

718

جامعة 08 ماي 1945 قالمة

كلية العلوم والتكنولوجيا

Université du 8 mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



Mémoire de fin d'étude

Présenté par : Redjaimi Djihad

Master

Option :Maintenance Industriel

=====

***ETUDE DU FINIE DE SURFACE ET ANALYSE
VIBRATOIRE LORS DE LA COUPE DES MATERIAUX
COMPOSITES***

=====

Sous la direction de : Dr. KHETTABI Riad

Pr. FATMI Louendi

Année universitaire 2016/2017

Remerciements



Je remercie dieu de m'avoir donné la force et le courage ainsi que la volonté d'effectuer mon projet de fin cycle.

Je souhaite en premier lieu remercier les encadreurs, **Pr. FATMI LOUENDI** et **KHETTABI RIAD**, pour leur relecture, l'attention qu'ils ont portée à ces travaux, et leurs remarques et questions précises et constructives. Je remercie aussi chaleureusement.

J'adresse aussi à tous les enseignants de notre département de Génie mécanique de m'avoir apporté leur soutien pour réaliser ce travail.

J'exprime toute mes gratitude et mes remerciements à mes parents et toute ma famille pour leurs encouragements.

REJAIMI DJIHAD

Table des matières	
Résumé	4
Introduction générale	5
Problématique	6
Objectifs	6
Méthodologies	6

Chapitre 01 : Généralités

1. 1 Généralité sur l'analyse vibratoire	8
1.1.1 L'analyse vibratoire	8
1.1.2 Caractérisation par analyse vibratoire	8
a) Caractéristiques modales	8
b) Les caractéristiques sur la base d'Ondelettes	8
1.1.3 Domaine d'utilisation	9
✓ Véhicule	9
✓ Machine tournantes	10
✓ Milieu du travail industriel	11
1.1.4 Les indicateurs scalaires	12
a) Kurtosis	12
b) Facteur de Crête (FC)	12
c) Valeur efficace RMS (Root Mean Square)	13
d) Crête-à-Crête (C-à-C)	13
e) La valeur crête	13
f) Facteur K (FK)	13
1. 2 Généralité sur l'usinage	13
1.2.1 Définition de l'usinage	14
1.2.2 Principe [12]	14
1.2.3 Outils de coupe	14
• Tournage	14
• Fraisage	15
• Perçage :.....	16
❖ Classification des matériaux des outils de coupe	16
❖ Influence de la température sur les matériaux des outils	18
❖ Différentes formes d'usure des outils	19
1.2.4 Procédés d'usinage	20
❖ Tournage	20

❖ Perçage.....	22
❖ Fraisage.....	23
❖ Brochage	25
1.2.5 Formation de copeau	26
1.2.6 Usinage à grande vitesse.....	26
❖ Définition de l'usinage à grande vitesse / UGV	26
❖ Principe physique.....	27
❖ Avantage de l'UGV	27
❖ Problèmes liés à l'UGV	27
1.2.7 Usinage des composite	27
1.2.8 Analyse des défauts d'usinage des composites	27
1.2.9 Paramètres d'amplitude de rugosité	28
1.3 Généralité sur les matériaux composites.....	29
1.3.1 Matériau composites.....	29
1.3.2 Constituants.....	29
1.3.3 Types de matériaux composites structuraux.....	30
1.3.4 Les raisons de l'utilisation des composites.....	30
1.3.5 Mécanismes d'endommagement des matériaux composites	30
Synthèse Bibliographique	33

Chapitre 02 : Matériel utilisé et résultats obtenus

2.1 Banc d'essai.....	37
2.2 Matériau utilisé	38
2.3 Outils de coupe utilisés.....	38
2.4 Mesures réalisées	38
2.4.1 Rugosité.....	38
2.4.2 Vibrations	39
2.5 Méthodes et outils d'analyses	39
2.6 Optimisation des paramètres de coupe par Désigne expert.....	40
2.7 Résultats obtenus.....	40
2.7.1 Signaux vibratoires	40
2.7.2 La rugosité.....	41
2.8 Méthode et outils d'analyse Design expert 10.....	42

Chapitre 03 : Analyse des résultats

3.1 Vérification de la validité des modèles :.....	44
3.2 Analyse ANOVA de la rugosité.....	45
3.2.1 L'analyse ANOVA de la rugosité (Ra).....	45

3.2.2	L'analyse ANOVA de la Rp	48
3.3	<i>Analyse ANOVA des signaux de vibrations</i>	50
3.3.1	L'analyse ANOVA de l'Rms z	50
3.3.2	L'analyse Analyse ANOVA de Vcx	53
3.3.3	L'analyse ANOVA de Vcy :	55
3.3.4	L'analyse ANOVA de Vcz :	58
3.3.5	L'analyse ANOVA de E y :	61
3.3.6	L'analyse ANOVA de Kx :	63
	<i>Corrélation entre Rugosité et Vibration</i>	66
	<i>Conclusion générale</i>	66
	<i>Références</i>	69

Résumé

Le présent travail consiste à intégrer l'analyse vibratoire lors de l'usinage des composite renforcés de fibres de verre E afin d'optimiser l'usinabilité en terme de qualité des pièces usinées.

Afin de répondre à ces exigences, nous avons procédé à une étude bibliographique détaillée sur l'usinage d'une part et sur l'analyse vibratoire d'autre part. Les caractéristiques mécaniques de la machine-outil utilisée ont permis de dégager un plan d'expérience à dix-sept essais. L'application d'un ensemble d'outils d'analyse statistique a conduit à l'optimisation des paramètres de coupe V_c , a_p et f_z .

L'usinage du matériau considéré à l'aide des paramètres coupe optimisés a conduit aux mesures d'une part de la rugosité et d'autre part des signaux vibratoires selon les 3 directions.

L'introduction des signaux de vibrations obtenus par un programme élaboré sous Matlab a permis de calculer les indicateurs scalaires R_{ms} , V_{c_x} , V_{c_y} , V_{c_z} , E_y , K_x .

Les rugosités mesurées et les indicateurs scalaires calculés ont servi comme données de base pour le Logiciel d'analyse statistique Design expert.

L'élaboration des modèles empiriques et l'évolution de la combinaison des différents paramètres pris en considération sont obtenues par l'exploitation du Logiciel Design expert. Il a été obtenu que l'analyse vibratoire puisse servir à identifier certains défauts de surface lors de l'usinage.

Introduction générale

L'utilisation des composites renforcés en fibre de verre largement répandu en industrie automobile, aéronautique, aérospatial, naval et plusieurs secteurs en génie électrique, ainsi que d'autres domaines, connaît de plus en plus une implication grandissante. Ces matériaux possèdent de nombreux avantages et permettent aux industries de répondre aux attentes des utilisateurs, et aux nouvelles contraintes techniques et réglementaires. Ces matériaux offrent la bonne résistance à la fatigue et à la corrosion, et épousent des formes de plus en plus compliquées et offrent l'avantage de légèreté par rapport aux matériaux métalliques. Malgré tous les avantages des zones d'ombre restent inexploitées et surtout leur comportement après usinage en termes d'état de surface et de vibrations. Bien que, les éléments du renfort jouent un rôle important sur l'amélioration des propriétés mécaniques, ils sont, généralement, néfastes sur la dégradation des outils de coupe et sur la qualité de la surface des pièces usinées. Plusieurs travaux de recherche tentent d'optimiser les conditions de coupe lors de l'usinage de matériaux composites afin de développer des indicateurs de performances en usinage. La quasi-totalité de ces travaux se consacre à des études expérimentales basées sur des conditions conventionnelles ou traditionnelles de caractérisation. L'intégration de certains outils nouveaux, comme l'analyse vibratoire peut être considérée comme un nouvel indicateur dans le but d'améliorer la qualité des pièces usinées.

Le présent travail traite l'usinage des composites en se servant du procédé de fraisage dont le but d'étudier d'une part l'état de surface à obtenir et d'autre part à recueillir les signaux de vibrations engendrés lors de l'usinage afin de dégager certains indicateurs scalaires. Ces indicateurs permettent d'avoir une idée de l'impact des conditions d'usinage sur l'état de surface obtenus et l'effet des vibrations. Les signaux vibratoires peuvent servir au même temps comme indices de qualité des pièces usinées en termes de rugosité de surface.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons jugé utile d'organiser notre travail et les résultats obtenus dans ce mémoire en trois chapitres en plus une introduction générale, une conclusion générale et des références bibliographiques.

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art et à l'étude bibliographique sur les matériaux composites, des notions générales sont présentées sur les procédés d'usinages et sur les vibrations qui peuvent être engendrées.

Le deuxième chapitre est réservé aux matériels utilisés, aux méthodes et outils d'analyse, ainsi qu'aux résultats obtenus.

Le troisième chapitre représente une analyse des résultats obtenus. Le mémoire est terminé par une conclusion générale et des références bibliographiques.

Problématique

Les composites sont des matériaux prometteurs du point de vue propriétés mécaniques, résistances à l'usure et à la corrosion. Cependant, la coupe de ce type de matériau présente des difficultés sérieuses qui se traduisent par l'usure des outils et surtout la dégradation de l'état de surface des pièces produites.

Objectifs

Analyser les défauts des pièces de matériau composite

Identifier les paramètres de coupe responsable à ces défauts

Utiliser l'analyse vibratoire afin de détecter les différents défauts

Développer des stratégies de coupe afin d'éviter la génération des défauts en se servant de l'analyse vibratoire.

Méthodologies

Proposer un plan d'expérience.

Proposer un montage qui permet l'analyse vibratoire et la mesure de la rugosité.

Réaliser des essais de coupe sur des matériaux composite sélectionnés.

Inspecter les pièces et les outils de coupe afin d'identifier les défauts structuraux et l'usure produite.

Analyse des résultats.

Chapitre 01 : Généralités

1. 1 Généralité sur l'analyse vibratoire

1.1.1 L'analyse vibratoire

L'analyse vibratoire intervient souvent en complément de la mesure acoustique ou thermique, pour en préciser le diagnostic. Il s'agit d'analyser les vibrations émises par la machine pour détecter et identifier des défauts de fonctionnement. L'analyse vibratoire permet, par exemple, de déceler des défauts de serrage, des arbres de transmission désalignés ou encore des courroies endommagées. Les vibrations sont captées grâce à différents dispositifs, généralement non intrusifs : accéléromètres (capteurs d'accélération ou de rotation), vibromètres laser, enregistreurs numériques ou encore analyseurs de spectres. Elles peuvent être mesurées de différentes façons : amplitude, niveau acoustique (décibels) ou encore fréquence hertz [1].

1.1.2 Caractérisation par analyse vibratoire

a) Caractéristiques modales

Les méthodes d'analyse modale sont des méthodes d'investigation relativement récentes, qui ont été mises en œuvre pour établir et (ou) améliorer la connaissance du modèle dynamique des structures réelles. En effet, les paramètres significatifs permettant de représenter le comportement dynamique d'une structure linéaire quelle que soit sa complexité. Ils sont « concentrés » dans un nombre de paramètres modaux réduits : fréquences propres, amortissements et formes propres associés. Le comportement dynamique de la structure sous des conditions d'excitation particulières en l'absence de toute modélisation ne requiert que la connaissance de ces paramètres. C'est la raison pour laquelle l'analyse modale expérimentale est devenue grâce aux progrès de l'informatique et de l'instrumentation, une méthode privilégiée d'investigation dans le domaine de la dynamique des structures. On distingue deux grandes familles : les méthodes opérant dans le domaine temporel et celles opérant dans le domaine fréquentiel [2].

b) Les caractéristiques sur la base d'Ondelettes

L'analyse de signaux vibratoires sur la base d'ondelettes a été introduit en 1994 par Newland D.E [3, 4] ([NEW 94a]). L'ondelette harmonique complexe (partie réelle et partie imaginaire) la transformée de Fourier est généralement une "porte" passe-bande. Dans ce travail, l'analyse de mesures vibratoires est issues d'un bâtiment soumis à différentes excitations (métro et routes) [3, 4] ([NEW 94b]), la synthèse des signaux à partir de leurs coefficients d'ondelettes de Daubechies a permis la détection de corrélations vibratoires entre les différents étages ainsi que l'évaluation de l'excitation due au passage de la rame à la jonction des rails. La représentation temps-fréquence à partir d'une analyse en ondelettes harmoniques mise en évidence des modes de torsion dans les vibrations d'une poutre excitée par marteau de choc, des vitesses de propagation différentes dans un guide d'onde ainsi que les différentes réflexions (par la cartographie temps-fréquence de la phase), du caractère haute fréquence (>500 Hz) du contact roue-rail d'une rame de métro dans un virage et constitue une nouvelle approche dans l'analyse de phénomènes sismiques. Par extension des travaux de Newland, Gaul L et Hurlbauss S [5] ([GAU 97]) appliquent l'analyse en ondelettes (de Gabor) continue sur des signaux temporels, mesurés par plusieurs capteurs piézo-électriques disposés parallèlement aux bords d'une plaque isotrope, pour la détermination du point d'impact. Cette méthode expérimentale utilise les maxima de la représentation temps-fréquence qui correspondent à

l'arrivée d'un groupe d'ondes de flexion propagative incidentes (grandes valeurs des coefficients et principalement basses fréquences) sur les différents capteurs. La résolution du système d'équations non linéaires dont les inconnues sont sur les différents capteurs. La résolution du système d'équations non linéaires dont les inconnues sont la célérité de propagation, le décalage temporel (le temps de parcours) et la position par la méthode de Gauss-Newton conduit alors à une localisation satisfaisante de l'impact sans avoir recours aux propriétés physiques de la plaque [3].

La représentation temps-échelle par analyse en ondelettes est aussi utilisée pour l'extraction de caractéristiques comme l'amortissement et les fréquences propres de systèmes non-linéaire.

La première étape consiste à analyser la réponse impulsionnelle du système par transformation en ondelettes (multiplication dans l'espace de Fourier), à calculer la résolution fréquentielle des ondelettes pour le découplage des modes (dépendant de la résolution de la réponse) et à extraire la transformée de chacun des modes découplés [3].

La deuxième étape est la détermination du système : structuration du squelette (représentation temporelle) de la transformée en ondelette à partir des maxima locaux (ou ridge) de la représentation temps-échelle, calcul de la fréquence instantanée et de l'enveloppe instantanée du squelette (backbone). L'épaisseur et l'amortissement sont les caractéristiques obtenues à partir de cette représentation fréquence-amplitude (backbone). La méthode est aussi applicable à des systèmes à un ou à plusieurs degrés de liberté sauf qu'il faut signaler des sérieuses difficultés de la grande sensibilité aux bruits dans les signaux analysés [3].

1.1.3 Domaine d'utilisation

✓ Véhicule

L'analyse vibratoire est souvent utilisée dans le domaine des véhicules. Dans une étude de recherche, Les mesures de vibrations ont été réalisées en fixant des accéléromètres à des endroits spécifiques au plancher des différents types de véhicules pour permettre l'évaluation des différents modes vibratoires requis [6].

Pour les autobus urbains, les chenillettes de déneigement et les chariots élévateurs à conduite assise, un accéléromètre tri-axial est fixé à l'aide d'un aimant sur une partie rigide à proximité de la base de fixation du siège du conducteur. Les trois mesures résultantes, représentées par les numéros 1, 2 et 3 dans la figure 1.1, représentent les modes vibratoires selon les trois directions suivantes [6] :

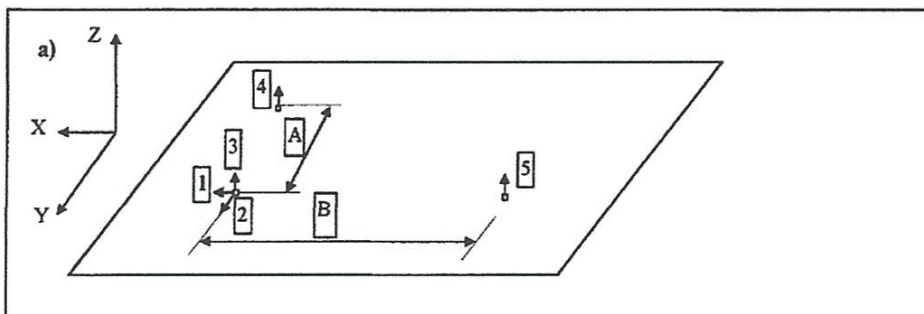


Figure 1-1 : Identification de l'emplacement et de la direction des points de mesure, a) Vue de dessus [6].

- #1 : Axe x : direction avant-arrière ;
- #2 : Axe y : direction latérale ;
- #3 : Axe z : direction verticale.

De plus, deux accéléromètres linéaires additionnels orientés en direction de l'axe z sont aussi fixés au plancher des véhicules, en les positionnant de sorte à pouvoir déterminer les accélérations angulaires de roulis et de tangage des véhicules. En se référant aux figures 1a et 1b, ceci est accompli en fixant l'accéléromètre représenté par le numéro 4 directement en ligne avec le numéro 3, mais en les séparant par une distance A, permettant ainsi la détermination des mouvements de roulis(ϕ). Le tangage(θ) est quant à lui déterminé en fixant un accéléromètre linéaire représenté par le numéro 5 directement en ligne avec le numéro 3, les deux étant séparés par une distance B (figure 1.1). Les accélérations angulaires de roulis ($\ddot{\phi}$) et de tangage ($\ddot{\theta}$) sont ainsi déterminées en effectuant les opérations suivantes sur les signaux vibratoires enregistrés dans le temps [6] :

- $\ddot{\phi} = \frac{\ddot{z}_4 - \ddot{z}_3}{A}$ (rad/s²) équation (1.1)

- $\ddot{\theta} = \frac{\ddot{z}_3 - \ddot{z}_5}{B}$ (rad/s²) équation (1.2)

Où \ddot{z}_3 ; \ddot{z}_4 ; \ddot{z}_5 , représentent les accélérations vibratoires verticales mesurées aux points 3, 4 et 5 respectivement. Il en résulte donc que pour les autobus urbains, les chenillettes de déncigement et les chariots élévateurs à conduite assise, les mesures sont réalisées en contrôlant simultanément cinq canaux de mesure représentés par les numéros 1 à 5 figure 1-1 [6].

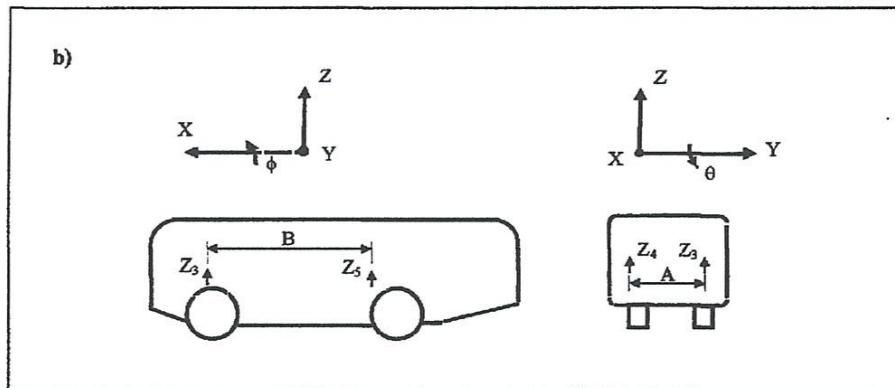


Fig-1-1 : Identification de l'emplacement et de la direction des points de mesure, b-Vue de côté [6].

✓ Machine tournantes

Toutes les machines en service génèrent des vibrations témoignées par les images des efforts dynamiques engendrés par les pièces en mouvement. Il est évident qu'une machine neuve d'excellent état de fonctionnement doit produire très peu de vibrations. La dégradation et l'amortissement du fonctionnement conduit le plus souvent à une augmentation du niveau des

vibrations. En observant l'évolution de ce niveau, il est par conséquent possible d'obtenir des informations très utiles sur l'état de la machine. Ces vibrations occupent une place privilégiée parmi les paramètres à prendre en considération pour effectuer un diagnostic. La modification de la vibration d'une machine constitue souvent la première manifestation physique d'une anomalie, cause potentielle de dégradations, voire de pannes. Ces caractéristiques font de la surveillance par analyse vibratoire, un outil indispensable pour une maintenance moderne, puisqu'elle permet, par un dépistage ou un diagnostic approprié de défauts, d'éviter la casse et de n'intervenir sur une machine qu'au bon moment et pendant des arrêts programmés de production [7].

✓ **Milieu du travail industriel**

Les applications industrielles de la surveillance vibratoire des équipements en fonctionnement sont diversifiées, que ce soit pour des structures mécaniques complexes (plate - formes, pont, barrages, bâtiments,...) ou les machines (turbo - alternateurs, système d'engrenage,...) ou certains organes des machines de productions (roulements, pignons, rotors, ...etc.) contenant la signature cinématique de la machine, reliée aux conditions de fonctionnement [8].

Les techniques de l'analyse vibratoire, permettent à tout industriel qui les met en application :

- de connaître à tout moment « l'état de santé » de ces machines et d'estimer la longévité potentielle des différents composants et ainsi prévenir l'usure prématurée des différentes pièces ;
 - Pour un équipement neuf, l'analyse vibratoire permet la détection d'anomalies ou défauts de montage - sources potentielles de pannes- pratiquement indécélables par d'autres techniques d'investigation ;
 - Pour un équipement venant de faire l'objet d'une remise en état, l'analyse vibratoire vérifie si cette opération a bien corrigé les anomalies identifiées ayant conduit à la prise de décision d'arrêt ou, au contraire, a généré un autre comportement anormal susceptible d'induire, à brève échéance, une nouvelle panne (maintenance mal adaptée).
- d'en déduire l'évolution de l'état de santé pour les semaines ou les mois à venir et de faire des prévisions sur leur destin : faire un bilan de santé ;
- d'enrichir et affiner les informations juste et pertinentes nécessaires pour la maîtrise des risques ;
- d'évaluer avec précision le niveau de vibration aux endroits envisagés pour l'utilisation d'équipements sensibles et ainsi évaluer l'emplacement idéal d'un équipement requérant un faible niveau de vibrations,
- Améliorer l'environnement de travail.

Les avantages suivants peuvent être perçus :

- éviter la casse des machines (vrais pour plus de 90 des cas) ;
- éviter les arrêts de production non programmés ;
- augmenter la durée de vie des équipements ;
- assurer un contrôle qualité permanent de réparation, de montage et de graissage ;

- pratiquer l'équilibrage in situ de ces équipements ;
- augmenter la sécurité dans les secteurs d'activités tels que le pétrole, la pétrochimie et la chimie ;
- éviter les erreurs humaines, lors des arrêts et des remises en état ;
- améliorer la disponibilité des équipements et la sécurité de l'environnement.

Cependant, Il faut remarquer que les méthodes et les résultats dans le domaine de l'analyse vibratoire intéressent directement la production industrielle (chaîne de fabrication, la production d'énergie et la motorisation) [8].

1.1.4 Les indicateurs scalaires

Généralement, les différents outils de surveillance ainsi que les méthodes temporelles sont basées sur l'analyse statistique du signal engrangé. Ceci s'applique à des machines simples et consiste à faire des mesures de vitesse dans des régimes de fréquences faibles et des mesures d'accélération dans le cas des fréquences élevées. Le but est de minimiser l'influence des vibrations causées par la rotation des arbres. Cette méthode utilise des indicateurs scalaires qui permettent de suivre la variation d'une grandeur dérivant de la puissance ou de l'amplitude crête du signal.

Sa valeur peut ne pas avoir de signification intrinsèque, mais c'est son évolution dans le temps qui est significative au défaut.

a) Kurtosis

Il définit la distribution d'amplitude d'un signal et est déterminé par le rapport du moment d'ordre 4 sur le carré du moment d'ordre 2 du signal. Certains mathématiciens utilisent le Kurtosis excès qui est égal au Kurtosis moins trois (-3), et de ce fait le Kurtosis excès d'une distribution Gaussienne est égale à zéro. Mathématiquement il est donné par l'équation suivante [9].

$$\text{Kurtosis} = \frac{M_4 S(t)}{M_2^2 S(t)} = \frac{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_t} (S(t) - \bar{S})^4}{\left(\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_t} (S(t) - \bar{S})^2 \right)^2} \quad \text{équation (1.3)}$$

Où M4 et M2 représentent respectivement le moment statistique d'ordre quatre et deux (appelé encore écart type). S La valeur moyenne qui est en soit même un indicateur scalaire.

b) Facteur de Crête (FC)

Le facteur de crête est le rapport entre la valeur crête et la valeur efficace du signal. Plus la vibration devient impulsive, plus la valeur de crête augmente, cependant ce facteur présente les mêmes valeurs pour les deux extrêmes de l'état d'une machine [10].

$$\text{Facteur de crête} = \frac{\text{Sup}|S_K|}{\sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{k=1}^{N_e} (S_K)^2}} \quad \text{équation (1.4)}$$

c) Valeur efficace RMS (Root Mean Square)

C'est un indicateur scalaire très utilisé, bien qu'il présente des inconvénients. Il est sensible à l'effet de masque, c'est-à-dire qu'il peut s'avérer inefficace à l'apparition de certains défauts.

Globalement, la valeur efficace ne détecte pas tous les défauts, ce qui représente un inconvénient majeur dans le cadre de la maintenance conditionnelle. Le RMS a été appliqué avec succès limité pour la détection de défauts localisés. Pour un signal $S(t)$ le RMS est donné par [11] :

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{k=1}^{N_e} (S_K)^2} \quad \text{équation (1.5) [11]}$$

d) Crête-à-Crête (C-à-C)

Cet indicateur représente la différence entre la valeur max est la valeur min du signal vibratoire.

e) La valeur crête

Représente la valeur maximale du signal. Pour un signal $S(t)$ la valeur crête est donné par :

$$\text{Valeur crête} = \text{Sup}|S_K| \quad \text{équation (1.6) [11]}$$

f) Facteur K (FK)

Le facteur K est défini comme étant le produit entre la valeur crête et a valeur efficace [10]

$$\text{Facteur K} = \text{Valeur crête} * \text{Valeur efficace} \quad \text{équation (1.7) [10]}$$

Le facteur K est plus sûr pour effectuer une analyse ponctuelle (analyse «spot») des roulements.

Sa valeur est directement liée à l'état du ou des roulements. Contrairement au facteur de crête, le facteur K est un indicateur instable.

1. 2 Généralité sur l'usinage

L'usinage est une famille de techniques de fabrication de pièces mécaniques par enlèvement de matière. Le principe est d'enlever de la matière de manière à donner à la pièce brute la forme voulue, à l'aide d'une machine-outil. Par cette technique, on obtient des pièces d'une grande précision. Le coût de l'usinage dépend de : temps de travail, surépaisseur de matière à enlever, usure de la machine-outil, consommables (outil, lubrifiant, courant électrique), coût du stockage [12].

1.2.1 Définition de l'usinage

L'usinage selon l'office de la langue française : opération consistant à soumettre une pièce à l'action d'une ou de plusieurs machines-outils essentiellement dans le cas où cette action consiste en un enlèvement de matière. Trois éléments interviennent dans l'action d'usinage : une **machine-outil**, une **pièce (avec une porte pièce)** et un **outil (avec un porte outil)** [12].

1.2.2 Principe [12]

- Une lame d'outil pénètre dans la matière et enlève un copeau.
- L'outil suit une trajectoire par rapport à la pièce à usiner.
- Ces mouvements sont assurés par les éléments constitutifs de la machine-outil.
- Pour obtenir un travail satisfaisant (bon état de la surface usinée, rapidité de l'usinage, usure modérée de l'outil, ...) on doit régler les paramètres de la coupe

1.2.3 Outils de coupe

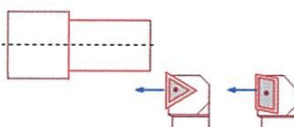
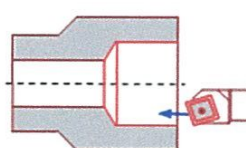
On distingue différents types d'outils pour la coupe des pièces mécaniques selon le procédé d'usinage : tournage, fraisage ou perçage :

- **Tournage**

En le tournage, on peut classer, selon le profil de la pièce demandé les opérations en deux classes principales :

- Tournage intérieur
- Tournage extérieur

Pour les deux classes, on peut distinguer suivant les formes à obtenir, les opérations suivantes :

Les opérations	Les outils
Chariotage	outils à charioter 
Alésage	outils à aléser 
Dressage	outils à dresser

Perçage	outils à percer
Rainurage	outils rainurés
Chanfreinage	Outils à chanfreiner
Tronçonnage	outils à tronçonner
Filetage	outils à fileter

Tableau 1-1 : opérations usuelles et outils de tournage [13]

- **Fraisage**

Le profil des outils de fraisage peut varier en fonction de leur usage [14] :

- dresser, - feuiller (feuillures), - rainurer, - profiler, - calibrer, - abouter, - tenonner, - affleurer

Ces outils peuvent être équipés par des plaquettes qui contiennent ou pas des brises copeaux.

- **Perçage :**

Les outils de perçage généralement employés en fabrication mécanique sont des forets hélicoïdaux [15]

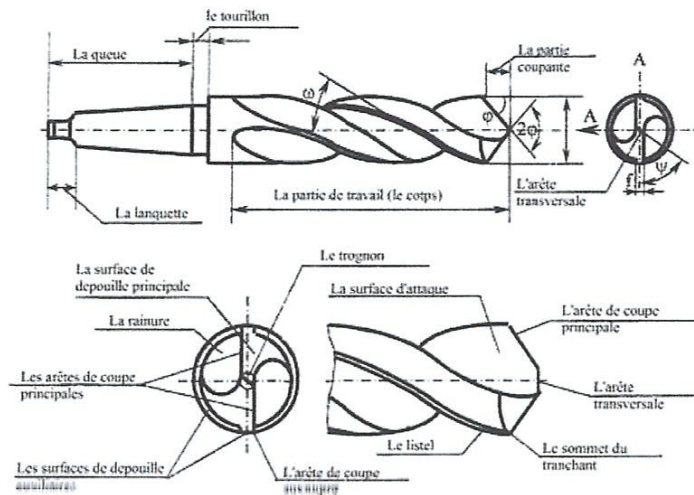


Fig. 1-2. Foret hélicoïdal

Ils sont constitués

D'un diamètre comprenant deux listels de guidage et deux goujures hélicoïdales.

D'un pointe : elle contient les arêtes de coupe principales son angle est variable suivant la matière usinée, le demi angle de point $P/2$ définit l'angle de direction d'arête.

D'une queue : cylindrique ou conique morse, c'est la zone d'attachement du foret avec la machine-outil (perceuse, fraiseuse, tour) [15].

- ❖ **Classification des matériaux des outils de coupe**

Les outils de coupe sont généralement caractérisés par la nature du matériau. Au fil des années le développement des nouveaux matériaux des pièces nécessite le développement des nouveaux matériaux d'outil capable à réaliser l'opération de coupe.

Les matériaux de coupe ont des propriétés différentes en termes de dureté, de ténacité et de résistance à l'usure. Le matériau de coupe doit posséder le meilleur des propriétés suivantes :

- Dureté
- Ténacité : résistance à la rupture
- Neutralité chimique : absence de réaction chimique avec la matière a usiné
- Stabilité chimique : résistance à l'oxydation et à la diffusion
- Résistance aux variations thermiques brusques [16].

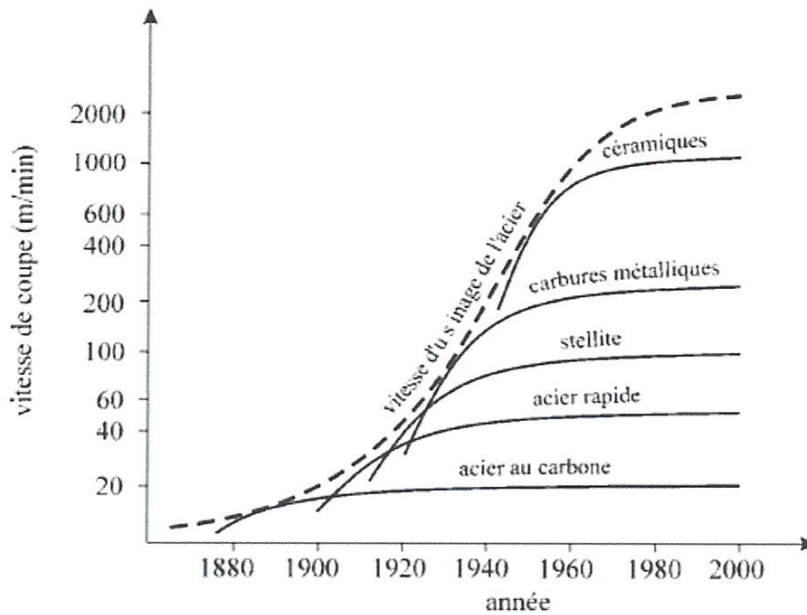


Figure 1-3 : Classification Matériaux de coupe

En fonction des besoins et le type du matériau de coupe, la figure 2.3 trace cette relation par date de parution.

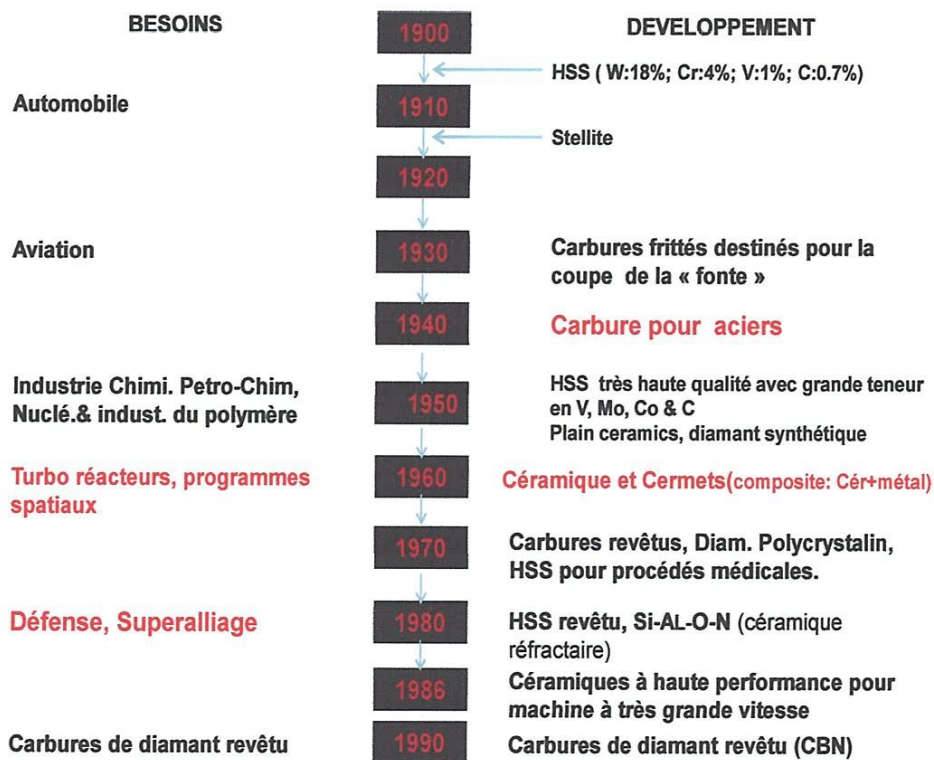


Fig. 1-4 : Classification Matériaux de coupe

❖ Influence de la température sur les matériaux des outils

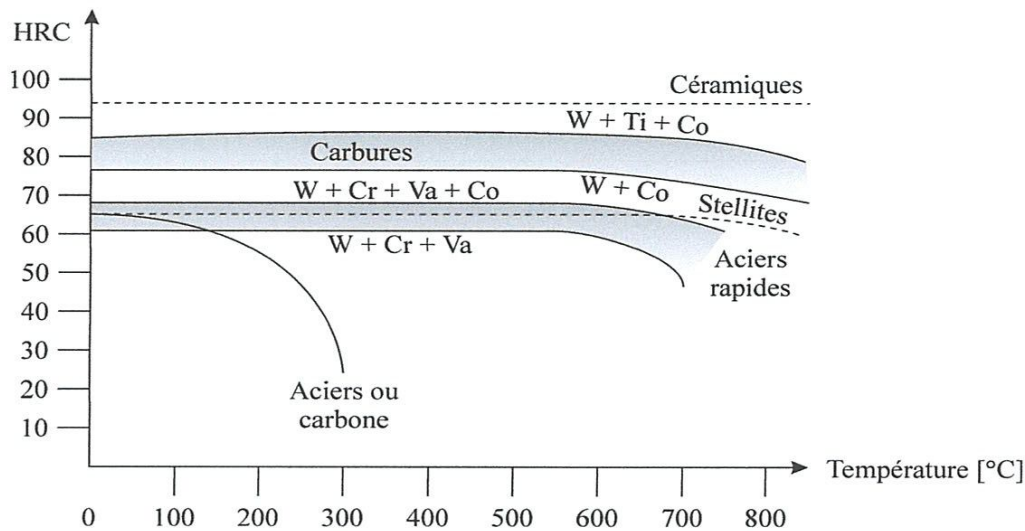


Fig. 1-5. Diagramme de Saint-Clair

Acier rapides ou HSS

Les outils à Acier Rapides ou HSS (High Speed Steel) sont des aciers faiblement alliés avec traitement thermique. Sa découverte en 1900 par Taylor a été une révolution à cette époque car cela a permis d'augmenter la vitesse de coupe jusqu'à 4 fois. [16]

Carbure

Les outils carbures sont les plus répandus. Fabriqué par la technologie de poudre (frittage). On en trouve des nuances revêtus ou non revêtus. Les types de revêtement sont généralement des CVD ou PVD. Les plus utilisés sont des carbure de tungstène (T° de fusion 2600°) ou carbure de titane (3100°), ou tantale (3780°) ou molybdène (3500°) en se servant d'un liant (cobalt ou nickel) pour le revêtement. [16]

Cermets :

Ce sont des céramiques métalliques, généralement, des carbures possédant des particules de Titane, de carbonitride de Titane ou de nitrure de Titane.

Ces outils doivent être alliés à du carbure de Molybdène pour augmenter leur ténacité. Ils sont utilisés pour des grandes vitesses de coupe associées à de faibles avances, donc pour de la finition. Le matériau étant fragile, il ne faut pas d'interruption de coupe (plan de joint...) [16].

Céramiques

On distingue ici, les oxydes et les nitrures : alumine et nitrure de silicium (figure 1-6).

Les céramiques ont une grande dureté (donc une faible ténacité) avec une grande stabilité à haute température et aucune réaction avec la matière usinée.

Les céramiques permettent un grand débit de matière, mais nécessitent une grande stabilité de la machine, un strict respect des conditions de coupe et une méthode d'usinage adaptée [16].

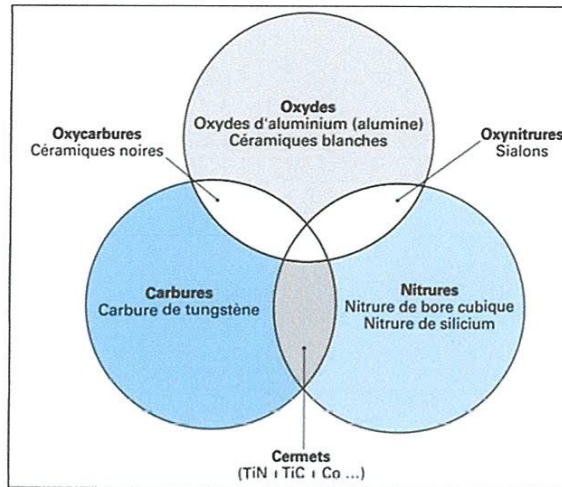


Figure 1-6 : Céramiques [17]

Le Nitrure de bore cubique, souvent appelé CBN est le matériau le plus dure après le diamant, adaptée au tournage de l'acier dure et aux alliages de titane. La productivité et la longévité sont nettement supérieures à celles des plaquettes de céramiques et de carbure. Les plaquettes en nitrure de bore cubique sont destinées en premier lieu aux opérations de finition [16].

Diamant

L'utilisation du diamant est fortement répandue à certaines opérations spécifiques comme le meulage des alliages non ferreux. Par contre, son énorme inconvénient réside dans sa non-stabilité à haute température. Un diamant soumis à une température de plus de 650° risque de se transformer en graphite. On ne peut donc pas l'utiliser pour les matériaux ferreux. Mais, il convient aux matériaux non ferreux s'usinant à basse température : Alliage d'aluminium, de cuivre, de magnésium, résines thermodurcissables....etc [16].

❖ Différentes formes d'usure des outils

Il est nécessaire de rappeler les modalités d'usure des outils de coupe, c'est à dire les différents mécanismes de l'usure et les différentes formes d'usure des outils

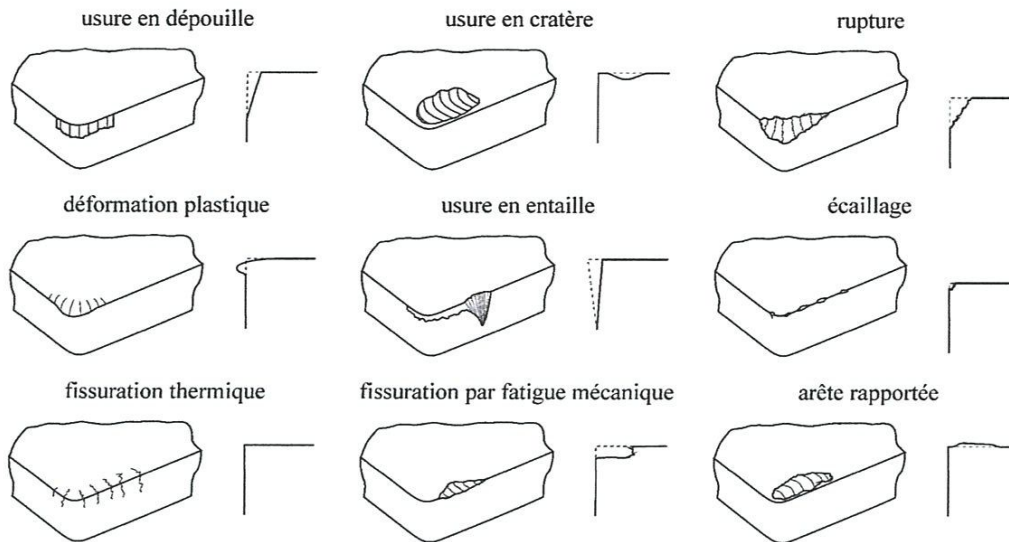


Fig. 1-7. Différents type d'usure des outils de coupe

1.2.4 Procédés d'usinage

Parmi les différentes techniques de transformation de la matière, la mise en forme par enlèvement de matière (usinage) présente un poste onéreux tant par le parc de machines mobilisé que par les outils de coupe utilisés ou la perte inévitable de la matière par formation de copeaux, mais néanmoins c'est la seule méthode qui permet de produire des formes complexes avec des tolérances très serrées. Si on compare les différentes opérations d'usinage réalisées au cours des travaux industriels, on remarque que la répartition s'effectue de la façon suivante : tournage 30%, fraisage 15%, perçage 15%, rectification 10%, alésage et brochage 15%, divers 15% [18].

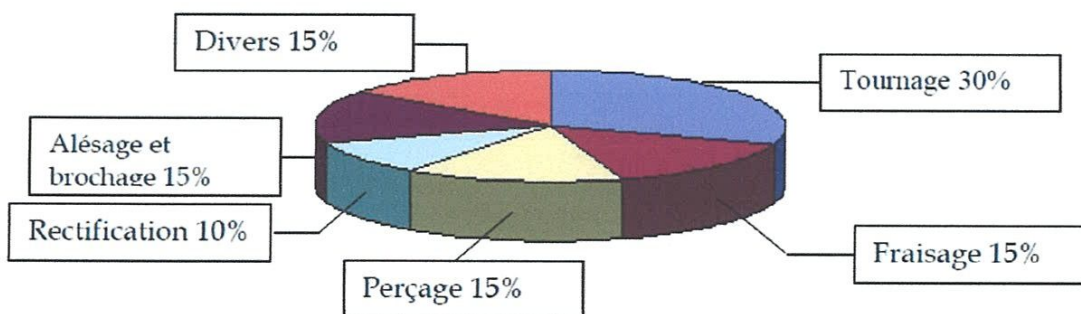


Fig-1-8 : Les différentes opérations d'usinage [18].

❖ Tournage

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils à arête unique. La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principal du procédé (fig 1-9)

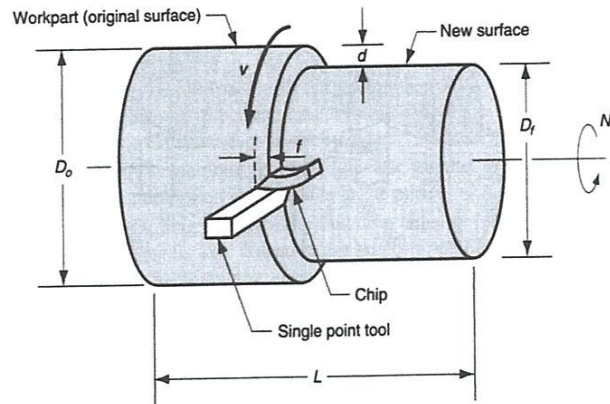


Fig-1-9 : Mouvements de coupe et d'avance en tournage [19]

L'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce. La combinaison de ces deux mouvements, ainsi que la forme de la partie active de l'outil, permettent d'obtenir des usinages de formes de révolution (cylindres, plans, cônes ou formes de révolution complexes) [18].

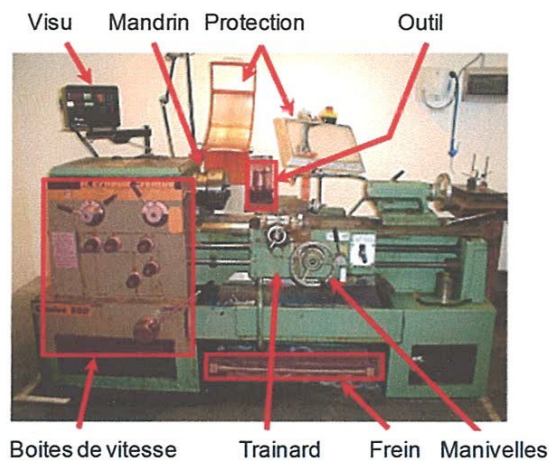


Fig-1-10 : tour.

Les différentes opérations du tournage sont :

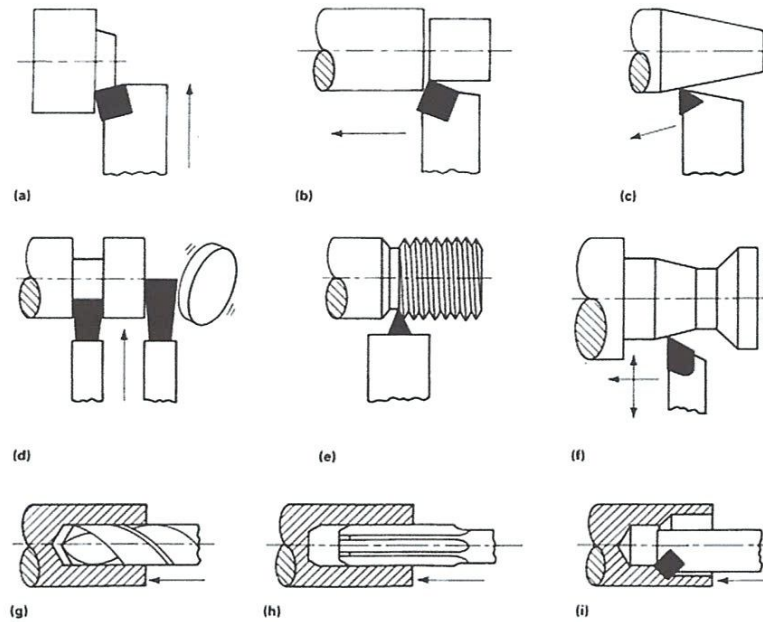


Fig. 1-11. a) Dressage, b) Chariotage, c) Tournage conique, d) Rainurage et tronçonnage, e) Filetage, f) Profilage, g) Perçage, h) Alésage (alésoir), i) Alésage ou Chambrage (outil à aléser) [19].

❖ Perçage

Le terme de perçage recouvre toutes les méthodes ayant pour objet d'exécuter des trous cylindriques dans une pièce avec des outils de coupe par enlèvement de copeaux. En plus du perçage de trous courts et du forage de trous profonds, ce concept inclut également diverses opérations d'usinage consécutives, telles que brochage, alésage, réalésage et certaines formes de finition comme le calibrage et le galetage. Tous ces procédés ont en commun d'utiliser en combinaison un mouvement rotatif et un mouvement d'avance linéaire

Le processus de perçage peut être comparé au tournage et au fraisage, mais à cette différence que les exigences au niveau de la formation et de l'évacuation des copeaux sont plus strictes pour le perçage [18].

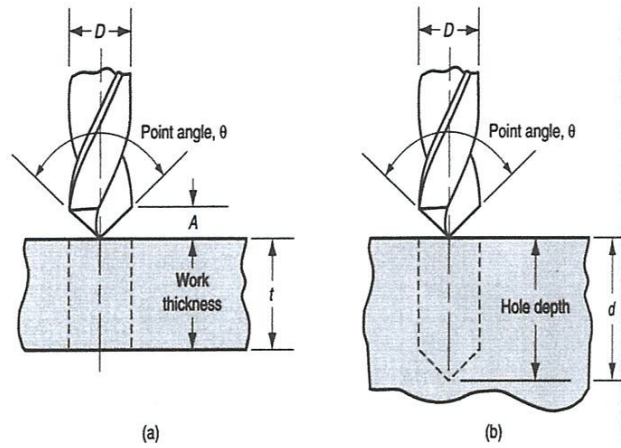


Fig-1-12 : Type de Perçage, a) bout-a-bout, b) petite profondeur.

La perceuse sensitive

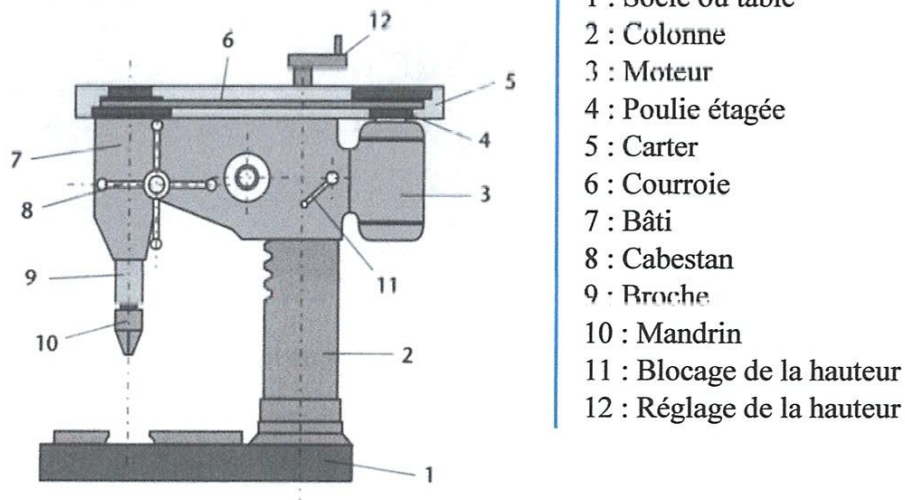


Fig-1-13 : La perceuse sensitive [18].

❖ Fraisage

Le fraisage est un procédé d'usinage réalisé au moyen d'un outil multiple (à plusieurs arêtes de coupe) qui est animé d'un mouvement de rotation :

- Mouvement de rotation de la fraise qui est entraîné par la broche de la machine, M_c (mouvement rapide circulaire de coupe) ;
- Mouvement de translation de la pièce qui est fixée sur la table de la machine, M_a (mouvement lent rectiligne uniforme d'avance).

Le mouvement de translation est orienté de façon à pousser la pièce contre la fraise suivant une direction généralement perpendiculaire par rapport à son axe [18]

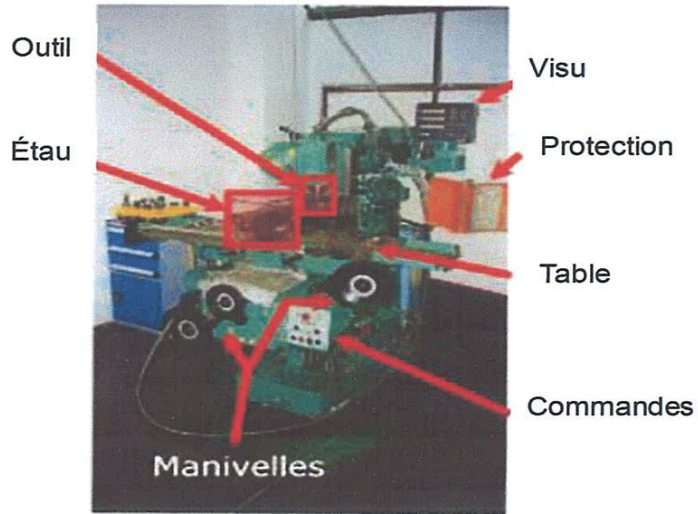
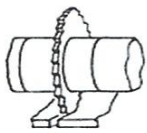
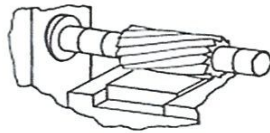


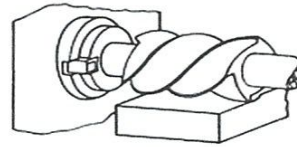
Fig-1-14 : Fraiseuse.



(a) Saw, slitting



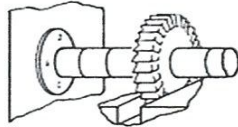
(b) Plain



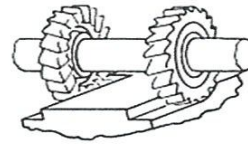
(c) Helical, plain



(d) Saw, slotting



(e) Side mill, slotting



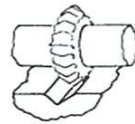
(f) Half-side, straddle



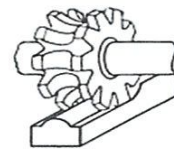
(g) Single angle



(h) Single angle



(i) Double angle



(j) Concave

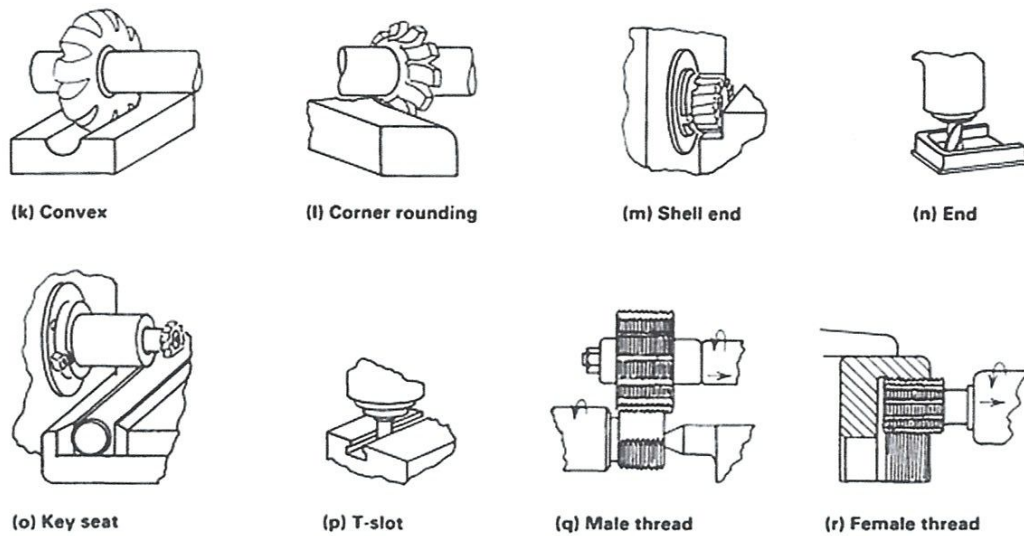


Fig. 1-15. Les opérations du fraisage [19]

❖ Brochage

Le brochage est un procédé d'usinage qui consiste à enlever la matière par coupe à l'aide d'un outil à dents multiples étagées qui se déplace parallèlement à la surface à usiner. L'outil utilisé est appelé broche et la machine est appelée brocheuse. L'opération de brochage est effectuée généralement en une seule passe rectiligne dans laquelle sont incluses les opérations d'ébauche et de finition. Le temps de coupe est relativement court [18].

Les broches, outils de forme, sont constituées d'une série de dents travaillant successivement. Chaque dent à son arête de coupe décalée de la précédente d'une distance de l'épaisseur du copeau (la progression) [18].

L'ensemble des dents génère le profil fini à partir du profil brut, par le passage de la broche, au travers de la pièce (broche d'intérieur) ou devant la pièce (broche d'extérieur) suivant le mouvement de coupe rectiligne [18].



Fig-1-16 : Les formes élaborées par Brochage [18].

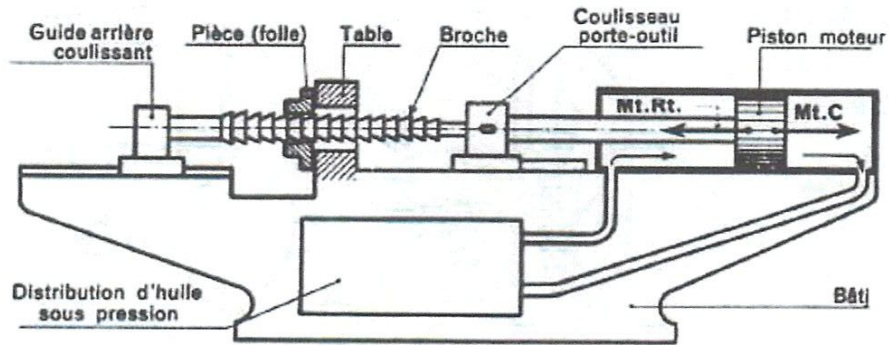


Fig-1-17 : Machine à brocher horizontale [18]

1.2.5 Formation de copeau

La forme du copeau témoigne les conditions de coupe et la qualité de fabrication. La figure 1. 18 montres les caractéristiques des formes de copeau en fonction des circonstances d'usinage.

1. COPEAU RUBAN	2. COPEAU TUBULAIRE	3. COPEAU EN SPIRALE	4. COPEAU HÉLICOÏDAL RONDELLE	5. COPEAU HÉLICOÏDAL CONIQUE	6. COPEAU EN ARC	7. COPEAU ÉLÉMENTAIRE	8. COPEAU AIGUILLE
1.1 Long	2.1 Long	3.1 Plat	4.1 Long	5.1 Long	6.1 Attaché		
1.2 Court	2.2 Court	3.2 Conique	4.2 Court	5.2 Court	6.2 Détaché		
1.3 Enchevêtré	2.3 Enchevêtré		3.3 Enchevêtré	4.3 Enchevêtré			

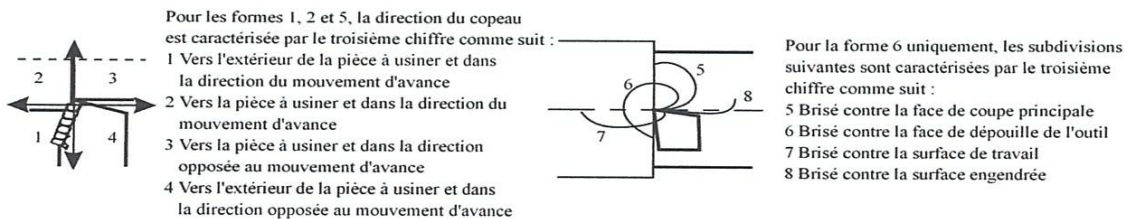


Fig-1-18 : Caractéristique des formes de copeau

1.2.6 Usinage à grande vitesse

❖ Définition de l'usinage à grande vitesse / UGV

L'usinage à grande vitesse (UGV) est une opération d'enlèvement de matière à des vitesses de coupe élevées. Ces grandes vitesses engendrent un phénomène de coupe spécifique [20].

❖ Principe physique

Grâce aux vitesses de coupe élevées, les phénomènes de coupe intervenant entre la pièce, l'outil et le copeau sont différents de ceux observés en usinage conventionnel. La chaleur dégagée lors du cisaillement du copeau n'a pas le temps de se propager dans la pièce et l'outil. Donc, l'essentiel de cette chaleur est évacuée par le copeau (environ 80% en UGV contre 40% en usinage conventionnel). On remarque aussi que plus la vitesse de coupe augmente, plus l'énergie spécifique de coupe diminue (puissance électrique consommée par la machine divisée par le débit copeaux) [21].

❖ Avantage de l'UGV

- augmentation de la productivité : directement lié à l'augmentation des vitesses de coupe et d'avance [21].
- amélioration de l'état de surface [21].
- conservation de l'intégrité matière : la chaleur transmise à la pièce étant plus faible, il y a moins de modification de sa structure [21].
- amélioration de la précision [21].
- usinage à sec : l'essentiel de la chaleur étant évacuée avec le copeau, une lubrification de refroidissement n'est plus forcément indispensable [21].
- possibilité d'usiner des voiles minces : les forces de coupe tangentielles diminuent quand la vitesse de coupe augmente, il devient par conséquent envisageable d'usiner des parois minces [21].
- possibilité d'usiner des aciers traités thermiquement (trempe, cémentation) sans pour tout autant que le traitement ne soit abîmé par la chaleur [21].

❖ Problèmes liés à l'UGV

A cause des fréquences de rotation élevées des outils, des phénomènes d'instabilité dynamique (broutement, vibrations) surviennent régulièrement lors d'opérations d'UGV [21].

1.2.7 Usinage des composite

L'usinage des matériaux composites dépend de l'étude de la qualification des défauts introduits par la coupe. Leur quantification est importante pour permettre aux concepteurs de structures constituées de ces matériaux de diminuer les marges d'erreur et ainsi d'augmenter la qualité de leur production [22].

1.2.8 Analyse des défauts d'usinage des composites

Un des modes de défaillance les plus dangereux dans un composite stratifié est le délaminage. La perte de rigidité peut réduire la durée de vie d'une structure composite d'une manière significative. Pour utiliser la pleine capacité des composites usinés, il est nécessaire d'analyser l'amorçage et la croissance du délaminage. D'autres défauts comme l'usure brutale de l'outil

de coupe et l'échauffement de la matrice composite peuvent apparaître au cours de l'usinage [23].

1.2.9 Paramètres d'amplitude de rugosité

✓ Rugosité moyenne R_a

Selon les normes : ASME B46.1-1995, ASME B46.1-1985, ISO 4287-1997, ISO 4287/1-1997.

Le R_a nommé écart moyen arithmétique : C'est l'écart moyen de tous les points du profil de rugosité par rapport à une ligne moyenne sur la longueur d'évaluation [24].

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |r_j| \quad \text{équation (1.8)}$$

✓ Rugosité moyenne quadratique R_q

Selon les normes : ASME B46.1-1995, ISO 4287-1997, ISO 4287/1-1997.

La moyenne quadratique des écarts de hauteur sur la longueur d'évaluation et mesurés par rapport à la ligne moyenne [24].

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_j^2} \quad \text{équation (1.9)}$$

✓ Hauteur maximale du profil R_t

Selon les normes : ASME B46.1-1995, ISO 4287-1997.

La hauteur crête-à-crête maximale : Est la valeur absolue entre les hauteurs maximum et minimum [24].

$$R_t = |\min r_j| + |\max r_j| \quad \text{Avec } 1 \leq j \leq N \quad \text{équation (1.10)}$$

✓ Profondeur minimale des vallées R_v, R_m

Selon les normes : ASME B46.1-1995, ASME B46.1-1985, ISO 4287-1997, ISO 4287/1-1997.

La vallée la plus profonde : C'est la profondeur de la vallée la plus profonde du profil de rugosité sur la longueur d'évaluation [24].

$$R_v = |\min r_j| \quad \text{Avec } 1 \leq j \leq N \quad \text{équation (1.11)}$$

✓ Hauteur maximale des pics R_p

Selon les normes : ASME B46.1-1995, ASME B46.1-1985, ISO 4287-1997, ISO 4287/1-1997.

Le pic le plus élevé : est la hauteur du pic le plus élevé du profil de rugosité sur la longueur d'évaluation [24].

$$R_p = |\max r_j| \quad \text{Avec} \quad 1 \leq j \leq N \quad \text{équation (1.12)}$$

1.3 Généralité sur les matériaux composites

Les matériaux composites sont des matériaux à hautes performances mécaniques, façonnables à volonté au gré du concepteur et donc doué d'un potentiel illimité. Les matériaux composites se développent aujourd'hui dans pratiquement tous les domaines et sont à l'origine de formidables challenges dans diverses réalisations de haute technologie. Ainsi, le développement de l'utilisation des matériaux composites dans les structures nécessite de mettre en place les outils nécessaires à la modélisation du comportement mécanique des matériaux composites et à l'analyse des structures stratifiées ou sandwiches [25].

1.3.1 Matériau composites

Les matériaux composites sont des matériaux composés d'un ou de plusieurs éléments, ils sont macroscopiquement homogènes et spécifiquement différent des matériaux habituels.

L'association de deux ou plusieurs matériaux de natures différents donne un comportement mécanique plus performant par rapport à ces constituants pris séparément [15].

1.3.2 Constituants

Un matériau composite se caractérise par deux phases, une discontinue, représentant le renfort, qui peut être sous la forme de particules ou des fibres (verre, carbone, kevlar,...etc.) dont les propriétés mécaniques sont plus élevées. L'autre phase définit la résine ou la matrice qui peut être polyester ou époxyde ou même métal dans le cas des composites à matrice métallique (MMC). Les propriétés des matériaux composites dépendent principalement, de leur constituant [15].

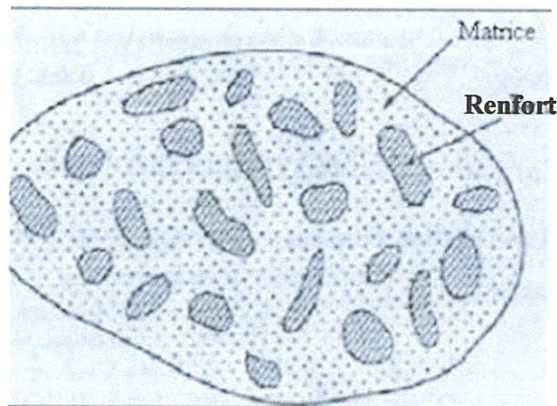


Fig-1-19 : Matériau composite [15]

1.3.3 Types de matériaux composites structuraux

Composites à fibres courtes : fibres dispersées dans une matrice isotrope, généralement sans orientation préférentielle ; comportement macroscopique isotrope [26].

Composites à fibres longues : fibres longues noyées dans une matrice isotrope avec orientation établie ; comportement macroscopique anisotrope [26].

Stratifiés : superposition de plis en composite diversement orientés ; le comportement macroscopique doit être conçu selon les besoins [26].

Sandwiches : panneaux ou coques conçus pour des sollicitations de flexion ; généralement, le comportement dans le plan est isotrope [26].

1.3.4 Les raisons de l'utilisation des composites

Le développement des composites modernes est dû essentiellement aux besoins de plus en plus poussés de l'industrie, surtout dans les secteurs [26].

- ✓ Aérospatial
- ✓ Aéronautique
- ✓ Défense
- ✓ Sport
- ✓ Biomécanique

Dans tous ces secteurs les impératifs de légèreté, rigidité et résistance rendent les composites indispensables [26].

1.3.5 Mécanismes d'endommagement des matériaux composites

L'endommagement des matériaux composites fait l'objet de nombreuses études depuis plus de 20 ans. Le but de ces études est de permettre un dimensionnement plus fin des structures en tenant compte des phénomènes d'endommagement amenant à la ruine du matériau. La théorie des stratifiés classiques permet de dimensionner les structures de façon fiable mais démesurés. En effet les critères de rupture basés sur cette théorie prévoient la rupture d'un stratifié par le premier endommagement. Il n'est donc pas tenu compte de la multitude des phénomènes endommageant qui aboutissent à la rupture du stratifié [27].

Il y a beaucoup de défauts affectant les matériaux composites et sont classés généralement comme suit :

- Microfissuration de la matrice

- Rupture de l'interface fibre matrice
- Délaminage
- Rupture de fibres

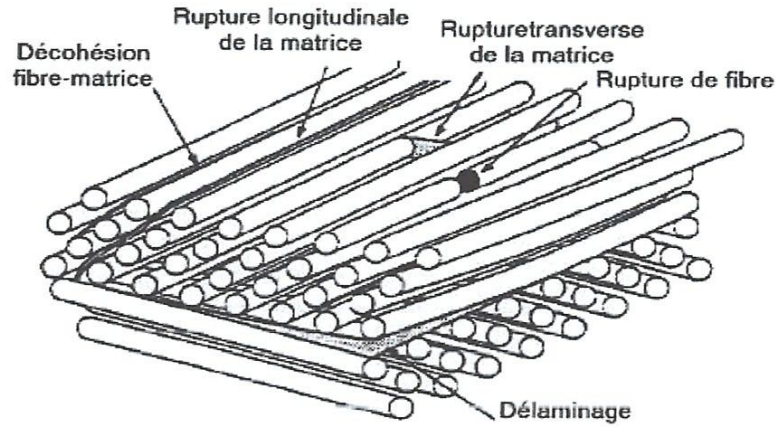


Fig-1-20 : Les différents modes d'endommagement d'un composite stratifié [27]

Fissuration matricielle

La fissuration matricielle est le premier mode d'endommagement survenant lors d'un chargement d'une structure composite. Ce type d'endommagement est essentiellement dû aux contraintes de traction transverse qui créent une rupture de la matrice. Les fissures apparaissent alors dans un pli, parallèlement et/ou perpendiculairement aux fibres du stratifié. L'évolution de cet endommagement est en général stable [27].

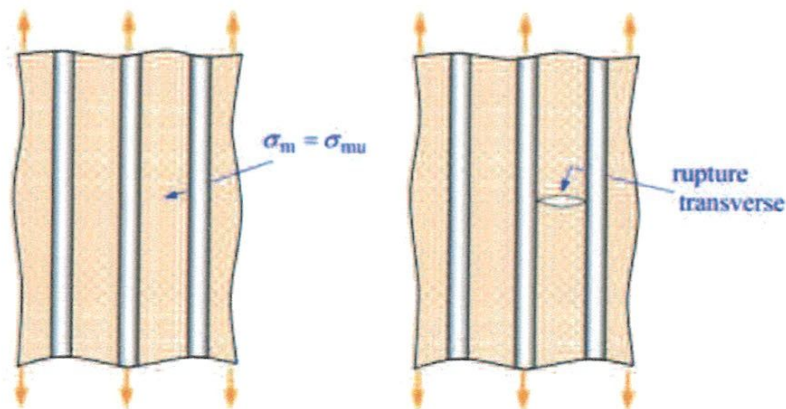


Fig-1-21 : fissuration de la matrice [28]

Rupture de l'interface fibre-matrice

Lorsque la fissuration matricielle progresse, elle peut être bloquée par les fibres. Alors si l'interface fibre-matrice possède une faible résistance, la fissuration peut évoluer le long des fibres par rupture de cette interface sollicitée en traction et/ou en cisaillement [27].

Délaminage

Le délaminage est créé par une accumulation importante de fissures dans la matrice. C'est pourquoi ce mode d'endommagement intervient en général plus tardivement dans l'historique de l'endommagement du stratifié. La fissuration matricielle transverse, lorsqu'elle se propage, peut parvenir à l'interface entre deux plis d'orientation différente. Soit elle est stoppée, soit, pour un état important de fissuration, l'interface entre deux plis d'orientation différente peut se rompre sous des contraintes d'arrachement. Il se crée alors un décollement des plis d'orientation différente appelé délaminage. L'évolution de ce type d'endommagement est souvent instable et provoque la ruine du matériau [27].

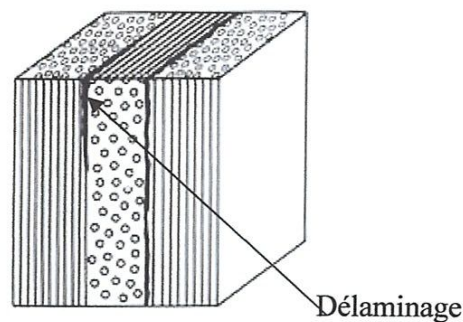


Fig-1-21 : Mécanisme de délaminage [28]

Rupture de fibres

La rupture de fibres est l'endommagement ultime d'un stratifié. En effet, la contrainte à rupture des fibres est plus importante que celles de tous les autres constituants d'un composite stratifié. Ce type d'endommagement est catastrophique pour la structure et entraîne souvent la rupture totale du stratifié [27].

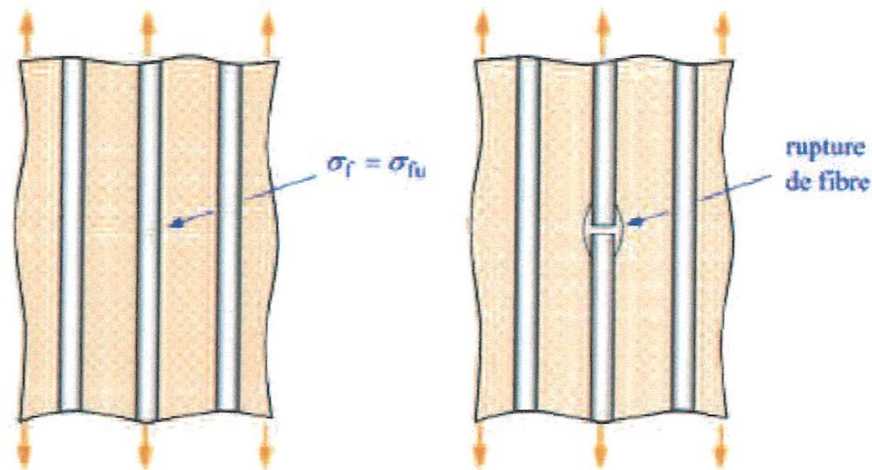


Fig-1-22 : Mécanisme rupture de fibre [28]

Synthèse Bibliographique

L'usinage génère des vibrations, des bruits et des fines particules qui peuvent être nocifs à la santé des opérateurs et à l'environnement. Ces risques causés par les opérations de coupe dépendent fortement des conditions de coupe, des matériaux de la pièce et des matériaux de l'outil. Des stratégies de coupe ont été développées à la suite de différentes études scientifiques pour permettre de réduire ces risques tout en restant compétitif sur le plan productivité et coûts de fabrication [réf CIRP][30]. Un nouveau modèle de durabilité d'usinage développé récemment, prend en charge les risques associés à la coupe des alliages métalliques [29].

Un nouveau modèle de durabilité pour les procédés d'usinage [29]

Un nouveau modèle de durabilité dans le domaine de la fabrication a été étudié par Khettabi et al. Le modèle a été développé afin d'augmenter la productivité, de réduire la puissance et l'énergie utilisées pendant le procédé de coupe et de réduire les impacts nocifs sur l'environnement et la sécurité au travail. La durabilité de l'usinage proposée contribue ainsi à la recyclabilité, réduit la toxicité, le coût et la puissance, avec l'amélioration de la productivité. La durabilité d'un procédé d'usinage doit être évaluée à l'aide de facteurs mesurables qu'on peut appeler indicateurs de durabilité. Dans ce but, le processus d'usinage peut être considéré comme durable si la puissance, la matière, le coût et l'émission d'aérosols sont minimisés au niveau des entrées / sorties.

Pour déterminer la durabilité d'un procédé, la logique floue a été utilisée. La forme trapézoïdale des ensembles flous a été adoptée et trois niveaux sont proposés pour chaque indicateur (faible, moyen et élevé). Le modèle a été appliqué sur les principaux procédés de fabrication (fraisage, perçage et tournage) afin d'évaluer la durabilité de l'usinage des alliages d'aluminium.

Il a été obtenu que généralement lors de l'usinage à très grande vitesse, le procédé est considéré comme durable car la puissance, le coût, le matériau et la toxicité diminuent.

Un nouveau concept de durabilité dans le domaine de l'usinage intégré des aérosols d'émission, de puissance, de coût et de matériel permet de développer une nouvelle classification standard de l'usinage. L'application de la méthode de la logique floue pour évaluer l'indice de durabilité a permis de prendre la décision la plus judicieuse. La durabilité de l'usinage est fortement influencée par les paramètres de coupe et les procédés qui doivent être optimisés [29].

L'émission de micro et de nanoparticules lors de l'usinage du titane et des alliages d'aluminium [30]

Des études précédentes ont testé divers matériaux, mais ils ont dépassé y compris les alliages de titane. Le mode de formation de la puce et les mécanismes d'émission de particules des alliages de titane sont différents par rapport à d'autres matériaux. En outre, le titane et les alliages d'aluminium sont tous deux utilisés dans les industries aéronautique et automobile. La comparaison entre l'usinage du titane et des alliages d'aluminium est très difficile en raison de la valeur de seuil à grande vitesse qui est différente pour les deux matériaux. Khettabi et al, ont réalisé une étude a permis d'identifier de nouvelles sources et mécanismes d'émission de particules lors des processus d'usinage. Les éléments principaux qui sont étudiés dans cette étude est l'émission de particules et le mode de formation des puces.

Les deux types de matériaux utilisés comme ouvrages dans cette étude (titane et alliages d'aluminium), préparés sous forme de barres de 24 mm de diamètre. L'alliage de titane utilisé était un Ti6Al4V et l'alliage d'aluminium était 6061-T6.

L'étude des émissions de particules lors de l'usinage de l'alliage de titane Ti6Al4V et de l'alliage d'aluminium 6061-T6 montre que :

L'étude du mode de formation de la puce peut être considérée comme un indice des mécanismes d'émission de particules lors des processus d'usinage.

Le comportement de l'alliage de titane Ti6Al4V pendant l'usinage est différent de celui de l'alliage d'aluminium 6061-T6 et affecte fortement les mécanismes d'émission des particules. La désagrégation des particules grossières produites lors de l'usinage des alliages de titane dans certaines conditions produit un certain nombre de particules fines et ultrafines.

Dans des conditions similaires, l'usinage des alliages de titane produit plus de micro et de nanoparticules que les alliages d'aluminium. Cependant, en comparant les émissions de particules de l'aluminium et des alliages de titane, il faut tenir compte de la valeur de la vitesse de coupe correspondant à la vitesse élevée de chaque matériau, car ces deux alliages sont usinés efficacement à des gammes de vitesses différentes.

Caractérisation des composites par analyse vibratoire [23]

L'usinage des matériaux composites présente certaines particularités. Le choix des conditions de coup est très important lors d'usinage de ce type de matériau, pour avoir des pièces de bonne qualité et éviter l'apparition des défauts (délaminage, échauffement de la résine et usure de

l'outil de coupe). CHIBAN et al, ont réalisé une étude afin d'investiguer l'influence des paramètres de coupe (vitesse de coupe V_c , profondeur de passe a_p et avance par tour f) sur la qualité des pièces usinées en se servant de l'analyse vibratoire pour détecter les défauts de délaminage, échauffement de la résine et usure de l'outil de coupe.

Deux méthodes sont utilisées pour déterminer le modèle mathématique, la méthode de régression linéaire (MRL) et la surface de réponses (RSM). Les méthodes MRL et RSM ont permis de déterminer les différents modèles mathématiques exprimant la relation entre les paramètres de coupe et les vibrations enregistrées selon trois directions (x, y, z).

Enfin, les résultats obtenus montrent que le modèle déterminé par le plan expérimental est satisfaisant, il permet de choisir les conditions de coupe les mieux adaptées pour éviter les défauts d'usinage de ce matériau et augmenter la productivité [23].

Chapitre 02 : Matériel utilisé et résultats obtenus

Dans ce chapitre, on présente les matériaux des pièces, les outils de coupe, la machine-outil le rugosimetre et le système de mesure des vibrations utilisés. De plus, le plan d'expérience ainsi que les méthodes d'analyse avec la liste des résultats obtenus sont détaillé dans le présent chapitre.

2.1 Banc d'essai

La figure (2.1) montre le matériel utilisé lors l'usinage du matériau considéré. Ce banc d'essais est composé de :

D'une fraiseuse verticale (1), d'un peulse labshop (2) et d'un capteur de mesure de vibrations triaxial (3).



Figure 2.1 : Banc d'essai

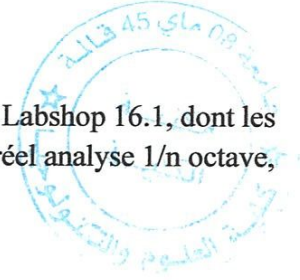
- **Fraiseuse universelle à usinage verticale (1)** : elle est d'une puissance de 5 KW, de type ALMO (machine-outil algérienne), elle est équipée d'une gamme d'avances de 16 à 800 mm et d'une plage de vitesses des coupe de 45 à 2000 tr/min.
- **Pulse 16.1 et labshop (2)** : C'est un Système multi-analyseur de type 3160-A-042, de marque Brüel & Kjær à 2 entrées/2 sorties. Tous les canaux d'entrées et de sorties ont une plage de fréquences de DC à 51,2 kHz. Cet analyseur fonctionne aussi bien comme un système de test avec un seul module, ou comme une partie d'un grand système de mesure LAN-XI. La combinaison des canaux d'entrées et de sorties fait de lui l'un des

modules d'acquisition de données les plus polyvalents disponibles, tandis que les panneaux avant interchangeables assurent la flexibilité à utiliser une grande variété de capteurs.

Caractéristiques

- 4 canaux d'entrées
- 2 canaux de sorties du générateur
- Gammes de fréquence de 0 à 51.2KHz
- Support transducteurs TEDS (Transducer Electronic Data Sheet)
- Panneaux avant interchangeables

Le système est piloté par le logiciel d'acquisition et de traitement Pulse Labshop 16.1, dont les outils d'analyse standards sont : l'analyse FFT, Analyse CPB en temps réel analyse 1/n octave, analyse d'ordre, analyse d'enveloppe et analyse cepstrale.



2. 2 Matériau utilisé

Le matériau étudié est un composite stratifié fabriqué par la méthode R.T.M au laboratoire Roberval des polymères et composites de l'Université de technologie de Compiègne France. Il est composé de 70% fibres de verre et de 30% résines. La masse volumique de ce stratifié est de 1798 Kg/m³ sa désignation est [-60, -30/0]₁₀ [30].

2. 3 Outils de coupe utilisés

L'usinage du matériau est réalisé à l'aide d'une fraise à carbure métallique de diamètre 54 mm à 6 dents équipée de 6 plaquettes.

2. 4 Mesures réalisées

2.4.1 Rugosité

La mesure de la rugosité a été réalisée en se servant d'un rugosimètre (2D) SurfTest 201 (Mitutoyo). La plage de mesure des critères de rugosité est de (0.05 à 40µm) pour Ra. Les mesures de la rugosité de la pièce usinée ont été prélevées directement sur la machine et sans démontage de celle-ci.



Figure 2.2 : Rugosimètre (2D)

2.4.2 Vibrations

Les vibrations engendrées lors de l'usinage des composites sont mesurées à l'aide d'un accéléromètre triaxial, fixé au matériau usiné et relié au peulse labshop.

2.5 Méthodes et outils d'analyses

Les logiciels des plans d'expériences [32] possèdent des bibliothèques de plans classiques et permettent aussi de construire des plans sur mesures. En particulier, les plans de mélanges et les plans avec contraintes sur le domaine d'étude nécessitent l'usage d'un logiciel pour construire le plan le mieux adapté à l'étude.

Dans notre étude nous avons utilisé un logiciel d'analyse statistique «Design Expert 10».

2.5.1 Plans d'expériences

Un plan d'expériences **Box-Behnken** à 17 essais a été choisi pour étudier l'influence des trois paramètres de coupe retenus (vitesse de coupe, profondeur de passe et avance par dent). Ces méthodes et outils d'analyses permettent de donner les différents modèles mathématiques exprimant la relation entre les paramètres de coupe et les réponses étudiées (la rugosité et les vibrations enregistrées selon trois directions (x, y, z)).

2.5.2 Analyse Anova

Ce test permet de dire si le modèle est fiable ou pas, l'équation établit est une relation entre la variation des paramètres de coupe et les réponses (rugosité et signaux vibratoire), ou bien elle est liée à un changement ou à une fluctuation aléatoire.

2.5.3 Modélisation

L'exploitation du logiciel permet d'obtenir les résultats les plus significatif des paramètres testés en procédant à différentes combinaisons statistiques et à tester plusieurs modèles mathématiques : linéaire, quadratique, cubique, Etc.

2.6 Optimisation des paramètres de coupe par Désigne expert

Les plages des différentes conditions de coupe ont été sélectionnées selon les contraintes des limites de la machine-outil utilisée. En fonction de ces plages, le logiciel nous propose valeurs optimales des paramètres de coupe utilisés dans notre plan d'expérience.

Données : Vc min, Vc max [84,82 ; 237,5]

fz min, fz max [0,008 ; 0,188]

ap min, ap max [0.5 ; 1]

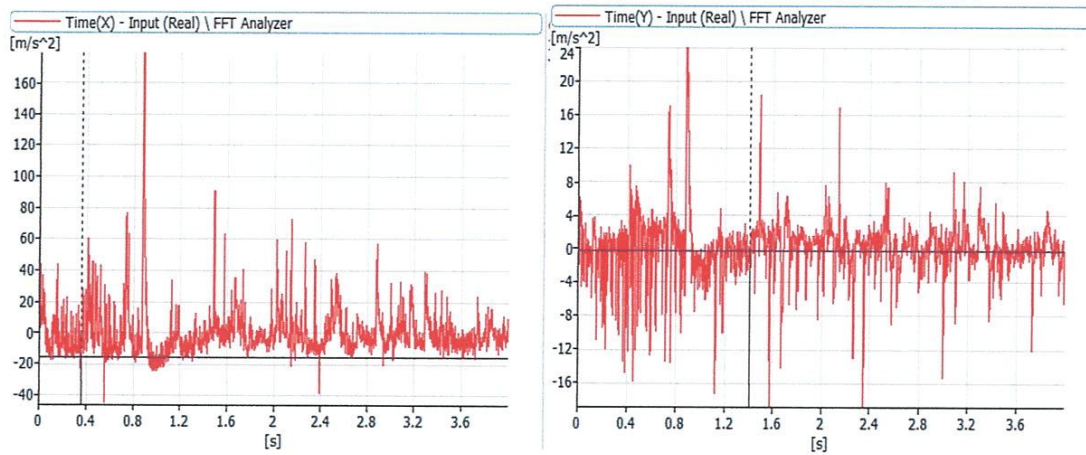
N°	Vc m/min	fz mm/ dent	ap mm
1	84,82	0,008	0,75
2	237,5	0,008	0,75
3	84,82	0,188	0,75
4	237,5	0,188	0,75
5	84,82	0,098	0,5
6	237,5	0,098	0,5
7	84,82	0,098	1
8	237,5	0,098	1
9	161,16	0,008	0,5
10	161,16	0,188	0,5
11	161,16	0,008	1
12	161,16	0,188	1
13	161,16	0,098	0,75
14	161,16	0,098	0,75
15	161,16	0,098	0,75
16	161,16	0,098	0,75
17	161,16	0,098	0,75

Tableau 2.1 : paramètres de coupe optimale pour le plan box-behnken

2.7 Résultats obtenus

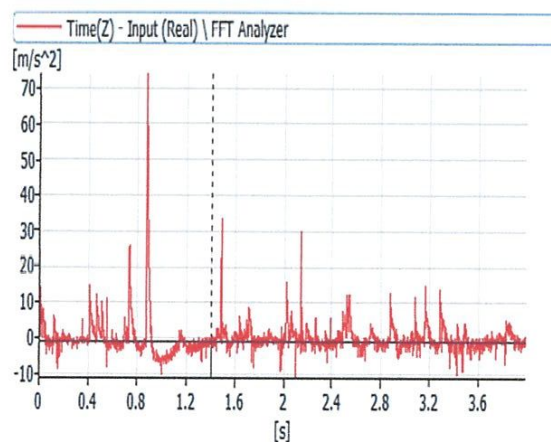
2.7.1 Signaux vibratoires

Lors de l'usinage du composite on mesure les signaux de vibrations selon les trois directions x, y, et z. Les figures 2.3 représentent un exemple des types de signaux vibratoires obtenus.



a) Signal vibratoire selon x

b) Signal vibratoire selon y



c) Signal vibratoire selon z

Figure 2.3 : Exemple de signaux vibratoires obtenus

- Indicateurs scalaires

Le calcul des indicateurs scalaires est réalisé à l'aide d'un programme élaboré sous MATLAB, par l'introduction de l'amplitude du signal et du nombre de points.

2.7.2 La rugosité

Les rugosités R_a , R_p , R_y , R_q et R_z sont mesurées après chaque passe d'usinage à l'aide d'un rugosimètre (2D) par montage spécifique sans démontage de la pièce lors de l'usinage.

Pour des fins d'analyse les résultats obtenus des indicateurs scalaires et des rugosités sont introduits au logiciel Design expert 10.

2. 8 Méthode et outils d'analyse Design expert 10

Les valeurs des paramètres de réponses considérés sont portées sur le tableau (2.2), elles sont obtenues suivant le plan d'expérience de **Box-Behnken** à 17 essais pour trois facteurs et trois niveaux.

N°	Paramètres de coupe			Ra	Rp	Rmsz	Vcx	Vcy	Vcz	E Y	Kx
	Vc m/min	fz mm/ dent	ap mm								
1	84,82	0,008	0,75	3,44	4,98	3,33	0,14	10,3	9,09	45684	3.2501
2	237,5	0,008	0,75	5	5,42	5,06	92,2	20,6	39,6	3140,3	38.8554
3	84,82	0,188	0,75	2,91	6,58	4,00	180	45,9	56,9	266590	11.9926
4	237,5	0,188	0,75	1,74	8,1	12,99	544	121	202	1556000	19.7819
5	84,82	0,098	0,5	3,68	7,49	8,12	227	42,5	76,3	459290	15.4809
6	237,5	0,098	0,5	3,34	6,83	21,69	544	113	149	1476100	35.9198
7	84,82	0,098	1	3,17	6,12	6,31	250	46	88,1	186620	22.359
8	237,5	0,098	1	2,65	9,40	18,64	789	130	247	2323900	53.9362
9	161,16	0,008	0,5	1,72	6,53	4,82	180	33,8	46,6	112220	14.5007
10	161,16	0,188	0,5	4,22	7,08	12,60	259	47,4	78,8	198860	20.6323
11	161,16	0,008	1	4,25	7,46	6,59	333	62	53,3	238110	17.391
12	161,16	0,188	1	1,79	8,86	12,85	371	67,7	130	633410	18.1443
13	161,16	0,098	0,75	2,56	8,18	10,58	511	95,5	124	515370	31.1488
14	161,16	0,098	0,75	2,66	8,52	7,80	214	39,7	65,2	273330	11.8509
15	161,16	0,098	0,75	2,68	9,79	7,15	279	50,2	90,6	286140	18.3692
16	161,16	0,098	0,75	2,75	11,39	10,47	365	69,7	117	813060	20.0389
17	161,16	0,098	0,75	3,84	10,33	15,53	401	78,3	138	1159500	25.1564

Tableau 2.2 : Résultats expérimentaux des critères de rugosité, et d'indicateurs scalaires

Chapitre 03 : Analyse des résultats

Dans ce chapitre nous présentons une analyse succincte des différents résultats obtenus en utilisons un ensemble d'outils d'analyses.

3.1 Vérification de la validité des modèles :

Pour vérifier la validité du modèle, on utilise :

- L'analyse de la variance (*ANOVA*) : Elle est appliquée pour vérifier l'influence des effets et des interactions simultanées des paramètres de coupe sur la rugosité de surface et les indicateurs scalaires. Etant donné que les facteurs sont exprimés dans des unités différentes, le codage de ces facteurs permis la comparaison de leurs effets.
- Coefficients d'ajustement des modèles : Le coefficient de détermination R^2 est au même temps la fraction des variations de la réponse expliquée par le modèle seul et une information de la qualité de la régression. Le coefficient R^2 peut être interprété comme le quotient des variances expliqué par la variance des réponses mesurées, avec R^2 varie entre 0 et 1. Plus la valeur de R^2 est proche de 1 plus le modèle est significatif. Le coefficient de détermination de la régression R^2 est défini par le quotient de la dispersion des résultats (équation 3.1) [33].

$$R^2 = 1 - \frac{SSErreur}{SStotal} \quad \text{équation (3.1)}$$

- Graphiques des valeurs résiduelles : les graphiques des valeurs résiduelles sont déterminées par l'évaluation de l'équation (équation 3.2) [32].

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} \quad \text{équation (3.2)}$$

Où :

y_{ij} : observation des valeurs non ajustées.

\hat{y}_{ij} : observation des valeurs ajustées.

- Graphique des valeurs ajustées en fonction des valeurs résiduelles

- Test de normalité d'Anderson Darling : ce test est utilisé pour vérifier si un échantillon de données est issu d'une population ayant une distribution spécifique. Il est une autre forme du test de chi carré ou de Kolmogorov-Smirnov [32].

- valeurs critiques sont fonction des distributions (normale, log-normale, exponentielle...). Les valeurs de P sont le baromètre de la validité des résultats. Plus la valeur de (P) est petite, plus la probabilité de faire une erreur en rejetant l'hypothèse fausse est faible. Une valeur limite de 0.05 est requise. Autrement dit, écarter l'hypothèse nulle si la valeur de P est inférieure à 0.05.

3.2 Analyse ANOVA de la rugosité

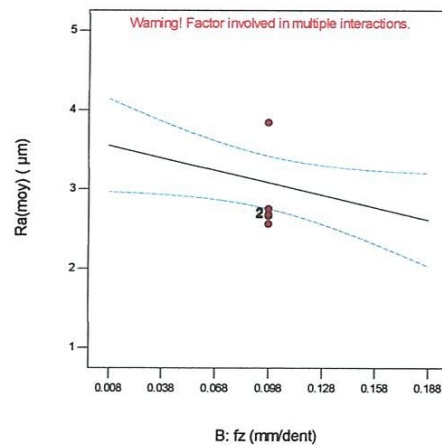
3.2.1 L'analyse ANOVA de la rugosité (Ra)

Le tableau (3.1) concerne l'analyse de la variance ANOVA du critère de la rugosité Ra

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	9.96	6	1.66	4.39	0.0197	signifiant
A-Vc	0.028	1	0.028	0.073	0.7924	
B-fz	1.76	1	1.76	4.65	0.0564	
C-ap	0.15	1	0.15	0.40	0.5411	
AB	1.86	1	1.86	4.93	0.0506	
AC	8.100E-003	1	8.100E-003	0.021	0.8865	
BC	6.15	1	6.15	16.28	0.0024	
Résiduel	3.78	10	0.38			
Cor Total	13.74	16				

Tableau 3.1 : Analyse de la variance ANOVA pour (Ra)

Nous avons reporté sur les figures (3.1) l'évolution de la rugosité Ra en fonction des paramètres de coupe Vc, ap et fz.



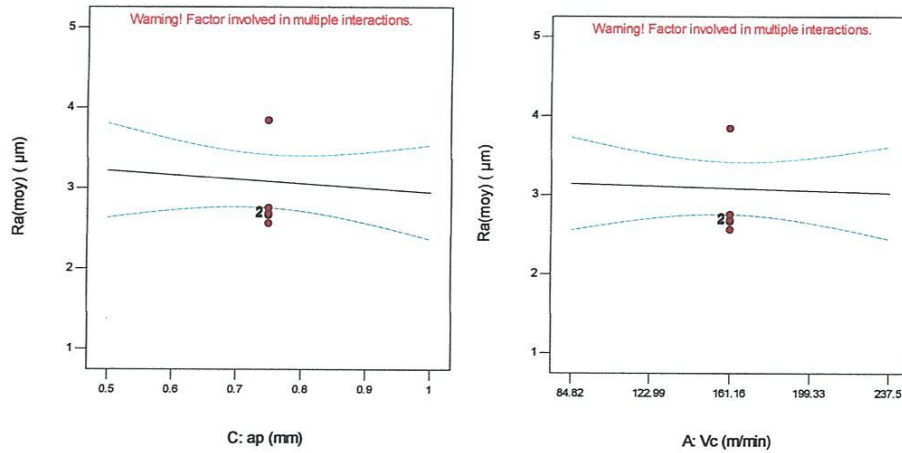


Figure 3.1 Evolution de la rugosité en fonction des paramètres de coupe

Ces courbes montrent que seuls l'avance (fz) et la profondeur (ap) ont une influence significative sur la rugosité Ra .

- **Modèles mathématique**

Ces modèles permettent de décrire la relation entre chacun des critères de la rugosité et les paramètres de coupe. Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux car le coefficient de détermination est proche de l'unité.

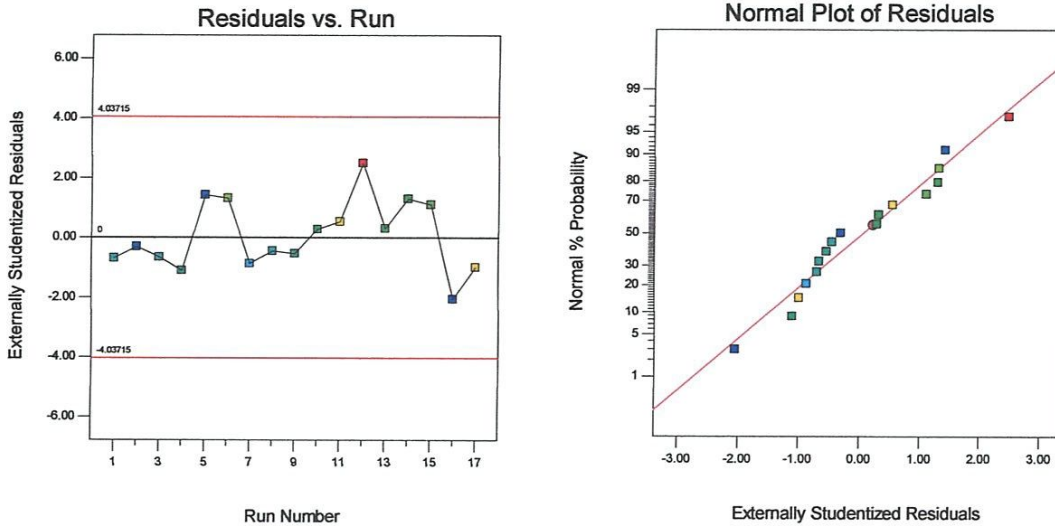
$$Ra(moy) = -1.77525 + 0.010734 * Vc + 52.13404 * fz + 5.23088 * ap - 0.099336 * Vc * fz - 2.35787E-003 * Vc * ap - 55.11111 * fz * ap$$

$$R^2 = 0.7250$$

P value = 0.0197 < 0.05 l'influence est significative

- **Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux**

Sur la figure (3.2) nous avons reporté la distribution de l'erreur



a) Courbe des valeurs résiduelles pour Ra b) Courbe de normalité pour Ra

Figure 3.2 : Teste de la concordance

Sur les graphiques de distribution de l'erreur on constate que les points sont plus proches de la droite, cela signifie une bonne normalité de la distribution de l'erreur.

- Diagrammes de surface 3D de (Ra)

Sur la figure (3.3) nous représentons l'évolution des paramètres (a_p et f_z) pour une vitesse de 161.16 m/tr.

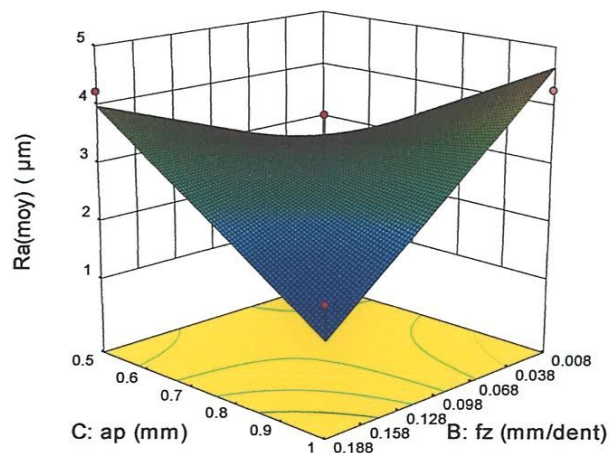


Figure 3.3. Diagrammes de surface 3D de Ra en fonction de (a_p , f_z) avec $V_c=161.16$ m/tr

La figure (3.3) permet d'évaluer l'influence simultanée de (a_p et f_z), sur la rugosité (Ra). Cette figure montre que les pentes de la vitesse d'avance (f_z), et la profondeur de passe (a_p) sont plus importantes pour la vitesse de coupe ($V_c = 161.16$ m/tr). La meilleure valeur de la rugosité (Ra) est obtenue avec la plus grande vitesse d'avance ($f_z = 0.188$ mm/dent) et une grande profondeur de passe ($a_p = 1$ mm) dans le cas testé.

3.2.2 L'analyse ANOVA de la Rp

Le tableau (3.2) concerne l'analyse de la variance ANOVA du critère de la rugosité Rp

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	35,7889695	6	5,96482825	4,54957133	0,01758786	signifiant
A-Vc	2,6335125	1	2,6335125	2,00866688	0,18679772	
B-fz	4,84382813	1	4,84382813	3,69454754	0,08351569	
C-ap	1,90612813	1	1,90612813	1,45386682	0,25566308	
BC	0,180625	1	0,180625	0,13776865	0,71825216	
A^2	12,5557652	1	12,5557652	9,57669639	0,01135417	
B^2	12,2122984	1	12,2122984	9,31472294	0,01220991	
Résiduel	13,1107478	10	1,31107478			
Cor Total	48,8997173	16				

Tableau 3.2 : Résultat de la variance de la composante de la rugosité Rp

Nous avons reporté sur les figures (3.4) l'évolution de la rugosité Rp en fonction des paramètres de coupe Vc, ap et fz.

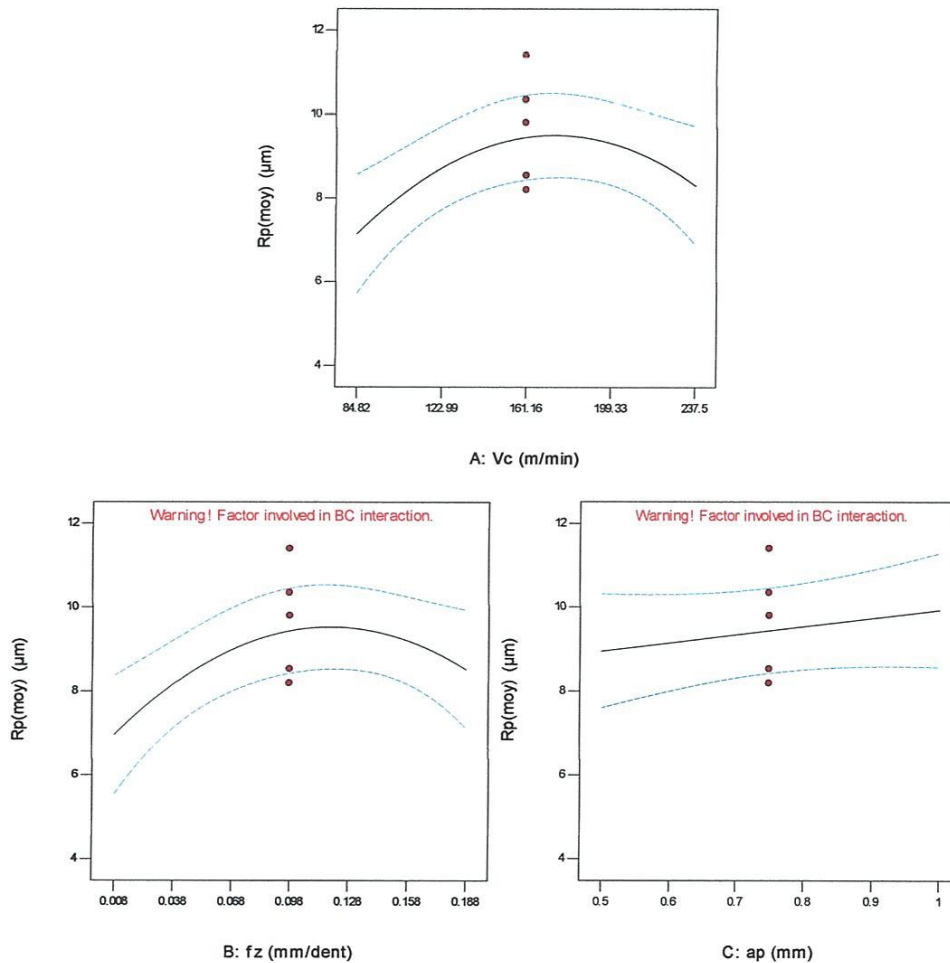


Figure 3.4 : Graphes des effets principaux de Vc, fz et ap sur la rugosité Rp

Ces courbes montrent que la rugosité Rp évolue de façon parabolique pour fz et Vc et d'une manière linéaire croissante pour ap.

- **Modèles mathématiques et coefficients de déterminations**

Ce modèle permet de décrire la relation entre la rugosité Rp et les éléments du régime de coupe. Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est proche de l'unité.

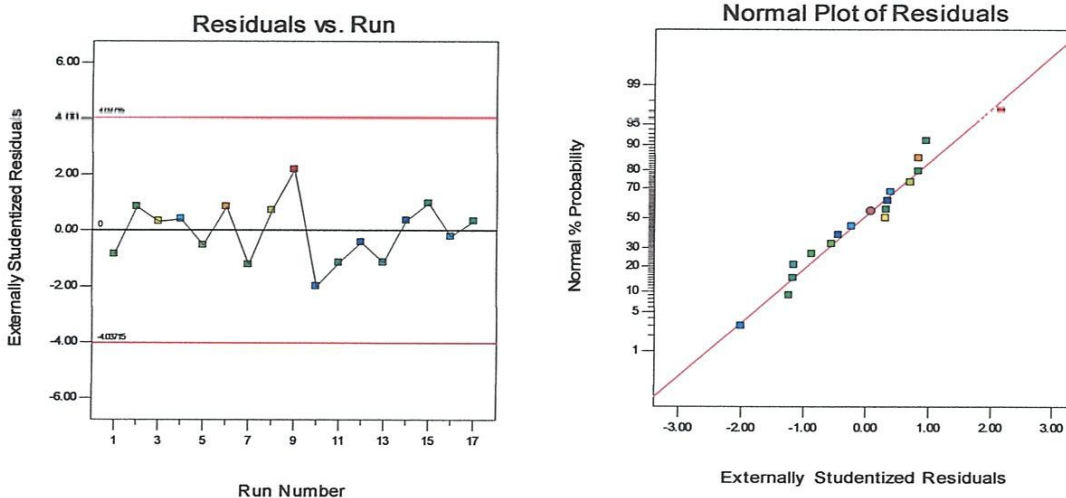
$$Rp \text{ (moy)} = -3.08947 + 0.10289 * Vc + 42.71528 * fz + 1.02694 * ap + 9.44444 * fz * ap - 2.95901E-004 * Vc^2 - 209.96318 * fz^2$$

$$R^2 = 0.7319$$

P value = 0,01758786 < 0.05 l'influence est significative

- **Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux :**

Sur la figure (3.5) nous avons reporté la distribution de l'erreur



a) Courbe des résiduels pour Rp

b) Courbe de normalité pour Rp

Figure 3.5 : Teste de la concordance

Sur les graphiques de distribution de l'erreur on constate que les points sont plus proches de la droite, cela signifie une bonne normalité de la distribution de l'erreur.

- **Diagrammes de surface 3D de (Rp)**

Sur la figure (3.6) nous représentons l'évolution des paramètres (Vc et ap) pour une vitesse d'avance 0.098 mm/dent.

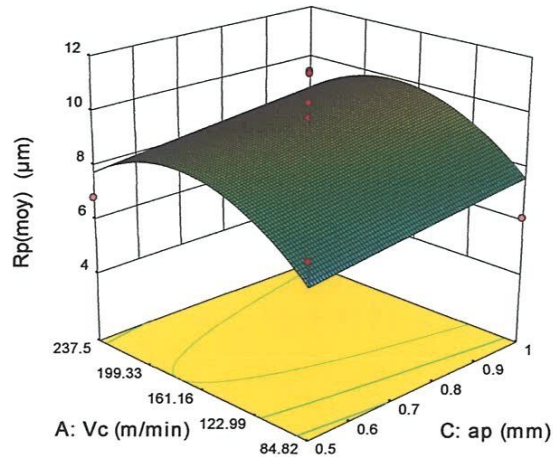


Figure 3.6 : Diagrammes de surface 3D de (R_p) en fonction de (V_c , a_p) avec $f_z = 0.098$ mm/dent

L'évolution de la rugosité R_p s'est montrée d'une tendance linéaire en fonction de a_p . par contre en fonction de la vitesse de coupe, l'évolution de la rugosité augmente avec l'augmentation de V_c pour atteindre un maximum et diminue par la suite. Ceci montre cas des grandes vitesses et des petites profondeurs, la qualité de surface est meilleure.

3.3 Analyse ANOVA des signaux de vibrations

3.3.1 L'analyse ANOVA de l' R_{msz}

Le tableau (3.3) concerne l'analyse de la variance ANOVA du critère de l' R_{msz}

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	232,781031	3	77,5936771	4,87339518	0,01742453	signifiant
A- V_c	167,704045	1	167,704045	10,5329212	0,00638394	
B- f_z	64,071766	1	64,071766	4,02412989	0,06612298	
C- a_p	1,00522021	1	1,00522021	0,06313447	0,8055367	
Résiduel	206,98461	13	15,9218931			
Cor Total	439,765642	16				

Tableau 3.3 : Les résultats d'ANOVA de composante de R_{msz}

Nous avons reporté sur les figures (3.7) l'évolution de (R_{msz}) en fonction des paramètres de coupe V_c , a_p et f_z .

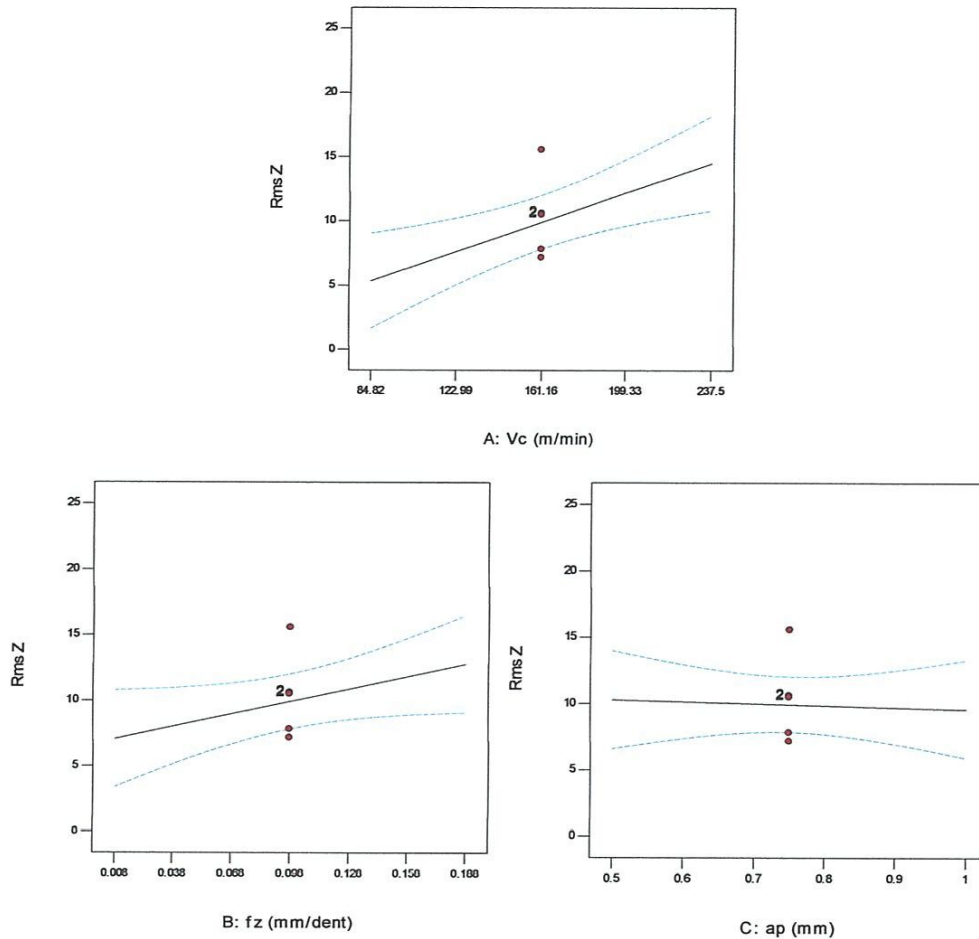


Figure 3.7 : Graphes des effets principaux de Vc, fz et ap sur Rms_z

Ces courbes montrent que l'avance (fz) et la vitesse (Vc) ont une influence significative sur l'indicateur scalaire (Rms_z) tandis que, la profondeur de passe présente une faible influence sur ce paramètre.

- **Modèles mathématique est les coefficients de déterminations**

Ce modèle permet de décrire la relation entre chacun l'effort de coupe et les éléments du régime de coupe. Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est assez acceptable.

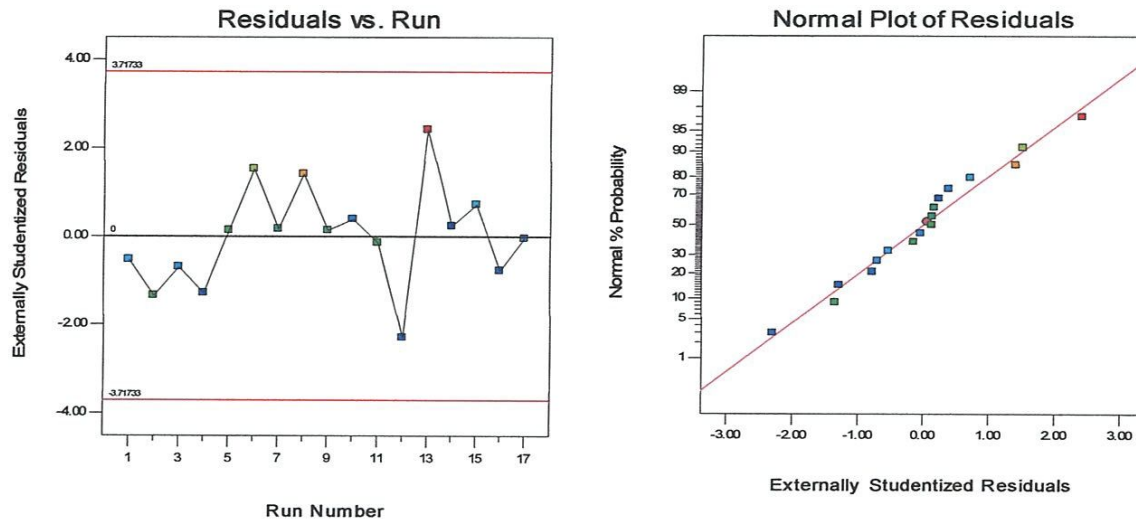
$$Rms_z = -1.76542 + 0.059976 * Vc + 31.44458 * fz - 1.41790 * ap$$

$$R^2 = 0.5293$$

P value = 0,01742453 < 0.05 l'influence est significative

- **Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux :**

Sur la figure (3.8) nous avons reporté la distribution de l'erreur



a) Courbe des résiduels pour Rms_z

b) Courbe de normalité pour Rms_z .

Figure 3.8 : teste de la concordance

Sur les graphiques de distribution de l'erreur on constate que les points sont plus proches de la droite, cela signifie une bonne normalité de la distribution de l'erreur.

- **Diagrammes de surfaces 3D de Rms_z**

L'évolution de l' Rms_z en fonction de la vitesse de coupe et la profondeur de passe pour $fz=0.098$ mm/dent, est présenté dans la figure (3.9).

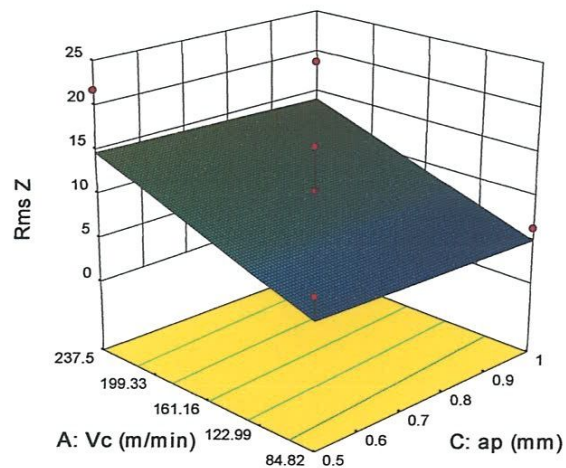


Figure 3.9 : Diagrammes de surface 3D de (Rms_z) en fonction de (V_c , a_p) pour $fz=0.098$ mm/dent.

L'évolution de l' Rms_z s'est montrée d'une tendance linéaire en fonction de a_p et V_c . L'augmentation de la vitesse de coupe entraîne une augmentation de l' Rms_z . Tandis que l'augmentation de la profondeur de passe engendre une diminution de l' Rms_z .

3.3.2 L'analyse Analyse ANOVA de V_{c_x}

Le tableau (3.4) concerne l'analyse de la variance ANOVA du critère de V_{c_x}

	Sum of		Mean	F	p-value	
Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F	
Model	3.208E+005	3	1.069E+005	5.14	0.0146	Signifiant
A-Vc	2.152E+005	1	2.152E+005	10.35	0.0068	
B-fz	70060.73	1	70060.73	3.37	0.0894	
C-ap	35511.12	1	35511.12	1.71	0.2140	
Résiduel	2.704E+005	13	20799.92			
Cor Total	5.912E+005	16				

Tableau 3.4 : Analyse de la variance ANOVA pour (V_{c_x})

Nous avons reporté sur les figures (3.10) l'évolution de (V_{c_x}) en fonction des paramètres de coupe V_c , a_p et f_z .

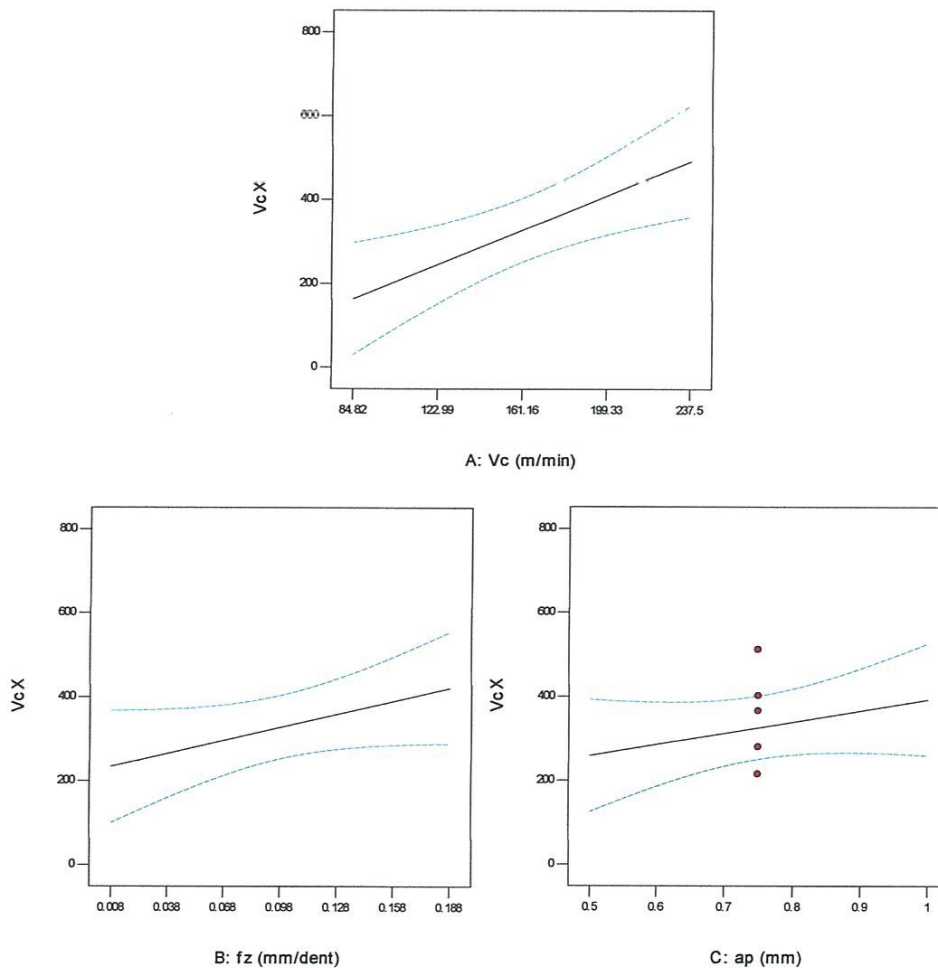


Figure 3.10 : Graphes des effets principaux de V_c , f et a_p sur V_{c_x}

Ces courbes montrent que l'avance (fz) et la profondeur (ap) et La vitesse (Vc) ont une influence significative sur l'indicateur scalaire V_{c_x} .

- **Modèles mathématique est les coefficients de déterminations :**

Ce modèle permet de décrire la relation entre V_{c_x} et les éléments du régime de coupe. Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est assez acceptable.

$$V_{c_x} = -322.16386 + 2.14838 * V_c + 1039.80000 * fz + 266.50000 * ap$$

$$R^2 = 0.5426$$

P value = 0.0146 < 0.05 l'influence est significative

- **Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux :**

Sur la figure (3.11) nous avons reporté la distribution de l'erreur

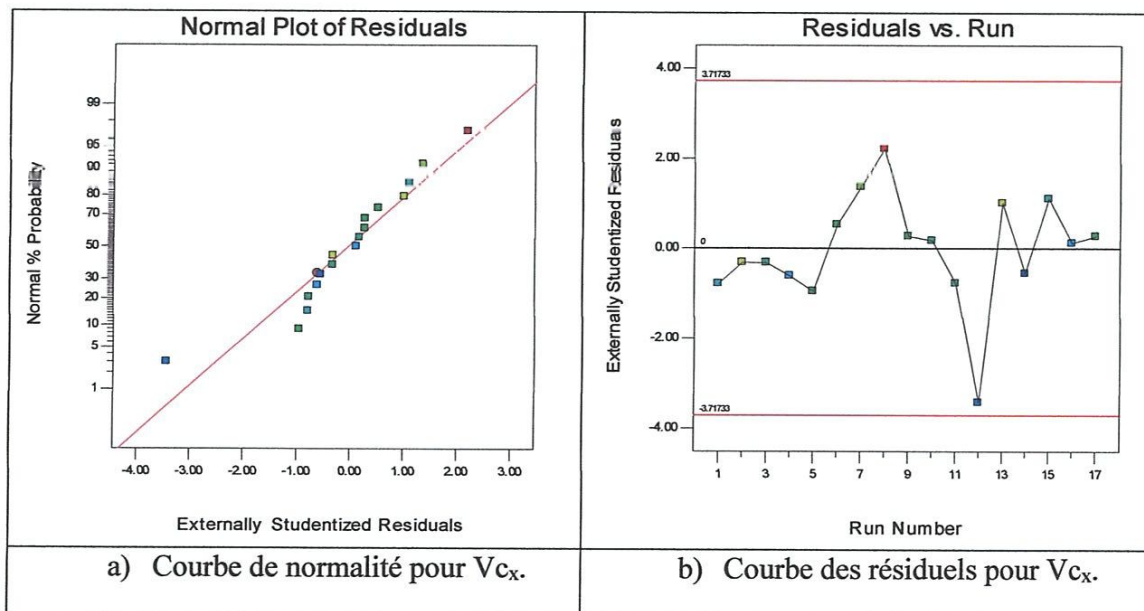


Figure 3.11 : teste de concordance.

Sur les graphiques de distribution de l'erreur on constate que les points sont plus proches de la droite, cela signifie une bonne normalité de la distribution de l'erreur.

- **Diagrammes de surfaces 3D de (V_{c_x}) :**

L'évolution de V_{c_x} en fonction de la vitesse de coupe et la profondeur de passe pour $fz=0.098$ mm/dent, est présenté dans la figure (3.12).

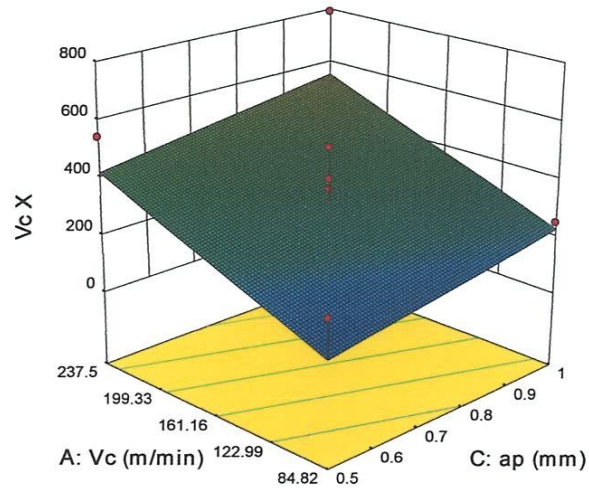


Figure 3.12 : Diagrammes de surface 3D de (V_{c_x}) en fonction de (V_c , a_p) avec $f_z=0.098$ mm/dent

L'évolution de V_{c_x} s'est montrée d'une tendance linéaire en fonction de a_p et V_c . L'augmentation de la vitesse de coupe ainsi que la profondeur de passe entraîne une augmentation de V_{c_x} .

3.3.3 L'analyse ANOVA de V_{c_y} :

Le tableau (3 5) concerne l'analyse de la variance ANOVA du critère de V_{c_y} ,

	Sum of		Mean	F	p-value	
Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F	
Model	10803.89	3	3601.30	5.65	0.0106	signifiant
A- V_c	7194.00	1	7194.00	11.29	0.0051	
B- f_z	3014.76	1	3014.76	4.73	0.0487	
C- a_p	595.12	1	595.12	0.93	0.3516	
Résiduel	8286.47	13	637.42			
Cor Total	19090.36	16				

Tableau 3.5 : Analyse de la variance ANOVA pour (V_{c_y})

Nous avons reporté sur les figures (3.13) l'évolution de (V_{c_y}) en fonction des paramètres de coupe V_c , a_p et f_z .

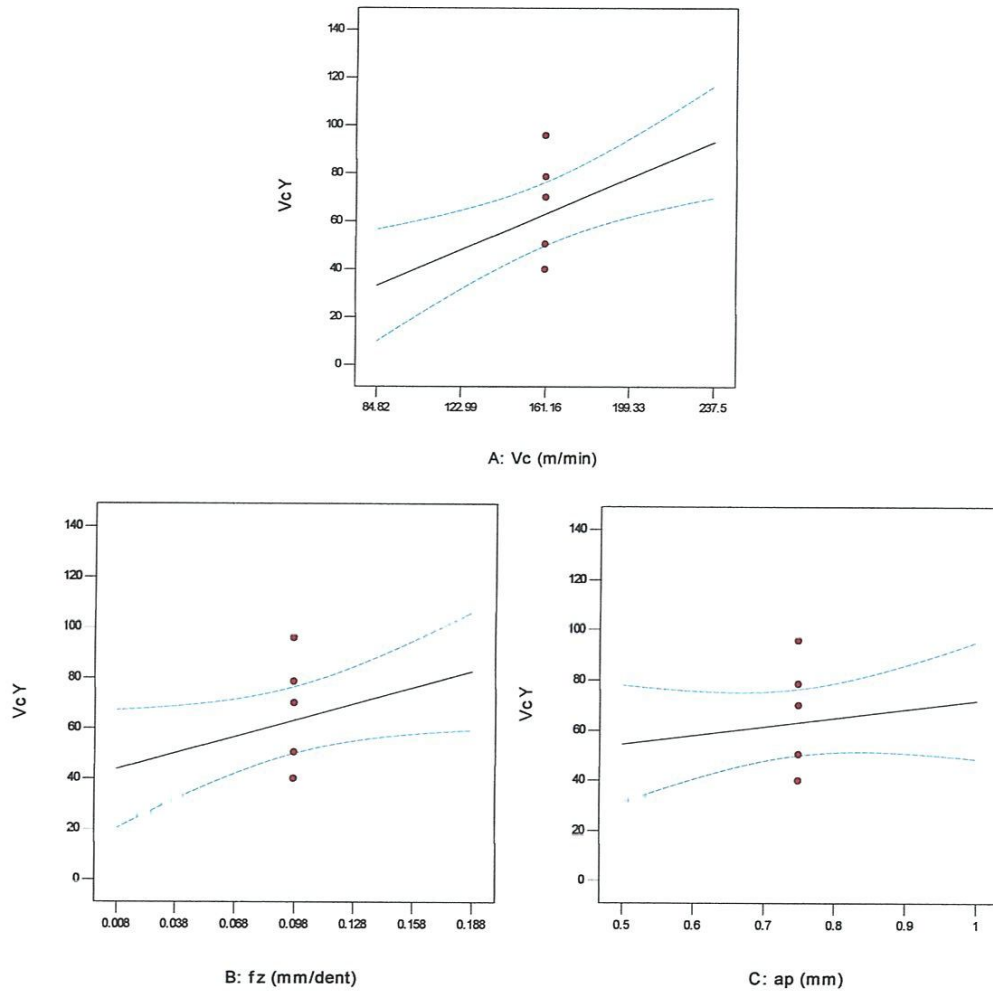


Figure 3.13 : Graphes des effets principaux de Vc, f et ap sur V_{cy}

Ces courbes montrent que l'avance (fz) et la vitesse (Vc) et la profondeur de passe ont une influence significative sur l'indicateur scalaire (V_{cy}).

- **Modèles mathématique est les coefficients de déterminations :**

Ce modèle permet de décrire la relation entre V_{cy} et les éléments du régime de coupe. Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est assez acceptable.

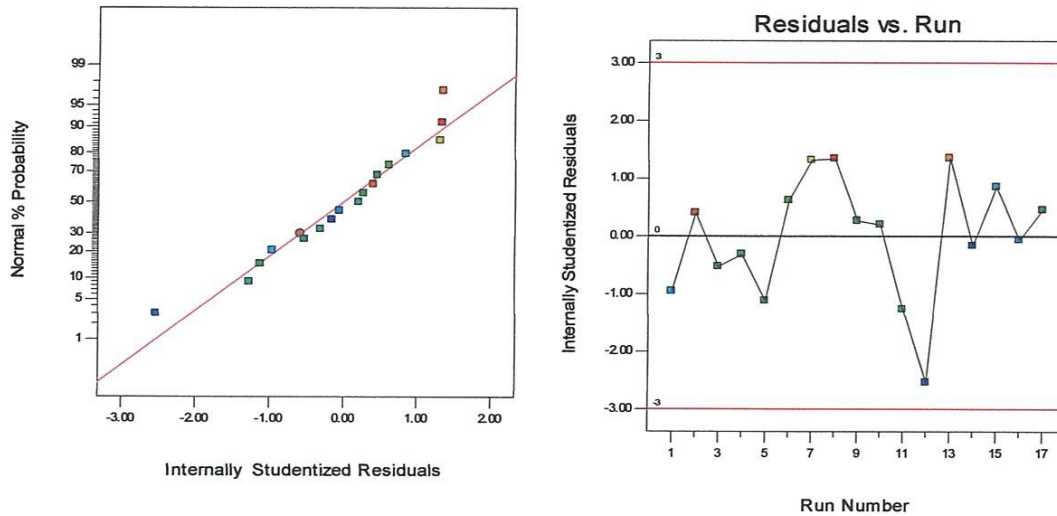
$$V_{cy} = -47.16619 + 0.39282 * Vc + 215.69444 * fz + 34.50000 * ap$$

$$R^2 = 0.5659$$

P value = 0.0106 < 0.05 l'influence est significative

- **Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux :**

Sur la figure (3.14) nous avons reporté la distribution de l'erreur



a) Courbe de normalité pour V_{cy}

b) Courbe des résiduels pour V_{cy} .

Figure 3.14 : teste de concordance

Sur les graphiques de distribution de l'erreur on constate que les points sont plus proches de la droite, cela signifie une bonne normalité de la distribution de l'erreur.

- **Diagrammes de surfaces 3D de (V_{cy}) :**

L'évolution de V_{cy} en fonction de la vitesse de coupe et la profondeur de passe pour $f_z=0.098$ mm/dent, est présenté dans la figure (3.15).

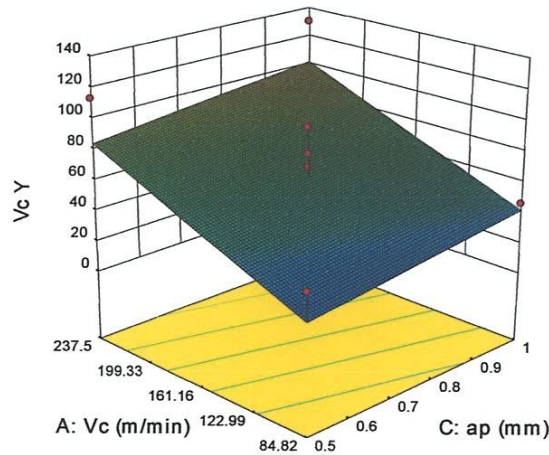


Figure 3.15 : Diagramme de surface 3D de (V_{cy}) en fonction de (V_c , a_p) avec $f_z=0.098$ mm/dent

L'évolution de V_{cy} s'est montrée d'une tendance linéaire en fonction de a_p et V_c . L'augmentation de la vitesse de coupe ainsi que la profondeur de passe entraîne une augmentation de V_{cy} .

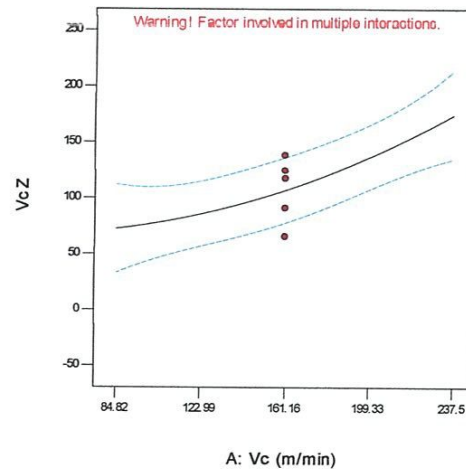
3.3.4 L'analyse ANOVA de V_{cz} :

Le tableau (3.6) concerne l'analyse de la variance ANOVA du critère de V_{cz}

	Sum of		Mean	F	p-value	
Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F	
Model	53492.50	9	5943.61	7.74	0.0066	signifiant
<i>A-Vc</i>	20727.50	1	20727.50	26.98	0.0013	
<i>B-fz</i>	12728.90	1	12728.90	16.57	0.0047	
<i>C-ap</i>	3515.41	1	3515.41	4.58	0.0697	
<i>AB</i>	3282.72	1	3282.72	4.27	0.0775	
<i>AC</i>	1857.61	1	1857.61	2.42	0.1639	
<i>BC</i>	495.06	1	495.06	0.64	0.4485	
<i>A²</i>	1136.78	1	1136.78	1.48	0.2632	
<i>B²</i>	9101.76	1	9101.76	11.85	0.0108	
<i>C²</i>	1175.50	1	1175.50	1.53	0.2560	
Résiduel	5377.72	7	768.25			
Cor Totul	58870.22	16				

Tableau 3.6 : Analyse de la variance ANOVA pour (V_{cz})

Nous avons reporté sur les figures (3.16) l'évolution de (V_{cz}) en fonction des paramètres de coupe V_c , a_p et f_z .



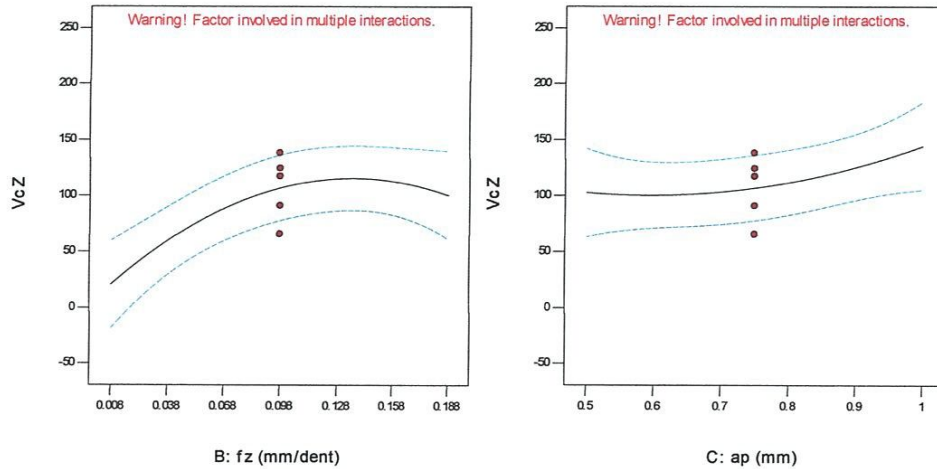


Figure 3.16 : Graphes des effets principaux de V_c , f et a_p sur V_{c_z}

Ces courbes montrent que l'avance (f_z) et la vitesse (V_c) et la profondeur de passe ont une influence significative sur l'indicateur scalaire (V_{c_z}).

- **Modèles mathématique est les coefficients de déterminations :**

Ce modèle permet de décrire la relation entre V_{c_z} et les éléments du régime de coupe. Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est proche de l'unité.

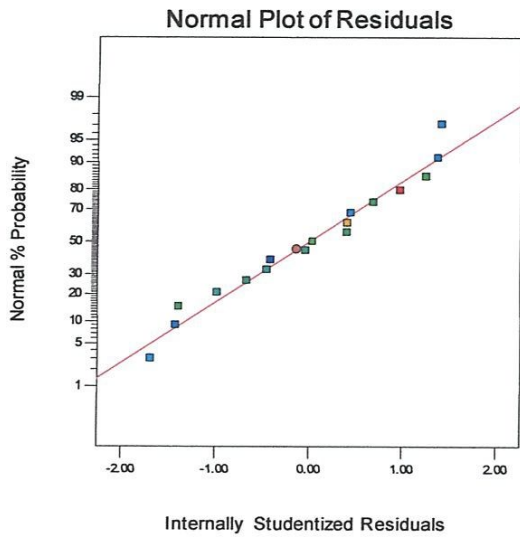
$$V_{c_z} = +300.33816 - 1.4974 * V_c + 525.43982 * f_z - 547.59082 * a_p + 4.16958 * V_c * f_z + 1.12916 * V_c * a_p + 494.44444 * f_z * a_p + 2.81946E-003 * V_c^2 - 5739.96914 * f_z^2 + 267.34000 * a_p^2$$

$$R^2 = 0.9087$$

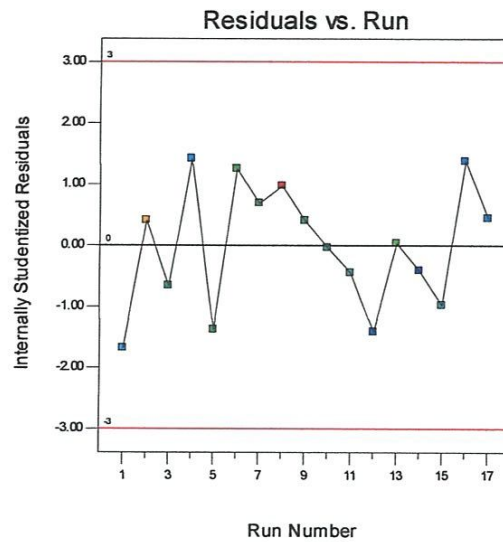
P value = 0.0066 < 0.05 l'influence est significative

- **Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux :**

Sur la figure (3.17) nous avons reporté la distribution de l'erreur



a) Courbe de normalité pour V_{c_z} .



b) Courbe des résiduels pour V_{c_z} .

Figure 3.17 : teste de concordance

Sur les graphiques de distribution de l'erreur on constate que les points sont plus proches de la droite, cela signifie une bonne normalité de la distribution de l'erreur

- Diagrammes de surfaces 3D de (V_{c_z}) :

L'évolution de V_{c_z} en fonction de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance pour $a_p = 0.75$ mm, est présenté dans la figure (3.18).

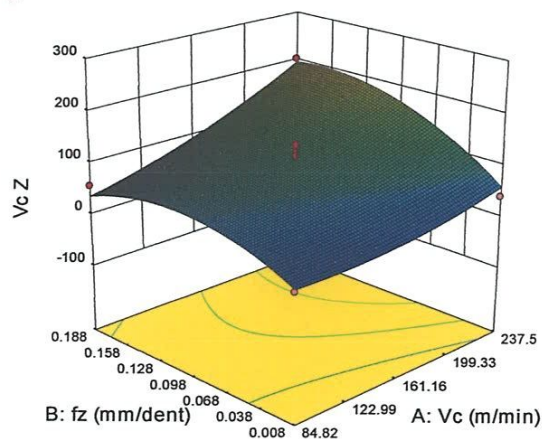


Figure 3.18 : Diagramme de surface 3D de (V_{c_z}) en fonction de (V_c et f_z) avec $a_p = 0.75$ mm

L'évolution de V_{c_z} s'est montrée d'une tendance linéaire en fonction de V_c . par contre en fonction de la vitesse d'avance, l'évolution de V_{c_z} augmente avec l'augmentation de f_z pour atteindre un maximum et diminue par la suite. Ceci montre cas des petites vitesses V_c et des petites avances f_z , la valeur de V_{c_z} est meilleure.

3.3.5 L'analyse ANOVA de E y :

Le tableau (3.7) concerne l'analyse de la variance ANOVA du critère de l'énergie E_y

	Sum of		Mean	F	p-value	
Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F	
Model	3.218E+012	3	1.073E+012	3.99	0.0323	signifiant
A-Vc	2.421E+012	1	2.421E+012	9.01	0.0102	
B-fz	6.360E+011	1	6.360E+011	2.37	0.1480	
C-ap	1.612E+011	1	1.612E+011	0.60	0.4526	
Résiduel	3.495E+012	13	2.688E+011			
Cor Total	6.713E+012	16				

Tableau 3.7 : Analyse de la variance ANOVA pour (E y)

Nous avons reporté sur les figures (3.19) l'évolution de (E_y) en fonction des paramètres de coupe V_c, ap et fz.

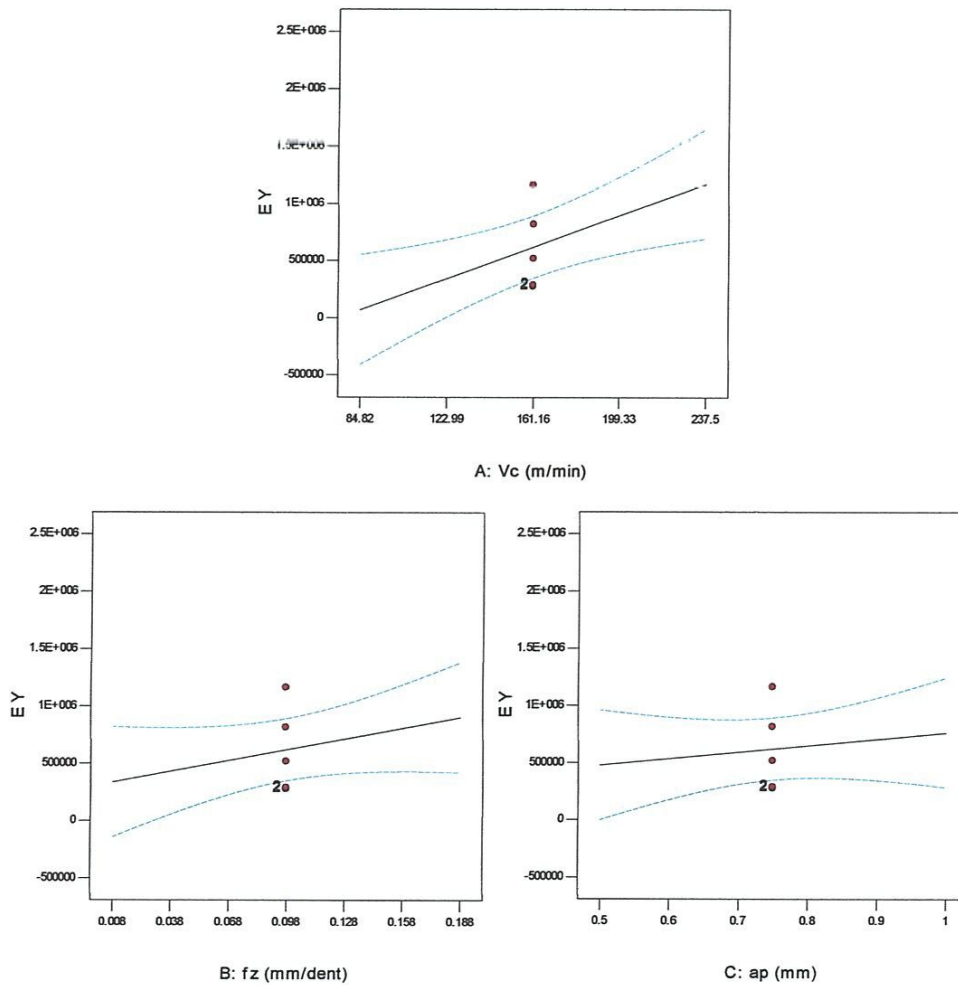


Figure 3.19 : Graphes des effets principaux de V_c, f et ap sur E y.

Ces courbes montrent que l'avance (f_z) et la vitesse (V_c) ont une influence significative sur l'indicateur scalaire (E_y) tandis que, la profondeur de passe présente une faible influence sur cet indicateur.

- **Modèles mathématique est les coefficients de déterminations :**

Ce modèle permet de décrire la relation entre E_y et les éléments du régime de coupe. Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est assez acceptable.

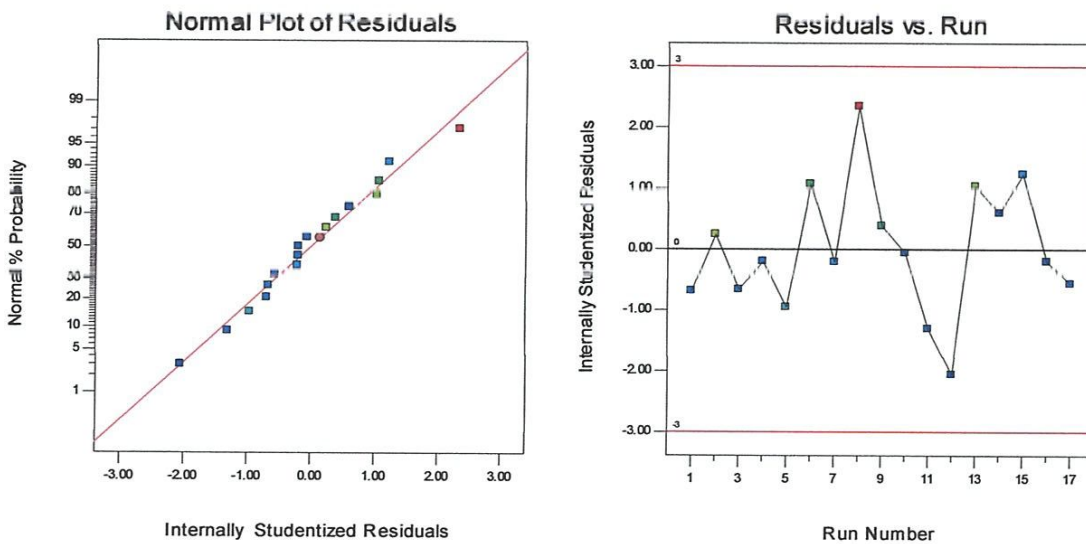
$$E_y = -1.27378E+006 + 7206.17681 * V_c + 3.13292E+006 * f_z + 5.67785E+005 * a_p$$

$$R^2 = 0.4794$$

P value = 0.0323 < 0.05 l'influence est significative

- **Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux :**

Sur la figure (3.20) nous avons reporté la distribution de l'erreur



a) Courbe de normalité pour E_y .

b) Courbe des résiduels pour E_y .

Figure 3.20 : teste de concordance

Sur les graphiques de distribution de l'erreur on constate que les points sont plus proches de la droite, cela signifie une bonne normalité de la distribution de l'erreur.

- **Diagrammes de surfaces 3D de (E_y) :**

L'évolution de E_y en fonction de la vitesse de coupe et la profondeur de passe pour $f_z=0.098$ mm/dent, est présenté dans la figure (3.21).

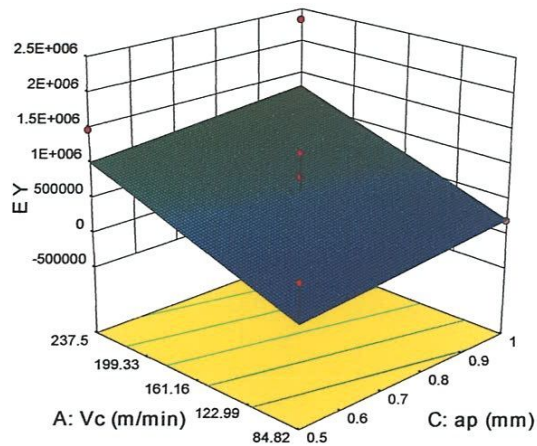


Figure 3.21 : Diagramme de surface 3D de (E_y) en fonction de (V_c et f_z) avec $f_z = 0.098$ mm/dent

L'évolution de E_y s'est montrée d'une tendance linéaire en fonction de ap et V_c . L'augmentation de la vitesse de coupe ainsi que la profondeur de passe entraîne une augmentation de E_y .

3.3.6 L'analyse ANOVA de K_x :

Le tableau (3.8) concerne l'analyse de la variance ANOVA du critère de kurtosisc K_x

	Sum of		Mean	F	p-value	
Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F	
Model	1970.94	9	218.99	4.61	0.0282	Signifiant
A- V_c	1137.90	1	1137.90	23.94	0.0018	
B- f_z	1.48	1	1.48	0.031	0.8647	
C- ap	79.99	1	79.99	1.68	0.2356	
AB	193.43	1	193.43	4.07	0.0834	
AC	31.02	1	31.02	0.65	0.4457	
BC	7.23	1	7.23	0.15	0.7081	
A ²	137.14	1	137.14	2.89	0.1332	
B ²	307.79	1	307.79	6.48	0.0384	
C ²	101.26	1	101.26	2.13	0.1877	
Résiduel	332.66	7	47.52			
Cor Total	2303.60	16				

Le tableau (3.8) : Analyse de la variance ANOVA pour (K_x)

Nous avons reporté sur les figures (3.21) l'évolution de (K_x) en fonction des paramètres de coupe V_c , ap et f_z .

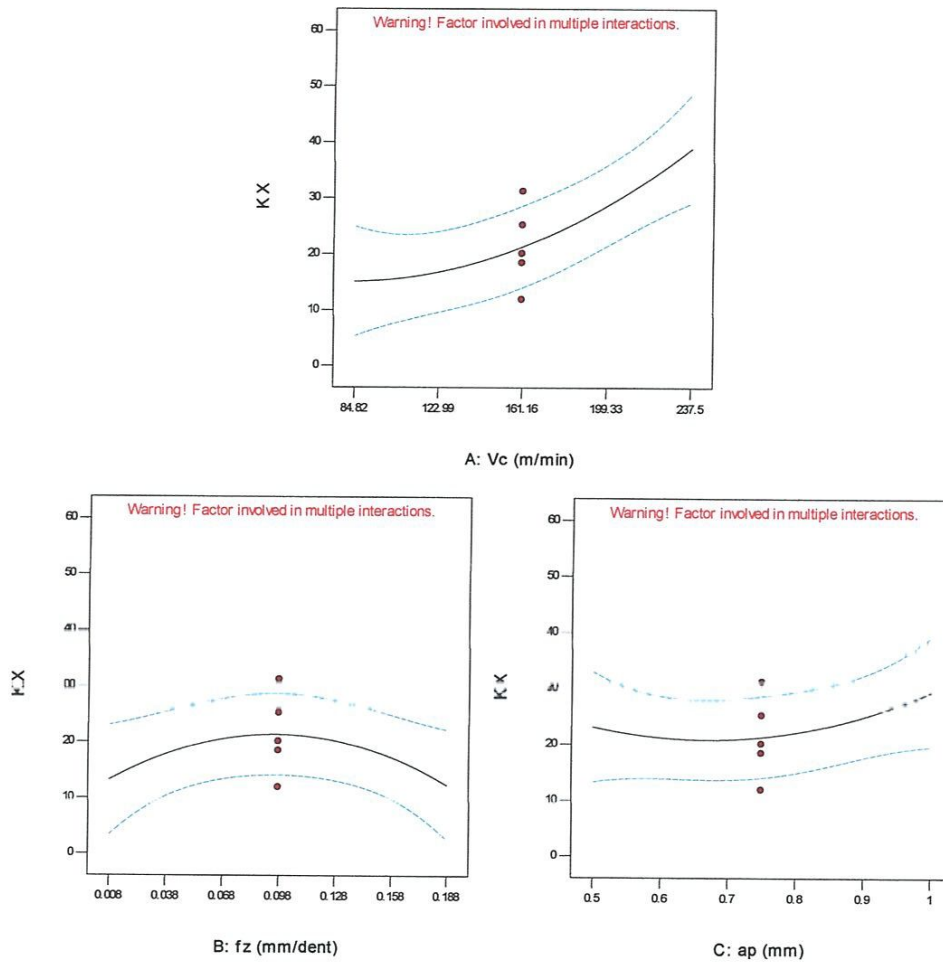


Figure 3.21 : Graphes des effets principaux de V_c , f et a_p sur K_x .

Ces courbes montrent que l'avance (f_z) et la vitesse (V_c) et la profondeur de passe ont une influence significative sur l'indicateur scalaire (K_x).

- **Modèles mathématique est les coefficients de déterminations :**

Ce modèle permet de décrire la relation entre K_x et les éléments du régime de coupe. Ces modèles sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est assez acceptable.

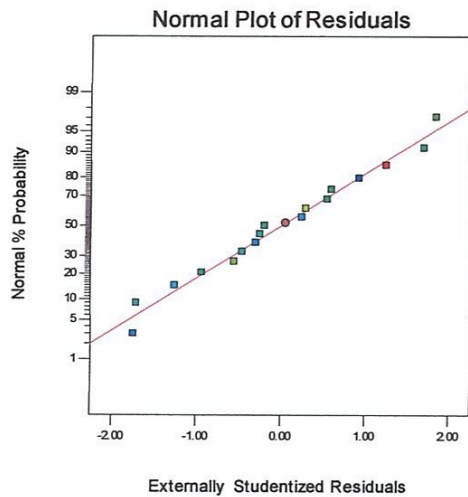
$$K_x = +43.80972 - 0.16965 * V_c + 410.03493 * f_z - 122.70761 * a_p - 1.01214 * V_c * f_z + 0.14590 * V_c * a_p - 59.75889 * f_z * a_p + 9.79278E-004 * V_c^2 - 1055.53951 * f_z^2 + 78.46568 * a_p^2$$

$$R^2 = 0.8556$$

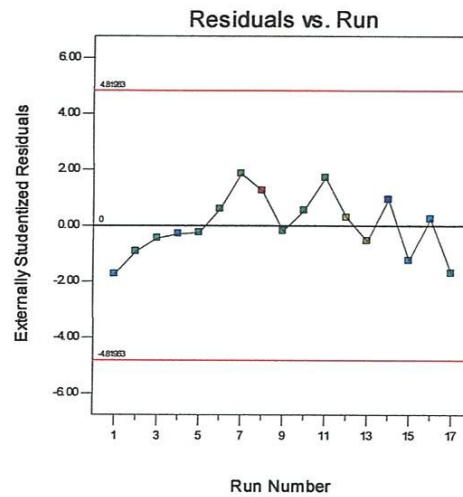
P value = 0.0282 < 0.05 l'influence est significative

- **Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux :**

Sur la figure (3.22) nous avons reporté la distribution de l'erreur



a) Courbe de normalité pour E y.



b) Courbe des résiduels pour E y.

Figure 3.22 : teste de concordance

Sur les graphiques de distribution de l'erreur on constate que les points sont plus proches de la droite, cela signifie une bonne normalité de la distribution de l'erreur.

- **Diagrammes de surfaces 3D de (K_x) :**

L'évolution de E_y en fonction de la vitesse de coupe et la profondeur de passe pour $f_z=0.098$ mm/dent, est présenté dans la figure (3.23).

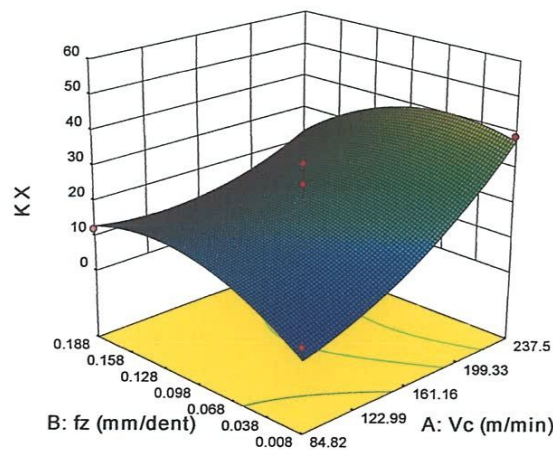


Figure 3.23 : Diagrammes de surface 3D de (R_p) en fonction de (V_c , f_z) avec $a_p=0.75$ mm

La figure (3.23) permet d'évaluer l'influence simultanée de (V_c et f_z), sur (K_x). Cette figure montre que les pentes de la vitesse d'avance (f_z), et la vitesse de coupe (V_c) sont plus importantes pour la profondeur de passe ($a_p=0.75$ mm). La meilleure valeur de (K_x) est obtenue avec la plus petite vitesse d'avance ($f_z=0.008$ mm/dent) et une petite vitesse de coupe ($V_c=84.82$ m/min) dans le cas testé.

Corrélation entre Rugosité et Vibration

En termes de corrélation entre rugosité et vibration la tendance observée est que la rugosité augmente avec l'augmentation des niveaux de vibrations. Les résultats expérimentaux montrent une certaine fluctuation mais en général, la tendance va dans le sens que le fini de surface se dégrade avec l'augmentation des indicateurs scalaires de vibrations. Les fluctuations enregistrées témoignent de la surcharge dans certaines directions de coupe.

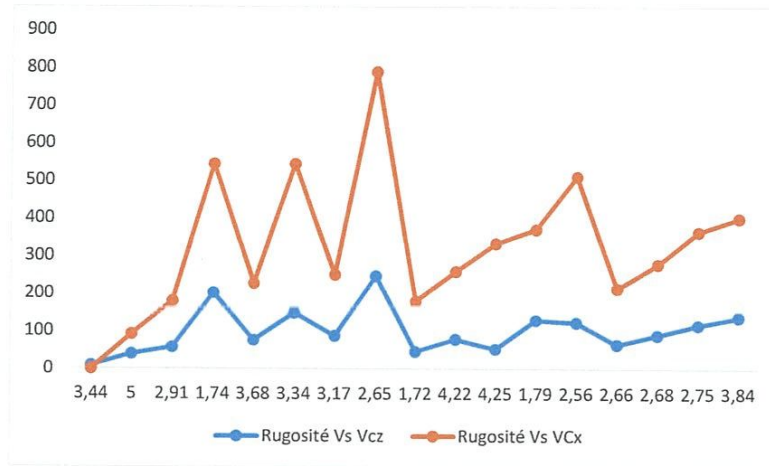


Figure 3.24 : corrélation entre rugosité et vibrations

Conclusion générale

L'objectif principal de cette étude est d'intégrer l'analyse vibratoire lors de l'usinage des composite renforcés de fibres de verre E afin d'optimiser l'usinabilité en terme de qualité des pièces usinées. L'élaboration d'un plan d'expérience de 17 essais de Box-Behnken a été adopté selon les contraintes liées aux caractéristiques mécaniques de la machine-outil utilisée. L'analyse statistique a conduit à l'optimisation des paramètres de coupe V_c , a_p et f_z .

L'usinage du matériau considéré à l'aide des paramètres coupe optimisés a conduit aux mesures d'une part de la rugosité et d'autre part des signaux vibratoires selon les trois directions x, y et z.

L'introduction des signaux de vibrations obtenus à l'aide d'un programme élaboré sous Matlab a permis de calculer les indicateurs scalaires Rms , V_{c_x} , V_{c_y} , V_{c_z} , E_y , K_x .

Les rugosités mesurées et les indicateurs scalaires calculés ont servi comme données de base pour le Logiciel d'analyse statistique en se servant de Design expert.

L'élaboration des modèles empiriques et l'évolution de la combinaison des différents paramètres pris en considération sont obtenues par l'exploitation du Logiciel Design expert. Il ressort de cette étude que pour :

- Les rugosités

- Ra

Modèle $R^2 = 0.7250$

Evolution : La meilleure valeur de Ra est obtenue avec les grandes vitesses de coupe et les vitesses d'avance.

- Rp

Modèle : $R^2 = 0.7250$

Evolution : La meilleure qualité de surface est obtenue avec les grandes vitesses de coupe et les petites profondeurs de passe.

- Les indicateurs scalaires

- Rms_z

Modèle : $R^2 = 0.5293$

Evolution : L'augmentation de l' Rms_z est fonction de l'augmentation de Vc et la diminution de l' Rms_z est fonction de l'augmentation de ap.

- V_{c_x}

Modèle : $R^2 = 0.5426$

Evolution : L'augmentation de V_{c_x} est fonction de l'augmentation de Vc et ap.

- V_{c_y}

Modèle : $R^2 = 0.5659$

Evolution : L'augmentation de V_{c_y} est fonction de l'augmentation de Vc et ap.

- V_{c_z}

Modèle : $R^2 = 0.9087$

Evolution : La diminution de V_{c_z} est fonction de la diminution de Vc et fz.

- E_y

Modèle : $R^2 = 0.4794$

Evolution : L'augmentation de E_y est fonction de l'augmentation de a_p et V_c .

- K_x

Modèle : $R^2 = 0.8556$

Evolution : La diminution de K_x est fonction de la diminution de V_c et f_z .

Ces résultats montrent bien l'importance de la démarche préconisée et les résultats obtenus.

En termes de corrélation entre rugosité et vibration la tendance dégagée est que la rugosité augmente avec l'augmentation des niveaux de vibrations.

Références

- [1] <http://www.analysepredictive.fr> qualité prédictive applications qualité maintenance prédictive les-trois-techniques-a-connaître.
- [2] Jean PIRANDA, techniques de l'ingénieur-Analyse modale expérimentale, Décembre 2000.
- [3] Maurice MARTINET, Analyse multi résolution en ondelettes Du rayonnement acoustique des structures planes, Thèse de Doctorat, Soutenue le 19 décembre 2001 L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- [3] [4] NEW 94a.
- [3] [5] Gaul L et Hurlebaus S.
- [6] Paul Emile Boileau, Subhash Rakheja, caractérisation de l'environnement vibratoire dans différentes catégories de véhicules : industries utilitaires et de transport urbain, Mai 2000.
- [7] Landolsi Foued, cours de techniques de surveillance-partie i surveillance des machines par analyse vibratoire.
- [8] CHAIB RACHID, contribution à l'optimisation de la maintenance conditionnelle par l'analyse vibratoire, université mentouri de Constantine.
- [9] [10] [11]..... ?
- [12] biblio.-univ-annaba.-dz/-wp-content/uploads/-2014/-06/-Nouveau--dossier-pdf, consulté le 14/02/2017.
- [13] le tournage, inconnu
- [14] caractéristiques spécifiques, tb 13-9, inconnu.
- [15] [26] BOUCHELAGHEM Hafida, BOUCHAHDANE Karima, étude de l'effet du perçage sur le comportement mécanique des plaques composites sollicitées en traction, Juin 2005, mémoire d'ingénieur.

- [16] LACHRAF KHELIL, Projet de fin d'étude d'un diplôme de Master ; Etude de l'influence des paramètres d'usinage sur la rugosité des surfaces usinés par une céramique (AL₂O₃/Tic) revêtue et non revêtue .
- [17] ALLAL Mohammed, Mémoire de fin d'étude d'un diplôme de Master, Optimisation des conditions de coupe lors de l'usinage de l'acier AISI 52100 en utilisant la méthode RSM et l'approche de Taguchi.
- [18] BELLOUFI Abderrahim, Cours procédés de fabrication 2010, Master –Maintenance industrielle, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [19] Handboubk, ASM Machining Vol. 6
- [20] Jean-Loup PRENSIER – Jean-Baptiste VIDAL, L'usinage à grande vitesse Edité le 01/01/2005.
- [21] Usinage à grande vitesse, <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=73528641>
Contributeurs : Abracadabra, Badmood, Beryllium-9, Choun8, Fantom1982, Grimlock, Ji-Elle, Kerilumox, Le ciel est par-dessus le toit, Magic-Bretzel, Martin, Ollamh, Vlaam, Wikig, Zetud, 15 modifications anonymes.
- [22] P. GUEGAN , F. LE MAITRE , J.C. HAMANN, contribution à l'usinage des matériaux composites, La construction navale en composites. Paris, 7-9 décembre 1992 IFRIiMER. Actes de colloques n° 15. Communication n° 45.
- [23] Hicham Chibane, choix de conditions de coupe en usinage des composites par analyse vibratoire, Juin 2011
- [24] guide d'utilisateur [<http://gwyddion.net/documentation/user-guide-fr/roughness-iso.html>].
- [25] Jean-Marie Berthelot, Mécanique des Matériaux et Structures Composites.
- [26] P. Vannucci, Introduction aux Cours Matériaux Composites Partie : Anisotropie et mécanique des stratifiés, Master 2 DSME.
- [27] Frédéric Lachaud, délaminage de matériaux composites à fibres de carbone et a matrices organiques : étude numérique et expérimentale, suivi par émission acoustique, thèse de

doctorat, soutenue le 3 décembre 1997, spécialité : génie mécanique, l'université Paul Sabatier de Toulouse.

[28] KAOUCHE Naima, prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans le dimensionnement de structures en matériaux composites, diplôme de magister, département : De technologie des matériaux, université des sciences et de la technologie d'oran mohamed boudiaf faculté de de physique, La soutenance aura lieu Le : 27/11/2016 à 10h.

[29] R. Khettabi, L. Fatmi, J.Masounave, V. Songmene, on the micro and nanoparticle emission during machining of titanium and aluminum alloys, 2013 page 175-180.

[30] Riad Khettabi, Imad Zeghbani, Abdelhakim Djebara, Jules Kouam and Victor Songmene, 2011, page 187-202.

[31] Kharoubi Mounir, Etude du comportement mécanique de matériaux composites sous chargement cyclique et dynamique, thèse de doctorat, octobre 2009 département de génie mécanique, université 08 mai 1945 Guelma.

[32] GOUPY Jacques. "Plans d'expériences". Techniques de l'ingénieur. Traité Analyse Chimique et Caractérisation, P230, p. 1-20. (1992)).

[33] **Senthil k, Raja D, Sornakumar T.**The effect of tool wear on tool life of alumina-based ceramic cutting tools while machining hardened martensitic stainless steel, Journal of Materials Processing Technology, 173, pp. 151–156(2006).