f = k_f + \frac{G_f}{3}$	$K_m = k_m + \frac{G_m}{3}$

Tableau II.2. : Module des fibres et de la matrice

Module d'élasticité longitudinal E_L :

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

Coefficient de Poisson ν_{LT} :

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

Module de cisaillement G_{LT} :

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

Module de compression latéral :

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

Module de cisaillement transversal $G_{TT'}$:

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

Module d'élasticité transversal E_T :

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

Calcul de la fraction volumique :

Fibre :

$$V_f = \frac{M_f \cdot \rho_m}{\rho_f - M_f(\rho_f - \rho_m)}$$

$$M_f = 57.7$$

$$\rho_m = 1.2 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_f = 2.6 \text{ g/cm}^3$$

$$V_f = 0.39 = 39\%$$

Matrice

$$V_m = 1 - V_f$$

$$V_m = 0.61 = 61\%$$

Calcul du module de la fibre :

	Pour les fibres	Pour la matrice
Module de cisaillement G (Gpa)	29.92	1.08
Module de compressibilité k (Gpa)	43.45	2.33
Module de la compression latéral K (Gpa)	53.42	2.69

Tableau II.3. : Les module de la fibre et matrice

Matériau	Stratifié en taffetas
Fraction volumique de fibre	39%
E_L (GPa)	30.178
E_T (GPa)	4.91
G_{LT} (GPa)	2.3112
$G_{TT'}$ (GPa)	2.0844
K_L (GPa)	4.91
ν_{LT} (GPa)	0.2688

Tableau II.4. : Caractéristiques physiques du matériau étudié

II.3 Banc d'essai**II.3.1 Dispositif de perçage :**

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

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

Quant aux forets, un diamètre est pris en considération, un foret de 12 mm. Le nombre de tours/min et la vitesse d'avance sont des éléments très important dans le paramétrage de l'opération de perçage, deux vitesses de rotation ont été choisi, une vitesse maximale de 1400 tr/min et une vitesse minimale d'une valeur de 710 tr/min.et aussi pour la vitesse d'avance, une vitesse maximale de 0.56mm/tr et une vitesse minimale d'une valeur de 0.10 mm/tr



Figure II.5. : Foret utilisés (12 mm)

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

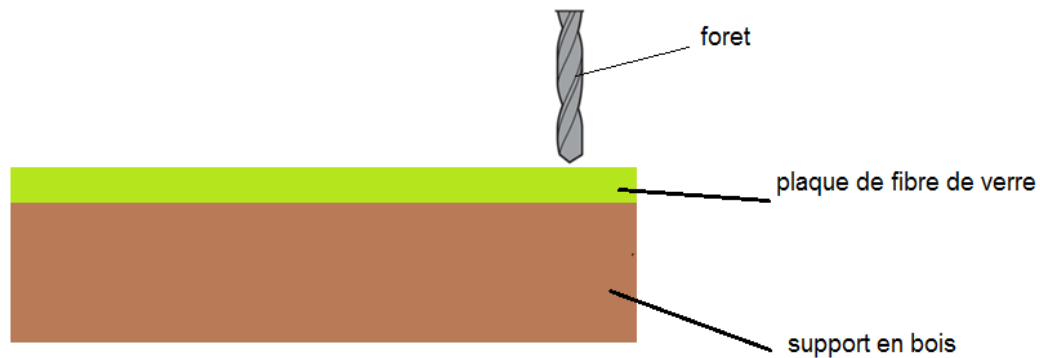


Figure II.6. : Dispositif de perçage.

II.3.2 Perceuse à colonne universelle

Est conçue et réalisée uniquement pour des opérations de perçage à poste fixe, sur un mouvement vertical, dans l’acier, les matériaux ferreux et non ferreux, les matières plastiques et le bois.

Capacité de perçage maxi (mm)	Cône morse	Ø colonne (mm)	Course de broche (mm)	Nombre de vitesses	Vitesse de broche (tr/min)	Puissance moteur (kW)	Alimentation	Poids (kg)
22	CM2	80	90	12	240 - 2500	0,75	230 V monophasé 400 V triphasé	80,5

Tableau II.5. : Caractéristiques.

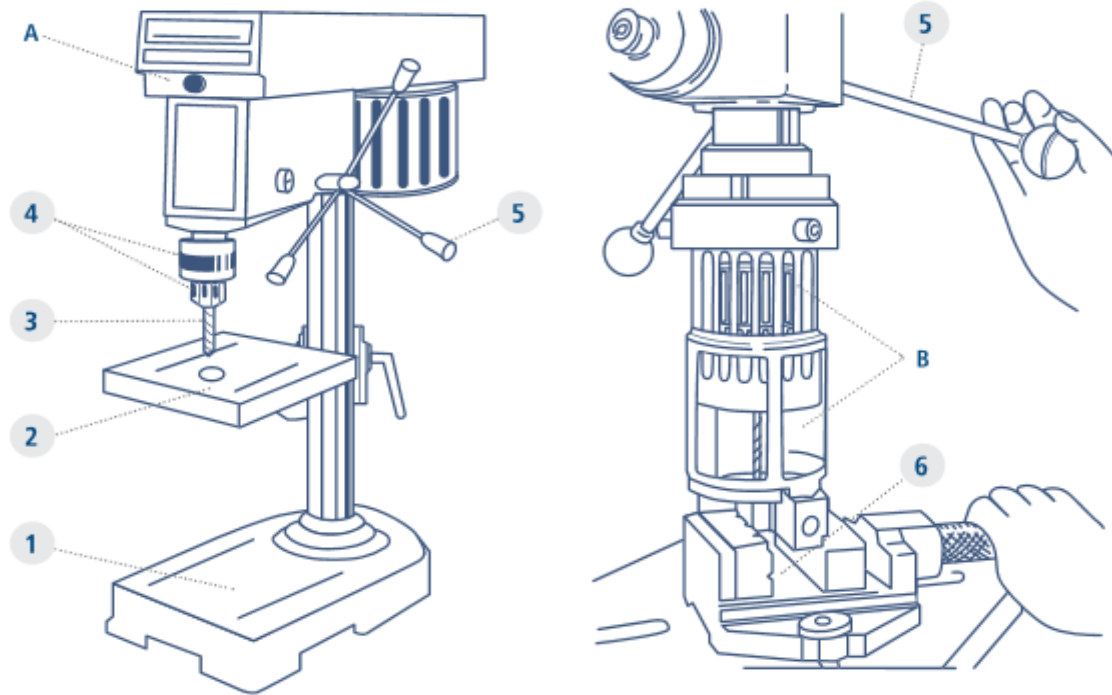


Figure II.7. : Perceuse a colonne universelle

Éléments d'une perceuse

- 1 Bâti
- 2 Table
- 3 Outil
- 4 Mandrin
- 5 Levier
- 6 Système de fixation

Dispositifs de sécurité

- A Bouton d'arrêt d'urgence
- B Protecteur coulissant

II.3.3 Microscope Falcon CNC

Microscopes de mesure vidéo sans contact à 3 axes haute performance et compacts fournissant des mesures rapides et précises de pièces de précision simples et complexes, qui conviennent aussi bien pour le contrôle qualité dans les ateliers que les applications d'inspection de fabrication. Ils sont dotés de différentes configurations et options systèmes, dont l'option CNC automatique.

- Système de mesure vidéo à 3 axes précis fournissant des résultats extrêmement répétables
- Fonctions avancées de série
- Performant et intuitif pour des résultats précis et fiables
- Optique de zoom haute résolution à plusieurs positions offrant précision et flexibilité
- Grand champ de vision pour une orientation aisée de l'échantillon
- Étalonnages NLEC* et SLEC** réalisés à l'usine
- Logiciel de mesure « touch-to-measure » de nouvelle génération
- Platine de mesure de précision 150 mm x 150 mm

Modèle Falcon CNC : Microscope de mesure vidéo automatique avec Platine de mesure de précision motorisée 150 mm x 150 mm (Palpeur en option pour des mesures avec contact).

Le système d'inspection vidéo sans contact Falcon CNC fournit des mesures rapides et précises de pièces de précision simples et complexes et convient aussi bien pour une utilisation dans les ateliers que pour les applications d'inspection de fabrication.

Le système de métrologie Falcon CNC fournit des mesures extrêmement répétables, qui vous permettent d'obtenir le résultat escompté, à chaque fois. Doté de différentes configurations et options systèmes, il convient pour de nombreuses applications.



Figure II.8. : Microscope Falcon CNC

II.3.4 Matériau composite de l'étude

Notre matériau composite est un stratifié à fibres de verre tressé en serge de cinq (05) plis et de résine époxyde. Il est composé de 39% fibre de verre et 61% résines.



Figure II.9. : Stratifié en taffetas

II.3.5 Outils de coupe utilisés

L'usinage du matériau est réalisé à l'aide d'un foret à HSS (high speed steel) de diamètre 12 mm

II.4 Technique expérimentale

II.4.1 Introduction aux plans d'expériences

Les plans d'expériences sont utilisés dans les études industrielles en recherche-développement.

Ils interviennent dans de nombreux domaines industriels. On peut notamment citer :

- industries chimiques, pétrochimiques et pharmaceutiques
- industries mécaniques et automobiles
- industries métallurgiques

Leur utilisation vise aux buts suivants :

- détermination des facteurs clés dans la conception d'un nouveau produit ou d'un nouveau procédé
- optimisation des réglages d'un procédé de fabrication ou d'un d'appareil de mesure
- prédiction par modélisation du comportement d'un procédé

Les plans d'expériences s'inscrivent dans une démarche générale d'amélioration de la qualité.

Le succès de la démarche originale des plans d'expériences réside dans la possibilité d'interprétation de résultats expérimentaux avec un effort minimal sur le plan expérimental : la minimisation du nombre nécessaire d'expériences permet un gain en temps et en coût financier.

Le scientifique est souvent amené à comprendre comment réagit un système en fonction des facteurs susceptibles de le modifier. Pour visualiser cette évolution, il mesure une réponse et va ensuite essayer d'établir des relations de cause à effet entre les réponses et les facteurs. [13]

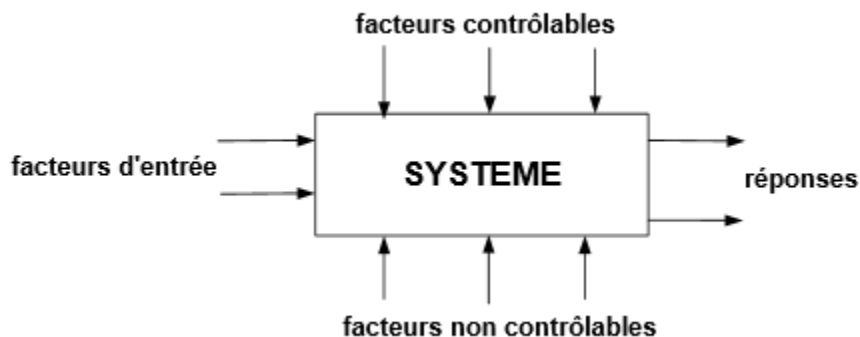


Figure II.10. : Vocabulaire de base des plans d'expérience

Le plan d'expériences sert à mettre en évidence et à quantifier l'influence des paramètres pris en compte.

Vous devez mettre en œuvre une série d'essais physiques ou une série de calculs numériques. C'est souvent le cas si vous vous trouvez dans un des contextes suivants :

- études techniques ;
- optimisation de processus ;
- études de moyens de fabrication ;
- amélioration de capacité machine ;
- essais de mise au point ;
- essais d'endurance ;
- essais de laboratoire ;
- etc. [14]

II.4.2 Méthodologie expérimentale

Pour rendre commode le déroulement des essais, une méthode des plans d'expériences a été introduite. Elle a pour rôle d'optimiser la disposition des essais. Cette technique nous permet de minimiser le nombre d'expériences tout en ayant le maximum de renseignements ce qui aide à gagner du temps et à économiser la matière première. Les plans d'expériences sont basés sur des règles mathématiques.

Les essais expérimentaux ont été effectués selon les plans factoriels 2^2 composés de deux facteurs à deux niveaux (-1, +1) (Figure II.11).

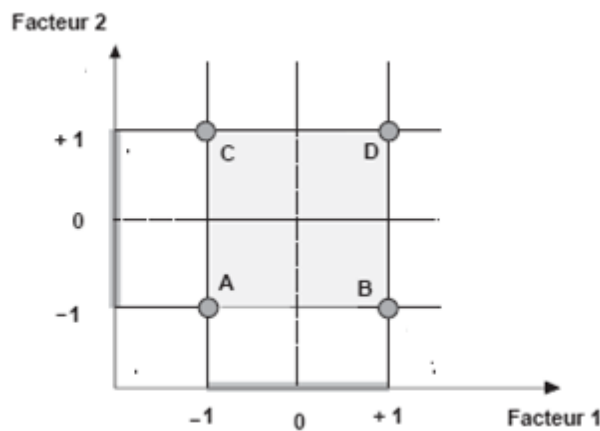


Figure II.11. : Représentation du domaine d'étude par les sommets A, B, C, D

II.4.2.1 Matrice d'expériences

La matrice d'expérience (tableau II.6) définit les essais à réaliser. Le terme essai est l'équivalent de points d'expérience lorsque l'on emploie la représentation en tableau des plans d'expériences.

N ^o essai	facteur1	facteur2
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1

Tableau II.6. : Matrice d'expérience

Les représentations géométriques et les représentations par tableaux sont équivalentes. Les tableaux (ou matrices) présentent l'avantage de pouvoir être utilisés quel que soit le nombre de facteurs, c'est-à-dire quel que soit le nombre de dimensions de l'espace expérimental. Il est utile de savoir passer d'une représentation à l'autre pour bien interpréter les résultats des plans d'expériences.

Le modèle mathématique postulé est un modèle polynomial du premier degré avec interactions représenté dans l'équation

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_{12}X_1X_2$$

- a_0 : coefficient constant du modèle ;
- a_1 : coefficient du facteur 1 ;
- a_2 : coefficient du facteur 2 ;
- a_{12} : coefficient du terme x_1x_2 ;
- Y : est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée.

II.4.2.2 Conditions du perçage

Le procédé s'est déroulé conformément aux plans d'expériences 2^2 : le régime adopté est en fonction du matériau et des caractéristiques de la machine-outil (tableau II.7).

Facteurs codés	Paramètres	Niveaux -1	Niveaux +1
X ₁	Avance (mm/tr)	0.10	0.56
X ₂	Nombre de tours/min (tr/min)	710	1400

Tableau II.7. : Facteurs codés en perçage

L'opération a été réalisée selon les régimes indiqués sur le (tableau II.8)

N° d'essai	Paramètres d'entrée	
	Avance (mm/tr)	Nombre de tours/min (tr/min)
1	0.10	710
2	0.56	710
3	0.10	1400
4	0.56	1400

Tableau II.8. : Matrice d'expérience

Le résultat de l'action de perçage avec un nombre de tours/min "N" combinée à une vitesse avance "f" illustré sur la (figure II.12).



a) Pièce percée

b) Opération de perçage

Figure II.12. : Résultat de l’action de perçage

Le processus de perçage comporte un grand nombre de paramètres de processus, mais trois différents paramètres d’usinage ont été analysés dans la littérature, à savoir Avance (f), Nombre de tours/min (N) et Diamètre du foret (d), sont identifiés. Le nombre de tours/min et l’avance sont réglés sur quatre niveaux, tandis que le diamètre du foret est défini sur un niveau, comme indiqué ci-dessous (tableau II.9).

N° d’essai	N (tr/min)	F(mm/tr)	D (mm)
1	710	0.10	12
2	710	0.56	12
3	1400	0.10	12
4	1400	0.56	12
5	710	0.2	12
6	710	0.28	12
7	710	0.40	12
8	710	0.56	12
9	710	0.80	12
10	710	1.12	12
11	355	0.10	12
12	500	0.10	12
13	1000	0.10	12
14	1400	0.10	12

15	2000	0.10	12
16	90	0.10	12
17	63	0.10	12
18	45	0.10	12

Tableau II.9. : Détails des paramètres d'usinage



Figure II.13. : Pièce percée

II.5 Détermination de la circularité des trous usinés

II.5.1 La circularité

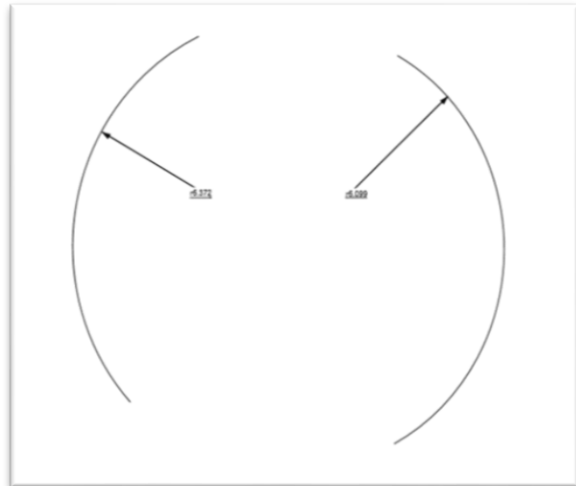
Parmi les imperfections provoquées par le perçage, la circularité des trous semble être généralement précaire. La circularité des trous peut entraîner une baisse de la qualité du trou et peut être indésirable. Le niveau de circularité peut être dicté par la variable (Δr). Pour calculer cette variable on a fait deux arcs à deux endroits différents sur le trou percé, puis on a mesuré les rayons des deux arcs et voir la différence entre eux.

$$\Delta r = r_{max} - r_{min}$$

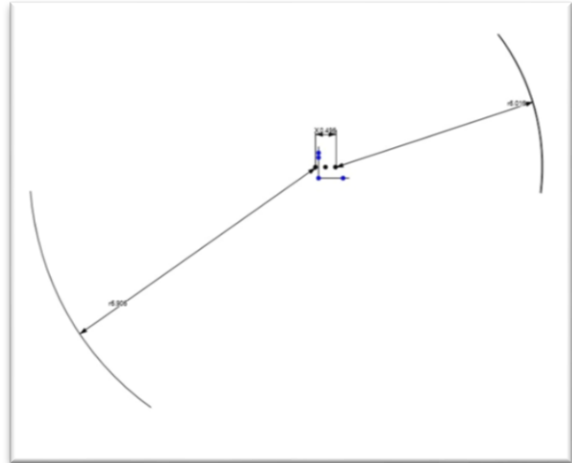
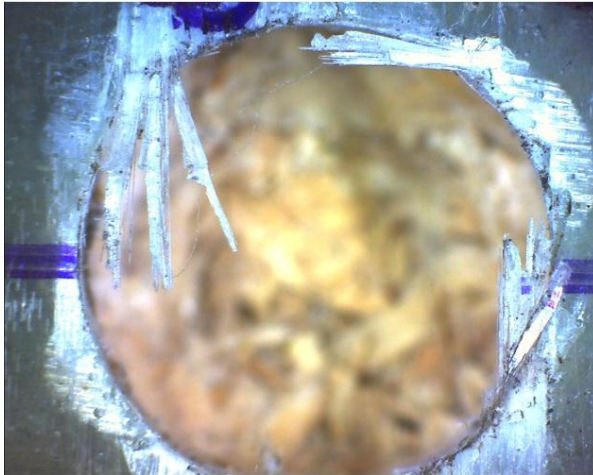
La meilleure circularité des trous percé correspond à la valeur minimale de Δr et donc au meilleur régime de coupe (N, f).



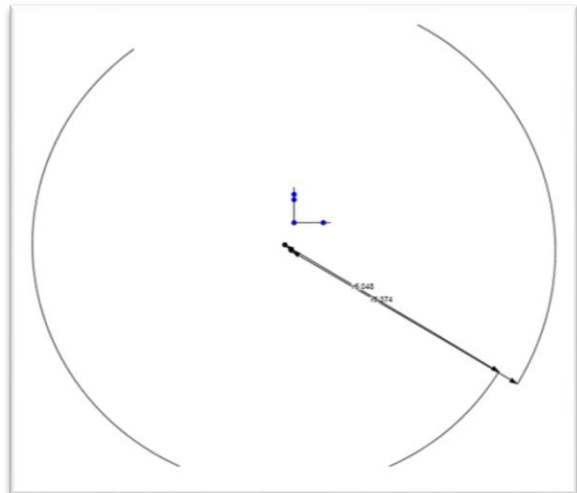
Figure II.14. : Observation des trous



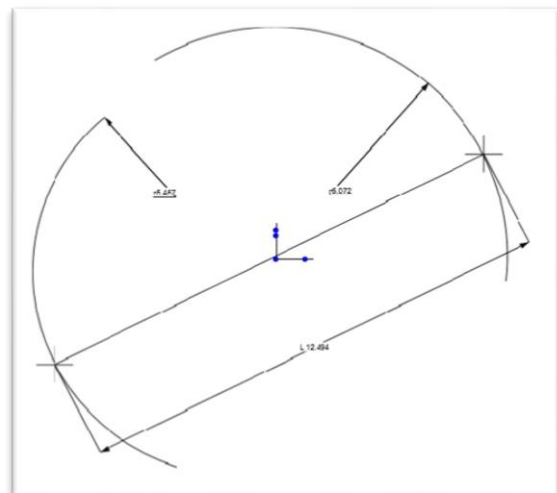
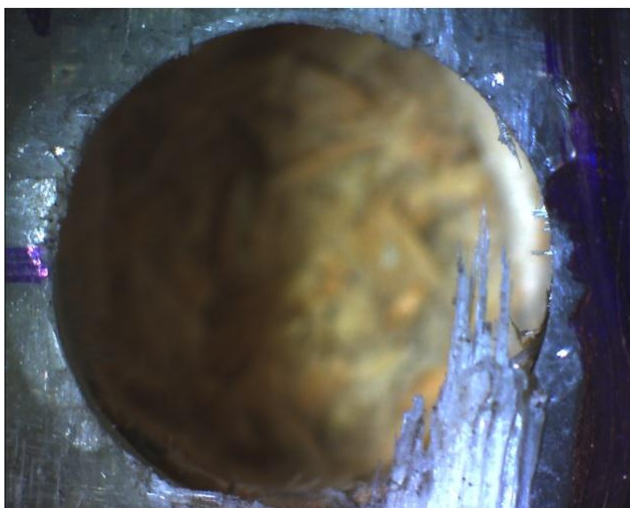
Expérimentation No :1



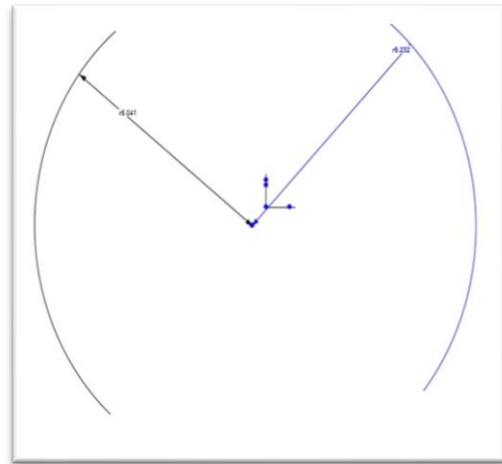
Expérimentation No :2



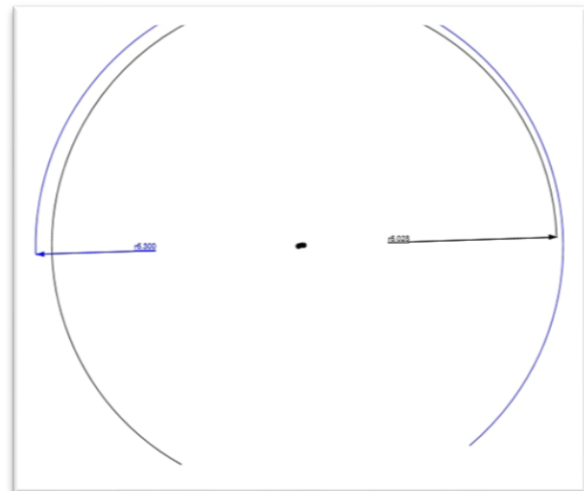
Expérimentation No :3



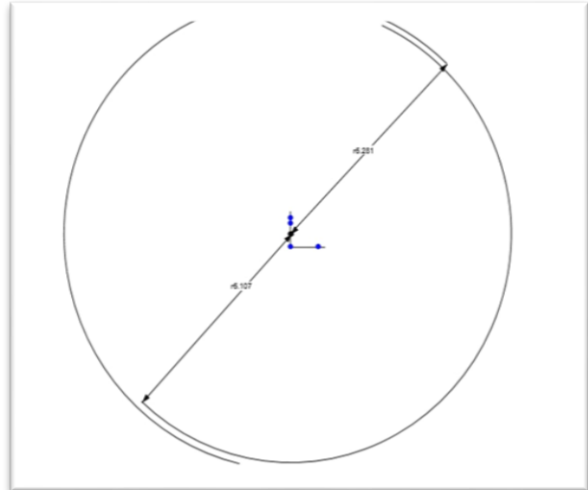
Expérimentation No :4



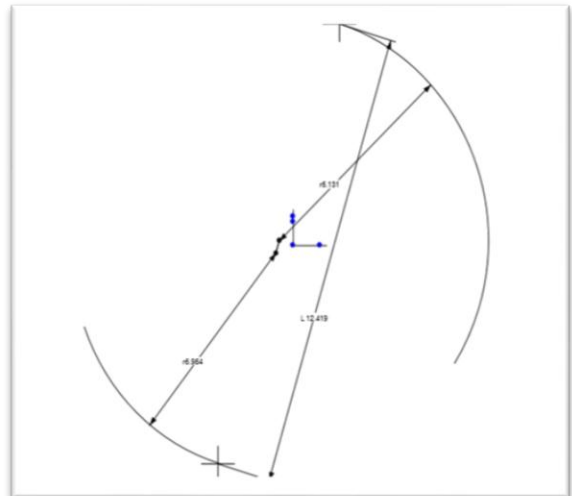
Expérimentation No :5



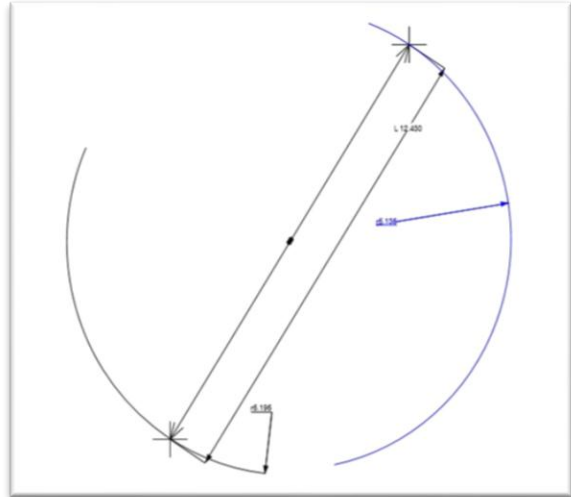
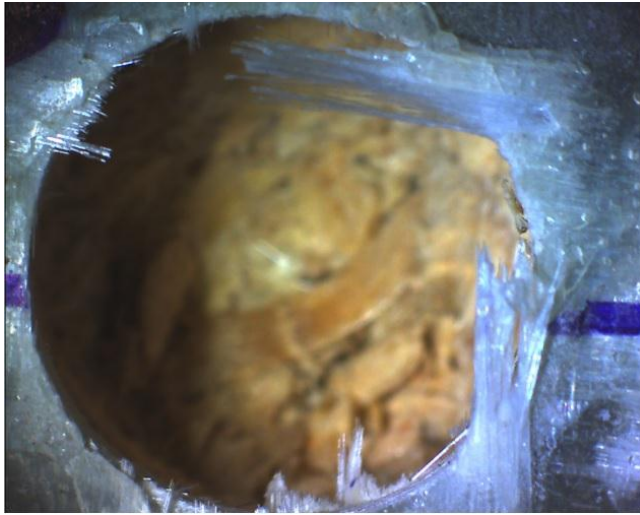
Expérimentation No :6



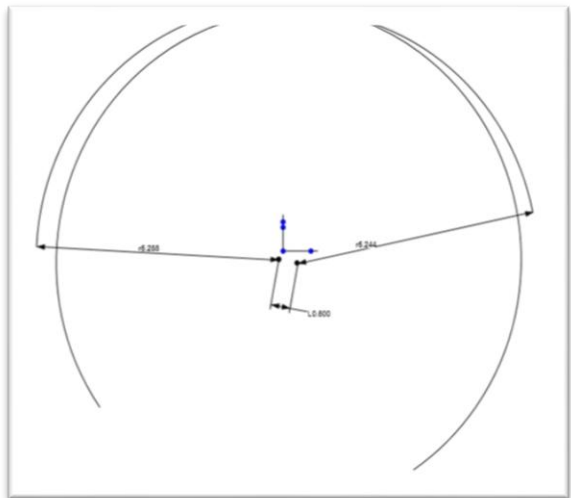
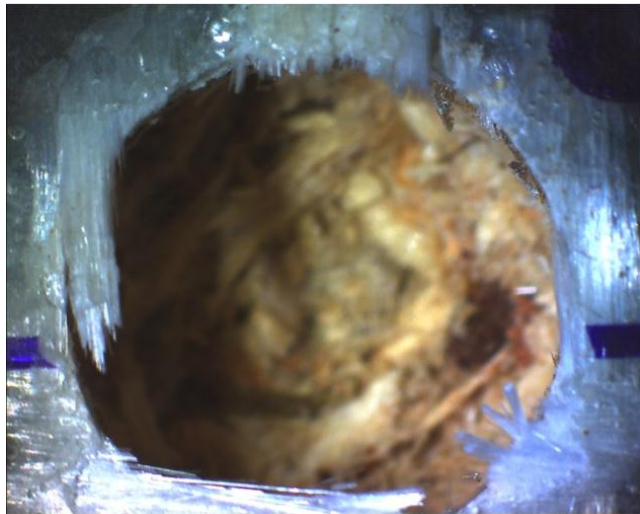
Expérimentation No :7



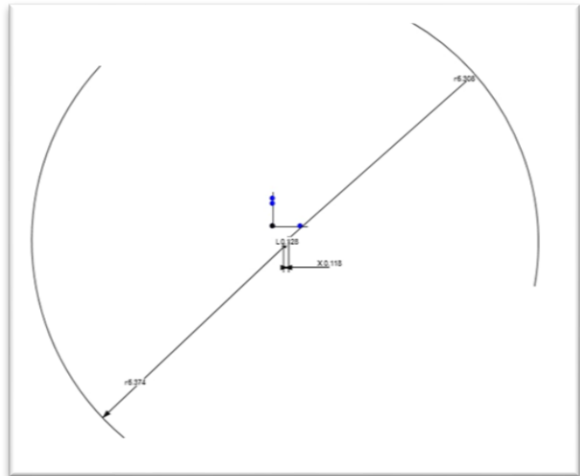
Expérimentation No :8



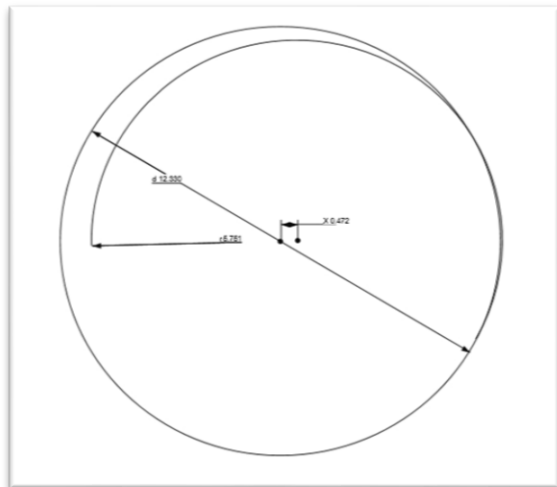
Expérimentation No :9



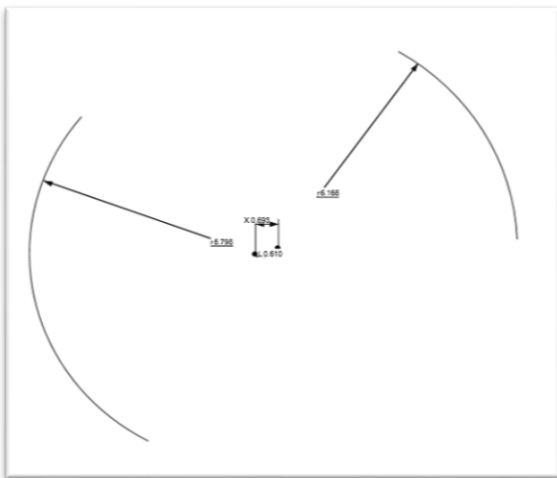
Expérimentation No :10



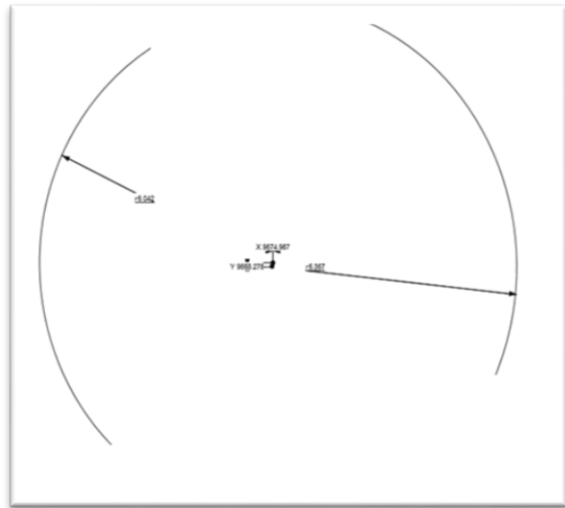
Expérimentation No :11



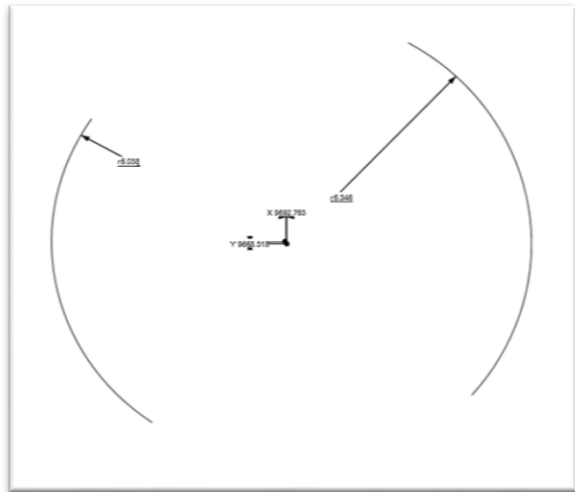
Expérimentation No :12



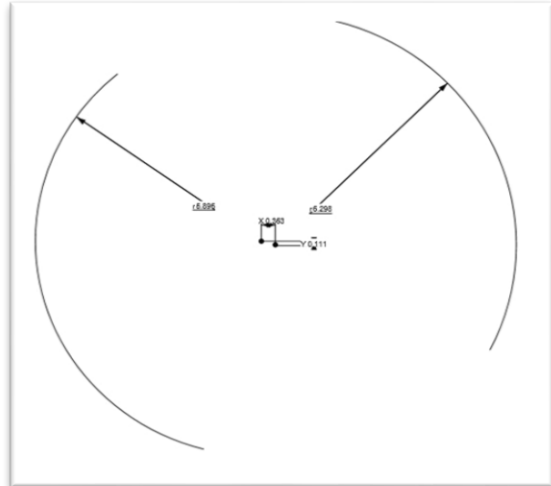
Expérimentation No :13



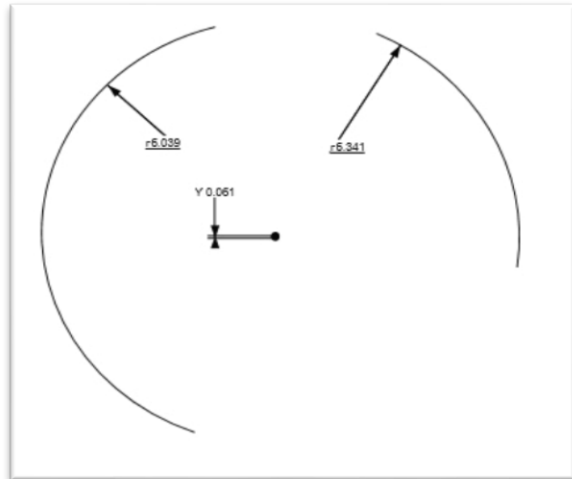
Expérimentation No :14



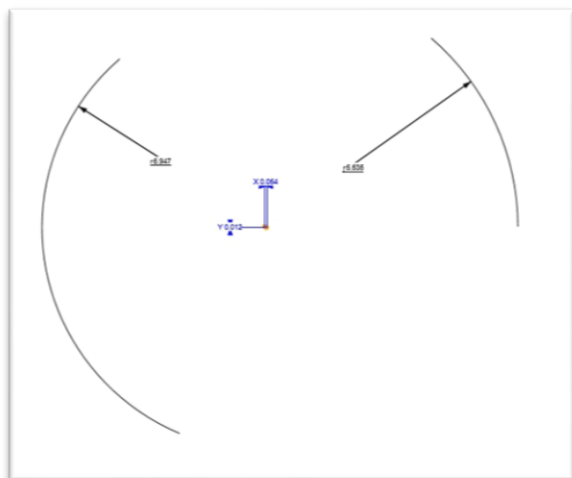
Expérimentation No :15



Expérimentation No :16



Expérimentation No :17



Expérimentation No :18

Figure II.15. : Observation des trous au microscope optique

II.5.2 Interprétation des résultats obtenus

Le calcul de circularité du trou usinée est basé sur la relation ($\Delta r = r_{max} - r_{min}$) pour déterminer la moindre valeur qui indique la meilleure circularité alors choisissez leur régime de coupe le régime le plus convenable.

N° d'essai	N (tr/min)	f (mm/tr)	d mm	Δr (mm)
1	710	0.10	12	0.233
2	710	0.56	12	1.89
3	1400	0.10	12	0.326
4	1400	0.56	12	0.615
5	710	0.2	12	0.191
6	710	0.28	12	0.272
7	710	0.40	12	0.174
8	710	0.56	12	0.177
9	710	0.80	12	0.061
10	710	1.12	12	0.044
11	355	0.10	12	0.066
12	500	0.10	12	0.414
13	1000	0.10	12	0.367
14	1400	0.10	12	0.325
15	2000	0.10	12	0.307
16	90	0.10	12	0.402
17	63	0.10	12	0.302
18	45	0.10	12	0.688

Tableau II.10. : Performances observées pendant l'expérience.

La valeur minimale est l'essai N°10 :

$\Delta r = 0.044$ mm

N=710 tr/min

f= 1.12 mm/min

CHAPITRE III

Analyse des résultats

III. Chapitre III Analyse des résultats

III.1 Introduction

Ce chapitre comprend les résultats expérimentaux. Les données sont tracées et également présentées sous forme de tableau et de méthodes graphiques. Nous présentons une analyse succincte des différents résultats obtenus en utilisant un ensemble d'outils d'analyses (logiciel d'analyse statistique Minitab). Afin d'avoir la relation entre les facteurs de sorties (circularité Δr) et les paramètres de coupe (N et f), formulés ensuite sous forme d'équation mathématique.

III.2 Effet de l'avance (f) sur la circularité

N° d'essai	N (tr/min)	f (mm/tr)	d (mm)	Δr (mm)
5	710	0.2	12	0.191
6	710	0.28	12	0.272
7	710	0.40	12	0.174
8	710	0.56	12	0.177
9	710	0.80	12	0.061
10	710	1.12	12	0.044

Tableau III.1. : Effet de l'avance sur la circularité

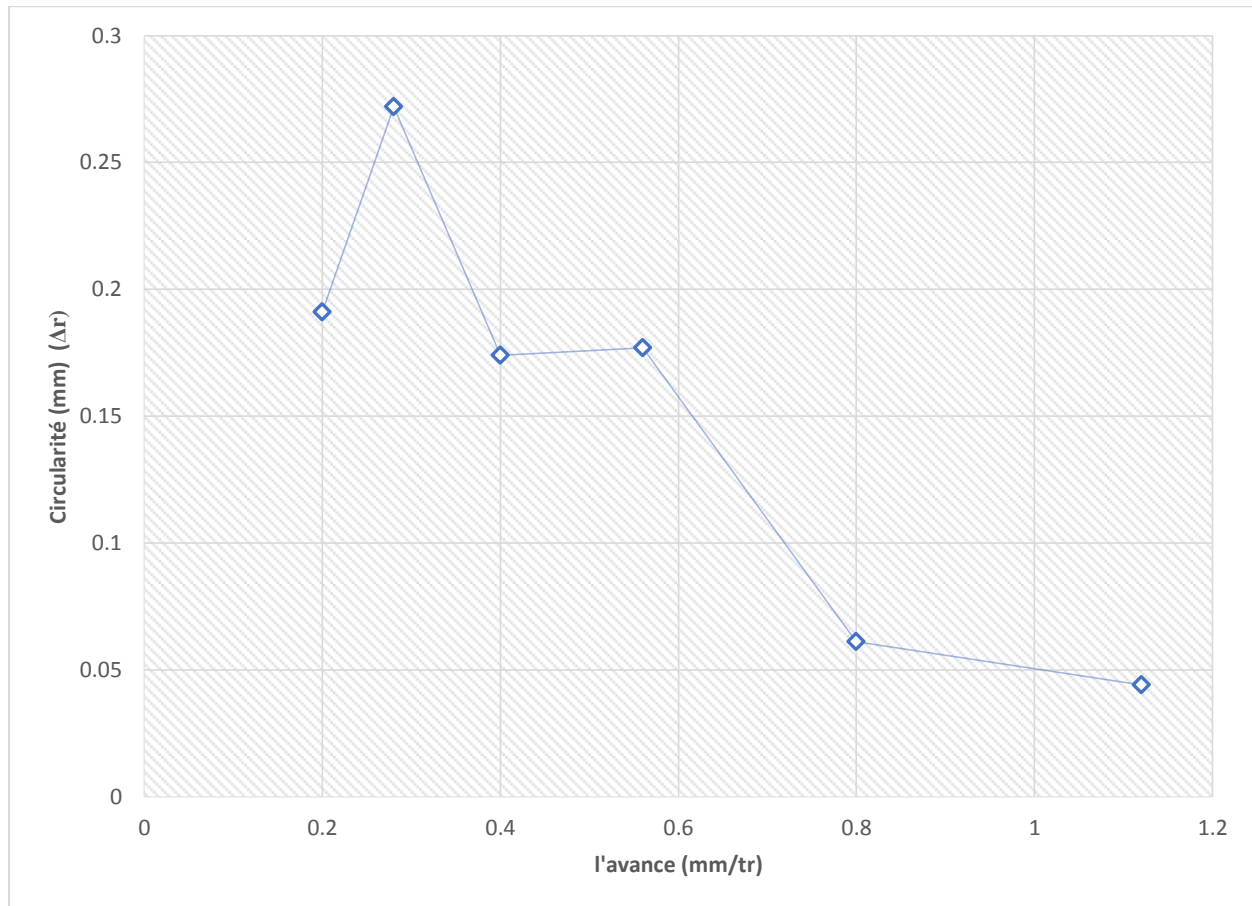


Figure III.1. Influence de l'avance sur la circularité (trou de 5 à 10)

III.3 Effet du nombre de tours (N) sur la circularité

N° d'essai	N (tr/min)	F (mm/tr)	d (mm)	Δr (mm)
11	355	0.10	12	0.066
12	500	0.10	12	0.414
13	1000	0.10	12	0.367
14	1400	0.10	12	0.325
15	2000	0.10	12	0.307
16	90	0.10	12	0.402
17	63	0.10	12	0.302
18	45	0.10	12	0.688

Tableau III.2. : Effet de Le nombre de tours sur la circularité

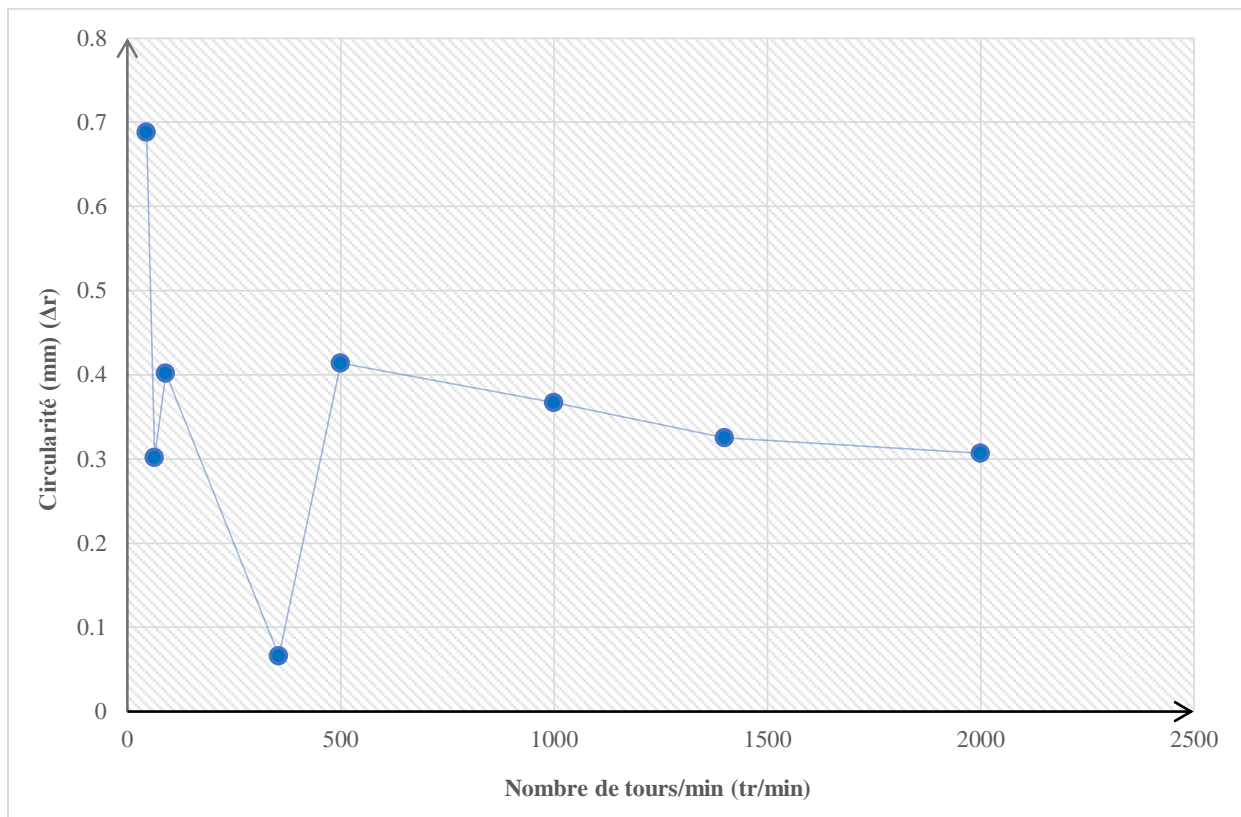


Figure III.2. Influence du nombre de tours sur la circularité (trous de 11 à 18)

III.4 Plan d'expériences

Une application simple est fournie par le plan d'expériences suivant où les calculs peuvent s'effectuer manuellement. On examine l'influence du nombre de tours/min et de l'avance (deux facteurs) sur la circularité (réponse). Le modèle choisi à priori est le suivant :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2$$

Où x_1 et x_2 représentent respectivement les variables codées représentatives des nombres de tours/min et de l'avance.

Le choix des expériences réalisées sera explicité par la suite. On utilise un tableau nommé matrice d'expériences pour récapituler l'ensemble des essais.

La matrice comprend plusieurs colonnes : la première identifie les essais, les suivantes indiquent les états des facteurs exprimés en "unités codés". Chaque colonne étant représentative d'un facteur. La dernière colonne indique les réponses obtenues pour chaque essai. Les lignes inférieures rappellent les valeurs des niveaux en unités naturelles.

N° essai	Avance (mm/tr)	Nombre de tours/min	Circularité (mm)
1	-1	-1	0,233
2	+1	-1	1,89
3	-1	+1	0,326
4	+1	+1	0,615
Niveau – 1	0,10	710	
Niveau + 1	0,56	1400	

Tableau III.3. : Facteurs codés

Le modèle de planification d'expérience adopté prend en compte deux niveaux de variation et deux facteurs selon la matrice suivante :

N° d'essai	Paramètres de régime	
	Avance (mm/tr)	Nombre de tours/min
1	0.10	710
2	0.56	710
3	0.10	1400
4	0.56	1400

Tableau III.4. : Matrice des essais

III.5 Calcul des coefficients

A partir du modèle, on peut écrire les 4 relations suivantes en remplaçant les variables x_1 et x_2 par leurs valeurs dans chaque expérience.

$$y_1 = a_0 + a_1(-1) + a_2(-1) + a_{12}(-1)(-1)$$

$$y_2 = a_0 + a_1(+1) + a_2(-1) + a_{12}(+1)(-1)$$

$$y_3 = a_0 + a_1(-1) + a_2(+1) + a_{12}(-1)(+1)$$

$$y_4 = a_0 + a_1(+1) + a_2(+1) + a_{12}(+1)(+1)$$

$$a_0 - a_1 - a_2 + a_{12} = 0,233$$

$$a_0 + a_1 - a_2 - a_{12} = 1,89$$

$$a_0 - a_1 + a_2 - a_{12} = 0,326$$

$$a_0 + a_1 + a_2 + a_{12} = 0,615$$

Où,

- a_0 est le coefficient constant du modèle ; $a_0 = 1/4 [y_1 + y_2 + y_3 + y_4]$
- a_1 est le coefficient du facteur 1 ; $a_1 = 1/4 [-y_1 + y_2 - y_3 + y_4]$
- a_2 est le coefficient du facteur 2 ; $a_2 = 1/4 [-y_1 - y_2 + y_3 + y_4]$
- a_{12} est le coefficient du terme x_1x_2 . $a_{12} = 1/4 [+y_1 - y_2 - y_3 + y_4]$

La résolution "à la main" fournit les valeurs de coefficients suivants :

$$a_0 = 0,766$$

$$a_1 = 0,4865$$

$$a_2 = -0,2955$$

$$a_{12} = -0,342$$

III.5.1 Les réponses avec les facteurs codés

On introduit les valeurs des coefficients du polynôme dans l'expression du modèle pour trouver la réponse avec les facteurs codés suivants :

$$y(\text{Circularité}) = 0,766 + (0,4865) x_1 + (-0,2955) x_2 + (-0,342)x_1 \cdot x_2$$

Où x_1 et x_2 sont les variables avance et nombre de tours exprimées en variables centrées réduites.

III.5.2 Les réponses avec les unités légales

Après le développement l'équation du modèle et en remplaçant les valeurs de l'avance et du nombre de tours/min dans l'équations relative, on trouve le modèle mathématique de notre expérience :

La Circularité

$$\Delta r = 0,766 + 0,4865.f - 0,2955.N - 0,342.f.N$$

III.6 Effets des paramètres de coupe

III.6.1 L'effet du facteur 1

On se place maintenant au niveau du facteur 2 : pour cela nous donnons la valeur zéro à x_2 et la relation devient :

$$y = a_0 + a_1 x_1$$

$$y^- = 0,28$$

$$y^+ = 1,25$$

$$y \text{ (moyenne)} = 0,765$$

III.6.2 L'effet du facteur 2

On se place maintenant au niveau du facteur 1 : pour cela nous donnons la valeur zéro à x_1 et la relation devient :

$$y = a_0 + a_2 x_2$$

$$y^- = 1,06$$

$$y^+ = 0,47$$

$$y \text{ (moyenne)} = 0,765$$

Nous avons reporté sur la figure III.3 Effets des paramètres de coupe (N et f) sur la circularité.

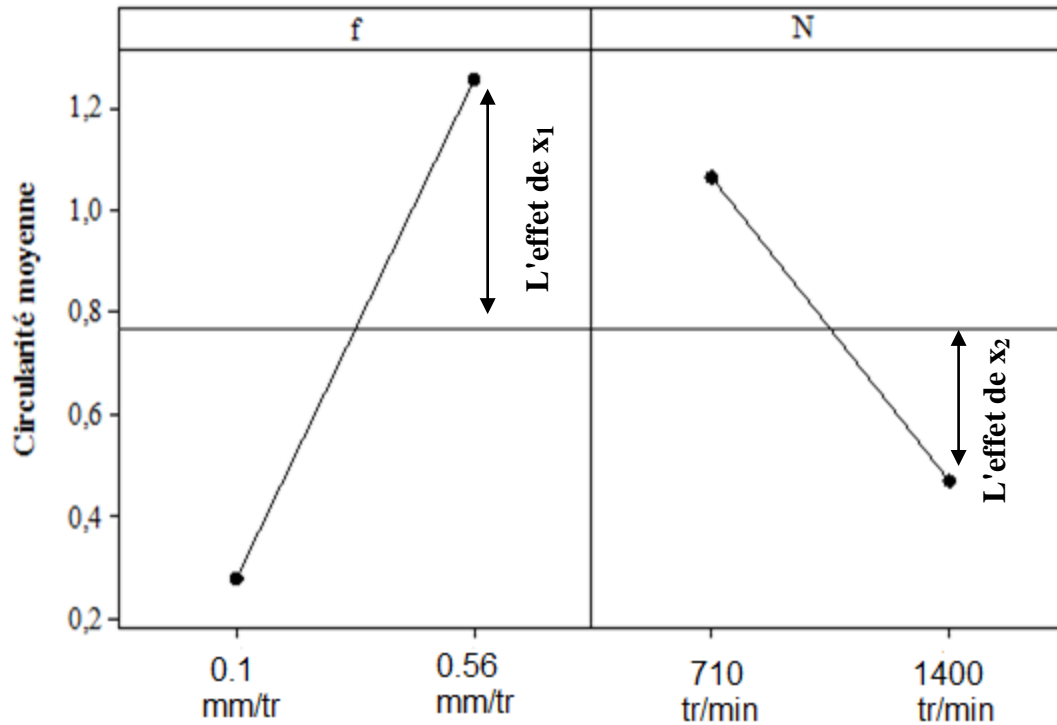


Figure III.3. Effets des paramètres de coupe sur la circularité

III.6.3 Interprétation

L'effet du facteur 1 et 2 apparaît comme la variation de la réponse quand on passe du niveau zéro au niveau haut du facteur 1 ou 2.

Moyenne	0,765
Effet de x_1	0,485
Effet de x_2	-0,295

Tableau III.5. : Tableau des effets.

L'effet de l'avance est de $\Delta r = 0,485$ mm pour une variation de $f = 0,33$ mm/tr (Figure III.3). Il en résulte qu'il faut baisser la vitesse d'avance pour améliorer la circularité.

L'effet du nombre de tours/min est de $\Delta r = -0,295$ mm pour une variation de $N=1055$ tr/min. On peut donc améliorer la circularité en augmentant le nombre de tours/min.

III.7 Effet de l'interaction des paramètres de coupe sur la circularité

Une représentation simple consiste à tracer le graphique des interactions en prenant la moyenne des données pour une condition expérimentale. Les droites du graphique n'étant pas parallèles, on en déduit aussi qu'il y a interaction de l'avance(f) et de nombre de tours/min(N).

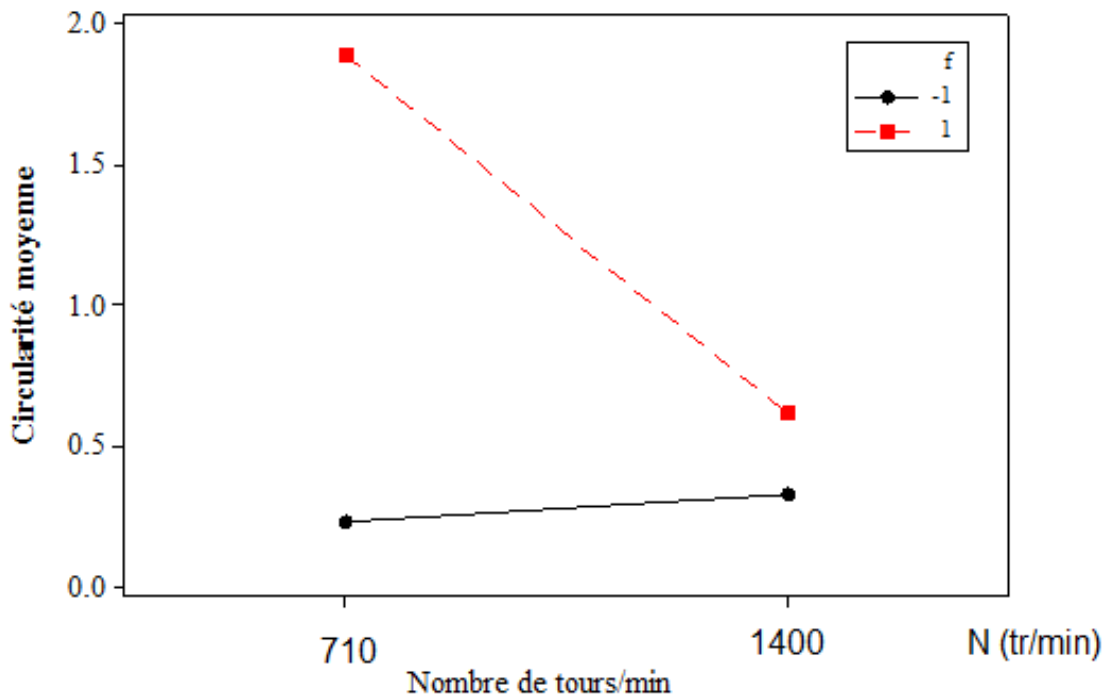


Figure III.4. Effet de l'interaction des paramètres de coupe sur la circularité

III.7.1 Interprétation

La ligne noire représente le niveau de l'avance de 0.1mm/tr. Minitab trace les moyennes de réponse (0.233 ; 0.326) à chaque niveau du nombre de tours/min et les relie avec une ligne noire continue. Cette ligne est presque horizontale et elle indique que la réponse est à peu près la même pour les deux niveaux du nombre de tours/min.

La ligne rouge représente le niveau de l'avance de 0.56 mm/tr. Minitab trace les moyennes de réponse (1.89 ; 0.615) à chaque niveau du nombre de tours/min et les relie avec une ligne rouge continue. Cette ligne diminue au fur et à mesure que le nombre de tours/min augmente, indiquant que la réponse diminue avec l'augmentation du nombre de tours.

Ainsi, le changement en réponse diffère selon les niveaux du nombre de tours/min en fonction du niveau d'avance : les deux facteurs semblent interagir.

III.8 Notion de surface 3D de réponse

Les niveaux x_i représentent les coordonnées d'un point expérimental et y est la valeur de la réponse en ce point. On définit un axe orthogonal à l'espace expérimental et on l'attribue à la réponse. La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. Un plan à deux facteurs utilise un espace à trois dimensions pour être représenté : une dimension pour la réponse, deux dimensions pour les facteurs.

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse.

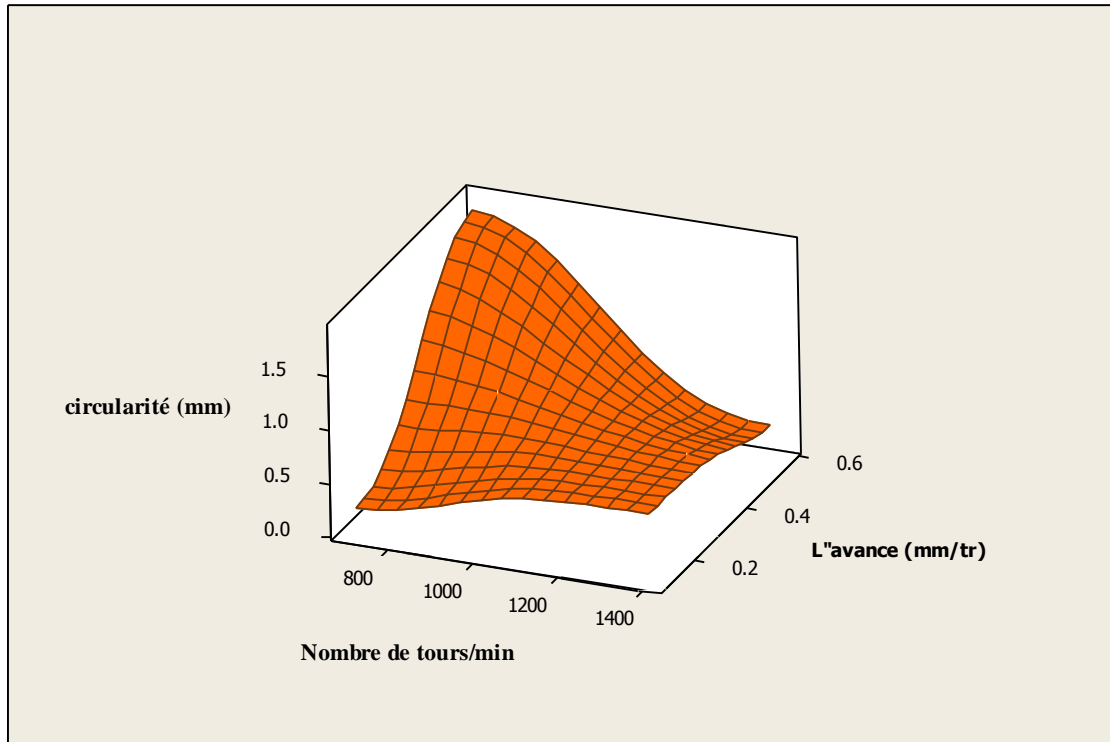


Figure III.5. Influence de la vitesse d'avance et du nombre de tours sur la circularité

La figure III.5 permet d'évaluer l'influence simultanée de (N et f) sur la circularité (Δr). La surface 3D de réponse montre que l'usinage avec une petite vitesse d'avance ($f=0.10$ mm/tr) entraîne une faible valeur de circularité quelque que soit le nombre de tours/min. Les valeurs de circularité les plus élevées sont obtenues avec la plus grande vitesse d'avance ($f = 0.56$ mm/tr) et un petit nombre de tours/min ($N=710$ tr/min) dans le cas testé.

Conclusion générale

L'objectif principal de cette étude a été orientée pour voir l'influence des régimes de coupe sur la qualité (circularité Δr) des trous usinés. Notre étude a été menée en s'appuyant sur une recherche bibliographique qui met en évidence, les éléments constitutifs des matériaux composites et l'élaboration des matériaux composites et un aperçu sur l'état de l'art dans l'usinage des matériaux composite. Une introduction sur le perçage des matériaux composites a été exposée ainsi qu'une présentation sur la qualité de surface et défauts d'usinage liés au perçage de matériaux composites.

Les résultats obtenus dans ce travail reposent sur des essais expérimentaux obtenus suite à des opérations de perçage d'une plaque stratifiée en matériau composite dont l'épaisseur est de 3 mm. Différents trous ont été percés par un foret en acier rapide de diamètre 12 mm en faisant varier deux paramètres du régime de coupe (N, f). Ainsi, pour avoir une meilleure optimisation de ces facteurs de coupe dont l'influence est impérativement ressentie sur la qualité des trous percés en termes de circularité (Δr) ; on a eu recours à l'utilisation de la méthode factorielle des plans d'expérience. Le plan d'expérience, pour notre cas, est 2^2 à l'aide duquel on a élaboré un modèle mathématique qui a permis de prédire les meilleures réponses (Δr) en vue d'optimiser le régime de coupe le plus adapté et ce avec un minimum d'essais.

L'élaboration de ce modèle empirique et la combinaison des deux paramètres (N, f) pris en considération sont obtenues par l'exploitation du Logiciel Minitab. Ce dernier montre que l'usinage avec une petite vitesse d'avance ($f=0.10$ mm/tr) entraîne une faible valeur de circularité (Δr) quel que soit le nombre de tours/min.

Références bibliographiques

- [1] Daniel Ilescu, thèse, Approches expérimentale et numérique de l'usinage à sec des composites carbone/époxy.
- [2] Paolo Vannucci. Matériaux composites structuraux : Méthodes d'analyse et de conception Master. France. 2007. <cel-01529026>.
- [3] DJEBLOUN Youcef, mémoire de fin d'étude.
- [4] Jean-Marie Berthelot « Matériaux composites comportement mécanique et analyse Des structures ».
- [5] S. Abrate, Article · January 1997, Southern Illinois University Carbondale.
- [6] Prof. Rafic Younes. « Matériaux composites. ».
- [7] Cours DSME 2007, sur « la mécanique des matériaux composites et les stratifiés ».
- [8] Glossaire des Matériaux Composites. Centre d'Animation Régional en Matériau Actives -CARMA -.
- [9] Ecole centrale Nantes, laboratoire matériaux, P. GUEGAN, F. LE MAITRE, J.C. HAMANN.
- [10] Nadia BAHLOULI, Cours Matériaux Composites / DESS Mécanique avancée et Stratégie industrielle.
- [11] <https://www.gralon.net/articles/materiel-et-consommables/materiels-industriels/article-la-fibre-de-verre>.
- [12] CARMA « Glossaire des matériaux composites » Actualisation octobre 2006.
- [13] Philippe TRIBOULET (Lycée Niepce – Chalon sur Saône) 09/09/2008.
- [14] Jean-Claude CHAUVEAU et Jean-Paul CHASSAING, introduction à la méthode des plans d'expériences par la méthode Taguchi.
- [15] BEY. K, cours sur l'usinage des matériaux composites.