

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

MEMOIRE
PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER
FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE
SPÉCIALITÉ : FABRICATION MÉCANIQUE ET PRODUCTIQUE
PAR :
BOUDRA ABDERREZAK
AZIZOU SONIA

Thème

**Etude des effets des conditions de coupe en fraisage sur la qualité
de la surface des matériaux composites**

Soutenu le 02/06/2018 devant le jury composé de:

| | |
|------------------------|------------|
| Mme. HIMED Lynda | Présidente |
| Mr. SAHALI Mohand Akli | Rapporteur |
| Mr. HADJOU Madjid | Examineur |

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2017-2018

Remerciement

Avant de présenter notre mémoire de fin d'étude, nous tenons, à exprimer notre très grande gratitude à notre encadreur Mr SAHALI pour les encouragements et conseils, toute au long de notre élaboration de ce modeste manuscrit.

Nous remercions vivement, les membres du jury Mr Madjid HADJOU, ainsi que Mme Lynda HIMED, qui ont bien voulu nous honorer en examinant notre travail.

Nous tenons aussi à remercier nos deux familles pour leur soutien moral et matériel sans égal durant toutes nos études et notre vie.

Nous remercions tous nos ami(e)s et camarades qui nous ont aidé.

Dédicaces :

Avec une grande joie je dédie ce modeste travail :

-A mes parents et grandes parents

-A mes frères et ma sœur

-A toute ma grande famille

-A ma collègue Sonia

-A tous mes ami(e)s spécifiquement Djari Borzak,
Mimih Yacine et Sofiane, Balhou, Massi, Dal-
Bachir, Madin, Chikh Rachid...

Abderrezak

Dédicaces :

Avec une grande joie je dédie ce modeste travail :

-A mes parents et grandes parents

-A mes frères et mes sœurs

-A mes nièce et neuves

-A toute ma grande famille

-A mon collègue Abderrezak

-A tous mes ami(e)s spécifiquement Salima, Sonia,
Samira, Nassima, Mouna, Madin, Fadila, Souhila,
Radia, Saida...

Sonia

Abréviations :

| | |
|-------|---------------------------------------|
| PE | Le polyéthylène |
| PP | Le polypropylène |
| PA | Le polyamide |
| PC | Le polycarbonate |
| TGV | Tournage à grande vitesse |
| RFI | Resin film infusion |
| LRI | Liquid resin infusion |
| PCD | Diamant poly-cristallin |
| RSM | Méthodologie de la surface de réponse |
| S/N | Signal to noise |
| CNC | Computer numerical control |
| DOE | Design of experiments |
| NSGAI | Non sorting genetic algorithm |

Liste des Notations :

| <u>Variable</u> | <u>Nom</u> | <u>Unité</u> |
|-----------------------|---|---------------|
| V_c | Vitesse de coupe | $m.min^{-1}$ |
| N | Vitesse de rotation | $Tr.min^{-1}$ |
| D | Diamètre de la pièce | mm |
| D | Diamètre de l'outil | mm |
| f | Avance | mm |
| V_f | Vitesse d'avance | $mm.min^{-1}$ |
| a_p | Profondeur de passe | mm |
| γ | Angle de coupe | deg |
| α | Angle de dépouille | deg |
| k | Angle de direction d'arête ou d'angle d'attaque | deg |
| R_a | Rugosité arithmétique du profil | um |
| R_q | Rugosité quadratique | um |
| F | Effort de coupe | N |
| P_u | Puissance de coupe | Kw |
| K_c | Effort spécifique de coupe | $N.mm^{-2}$ |
| K_r | Angle d'attaque | deg |
| Y | Modèle de surface de réponse | |
| b_i, b_{ii}, b_{ij} | Des coefficients indépendants de modèle | |
| ε | Erreur expérimentale. | |
| A_{rms} | Les vibrations | m/s^2 |
| Q | Débit de copeaux | cm^3/s |
| T | La température | deg |
| R^2 | Coefficient de détermination | % |
| R_{adj}^2 | Coefficient de détermination ajusté | % |

| | | |
|----------|--------------------------|------------|
| V_b | L'usure de l'outil | <i>um</i> |
| L_d | Longueur de délaminage | <i>mm</i> |
| T_u | Temps d'usinage unitaire | <i>min</i> |
| C | Coûts de production | <i>\$</i> |
| R_{th} | Rugosité théorique | <i>um</i> |

Table des Matières :

| | |
|---|----|
| Introduction Générale..... | 1 |
| I.1 Introduction | 3 |
| I.2 Définition de l'usinage | 3 |
| I.3 Le tournage | 3 |
| I.4 Le fraisage | 4 |
| I.5 Les parametres des coupes en tournage..... | 4 |
| I.5.1 La vitesse de coupe | 5 |
| I.5.2 Vitesse d'avance V_f et Avance par tour f : | 6 |
| I.5.3 La profondeur de passe a_p | 7 |
| I.5.4 Bec de l'outil..... | 8 |
| I.5.5 Angle de coupe | 8 |
| I.5.6 Angle de direction d'arête κ ou angle d'attaque | 9 |
| I.6 Performances d'usinages | 9 |
| I.6.1 L'état de surface..... | 9 |
| I.6.2 L'effort de coupe..... | 10 |
| I.6.3 Puissance de coupe | 12 |
| I.6.4 La température de coupe : | 13 |
| I.7 Conclusion | 14 |
| II.1 Introduction | 15 |
| II.2 Définition des matériaux composites | 15 |
| II.3 Les constituants des matériaux composites | 15 |
| II.3.1 La matrice..... | 16 |
| II.3.2 Les renforts..... | 17 |
| II.3.3 Interface..... | 17 |
| II.4 Applications des matériaux composites | 18 |
| II.4.1 Industrie aérospatiale : | 18 |
| II.4.2 Industrie des transports terrestres et maritime : | 19 |
| II.5 Les avantages et les inconvénients des matériaux composites..... | 19 |
| II.5.1 Avantages | 19 |
| II.5.2 Les inconvénients | 20 |
| II.6 Procédés de fabrication de structures composites | 21 |
| II.6.1 Les pré-imprégnés | 21 |

TABLES DES MATIERES

| | | |
|----------|---|----|
| II.6.2 | Moulage au contact | 22 |
| II.6.3 | Infusion de film de résine / Resin Film Infusion (RFI)..... | 22 |
| II.6.4 | Infusion de résine liquide / Liquid Resin Infusion (LRI)..... | 23 |
| II.7 | Défauts d'usinage des matériaux composites | 24 |
| II.7.1 | Délaminage..... | 24 |
| II.7.2 | Dégradation thermique | 25 |
| II.7.3 | Etat de surface | 25 |
| II.7.4 | Rupture de fibres | 26 |
| II.7.5 | Fissuration de la matrice | 27 |
| II.8 | Conclusion | 28 |
| III.1 | Introduction | 29 |
| III.2 | Plans d'expériences | 29 |
| III.2.1 | Généralités..... | 29 |
| III.2.2 | Définition les plans d'expériences : | 30 |
| III.2.3 | Méthodologie de la surface de réponse RSM..... | 30 |
| III.2.4 | Méthode de Taguchi..... | 31 |
| III.3 | Les modelés d'optimisations | 32 |
| III.3.1 | Modèle de vibration Arms | 32 |
| III.3.2 | Modèle de la productivité..... | 33 |
| III.3.3 | Modèle de température (T°) | 33 |
| III.3.4 | Modèle de l'effort de coupe (F) | 33 |
| III.3.5 | Modèle de puissance (Pu) | 33 |
| III.3.6 | Modèle d'usure (Vb) | 34 |
| III.3.7 | Modèle de la longueur de délaminage Ld | 34 |
| III.3.8 | Temps d'usinage unitaire | 34 |
| III.3.9 | Coût d'usinage | 36 |
| III.3.10 | Qualité d'usinage..... | 36 |
| III.4 | Conclusion | 37 |
| IV.1 | Introduction :..... | 38 |
| IV.1 | Définition..... | 38 |
| IV.1.1 | L'optimisation : | 38 |
| IV.1.2 | Qu'est-ce qu'un problème d'optimisation ?..... | 38 |
| IV.1.3 | Variables du problème | 39 |

TABLES DES MATIERES

| | | |
|-----------------------------|---|----|
| IV.1.4 | Espace de recherche | 40 |
| IV.1.5 | Fonction objectif | 40 |
| IV.1.6 | L'ensemble de contraintes | 40 |
| IV.2 | Méthodes d'optimisation..... | 41 |
| IV.3 | Optimisation mono-Objectif..... | 42 |
| IV.4 | L'optimisation multi-objectif | 42 |
| IV.5 | MÉTHODES BIO-INSPIRÉES POUR LA RÉOLUTION DE PROBLÈMES.. | 43 |
| IV.5.1 | Sources d'inspiration..... | 43 |
| IV.5.2 | Les avantages | 44 |
| IV.5.3 | Les inconvénients..... | 44 |
| IV.6 | CAS D'APPLICATION | 45 |
| IV.6.1 | Principe de l'algorithme NSGA-II | 45 |
| IV.6.2 | Modèles d'optimisation retenus | 46 |
| IV.6.3 | Formulation de problème | 46 |
| IV.6.4 | Donnée numérique | 47 |
| IV.7 | Résultats et discussion :..... | 47 |
| IV.1.1 | Pour cas de vibration à 214,77 m/s ² | 47 |
| IV.1.2 | Pour cas de vibration à 232,78 m/s ² | 49 |
| IV.1.3 | Pour cas de vibration à 279,54 m/s ² | 52 |
| IV.8 | Conclusion..... | 54 |
| Conclusion Générale : | | 55 |

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Liste des figures :

| | |
|--|----|
| Figure I.1 : Illustration d'un procédé d'usinage (tournage) | 3 |
| Figure I.2 : Le principe de fonctionnement d'une machine-outil de tournage..... | 4 |
| Figure I.3 : Le principe de fonctionnement d'une machine-outil de fraisage..... | 4 |
| Figure I.4 : La vitesse de coupe..... | 5 |
| Figure I.5 : Vitesse d'avance V_f et avance par tour..... | 6 |
| Figure I.6 : Différents types d'avance..... | 7 |
| Figure I.7 : Profondeur de passe a_p et l'avance en tournage..... | 7 |
| Figure I.8 : (a)Outil droit sans rayon d'arête. (b) Outil droit avec rayon d'arête (R) (c) Outil droit avec un plat en dépouille..... | 8 |
| Figure I.9 : plan de l'outil..... | 8 |
| Figure I.10 : L'angle de direction d'arête en travail..... | 9 |
| Figure I.11 : Rugosité moyenne arithmétique R_a | 10 |
| Figure I.12 : Les actions de contact exercées sur l'outil..... | 11 |
| Figure I.13 : Les composantes de l'effort de coupe..... | 11 |
| Figure I.14 Usure en dépouille..... | 12 |
| Figure I.15 : Représentation en coupe orthogonale des zones génératrices de chaleur..... | 13 |
| Figure I.16 : Représentation en coupe orthogonale des transferts de chaleur..... | 14 |
| Figure II.1 : Éléments d'un matériau composite..... | 15 |
| Figure II.2 : Constitution d'un matériau composite..... | 16 |
| Figure II.3 : Types de renfort. | 17 |
| Figure II.4 : Présentation de l'interface, matrice et fibre..... | 18 |
| Figure II.5 : Principe de moulage avec des pré-impregnés..... | 21 |
| Figure II.6 : Principe de moulage au contact..... | 22 |
| Figure II.7 : Principe du procédé RFI..... | 23 |
| Figure II.8 : Principe du procédé LRI..... | 24 |
| Figure II.9 : Défaut de délaminage..... | 25 |
| Figure II.10 : Mécanisme rupture de fibre..... | 27 |
| Figure II.11 : Différents types de fissuration de la matrice (longitudinale, transversale) | 28 |
| Figure III.1 Différents facteurs influençant sur les performances d'usinage..... | 32 |
| Figure III.2 Rugosité théorique..... | 37 |
| Figure IV.1 Processus D'optimisation Selon Asimow | 39 |
| Figure IV.2 Classification possible de méthodes de résolution..... | 41 |

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Figure IV.3 Processus d'inspiration d'un phénomène naturel..... | 44 |
| Figure IV.4 Algorithme NSGA-II..... | 45 |
| Figure IV.5 Espace de recherche faisable en vert pour $a_p = 0,9736 \text{ mm}$ | 48 |
| Figure IV.6 Espace de recherche faisable en vert pour $a_p 1,8451 \text{ mm}$ | 49 |
| Figure IV.7 Agrandissement d'espace de recherche faisable en vert pour $a_p 1,8451 \text{ mm}$ | 49 |
| Figure IV.8 Espace de recherche faisable en vert pour $a_p 1,0552 \text{ mm}$ | 50 |
| Figure IV.9 Espace de recherche faisable pour $a_p = 2,0179 \text{ mm}$ | 51 |
| Figure IV.10 Agrandissement d'espace de recherche faisable en vert pour $a_p 2,0179 \text{ mm}$ | 51 |
| Figure IV.11 Espace de recherche faisable en vert pour $a_p = 1,3272 \text{ mm}$ | 52 |
| Figure IV.12 Espace de recherche faisable en vert pour $a_p 2,3400 \text{ mm}$ | 53 |
| Figure IV.13 Les solutions non dominée de front de Pareto..... | 54 |

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Liste des tableaux :

| | |
|---|----|
| Tableau IV.1 : Valeurs des coefficients et constantes utilisées..... | 47 |
| Tableau IV.2 Les paramètres de coupe optimaux par $Arms1 = 214.77 \text{ ms}^2$ | 48 |
| Tableau IV.3 Les paramètres de coupe optimaux pour $Arms2 = 232.78 \text{ ms}^2$ | 50 |
| Tableau IV.4 Les paramètres de coupe optimaux pour $Arms3 = 279.54 \text{ ms}^2$ | 52 |



INTRODUCTION
GENERALE

Introduction Générale

Le développement des pièces de l'industrie en matériau composite passe par l'amélioration des procédés de fabrication pour augmenter la productivité en garantissant le même niveau de qualité. L'étude présentée dans ce mémoire se focalise sur l'usinage des matériaux composites, en considérant les problèmes d'état de surface.

L'emploi de matériaux composites dans les industries est en constante augmentation ces dernières années. L'ensemble des constructeurs suit cette tendance afin de rester compétitif et produire des pièces plus légères et plus économes. Ces matériaux prennent peu à peu la place des matériaux conventionnels tels que les alliages d'aluminium et permettent de réaliser des gains de poids conséquents.

L'usinage des matériaux composites se différencie de l'usinage des matériaux métalliques homogènes essentiellement par leur hétérogénéité intrinsèque. Cette hétérogénéité engendre des phénomènes de coupe différents qui ont un impact fort sur le choix des outils, de leurs conditions d'utilisation et de la qualité des usinages produits.

Dans notre étude, nous visons à chercher les conditions de coupe optimales afin d'assurer un meilleur état de surface des pièces usinées, une durée de vie plus importante des outils de coupe et une productivité plus élevée. Le résultat d'un bon choix de conditions de coupe peut être constaté par une diminution des niveaux de vibrations de l'outil.

Le premier chapitre de ce mémoire a permis de présenter des généralités sur l'usinage.

Des notions sur le tournage et fraisage sur lesquels porte ce travail. L'objectif exposé dans ces travaux réside dans l'optimisation et le choix de paramètres de coupe lors de l'usinage d'un matériau composite.

Le Chapitre II s'articule sur la présentation du sujet suivie d'une analyse bibliographique centrée essentiellement sur les problèmes liés au l'usinage des composites. Nous présentons les différents mécanismes d'endommagement des pièces qui ont lieu lors d'une opération de coupe, Les différents types de matrices et de renforts qui constitué les matériaux composite et leur procédés de fabrications.

Le Chapitre III présente des modèles mathématiques reliant les performances d'usinage et les paramètres de coupe qui seront utilisés dans la formulation du problème d'optimisation d'opération en fraisage.

INTRODUCTION GENERALE

Le Chapitre IV expose un état de l'art des différentes formulations de problèmes d'optimisation et les techniques adéquates pour les résoudre. Puis nous se focaliserons sur les avantages apportés par les méthodes d'optimisation modernes entre autres les méthodes bio et socio-inspirées. Puis, un cas d'application numérique d'un problème d'optimisation en fraisage sera traité à savoir ; la minimisation de la rugosité de la surface et la maximisation du débit coupeau sous contraintes pratiques des vibrations de triplet pièce-outil-machine. Les solutions optimales obtenues à l'aide de l'algorithme génétique NSGA-II (Algorithme génétique de tri non-dominé) seront ensuite présentées et discutées.

CHAPITRE I :
INTRODUCTION SUR
L'USINAGE

I.1 Introduction

Le challenge actuel des industriels est de plus en plus basé sur le gain du temps et la diminution des coûts de fabrication tout en respectant l'environnement. Parmi ces industries, L'usinage occupe une place très importante dans la famille de techniques de fabrication de pièces mécaniques. Le principe de l'usinage est d'enlever 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 .L'usinage d'une pièce se décompose en une succession d'opérations, définie par la gamme d'usinage établie par le bureau des méthodes à partir du dessin de définition issu du bureau d'études.

I.2 Définition de l'usinage

L'usinage est un procédé de fabrication (consistant) à réduire progressivement les dimensions de la pièce par enlèvement de la matière à froid et sans déformation en utilisant un outil de coupe[1].

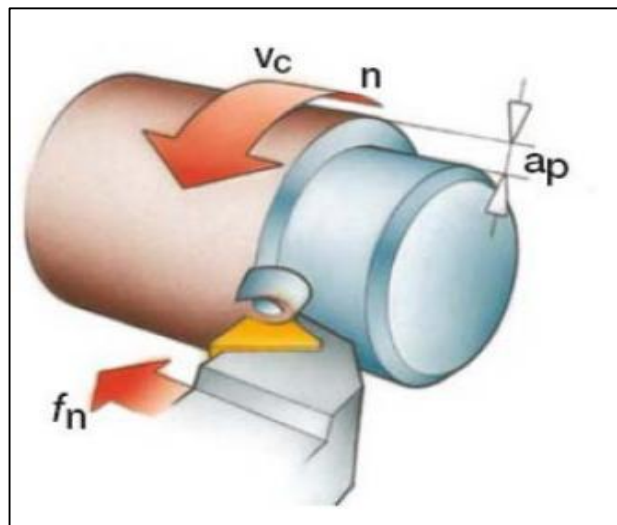


Figure I.1 : Illustration d'un procédé d'usinage (tournage) [2].

I.3 Le tournage

Ce procédé sert principalement à usiner des pièces de révolution. La pièce est fixée dans le mandrin. Celui-ci est mis en rotation par le moteur de broche. L'outil suit une trajectoire qui interfère avec la pièce.

L'outil est muni d'une arête coupante, il en résulte un enlèvement de matière de petite taille appelés ; copeau (figure I.1) [3].

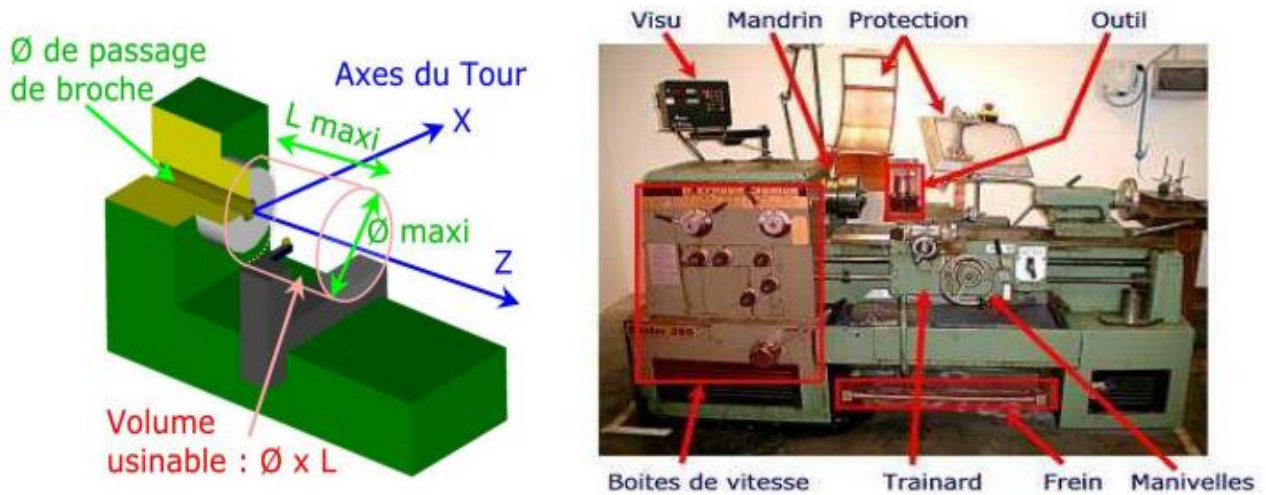


Figure I.2 : Le principe de fonctionnement d'une machine-outil de tournage [3].

I.4 Le fraisage

Ce procédé sert principalement à usiner des pièces prismatiques. La pièce est fixée dans l'étau. L'outil ou fraise, muni de plusieurs arêtes tranchantes (dents), est mis en rotation par le moteur de broche, il suit une trajectoire qui interfère avec la pièce, qui de la même façon que dans le tournage produit des copeaux [3].

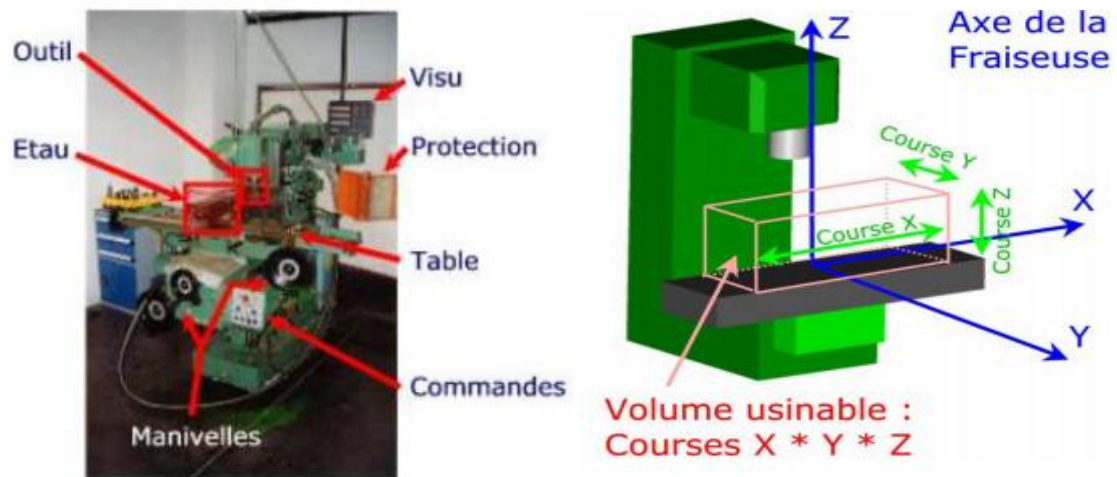


Figure I.3 : Le principe de fonctionnement d'une machine-outil de fraisage [3].

I.5 Les paramètres des coupes en tournage

Les paramètres de coupe permettant de réaliser un usinage économique, productif et précis sont essentiellement ; la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe.

I.5.1 La vitesse de coupe

C'est l'un des paramètres d'importance majeure dans le processus de coupe. Il dépend du matériau à usiner et de la vitesse de rotation de la pièce (en tournage)[4], La pièce est entraînée sur le tour à une certaine fréquence de rotation (N), cette vitesse angulaire étant communiquée par la broche de la machine via le porte-pièce. Compte tenu du diamètre de la pièce au point d'usinage situé sur un diamètre D, la vitesse relative de la pièce en ce point par rapport à l'outil (supposé fixe par rapport à la machine) vaut [5] :

La vitesse de rotation de la broche du tour s'exprime comme suit :

$$N(\text{tr}/\text{min}) = \frac{1000 VC(\text{m}/\text{min})}{\pi D(\text{mm})} \quad (\text{I.1})$$

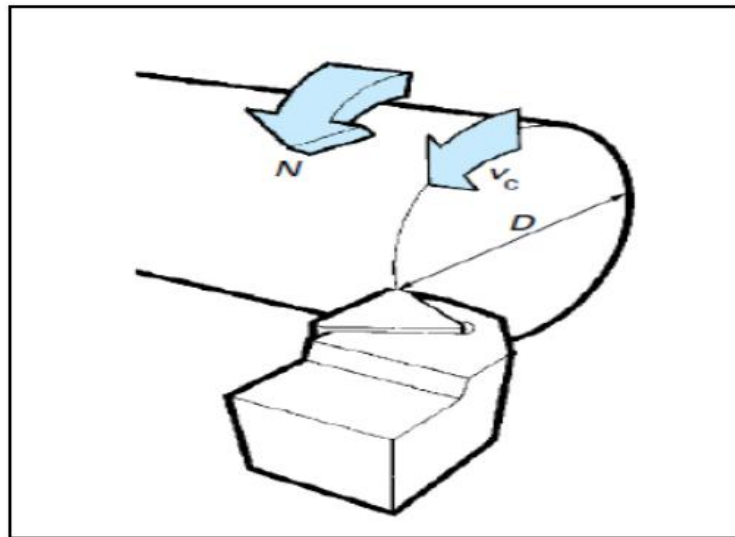


Figure I.4 : La vitesse de coupe [5].

Facteurs en relation avec la valeur de la vitesse de coupe :

- La qualité du métal à usiné (dureté, composition chimique).
- le matériau et la forme de l'outil.
- La section du copeau (profondeur de passe et avance).
- La nature de l'opération (ébauche, finition).
- La réfrigération et la lubrification de l'outil.
- La durée de coupe.
- Les caractéristiques de la machine utilisée (puissance, gamme des vitesses et des avances) [6].

I.5.2 Vitesse d'avance V_f et Avance par tour f :

La vitesse d'avance notée V_f (en mm/min) correspond à la vitesse de déplacement de l'outil par rapport au bâti. L'avance par tour f (en mm/tr) quant à elle correspond à la valeur du déplacement de l'outil ou de la pièce pour un tour de la pièce. Elle est prise comme référence car elle conditionne la qualité de la surface usinée et le chargement de l'outil. L'avance influence également l'épaisseur des copeaux et leur mode segmentation. Toutes ces données sont liées par la formule suivante [7]:

$$V_f = f \times N \quad (I.2)$$

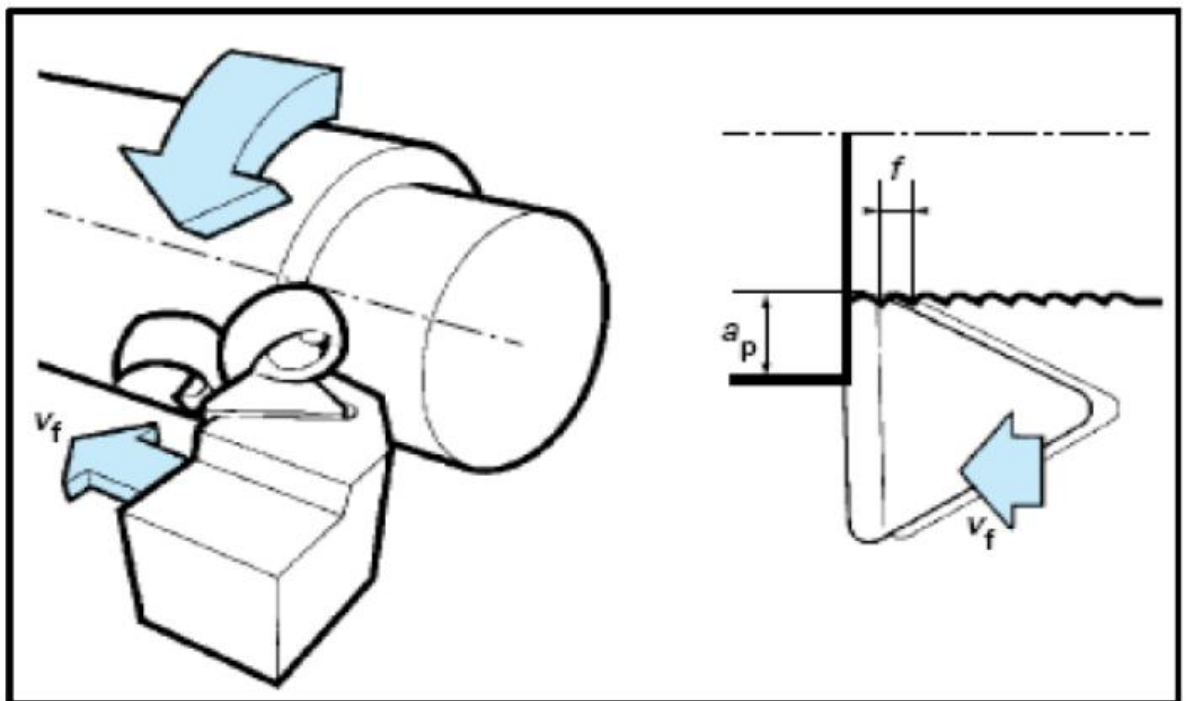


Figure I.5 : Vitesse d'avance V_f et avance par tour [5].

On distingue trois types d'avance [8]:

a) Avance longitudinal

On appelle avance longitudinale quand l'outil se déplace parallèlement à l'axe de la broche.

b) Avance transversale

On appelle avance transversale lorsque l'outil se place perpendiculairement à l'axe de la broche.

c) Avance oblique

La combinaison de l'avance transversale et perpendiculaire donne l'avance oblique.

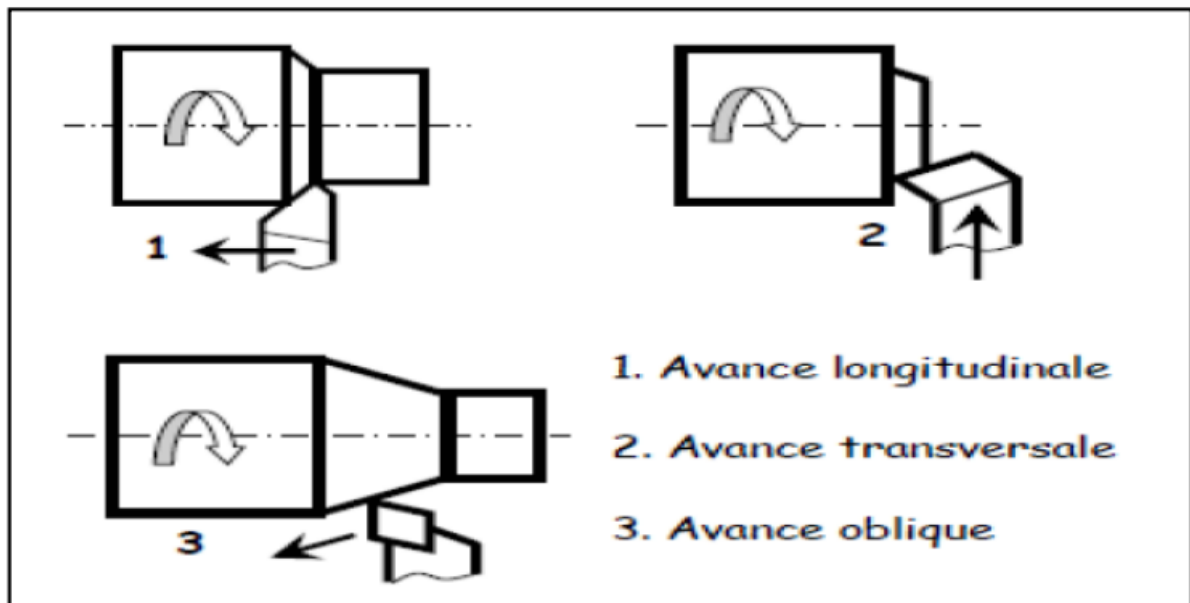


Figure I.6: Différents types d'avance [8].

I.5.3 La profondeur de passe a_p

En chariotage, la profondeur de coupe a_p (mm) est la différence de rayon entre la surface non usinée et la surface usinée (c'est-à-dire la moitié de la différence entre le diamètre non usiné et le diamètre usiné). La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arête de l'outil [5].

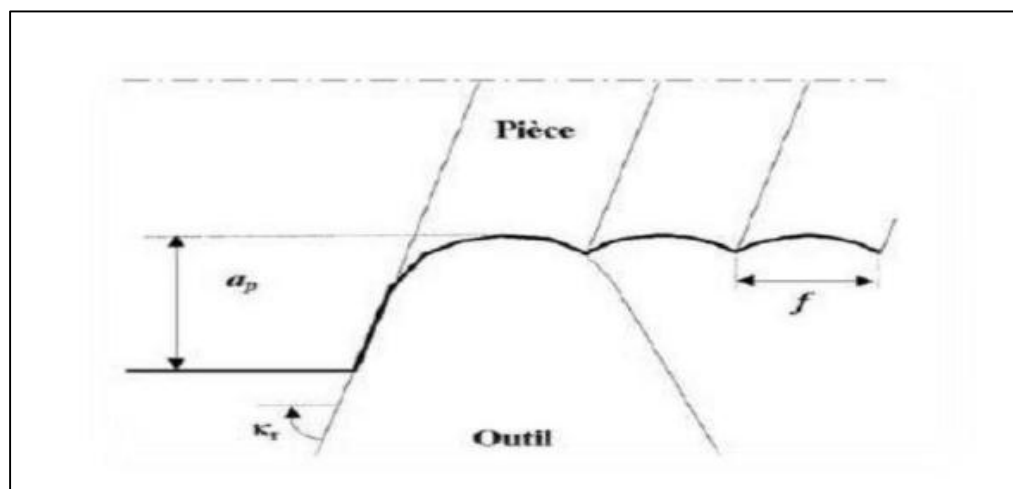


Figure I.7 : Profondeur de passe a_p et l'avance en tournage [9].

I.5.4 Bec de l'outil

Partie qui joint l'arête principale à l'arête secondaire (arrondie, droite ou intersection vive)

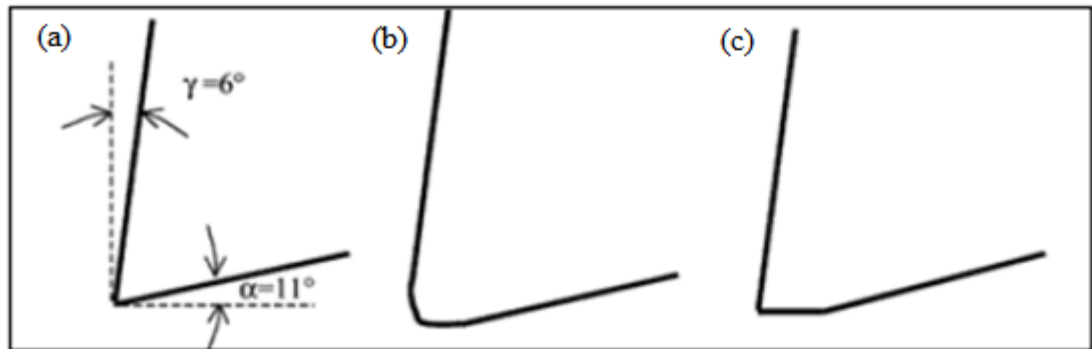


Figure I.8 : (a) Outil droit sans rayon d'arête. (b) Outil droit avec rayon d'arête (R),
(c) Outil droit avec un plat en dépouille [2].

I.5.5 Angle de coupe

L'angle de coupe (γ) et l'angle de dépouille (α) sont liés à la géométrie de l'outil qui à son tour dépend fortement de la nature du couple outil-matière et des conditions de coupe. L'angle de coupe c'est l'angle qui se trouve entre la face de coupe et le plan de référence P_r dans le plan P_0 . Il est déterminant dans la formation du copeau. Selon le matériau à usiner, il peut passer d'une valeur positive à une valeur très négative (figure I.9). Dans l'usinage des aciers durs, et pour rendre l'outil plus résistant mécaniquement et thermiquement, l'angle de coupe doit être très faible voir négatif (jusqu'à -20 degrés). L'angle de dépouille quant à lui est l'angle formé entre la face de dépouille de l'outil et le plan P_s perpendiculaire au plan de référence P_r . Il intervient aussi dans le frottement entre la pièce et l'outil [10].

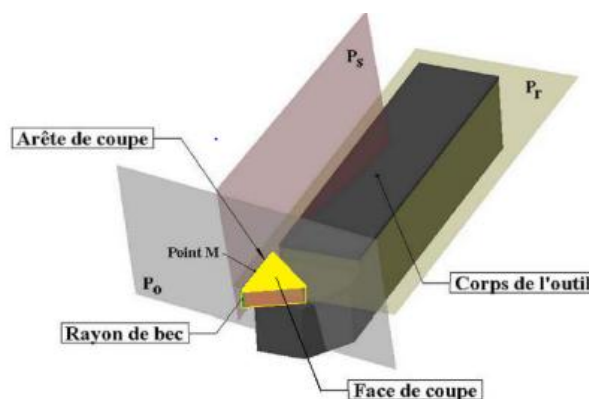


Figure I.9 : plan de l'outil [10].

I.5.6 Angle de direction d'arête κ ou angle d'attaque

L'angle de direction d'arête κ est l'angle entre l'arête de coupe et la direction de l'avance, (figure I.10). κ affecte également la direction des forces de coupe que l'outil exerce sur la pièce dans le plan horizontal. L'angle d'attaque, en combinaison avec les autres éléments de la géométrie d'arête et la matière usinée, affecte la direction d'évacuation des copeaux au niveau de l'arête de coupe. En règle générale, il convient de choisir un angle d'attaque entre 60° et 80° pour le tournage chaque fois que la nature de la pièce ou de l'opération l'autorise [11].

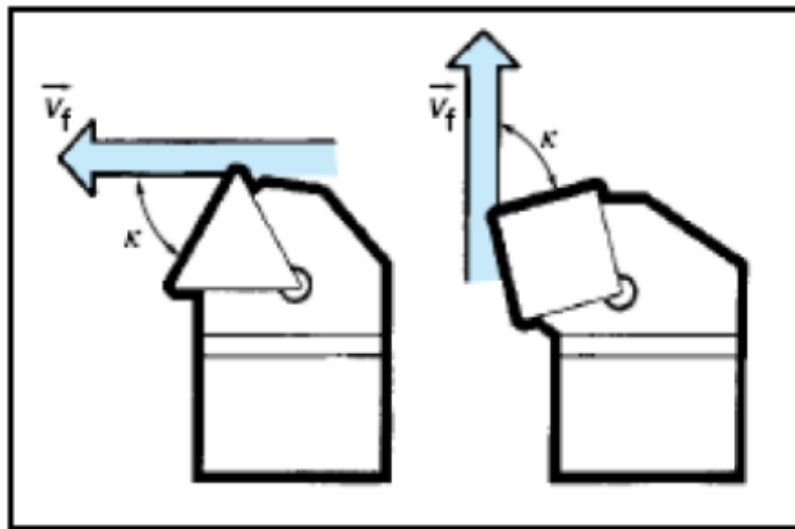


Figure I.10 : L'angle de direction d'arête en travail [11].

I.6 Performances d'usinages

I.6.1 L'état de surface

L'état de surface d'une pièce correspond à des irrégularités de surface. Les mesures de rugosité permettent de quantifier l'état géométrique de surface de cette pièce. Les mesures de rugosité peuvent s'effectuer à l'aide d'un rugosimètre 2D ou 3D [10].

La rugosité présente les défauts de l'état géométrique de surface du troisième et du quatrième ordre. Elle est considérée comme le paramètre le plus important qui caractérise l'enlèvement de matière [12].

- **Rugosité arithmétique** : elle correspond à la moyenne arithmétique des pics et des creux par rapport à la ligne moyenne, mesurée sur une longueur d'évaluation l . Son expression est la suivante [10]:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (\text{I.3})$$

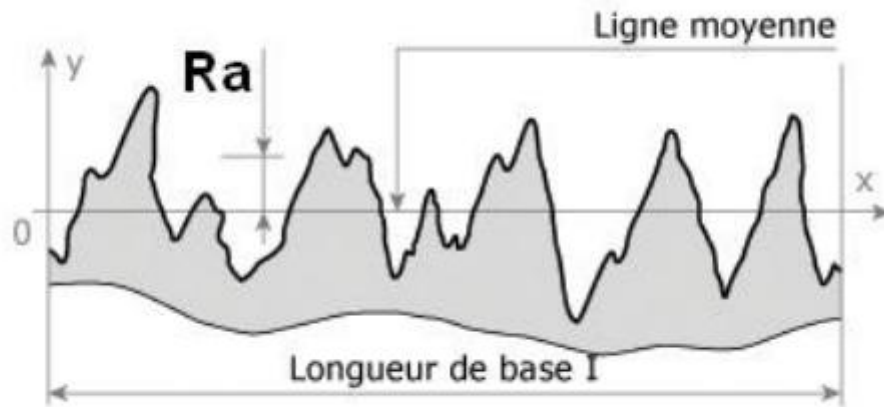


Figure I.11 : Rugosité moyenne arithmétique Ra [10].

➤ **Rugosité quadratique moyenne**

La rugosité quadratique moyenne Rq est le plus important paramètre statistique de surface. Dans la caractérisation optique de l'état de surface, elle est obtenue directement par la mesure de la lumière diffusée [13].

I.6.2 L'effort de coupe

Les efforts résultant de l'interaction de l'outil par rapport à la pièce proviennent des contraintes qui apparaissent dans les zones de cisaillement primaire et secondaire, et des forces de frottement. Plus précisément, les forces exercées sur l'outil résultent des actions de contact du copeau sur l'outil (zone 1) et de la pièce sur l'outil (zone 2) [11].

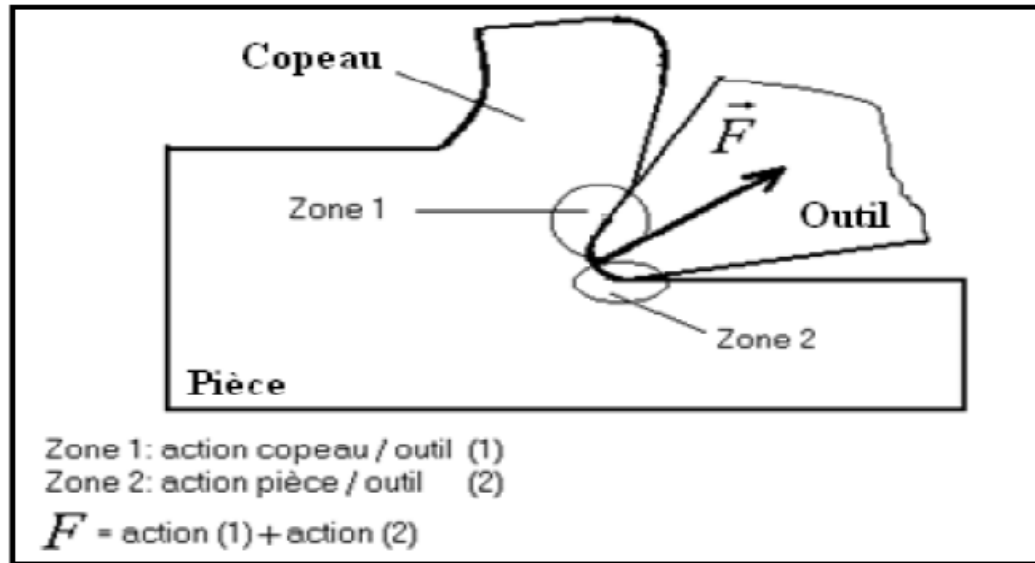


Figure I.12 : Les actions de contact exercées sur l'outil [11].

➤ Les composantes de l'effort de coupe

En plus des informations concernant la stabilité de la coupe, la connaissance des efforts de coupe nous renseigne sur les déformations plastiques et la puissance mécanique fournie qui est nécessaire à l'enlèvement de la matière. De plus, elle permet de délimiter la zone de coupe en choisissant des valeurs des efforts acceptables pour l'outil. L'effort de coupe produit peut être décomposé en trois composantes selon les directions privilégiées [11] :

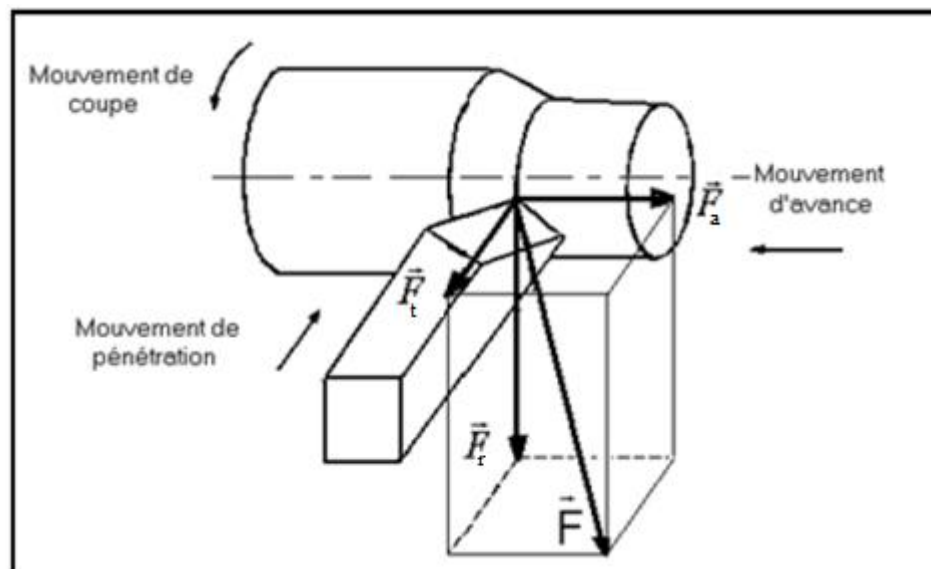


Figure I.13 : Les composantes de l'effort de coupe [11].

➤ Influence de l'usure en dépouille sur l'effort de coupe :

Les arêtes de coupe usées augmentent les efforts de coupe. En effet en pratique on estime qu'une usure de 0,1 mm sur la surface en dépouille d'un outil. Fait accroître l'effort de coupe de 10%.

L'usure maximale admissible dépend des résultats d'usinage souhaités (précision dimensionnelle, état de surface,... etc.), et de l'outil utilisé. Pour les plaquette amovibles, elle est égale à environ 10% de l'épaisseur de la plaquette pour les opérations d'ébauches (Figure.I.14) [14].

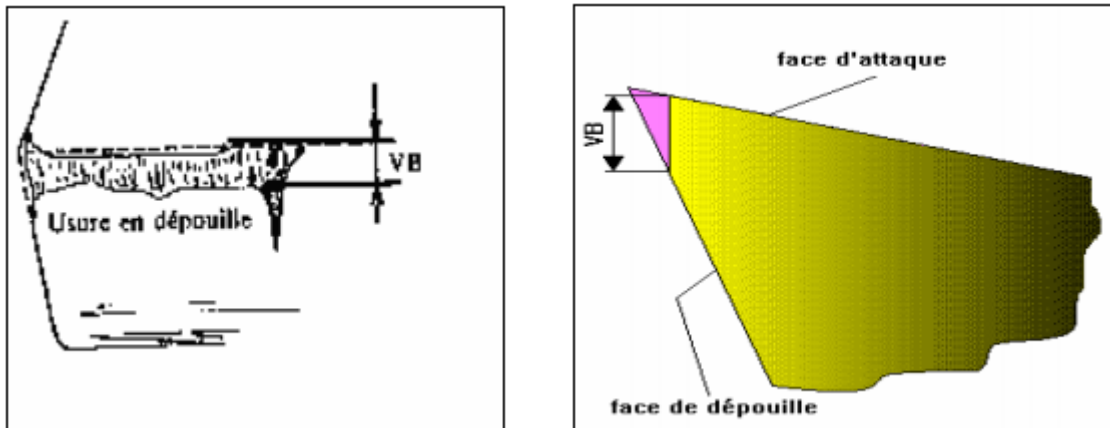


Figure I.14 Usure en dépouille [14].

I.6.3 Puissance de coupe

La puissance de coupe est un paramètre important surtout pour les opérations d'ébauche car elle permet :

- de choisir ou d'investir dans une machine de puissance adaptée à l'opération à réaliser;
- de rechercher les conditions de coupe permettant d'utiliser au mieux la puissance de la machine pour assurer le meilleur débit de copeaux en tenant compte des capacités de l'outil utilisé.

La puissance nécessaire à la coupe P_u (kW) peut être estimée par la formule suivante :

$$P_u = (K_C \times a_p \times f \times V_C) / 60000 \quad (\text{I.4})$$

Avec :

- a_p profondeur de passe au rayon (mm) ;
- f avance par tour (mm) ;
- V_C vitesse de coupe (m/min) ;
- K_C effort spécifique de coup ($N \text{ mm}^{-2}$) ;

L'effort spécifique de coupe K_C est fonction principalement :

- du matériau usiné ;
- de l'avance ;
- de la géométrie de coupe [10];

I.6.4 La température de coupe :

Les procédés d'usinage présentent pour leur grande majorité des problèmes tridimensionnels, complexes et difficiles à modéliser ou à simuler numériquement. C'est pourquoi afin d'affiner la compréhension du procédé d'usinage, il est intéressant de se placer dans un cas géométrique et de cinématique simple, celui de la coupe orthogonale. Tous les principaux phénomènes de la coupe y sont présents et les paramètres se résument à la vitesse de coupe de l'outil et à l'avance par tour, (figure I.15).

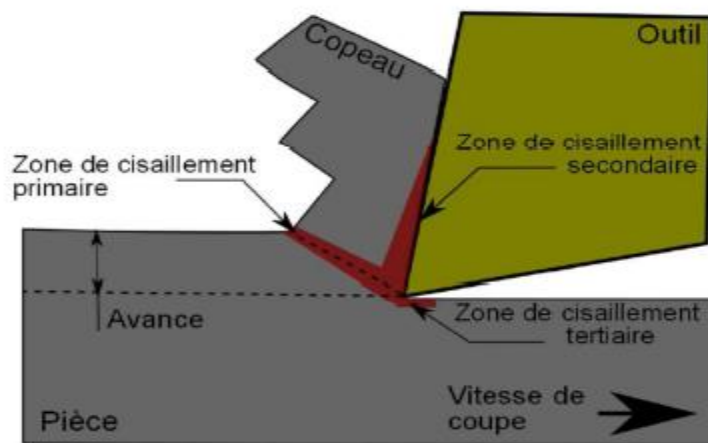


Figure I.15 : Représentation en coupe orthogonale des zones génératrices de chaleur [15].

La formation du copeau génère un processus thermomécanique faisant apparaître un cisaillement intense au voisinage d'un plan incliné par rapport à la surface libre de la pièce, c'est la zone primaire de cisaillement. Même pour des vitesses de coupe conventionnelles, la vitesse de glissement dans cette zone atteint des valeurs très élevées, de l'ordre de 10^4 à 10^5 s^{-1} . L'énergie de déformation plastique est alors principalement transformée en chaleur, principalement évacuée par le copeau. Le copeau est en contact avec la face de coupe de l'outil sur laquelle il adhère puis glisse. De nouvelles déformations plastiques sont générées par cisaillement dans cette région à l'interface outil-copeau ; cette région est appelée zone secondaire de cisaillement. Les déformations plastiques et le frottement à l'interface outil copeau provoquent à leur tour une dissipation sous forme de chaleur évacuée pour une partie par le copeau et pour l'autre partie transmise par conduction à l'outil, (figure I.16). Une troisième zone de déformation et de génération de chaleur existe à l'interface outil /

pièce. Dans cette région l'arête de coupe laboure la surface générée produisant de nouvelles déformations plastiques par cisaillement, c'est la zone tertiaire de cisaillement. Les effets de la génération de chaleur dans cette zone sont particulièrement pénalisants pour l'outil et la pièce usinée. Ces effets sont principalement :

- une usure prématurée de l'arête et de la face en dépouille ;
- l'apparition de contraintes résiduelles en traction dans la pièce usinée ;
- des transformations métallurgiques possibles sous la surface usinée ;
- l'apparition éventuelle de défauts géométriques liés à l'échauffement excessif [15].

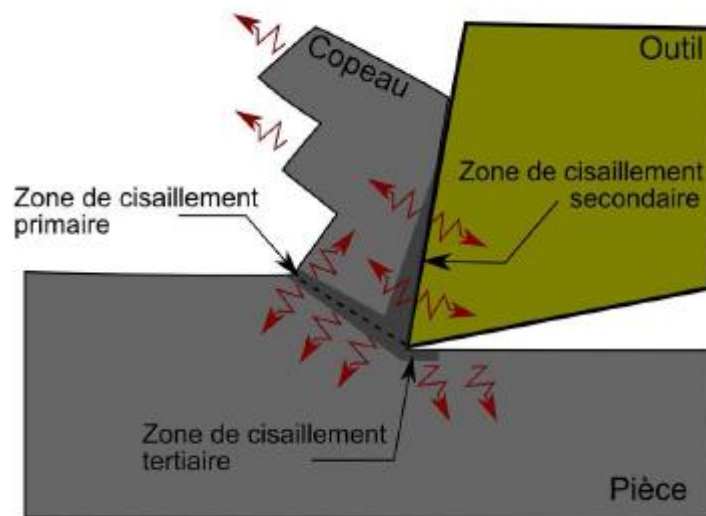


Figure I.16 : Représentation en coupe orthogonale des transferts de chaleur [15].

I.7 Conclusion

Après avoir présenté les procédés d'usinage usuels dans ce chapitre, tels que le tournage et le fraisage, on peut déduire que ce procédé est basé sur certains paramètres, comme la vitesse de coupe qui influe sur l'état de surface de la pièce usinée, et cette dernière est évalué par le calcul de la rugosité.

Ce pendant des défauts d'usinage peuvent être aperçu lors de son application sur les matériaux composites, ces mêmes défauts seront élaborés dans le prochain chapitre.

CHAPITRE II :
LES DEFAUTS
D'USINAGE DES
MATERIAUX COMPOSITES

II.1 Introduction

Les matériaux composites sont utilisés dans tous les domaines technologiques tels que la mécanique, l'aéronautique et l'aérospatial pour fabriquer des pièces structurales ou vitales, du fait de leurs propriétés mécaniques, leur facilité de leur fabrication et leur légèreté. Cependant la mise en forme et l'usinabilité de ces matériaux (par enlèvement de la matière, ou par laser) reste toujours un problème ouvert pour la recherche, car l'usinage fait apparaître des dommages de natures différentes dans la structure. Ces dommages diminuent de façon importante les avantages fonctionnels des pièces en matériaux composites.

II.2 Définition des matériaux composites

Un matériau composite est constitué de deux ou plusieurs matériaux dont les propriétés individuelles se combinent pour former un matériau hétérogène ayant des performances globales fortement améliorées [16].

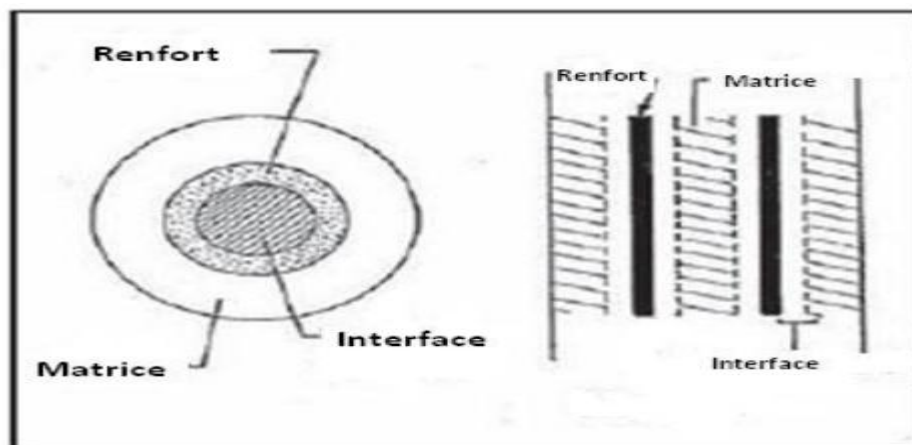


Figure II.1 : Éléments d'un matériau composite [17].

II.3 Les constituants des matériaux composites

Les composites sont constitués de deux éléments : une matrice et un renfort. Tous deux peuvent bien évidemment être de différentes natures. Les propriétés mécaniques et physiques intéressantes du composite sont données par l'adjonction de ces deux éléments non miscibles [18].

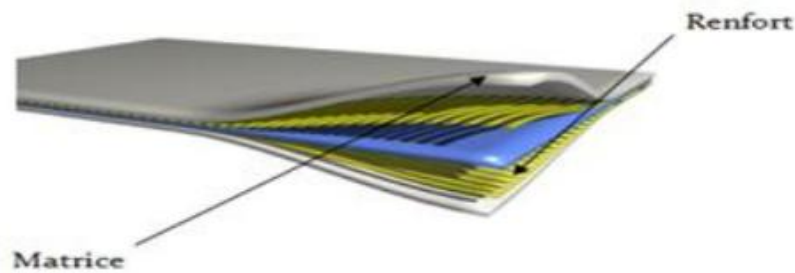


Figure II.2 : Constitution d'un matériau composite [17].

II.3.1 La matrice

Les matrices ont essentiellement pour rôle de transférer les contraintes apportées sur le matériau aux fibres, de les protéger contre les agressions extérieures et donnent la forme du matériau. Elles doivent être en outre assez déformable et présenter une certaine compatibilité avec le renfort. Ainsi, pour pouvoir apporter aux matériaux composites des propriétés mécaniques élevées, les résines doivent posséder des masses volumiques faibles.

Il existe plusieurs types de résines classées en deux grandes familles: les thermoplastiques et les thermodurcissables. Une nouvelle classe de résines, ayant les propriétés des deux précédentes familles, a vu le jour, il s'agit des thermostables.

II.3.1.1 Les thermoplastiques

Les thermoplastiques sont des chaînes polymères reliées entre elles par de faibles liaisons.

Ils sont recyclables et possèdent au moins un solvant. Les thermoplastiques représentent le plus grand tonnage en termes de production à cause de leur facilité de mise en œuvre et des faibles coûts. Ce sont principalement les plastiques traditionnels (le polychlorure de vinyle PVC, le polyéthylène PE, le polypropylène PP, le polyamide PA, les polycarbonates PC, etc.).

II.3.1.2 Les thermodurcissables

Les thermodurcissables sont des polymères qui ne peuvent être mis en forme qu'une seule fois mais possèdent des propriétés mécaniques et thermomécaniques élevées par rapport aux thermoplastiques. On retrouve dans cette famille les polyesters insaturés (les dérivés allyliques, les polyesters condensés, etc.), les résines époxydes, les résines de condensation (les phénoliques, les aminoplastes,... etc.) [19].

II.3.2 Les renforts

Le renfort est le squelette supportant les efforts mécaniques. Le but des renforts dans les matériaux composites est essentiellement d'accroître leurs propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc.) et d'améliorer des propriétés physiques, tels que les comportements au feu, la tenue en température (conservation des caractéristiques mécaniques à haute température) ou les propriétés électriques. Outre les propriétés mécaniques élevées qu'ils procurent, les caractéristiques recherchées dans les renforts sont une masse volumique faible, une compatibilité avec les matrices et une facilité de mise en œuvre[19].

Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel) [20]. La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la (Figure II.3).

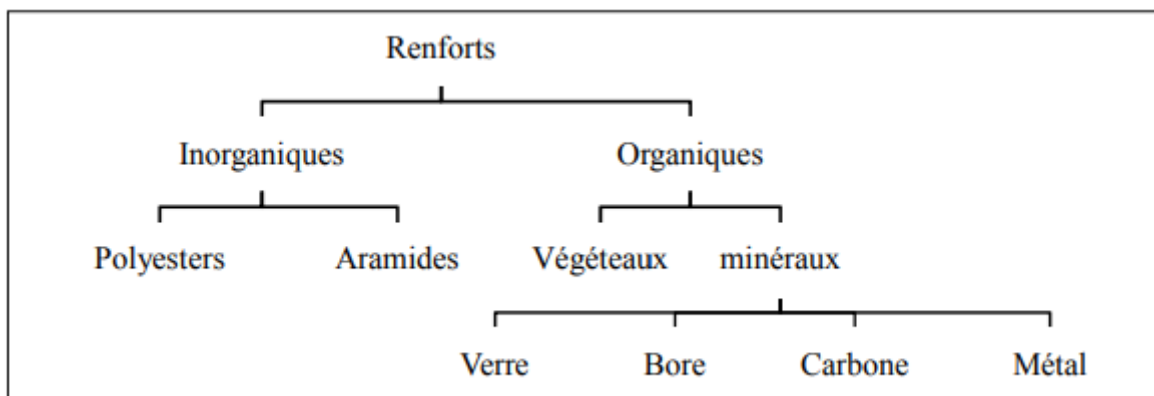


Figure II.3: Types de renfort [20].

II.3.3 Interface

L'interface renfort- matrice est souvent considérée comme une surface de contact, mais ce n'est pas une surface au sens géométrique du terme. Elle assure la compatibilité renfort - matrice et l'adhésion, en transmettant les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif (interface). A cause de sa structure, l'interface peut être considérée d'un point de vue mécanique, comme un point faible du composite. Dans le transfert d'effort orienté dans le sens de l'axe de la fibre, l'interface est considérée comme une couche de cisaillement. Lorsqu'il n'y a pas de décohésion interfacial, le comportement est élastique :

le cisaillement interfacial est linéairement proportionnel à la différence de déplacement entre la matrice et la fibre au niveau de leurs parois [17].

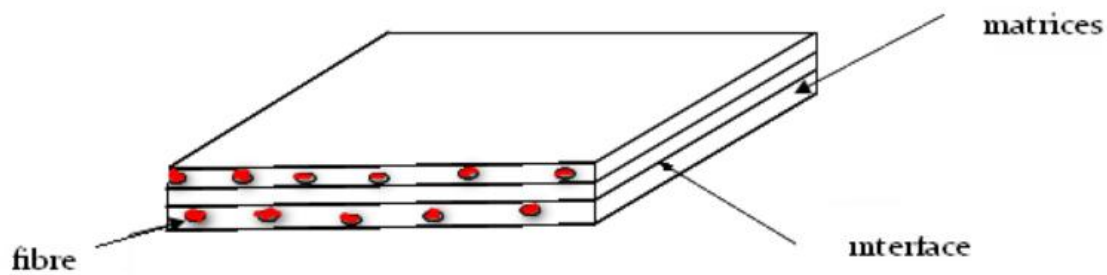


Figure II.4 : Présentation de l'interface, matrice et fibre [17].

II.4 Applications des matériaux composites

Les composites sont largement utilisés dans l'industrie, parce qu'ils présentent de bonnes caractéristiques telles la rigidité, légèreté et résistance à des contraintes d'origine mécanique ainsi qu'à celles d'origine thermique[21].

II.4.1 Industrie aérospatiale :

Au début des années 1960, une évaluation de l'impact de la fibre de bore et ses matériaux composites a été effectuée par l'armée de l'air des Etats-Unis. Un stratifié unidirectionnel de fibres de bore a été estimé avoir une rigidité supérieure à celle de l'acier pour seulement un quart de la masse. Cela a provoqué une fameuse prévision que les immeubles construits avec un tel matériau pourraient être cinq fois plus hauts et la travée des ponts cinq fois plus Longues. Bien que cette prévision a lancé les matériaux composites dans des applications aéronautiques sérieuses. Une nouvelle classe de composites appelée les composites hautes performances (Advanced composites), basée sur les fibres de bore et subséquemment les fibres de carbone, a été en développement intensif depuis.

Les composites à « haute performance » sont les composites à fibres très résistantes et très rigides comme le bore et le carbone. Les composites carbone/époxy ont connu une grande réputation dans cette classe. Tandis que les fibres de verre sont également très résistantes, leur rigidité n'est pas suffisamment élevée pour l'usage des structures primaires d'avions [22].

II.4.2 Industrie des transports terrestres et maritime :

L'intégration des matériaux composites dans l'industrie de l'automobile et des transports terrestres a pu réduire substantiellement la consommation de carburant au moyen de l'économie du poids obtenu. Les applications sont très nombreuses dans le domaine des transports, même ferroviaires, avec la fabrication de nombreux éléments de carrosserie et des boucliers amortisseurs de choc placés à l'avant des motrices des T.G.V. et qui présentent des performances supérieures en matière d'absorption d'énergie [23].

II 4 3 Industrie des articles de sport et de loisir :

De par leur légèreté, leur bonne tenue à la fatigue statique' et dynamique et leur stabilité dimensionnelle, les composites sont des matériaux idéaux pour la fabrication et la conception de très nombreux d'articles de sport et de loisirs tels que les skis et les bâtons, les raquettes de tennis, les cannes à pêche et de hockey, les planches à voiles et leurs mâts, les voiliers de plaisance, les aies, les cadres de vélos, des instruments de musique, au lieu du bois qui ne pouvait plus faire face à la demande créée par la civilisation des loisirs, ou l'aluminium qui ne correspondait plus aux critères modernes de performance et d'endurance.

De nombreux résultats d'études confirment le haut degrés d'amortissement des vibrations des skis sur neige qui confère au skieur le confort tout en conservant au produit ses caractéristiques essentielles. De plus, les matériaux composites permettent de concevoir des jaquettes légères, très rigides et excellentes eu langue dynamique qui confèrent au joueur une moindre sollicitation des muscles du bras et donc de moindre fatigue et plus de confort [24].

II.5 Les avantages et les inconvénients des matériaux composites

II.5.1 Avantages

- Facilité de mise en forme** : le matériau durcit et prend un aspect de surface définitif alors qu'il est positionné sur le moule.
- Légèreté** : pour des propriétés mécaniques équivalentes, l'utilisation de matériau composite à la place de métaux permet un gain de poids de près de 50 %. Cette propriété est notamment mise à profit dans le secteur automobile...ets.

• **Adaptabilité** : les caractéristiques mécaniques du composite peuvent être ajustées en jouant globalement sur le taux de fibres mais aussi localement en adaptant la quantité et le positionnement des fibres dans des zones soumises à de plus fortes contraintes mécaniques.

• **Résistance à la corrosion ou à l'oxydation** : à cause de leur composition chimique à base de résine organique, les composites sont peu sensibles à la corrosion et sont très résistants aux attaques chimiques. Cette caractéristique leur donne un avantage important par rapport aux métaux pour la réalisation de réservoirs et d'équipements destinés à un usage extérieur ou en zone humide.

• **Isolation électrique et thermique** : le bon niveau d'isolation que procurent les matériaux composites pourrait conduire à une utilisation plus importante dans le bâtiment. Toutefois, leur emploi massif est freiné à cause de coûts élevés par rapport aux matériaux de construction traditionnels[25].

II.5.2 Les inconvénients

Bien que les avantages des matériaux composites soient impressionnants, ces matériaux ne sont pas une solution miracle pour toutes les applications. Des inconvénients ou des problèmes existent et peuvent empêcher leur usage. Les inconvénients les plus courants sont les suivants :

• **Coût** : Les matériaux composites hautes performances ont été développés principalement pour répondre aux besoins de la communauté aérospatiale où le coût élevé peut être toléré en échange de matériaux plus performants. Par conséquent, le transfert de la technologie des composites aux produits de grande consommation est lent, à quelques exceptions comme les équipements de sports où la performance prime également sur le coût.

• **Conception et analyse** : Les matériaux composites sont souvent à la fois hétérogènes et anisotropes. Ces deux caractéristiques sont différentes des celles de la plupart des matériaux conventionnels. Elles nécessitent de nouvelles approches, généralement plus compliquées, pour la conception et l'analyse des structures.

• **Assemblage** : Les matériaux composites sont généralement plus fragiles que les matériaux métalliques conventionnels. Par conséquent, la redistribution des contraintes autour des

sites de concentration tel que le trou est moins efficace. La résistance et la rigidité d'un stratifié ne peuvent pas toujours être entièrement transférés par un joint.

• Tolérance aux dommages

Un des points faibles les plus importants des matériaux composites est la tolérance aux dommages. Des dommages de diverses natures peuvent se produire dans la vie d'une structure, par exemple l'impact, soit en service ou pendant la maintenance, est inévitable[25].

II.6 Procédés de fabrication de structures composites

II.6.1 Les pré-imprégnés

Le moulage en autoclave est un procédé de fabrication de composites structuraux par voie sèche. Le principe consiste à compacter des tissus pré-imprégnés appelés aussi semi-produits. Il s'agit de fibres imprégnées de résine, se trouvant dans un état de polymérisation adapté à la mise en œuvre et à la conservation, empilées selon une séquence définie par un cahier des charges sur un moule rigide. Une membrane déformable forme avec l'outillage une poche étanche reliée à une pompe à vide afin qu'une pression soit appliquée (Figure II.5). La structure est consolidée en autoclave via un cycle de cuisson prédéfini selon le type et la formulation de la résine [18].

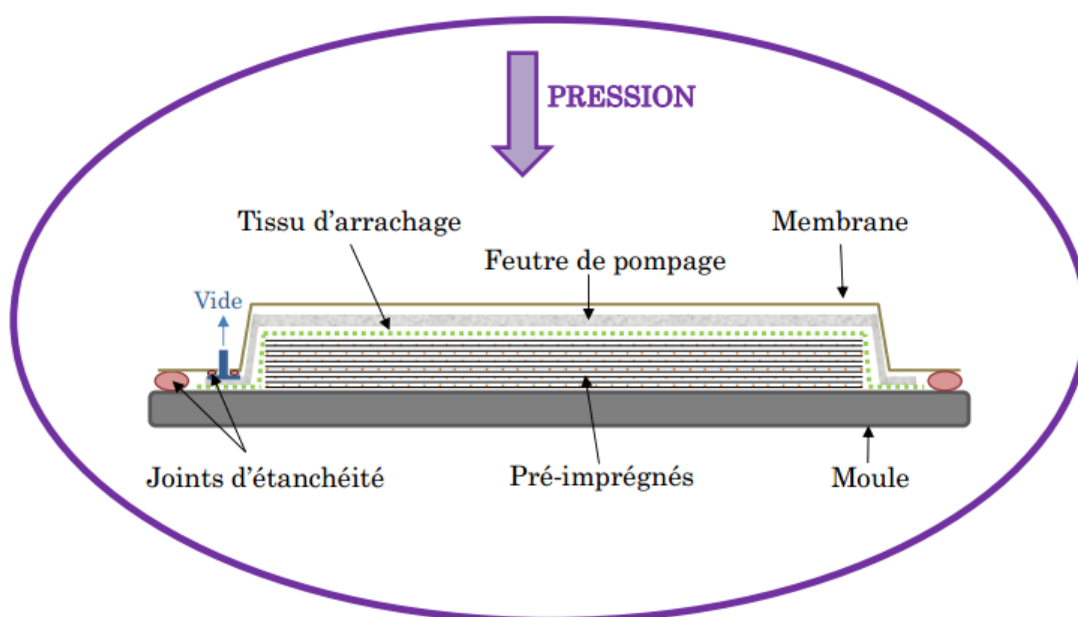


Figure II.5 : Principe de moulage avec des pré-imprégnés [18].

II.6.2 Moulage au contact

Technologie de réalisation de pièces prototypes après simulation. Le principe consiste à imprégner manuellement les renforts disposés dans un moule. C'est peu onéreux et des pièces de formes quelconques peuvent être réalisées mais à une cadence très faible. En effet, cette technique, par suite d'une dilatation peut faire éclater la structure, d'où une altération mécanique qui entraîne souvent une dégradation chimique (humidité, agression atmosphérique) [26].

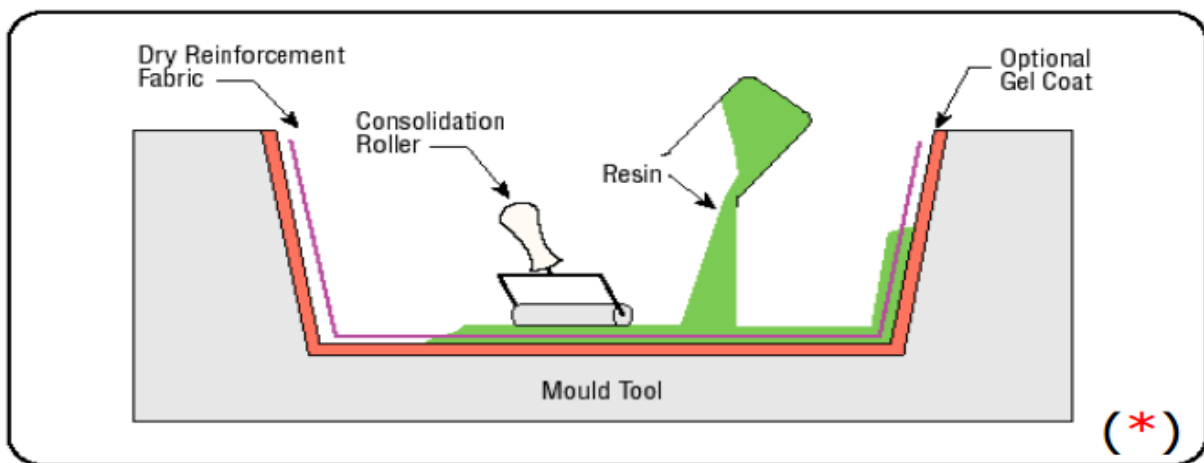


Figure II.6 : Principe de moulage au contact [27].

II.6.3 Infusion de film de résine / Resin Film Infusion (RFI)

Le principe du procédé RFI, présenté sur la (Figure II.7), consiste à placer un film de résine solide sur un moule sous un empilement défini, la préforme. Afin d'assurer un bon état de surface de la pièce finale, une plaque d'aluminium peut éventuellement être positionnée au-dessus de l'empilement fibre/résine. Un tissu absorbant est placé sur cette plaque afin de récupérer l'excédent de résine. Une bâche plastique assure l'étanchéité et compacte l'ensemble, le tout étant relié à une pompe à vide afin d'appliquer une pression. En exécutant de front un cycle de température et une pression, la viscosité de la résine diminue et permet ainsi sa diffusion au travers de la préforme pour aboutir en fin de cycle à un produit fini d'épaisseur donnée. Un autoclave est généralement requis pour le cycle de polymérisation [18].

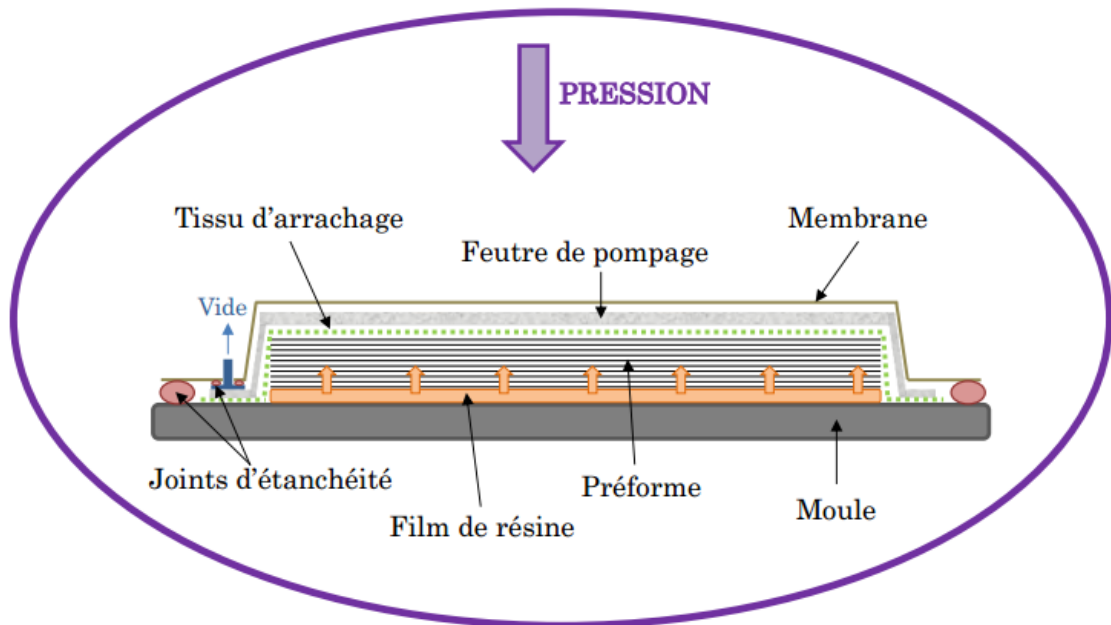


Figure II.7: Principe du procédé RFI [18].

II.6.4 Infusion de résine liquide / Liquid Resin Infusion (LRI)

Ce procédé permet d'imprégner un empilement de tissus secs, sans contre-moule rigide et sans passage à l'autoclave, uniquement par tirage de vide. Afin de réaliser l'infusion de résine liquide, il est nécessaire d'utiliser un drainant fortement perméable placé au-dessus d'un empilement de tissus préformés. Ce drainant reçoit la résine et alimente quasi instantanément les fibres dans le sens transverse, de haut en bas, par différence de pression entre l'entrée de résine et l'évent provoquant ainsi l'infusion à travers l'épaisseur des préformes. Des tissus d'arrachage peuvent être positionnés sur les faces inférieures et supérieures en fonction de l'état de surface souhaité. Ces derniers facilitent également le démoulage. Un frein, mis en bout de pièce, stoppe la résine et évite sa remontée dans le système de vide. Afin d'obtenir une parfaite étanchéité, l'ensemble est placé sous une bâche à vide combinée à un joint d'étanchéité (Figure II.8) [18].

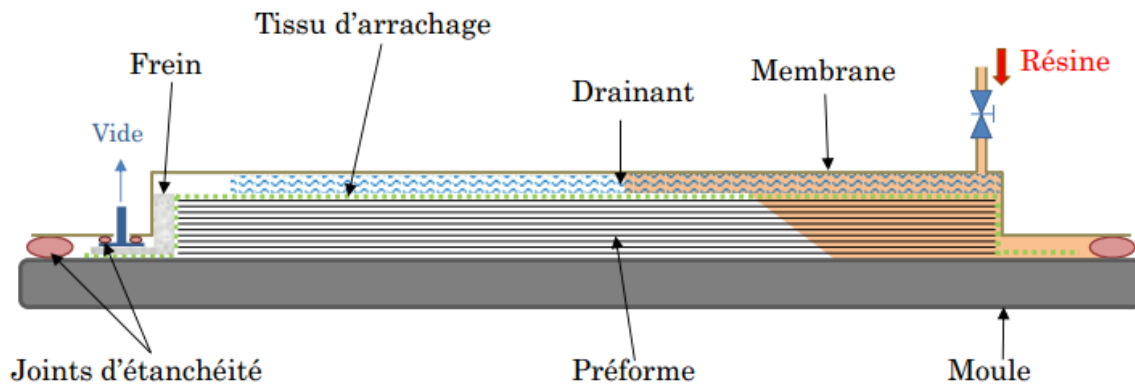


Figure II.8: Principe du procédé LRI [18].

II.7 Défauts d'usinage des matériaux composites

Usiner un matériau composite peut entraîner un risque d'endommagement au voisinage de la zone usinée. Il est donc important d'étudier la nature des défauts introduits par la coupe et d'appliquer des techniques d'usinage adaptées aux constituants du composite et élaborer des méthodes de contrôle spécifiques. La réalisation de pièces dans ces types de matériaux nécessite souvent, après la mise en forme globale, des opérations d'usinage à l'outil coupant [10].

II.7.1 Délaminage

Lors de sollicitations du composite en usinage, des micro-fissures peuvent apparaître dans les interfaces entre les plis. À des niveaux de chargement plus élevés, les fissures microscopiques peuvent croître et se rejoindre jusqu'à former des dégradations plus étendues sur les plis. Ces dernières commencent donc à se décoller les uns des autres : c'est le délaminage. Le délaminage peut s'étendre sur des surfaces considérables comme le montre la (Figure II.9) Il provoque alors la destruction du stratifié car les efforts ne peuvent alors plus se répartir entre les plis, et l'ensemble n'a alors plus aucune cohésion [10].

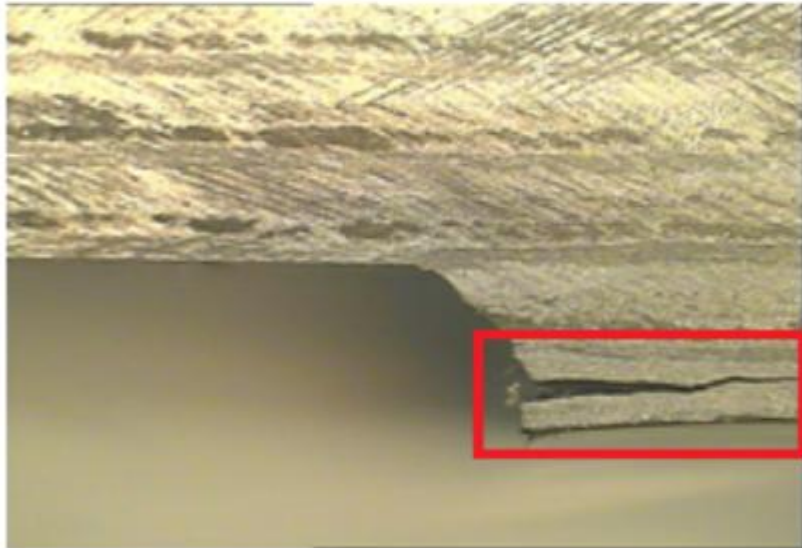


Figure II.9 : Défaut de délaminage [10].

II.7.2 Dégradation thermique

Lors d'opérations d'usinage sans lubrification de matériaux composites dont la matrice est en résine thermodurcissable, les paramètres de coupe ainsi que la forme de l'outil influencent directement l'apparition d'une dégradation thermique localisée de la pièce usinée [10].

II.7.3 Etat de surface

Afin de qualifier l'état des surfaces usinées dans des matériaux composites, de nombreux critères ont été utilisés dans la littérature. L'écart moyen arithmétique du profil de rugosité R_a est le paramètre le plus fréquemment étudié. Hocheng et al. et Paulo Davim et al. ont analysé l'influence de la géométrie de l'outil, de la vitesse de coupe et d'avance sur l'état de la surface obtenue à l'aide d'outil carbure dans un matériau carbone/époxy. Pour cela, un profilomètre tactile a été utilisé afin de mesurer la rugosité, au travers du paramètre R_a , obtenue en fond de rainure dans le sens de l'avance. Colligan et al. dans leur étude sur les fraises à pastille diamantées, ont utilisé le même moyen de mesure et le même critère R_a pour qualifier l'état de surface obtenu sur le flanc de la rainure usinée, en fonction de la granulométrie de l'outil. Contrairement aux études de Hocheng et Davim, les mesures ont été réalisées dans une direction perpendiculaire à l'avance. Hu et al. ont mixé les deux approches en considérant à la fois la rugosité (R_a) obtenue dans le sens longitudinal (identique à celui de l'avance), et dans le sens transverse. Leur étude se consacre à la rectification d'un matériau carbone/époxy, à l'aide d'une meule fabriquée à partir de grains d'alumine compactés.

Comme l'ont souligné Wang et al. et Ramulu, une analyse unique du Ra n'est pas adaptée pour qualifier l'état de surface d'une pièce composite, en raison des importantes variations d'altitudes. C'est pourquoi la hauteur maximale du profil Rz a été introduite, comme paramètre complémentaire dans leur étude sur le rabotage à l'aide d'outils PCD. Les valeurs longitudinales et transversales des Ra et Rz ont ainsi été déterminées à l'aide d'un profilomètre tactile, puis analysées afin de déterminer l'influence de la vitesse d'avance, de la géométrie de l'insert PCD et de l'orientation des fibres sur l'état de la surface usinée. Les auteurs ont également préconisé une inspection qualitative de la surface sur le profil transverse afin d'en caractériser la distribution spatiale et de détecter d'éventuelles irrégularités. L'observation de deux graphes a ainsi été proposée : l'histogramme de répartition des altitudes, qui illustre le facteur d'asymétrie du profil primaire Psk, et le graphe de répartition des hauteurs cumulées, qui correspond au facteur d'aplatissement Pku.

Afin d'améliorer la qualité de la surface obtenue et d'éviter les problèmes d'intégrité matière, il est important de choisir pertinemment le procédé de parachèvement le plus adapté à une application donnée : nature de la matrice et des fibres, épaisseur de la pièce... Comme nous l'aborderons par la suite, de nombreux procédés de parachèvement peuvent être utilisés pour assurer la qualité imposée [28].

II.7.4 Rupture de fibres

Dans un matériau composite unidirectionnel soumis à des sollicitations mécaniques, la rupture des fibres intervient lorsque la contrainte de traction dans une fibre atteint la contrainte à la rupture σ_r (Figure II.10). Cette rupture provoquera une concentration de contraintes au voisinage et une rupture des constituants voisins, et ce de proche en proche jusqu'à la ruine du volume sollicité [17].

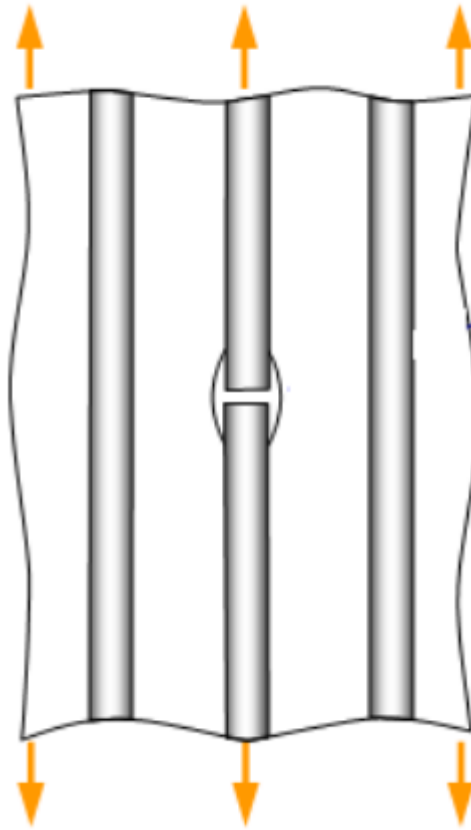


Figure II.10 : Mécanisme rupture de fibre [17].

II.7.5 Fissuration de la matrice

La complexité des matériaux composites introduit plusieurs types d'endommagements à l'échelle microscopique. La matrice étant le constituant qui s'endommage le premier, son seuil de déformation à l'endommagement est plus faible par rapport à celle des fibres. Les microfissures se produisent au sein de la matrice apparaissent aux niveaux des porosités et des inclusions constitue le principal mécanisme de dégradation des composites par le phénomène de fissuration transversal ou par fissuration longitudinale. Ce dernier mode de rupture se produit lorsque la contrainte de décohésion est supérieure à celle de cisaillement. Cette fissuration se propage selon la direction perpendiculaire à la sollicitation et elle peut provoquer une décohésion fibre- matrice [17].

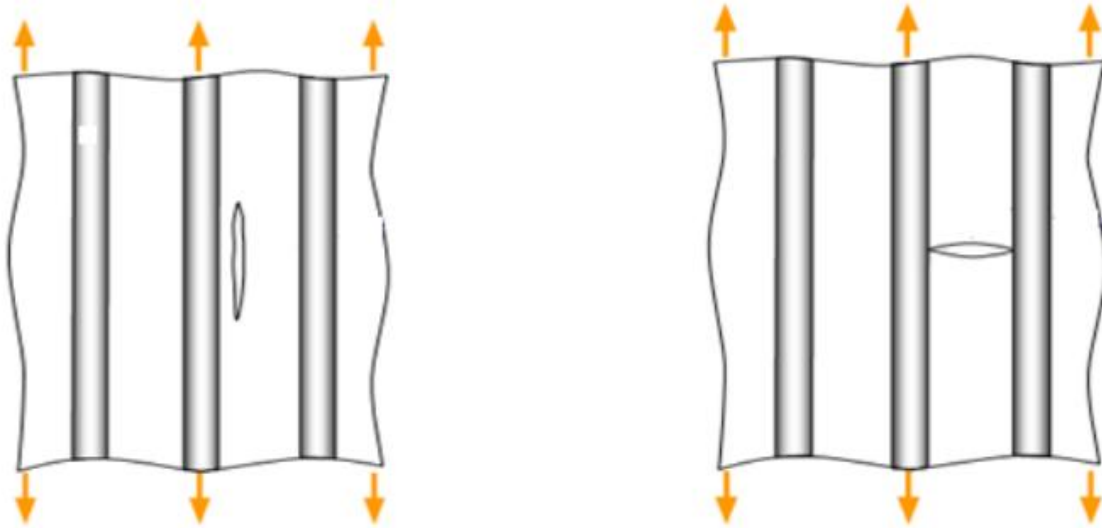


Figure II.11: Différents types de fissuration de la matrice (longitudinale, transversale) [17].

II.8 Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet de généralités sur les matériaux composites, leurs propriétés physiques et mécaniques, le mode de fabrication des pièces en matériaux composites tel que le moulage, leur utilisation dans le secteur industriel tel que l'automobile, le sport et l'aéronautique...etc.

Par ailleurs, nous avons décrit les différents défauts d'usinage des matériaux composites tel que l'état de surface, délaminage, dégradation thermique et rupture des fibres...ets.

CHAPITRE III :
MODELES
D'OPTIMISATION

III.1 Introduction

Les essais de mise au point d'un produit ou d'un processus font partie intégrante du métier des ingénieurs. Ceux-ci sont souvent amenés à rechercher des valeurs des paramètres qui définissent les produits ou les paramètres de réglage des moyens de production afin d'obtenir les performances désirées.

Pour cela on utilise les techniques d'optimisation tel que les plans d'expériences qui est une suite d'essais entièrement organisée à l'avance de manière à déterminer, en un minimum d'essais et un maximum de précision, l'influence des différents paramètres possibles, pour optimiser les performances du système étudié, Les tables optimisées de Taguchi permettent une réduction considérable du temps et des ressources nécessaires pour réduire la variabilité de la réponse par rapport au plan d'expériences traditionnel.

Ce chapitre présent deux applications sur un matériau composite carbone/époxy T800S/M21. La première a comme objectif de qualifier l'usinabilité de ce matériau avec un outil de coupe du type PCD (Poly-crystalline Diamond) ; la deuxième est une application sur une plaquette de revêtement DLC et d'angle d'attaque $K_r=60^\circ$, nous avons utilisé les niveaux de vibration de la plaque composite et les défauts enregistrés au cours d'usinage pour déterminer les conditions de coupe optimales.

III.2 Plans d'expériences

III.2.1 Généralités

La méthode des plans d'expériences a été mise au point au début du siècle dernier, dans les années 1920, par Ronald A. Fisher, dans le cadre d'études agronomiques. Elle a pris un essor considérable avec le développement de l'informatique et la puissance du calcul qui l'accompagne.

La grande nouveauté de la méthode des plans d'expériences est qu'elle propose une expérimentation factorielle, c'est-à-dire que tous les facteurs varient simultanément. Le traitement des résultats se fait à l'aide de la régression linéaire multiple et l'analyse de variance [29].

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais et analyses [30]. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à tous les secteurs d'activité. Avec ces plans, on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Ils permettent d'étudier plusieurs facteurs à la fois et non pas chaque paramètre séparément.

Les plans d'expériences nécessitent impérativement que puisse être établie par l'expérimentateur une relation de cause à effet entre les « facteurs », qui sont des paramètres supposés influencer le comportement du protocole analytique et les « réponses » qui caractérisent le résultat de l'essai. [29] Ceci correspond à la transposition dans le domaine expérimental réel de la « matrice d'expériences ».

Cette dernière, est un objet mathématique qui représente, sous forme codée, l'ensemble des expériences à réaliser. C'est un tableau constitué de N lignes, correspondant aux N expériences, et de K colonnes, correspondant aux k facteurs étudiés [31]. La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie donc sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées.

Il existe plusieurs types de plans d'expériences dans la littérature, nous citons à titre d'exemples les plans suivants :

- Plans factoriels complets à deux niveaux.
- Plans factoriels fractionnaire à deux niveaux.
- Plans à plusieurs niveaux.
- Plans pour surfaces de réponse.
- Plans de mélanges [29].

III.2.2 Définition les plans d'expériences :

Les plans d'expériences constituent essentiellement une stratégie de planification d'expériences afin d'obtenir des conclusions solides et adéquates de manière efficace et économique. La méthodologie des plans d'expériences se base sur le fait qu'une expérience convenablement organisée, conduira fréquemment à une analyse et à une interprétation statistique relativement simple des résultats [32].

III.2.3 Méthodologie de la surface de réponse RSM

La méthode RSM, est une technique basée sur la méthodologie de plan d'expériences (DOE). Elle représente un outil dynamique dans laquelle la relation entre la réponse (Y) d'un processus avec ses variables de décision (x_i), est mise en tracés pour atteindre l'objectif de maximisation, de minimisation ou d'une valeur cible de la réponse sous contrainte d'une autre réponse. Afin d'aboutir à un modèle de surface de réponse décrivant fidèlement le processus étudié

(Eq III.1), un plan composite centré est le type de plan le plus utilisé afin de minimiser le nombre d'expériences nécessaires à l'étude [33]. La taille du plan est proportionnelle aux nombres de niveau et de facteur ($N_e = n_v^{Nf}$). Les facteurs considérés dans cette stratégie sont de préférence ceux déterminés par « débroussaillage » et donc très réduits, quant au nombre de niveaux, il doit être compris entre (5 et 7). Une fois le modèle mathématique développé, il pourrait être représenté par des surfaces appelées « surfaces de réponse ». Ensuite, un outil informatique peut être utilisé pour représenter graphiquement, sous forme d'iso-contours, la réponse en fonction de variables de décision indépendantes. En superposant ces iso-contours, il est possible de sélectionner une combinaison optimale des variables de décision qui satisfait certains critères d'optimisation précis.

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k b_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad \text{(III.1)}$$

Où (b_i, b_{ii} et b_{ij}) sont les coefficients indépendants de modèle et x_i sont les facteurs d'entrée du modèle.

ε : Erreur expérimentale.

L'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences [34].

III.2.4 Méthode de Taguchi

Genichi Taguchi est un ingénieur japonais qui a œuvré à l'amélioration des produits et des procédés industriels de son pays. La contribution majeure de Taguchi réside dans la combinaison de l'ingénierie et des méthodes statistiques pour obtenir des améliorations rapides en termes de coût et de la qualité, en optimisant les processus de conception et de fabrication des produits. L'idée de la conception robuste de Taguchi est basée sur la conception d'un produit ou d'un procédé de telle manière à rendre ses performances moins sensibles à la variabilité, qui est due aux facteurs de bruits, dont le contrôle est soit très coûteux ou tout simplement impossible. La méthode Taguchi est généralement appréciée pour sa distribution libre et à ses plans et tables orthogonales [35]. Les tables optimisées de Taguchi permettent une réduction considérable du temps et des ressources nécessaires pour réduire la variabilité de la réponse par rapport au plan d'expériences traditionnel, et cela avec une amélioration simultanée de la qualité et du coût de la fabrication [36]. La méthode de Taguchi est basée sur la séparation des variables du problème d'optimisation en deux ensembles (Fig III.1) :

- les facteurs de décision contrôlables qui agissent sur la moyenne ou la dispersion de la réponse ou simultanément sur les deux,
 - les facteurs de bruit interne et externe au système, qui sont au moins mesurables quand ils ne sont pas maîtrisables.
1. Taguchi a créé un certain nombre de tables orthogonales [37-38] pour identifier une configuration des variables de décision maximisant le rapport signal sur bruit. Ce rapport (S/N) a été utilisé pour s'assurer d'une conception immunisée contre l'influence des facteurs de bruit. Ces derniers, dont l'identification soit coûteuse soit impossible en tournage, ont mené pas mal d'auteurs [39-40] à se focaliser sur la recherche des niveaux optimaux des facteurs de décision (maîtrisables) permettant de neutraliser leurs effets. En vue de déterminer les paramètres de coupe réduisant l'énergie de coupe consommée en tournage, [41] ont identifié deux facteurs de bruit maîtrisables dans leur démarche pour l'optimisation robuste, à savoir la présence ou l'absence de fluide de coupe et le modèle de la machine-outil CNC. La recherche d'une disposition des niveaux optimaux des deux facteurs de bruit n'a pas été effectuée afin de minimiser leurs effets. La TM va en effet à l'encontre du principe communément admis qui repose sur la suppression des causes pour la suppression des effets. Néanmoins, son but n'est pas de supprimer les variations des facteurs de bruits, mais de rendre le système insensible à leurs variations [33].

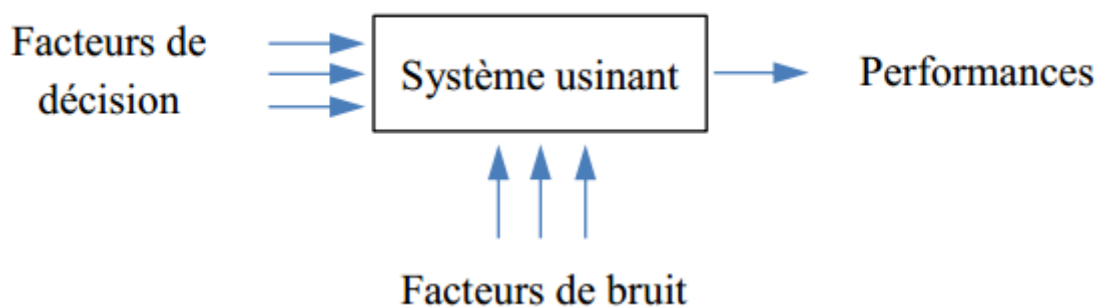


Figure III.1 Différents facteurs influençant sur les performances d'usinage [34].

III.3 Les modèles d'optimisations

III.3.1 Modèle de vibration A_{rms}

Le modèle choisi prend en compte les effets linéaires, d'interactions et quadratiques. Les coefficients de régression de ce modèle permettent d'exprimer la relation de la vibration de la pièce en fonction des trois paramètres étudiés :

$$A_{rms} = 62.185 - 0.018 \times V_c - 80.999 \times f - 49.112 \times a_p + 5.368 \times f^2 + 10.124 \times a_p^2 + 46.255 \times a_p \times f + 0.080 \times V_c \times f + 0.031 \times V_c \times a_p + 319.541 \times f \times a_p \quad \text{(III.2)}$$

Le coefficient de détermination du modèle vaut 0.962, ce qui signifie que 96.2% des variations des vibrations sont expliqués par le modèle et que 3.8 % restent par conséquent inexpliqués [10].

III.3.2 Modèle de la productivité

La productivité est représentée par le débit copeaux Q et calculée par la relation suivante :

$$Q = \sqrt{\frac{a_p \times f \times V_c \times a_e \times Z}{\pi \times D}} \quad \text{(III.3)}$$

a_e : est l'engagement de l'outil de coupe dans la matière [10].

III.3.3 Modèle de température (T°)

Le modèle du second ordre de la température de la matière T est donné par l'équation (III.4) :

$$T = -17.43 + 0.22 \times V_c + 734.13 \times f \times \sin(K_r) - 1301.45 \times (f \times \sin(K_r))^2 - 1.02 \times V_c \times f \times \sin(K_r) \quad \text{(III.4)}$$

Les valeurs du coefficient de détermination R^2 et du coefficient de détermination ajusté R_{adj}^2 ont été calculées et valent : $R^2 = 0.97$ et $R_{adj}^2 = 0.92$ respectivement. Ces deux coefficients montrent une bonne corrélation entre le modèle et les données expérimentales [10].

III.3.4 Modèle de l'effort de coupe (F)

Le modèle du second ordre de l'effort de coupe F est donné par l'équation (III.5) :

$$F = 516.12 + 0.94 \times V_c - 2151.78 \times f \times \sin(K_r) + 4438.76 \times (f \times \sin(K_r))^2 - 3.29 \times V_c \times f \times \sin(K_r) \quad \text{(III.5)}$$

Les valeurs du coefficient de détermination R^2 et du coefficient de détermination ajusté R_{adj}^2 ont été calculées et valent : $R^2 = 0.99$ et $R_{adj}^2 = 0.99$ respectivement. Ces deux coefficients montrent une bonne corrélation entre le modèle et les données expérimentales [10].

III.3.5 Modèle de puissance (P_u)

L'équation de la puissance se résume sur la multiplication de l'effort de coupe F par la vitesse de coupe V_c comme suit :

$$P_u = F \times V_c \quad \text{(III.6)}$$

En remplaçant l'équation de l'effort de coupe (III.5) dans l'équation (III.6) on obtient l'équation de la puissance suivante :

$$P_u = 516.12 \times V_c + 0.96 \times V_c^2 - 2151.78 \times f \times \sin(K_r) \times V_c + 4438.76 \quad (\text{III.7})$$

$$\times (f \times \sin(K_r))^2 \times V_c - 3.29 \times V_c^2 \times f \times \sin(K_r)$$

III.3.6 Modèle d'usure (V_b)

Le modèle du second ordre de l'usure de l'outil de coupe V_b est donné par l'équation (III.8) :

$$V_b = -1.029 + 0.138 \times V_c - 177.93 \times f \times \sin(K_r) - 130.279 \quad (\text{III.8})$$

$$\times (f \times \sin(K_r))^2 - 0.32 \times V_c \times f \times \sin(K_r)$$

Les valeurs du coefficient de détermination R^2 et du coefficient de détermination ajusté R_{adj}^2 ont été calculées et valent : $R^2 = 0.96$ et $R_{adj}^2 = 0.91$ respectivement. Ces deux coefficients montrent une bonne corrélation entre le modèle et les données expérimentales [10].

III.3.7 Modèle de la longueur de délaminage L_d

Le modèle du second ordre de la longueur de délaminage L_d est donné par l'équation (III.9):

$$L_d = -2.670 + 0.001 \times V_c + 25.209 \times f \times \sin(K_r) - 63.945 \times (f \times \sin(K_r))^2 \quad (\text{III.9})$$

$$+ 0.005 \times V_c \times f \times \sin(K_r)$$

Les valeurs du coefficient de détermination R^2 et du coefficient de détermination ajusté R_{adj}^2 ont été calculées et valent : $R^2 = 0.991$ et $R_{adj}^2 = 0.976$ respectivement. Ces deux coefficients montrent une très bonne corrélation entre le modèle et les données expérimentales [10].

III.3.8 Temps d'usinage unitaire

$$T_u = T_{cr} + T_{cf} + \frac{R}{v_t} + t_L + \frac{t_s}{N_L} + \frac{t_{cr} \times t_e}{t_{or}} + \frac{t_{cf} \times t_e}{t_{of}} \quad (\text{III.10})$$

Comme nous modélisons une opération de fraisage en bout, il faut étendre encore l'expression du modèle. Nous allons donc ajouter la largeur de passe radiale afin d'avoir un modèle général convenable pour le fraisage en bout :

$$t_o = \frac{k}{V_C^\alpha f^\beta a_{pr}^r w^\lambda} \quad (\text{III.11})$$

k, α, β, r et λ .Sont des constantes. Il y a deux équations en réalité, une pour l' ébauche et une pour la finition, soit t_{or} et t_{of} :

$$t_{or} = \frac{k}{V_{Cr}^\alpha f_r^\beta a_{pr}^r w_r^\lambda} \quad (\text{III.12})$$

$$t_{of} = \frac{k}{V_{Cf}^\alpha f_f^\beta a_{pf}^r w_f^\lambda} \quad (\text{III.13})$$

Les temps de coupe se calculent ainsi :

$$t_{cr} = \frac{LWH - (W - w_f)La_p - HLw_f}{w_r a_{pr} v_{fr}} \quad (\text{III.14})$$

$$t_{cf} = \frac{WL}{D_f v_{ff}} \quad (\text{III.15})$$

$$T_u = \frac{LWH - (W - w_f)La_p - HLw_f}{w_r a_{pr} v_{fr}} + \frac{WL}{D_f v_{ff}} + \frac{R}{v_t} + t_L + \frac{t_s}{N_L} + \frac{LWH - (W - w_f)La_p - HLw_f}{w_r a_{pr} v_{fr}} \times \frac{t_e}{\left(k/V_{Cr}^\alpha f_r^\beta a_{pr}^r w_r^\lambda\right)} + \frac{WL}{D_f v_{ff}} \times \frac{t_e}{\left(k/V_{Cf}^\alpha f_f^\beta a_{pf}^r w_f^\lambda\right)} \quad (\text{III.16})$$

t_{or}, t_{of} : Durée de vie d'un outil avant aiguisage (Taylor) (min)

t_{cr}, t_{cf} : Temps de coupe, ébauche et finition (min/unité)

t_e : Temps pour changer un outil émoussé (min)

t_L : Temps pour charger et enlever une pièce (min)

t_s : Temps de mise en course pour l'opération (min)

T_u : Temps d'usinage unitaire (min)

v_{fr}, v_{ff} : Vitesse d'avance (en unité de temps) (mm/min)

H : Hauteur du volume à usiner (mm)

L : Longueur du volume à usiner (mm)

R : Distance à parcourir en avance rapide, par opération (mm)

v_t : Vitesse d'avance rapide (mm/min)

w_r, w_f : Largeur de la passe (mm)

W : Largeur du volume à usiner (mm)

N_L : Nombre de pièces par lot (entier) [42].

III.3.9 Coût d'usinage

L'équation générale des coûts de production (C) comme suite :

$$C = C_B + k_o T_u + C_{Hr} t_{cr} + C_{Hf} t_{cf} \quad (\text{III.17})$$

Les coûts horaires des outils, C_{Hr} et C_{Hf} , sont calculés en utilisant les durées de vies t_{or} et t_{of} , le coût d'achat initial C_p , le coût d'aiguisage C_A , et le nombre de fois qu'il peut être aiguisé N_A :

$$C_{Hr} = \frac{C_{pr} + (C_A + N_{Ar})}{t_{or}(N_{Ar} + 1)} \quad (\text{III.18})$$

$$C_{Hf} = \frac{C_{pf} + (C_A + N_{Af})}{t_{of}(N_{Af} + 1)} \quad (\text{III.19})$$

$$C = C_B + k_o T_u + \frac{C_{pr} + (C_A + N_{Ar})}{t_{or}(N_{Ar} + 1)} \times \frac{LWH - (W - w_f)La_p - HLW_f}{w_r a_{pr} v_{fr}} + \frac{C_{pf} + (C_A + N_{Af})}{t_{of}(N_{Af} + 1)} \times \frac{WL}{D_f v_{ff}} \quad (\text{III.20})$$

C_A : Coût d'aiguisage de l'outil(\$)

C_{Hr}, C_{Hf} : Coût horaire de l'outil (\$/min)

C_{pr}, C_{pf} : Coût d'achat de l'outil (\$/outil)

C_B : Coût du matériel brut (\$)

k_o : Coût d'opération, incluant salaire et machine (\$/min) [42].

III.3.10 Qualité d'usinage

L'équation générale de la rugosité théorique s'exprime par [43] :

$$R_{th} = 125 \times \frac{f^2}{\left[\frac{D}{2} + \frac{fZ}{\pi} \right]} \quad (\text{III.21})$$

Le signe + nous indique que c'est un fraisage en opposition.

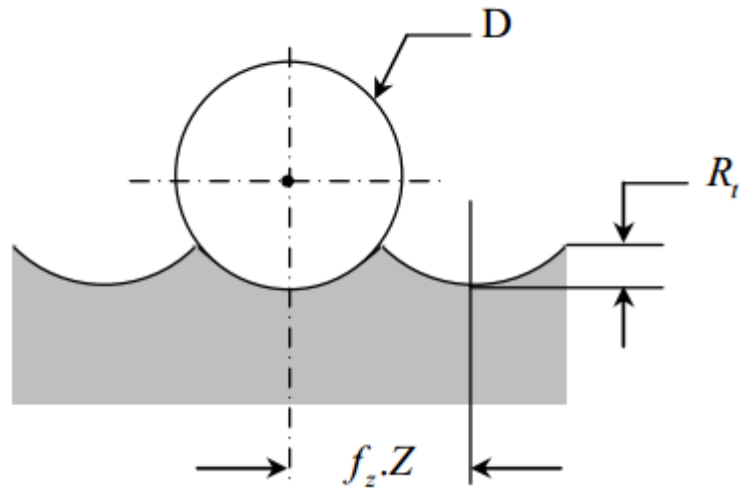


Figure III.2 Rugosité théorique [44].

Z : Nombre des dents.

f : Avance par dent.

D : Diamètre de l'outil

III.4 Conclusion

L'objectif de cette étude est de déterminer les conditions de coupe au cours d'une opération de fraisage d'un matériau composite stratifiés permettant d'éviter l'apparition des défauts de délaminage ainsi de montrer la corrélation entre les vibrations et les défauts générés lors de l'usinage d'un matériau composite carbone/époxy T800S/M21. 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.

CHAPITRE IV :
OPTIMISATION DES
CONDITIONS DE
COUPE

IV.1 Introduction :

L'optimisation est la discipline permettant de déterminer analytiquement ou numériquement la meilleure solution à un problème, au sens d'un certain critère. Elle est fondamentale dans la résolution de nombreux problèmes liés à l'industrie, à l'économie ou à la science de la physique, en vue d'obtenir un gain d'effort ou de temps.

La qualité de la solution obtenue dépend généralement du modèle utilisé pour représenter le problème réel et de la méthode de résolution adoptée. Le développement des modèles théoriques et des techniques traitant des problèmes d'optimisation a connu une accélération spectaculaire.

IV.1 Définition

IV.1.1 L'optimisation :

L'optimisation c'est l'art de comprendre un problème réel, de pouvoir le transformer en un modèle mathématique que l'on peut étudier afin d'en extraire les propriétés structurelles et de caractériser les solutions du problème. Enfin, c'est l'art d'exploiter cette caractérisation afin de déterminer des algorithmes qui les calculent mais aussi de mettre en évidence les limites sur l'efficacité et l'efficacité de ces algorithmes [45].

IV.1.2 Qu'est-ce qu'un problème d'optimisation ?

Un problème d'optimisation se définit comme la recherche du minimum ou du maximum (de l'optimum donc) d'une fonction donnée. On peut aussi trouver des problèmes d'optimisation pour lesquels les variables de la fonction à optimiser sont contraintes d'évoluer dans une certaine partie de l'espace de recherche. Dans ce cas, on a une forme particulière de ce que l'on appelle un problème d'optimisation sous contraintes.

Ce besoin d'optimisation vient de la nécessité de l'ingénieur de fournir à l'utilisateur un système qui réponde au mieux au cahier des charges. Ce système devra être calibré de manière à:

- Occuper le volume minimum nécessaire à son bon fonctionnement (coût des matières premières),
- consommer le minimum d'énergie (coût de fonctionnement),
- répondre à la demande de l'utilisateur (cahier des charges) [46].

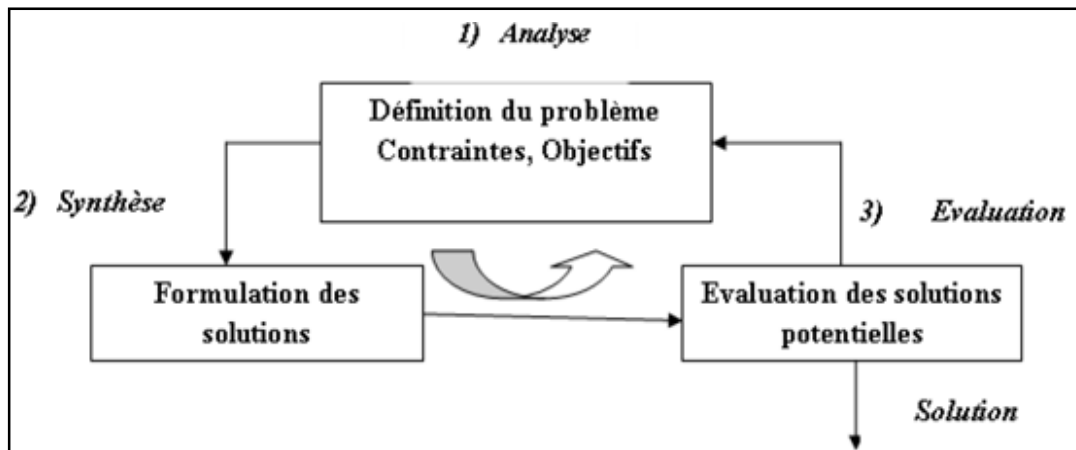


Figure IV.1 Processus D'optimisation Selon Asimow [47].

La figure IV.1, présente les trois étapes du processus d'optimisation : analyse, synthèse et évaluation. Tout d'abord, il convient d'analyser le problème et d'opérer un certain nombre de choix préalables :

- Variable du problème quels sont les paramètres intéressants à faire varier?
- Espace de recherche dans quelles limites faire varier ces paramètres?
- Fonction objectives quels sont les objectifs à atteindre?
- Méthode d'optimisation quelle méthode choisir?

Une fois effectuée ces différents choix, la méthode choisie synthétise des solutions potentielles qui sont évaluées, puis éliminées jusqu'à obtention d'une solution acceptable. Si nécessaire, le problème peut être redéfini à partir des solutions déjà obtenues [47].

IV.1.3 Variables du problème

Les variables peuvent être de natures diverses. Par exemple, pour une opération d'usinage il peut s'agir de la matière à usiner, les conditions de coupe, etc. C'est à l'utilisateur de définir les variables du problème. Il peut avoir intérêt à faire varier un grand nombre de paramètres afin d'augmenter les degrés de liberté de l'algorithme.

Dans notre étude nous désignerons par x_1, x_2, \dots, x_n les n variables du problème. Celles-ci peuvent être réelles, complexes, entières, booléennes, etc [47].

IV.1.4 Espace de recherche

Dans certains algorithmes d'optimisation, tels que les stratégies d'Evolution, l'espace de recherche est infini : seule la population initiale est confinée dans un espace fini [47]. Mais dans le cas des algorithmes de type Monte Carlo et génétique, il est généralement nécessaire de définir un espace de recherche fini. Cette limitation de l'espace de recherche n'est généralement pas problématique. En effet, ne serait-ce que pour des raisons technologiques ou informatique (taille de la fenêtre de modélisation), les intervalles de définition des variables sont en général limités. De plus, la plupart du temps on a au moins une idée des ordres de grandeur des variables du problème.

Nous désignerons par x_{imin} et x_{imax} les bornes de chaque variable x_i :

$$x_{imin} \leq x_i \leq x_{imax}$$

IV.1.5 Fonction objectif

Les grandeurs à optimiser peuvent être par exemple une consommation, un rendement, un profit, un temps de production, un coût, une durée de vie d'un outil, etc....

Un algorithme d'optimisation nécessite généralement la définition d'une fonction rendant compte de la pertinence des solutions potentielles à partir des grandeurs à optimiser [47].

IV.1.6 L'ensemble de contraintes

Définit des conditions sur l'espace d'état que les variables doivent satisfaire. Ces contraintes sont souvent des contraintes d'inégalité ou d'égalité et permettent en général de limiter l'espace de recherche.

La séparation entre les fonctions objectives et les contraintes peuvent paraître artificielles car nous pourrions considérer qu'une contrainte est un objectif à atteindre. Mais elle se justifie de deux manières différentes : d'une part, les contraintes sont appliquées sur l'espace de recherche alors que les objectifs définissent l'espace de solutions ; D'autre part, dans de nombreuses méthodes les contraintes et les objectifs sont traités par des procédures différentes [48].

IV.2 Méthodes d'optimisation

Actuellement, il existe plusieurs méthodes d'optimisation. Chacune d'elles permet d'obtenir de meilleurs résultats selon le type de problème traité. Le choix d'une méthode dépend d'une série de caractéristiques du problème à optimiser, et surtout du comportement de la fonction qui le représente, comportement habituellement difficile à déterminer. Pour faire le choix de la méthode d'optimisation, il est aussi nécessaire d'avoir une bonne connaissance des outils d'optimisation existants [49].

Ces méthodes font partie de deux groupes de nature différente Les méthodes exactes et les méthodes approchées (ou heuristiques).

Les méthodes exactes ont permis de chercher des solutions optimales pour des problèmes de taille raisonnable. Malgré les progrès réalisés, le temps de calcul nécessaire pour trouver une solution optimale risque d'augmenter exponentiellement avec la taille du problème.

En revanche, les algorithmes approximatifs (heuristiques) permettent de trouver une solution dont le coût est proche du coût de la solution optimale. Ils ont l'avantage de permettre en un temps raisonnable de trouver une solution. Ils constituent donc une alternative très intéressante pour traiter les problèmes d'optimisation de grande taille si l'optimalité n'est pas primordiale [50].

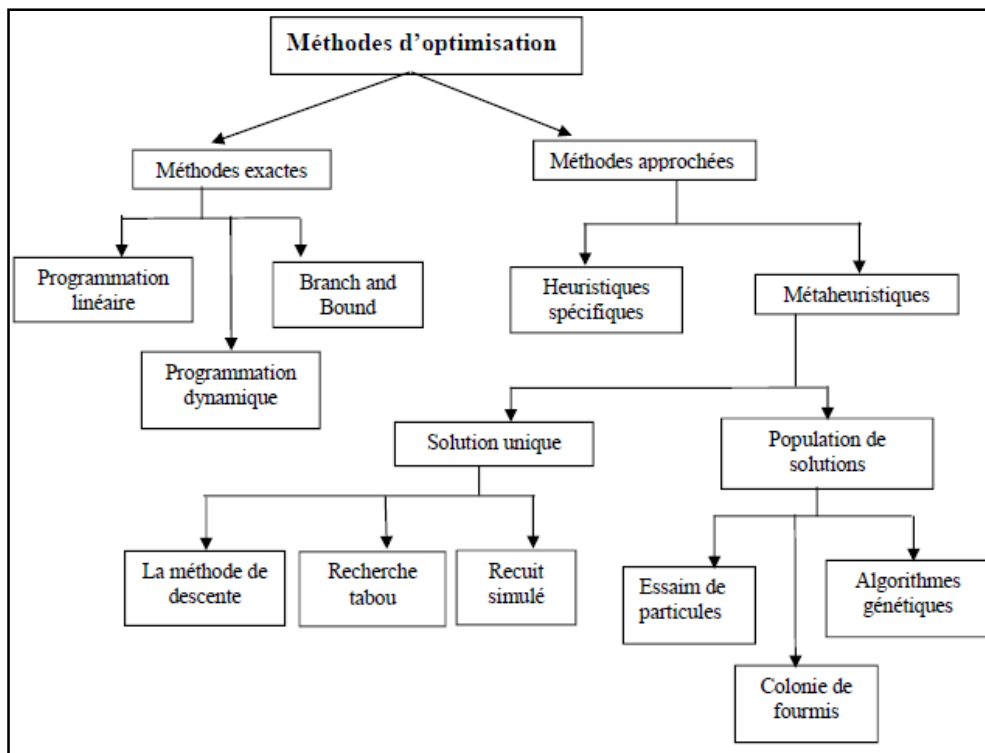


Figure IV.2 Classification possible de méthodes de résolution [50].

IV.3 Optimisation mono-Objectif

Mathématiquement parlant, un problème d'optimisation se présentera sous la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimiser } f(\vec{x}) \text{ (fonction à optimiser)} \\ \text{Avec } \vec{g}(\vec{x}) \leq 0 \text{ (} m \text{ contraintes d'inégalité)} \\ \text{Et } \vec{h}(\vec{x}) = 0 \text{ (} p \text{ contraintes d'égalité)} \end{array} \right.$$

On a $\vec{x} \in R^n$, $\vec{g}(\vec{x}) \in R^m$ et $\vec{h}(\vec{x}) \in R^p$.

Ici, les vecteurs $\vec{g}(\vec{x})$ et $\vec{h}(\vec{x})$ représentent respectivement m contraintes d'inégalité et p contraintes d'égalité.

Cette formulation relative à un problème dans lequel on recherchait un optimum pour une fonction objectif (f dans l'expression précédente), le problème d'optimisation est mono-objectif [46].

IV.4 L'optimisation multi-objectif

Cependant, lorsque l'on modélise un problème, on cherche souvent à satisfaire plusieurs objectifs. Par exemple, on veut un système performant et on veut aussi que ce système consomme peu. Dans ce cas, on parle de problème d'optimisation multi objectif (ou problème d'optimisation multicritère). Celui-ci s'écrit de la manière suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimiser } f(\vec{x}) \text{ (fonction à optimiser)} \\ \text{Avec } \vec{g}(\vec{x}) \leq 0 \text{ (} m \text{ contraintes d'inégalité)} \\ \text{Et } \vec{h}(\vec{x}) = 0 \text{ (} p \text{ contraintes d'égalité)} \end{array} \right.$$

On a $\vec{x} \in R^n$, $\vec{f}(\vec{x}) \in R^k$, $\vec{g}(\vec{x}) \in R^m$ et $\vec{h}(\vec{x}) \in R^p$.

Comme on peut le voir ici, on n'a plus un seul objectif à atteindre, mais k (le vecteur \vec{f} regroupe k fonctions objectif).

Dans un problème d'optimisation multicritère, on rencontre souvent des objectifs contradictoires. Deux objectifs sont contradictoires lorsque la diminution d'un objectif entraîne une augmentation de l'autre objectif [46].

IV.5 MÉTHODES BIO-INSPIRÉES POUR LA RÉOLUTION DE PROBLÈMES

Actuellement, La biologie est considérée comme une source d'inspiration de nombreuses méthodes de résolution des problèmes complexes. Ainsi, la théorie de l'évolution a inspiré les algorithmes évolutionnaires, l'étude de l'organisation de groupes d'animaux a donné naissance aux méthodes d'optimisation par essaim de particules, le phénomène de déplacement chez les fourmis a conduit à l'élaboration des algorithmes de colonies de fourmis, le principe du système immunitaire artificiel a permis d'inspirer des méthodes de résolution robustes et flexibles.

Les méthodes bio-inspirées sont les métaheuristiques qui s'inspirent de phénomènes naturels [50].

IV.5.1 Sources d'inspiration

La nature innove, invente, teste, valide, améliore et diversifie les systèmes vivants depuis des centaines de millions d'années, elle a été toujours une source d'inspiration. Plusieurs questions préoccupent les biologistes : dans une colonie d'insectes sociaux, tels les fourmis, les abeilles, les termites, etc., pourquoi le groupe est-il souvent cohérent alors que chaque individu semble autonome? Comment les activités de tous les individus sont-elles coordonnées sans supervision? Les éthologistes qui étudient le comportement des insectes sociaux observent que la coopération au sein des colonies de fourmis est auto-organisée : souvent, elle résulte d'interactions entre les individus. Bien que ces interactions puissent être simples, elles permettent à la collectivité de résoudre des problèmes difficiles, telle la recherche du chemin le plus court entre le nid et une source de nourriture, parmi d'innombrables voies possibles. Au cours des dernières décennies, toutes ses observations et interrogations ont donné lieu à l'émergence d'un nouveau paradigme de calcul intelligent inspiré de la nature « Nature Inspired Computing », pour traiter les problèmes complexes et dynamiques du monde réel. L'approche des systèmes bio-inspirés consiste dans l'étude des "inventions" et des "astuces" de la nature pour s'en inspirer.

C'est une façon de concevoir et de développer des solutions informatiques (méthodes bio inspirées) pour résoudre des problèmes complexes en reproduisant le comportement réel des systèmes naturels. Les méthodes bio-inspirées s'appuient sur les principes de l'émergence, d'auto-organisation et des systèmes complexes, elles sont caractérisées par l'adaptation, la tolérance aux bruits et aux pannes, le calcul distribué, la flexibilité, la robustesse et

la généralisation. Ce nouveau paradigme a connu un grand succès, et a contribué à la compréhension des différents phénomènes naturels, ainsi au développement de nouvelles techniques de calcul en réduisant considérablement la complexité algorithmique [50].

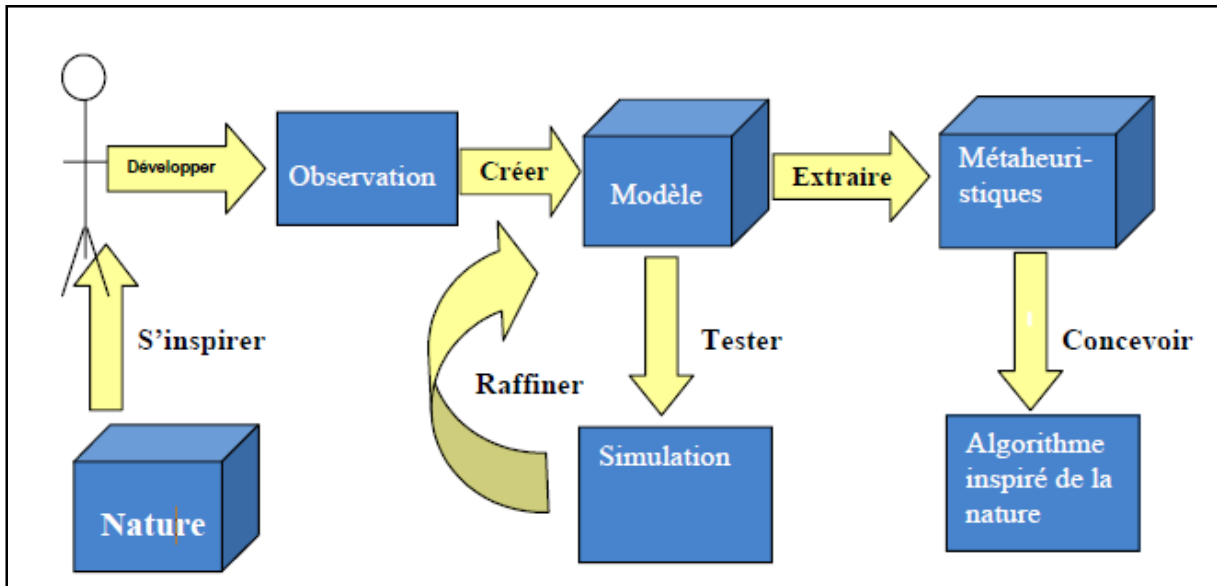


Figure IV.3 : Processus d'inspiration d'un phénomène naturel [51].

La (figure IV.3), Représente une illustration d'un framework de passage d'un phénomène naturel vers une technique bio-inspirée. L'homme s'inspire de la nature pour développer une observation sur un phénomène naturel. Il commence par sa modélisation en utilisant des simulations mathématiques. Une fois le modèle est raffiné, il sera utilisé pour extraire une métaheuristique [51].

IV.5.2 Les avantages

Le choix des méthodes bio-inspirées est motivé par :

- la production d'une performance collective supérieure à celle des individus ;
- une plus grande adaptation et flexibilité aux environnements réels (en général dynamiques);
- la fiabilité du système dans son ensemble (la perte d'un agent ne met pas en cause le processus général) ;
- le faible coût [52].

IV.5.3 Les inconvénients

Par contre, un certain nombre de problèmes surgissent :

- difficulté pour anticiper la résolution d'un problème par une intelligence "émergente".
- problèmes de formulation, de compréhension et de preuve de la résolution ;
- nécessité d'un grand nombre d'agents (notion de masse critique), donc risques de conflits ;
- risques de comportements oscillatoires ou bloquants ;
- pas de coopérations locales intentionnelles, c'est-à-dire de comportements volontairement coopératifs dédiés ou exigés par les individus [52].

IV.6 CAS D'APPLICATION

IV.6.1 Principe de l'algorithme NSGA-II

L'algorithme NSGA-II est un algorithme évolutif multi-objectif qui utilise un type de mesure du surpeuplement autour de chaque individu afin d'assurer la diversité de la population. Le principe de cet algorithme est illustré à la (Figure IV.4). Tout d'abord, une population $R_t = P_t \cup Q_t$ est formée, où P_t est la population des parents de taille N , et Q_t est la population des enfants (descendants) générés à partir des parents à travers les opérateurs de croisement et de mutation.

La taille de la population totale R_t est $2N$. Cette population R_t composée des parents et des enfants est ensuite classée en différents fronts de non-domination (F_1, F_2, \dots, F_n), en utilisant le concept de dominance de Pareto [53].

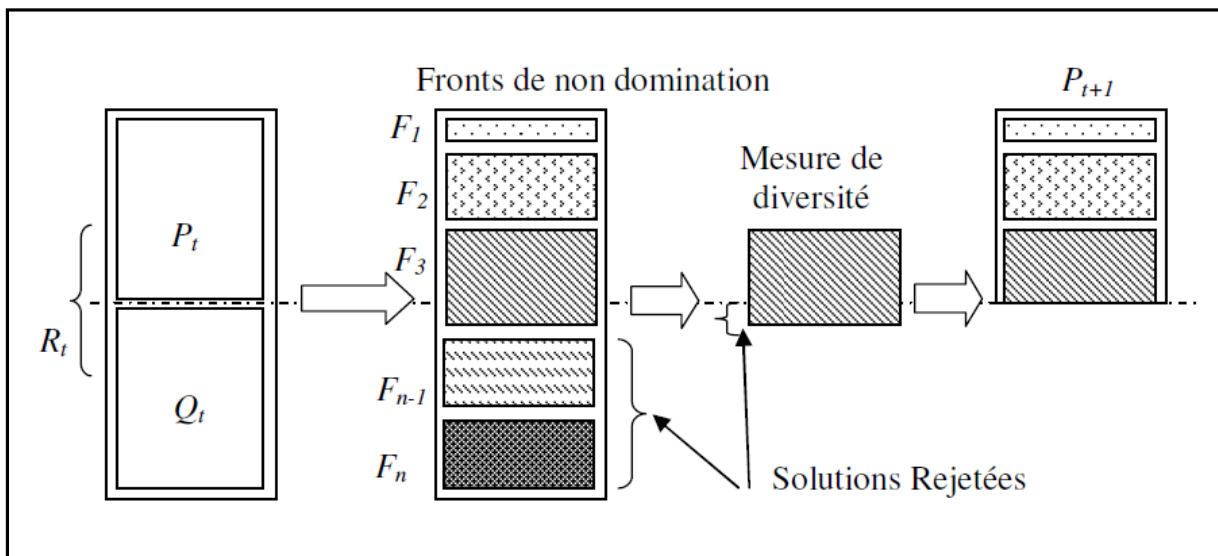


Figure IV.4 Algorithme NSGA-II [53].

Les individus faisant partie du premier front sont évidemment meilleurs que les individus du second front. Ces derniers sont à leur tour meilleurs que les individus du troisième front et ainsi de suite. L'accent est alors porté sur les meilleurs individus et donc dans ce cas, sur les individus du premier front, qui sont alors gardés dans une archive. Si le nombre d'individus de ce front est inférieur à la taille fixée N , alors tous les individus de ce front feront partie de la prochaine population P_{t+1} . Pour compléter la taille de la population P_{t+1} à N , les nouveaux membres doivent être choisis dans les fronts restants, suivant leur rang. Ainsi les membres du second front F_2 sont choisis, puis les membres de F_3 et ainsi de suite jusqu'à obtenir une nouvelle population de taille N . Si tous les membres d'un front ne peuvent entrer dans la population sans un dépassement de la taille N , alors les membres de ce front sont classés suivant une mesure de diversité qui détermine la population autour de chaque individu pris séparément. Suivant ce classement, les individus les plus isolés sont admis dans la liste de

P_{t+1} . Jusqu'à compléter la taille de celle-ci. Les individus qui ne peuvent entrer dans la population sont simplement rejetés [53].

IV.6.2 Modelés d'optimisation retenus

On a deux fonction objectifs sont les Qualité de d'usinage (III.21) et le débit de copeau (III.3) que considérons dans cette application. Les contraintes de ce problème d'optimisation sont par ailleurs liées aux limitations de production, les vibrations (III.2), la température (III.4), l'effort de coupe (III.5).

$C1$: *La vibration* : lors d'usinage, la vibration ne doit pas dépasse une valeur maximale $Arms\ max$ car la vibration provoque les défauts d'usinage.

$C2$: *La température* : lors d'usinage, La température ne doit pas dépasse une valeur maximale $T\ max$ car la pour éviter échauffement de la matrice de matériaux composites.

$C3$: *Effort de coupe* : effort de coupe ne doit pas dépasse une valeur maximale $F\ max$ pour éviter une déflexion excessive de l'outil et de la pièce et préserver la stabilité de la machine.

IV.6.3 Formulation de problème

Pour analyser la sensibilité des solutions, nous avons proposé d'examiner un cas d'optimisation multi-objectif en usinage ébauche et finition. La formulation des deux problèmes d'optimisation robustes s'écrit comme suit:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{minimiser } R_{th} \\
 \text{maximiser } Q \\
 \\
 \text{tel que} \\
 \\
 Arms \leq Arms_n \text{ max} \\
 T \leq T \text{ max} \\
 F \leq F \text{ max} \\
 \\
 659 \text{ m/min} \leq V_c \leq 2340 \text{ m/min} \\
 0.032 \text{ mm} \leq f \leq 0.368 \text{ mm} \\
 0.66 \text{ mm} \leq a_p \leq 2.34 \text{ mm}
 \end{array} \right. \quad (4.1)$$

IV.6.4 Donnée numérique

Tableau IV.1 : Valeurs des coefficients et constantes utilisées.

| | | | |
|--|------------------------------------|-----------------------------------|--|
| $V_c \text{ min} = 659 \text{ m/min}$ | $f \text{ max} = 0.368 \text{ mm}$ | $D=80\text{mm}$ | $F \text{ max} = 350 \text{ N/mm}^2$ |
| $V_c \text{ max} = 2340 \text{ m/min}$ | $a_p \text{ max}=2.34 \text{ mm}$ | $ae=40\text{mm}$ | $Arms1 \text{ max} = 214.77 \text{ m/s}^2$ $Arms2 \text{ max} = 232.78 \text{ m/s}^2$ $Arms3 \text{ max} = 279.54 \text{ m/s}^2$ |
| $f \text{ min}=0.032 \text{ mm}$ | $a_p \text{ min}=0.66 \text{ mm}$ | $K_r = \frac{\pi}{3} \text{ rad}$ | $T \text{ max} =150^\circ\text{c}$ |

Le défaut d'usinage de matériaux composite pour différent valeur de vibration

$Arms1 \text{ max}$: Usure de l'outil et Echauffement.

$Arms2 \text{ max}$: Délaminage.

$Arms3 \text{ max}$: Délaminage et Usure de l'outil.

IV.7 Résultats et discussion :

IV.1.1 Pour cas de vibration à $214,77 \text{ m/s}^2$

Trois solutions optimales du problème d'optimisation bi-objectif, minimisant la rugosité de la surface usinée et maximisant le débit copeau sous contrainte spécifique des vibrations maximales de 214.77m/s^2 , sont présentées dans le tableau ci-dessous. La première favorise la productivité avec un débit copeau de $11.26 \text{ cm}^3/\text{s}$ et néglige la qualité de la pièce produite. La

CHAPITRE IV : OPTIMISATION DES CONDITIONS DE COUPE

troisième solution favorise la qualité plutôt que la productivité avec une rugosité $0.2437\mu m$. La deuxième solution réalise un compromis entre les deux objectifs fixés.

On observe que les paramètres de coupe optimaux liés à la première solution varient de façon inverse comparée à celles de la troisième solution, cela s'explique par le fait que les deux objectifs favorisés par les deux solutions respectivement sont totalement opposés. Donc, le maximum de débit copeaux en usinage d'ébauche est obtenu avec des vitesses de coupe et d'avance maximales. Par contre, en usinage de finition c'est absolument l'inverse.

Tableau IV.2 les paramètres de coupe optimaux par $A_{rms1} = 214.77 m/s^2$.

| Les cas traités | Variable de décision | Objectif 1 : $Q \text{ cm}^3/s$ | Objectif 2 : $R_{th} \text{ } \mu m$ |
|--------------------|----------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| Première solution | $V_c = 2340 \text{ m/min}$ | 11,26 | 0,3805 |
| | $f = 0,3494 \text{ mm/tr}$ | | |
| | $a_p = 0,9736 \text{ mm}$ | | |
| Deuxième solution | $V_c = 1225 \text{ m/min}$ | 9,275 | 0,2869 |
| | $f = 0,3033 \text{ mm/tr}$ | | |
| | $a_p = 1,4546 \text{ mm}$ | | |
| Troisième solution | $V_c = 659 \text{ m/min}$ | 7,355 | 0,2437 |
| | $f = 0,2796 \text{ mm/tr}$ | | |
| | $a_p = 1,8451 \text{ mm}$ | | |

➤ Première solution pour $214,77 m/s^2$ dans l'espace de recherche faisable

On observe que la 1ere solution respecte les limitations imposées et exploite au mieux l'espace de recherche faisable d'où les vitesses de coupe et d'avance maximales. La solution est influencée par les contraintes liées aux vibrations maximales de l'outil (en bleu) et celle de l'effort de coupe maximal (en rouge).

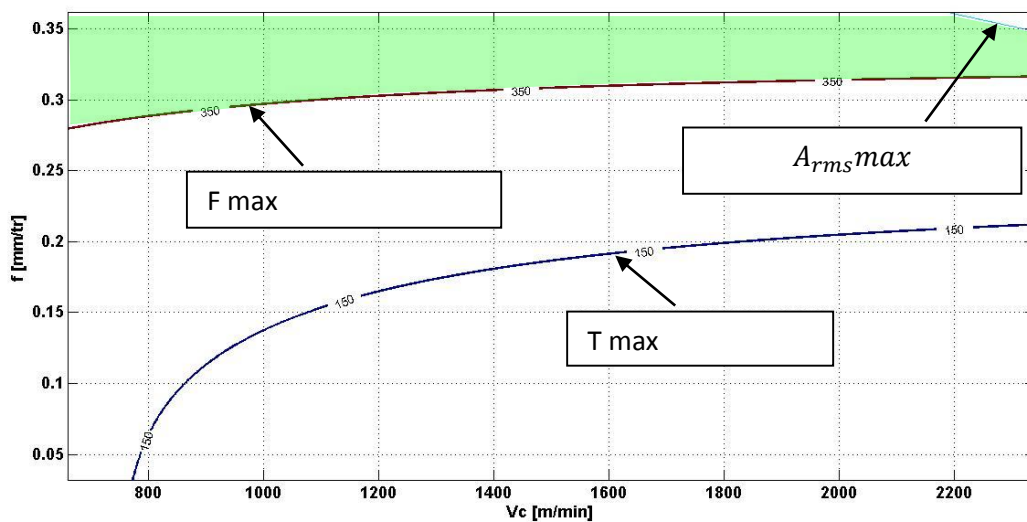


Figure IV.5 Espace de recherche faisable en vert pour $a_p = 0,9736 \text{ mm}$.

➤ Troisième solution $214,77 m/s^2$ dans l'espace de recherche faisable

On observe que la 1ere solution respecte les limitations imposées et exploite au mieux l'espace de recherche faisable d'où les vitesses de coupe et d'avance minimales. La solution

est influencée par les contraintes liées aux vibrations maximales de l'outil (en bleu) et celle de l'effort de coupe maximal (en rouge).

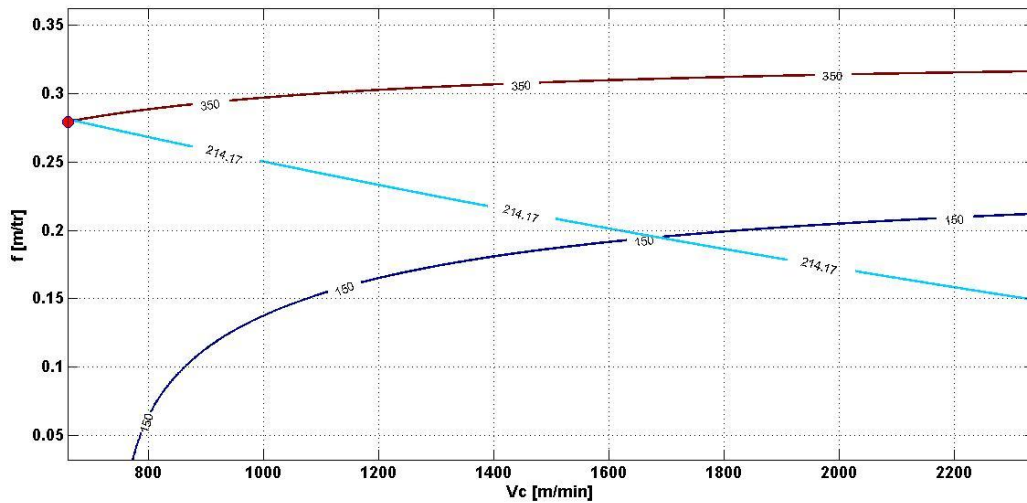


Figure IV.6 Espace de recherche faisable en vert pour $a_p = 1,8451mm$.

Pour un usinage de finition, les conditions de coupe optimales (V_c et f) dépendent seulement de la contrainte d'effort de coupe maximal (voir figure IV.7).

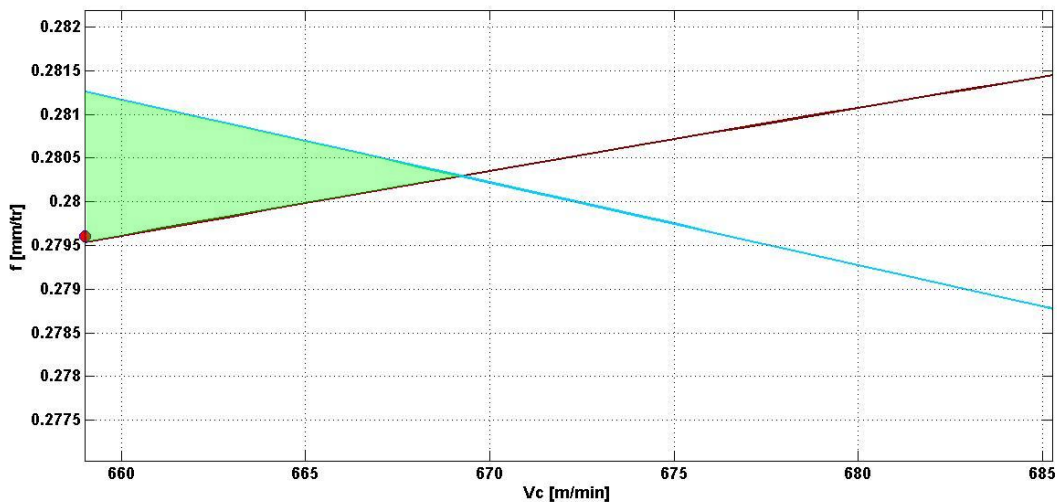


Figure IV.7 Agrandissement d'espace de recherche faisable en vert pour $a_p = 1,8451mm$.

IV.1.2 Pour cas de vibration à $232,78 m/s^2$

Trois solutions optimales du problème d'optimisation bi-objectif, minimisant la rugosité de la surface usinée et maximisant le débit copeau sous contrainte spécifique des vibrations maximales de $232,78m/s^2$, sont présentées dans le tableau ci-dessous. La première favorise la productivité avec un débit copeau de $11.84cm^3/s$ et néglige la qualité de la pièce produite. La troisième solution favorise la qualité plutôt que la productivité avec une

CHAPITRE IV : OPTIMISATION DES CONDITIONS DE COUPE

rugosité $0.2439\mu m$. La deuxième solution réalise un compromis entre les deux objectifs fixés.

On observe que les paramètres de coupe optimaux liés à la première solution varient de façon inverse comparée à celles de la troisième solution, cela s'explique par le fait que les deux objectifs favorisés par les deux solutions respectivement sont totalement opposés. Donc, le maximum de débit copeaux en usinage d'ébauche est obtenu avec des vitesses de coupe et d'avance maximales. Par contre, en usinage de finition c'est absolument l'inverse.

Tableau IV.3 les paramètres de coupe optimaux pour $Arms2 = 232.78 m/s^2$.

| Les cas | Variable de décision | Objectif 1 $Q cm^3/s$ | Objectif 2 $R_{th} \mu m$ |
|--------------------|----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Premier solution | $V_c = 2340 m/min$ | 11,85 | 0,3976 |
| | $f = 0,3572 mm/tr$ | | |
| | $a_p = 1,0552 mm$ | | |
| Deuxième solution | $V_c = 1231 m/min$ | 9,76 | 0,2877 |
| | $f = 0,3038 mm/tr$ | | |
| | $a_p = 1,596 mm$ | | |
| Troisième solution | $V_c = 659 m/min$ | 7,693 | 0,2439 |
| | $f = 0,2797 mm/tr$ | | |
| | $a_p = 2,0179 mm$ | | |

➤ Première solution pour $232,78 m/s^2$ dans l'espace de recherche faisable

On observe que la 1ere solution respecte les limitations imposées et exploite au mieux l'espace de recherche faisable d'où les vitesses de coupe et d'avance maximales. La solution est influencée par les contraintes liées aux vibrations maximales de l'outil (en bleu) et celle de l'effort de coupe maximal (en rouge).

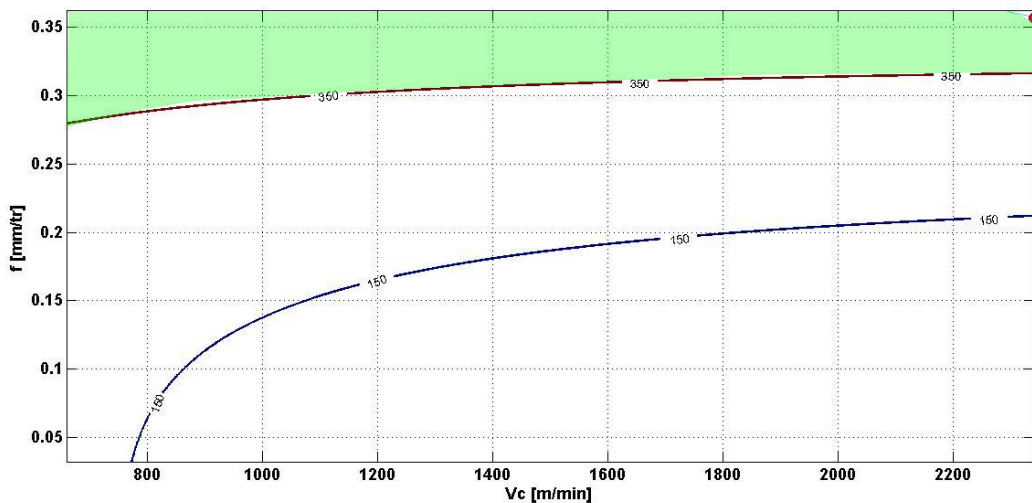


Figure IV.8 Espace de recherche faisable en vert pour $a_p = 1,0552 mm$.

➤ **Troisième solution $232,78 \text{ m/s}^2$ dans l'espace de recherche faisable**

On observe que la 1ere solution respecte les limitations imposées et exploite au mieux l'espace de recherche faisable d'où les vitesses de coupe et d'avance minimales. La solution est influencée par les contraintes liées aux vibrations maximales de l'outil (en bleu) et celle de l'effort de coupe maximal (en rouge).

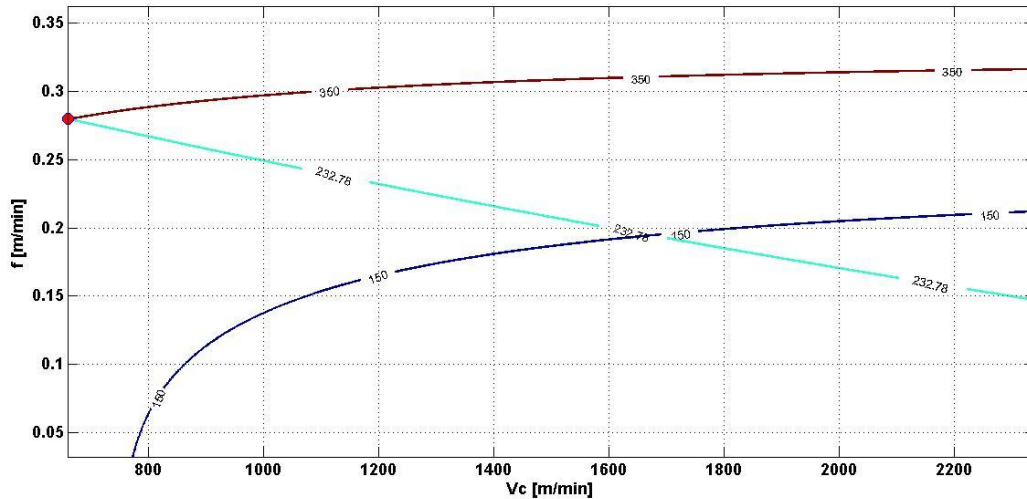


Figure IV.9 Espace de recherche faisable pour $a_p = 2,0179 \text{ mm}$.

Pour un usinage de finition, les conditions de coupe optimales (V_c et f) dépendent seulement de la contrainte d'effort de coupe maximal (voir figure IV.10).

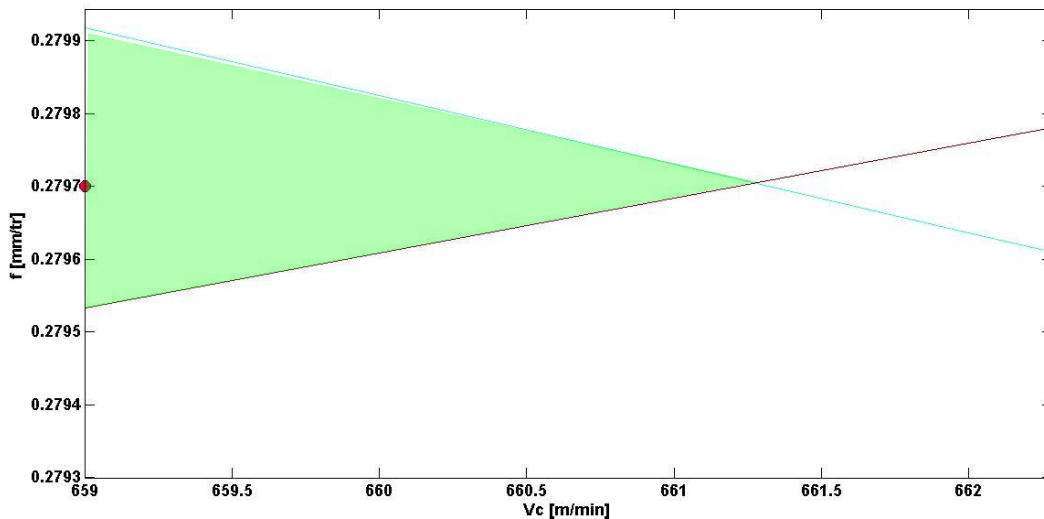


Figure IV.10 Agrandissement d'espace de recherche faisable en vert pour $a_p = 2,0179 \text{ mm}$.

IV.1.3 Pour cas de vibration à $279,54 m/s^2$

Trois solutions optimales du problème d'optimisation bi-objectif, minimisant la rugosité de la surface usinée et maximisant le débit copeau sous contrainte spécifique des vibrations maximales de $279,54m/s^2$, sont présentées dans le tableau ci-dessous. La première favorise la productivité avec un débit copeau de $13,24cm^3/s$ et néglige la qualité de la pièce produite. La troisième solution favorise la qualité plutôt que la productivité avec une rugosité $0.3438 \mu m$. La deuxième solution réalise un compromis entre les deux objectifs fixés.

On observe que les paramètres de coupe optimaux liés à la première solution varient de façon inverse comparée à celles de la troisième solution, cela s'explique par le fait que les deux objectifs favorisés par les deux solutions respectivement sont totalement opposés. Donc, le maximum de débit copeaux en usinage d'ébauche est obtenu avec des vitesses de coupe et d'avance maximales. Par contre, en usinage de finition c'est absolument l'inverse.

Tableau IV.4 les paramètres de coupe optimaux pour $Arms3 = 279.54 m/s^2$.

| Les cas | Variable de décision | Objectif 1 $Q \text{ cm}^3/s$ | Objectif 2 $R_{th} \mu m$ |
|--------------------|----------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Premier solution | $V_c = 2340 \text{ m/min}$ | 13,24 | 0,3916 |
| | $f = 0,3545 \text{ mm/tr}$ | | |
| | $a_p = 1,3272 \text{ mm}$ | | |
| Deuxième solution | $V_c = 1164 \text{ m/min}$ | 10,58 | 0,2845 |
| | $f = 0,3021 \text{ mm/tr}$ | | |
| | $a_p = 1,9819 \text{ mm}$ | | |
| Troisième solution | $V_c = 659 \text{ m/min}$ | 8,285 | 0,2438 |
| | $f = 0,2796 \text{ mm/tr}$ | | |
| | $a_p = 2,3400 \text{ mm}$ | | |

➤ **Premier solution pour $279,54 m/s^2$ dans l'espace de recherche faisable**

On observe que la 1ere solution respecte les limitations imposées et exploite au mieux l'espace de recherche faisable d'où les vitesses de coupe et d'avance maximales. La solution est influencée par les contraintes liées aux vibrations maximales de l'outil (en jaune) et celle de l'effort de coupe maximal (en rouge).

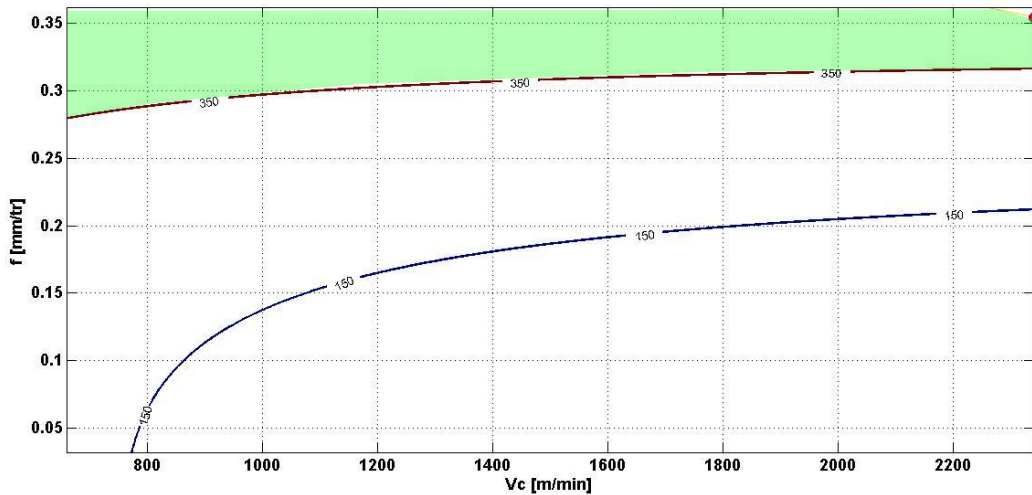


Figure IV.11 Espace de recherche faisable en vert pour $a_p = 1,3272 \text{ mm}$.

➤ **Troisième solution $279,54 \text{ m/s}^2$ dans l'espace de recherche faisable**

On observe que la 1ere solution respecte les limitations imposées et exploite au mieux l'espace de recherche faisable d'où les vitesses de coupe et d'avance minimales. La solution est influencée par les contraintes liées aux vibrations maximales de l'outil (en jaune) et celle de l'effort de coupe maximal (en rouge).

Pour un usinage de finition, les conditions de coupe optimales (V_c et f) dépendent seulement de la contrainte d'effort de coupe maximal (voir figure IV.12).

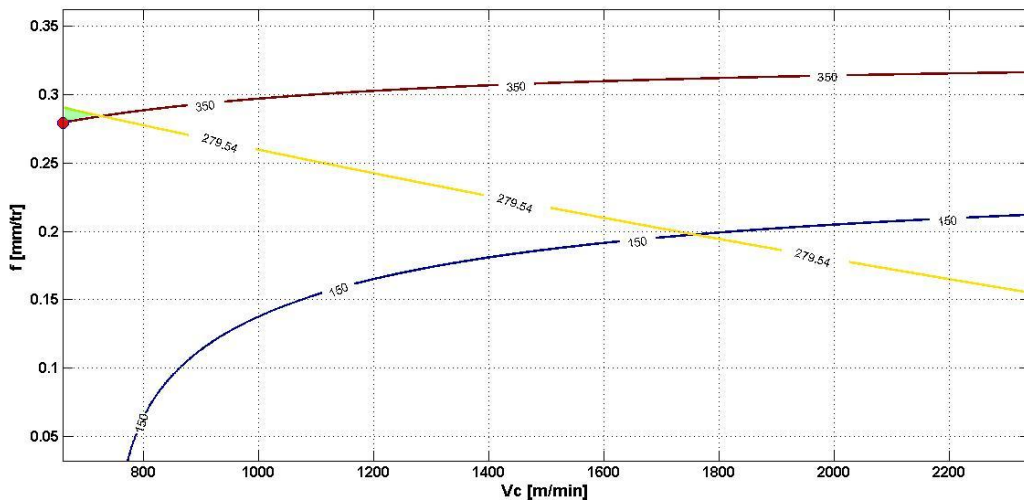


Figure IV.12 Espace de recherche faisable en vert pour $a_p = 2,3400 \text{ mm}$.

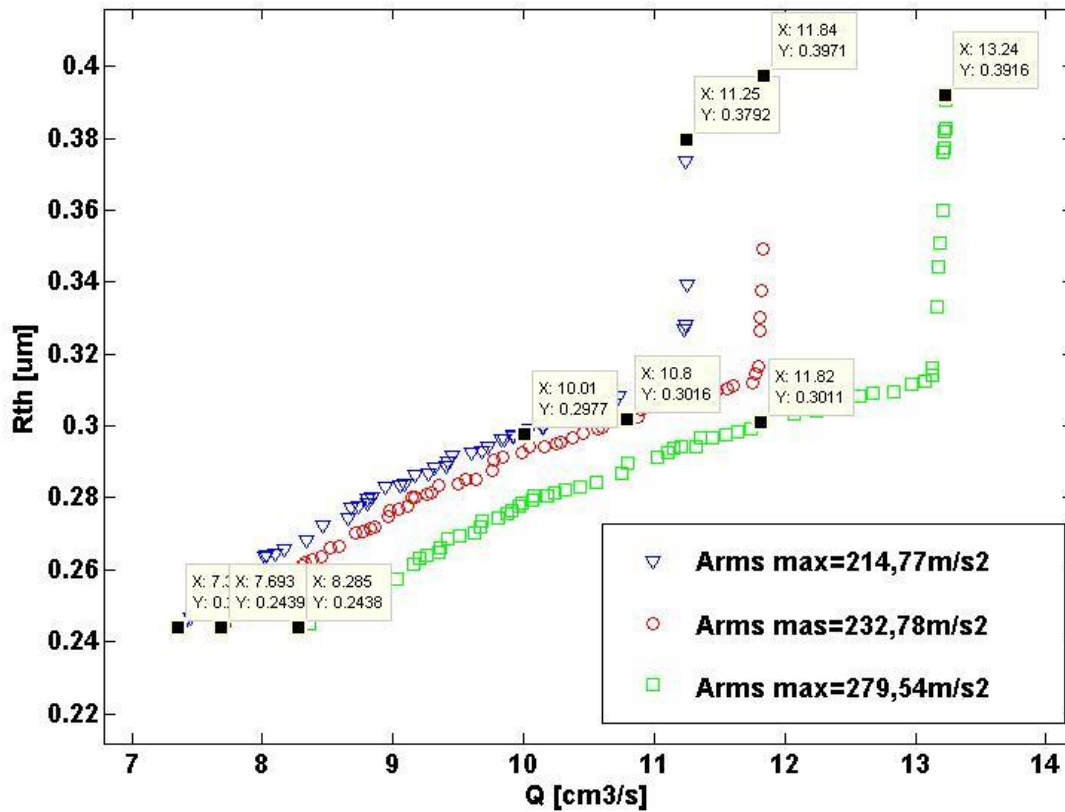


Figure IV.13 Les solutions non dominée de front de Pareto.

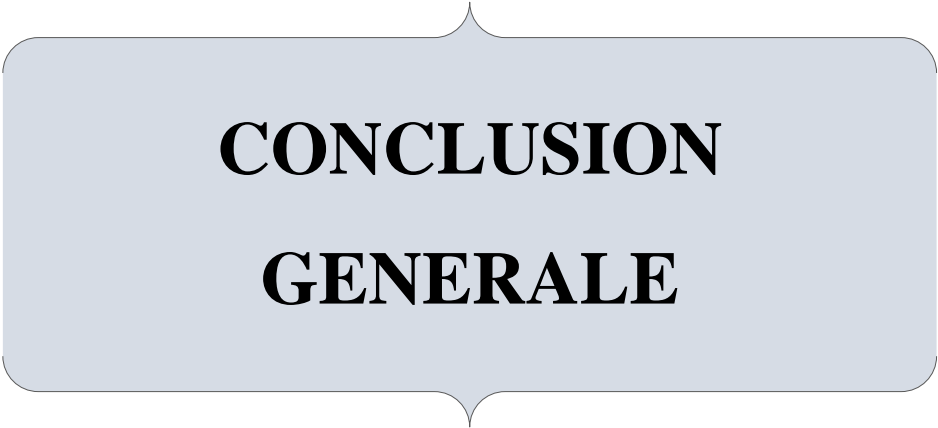
En ébauche plus les restrictions sur les vibrations du triplet pièce-outil-machine sont sévères (réduites), plus le débit copeau obtenu est réduit.

Par contre le maximum est assuré avec des limitations moins sévère et donc au détriment de la qualité (apparition de défaut : Usure de l'outil, Echauffement et Délaminage).

Dans le cas d'usinage en finition les vibrations influent un peu sur la rugosité de la surface usinée contrairement en cas d'ébauche

IV.8 Conclusion

Le problème d'optimisation des conditions d'usinage en général est un problème d'optimisation très difficile à résoudre. Les modèles utilisés se regroupent principalement parmi les problèmes de satisfaction de contraintes, ces modèles demandent tous deux méthodes de solution rigoureuses. Parmi les méthodes utilisées pour la résolution des problèmes d'optimisation combinatoire on note l'algorithme génétique NSGA II avec le quel on a traité notre problème dans ce chapitre.



**CONCLUSION
GENERALE**

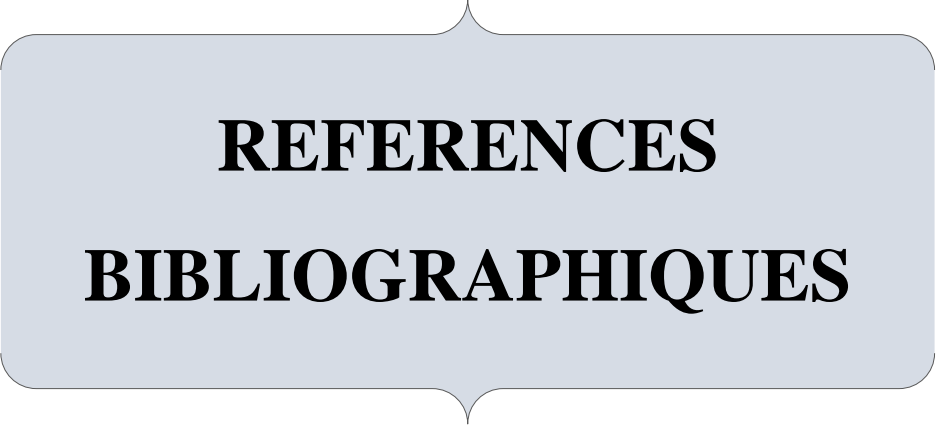
Conclusion Générale :

Après une synthèse bibliographique des travaux de recherche antérieurs traitant le sujet, nous y sommes référés aux modèles empiriques issus de la méthodologie des plans d'expériences. L'objectif de ce travail réside dans l'optimisation et le choix de paramètres de coupe lors de l'usinage d'un matériau composite (T800S/M21).

Les principales performances d'usinage prises en compte dans la formulation du problème d'optimisation sont :

- l'état de surface obtenu sur la pièce (la rugosité de surface) ;
- les efforts de coupe et la température de coupe
- les vibrations de l'outil et la pièce ;
- la productivité (le débit et le volume copeau) ;
- l'absence de défaut de surface (le délaminage dans le cas d'un matériau composite).

Ainsi, le but est de fournir à aux utilisateurs de machines-outils un nouvel outil d'aide à la décision dans le choix des conditions de coupe de façon intelligente, simple et efficace, à partir de modèles de surface de réponse moins couteux et en optimisant les intérêts souhaités avec des techniques facile a mettre œuvre. Dans notre cas, la l'optimisation de l'état de surface des pièces usinées en finition et de la productivité en ébauche sous différentes limitations des vibrations inhérents aux défauts d'usinage des matériaux composites, a permis de sélectionner des conditions de coupe diverses et variées, favorisant ainsi a posteriori l'objectif ou la performance désirée. Les critères pouvant permettre d'évaluer une opération d'usinages ont nombreux et dépendent non seulement du type d'opération, mais aussi de l'objectif lié à cette opération (ébauche ou finition). L'étude a mis en exergue l'influence des vibrations sur les solutions optimales notamment en usinage d'ébauche et de finition. En effet, en usinage de finition, les vibrations de l'ensemble pièce-outil-machine n'ont pas d'influence significative sur les solutions obtenues bien que les défauts sur la pièce usinée, tel que le délaminage..., soit présents. Cela montre la nécessité de la prise en compte des vibrations comme un critère, avec la rugosité de la surface, dans l'optimisation de la qualité des pièces lors du fraisage de matériaux composites.



REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIE

Reference Bibliographique :

- [1] **M. Benglia**, «*Sélection Optimale des Conditions Coupe d'Opération de Tournage à Passe Multiple*», Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2014.
- [2] **Fousseny KONÉ**, «*Étude expérimentale, modélisation et simulation numérique de l'usinage à sec des aciers inoxydables : Étude de l'effet des revêtements mono et multi couches* ».Thèse de doctorat, Université de Lorraine 2012.
- [3] **B.Vieille**, «*usinage, méthodes et fabrication*», conservatoire national des arts et métiers, production automatisée <http://bertrandvieille.free.fr/downloads/Poly-usinage.pdf> , consulté le 18/03/2018.
- [4] **M.Kagnaya**, «*Contribution a L'identification des Mécanisme D'usure D'un WC6%Co En Usinage Et par Une Approche Tribologique Et Thermique*», Thèse de Doctorat, L'école Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2009.
- [5] **A. Passeron**, «*Tournage Techniques de L'ingénieur*», Traité Génie mécanique, BM 7086, P27.1998
- [6] **TEBIB Asma**, «*Surveillance de la Température de Coupe Pendant le Tournage de l'Acier AISI 1060 en Utilisant la Logique Floue*», mémoire de master professionnel, université de kasdi merbah Ouargla, mai 2017.
- [7] **AURELIEN Maurel-Pantel**, «*Etude expérimentale et modélisation par éléments finis du procédé de fraisage : Applications a l'identification paramétrique des lois de comportement* », Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, septembre 2009.
- [8] **DEBBACHE Abdellatif, BENGLIA Mohammed Bakar**, «*Optimisation Multi-Passe des Régimes de Coupe En Charriotage* ».Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla. juin 2011.
- [9] **BELHAMRA.N**, «*Réalisations et Caractérisations de Revêtements Durs à Base de Nitrures et de Carbures : Applications à l'Usinage des Métaux* », Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2014.
- [10] **CHIBANE Hicham**, «*Contribution à l'optimisation multi-objectif des paramètres de coupe en usinage et apport de l'analyse vibratoire Application aux matériaux métalliques et composites*». Thèse de Doctorat, Université François - Rabelais de Tours, avril 2013.

BIBLIOGRAPHIE

- [11] **HIMED.L.**, «*Modélisation et simulation de la coupe orthogonale en utilisant un code de calcul par la méthode des éléments finis* ». Thèse de magistère, Université de Batna.2009.
- [12] **BENTERKI Smail**, «*Etude de la diffusion par réflexion de la lumière par un pare-brise d'automobile érodé par sablage*», thèse de doctorat, université Ferhat Abbas – Sétif -1, février 2015.
- [13] **H. Rothe, D. Hüser, A. Kasper and T. Rinder**, «*RIvestigations of smouth surfaces by measuring the BRDF with a stray light sensor in comparison with PSD curves evaluated from topography of large AFM scans*», SPIE. 3619, 1999, pp 111-121.
- [14] **BELHADI Salim**, «*étude de l'usinage des aciers traites lors du tournage avec des matériaux de coupe de haute technologie : étude expérimentale de la formation du copeau*», Thèse Doctorat, université badji Mokhtar Annaba, 2009.
- [15] **Gael Le Coz**. «*Usinage de l'Inconel 718 : Intégrité de surface, mesure de température et modèle analytique du fraisage périphérique*». Thèse de doctorat, Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université de Lorraine, 2012.
- [16] **Marc Marzano, Pascal Celle**, *Les matériaux composites, ANFA / Édition 2014.*
- [17] **Toufik ACHOUR**, «*Étude Des Techniques De Réparation Des Structures Composites Endommagées*», Mémoire de Magister, université mentouri Constantine, 2011.
- [18] **Laurence POUSSINES**, «*Développement de nouveaux matériaux pour l'infusion de composites*», thèse de doctorat, université de Toulouse, 2012.
- [19] **El Hadji Babacar LY**, «*Nouveaux matériaux composites thermoformables à base de fibres de cellulose*», thèse de doctorat, institut national polytechnique de grenoble, 2008.
- [20] **Gornet L.**, «*Généralités sur les matériaux composites*», cel-00470296, version 1, 2010.
- [21] **Laarej Merad**, «*Etude par spectroscopie raman et modelisation d'une resine composite rtm*», thèse de doctorat, Université Abou Bakr BELKAID de Tlemcen, 2010.
- [22] **Nadine Bourgeois**, «*Caractérisation et modélisation micromécanique du comportement et de l'endommagement d'un composite à matrice métallique : Al/SiCp*», thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, 1993.

BIBLIOGRAPHIE

- [23] **Berthelot J.-M. et Christensen**, « *Matériaux composites chapitre 4 Homogénéisation des matériaux composites poreux* », Presses de l'Ecole National des Ponts et Chaussées Paris, 1992.
- [24] **Binse P**, « *Fabrication de profilés en composites par pultrusion* », Techniques de l'Ingénieur, 1995.
- [25] **Saber BENFERDI**, « *caractérisation du comportement micromécanique d'un matériau composite par différentes approches mathématiques* », mémoire de magister, université de Mentouri Constantine, 2010.
- [26] **Degamber B., Fernando G.F.**, « *Fibre Optic Dilato-spectroscopic Sensor : Simultaneous Thermal, and Physical Analysis of Materials* », Smart Materials Structures, vol. 15, 2006, pp. 1054-1062.
- [27] **Rui Pedro Carreira, DECATHLON**, « *Les matériaux composites dans l'industrie des sports et loisirs* », Congrès RFIS, juin 2005.
- [28] **Aude BOUDELIER – CAILLAUD**, « *Modélisation et optimisation des opérations de parachèvement de pièces en matériaux composites* », thèse de doctorat, université de NANTES, École Doctorale SPIGA, 2011.
- [29] **Dachraoui M**, « *introduction à la norme ISO/CEI 17025 et guide de validation des méthodes d'analyse : tests statistiques et méthode du profil d'exactitude* », Centre de publication universitaire, 2012.
- [30] **GOUPY Jacques**, « *introduction aux plans d'expériences* », Dunod, Paris, 2001.
- [31] **D. Mathieu, R. Phan-Tan-Luu**, « *Approche méthodologique des surfaces de réponses, pp 211-278, dans Plans d'expériences, Applications à l'entreprise, J. J. Driesbeke, J.Fine, G.Saporta* », éditions Technip, Paris, 1997.
- [32] **Sandrine KARAM** « *Application de la méthodologie des plans d'expériences et de l'analyse de données à l'optimisation des processus de dépôt* », Thèse de doctorat, Université de Limoges, ECOLE DOCTORALE Science – Technologie – Santé ,2004.
- [33] **Schimmerling, P., Sisson, J. C., & Zaïdi, A.** « *Pratique des plans d'expériences* », Technique & Documentation, 1998.

BIBLIOGRAPHIE

- [34] **SAHALI Mohand Akli**, «*Évaluation des effets des paramètres du tournage: modélisation et optimisation multi-objectifs basées sur des méthodes de soft computing – stratégies et précision*», Thèse de Doctorat, Université M'hamed Bougara – Boumerdes, 2016.
- [35] **Ross, P. J.**, «*Taguchi techniques for quality engineering* », New York: McGraw-Hill.1998.
- [36] **Unal, R., & Dean, E. B.**, «Taguchi approach to design optimization for quality and cost: An overview», Annual conference of the international society of parameter analysis (pp. 1–9),1991.
- [37] **Taguchi, G., & Taguchi, G.**, «*System of experimental design; engineering methods to optimize quality and minimize costs*», (No. 04; QA279, T3.),1987.
- [38] **Koehler, J. R., & Owen, A. B.**, «*9 Computer experiments. Design and Analysis of Experiments*», 261–308. doi: 10.1016/s0169-7161(96)13011-x, 1996.
- [39] **Yang, W. H., & Tarng, Y. S.**, «*Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method*», Journal of Materials Processing Technology, 84(1-3), 122–129. doi:10.1016/s0924-0136(98)00079-x,1998.
- [40] **Nalbant, M., Gökkaya, H., & Sur, G.**, «*Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning*», Materials & Design, 28(4), 1379–1385. doi:10.1016/j.matdes.2006.01.008.2007.
- [41] **Camposeco-Negrete, C.,Calderón-Nájera, J., & Miranda-Valenzuela, J. C.**, «*Optimization of Cutting Parameters in Turning of AISI 1018 Steel With Constant Material Removal Rate Using Robust Design for Minimizing Cutting Power*», Volume 2B: Advanced Manufacturing. doi:10.1115/imece2013-62520,2013.
- [42] **LUC PARENT**, «*modélisation et optimisation de la performance des systèmes de production par usinage* », Mémoire de Magister, Université Du Québec, École De Technologie Supérieure, 2007.
- [43] **C. Barlier, L. Girardin**, «*Mémotech ; productique matériaux et usinage* », 1995.
- [44] **BERGHIDA RIAD**, «*Impact de la signature des outils de coupe sur la variation de la géométrie des pièces mécaniques*», Mémoire de Magister, Université Mentouri – Constantine, 2006.

BIBLIOGRAPHIE

- [45] **V. Th. Paschos**, «*Optimisation combinatoire : concepts fondamentaux*», Hermès science publication, pp. 17-60, Lavoisier, 2005.
- [46] **Yann Collette - Patrick Siarry**, «*Optimisation multi objectif* », Livre, 2002.
- [47] **Mohamed DJENNANE**, «*Optimisation de l'usinage multi passes et multi stage par la méthode du simplexe et la méthode des algorithmes génétiques*», thèse de doctorat, UNIVERSITE DE BATNA 2, 2017.
- [48] **MERDJAOUI Brahim**, «*optimisation multi-objectif par algorithme génétique et approche pareto des paramètres d'usinage sous contraintes des limitations de production*», Mémoire de magister, Université m'Hamed bougara boumerdes, 2006.
- [49] **ETSINDA MPIGA, Félicia**, «*nouvelle approche hybride d'optimisation multi objective basée sur la méthode des surfaces de réponse et le système de colonies de fourmis* », Mémoire Présenté A L'école De Technologie Supérieure, Université Du Québec, 2008.
- [50] **LABED SAID**, «*Méthodes bio-inspirées hybrides pour la résolution de problèmes complexes*», Thèse Doctorat en Sciences en Informatique, Université Constantine 2, 2013.
- [51] **A. Hazem & G. Janice, Swarm Intelligence**, «*Concepts, Models and Applications*», Technical report 2012-585, School of Computing, Queen's University, Canada, 2012.
- [52] **Walid TFAILI**, «*Conception d'un algorithme de colonie de fourmis pour l'optimisation continue dynamique*», Thèse Doctorat, L'université Paris 12-Val De Marne, 2007.
- [53] **DIPAMA Jean**, «*optimisation multi-objectif des systèmes énergétiques*», thèse de doctorat, École Polytechnique De Montréal, Université De Montréal, 2010.

ANNEXE

Annexe I :

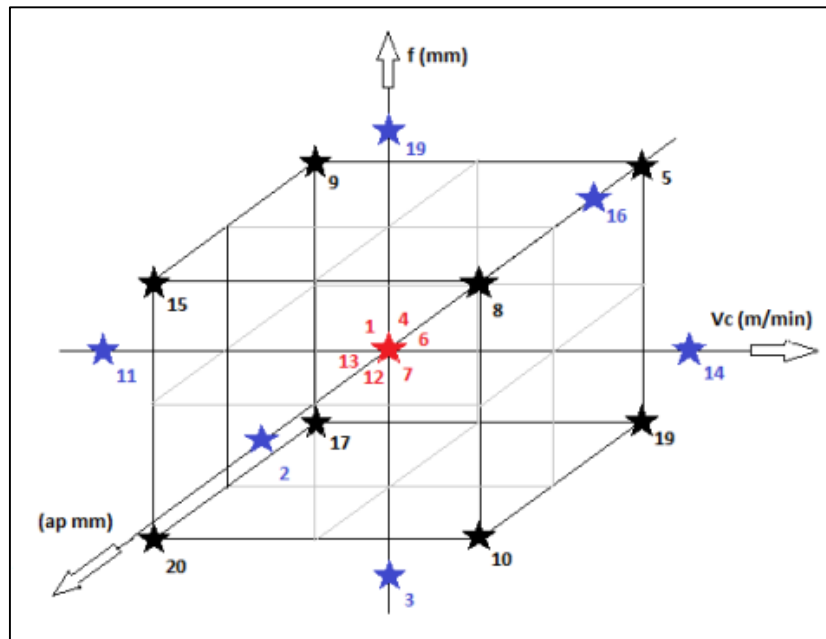


Figure A.1 Plan d'expérience composite centre [10].

Annexe II :

Tableau de mesures et observations[10].

| Essais | V_c m/min | f mm | a_p mm | A_{rms} m/s ² | Observations |
|-----------|-------------|--------------|-------------|----------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 1500 | 0,2 | 1,5 | 129,56 | RAS |
| 2 | 1500 | 0,2 | 2,34 | 232,78 | Dé laminage |
| 3 | 1500 | 0,032 | 1,5 | 56,14 | RAS |
| 4 | 1500 | 0,2 | 1,5 | 142,24 | RAS |
| 5 | 2000 | 0,3 | 1 | 124,07 | RAS |
| 6 | 1500 | 0,2 | 1,5 | 128,50 | RAS |
| 7 | 1500 | 0,2 | 1,5 | 16,47 | RAS |
| 8 | 2000 | 0,3 | 2 | 279,54 | Dé laminage+ Usure de l'outil |
| 9 | 1000 | 0,3 | 1 | 124,84 | RAS |
| 10 | 2000 | 0,1 | 2 | 122,05 | RAS |
| 11 | 659 | 0,2 | 1,5 | 128,11 | RAS |
| 12 | 1500 | 0,2 | 1,5 | 127,97 | RAS |
| 13 | 1500 | 0,2 | 1,5 | 150,47 | RAS |
| 14 | 2340 | 0,2 | 1,5 | 157,91 | RAS |
| 15 | 1000 | 0,3 | 2 | 214,77 | Usure de l'outil+Echauffement |
| 16 | 1500 | 0,2 | 0,66 | 78,51 | RAS |
| 17 | 1000 | 0,1 | 1 | 47,34 | RAS |
| 18 | 2000 | 0,1 | 1 | 65,34 | RAS |
| 19 | 1500 | 0,368 | 1,5 | 241,17 | Dé laminage |
| 20 | 1000 | 0,1 | 2 | 108,23 | RAS |

Annexe III :

Les pseudo-codes ci-dessous explicitent l'implémentation sous Matlab™ par les fonctions « fitness » de l'algorithme NSGA-II, pour les problèmes d'optimisation en fraisage d'ébauche et de finition, Pour trois défèrent contrainte de vibration.

- Pour $Arms1\ max = 214.77\ m/s^2$

```
function [y,cons] = TP_objfun_with_MC(x)
% Objective function : Test problem 'TNK'.
%*****
D=80;
ae=40;
Kr=(pi/3);
y = [0,0];
cons = [0,0,0];

%objectives

y(1)=- (sqrt((x(3)*x(2)*x(1)*ae*1)/(pi*D)));%l'équation de débit copeaux;

y(2)=125*((x(2))^2)/((D/2)+((x(2)*1)/pi)) ;%l'équation de l'état de
surface;

%constraints

c =(62.185-(0.018*x(1))-(80.999*x(2))-(
49.112*x(3)))+(5.368*(x(2))^2)+(10.124*(x(3))^2)+(46.255*x(3)*x(2))+(0.080*
x(1)*x(2))+(0.031*x(1)*x(3))+(319.541*x(2)*x(3))-214.77;%l'equation de
vibration;

if(c>0)
    cons(1) = abs(c);
end

c =((17.43)+(0.22*x(1))+(734.13*x(2)*sin(Kr))-(1301.45*(x(2)*sin(Kr))^2)-
(1.02*x(1)*x(2)*sin(Kr)))-150;%l'équation de température;

if(c>0)
    Cons(2) = abs(c);
end
c =(516.12+(0.94*x(1))-(2151.78*x(2)*sin(Kr))+(4438.76*(x(2)*sin(Kr))^2)-
(3.29*x(1)*x(2)*sin(Kr)))-350;%l'équation de l'effort de coupe;

if(c>0)
    cons(3) = abs(c);
end

end
```

- Pour $Arms2_{max} = 232.78 \text{ m/s}^2$

```

function [y,cons] = TP_objfun_with_MC(x)
% Objective function : Test problem 'TNK'.
%*****
D=80;
ae=40;
Kr=(pi/3);
y = [0,0];
cons = [0,0,0];

%objectives

y(1)=- (sqrt((x(3)*x(2)*x(1)*ae*1)/(pi*D)));%l'équation de débit copeaux;

y(2)=125*((x(2))^2)/((D/2)+((x(2)*1)/pi)) ;%l'équation de l'état de
surface;

%constraints

c =(62.185-(0.018*x(1))-(80.999*x(2))-(
49.112*x(3))+5.368*(x(2))^2+(10.124*(x(3))^2)+(46.255*x(3)*x(2))+(0.080*
x(1)*x(2))+(0.031*x(1)*x(3))+(319.541*x(2)*x(3)))-232.78;%l'equation de
vibration;
if(c>0)
cons(1) = abs(c);
end

c =((17.43)+(0.22*x(1)))+(734.13*x(2)*sin(Kr))-(1301.45*(x(2)*sin(Kr))^2)-
(1.02*x(1)*x(2)*sin(Kr))-150;%l'equation de temperature;
if(c>0)
cons(2) = abs(c);
end

c =(516.12+(0.94*x(1))-(2151.78*x(2)*sin(Kr))+(4438.76*(x(2)*sin(Kr))^2)-
(3.29*x(1)*x(2)*sin(Kr)))-350;%l'equation de l'effort de coupe;
if(c>0)
cons(3) = abs(c);
end

end

```

- Pour $Arms3 \max = 279.54 \text{ m/s}^2$

```

function [y,cons] = TP_objfun_with_MC(x)
% Objective function : Test problem 'TNK'.
%*****
**
D=80;
ae=40;
Kr=(pi/3);
y = [0,0];
cons = [0,0,0];

%objectives

y(1)=- (sqrt((x(3)*x(2)*x(1)*ae*1)/(pi*D)));%l'équation de débit copeaux;

y(2)=125*((x(2))^2)/((D/2)+((x(2)*1)/pi)) ;%l'équation de l'état de
surface;

%constraints

c = (62.185-(0.018*x(1))-(80.999*x(2))-
(49.112*x(3))+5.368*(x(2))^2+(10.124*(x(3))^2)+(46.255*x(3)*x(2))+(0.080*
x(1)*x(2))+(0.031*x(1)*x(3))+(319.541*x(2)*x(3)))-279.54;%l'equation de
vibration;

if(c>0)
cons(1) = abs(c);
end
c = ((17.43)+(0.22*x(1))+(734.13*x(2)*sin(Kr))-(1301.45*(x(2)*sin(Kr))^2)-
(1.02*x(1)*x(2)*sin(Kr)))-150;%l'equation de température;

if(c>0)
cons(2) = abs(c);
end
c = (516.12+(0.94*x(1))-(2151.78*x(2)*sin(Kr))+(4438.76*(x(2)*sin(Kr))^2)-
(3.29*x(1)*x(2)*sin(Kr)))-350;%l'equation de l'effort de coupe;

if(c>0)
cons(3) = abs(c);
end

end

```

Annexe IV :**Implémentation sous Matlab™ :**

```

%*****
% Test Problem : 'TP_KUR_objfun'
% Description:unconstrained bi-objectives problem
%
%*****

options = nsgaopt();                                % create default options structure
options.vartype = [1 1 1];                          % populaion size
options.popsize = 70;                                % max generation
options.maxGen = 400;                                % number of objectives
options.numObj = 2;                                  % number of design variables
options.numVar = 3;                                  % number of constraints
options.numCons = 3;                                 % lower bound of x
options.lb = [659 0.032 0.66];                       % upper bound of x
options.ub = [2340 0.368 2.34];                       % objective function handle
options.objfun = @TP_objfun_with_MC;                 % interval between two calls of
options.plotInterval = 2;                             "plotnsga".
result = nsga2(options);                              % begin the optimization!

```


Résumé :

Dans ce travail nous cherchons à déterminer les effets des paramètres de coupe à savoir ; la profondeur de passe, la vitesse de coupe et la vitesse d'avance, sur les performances de l'usinage d'un matériau composite carbone/époxy (T800/M21), dans le but de déterminer les conditions opératoires conduisant à une qualité et une productivité élevées. Pour se faire, nous avons recensé à travers une recherche bibliographique approfondie divers modèles empiriques, obtenus par la méthodologie des plans d'expériences, reliant les variables de décisions aux performances d'usinage citées précédemment, Puis, nous avons formulé mathématiquement un cas d'optimisation bi-objectifs en usinage d'ébauche et de finition avec des restrictions pratiques. Dans le cas d'application traité, la formulation vise à maximiser la qualité de la surface usinée et maximiser le débit de copeau sous limitation des vibrations du système usinant, des températures et d'efforts de coupe. Trois cas sont étudiés avec différents niveaux de vibrations maximaux, cherchant l'influence de celle-ci sur les solutions optimales. L'algorithme génétique NSGA-II, implémenté sous MATLAB™, a permis de résoudre le problème d'optimisation efficacement et de présenter diverses solutions possibles au problème posé sous forme de front de Pareto.

Mots clés: usinage, matériaux composites, modélisation, optimisation, algorithme génétique, qualité, productivité.

Abstract :

In this work we seek to determine the effects of cutting parameters namely; the depth of pass, the cutting speed and the feed rate, on the machining performance of a carbon / epoxy composite material (T800 / M21), in order to determine the operating conditions leading to a quality and high productivity. To do this, we have identified, through an extensive literature search, various empirical models, obtained by the experimental design methodology, linking the decision variables to the machining performances mentioned above. Then, we mathematically formulated a case of bi-objective optimization in roughing and finishing machining with practical restrictions. In the case of treated application, the formulation aims to maximize the quality of the machined surface and maximize the chip flow under a limited vibrations of the machining system, temperatures and cutting forces. Three cases are studied with different levels of maximum vibrations, seeking the influence of this one on the optimal solutions. The NSGA-II genetic algorithm, implemented under MATLAB™, solved the problem of optimization effectively and presented various possible solutions to the problems posed in the form of a Pareto front.

Key words: machining, composite materials, modeling, optimization, genetic algorithm, quality, productivity.