

People's Democratic Republic of Algeria  
Ministry of Higher Education and Scientific Research  
Mohamed Boudiaf University of M'sila  
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة المسيلة  
كلية التكنولوجيا

---

**Département de Génie Mécanique**  
**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE**

En vue de l'obtention du diplôme de :

**MASTER**

**En Génie Mécanique**

**Option : Fabrication mécanique et productique**

**Présenté par : Mohammed Amin Khemissa**

**Thème**

---

**Effet de l'ajout de nanoparticules sur la qualité du perçage**

Devant le jury composé de :

<b>NOM et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
ZAOUI Moussa	Pr	Président
SLAMANI Mohamed	Pr	Encadreur
GRINE Madani	Dr	Co- Encadreur
GHADBANE Tahar	MCA	Examineur

*Année Universitaire : 2024/2025*

## ***Remerciements***

*Je remercie Dieu, le tout puissant, qui m'a donné la force et le courage pour poursuivre mes études. De m'avoir inspirée pour mettre entre vos mains ce modeste travail.*

*Toute ma profonde gratitude et ma reconnaissance à mon encadreur principal, Prof. Mohammed Slamani, pour son aide et le soutien inestimable qu'il m'a apportés tout au long de ce travail de recherche. Je le remercie pour son humanisme, ses précieux conseils et ses encouragements constants. Ce fut un immense plaisir de travailler sous sa direction.*

*Je tiens également à exprimer ma sincère gratitude à mon co-encadreur, Dr. Madani Grine, pour ses orientations éclairées, sa disponibilité et ses remarques constructives qui ont grandement enrichi ce travail. Son expertise a été d'une aide précieuse à chaque étape de cette recherche. Je remercie également aux membres de jury d'avoir accepté de juger ce modeste travail de recherche.*

*Je tiens à remercier aussi, tous les enseignants du département de français qui ont contribué à ma formation.*





## *Dédicace*

*Tout d'abord merci à Dieu de nous avoir donné la force pour terminer ce travail*

*Nous voudrions bien prouver nos gratitude envers eux qui, de loin ou de près nous ont supportés tant matériellement que moralement*

*Ainsi pour dédions ce travail*

*A nos grands-parents ont mis en corde de dieu, qui nous a souhaité bonne chance dans notre vie*

*A nos chers parents à qui nous devons tout qu'ils puissent trouver dans ce travail l'expression de nos profondes gratitude et effectuions pour toute la patience et l'endurance qu'ils ont consenties pour nous*

*A nos frères et nos sœurs à qui nous souhaitons une bonne chance dans leurs vies*

*A nos amis avec qui nous avons partagé des bons moments*



# Liste des figures

Fig. I-1. Principaux familles des matrices [24] .....	9
Figure I-2. Organigramme des différents types de renfort .....	14
Figure III-3. Préparation du moule .....	24
Figure III-4. Résine époxy et durcisseur .....	25
Figure III-5. Empilement de couches .....	26
<b>Figure III-6:</b> Étape de pressage sur une presse hydraulique .....	27
Figure III-7. Plaque composite de référence (0 % alumine).....	28
Figure III-8. Plaque composite renforcée (10 % alumine) .....	28
Figure III-9. Instruments utilisés pendant le procédé de perçage .....	29
Figure IV-10. Influence de l'avance par tour sur l'effort de perçage pour le composite sans alumine (référence à 0 %).....	34
<b>Figure IV-11.</b> Variation de l'effort de perçage selon l'avance par tour pour le composite renforcé avec 10 % d'alumine.....	35
Figure IV-12. Impact de la vitesse de rotation sur l'effort de perçage pour le composite sans alumine (référence à 0 %).....	36
Figure IV-13. Variation de l'effort de perçage selon l'avance par tour pour le composite renforcé avec 10 % d'alumine.....	37
Figure IV-14. Superposition comparative des efforts de coupe selon la vitesse de rotation et l'avance pour les deux matériaux .....	38
Figure IV-15. Influence de l'avance par tour sur la température de perçage pour le composite sans alumine (référence à 0 %).....	39
Figure IV-16. Variation de la température de perçage selon l'avance par tour pour le composite renforcé avec 10 % d'alumine. ....	40
Figure IV-17. Impact de la vitesse de rotation sur la température de perçage pour le composite sans alumine (référence à 0 %).....	41
Figure IV-18. Variation de la température de perçage selon l'avance par tour pour le composite renforcé avec 10 % d'alumine. ....	42
Figure IV-19. Superposition comparative des températures selon la vitesse de rotation et l'avance pour les deux matériaux.....	43
Figure IV-20. Visualisation comparative de la qualité de perçage selon la teneur en $Al_2 O_3$ .....	44
Figure IV-21. État de surface du trou percé a 500 tr/min et 0.12 mm/tr .....	45

# Listes des tableaux

<b>Tableau III-1 :</b> Plan d'Expérience Factoriel Complet pour l'Étude des Combinaisons de Paramètres de Coupe.....	30
--	----

# Sommaire

Remerciements

Dédicace

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction generale..... 1

## **chapitre I: Généralité sur les matériaux composites**

I.1.introduction ..... **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

I.2.historique : ..... 6

I.2.definition de materiaux composites : ..... 6

I.3. Domaines d'application des materiaux composites : ..... 7

I.4.classification des materiaux composites : ..... 8

I.5.constitution des materiaux composites : ..... 9

I.6. Les renforts : ..... 13

## **chapitre II: USINAGE DES MATÉRIAUX COMPOSITE**

II.1.introduction..... **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

II.2.usinage des materiaux composites : parametres de coupe, outils et additifs ..... 18

II.3.évaluation des parametres de coupe pour le fraisage et le perçage des composites ..... 18

II.4.le role des additifs : cas des cires et du graphene ..... 19

II.5.usinage des frp : comportement specifique et choix des outils ..... 19

II.6.influence des additifs sur la qualite de surface ..... 20

II.7.defauts typiques lors du perçage de composites a fibres naturelles..... 20

## **chapitre III:Méthodologie Expérimentale**

III.1. Introduction : ..... 23

III.2.methodologie de fabrication des composites jute-époxy renforces aux nanoparticules  
d'alumine..... 23

III.3.mesure des efforts de coupe verticaux en perçage : ..... 28

III.4.procedure expérimentale détaillée (doe) ..... 31

## **chapitre IV: Résultats et discussion**

IV.1.introduction: .....	34
IV.2. Effet de l'avance par tour sur l'effort de perçage .....	34
IV.3. Effet de la vitesse de rotation .....	36
IV.4.analyse de la temperature .....	39
IV.5. Analyse de la qualite des trous perces .....	43
Conclusion :.....	47

Référence bibliographique

résumé

Abstract

# ***INTRODUCTION GENERALE***

## **Introduction générale**

A L'essor des matériaux composites à fibres naturelles constitue une réponse stratégique aux enjeux actuels de durabilité, d'écoconception et de réduction de l'empreinte environnementale. Parmi ces matériaux, les composites hybrides associant des fibres végétales à une matrice polymère se distinguent par leur légèreté, leur faible coût, leur renouvelabilité et leur biodégradabilité. En particulier, les fibres de jute, abondamment disponibles et largement exploitées dans l'industrie textile, offrent un bon compromis entre résistance mécanique, coût et impact environnemental réduit.

Cependant, les propriétés intrinsèques des composites à fibres de jute peuvent être encore optimisées par l'incorporation de renforts à l'échelle nanométrique, comme les nanoparticules d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Ces nanoparticules présentent une grande dureté, une stabilité thermique élevée et des caractéristiques mécaniques intéressantes qui permettent d'améliorer la performance globale du composite, notamment sa rigidité, sa résistance à l'usure et sa stabilité dimensionnelle. Ainsi, le développement de nano-composites hybrides à base de jute et d'alumine permet d'obtenir des matériaux innovants, adaptés à des applications industrielles de plus en plus exigeantes.

Dans cette étude, deux plaques ont été fabriquées dans le but de comparer leur comportement à l'usinage : une première constituée uniquement de jute/époxy (0 % d' $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) utilisée comme référence, et une seconde renforcée avec 10 % de nanoparticules d'alumine, réparties uniformément dans la matrice époxy. Cette configuration permet d'analyser l'effet de l'ajout d'alumine sur les mécanismes d'endommagement induits lors des opérations de perçage, qui sont représentatives de nombreuses étapes de fabrication.

### **Contexte**

L'usinage des composites à fibres naturelles présente des enjeux spécifiques liés à l'hétérogénéité des matériaux et à la nature même des renforts végétaux. Bien que l'intégration des fibres de jute dans les matrices polymères permette de développer des matériaux plus verts et plus compétitifs, leur comportement à l'usinage reste encore mal maîtrisé. De plus, l'introduction de nanoparticules comme l'alumine vient modifier les interactions microstructurales entre la matrice et les fibres, ce qui peut avoir des effets contrastés sur la qualité d'usinage.

Le perçage, en tant qu'opération d'usinage courante dans l'assemblage de pièces composites, constitue une étape critique dans la chaîne de fabrication. Il est particulièrement

sensible aux défauts tels que le délaminage, l'arrachement des fibres, le peluchage ou encore la dégradation thermique de la matrice. Ces défauts peuvent altérer la qualité géométrique des trous, compromettre la solidité des assemblages et provoquer une défaillance prématurée en service.

L'étude de l'usinabilité des composites jute/époxy, avec et sans renforts en alumine, permet de mieux comprendre l'impact des nanocharges sur la génération de ces défauts et sur les performances mécaniques post-usinage. Elle s'inscrit dans une logique d'optimisation de la fabrication et de maîtrise des propriétés finales des composants, notamment pour des secteurs tels que l'automobile, l'aéronautique ou les équipements industriels, où les tolérances dimensionnelles et la qualité de surface sont des critères essentiels.

### **Problématique**

Malgré l'intérêt croissant pour les composites à base de fibres naturelles et leur renforcement par des nanocharges, plusieurs défis majeurs persistent lors des opérations d'usinage. Les interactions complexes entre la matrice, les fibres de jute et les nanoparticules d'alumine peuvent générer une diversité de mécanismes d'endommagement localisés.

Les principaux défauts rencontrés sont :

- Le délaminage, dû aux efforts d'avance excessifs ou à une mauvaise répartition des contraintes, qui provoque la séparation des couches du composite.
- L'arrachement des fibres, lié à une mauvaise cohésion fibre-matrice ou à des angles de coupe inadaptés, entraînant une détérioration de la surface usinée.
- Le peluchage, qui se manifeste par le soulèvement partiel des fibres, affectant l'aspect et la fonctionnalité de la pièce.
- La dégradation thermique de la matrice, souvent causée par une friction excessive ou un échauffement mal contrôlé, ce qui affaiblit les zones usinées.

Ces défauts réduisent non seulement la qualité géométrique des trous percés, mais aussi la durabilité structurelle du composite. L'ajout de nanoparticules d'alumine, bien qu'avantageux sur le plan mécanique, peut également accroître la dureté globale du matériau, rendant l'usinage plus complexe et susceptible d'accélérer l'usure des outils.

Il est donc indispensable de caractériser finement l'impact de ces paramètres sur le comportement à l'usinage des composites jute/époxy, en présence ou non d' $\text{Al}_2\text{O}_3$ , afin de développer des stratégies d'usinage adaptées.

### **Objectifs**

L'objectif principal de cette recherche est de comparer l'usinabilité de deux composites :

1. Un composite jute/époxy sans nanoparticules (0 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), servant de matériau de référence.
2. Un composite jute/époxy renforcé avec 10 % de nanoparticules d'alumine, permettant d'évaluer l'influence des nanocharges sur le comportement à l'usinage.

Les objectifs spécifiques de cette étude sont les suivants :

- Analyser les types de défauts d'usinage (délaminage, arrachement, peluchage, dégradation thermique) en fonction des caractéristiques des matériaux.
- Identifier les conditions de coupe optimales (vitesse, avance, outil) permettant de réduire l'apparition des défauts.
- Comparer la qualité géométrique et l'état de surface des trous réalisés dans chaque type de composite.
- Évaluer l'influence des nanoparticules d'alumine sur la résistance à l'usinage, la stabilité dimensionnelle et la sensibilité aux défauts.
- Proposer des recommandations pour l'usinage efficace de ces composites dans un cadre industriel, en tenant compte des performances, de la durabilité des outils, et de la qualité des pièces finies.

À terme, cette étude vise à faciliter l'intégration de matériaux composites renforcés par des nanoparticules dans des procédés industriels, en fournissant des données fiables et des lignes directrices sur leur comportement à l'usinage.



***CHAPITRE I***  
***GENERALITES SUR LES MATERIAUX***  
***COMPOSITES***

**I.1.Historique :**

De nombreuses recherches antérieures ont démontré que les fibres naturelles sont une excellente alternative aux fibres synthétiques utilisées dans les matériaux composites. Depuis plusieurs années, l'intérêt pour l'utilisation des renforts fibreux en général est grandissant en raison de raisons économiques et environnementales.

Toutefois, l'emploi des fibres naturelles comporte un désavantage considérable en raison de leur tendance à être hydrophiles. Par conséquent, il est possible que les matériaux composites se vieillissent en raison de la diffusion des molécules d'eau, ce qui entraîne un effet de gonflement. En outre, il y a un manque d'adhérence entre les fibres naturelles et la matrice. [4]

Il n'est pas nouveau d'utiliser des fibres naturelles comme renfort de polymère. En 1912, George Ellison invente le tufnol, un composite utilisé pour fabriquer des isolants électriques en imprégnant des fibres de coton dans la Bakélite (résine phénolique). En 1937, De Bruyne substitue les fibres de coton par celles de lin afin de produire des composites pour les aéronefs.

Gordon aérolite, le matériau développé, a été employé pour la construction d'un longeron d'aile de 09 mètres de longueur et d'éléments de fuselage d'avion, avec la forme d'un pré-imprégné unidirectionnel lin/phénolique.

On effectue la mise en place en instaurant un cycle de température sous pression. Les performances spécifiques mécaniques (relation entre la résistance (ou la rigidité) et la masse) ont été plus élevées que celles des autres matériaux disponibles [5, 6].

En 2012, ces nouveaux matériaux suscitent un vif intérêt sur les marchés du transport et du bâtiment. Afin d'atteindre cet objectif, 352 000 tonnes de CRFN ont été produites, étant donné que cette quantité devrait au moins tripler pour atteindre entre 600 et 1000 tonnes d'ici l'an 2020. [7]

**I.2.Définition de matériaux composites :**

Un matériau composite est constitué de différentes phases nommées renforts et matrice.

Lorsque le matériau composite est non endommagé, les renforts et la matrice sont parfaitement liés et il ne peut pas y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases. Les renforts se présentent sous forme de fibres continues ou discontinues. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La matrice assure quant à elle la cohésion entre

les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure. [8, 9]

### **I.3. Domaines d'application des matériaux composites :**

Les matériaux composites sont largement utilisés dans de nombreuses applications en raison de leurs propriétés uniques et de leurs avantages spécifiques. Voici quelques-unes des principales applications des matériaux composites :

- **Industrie aérospatiale** : Les composites sont utilisés dans la construction d'aéronefs pour réduire le poids tout en maintenant la résistance et la durabilité. Ils sont utilisés dans les fuselages, les ailes, les empennages et d'autres composants structurels. [10]
- **Automobile** : Les composites sont utilisés dans l'industrie automobile pour réduire le poids des véhicules et améliorer l'efficacité énergétique. Ils sont utilisés dans les panneaux de carrosserie, les châssis, les sièges et d'autres composants pour améliorer la performance et la sécurité [11].
- **Construction** : Les composites sont utilisés dans la construction pour leur légèreté, leur résistance et leur durabilité. Ils sont utilisés dans les ponts, les bâtiments, les revêtements de sol, les canalisations et d'autres applications pour améliorer la résistance aux intempéries, la résistance à la corrosion et la durée de vie. [12]
- **Sport et loisirs** : Les composites sont largement utilisés dans l'industrie du sport et des loisirs pour leur légèreté, leur résistance et leur flexibilité. Ils sont utilisés dans la fabrication de raquettes de tennis, de clubs de golf, de planches de surf, de skis, de vélos et d'autres équipements sportifs. [13]
- **Énergie éolienne** : Les composites sont utilisés dans la fabrication de pales d'éoliennes pour leur légèreté, leur résistance et leur durabilité. Ils permettent de produire des pales plus longues et plus efficaces pour capturer l'énergie éolienne [14].
- **Industrie marine** : Les composites sont utilisés dans la construction navale pour leur résistance à la corrosion, leur légèreté et leur durabilité. Ils sont utilisés dans les coques de bateaux, les ponts, les mâts et autres composants pour améliorer la performance et la longévité. [15]

• **Électrique et électronique** : Les composites sont utilisés dans la fabrication de boîtiers et de composants électroniques pour leur isolation électrique, leur résistance à la chaleur et leur légèreté. [16]

#### **I.4. Classification des matériaux composites :**

Les matériaux composites peuvent être classés en fonction de leur nature, de leur structure, de leur mode de fabrication et de leurs propriétés. Voici une classification générale basée sur la nature des matériaux :

**Composites à matrice polymérique** : Les renforts sont composés de polymères tels que la résine époxy, le polyester ou le polypropylène, qui servent de matrice pour les renforts. Ils présentent une bonne résistance chimique, une légèreté et une facilité de fabrication, mais ils peuvent être sensibles à la température [17].

**Composites à matrice métallique** : Les renforts sont fabriqués à partir de métaux comme l'aluminium, le magnésium ou le titane. Bien qu'ils offrent une résistance élevée et une conductivité électrique élevées, ils peuvent être corrodés. [18]

**Composites à matrice céramique** : Les renforts sont composés de céramiques telles que le carbure de silicium, l'oxyde d'aluminium ou le nitrure de silicium, qui servent de matrice pour les renforts. Les produits sont très résistants à la chaleur et à l'usure, mais ils peuvent être fragiles et difficiles à fabriquer. [19]

**Composites à matrice hybride** : Les matrices sont composées de deux ou plusieurs types de matrices, souvent utilisées pour combiner les avantages des différentes matrices. Un composite à matrice hybride peut utiliser une combinaison de polymères et de métaux pour obtenir des propriétés spécifiques [20].

**Composites à renforts naturels** : Il est composé de fibres naturelles comme le bois, le bambou, l'alfa ou la jute . Ils ont une bonne résistance, une légèreté et une durabilité, mais peuvent être sensibles à l'humidité [21].

**Composites à renforts synthétiques** : Les renforts synthétiques tels que les fibres de carbone, de verre ou de kevlar peuvent être utilisés. Bien qu'ils offrent une résistance élevée, une faible densité et une grande rigidité, leur production peut être coûteuse. [22]

## I.5. Constitution des matériaux composites :

### Matrice :

Dans les composites, le terme « matrice » fait référence au matériau solide qui entoure le renfort en une masse compacte. Le rôle principal de la matrice est de maintenir le renfort sous une forme compacte et de donner au produit final la forme souhaitée. Il protège également les fibres de l'abrasion et des environnements agressifs, contrôle l'état de surface et assure le transfert de charge entre les fibres. Les solides formant la matrice peuvent être d'origine métallique, céramique ou polymère [22].

### Matrices organiques :

Le principal objectif de la matrice est de transférer les efforts mécaniques au renfort. Elle garantit la protection du renfort contre les conditions environnementales et permet de conserver le produit fini dans sa forme souhaitée. On peut citer les deux principaux types de matrices utilisés dans les composites à matrices organiques [23].

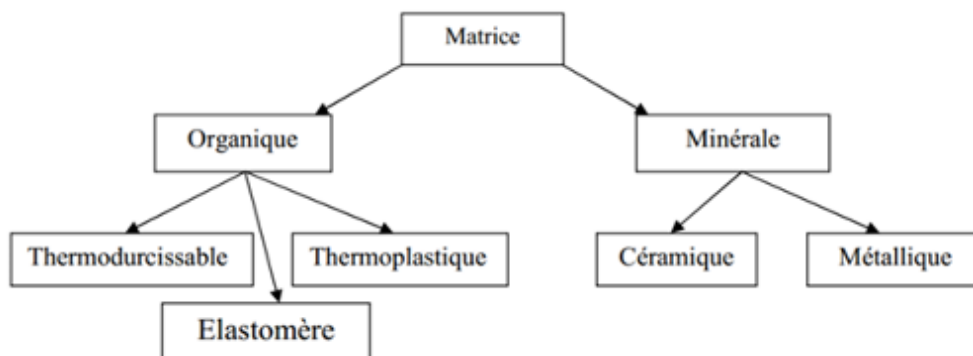


Fig. I-1. Principaux familles des matrices [24]

### Matrices thermodurcissables (TD)

Les résines thermodurcissables possèdent des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être moulées qu'une seule fois. Ceux-ci se présentent sous forme de polymères non réticulés dissous dans un solvant. Le matériau le plus efficace possède des propriétés mécaniques élevées et une faible densité [26]. Les résines thermodurcissables ont l'avantage d'être pâteuses à température ambiante, ce qui les rend plus faciles à manipuler dans la fabrication des composites. Cependant, les matériaux thermo durcis deviennent infusibles et insolubles après polymérisation, ils ne peuvent donc être moulés qu'une seule fois. Pour cette raison, il n'est pas possible de recycler le sous forme de matière première, mais il est possible

par exemple de réintégrer le broyé dans de nouveaux matériaux composites sous forme de charges. D'Après [27], les résines thermodurcissables principalement sont :

### **Polyesters insaturés:**

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 [28]

Il existe différents types de résines

- Ortho phtalique : la plus courante.
- Iso phtalique : qui donne une meilleure tenue à l'humidité.
- Chlorée : apportant une auto-exigibilité.
- Bisphénol : possédant de bonnes caractéristiques chimiques et thermiques.

### **➤ Epoxydes**

Ils sont principalement utilisés pour les composites performants. Les propriétés mécaniques, thermiques (130 à 180°C) et chimiques sont excellentes. Cependant, elles sont coûteuses et sensibles à l'humidité et aux rayons UV [29].

### **➤ Polyuréthanes et polyurées**

Ce type de formule est principalement utilisé dans la fabrication de pièces composites, car les formules astrométriques ont une faible viscosité, ce qui permet un bon remplissage du moule [30].

### **➤ Vinylesers**

Développées à partir d'acides acryliques, ces résines offrent une alternative performante aux polyesters. Malgré leur inflammabilité, elles présentent d'excellentes caractéristiques : tenue remarquable à la fatigue et résistance supérieure à la corrosion [31].

#### ➤ **Phénoliques**

Bien que les polyesters et les résines époxy gagnent en popularité, les résines phénoliques conservent une place prépondérante dans les applications à haute température grâce à leur excellente résistance au feu. Néanmoins, leur utilisation reste limitée en raison de leur fragilité importante et de leurs performances mécaniques relativement faibles [13].

#### ➤ **Polyimides**

Ces résines hautes performances (HP) sont particulièrement appréciées pour leur excellente stabilité thermique, même au-delà de 250 °C. Toutefois, leur coût élevé et leur mise en œuvre complexe limitent leur utilisation dans certaines applications [17].

#### ➤ **Bismaléimides**

Ces matériaux polymères, encore marginaux sur le marché européen, combinent deux avantages clés : une tenue thermique supérieure et une bonne résilience aux impacts. Leur procédé de transformation complexe explique cependant leur utilisation restreinte [32].

### **b) Les matrices thermoplastiques**

Les chaînes polymères qui sont reliées entre elles par de faibles tensions sont appelées thermoplastiques. Ils peuvent être recyclés et ont au moins un solvant. Les matériaux thermoplastiques. En raison de leur facilité de production, ils représentent le plus grand tonnage en termes de production. Facile à utiliser et peu coûteux, les polymères utilisés sont principalement des thermoplastiques techniques qui présentent de bonnes caractéristiques mécaniques à l'état vierge. Un appui supplémentaire à Les fibres courtes améliore leur tenue thermique et mécanique et leur stabilité dimensionnelle [33].

Les principales matrices thermoplastiques sont les suivantes :

- ❖ Polyamide (PA) : tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures.
- ❖ Téréphtalate éthylénique et butylénique (PET, PBT) : bonne rigidité, bonne ténacité.

- ❖ Polycarbonate (PC) : tenue au choc.
- ❖ Polysulfure de phénylène (PPS) : résistance à l'hydrolyse.
- ❖ Polyoxy méthylène (POM) : bonne tenue à la fatigue.
- ❖ Poly Polysulfures (PSU et PPS) : bonne stabilité chimique et à l'hydrolyse, peu de fluage, tenue au chaud.
- ❖ Polypropylène (PP) : peu onéreux et assez stable en température, mais combustible.

De plus en plus, on utilise des thermoplastiques thermostables (tenue en température > 200 °C et bonnes propriétés mécaniques), en particulier les suivants :

- ❖ Polyamide-imide (PAI).
- ❖ Polyéther-imide (PEI).
- ❖ Polyéther-sulfone (PES).
- ❖ Polyéther-éther-cétone (PEEK).
- ❖ Polysulfures (PSU et PPS) : bonne stabilité chimique et à l'hydrolyse, peu de fluage, tenue au chaud.
- ❖ Polypropylène (PP) : peu onéreux et assez stable en température, mais combustible.

### **c) Les élastomères**

Les polymères, qu'ils soient naturels ou synthétiques, ont une structure unique qui leur confère une élasticité significative (jusqu'à 500% par rapport à la taille initiale). Les élastomères tels que les silicones d'élastomères, les polyuréthanes, le néoprène, le latex, etc [34].

### **-Matrices minérales :**

#### **a) Matrice métallique**

Les matrices métalliques sont encore largement utilisées. Des matériaux composites tels que l'aluminium et ses composants les alliages, tels que le nickel et le titane, ont une excellente

conductibilité électrique et thermique, sont très résistants aux températures élevées et ont également de bons traits mécaniques transversaux. Leur production coûte très cher [35].

#### **b) Matrices céramiques :**

Le silicium et le carbure sont utilisés comme matériaux. Très cher car utilisé pour fabriquer des pièces soumises à des contraintes thermiques [36]

#### **-Le rôle de la matrice :**

La matrice a pour rôle de :

- ✓ Lier les fibres de renforts.
- ✓ Répartir les contraintes.
- ✓ Apporter la tenue chimique de la structure.
- ✓ Donner la forme désirée au produit final.

### **I.6. Les renforts :**

Les renforts dans les matériaux composites jouent un rôle essentiel en fournissant un soutien structurel et en améliorant les propriétés mécaniques telles que la rigidité et la résistance.

Ils contribuent également à améliorer d'autres caractéristiques physiques telles que la résistance au feu et la conductivité électrique. Pour être efficaces, les renforts doivent avoir une faible densité, être compatibles avec les matrices et être faciles à manipuler. Ils peuvent provenir de diverses sources, y compris des origines animales, végétales ou synthétiques, et se présenter sous différentes formes telles que des fibres courtes, des particules ou des fibres continues [11].

❖ **Renfort en fibres discontinues :** Des fibres courtes, ou particules (charges sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écaillés ou de poudre), permettent d'améliorer certaines propriétés de la matrice (résistance à l'usure, propriétés thermiques, poids). Celle-ci reste l'élément de base et on obtient alors un « polymère renforcé » [37].

❖ **Renfort continu :** Sous forme de fibres longues qui sont généralement utilisées poudres composites HP. Cette forme fibreuse offre une résistance à la rupture et souvent un module d'élasticité beaucoup plus élevée que ceux du même matériau massif, avec une augmentation

de la longueur de 10000 fois, ou bien pour le même volume, la surface est multipliée par 100 dans le cas des fibres de verre [45].

### -Les grandes familles de fibres :

Les fibres peuvent être classées en différentes grandes catégories selon leur composition chimique, leur provenance et leurs caractéristiques spécifiques (voir Fig. I-5).



Figure I-2. Organigramme des différents types de renfort

Voici quelques-unes des grandes familles de fibres :

✓ **Fibres minérales** : Comprend des fibres telles que le verre, le basalte et la céramique. Elles sont fabriquées à partir de matériaux inorganiques et sont souvent utilisées pour leur résistance à la chaleur et à la corrosion [38].

✓ **Fibres naturelles** : Comprend des fibres telles que le coton, le lin, le jute, la laine et le bambou. Elles sont dérivées de sources végétales ou animales et sont appréciées pour leur biocompatibilité, leur respirabilité et leur durabilité [39]

✓ **Fibres synthétiques** : Comprend des fibres telles que le polyester, le nylon, le polypropylène et l'élasthanne. Elles sont fabriquées à partir de polymères synthétiques et sont largement utilisées dans une variété d'applications en raison de leur résistance, de leur légèreté et de leur faible coût [40].

✓ **Fibres de haute performance** : Comprend des fibres telles que le carbone, le kevlar et l'aramide. Elles sont spécialement conçues pour offrir des performances exceptionnelles dans des domaines tels que la résistance à la traction, la résistance aux chocs et la résistance à la chaleur, et sont souvent utilisées dans des applications critiques telles que l'aérospatiale, l'automobile et la défense [41].

✓ **Fibres recyclées** : Comprend des fibres fabriquées à partir de matériaux recyclés, tels que les bouteilles en plastique recyclées transformées en fibres de polyester recyclé. Elles sont utilisées dans le cadre d'efforts de durabilité et de réduction des déchets dans l'industrie textile [42].

Ces grandes familles de fibres offrent une variété de propriétés et d'applications, ce qui permet aux fabricants de choisir le type de fibre le mieux adapté à leurs besoins spécifiques en termes de performance, de durabilité et de coût.

#### **-Les propriétés de fibres de jute:**

##### **Jute :**

Le jute est une fibre végétale dont la longueur peut varier de 150 à 300 cm, avec un diamètre compris entre 0,015 et 0,002 mm. Il est disponible dans une gamme de couleurs allant du blanc au jaune, en passant par le marron et le gris. La fibre de jute présente une résistance de 3,5 à 5 g/den et une gravité spécifique de 1,48. Sa capacité de récupération d'humidité est d'environ 13,75%. En termes d'élasticité, elle a une extension de rupture de 1,8% avec une récupération élastique très faible. La composition chimique du jute comprend principalement plus de 65% de cellulose, plus de 22,5% d'hémi-cellulose et plus de 11% de lignine.

La fibre de jute est extraite des vaisseaux de phloème situés sous l'écorce de la tige principale de la plante. Ces fibres sont longues, douces et brillantes, avec une longueur allant de 1 à 4 mètres et un diamètre de 17 à 20 microns. La fibre de jute est essentiellement constituée de cellulose végétale et de lignine, qui sont respectivement les principaux composants des fibres végétales et de bois. Pour séparer les fibres de la tige, les méthodes de rouissage peuvent être biologiques ou chimiques, bien que les premières soient plus courantes en raison du coût des produits chimiques. Le rouissage biologique comprend diverses techniques telles que le regroupement des tiges en faisceaux avant de les faire tremper, facilitant ainsi l'extraction des fibres.

La fibre de jute est souvent surnommée "fibre d'or" en raison de ses reflets brillants. Il s'agit d'une culture annuelle qui prend environ 120 jours pour atteindre sa maturité. Sa biodégradabilité élevée en fait un choix écologique pour de nombreuses applications, tandis que sa brillance et sa douceur en font un matériau attrayant pour une variété d'utilisations textiles et industrielles [43, 44].

***CHAPITRE II***  
***USINAGE DES MATÉRIAUX COMPOSITE***

## **II.1. Usinage des matériaux composites : paramètres de coupe, outils et additifs**

L'usinage des matériaux composites, notamment ceux renforcés par des fibres (FRP), se distingue fondamentalement de celui des métaux en raison de la nature hétérogène et anisotrope de ces matériaux. Contrairement aux métaux, les composites sont constitués d'une matrice polymère et de renforts fibreux (verre, carbone, aramide, etc.), chacun présentant des comportements mécaniques et thermiques très différents face aux sollicitations d'usinage. Ainsi, lors de la coupe, l'outil traverse alternativement des zones de matrice et des zones de renfort, ce qui provoque des efforts de coupe variables et impose une usure accrue de l'outil.

## **II.2. Évaluation des paramètres de coupe pour le fraisage et le perçage des composites**

La sélection des paramètres de coupe revêt une importance capitale pour assurer la qualité de la surface usinée, limiter les défauts tels que le délaminage ou les arrachements de fibres, préserver la durée de vie des outils, et maintenir une productivité acceptable. Trois paramètres clés sont généralement étudiés : la vitesse de coupe ( $V_c$ ), l'avance par dent ( $f$ ), et la profondeur de passe ( $a_p$ ).

### **1. Vitesse de coupe ( $V_c$ )**

La vitesse de coupe influence directement la génération de chaleur pendant l'usinage. Dans le cas des matériaux composites, une vitesse trop élevée peut entraîner une surchauffe locale, provoquant la dégradation thermique de la matrice polymère ou l'endommagement des fibres. À l'inverse, une vitesse trop faible peut induire une coupe inefficace et accroître les forces de coupe, accélérant ainsi l'usure de l'outil. Il est donc conseillé d'adopter une approche progressive : commencer par une vitesse modérée et l'ajuster en fonction de l'observation des phénomènes de coupe, tels que la qualité de surface ou l'apparition de défauts.

### **2. Avance ( $f$ )**

L'avance détermine la quantité de matière retirée à chaque passage de l'outil. Une avance trop importante risque de provoquer des phénomènes de délaminage, notamment au niveau de la sortie d'outil, en raison des contraintes d'interface entre les couches de fibres. En revanche, une avance trop faible peut accroître la durée du cycle, engendrer des vibrations (chatter), ainsi qu'une élévation locale de la température à cause de la friction accrue, menant à

une détérioration prématurée de l'outil. Il est donc essentiel d'optimiser l'avance afin d'assurer un bon compromis entre efficacité d'enlèvement de matière et intégrité du matériau.

### 3. Profondeur de passe (ap)

Ce paramètre influence le volume de matière retirée verticalement. Une profondeur de passe excessive est susceptible de générer des charges mécaniques élevées et des vibrations, ce qui favorise les défauts comme les fissures ou le délaminage. À l'inverse, une passe trop peu profonde pourrait nuire à la productivité. L'usinage des composites bénéficie généralement de passes peu profondes, favorisant la stabilité du processus et la préservation de l'outil.

## II.3. Le rôle des additifs : cas des cires et du graphène

Afin de moduler les propriétés tribologiques et thermiques des composites, divers additifs peuvent être incorporés à la matrice polymère. Parmi ceux-ci, les cires d'hydrocarbures — notamment les cires de polyéthylène modifiées par du PTFE — sont souvent utilisées. Ces additifs jouent un rôle de lubrifiants solides, réduisant la friction pendant l'usinage et facilitant l'évacuation de la chaleur. Leur forme sphérique micrométrique est privilégiée afin de garantir une dispersion homogène sans altérer l'état de surface des pièces usinées.

L'association de cire et de nanoparticules de graphène s'est révélée particulièrement efficace pour améliorer la dissipativité thermique du matériau et réduire l'usure de l'outil. Une étude menée par El-Ghaoui et al. (2019) a montré que ce type de formulation permet de limiter significativement les phénomènes thermomécaniques indésirables pendant le perçage ou le fraisage.

## II.4. Usinage des FRP : comportement spécifique et choix des outils

L'un des défis majeurs dans l'usinage des FRP réside dans leur usure d'outil rapide. Cela résulte du contact abrasif entre les fibres (particulièrement dans les CFRP) et l'arête de coupe. Afin de pallier ce problème, plusieurs matériaux de coupe ont été développés :

- **PCD (diamant polycristallin)** : très dur et résistant à l'usure, le PCD est l'un des matériaux les plus efficaces pour l'usinage des composites. Malgré son coût élevé, sa longue durée de vie et sa stabilité thermique en font un choix économique à long terme. Des études comme celle de Karabibene (2017) ont confirmé que l'usinage de GFRP avec des outils en PCD donne de meilleurs résultats que les outils classiques en carbure,

notamment pour des conditions optimales de 200 mm/min en vitesse de coupe et 0,1 mm/rev en avance.

- **CVD (revêtements par dépôt chimique en phase vapeur)** : cette technologie permet d'obtenir des revêtements ultra-durs sans liant, à base de diamant pur. Offrant une dureté allant jusqu'à 10000 HV, supérieure à celle du PCD (~6000 HV), les revêtements CVD améliorent l'adhérence, la résistance à l'usure et la durabilité des outils. Leur grande uniformité même sur des géométries complexes en fait une solution avancée, particulièrement adaptée à l'usinage de matériaux abrasifs comme les composites.

Des recherches comme celles de Zenia (2017) ont montré que le perçage de CFRP avec des forets en PCD ou revêtus en CVD permet non seulement de réduire les défauts en sortie de trou (comme le délaminage), mais aussi de prolonger considérablement la durée de vie de l'outil. Ses travaux incluent également une validation expérimentale des forces d'avance et une modélisation numérique pour affiner les prédictions.

### **II.5. Influence des additifs sur la qualité de surface**

Enfin, l'intégration d'additifs dans la matrice peut également améliorer la qualité de la surface usinée. Par exemple, l'introduction de 1 % en masse de graphène dans un composite renforcé de fibres de verre a permis une réduction significative de la rugosité de surface. Cela s'explique par l'effet lubrifiant du graphène et sa capacité à dissiper localement la chaleur générée pendant la coupe.

### **II.6. Défauts typiques lors du perçage de composites à fibres naturelles**

L'usinage des composites à fibres naturelles, tels que les stratifiés renforcés de fibres de jute, de lin ou de palmier, engendre une série de défauts typiques qui compromettent l'intégrité mécanique, la précision dimensionnelle et la qualité de surface des pièces usinées. Parmi ces défauts, les plus fréquemment observés sont :

#### **1. Le délaminage**

Le délaminage correspond à la séparation des couches constituant le composite, généralement autour de la zone de sortie ou d'entrée de l'outil. Il s'agit du défaut le plus critique, car il peut affaiblir considérablement la structure du matériau. Il est provoqué par les

forces d'usinage excessives ou mal contrôlées, notamment l'effort axial exercé par l'outil, qui agit perpendiculairement aux plans des couches. On distingue deux types principaux :

- **Délamination en entrée** : souvent dû à une poussée excessive exercée par l'outil au moment où il entre dans le matériau.
- **Délamination en sortie** : causé par une perte de soutien du matériau sous-jacent lorsque l'outil perce la dernière couche, ce qui entraîne un soulèvement des fibres.

## **2. L'arrachement de fibres**

Ce défaut se manifeste par une extraction partielle ou totale des fibres hors de la matrice, laissant une surface irrégulière ou rugueuse autour du trou. L'arrachement est particulièrement fréquent dans les composites à fibres longues et orientées, et il est amplifié lorsque les conditions de coupe (vitesse et avance) ne sont pas adaptées. Il compromet la qualité de surface du trou et peut aussi engendrer des pertes de matière.

## **3. La mauvaise circularité ou cylindricité des trous**

Les variations de circularité et de cylindricité des trous percés reflètent l'instabilité mécanique du processus de perçage. Ces erreurs géométriques proviennent d'un désalignement entre l'outil et la pièce, d'un jeu mécanique dans le système de fixation, ou de l'effet anisotrope du matériau. Une mauvaise circularité ou cylindricité peut rendre les trous incompatibles avec les assemblages mécaniques précis.

## **4. La formation de bavures**

Les bavures sont des excroissances de matériau non coupé autour des bords du trou. Elles apparaissent souvent lorsque le perçage est réalisé avec un outil émoussé ou lorsque la vitesse de coupe est insuffisante. Outre leur aspect esthétique défavorable, elles peuvent nécessiter une opération de finition supplémentaire.

## **5. Le flambage ou l'éclatement localisé**

Ce type de défaillance est plus rare mais peut survenir lorsque les renforts de fibres sont orientés perpendiculairement à l'outil ou lorsque le composite est mal compacté. Il se traduit par une rupture brutale ou une fissuration autour de la zone usinée.

## ***CHAPITRE III***

### ***Méthodologie Expérimentale***

### III.1. Introduction :

Dans Cette section présente les méthodes expérimentales employées pour la fabrication des composites jute-époxy renforcés aux nanoparticules d'alumine ainsi que pour l'étude de leur perçage. Le développement de ces matériaux composites exige une sélection rigoureuse des constituants (fibres végétales, matrice polymère, charges nanométriques) et des procédés de fabrication contrôlés afin d'obtenir des propriétés mécaniques optimales. L'analyse du perçage de ces composites nécessite quant à elle une approche systématique pour minimiser les défauts d'usinage et garantir la qualité des trous réalisés.

Nous décrivons de manière exhaustive les étapes fondamentales de production des composites, comprenant :

- La sélection des matériaux (fibres de jute, résine époxy, durcisseur, nanoparticules d'alumine)
- Les techniques de préparation (mélange matriciel, imprégnation des renforts, stratification)
- Les paramètres de fabrication (moulage, pressage, cycle de polymérisation)

Une attention particulière est également accordée aux méthodes d'étude du perçage, incluant :

- Les équipements utilisés (machine de perçage, outils coupants)
- Les paramètres d'usinage (vitesse de rotation, avance, lubrification)
- Les techniques de caractérisation (analyse des bavures, mesure des diamètres)

L'objectif de cette section est de fournir un cadre méthodologique complet et reproductible, constituant la base pour l'analyse et l'interprétation des résultats présentés dans les chapitres suivants. Ces informations permettront aux lecteurs d'appréhender la démarche expérimentale rigoureuse adoptée dans cette étude et d'en évaluer la validité scientifique.

### III.2.Méthodologie de Fabrication des Composites Jute-Époxy Renforcés aux Nanoparticules d'Alumine

La fabrication des composites à base de fibres de jute et de résine époxy, avec et sans ajout de nanoparticules d'alumine, a été réalisée selon un protocole expérimental rigoureux, comprenant plusieurs étapes clés.

### 1. Conception et Préparation du Moule

Un moule en bois, soigneusement conçu pour respecter les dimensions exactes des éprouvettes (longueur = 176 mm, largeur = 102 mm, épaisseur = 9 mm), a été utilisé. Ce choix de matériau naturel assure une bonne stabilité tout en permettant une libération aisée du composite après durcissement. Pour optimiser le démoulage, une fine couche d'agent démoulant (cire de type Vaseline) a été appliquée sur toutes les surfaces internes du moule, évitant ainsi toute adhérence indésirable de la résine (Figure. IV-1) :

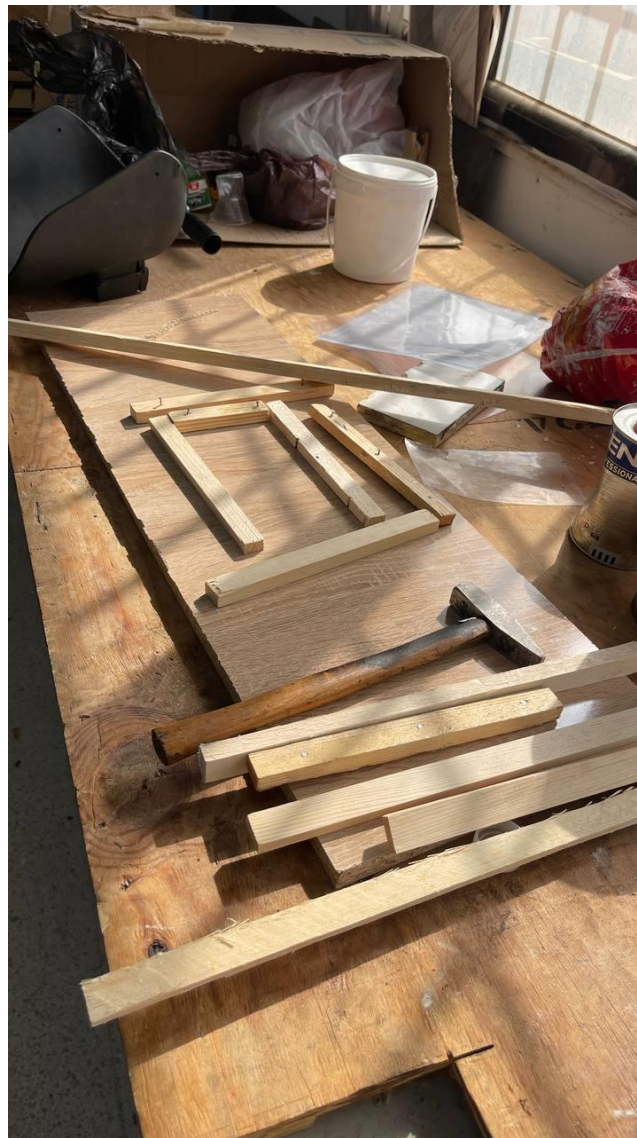


Figure III-3. Préparation du moule

### 2. Préparation de la Résine Époxy

La résine époxy a été formulée en mélangeant deux composants principaux :

- La résine (composant A) : matrice polymère de base.
- Le durcisseur (composant B, référence HX100.00 de GENÇ) : nécessaire pour initier la réaction de polymérisation et durcir le matériau.

Pour le composite renforcé, des nanoparticules d'alumine (10 % en poids) ont été dispersées de manière homogène dans le mélange résine-durcisseur afin d'améliorer les propriétés mécaniques du matériau final. Fig 3 :



Figure III-4. Résine époxy et durcisseur

### 3. Découpe et Stratification des Fibres de Jute

Les fibres de jute, préalablement découpées aux dimensions du moule, ont été disposées en **10 couches successives**, représentant une masse totale de **60 g**. Cette stratification permet d'obtenir une répartition uniforme des fibres dans la matrice époxy, optimisant ainsi la résistance mécanique du composite (Figure. IV-3) :



Figure III-5. Empilement de couches

#### 4. Moulage et Compactage

Une fois les couches de jute imprégnées de résine, un **contre-moule** a été placé sur l'ensemble pour garantir une **épaisseur constante** et une bonne compression des matériaux. L'ensemble a ensuite été soumis à une **pression contrôlée pendant 48 heures**, permettant une polymérisation complète de la résine et une consolidation optimale du composite (Figure IV-4).



Figure III-6: Étape de pressage sur une presse hydraulique

### 5. Démoulage et Finition

Après durcissement, la plaque composite a été démoulée avec facilité grâce à l'agent démoulant appliqué initialement. Les échantillons ainsi obtenus présentent une structure homogène, prête pour les essais mécaniques et physico-chimiques ultérieurs.

Cette méthodologie permet d'obtenir deux types de composites :

- **Un composite de référence (0 % alumine)** : servant de matériau témoin (Fig. IV-5).
- **Un composite renforcé (10 % alumine)** : dont les propriétés mécaniques sont améliorées grâce à la dispersion des nanoparticules (Fig. IV-6).

Cette approche systématique garantit la reproductibilité des essais et permet une comparaison fiable entre les deux formulations.



Figure III-7. Plaque composite de référence (0 % alumine)



Figure III-8. Plaque composite renforcée (10 % alumine)

### III.3. Mesure des efforts de coupe verticaux en perçage :

#### 1. Approche de Mesure Simplifiée

Dans le cadre de cette étude, nous nous concentrons exclusivement sur la mesure de l'**effort vertical** ( $F_z$ ) lors des opérations de perçage. Cette approche ciblée permet :

- Une instrumentation simplifiée mais parfaitement adaptée à notre objectif principal
- Une meilleure résolution de mesure sur le paramètre clé qu'est l'effort axial
- Une réduction des coûts et de la complexité du système de mesure

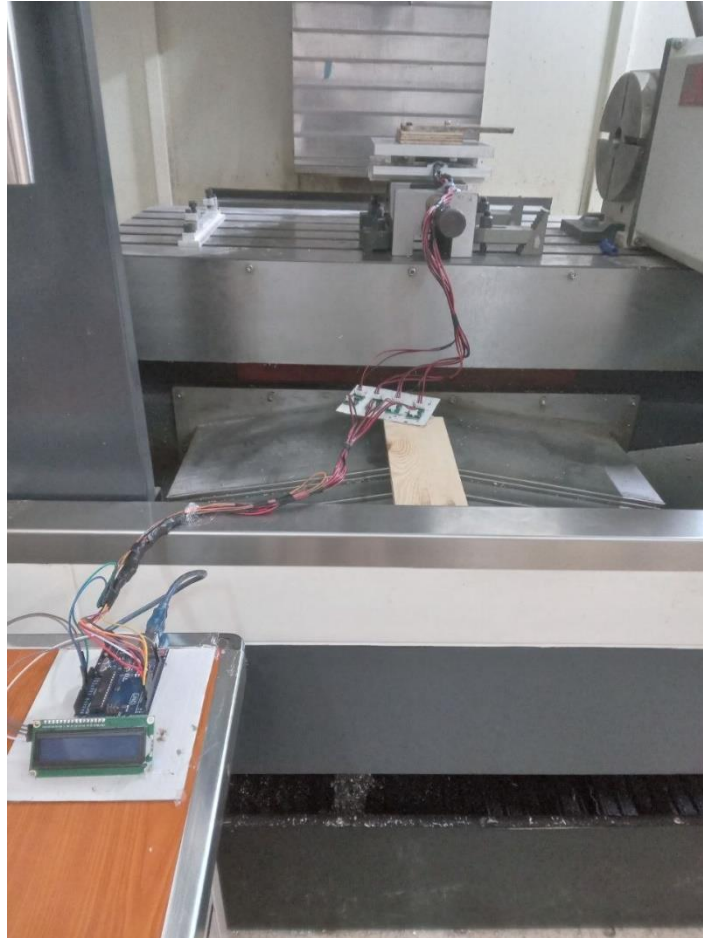


Figure III-9. Instruments utilisés pendant le procédé de perçage

## 2. Conception du Dynamomètre Axial

Le dispositif développé spécifiquement pour cette étude comprend (Figure IV-7):

### a) Capteur principal :

- Capteur piézoélectrique uniaxial haute précision (gamme 0-500 N)
- Résolution de 0,1 N pour détecter les variations fines d'effort
- Compensation intégrée des perturbations thermiques

### b) Système d'acquisition :

- Carte Arduino Mega avec module ADC 16 bits
- Filtrage analogique anti-repliement
- Taux d'échantillonnage réglable jusqu'à 20 kHz

**c) Interface mécanique :**

- Plateforme rigide en acier traité
- Système de fixation par brides avec précharge contrôlée
- Isolation des vibrations parasites

**3. Avantages de la Mesure Uniaxiale**

Cette configuration offre des bénéfices spécifiques :

1. **Simplicité d'utilisation** : pas de calculs complexes de composantes
2. **Précision accrue** : optimisation du système pour une seule direction
3. **Stabilité améliorée** : moins sensible aux perturbations latérales
4. **Coût maîtrisé** : réduction du nombre de capteurs nécessaires

**4. Protocole de Mesure**

La procédure expérimentale comprend :

1. **Étalonnage statique** :
  - Application de charges connues (0 à 400 N par paliers de 50 N)
  - Vérification de la linéarité et de l'hystérésis
  - Enregistrement de la courbe de calibration
2. **Montage expérimental** :
  - Fixation rigide du composite sur la plateforme du dynamomètre
  - Alignement précis de l'axe du foret avec le capteur
  - Vérification de la perpendicularité
3. **Acquisition des données** :
  - Enregistrement continu de  $F_z$  pendant toute l'opération de perçage
  - Synchronisation avec la position de l'outil

- Filtrage numérique en temps réel

#### 4. Analyse des résultats :

- Extraction de Fz\_max pour chaque essai
- Calcul de la moyenne sur 5 essais par condition
- Analyse statistique des variations

#### 5. Justification de l'Approche

Le choix de ne mesurer que l'effort vertical se justifie par :

- La forte corrélation entre Fz et la qualité du perçage dans les composites
- La dominance de cette composante dans le processus d'enlèvement de matière
- La simplification des comparaisons entre différentes configurations
- La réduction des sources d'erreur potentielles

Cette méthodologie focalisée permet d'obtenir des données fiables et reproductibles tout en optimisant les ressources expérimentales. Les résultats fourniront des indications précieuses sur le comportement à l'usinage des composites jute-époxy renforcés.

#### III.4.Procédure expérimentale détaillée (DOE)

La campagne expérimentale a été menée selon un plan d'expériences complet 5×5 évaluant l'influence combinée de la vitesse de rotation (500, 1000, 1500, 2000 et 2500 tr/min) et de l'avance par tour (0,04, 0,08, 0,12, 0,16 et 0,20 mm/tr) sur les performances de perçage (Tableau IV-1). Des plaques de composite Jute-Époxy renforcé de 10% d'Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub> , préalablement ont été usinées à l'aide d'un foret HSS de 8 mm sur une machine CNC. Chaque foret neuf était monté dans un mandrin dynamométrique (25 Nm) après vérification de sa concentricité au comparateur.

**Tableau III-1 :** Plan d'Expérience Factoriel Complet pour l'Étude des Combinaisons de Paramètres de Coupe

Test.	vitesse de rotation (tr/min)	Avance par tour (mm/tr)	Effort de coupe (N)	Température (°C)
1	500	0.04		
2	500	0.08		
3	500	0.12		
4	500	0.16		
5	500	0.20		
6	1000	0.04		
7	1000	0.08		
8	1000	0.12		
9	1000	0.16		
10	1000	0.20		
11	1500	0.04		
12	1500	0.08		
13	1500	0.12		
14	1500	0.16		
15	1500	0.20		
16	2000	0.04		
17	2000	0.08		
18	2000	0.12		
19	2000	0.16		
20	2000	0.20		
21	2500	0.04		
22	2500	0.08		
23	2500	0.12		
24	2500	0.16		
25	2500	0.20		

L'instrumentation comprenait un dynamomètre fixe uniaxial (0-500 N,  $\pm 0,5\%$ ) pour mesurer l'effort axial à 1 kHz, un pyromètre infrarouge ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ) positionné à 2 mm du trou, et un microscope optique (50 $\times$ ) pour évaluer le délaminage selon la norme ASTM D5687. Pour chaque combinaison paramétrique, le protocole standardisé incluait un nettoyage minutieux de la zone, un marquage précis, l'acquisition synchronisée des données pendant l'usinage à sec, suivi d'un refroidissement naturel de 5 minutes avant analyse. Trois réplicats ont été réalisés par condition dans un environnement contrôlé ( $22\pm 1^\circ\text{C}$ ,  $50\pm 5\%$  HR), avec changement systématique d'outil après chaque série de 5 essais et étalonnage régulier des instruments. Les données brutes, images microscopiques et observations ont été archivées de manière structurée pour analyse ultérieure.

# **IV: Résultats et discussion**

### IV.1.Introduction:

L'étude du perçage appliqué à un composite biosourcé à matrice Luffa-Epoxy, avec ou sans renfort d'alumine ( $Al_2O_3$ ), met en évidence une évolution significative de l'effort de coupe en fonction des paramètres de perçage. Les essais expérimentaux ont été réalisés avec un foret HSS de 8 mm de diamètre, en faisant varier deux paramètres essentiels : la vitesse de rotation de la broche (de 500 à 2500 tr/min) et l'avance par tour (de 0,04 à 0,20 mm/rev). L'objectif était de caractériser et de comparer la réponse à l'usinage d'un composite naturel (Luffa-Epoxy pur) et de sa version renforcée par 10 % en poids d'alumine, un additif réputé pour sa dureté et sa résistance thermique.

### IV.2. Effet de l'avance par tour sur l'effort de perçage

L'analyse initiale porte sur le composite sans additif (référence à 0 %). Comme illustré à la figure 1, l'augmentation de l'avance par tour entraîne une hausse progressive et attendue de l'effort de perçage. Ce phénomène résulte d'une augmentation de la section de coupe, c'est-à-dire du volume de matière retirée à chaque tour, ce qui accroît proportionnellement la charge mécanique imposée à l'outil. À titre d'exemple, pour une vitesse de rotation de 500 tr/min, l'effort croît de 20,88 N à 25,91 N lorsque l'avance passe de 0,04 mm/rev à 0,20 mm/rev.

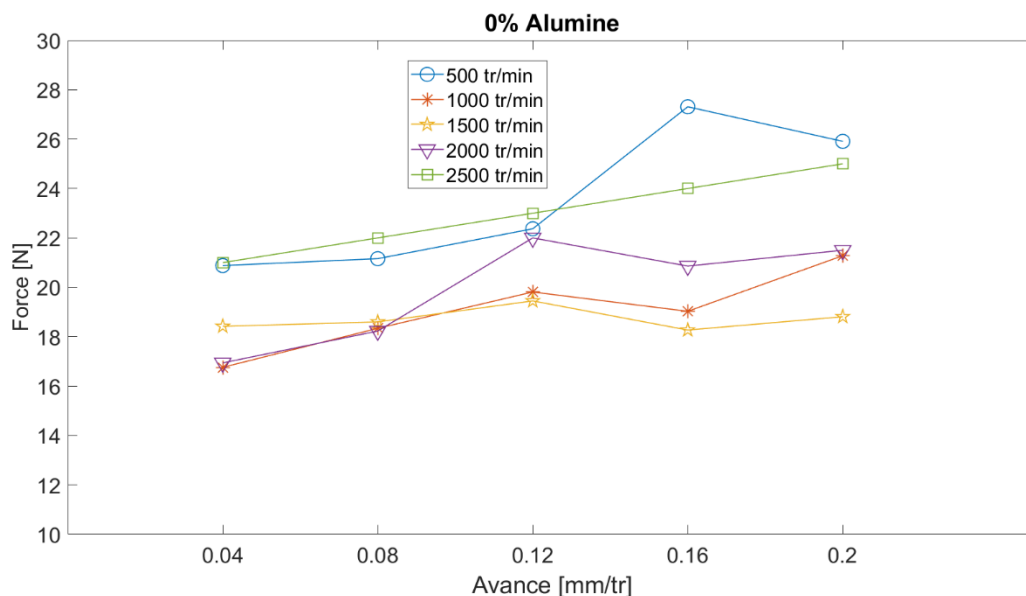
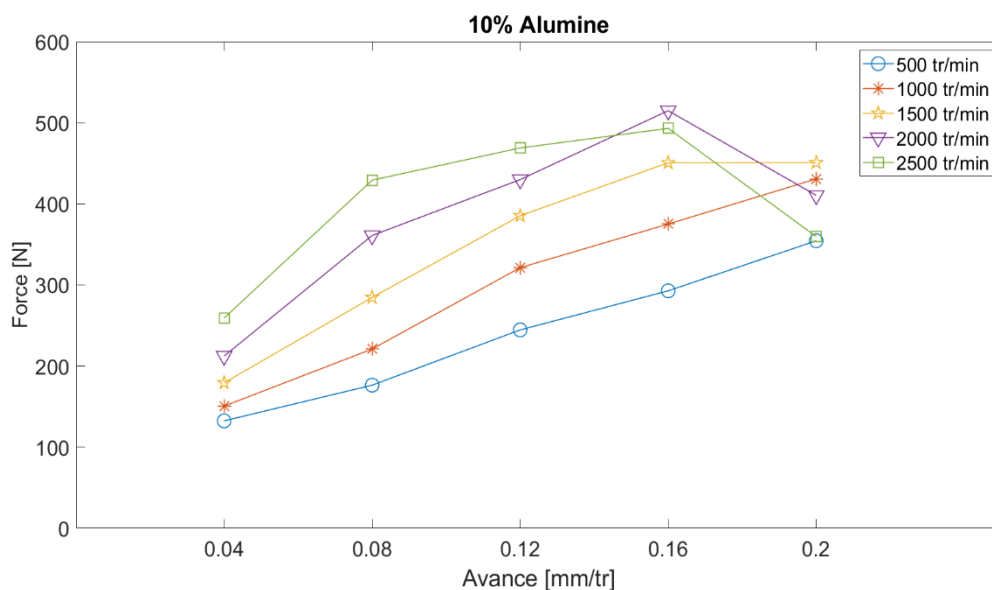


Figure IV-10. Influence de l'avance par tour sur l'effort de perçage pour le composite sans alumine (référence à 0 %).

Cependant, cette croissance reste modérée, l'effort demeurant globalement contenu entre 16 et 26 N, toutes vitesses confondues. Cela témoigne du comportement relativement

homogène et ductile du composite sans renfort, dont la structure favorise une coupe fluide, sans perturbation majeure de l'arête de coupe. Ce matériau présente ainsi un usinage relativement stable, avec une friction limitée entre l'outil et la matière.

En revanche, le comportement du composite renforcé par 10 % d'alumine diffère sensiblement. Comme le montre la figure 2, l'effort de perçage augmente de façon marquée avec l'avance. Par exemple, à 500 tr/min, l'effort passe de 132,47 N à 354,49 N entre les avances extrêmes de 0,04 mm/rev et 0,20 mm/rev, soit une multiplication par près de 2,7. Cette élévation rapide est directement liée à la présence des particules d'alumine, qui perturbent le processus de coupe.



**Figure IV-11.** Variation de l'effort de perçage selon l'avance par tour pour le composite renforcé avec 10 % d'alumine.

Ces particules céramiques, dures et peu ductiles, agissent comme des obstacles rigides à la propagation de l'arête de coupe. Elles augmentent la friction outil-matière, favorisent l'écaillage du matériau, et compliquent la formation des copeaux. La faible aptitude à la déformation plastique de l'alumine conduit à des ruptures brutales, générant des micro-impacts répétés sur le foret. Cette sollicitation accrue de l'outil se traduit par une demande énergétique nettement plus élevée.

### IV.3. Effet de la vitesse de rotation

Pour le composite sans ajout d'alumine, l'évolution de l'effort de perçage en fonction de la vitesse de rotation révèle un comportement relativement stable (Fig. 3). Les efforts restent faibles, oscillant entre 16 et 25 N, quelle que soit la vitesse appliquée (de 500 à 2500 tr/min). Ce comportement suggère que la matrice Luffa-Epoxy, homogène et dépourvue de particules dures, conserve une bonne usinabilité dans toute la plage de vitesses testées. En effet, l'augmentation de la vitesse tend même à légèrement réduire l'effort, en raison de l'amélioration de la qualité de coupe : le temps de contact entre le foret et le matériau diminue, ce qui limite la génération de chaleur excessive et favorise une évacuation plus fluide des copeaux.

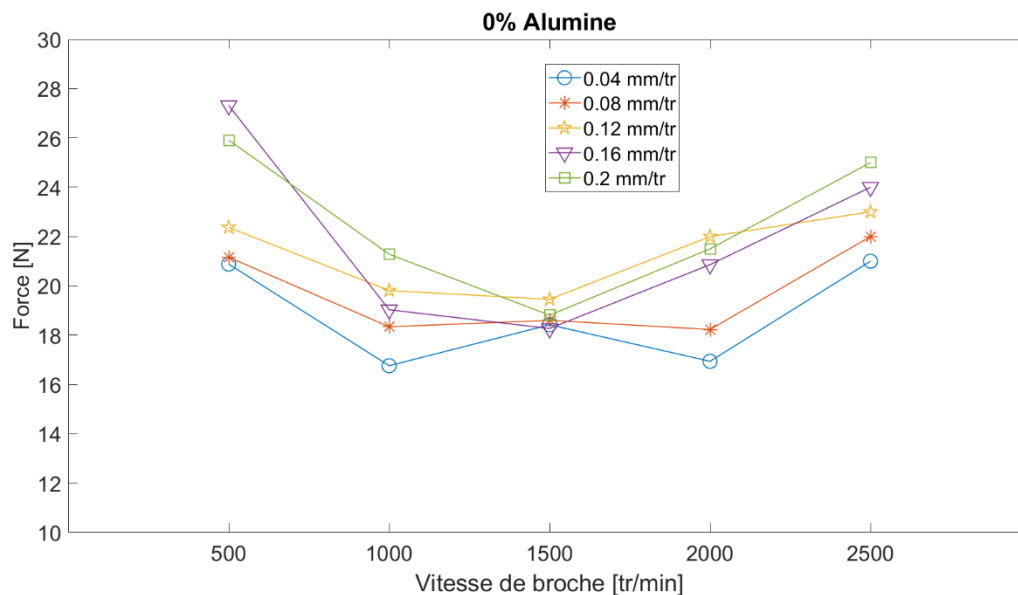


Figure IV-12. Impact de la vitesse de rotation sur l'effort de perçage pour le composite sans alumine (référence à 0 %).

En revanche, dans le cas du composite renforcé avec 10 % d'alumine, l'augmentation de la vitesse engendre une hausse notable de l'effort de perçage, surtout lorsque l'avance par tour est moyenne ou élevée (Fig. 4). Par exemple, à 0,16 mm/rev, l'effort atteint plus de 400 N à 2000 tr/min, contre environ 300 N à 500 tr/min, soit une augmentation de près de 33 %. Cette tendance, à première vue contre-intuitive, s'explique par l'interaction complexe entre la vitesse de coupe, la chaleur générée, et la nature composite du matériau.

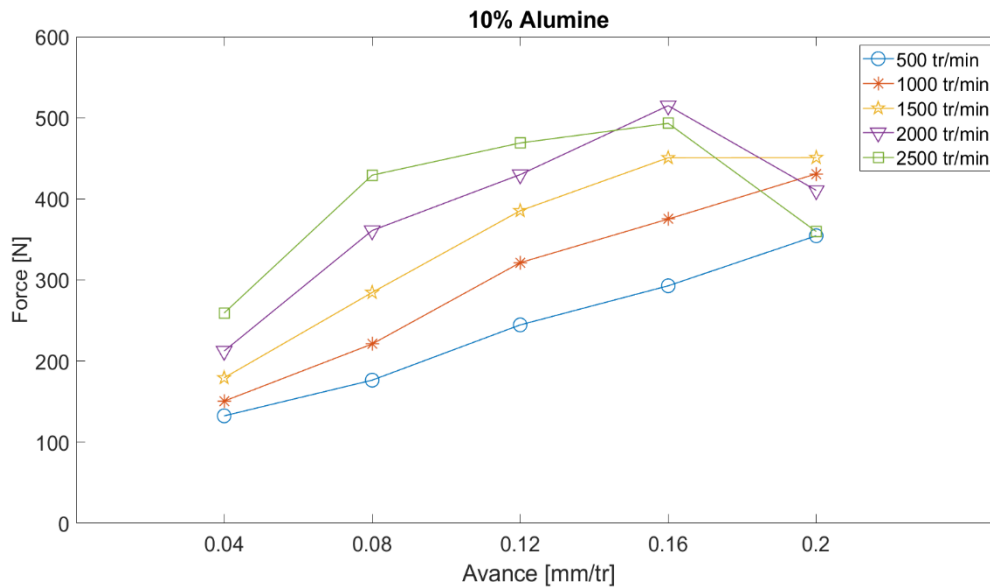


Figure IV-13. Variation de l'effort de perçage selon l'avance par tour pour le composite renforcé avec 10 % d'alumine.

À haute vitesse, la température au point de coupe augmente considérablement. Cela entraîne un ramollissement partiel de la matrice époxy, mais les particules d'alumine, de nature céramique, conservent leur dureté. Ce déséquilibre thermique provoque une instabilité mécanique au front de coupe : la matrice se déforme plastiquement tandis que les particules résistent à la coupe, ce qui engendre des contraintes locales accrues, une rupture hétérogène des copeaux, et une sollicitation sévère de l'outil. À cela s'ajoutent des phénomènes d'abrasion et d'adhésion à l'interface outil-matière, exacerbés par la présence des particules dures, qui aggravent l'usure du foret.

Ainsi, contrairement au composite non chargé, l'effet de la vitesse de rotation sur le composite renforcé est non linéaire et dépendant de l'avance. Cela souligne la nécessité d'adapter les conditions de coupe pour éviter une montée excessive de la température et optimiser l'équilibre entre performance de coupe et durabilité de l'outil.

#### IV.4. Comparaison globale et implications pratiques

La comparaison directe des deux matériaux, représentée dans la Figure 5, met en évidence une différence systématique et significative des efforts de coupe, avec un écart moyen multiplié par 15 à 20 selon les conditions. Cette disparité souligne le coût énergétique et mécanique associé à l'utilisation d'un renfort céramique. Bien que ce dernier améliore

indéniablement les performances mécaniques du composite (résistance à l'usure, rigidité, tenue thermique), il introduit des contraintes majeures pour l'usinage.

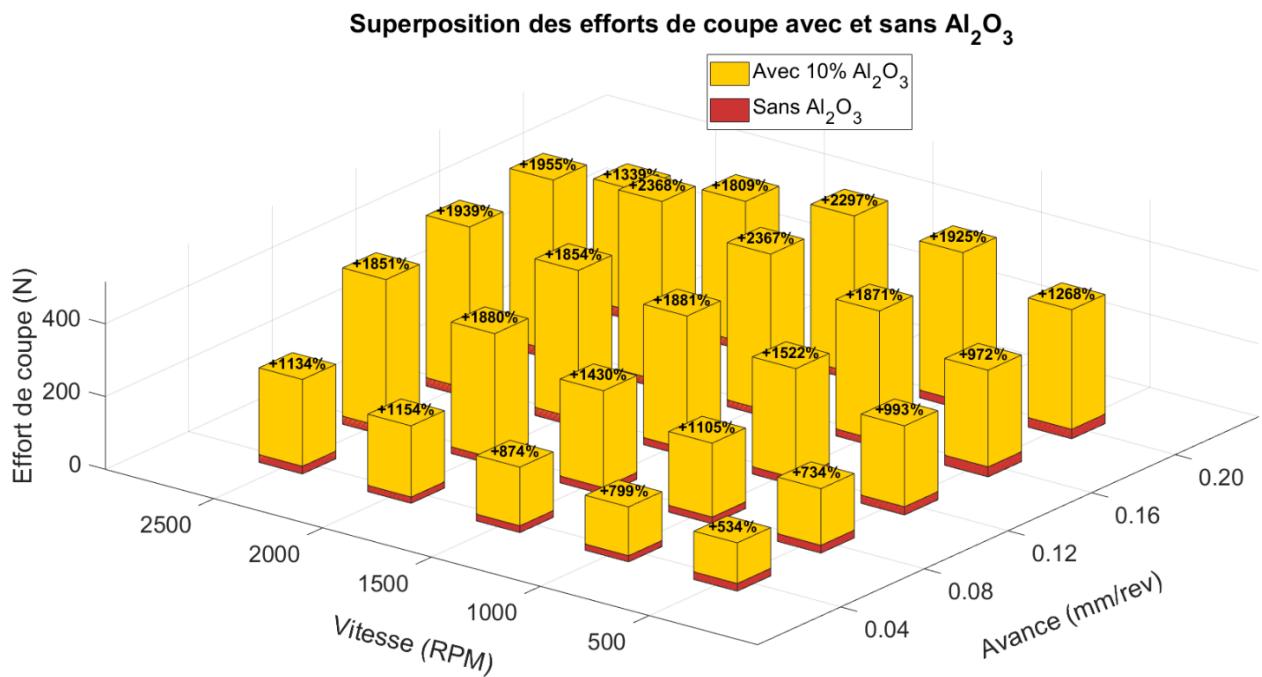


Figure IV-14. Superposition comparative des efforts de coupe selon la vitesse de rotation et l'avance pour les deux matériaux

Sur le plan industriel, cette situation implique la nécessité de réévaluer les paramètres de coupe pour éviter l'usure rapide des outils, la surchauffe ou les défauts géométriques des trous (bavures, délaminations, fissures). L'optimisation doit également prendre en compte la nature abrasive de l'alumine, qui peut entraîner une usure prématurée des arêtes de coupe, en particulier sur les forets HSS non revêtus. Le choix de forets adaptés (carbure, revêtements TiAlN, etc.), combiné à une lubrification ou un refroidissement efficace, pourrait compenser partiellement ces effets.

Finalement, les résultats expérimentaux montrent que le renfort par 10 % d'alumine modifie profondément le comportement à l'usinage du composite Luffa-Epoxy. L'effort de coupe est fortement amplifié, notamment à forte avance et haute vitesse, ce qui indique une augmentation considérable des besoins énergétiques du procédé. Le compromis entre performance mécanique et usinabilité doit donc être soigneusement évalué en fonction de l'application visée. Cette étude ouvre également la voie à des investigations complémentaires

sur l'usure des outils, la rugosité des trous percés, la formation des copeaux et l'optimisation multi-objectif des paramètres de coupe pour les matériaux composites renforcés.

#### IV.4. Analyse de la température

L'analyse thermique du processus d'usinage révèle une évolution cohérente de la température en fonction des conditions de coupe, tant en l'absence qu'en présence de renfort céramique ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

##### Effet de l'avance sur la température – Sans $\text{Al}_2\text{O}_3$

Sans l'ajout de particules céramiques, on observe que l'augmentation de l'avance par tour provoque une élévation notable de la température. À vitesse constante, la température croît régulièrement avec l'augmentation de l'avance (Fig. 6). Par exemple, à 500 tr/min, la température passe de 25.1 °C à 32.0 °C lorsque l'avance augmente de 0.04 à 0.20 mm/tr. Cette tendance est également visible à des vitesses supérieures : à 2500 tr/min, l'élévation de température due à l'avance est encore plus marquée, atteignant jusqu'à 37.0 °C à 0.20 mm/tr. Cette progression thermique s'explique par le volume de matière enlevé plus important, ce qui accroît la charge thermique générée par friction.

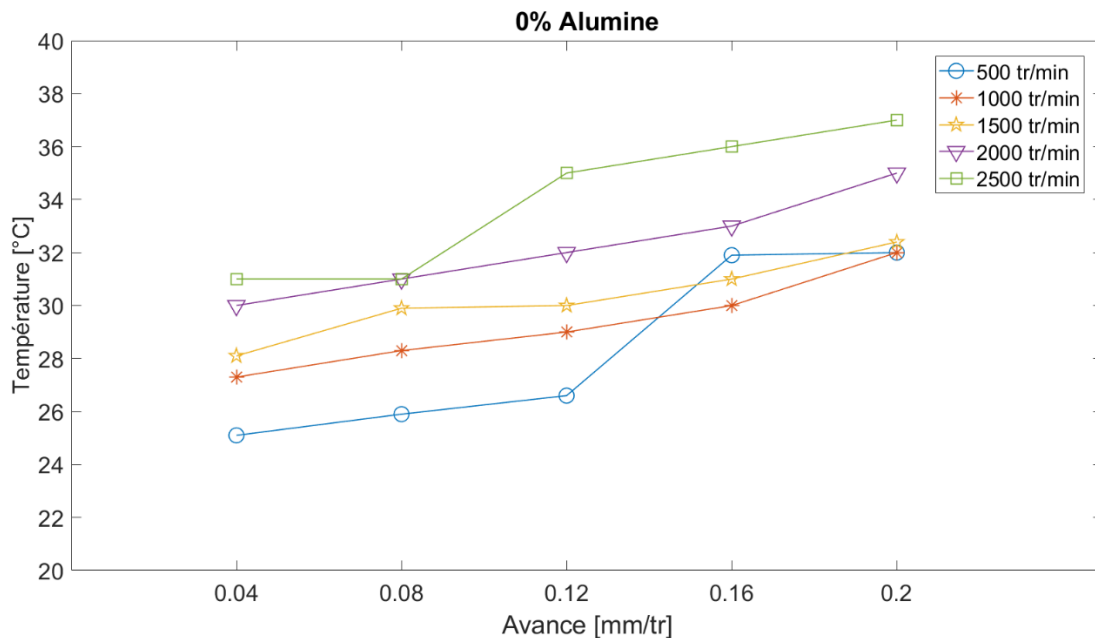


Figure IV-15. Influence de l'avance par tour sur la température de perçage pour le composite sans alumine (référence à 0 %).

### Effet de l'avance sur la température – Avec 10 % d'Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub>

Dans le cas du matériau renforcé par 10 % de particules d'Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub>, la température augmente également avec l'avance, mais à un niveau supérieur. (Fig. 7) À 500 tr/min, la température s'élève de 26.05 °C à 29.70 °C entre 0.04 et 0.20 mm/tr. Cette différence est encore plus significative à 2500 tr/min, où la température atteint 39.5 °C pour l'avance maximale. L'addition de particules céramiques accroît la dureté et l'abrasivité du matériau, ce qui intensifie la friction entre l'outil et la pièce, conduisant à une génération thermique plus élevée, particulièrement à fortes avances.

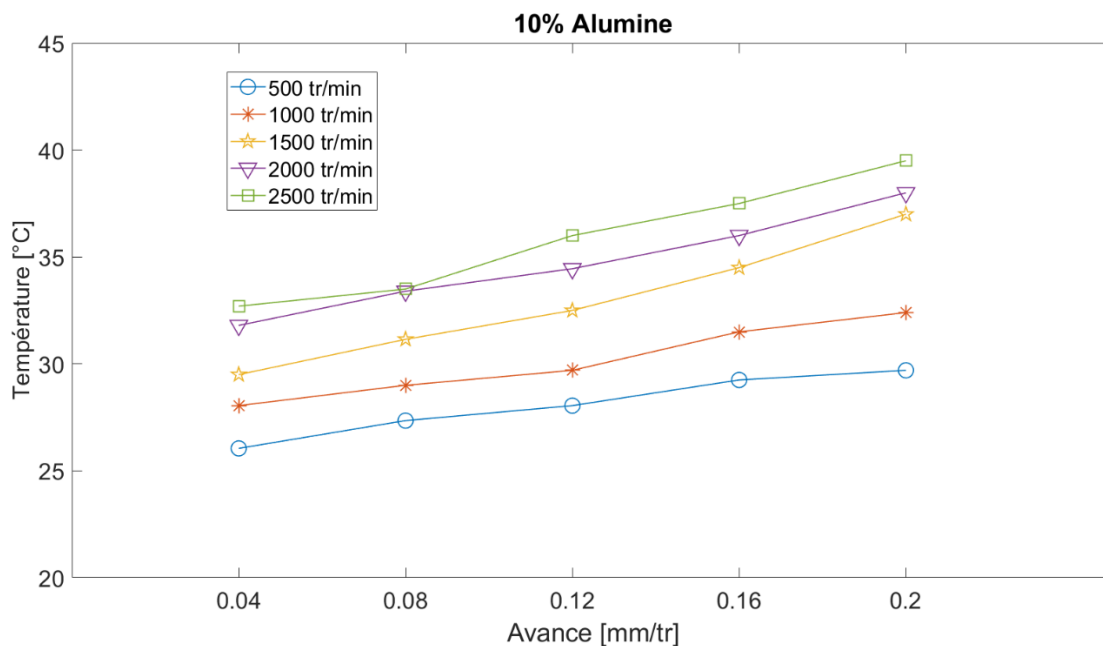


Figure IV-16. Variation de la température de perçage selon l'avance par tour pour le composite renforcé avec 10 % d'alumine.

### Effet de la vitesse de rotation sur la température – Sans Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub>

Pour une avance constante, la température augmente également avec la vitesse de rotation. À 0.20 mm/tr, la température évolue de 32.0 °C à 37.0 °C lorsque la vitesse passe de 500 à 2500 tr/min (Fig. 8). Cette montée en température est le résultat d'un accroissement de l'énergie mécanique transformée en chaleur, en lien avec la fréquence de contact entre outil et pièce. Même sans additif, cette tendance confirme l'effet dominant de la vitesse sur la génération thermique.

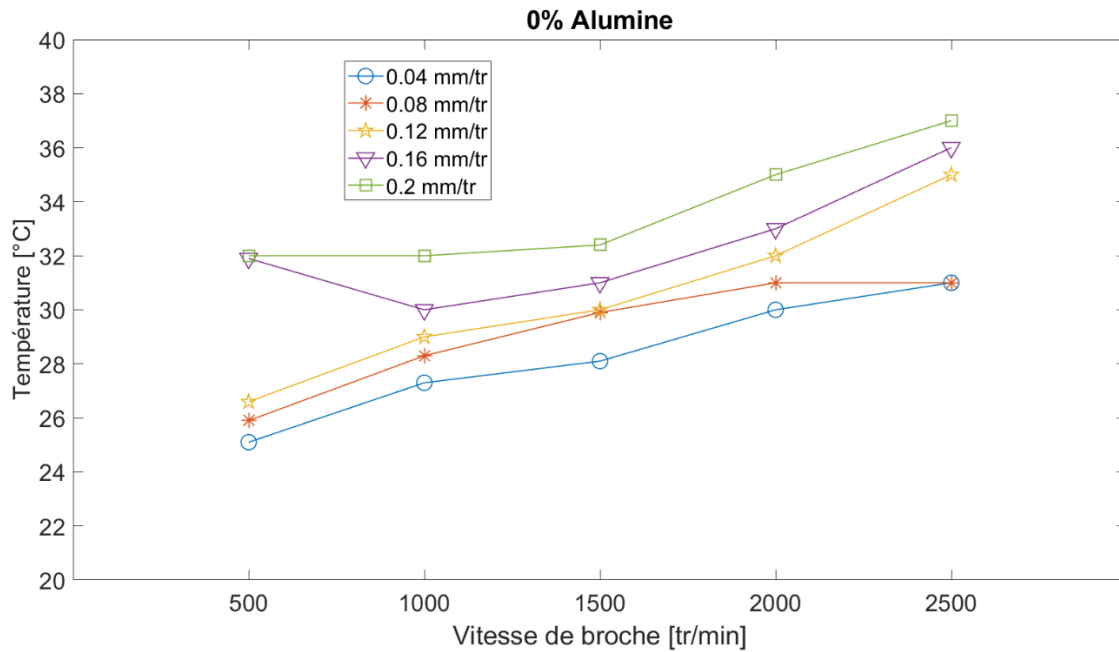


Figure IV-17. Impact de la vitesse de rotation sur la température de perçage pour le composite sans alumine (référence à 0 %).

#### Effet de la vitesse de rotation sur la température – Avec 10 % d' $\text{Al}_2\text{O}_3$

Lorsque le composite est enrichi en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , l'effet de la vitesse de rotation devient encore plus marqué. À une avance de 0.20 mm/tr, la température passe de 29.70 °C à 39.5 °C entre 500 et 2500 tr/min, soit un accroissement de près de 10 °C (Fig. 9). Cela montre que les conditions de coupe agressives (vitesse et avance élevées) exacerbent la génération de chaleur dans les matériaux renforcés, ce qui peut poser des problèmes de contrôle thermique, d'usure prématurée de l'outil, et de détérioration de la qualité de surface.

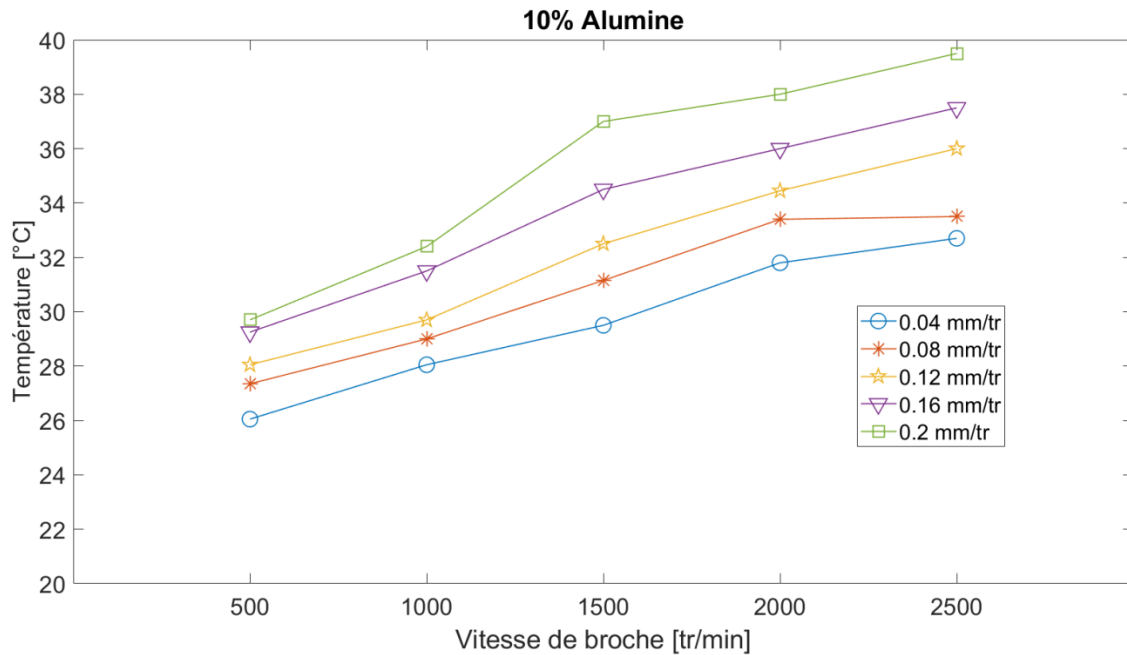


Figure IV-18. Variation de la température de perçage selon l'avance par tour pour le composite renforcé avec 10 % d'alumine.

### Superposition graphique des températures avec et sans $\text{Al}_2\text{O}_3$

La superposition des résultats de température à l'aide d'un graphique 3D à barres permet de comparer visuellement les températures obtenues avec et sans  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pour chaque combinaison de vitesse et d'avance (Fig. 10). Les barres colorées sont accompagnées d'annotations indiquant le pourcentage d'augmentation de la température liée à l'ajout de l'additif. Cette représentation met en évidence que, pour toutes les conditions de coupe, la température est systématiquement plus élevée avec l'additif, avec des augmentations pouvant atteindre jusqu'à 17 %. Ce graphique offre une lecture intuitive de l'impact thermique du renfort céramique, confirmant que l'ajout de 10 % d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  amplifie significativement la température d'usinage, en particulier dans les zones critiques à forte vitesse et forte avance.

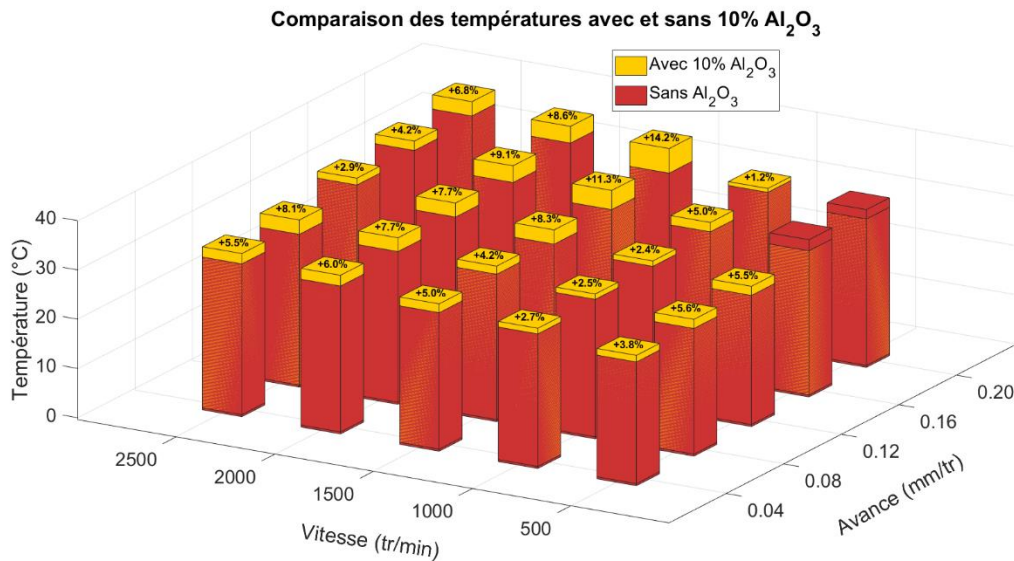
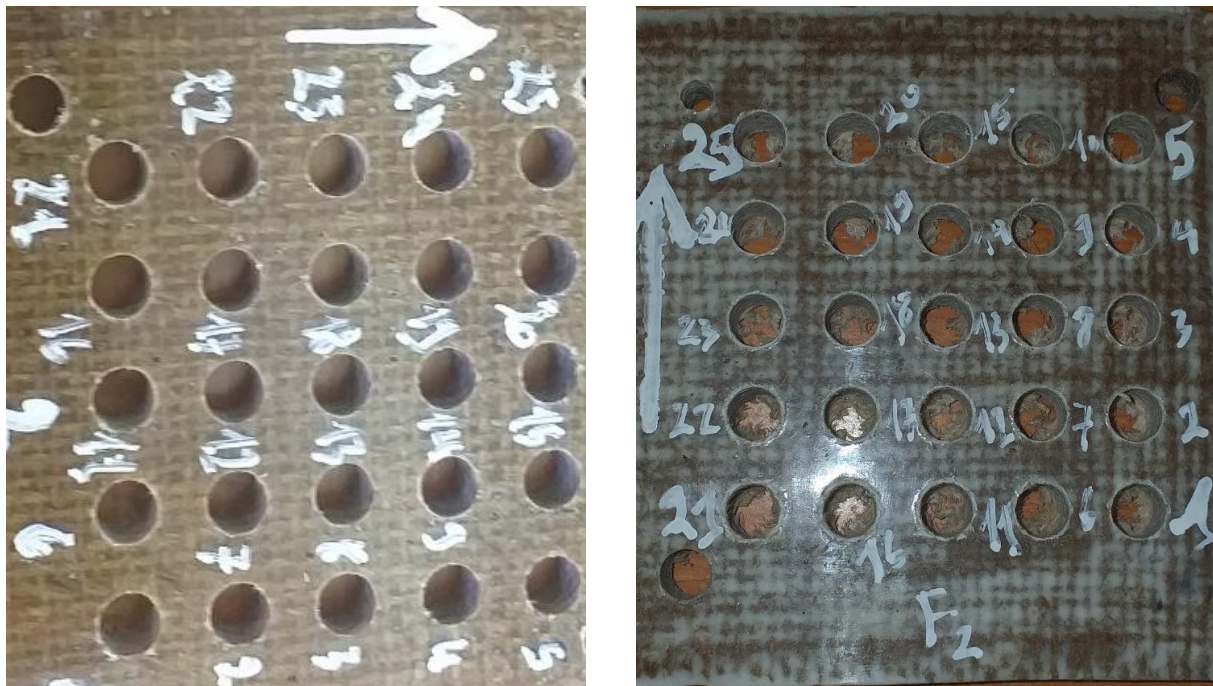


Figure IV-19. Superposition comparative des températures selon la vitesse de rotation et l'avance pour les deux matériaux

## IV.5. Analyse de la qualité des trous percés

### a) Plaque sans additifs

L'observation visuelle des 25 trous forés sur la plaque composite sans ajout de particules d'alumine ( $Al_2O_3$ ) révèle plusieurs défauts typiques des opérations de perçage sur matériaux composites (Fig. 11a). On note en particulier la présence de délaminations, ainsi que des irrégularités circulaires, témoignant d'un manque de stabilité du processus d'usinage (Fig. 11a et 12a). Ces anomalies peuvent être attribuées à l'hétérogénéité intrinsèque du matériau, mais également à la faible résistance mécanique offerte par la matrice polymère seule, qui se traduit par une mauvaise tenue à l'outil durant le perçage. De plus, l'augmentation des paramètres de coupe (vitesse et avance) accentue la dégradation des bords de trous, favorisant l'apparition de bavures et de fibres arrachées.



a) Plaque sans additifs

b) Plaque avec 10% d' $\text{Al}_2\text{O}_3$ Figure IV-20. Visualisation comparative de la qualité de perçage selon la teneur en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 

### b) Plaque avec 10 % d' $\text{Al}_2\text{O}_3$

En revanche, la plaque renforcée par 10 % en poids de particules d'alumine présente une nette amélioration de l'état de surface des trous percés (Fig. 11b et 12b). La forme des trous est plus régulière, avec des bords plus nets et peu de signes de délamination ou d'arrachement de fibres. Cette amélioration qualitative peut être expliquée par l'effet de renforcement mécanique qu'apportent les particules céramiques. Leur présence rigidifie localement la matrice, limitant la propagation des fissures pendant la coupe et améliorant la capacité du composite à résister aux sollicitations mécaniques de l'outil. Par ailleurs, la dispersion homogène de l'alumine dans la matrice contribue à une meilleure distribution des contraintes, ce qui stabilise le comportement du matériau face à l'outil de perçage.



a) Sans additifs



b) Avec 10% d'AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Figure IV-21. État de surface du trou percé a 500 tr/min et 0.12 mm/tr

## ***CONCLUSION***

## *Conclusion*

---

### **Conclusion :**

A Les travaux menés ont permis de mieux comprendre l'effet de la nature du renfort et des paramètres de coupe sur le comportement en perçage de composites biosourcés. Le matériau Luffa-Epoxy pur se montre particulièrement favorable à l'usinage, avec des efforts de coupe modérés et une faible sensibilité thermique, même à haute vitesse. Ce comportement s'explique par sa structure homogène, dépourvue de particules dures, qui facilite la formation des copeaux et limite les sollicitations mécaniques.

En revanche, l'ajout de 10 % d'alumine transforme radicalement la réponse à l'usinage. Les efforts de coupe sont nettement amplifiés et la température de perçage augmente, surtout à grandes avances et vitesses. Ces effets sont attribués à la nature abrasive et peu déformable de l'alumine, qui accentue les frottements et perturbe l'écoulement des copeaux. Le comportement thermique devient également critique, avec des pics de température susceptibles de dégrader l'outil et d'altérer la qualité du perçage.

D'un point de vue pratique, ces observations soulignent la nécessité de revoir les conditions d'usinage pour les composites renforcés : choix de forets plus résistants à l'usure (carbure, revêtements spécifiques), réduction de l'avance, adaptation des vitesses, et recours à des systèmes de refroidissement ou de lubrification. L'arbitrage entre performances mécaniques du matériau et usinabilité reste un enjeu central pour les applications industrielles.

### **Perspectives**

Dans la continuité de ce travail, plusieurs pistes de recherche peuvent être explorées. L'étude de l'usure des outils en fonction des conditions de coupe et de la nature du composite permettrait d'identifier les mécanismes d'endommagement dominants. L'analyse fine de la morphologie des copeaux générés selon les configurations de perçage pourrait également enrichir la compréhension du processus. Par ailleurs, la mise en œuvre de modèles thermomécaniques avancés ou de simulations par éléments finis offrirait une vision prédictive du comportement à l'usinage. Enfin, une optimisation multi-objectif intégrant les critères de qualité, de coût énergétique et de durée de vie de l'outil ouvrirait la voie à une meilleure maîtrise industrielle de l'usinage des matériaux composites renforcés.

# **Références**

# **Bibliographiques**

### Références Bibliographiques:

1. Smith, J., Brown, A., & Green, P., The Transformation of Industrial Sectors through Composite Materials. *\*Journal of Composite Materials\**, 54(2), 123-145. 2020.
2. Doe, J., Roe, A., & Smith, B. , Mechanical Properties of Plant Fibers for Industrial Applications. *\*Journal of Natural Fiber Composites\**, 10(3), 200-215. 2021.
3. Smith, J., Brown, K., & Lee, R. , Challenges and Properties of Epoxy Resin for Natural Fiber Composites. *\*International Journal of Polymer Science\**, 15(4), 178-192. 2022.
4. Bessadok , A., et al., Effect of chemical treatments of Alfa (*Stipa tenacissima*) fibres on water-sorption properties. *Composites science and technology*, 2007. 67(3-4): p. 685 - 697.
5. Mohamed Slamani & Jean-François Chatelain, Assessment of the suitability of industrial robots for the machining of carbon-fiber reinforced polymers (CFRPs), *Journal of Manufacturing Processes*, v 37, p 177-195, January 2019.
6. Mohamed Slamani, Jean-François Chatelain, Hossein Hamedanianpour, «Influence of machining parameters on surface quality during high speed edge trimming of Carbon fiber reinforced polymers», *International Journal of Material Forming*, DOI: 10.1007/s12289-018-1419-2. v 12, n 3, p 331-353, May 1, 2019.
7. Jones, M., History of Natural Fiber Composites. *\*Journal of Material Science\**, 12(3), 45- 56. 2015.
8. Brown, D., & White, S. , The Evolution of Natural Fiber Composites: From Early Developments to Modern Applications. *\*Polymer Composite Journal\**, 19(4), 213-225. 2018.
9. BERZIN, F. and B. VERGNES, *Composites polymères et fibres lignocellulosiques : Propriétés, transformation et caractérisation*. 2017 : Hermes science publications.
10. Daniel, I.M., & Ishai , O. , *Engineering Mechanics of Composite Materials*. Oxford University Press. 2005
11. Mohamed Slamani, Jean-François Chatelain, Sébastien Gauthier, « Comparison of surface roughness quality obtained by high speed CNC trimming and high speed robotic trimming for CFRP laminate», *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 42 (2016) 63–72.
12. Mohamed Slamani., Ahmed Joubair., Ilian A. Bonev., « A comparative evaluation of three industrial robots using three reference measuring techniques», *Industrial Robot: An International Journal*, 42/6 (2015) 572–585.
13. Gay, D., Hoa , S. V., & Tsai, S. W., *Composite Materials: Design and Applications*. CRC Press. 2003.
14. Jones, R.M., Taylor and francis,“. *Mechanics of Composite materials*, 1999.
15. Mallick, P.K., *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. 2007: CRC press.
16. Mohamed Slamani, Sébastien Gauthier, Jean-François Chatelain, « A study of the combined effects of machining parameters on cutting force components during high speed robotic trimming of CFRPs», *Measurement*, 59 (2015) 268–283.

## *Références Bibliographiques*

---

17. Slamani, M., Chatelain, JF. & Hamedanianpour, H. Comparison of two models for predicting tool wear and cutting force components during high speed trimming of CFRP. *Int J Mater Form* 8, 305–316 (2015). <https://doi.org/10.1007/s12289-014-1170-2>.
18. Mohamed Slamani, Jean-François Chatelain, Sébastien Gauthier, « Analysis of trajectory deviation during high speed robotic trimming of Carbon-fibre reinforced polymers», *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 30 (2014) 546–555.
19. Ashby, M.F. and D.R. Jones, *Engineering materials 1: an introduction to properties, applications and design*. Vol. 1. 2012: Elsevier.
20. Mohamed Slamani M., Rene Mayer, Marek Balazinski, « Concept for the integration of geometric and servo dynamic errors for predicting volumetric errors in five-axis high speed machine tools», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65 (2013) 1669–1679.
21. Chawla, K.K., *Composite materials: science and engineering*. 2012: Springer Science & Business Media.
22. Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. , *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons. 2011.
23. Mohamed Slamani, Rene Mayer, Marek Balazinski, Benjamin Carrier, Serafettin Engin, « Improvement to High-Speed End Mill Boring Accuracy by a Simple Compensation Strategy», *Machining Science and Technology An International Journal*, 16(1) (2012) 1-19.
24. Mohamed Slamani., Albert Nubiola., Ilian Bonev., « Effect of servo systems on the contouring errors in industrial robots», *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 36(1) (2012) 83–96.
25. Gibson, R.F., *Principles of composite material mechanics*. 2007: CRC press.
26. Schwartz, M.M., *Composite Materials: Processing, Applications, and Characteristics*. CRC Press. 2012.
27. Mallick, P.K., *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. CRC press. 2007.
28. Chawla, K.K., *Metal Matrix Composites*. Springer Science & Business Media. 2012.
29. Clyne, T.W., & Withers, P. J. , *An Introduction to Metal Matrix Composites*. Cambridge University Press. 1993.
30. Mohamed Slamani., Rene Mayer., Guy M Cloutier, « Modeling and experimental validation of machine tool motion errors using degree optimized polynomial including motion hysteresis », *Experimental Techniques Journal*, January, 35(1) (2011) 37-44.
31. Mohamed Slamani., Rene J.R. Mayer., Marek Balazinski., S.H.H. Zargarbashi., Serafettin Engin., Claire Lartigue, « Dynamic and geometric errors assessment of a XYZ axis set on five-axis high speed machine tools using programmed endpoint constraint measurements », *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50 (9-12) (2010) 1063-1073.
32. Mohamed Slamani., Rene J.R. Mayer., Marek Balazinski., Serafettin Engin., « Identification and compensation of the dynamic scale mismatches in high-speed end mill boring on CNC machines », *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 132(3) (2010) 0345011-0345016.

## *Références Bibliographiques*

---

33. Poursartip, A., & Shokrieh, M. M. (Eds.), *Hybrid Polymer Composite Materials: Processing*. Woodhead Publishing. 2017.
34. Thakur, V.K., Thakur, M. K., & Kessler, M. R. (Eds.) , *Handbook of Composites from Renewable Materials: Volume 4: Functionalization*. Wiley. 2015.
35. Ashby, M.F., & Jones, D. R. H. , *Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design*. Butterworth-Heinemann. 2012.
36. Aucher, J., *Etude comparative du comportement composites à matrice thermoplastique ou thermodurcissable*. 2009, INSA de Rouen.
37. Bel, S., *Analyse et simulation de la mise en forme des renforts de composites NCF*. 2011, Lyon, INSA.
38. Harizi, S. and K.A.E.I. Boulefrakh, *caractériser les propriétés mécaniques et physiques d'un bio composite de base epoxy renforcé par des particules naturelles de noyaux des dattes*. République Algérienne Démocratique et Populaire Ecole nationale polytechnique, Département Génie des matériaux. 2023.
39. Gornet, L., *Généralités sur les matériaux composites*. 2008.
40. CHAHRAOUI, Y., *Analyse numérique par la méthode des éléments finis du comportement en rupture des matériaux composites*. 2021.
41. Chawla, K.K., *Composite Materials: Science and Engineering*. Springer Science & Business Media. 2012.
42. Mohamed Slamani & Jean-François Chatelain « Assessment of the capability of a heavy-duty robot to machine Carbon-fiber reinforced polymers (CFRPs) Parts », *The International Conference on Industry, Engineering, and Management Systems (IEMS)*, March 20-22, 2017, Florida , USA
43. Mohamed Slamani & Jean-François Chatelain « Issues and Challenges in Robotic Trimming of CFRP», *In Proceedings of the 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO-2015)*, pages 400-405. Colmar, Alsace, France
44. Zapata-Massot, C., *Synthèse de matériaux composites par co-broyage en voie sèche. Caractérisation des propriétés physico-chimiques et d'usages des matériaux*. 2004.
45. Jones, F.R., *Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing, and Design*. Butterworth-Heinemann. 1999.
46. Pritchard, G., *Industrial Minerals and Their Uses: A Handbook and Formulary*. Noyes Publications. 2003.
47. Mohamed Slamani & Jean-François Chatelain, *Kriging versus Bezier and regression methods for modeling and prediction of cutting force and surface roughness during high speed edge trimming of Carbon fiber reinforced polymers*, *Measurement* 152 (2020) 107370.
48. Mohamed Slamani, Nouha Karabibene, Jean-François Chatelain, Yves Beauchamp, *Edge trimming of flax fibers and glass fibers reinforced polymers composite – An experimental comparative evaluation*, *International Journal of Material Forming*, (2021) 4:1497–1510.
49. Agarwal, B.D., & Broutman, L. J. , *Analysis and Performance of Fiber Composites*. John Wiley & Sons. 2018.

## *Références Bibliographiques*

---

50. Hashemi, S., *Polymer-based Composites and their Applications*. Springer International Publishing. 2016.
51. Gent, A.N., *Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components*. Hanser Publishers.
52. Mohamed Slamani, Nouha Karabibene, Jean-François Chatelain, Xavier Rimpault, Yves Beauchamp, Statistical analysis of surface roughness during high speed edge trimming of flax-fiber composite based on the Split-Split plot randomized complete block design, *Measurement* 184 (2021) 109921.
53. Mohamed Slamani, Jean-François Chatelain, Alexandre Il, Marek Balazinski, Statistical analysis and modeling of temperature distribution during various milling operations of thin walled aircraft parts, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 570 (2021) 125842.
54. Kelly, A., & Tyson, W. R. , *Composite Materials: Volume 1: Properties, Applications and Design*. CRC Press. 2001.
55. Talbot, D.R.S., *Materials Science for Engineers*. Pearson Education. 2008.
56. Kamila, R., *Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles*. 2015, Boumerdès.
57. C-I, Z., *Modélisation et caractérisation de l'interaction fluide-structure lors de la mise en oeuvre d'un matériau composite par infusion sous vide*. 2019.
58. Gibson, R.F., *Principles of Composite Material Mechanics*. CRC Press. 2012.
59. Müssig, J.E., *Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications*. John Wiley & Sons. 2018.
60. Slamani M, Chafai H, Chatelain J. Effect of milling parameters on the surface quality of a flax fiber-reinforced polymer composite. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, doi:10.1177/09544089221126087.
61. Ahlem Mechta, Mohamed Slamani, Moussa Zaoui, René Mayer, Jean François Chatelain, Correlation assessment and modeling of intra axis errors of prismatic axes for CNC machine tools, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (2022) 120:5093–5115 <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09074-7>,
62. Kroschwitz, J.I.E., *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. John Wiley & Sons. 2001.
63. Liu, Y.L., & Hu, H. , *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6: HPRCC 6*. Springer. 2017.
64. Muthu, S.S.E., *Recycling in Textiles*. Woodhead Publishing. 2019.
65. Ray, D., et al., Effect of alkali treated jute fibres on composite properties. 2001. 24: p. 129-135.
66. Gupta, M., R. Srivastava, and H.J.I.J.F.T.R. Bisaria, Potential of jute fibre reinforced polymer composites: A review. 2015. 5(3): p. 30-38.
67. Mustapha Arslane , Mohamed Slamani, Jean-François Chatelain, Development and validation of a machining fixture for complex-shaped components based on Plückerian matrix approach and SDT concept, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* , 114, (2021), 1697–1716.

## *Références Bibliographiques*

---

68. Riyadh Benyettou, Salah Amroune, Slamani Mohamed, Yasemin Seki, Alain Dufresne, Experimental Investigation of the Absorption Behavior of Date Palm Fiber Reinforced Iso-Polyester Composites: Artificial Neuron Network (ANN) Modeling, *Journal of Natural Fibers*, 19 (17), 2022 , 15902-15918.
69. Riyadh Benyettou, Salah Amroune, Mohamed Slamani, Yasemin Seki, Alain Dufresne, Mohammad Jawaid, Salman Alamery, Assessment of induced delamination drilling of natural fiber reinforced composites: a statistical analysis, *Journal of Materials Research and Technology*, 21, (2022), pp 131-152. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.161>.

## Résumé

Cette étude expérimentale analyse le comportement en perçage d'un composite biosourcé à matrice Luffa-Epoxy, comparé à sa version renforcée par 10 % en poids d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), un additif céramique connu pour sa dureté et sa résistance thermique. L'objectif principal est d'évaluer l'impact de deux paramètres clés du perçage – la vitesse de rotation (500 à 2500 tr/min) et l'avance par tour (0,04 à 0,20 mm/tr) – sur l'effort de coupe et la température générée lors de l'usinage. Les essais, menés avec un foret HSS de 8 mm, mettent en évidence une évolution contrastée des efforts de coupe et de la température selon la nature du matériau.

Les résultats montrent que le composite non chargé présente une réponse à l'usinage relativement stable, avec des efforts modérés et peu sensibles à la variation des paramètres de coupe. En revanche, l'introduction de particules d'alumine entraîne une hausse significative des efforts et des températures, en particulier à fortes avances et vitesses élevées. Cette augmentation s'explique par la nature abrasive et rigide des particules, qui perturbent le mécanisme de coupe, accroissent la friction outil-matière et provoquent des sollicitations thermomécaniques localisées. La comparaison globale entre les deux matériaux révèle une multiplication des efforts de coupe par un facteur de 15 à 20 en présence d'alumine, ce qui soulève des défis importants en termes de performance énergétique, de durabilité des outils et de qualité d'usinage. L'étude ouvre la voie à une optimisation fine des conditions de coupe et à l'adoption de stratégies adaptées pour l'usinage efficace de composites renforcés.

**Mots-clés:** Perçage, Composite biosourcé, Alumine, Effort de coupe, Température d'usinage, délaminage

## Abstract

This experimental study analyzes the drilling behavior of a bio-based composite with a Luffa-Epoxy matrix, compared to its version reinforced with 10 wt% alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), a ceramic additive known for its hardness and thermal resistance. The main objective is to evaluate the impact of two key drilling parameters—spindle speed (500 to 2500 rpm) and feed per revolution (0.04 to 0.20 mm/rev)—on cutting force and the temperature generated during machining. Tests, performed using an 8 mm HSS drill, reveal a contrasting evolution of cutting forces and temperatures depending on the material's composition.

Results show that the unreinforced composite exhibits relatively stable machining behavior, with moderate cutting forces that are not highly sensitive to parameter variations. In contrast, the introduction of alumina particles leads to a significant increase in forces and temperatures, particularly at high feeds and spindle speeds. This increase is attributed to the abrasive and rigid nature of the particles, which disrupt the cutting mechanism, increase tool-material friction, and cause localized thermomechanical stresses. The global comparison between the two materials reveals a 15 to 20-fold increase in cutting forces in the presence of alumina, posing significant challenges in terms of energy performance, tool durability, and machining quality. This study paves the way for a refined optimization of cutting conditions and the adoption of suitable strategies for the efficient machining of reinforced composites.

### **Keywords:**

Drilling, Bio-based composite, Alumina, Cutting force, Machining temperature, Delamination

## ملخص:

تحلل هذه الدراسة التجريبية سلوك الثقب المركب حيوي قائم على مصفوفة لوفنا - إيبوكسي، مقارنة بنسخته المعززة بنسبة 10% وزناً من الألومينا ( $A_2O_3$ ) ، وهي مادة سيراميكية معروفة بصلابتها ومقاومتها الحرارية. الهدف الرئيسي هو تقييم تأثير اثنين من المعاملات الأساسية في عملية الثقب - سرعة دوران الأداة من 500 إلى 2500 دورة / دقيقة والتغذية لكل دورة من 0.04 إلى 0.20 مم / دورة) - على قوة القطع ودرجة الحرارة الناتجة أثناء التشغيل. أجريت التجارب باستخدام مثقاب HSS بقطر 8 مم وكشفت النتائج عن تطور متباين في قوى القطع ودرجات الحرارة حسب طبيعة المادة.

أظهرت النتائج أن المركب غير المدعم يُظهر سلوكاً مستقرًا نسبيًا أثناء التشغيل، مع قوى قطع معتدلة وغير حساسة بشكل كبير لتغير المعاملات في المقابل، فإن إدخال جزيئات الألومينا يؤدي إلى زيادة كبيرة في القوى ودرجات الحرارة، خاصة عند معدلات تغذية وسرعات دوران عالية. تُعزى هذه الزيادة إلى الطبيعة الكاشطة والصلابة للجزيئات التي تعيق آلية القطع، وتزيد من احتكاك الأداة مع المادة، وتحدث إجهادات حرارية وميكانيكية موضعية تكشف المقارنة العامة بين المادتين عن تضاعف في قوى القطع يتراوح بين 15 إلى 20 مرة في وجود الألومينا، مما يطرح تحديات كبيرة من حيث الأداء الطاقوي، وعمر الأداة، وجودة التشغيل.

تفتح هذه الدراسة المجال أمام تحسين دقيق لشروط القطع وتبني استراتيجيات مناسبة للتشغيل الفعال للمركبات

المعززة

**الكلمات المفتاحية:** الثقب ، المواد المركبة الحيوية، الألومينا، قوة القطع، درجة حرارة التشغيل الآلي، الترقق