



**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE MECANIQUE**  
**LABORATOIRE DE STRUCTURES**

Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du Diplôme de Master en  
Fabrication mécanique et productique

**Thème :**  
**Simulation par la méthode des plans d'expérience d'une  
opération de fraisage**

Encadré par :  
Mr. Temmar Mustapha

Réalisé par :  
Mr: Ait Larbi Mohand Oulhocine  
Mr: Ikhlef Yacine

Année universitaire 2021/2022



# Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du Département de Mécanique de l'Université Saad Dahlab de Blida 1.

Selon la tradition, et à travers cette page de remerciements, nous tenons à saluer toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la concrétisation de ce travail.

Nous voudrions tout d'abord remercier les membres du jury pour leur précieux temps accordé à la lecture et à la critique de ce travail.

Nous remercions tous nos enseignants du Département de mécanique.

Nous sommes très reconnaissants à Monsieur Temmar et pour nous avoir dirigés tout au long de ce travail. Nous lui présentons également nos plus sincères gratitude pour la confiance et la sympathie qu'ils nous ont témoignés au cours de ces mois de travail.

## *Dédicaces*



- ✚ Ce travail est dédié tout particulièrement aux personnes qui nous sont les plus chères au monde :

**A nos très chers parents pour leur patience, soutien et confiance,**

- ✚ **Nos mères** qui n'ont pas cessé de prier pour nous, de nous encourager et de nous soutenir tout au long de notre formation,
- ✚ **Nos pères** qui se sont sacrifiés afin que rien n'entrave le déroulement de nos études,
- ✚ Ce travail est aussi dédié également à nos **sœurs et à nos frères** à tous les membres de nos **familles**,
- ✚ Bien sûr à nos **amis et collègues** de notre promotion sortante.

## Introduction Générale

Les pièces mécaniques (appareils, machines,...) sont obtenues par plusieurs procédés : moulage, assemblage, formage (laminage, forgeage, estampage, ...) ou usinage (coupe des métaux). L'usinage par enlèvement de matière permet d'élaborer des pièces mécaniques finies.

L'outil de coupe enlève de la surépaisseur pour générer une nouvelle surface. Cette coupe est influencée principalement par les propriétés du matériau de la pièce à usiner, la géométrie de l'outil de coupe, les conditions de coupe, les conditions de lubrification et les paramètres dynamiques (raideur, amortissement) du système usinant.

Pour bien comprendre ce phénomène, nous nous sommes intéressés à étudier une opération du procédé de fraisage sur une pièce de matière XC 45 et l'étude de l'influence des phénomènes induits lors de cette opération.

Aussi, il est recommandé de déterminer les paramètres de coupe conditionnés par deux paramètres : la géométrie de l'outil de coupe et l'avance de l'outil de coupe. Les résultats obtenus vont nous permettre de les simuler à travers l'application de la méthode des plans d'expérience.

Notre travail, simulation par la méthode des plans d'expérience d'une opération de fraisage, va nous permettre de prendre un exemple d'une des opérations de fraisage à savoir le dressage et d'étudier le phénomène de paramètres de coupe.

Notre travail se divise en quatre chapitres :

Dans le chapitre I, une recherche bibliographique introduira les notions nécessaires sur l'usinage en général.

Le chapitre II sera consacré au procédé de fraisage, les différentes machines-outils, les différents mouvements, les différentes opérations et autres.

Le chapitre III présentera les paramètres de coupe ainsi que les résultats expérimentaux.

Le chapitre IV sera consacré à l'utilisation des plans d'expériences. Il s'agira de simuler une opération de coupe et de déterminer leurs valeurs expérimentales. Le programme sera réalisé et simulé à l'aide du logiciel des plans d'expérience. Ce démonstrateur permet de valider le modèle appliqué.

La dernière partie, à savoir la conclusion générale, présentera les résultats obtenus tout au long de notre travail.

# **CHAPITRE I : Généralités sur la coupe des métaux**

## **I.1/ GENERALITES :**

L'usinage par enlèvement de matière est la principale technique utilisée dans la production des pièces mécaniques pour l'industrie automobile, aéronautique, ferroviaire etc.

L'introduction de nouvelles générations de machines travaillant à grande vitesse de coupe et à grande vitesse d'avance, le développement de nouveaux outils et la nécessité d'une plus grande productivité associée à une meilleure qualité des produits élaborés nécessitent une connaissance approfondie des processus d'usinage [1]. De mauvais choix des conditions de coupe peuvent provoquer, lors de l'usinage, des vibrations de l'outil, se transmettant au porte-outil et à la machine. Ces vibrations constituent un obstacle majeur pour la recherche d'une plus grande productivité et d'une meilleure qualité des pièces réalisées.

## **I.2/ EVOLUTION DU MATERIEL D'USINAGE :**

Jusqu'en 1850, les outils à main sont presque exclusivement employés par les artisans (menuisiers, forgeron, ajusteur,...). L'ouvrier prépare l'outil et parfois le conçoit, il l'anime et le conduit par sa force musculaire.

De 1850 à 1914, les machines-outils prennent une place sans cesse accrue dans les ateliers. Il s'agit de machines simples (tour, fraiseuse, perceuse, raboteuse) nécessitant un grand nombre d'opérations manuelles. L'ouvrier équipe le porte-pièce et le porte-outil ; il sélectionne les éléments de coupe  $n$ ,  $a$ ,  $p$  prend les passes successives et effectue les mesures.

Depuis 1914, les machines-outils automatiques se substituent de plus en plus souvent aux machines classiques. Les progrès sont lents au début et obtenus le plus souvent par dispositifs mécaniques.

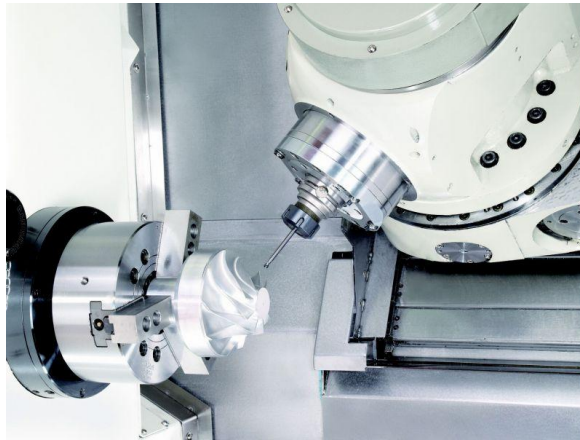
Depuis 1946, les dispositifs électro-mécaniques, hydro-mécaniques, puis électroniques nous amènent dans la période actuelle.

L'intervention de l'opérateur se réduit à un rôle de surveillance dans le cas de certaines machines actuelles capables de mesurer la qualité des pièces produites et s'autorégler.

Par contre avec l'usage des machines-outils automatiques, le rôle des techniciens s'accroît et se diversifie pour la préparation des travaux et des outillages spéciaux.

Actuellement, une nouvelle génération de machines est introduite dans le processus de fabrication. On peut citer la machine-outil 5 axes.

Dans le futur, l'imprimante 3D peut devenir une technique d'usinage concurrente.



**Figure I.1** : Machine-outil 5 axes



**Figure I.2** : Imprimante 3D

### **I.3/ COUPE DES METAUX :**

On appelle usinage toute opération de mise en forme par enlèvement de matière à l'aide d'une machine-outil destinée à conférer à une pièce des dimensions et un état de surface (écart de forme et rugosité) situés dans un intervalle de tolérance donné. D'un point de vue économique, le secteur industriel de l'usinage a une importance non négligeable puisqu'il produit environ 2,5 % du produit national brut d'un pays développé.

L'usinage concerne en premier lieu les matériaux métalliques et la plupart des objets métalliques d'utilisation courante qui ont subi déjà une ou plusieurs opérations de mise en

forme. La mise en forme par usinage concerne également, mais de manière moins conséquente en général, toutes les autres classes de matériaux (céramiques, polymères, bois et matériaux dérivés, matériaux composites, verres, semi-conducteurs, etc.), selon des modalités spécifiques, dépendant des caractéristiques du procédé et du matériau.

Lors de l'usinage d'une pièce, l'enlèvement de matière est réalisé par la combinaison de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil : le mouvement de coupe et le mouvement d'avance. Il existe deux manières pour générer la surface recherchée : soit par le travail de forme, soit par le travail d'enveloppe. Dans le cas du travail de forme, c'est la forme de l'outil qui conditionne la surface finalement obtenue. Dans le cas du travail d'enveloppe, c'est la trace de l'arête de l'outil qui travaille (le point générateur) qui donne la surface finale.

### **I.3.1/ EXIGENCES LIEES A L'USINAGE :**

Les procédés de mise en forme des matériaux par enlèvement de matière n'ont cessé d'être remis en question afin de répondre aux exigences industrielles imposées, quelles soient économiques ou écologiques, etc. Aujourd'hui, le technicien de fabrication se doit donc de pouvoir répondre à une multitude de questions afin de réaliser rapidement des pièces mécaniques avec la qualité demandée et à moindre coût.

Par exemple, parmi les questions qui se posent dans le cas de l'usinage :

- Quel type de machine faut-il utiliser et suffira-t-elle en termes de puissance et de précision ?
- Quelles sont les conditions de coupe à utiliser pour minimiser l'endommagement des outils ou du matériau usiné ?
- Quelles sont les solutions à adopter lors de la conception des outils et dans quels matériaux doivent-ils être fabriqués pour améliorer leur durée de vie et/ou la qualité des états de surface des pièces usinées ?
- Quelles sont les propriétés mécaniques de la pièce après usinage ?
- Est-il possible d'usiner sans apport de lubrifiant ? ...

Il y aurait encore un nombre considérable de questions à poser, dont il est difficile d'établir une liste exhaustive. L'état d'avancement des connaissances sur le plan fondamental ne peut pas apporter de réponse à toutes ces questions. En revanche, la technologie et les techniques d'usinage ont permis de faire évoluer et d'optimiser la production.



Depuis la révolution industrielle du début du siècle dernier, les machines outils ont considérablement évoluées afin de répondre à des exigences telles qu'un meilleur rendement, une plus grande sécurité, une meilleure rigidité, de plus grandes vitesses de déplacement, une puissance accrue, une amélioration de la productivité, une diminution de l'usure des outils, etc.

En contrepartie, l'amélioration de toutes ces performances fait ressortir un ensemble de phénomènes dont l'ignorance ne remettait pas en cause la fabrication traditionnelle des pièces mais dont l'importance ne peut être ignorée pour des conditions d'Usinage à Grande Vitesse où les vitesses de rotation, des outils de fraisage par exemple, deviennent très importants.

### **I.3.2/ ETUDE DE FABRICATION :**

Une étude de fabrication a pour objet d'établir une suite logique des différentes étapes de réalisation d'une pièce.

Elle doit, compte tenu des moyens disponibles :

- Respecter la qualité imposée par les dessins de définition du produit,
- Rendre les coûts de fabrication minimaux.

On trouve dans cette étude de fabrication une phase et une opération.

Une phase est l'ensemble des opérations élémentaires effectuées en un même poste de travail pour (ou sur) une même unité de production.

Une opération est tout ensemble de travail, mettant en œuvre un seul des moyens dont est doté le poste de travail, qui a pour but de rapprocher le produit de son état final.

Les principaux éléments de base à posséder pour établir une étude de fabrication sont :

- Le dessin de définition du produit,
- Le nombre de pièces à fabriquer,
- La cadence demandée,
- La main d'œuvre disponible,
- La disposition des machines,
- Le standard des machines,

- Le standard des outillages,
- La charge des machines.

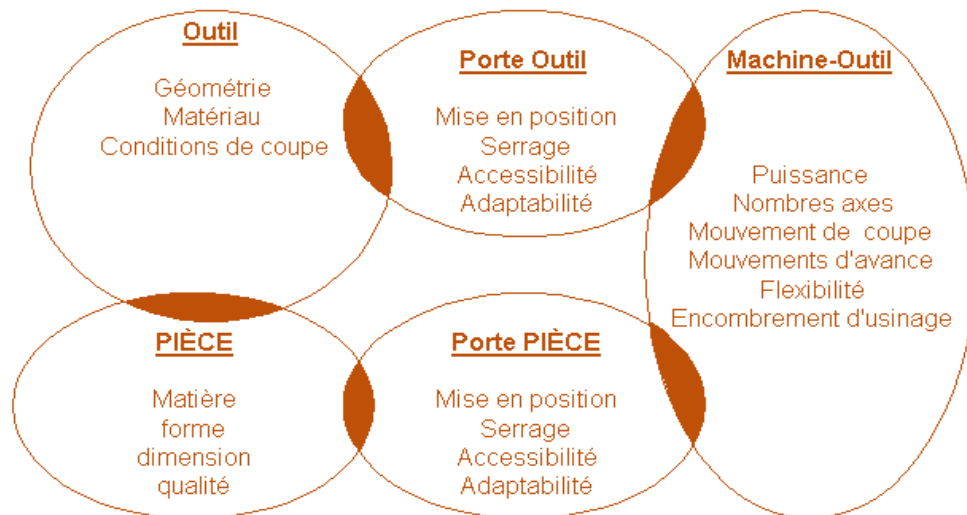
L'étude de phase est une étude détaillée qui consiste à définir avec précision les moyens techniques et économiques à mettre en œuvre en fonction des résultats à obtenir (gamme d'usinage ou carte technologique).

Le document comporte essentiellement :

- La désignation des sous phases,
- Les opérations et les éléments de travail successifs,
- La désignation des outillages et des montages employés,
- Les vérificateurs à utiliser,
- Les éléments de coupe et les éléments de passe,
- Le temps de fabrication,
- Les croquis de phase.

### **I.3.3/ LE PROCESSUS D'USINAGE :**

L'usinage est un processus complexe où interviennent plusieurs acteurs :



**Figure I.3 :** Processus d'usinage d'une machine-outil

Il existe donc des liaisons :

- Entre la pièce et le porte-pièce,
- Entre la pièce et l'outil,
- Entre l'outil et le porte-outil,

- Entre le porte-pièce et la machine-outil,
- Entre le porte-outil et la machine-outil.

### **I.3.4/ LES PROCEDES D'USINAGE :**

Les procédés d'usinage sont extrêmement variés et leur distinction se fait suivant trois critères essentiels :

- La date de leurs apparitions ; les procédés traditionnels et les non traditionnels.
- Les phénomènes physiques correspondant ; procédés de coupe, par abrasion, et procédés physico-chimiques.
- Le type des machines et des outils utilisés.

En fonction des outils et des machines utilisées, on distingue différents procédés d'usinage. Les procédés les plus répandus sont le tournage, fraisage, perçage, rectification, rabotage, etc. La fabrication débute avec ce que l'on appelle un matériau brut, elle le modifie jusqu'à ce qu'il soit conforme au dessin de détail, donc aux exigences techniques du bureau d'études.

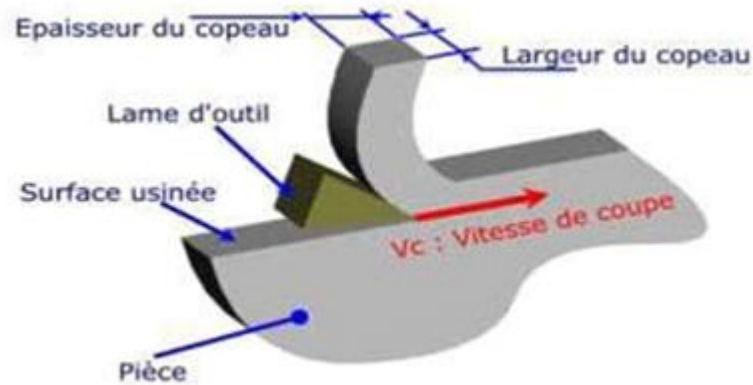
### **I.3.5/ PRINCIPE DE LA COUPE DES METAUX :**

La coupe des métaux (ou usinage) consiste à enlever une couche de métal pour obtenir une pièce finie conforme au dessin de définition. [2]

Cette coupe est effectuée sur des machines à l'aide d'outils tranchants de dimensions et de formes diverses.

Lors de l'usinage, on trouve :

- Une lame d'outil qui pénètre dans la matière et enlève un copeau,
- L'outil suit une trajectoire par rapport à la pièce à usiner, où les mouvements sont assurés par les éléments constitutifs de la machine-outil.



**Figure I.4** : Coupe des métaux

La conjugaison de 3 mouvements soit à l'outil où soit à la pièce permet la coupe.

Ces 3 mouvements sont :

- Le mouvement de coupe, **Mc**
- Le mouvement d'avance, **Ma**
- Le mouvement de profondeur, **Mp**

➤ **Mouvement de coupe Mc**

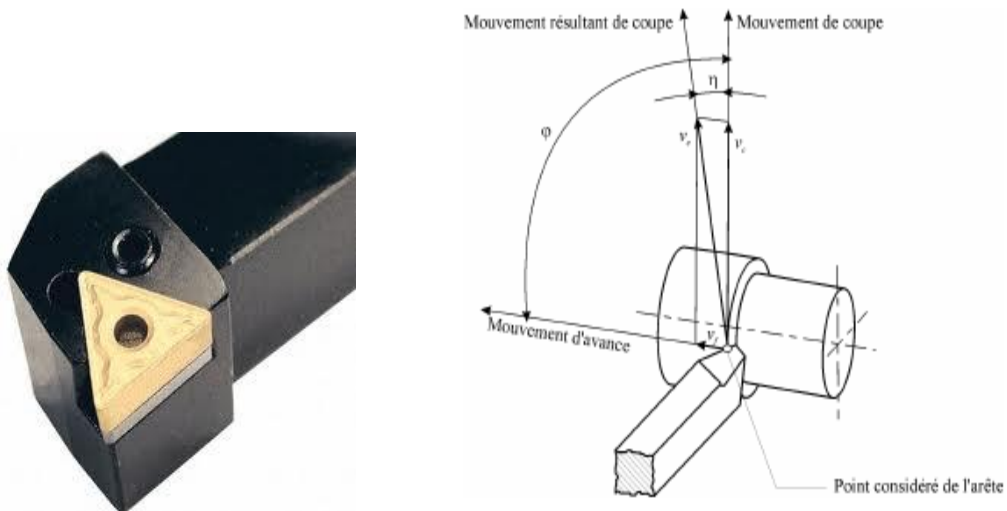
Le mouvement de coupe est un mouvement relatif principal entre l'outil et la pièce. Il est le mouvement principal à l'élaboration du copeau pendant la course de la machine. Il est caractérisé par la vitesse de coupe  $v_c$  qui est une vitesse instantanée du point considéré de l'arête par rapport à la pièce. Dans le cas du mouvement circulaire, la vitesse de coupe est une fonction de la vitesse de rotation  $n$  et du diamètre  $D$  de l'élément en rotation. Pour le tournage, il faut prendre le diamètre du cercle qui se trouve sur le point de l'arête de coupe le plus éloigné de l'axe de rotation.

$$V_c = \pi \varnothing n / 1000 = \text{m/min} \quad (\text{I.1})$$

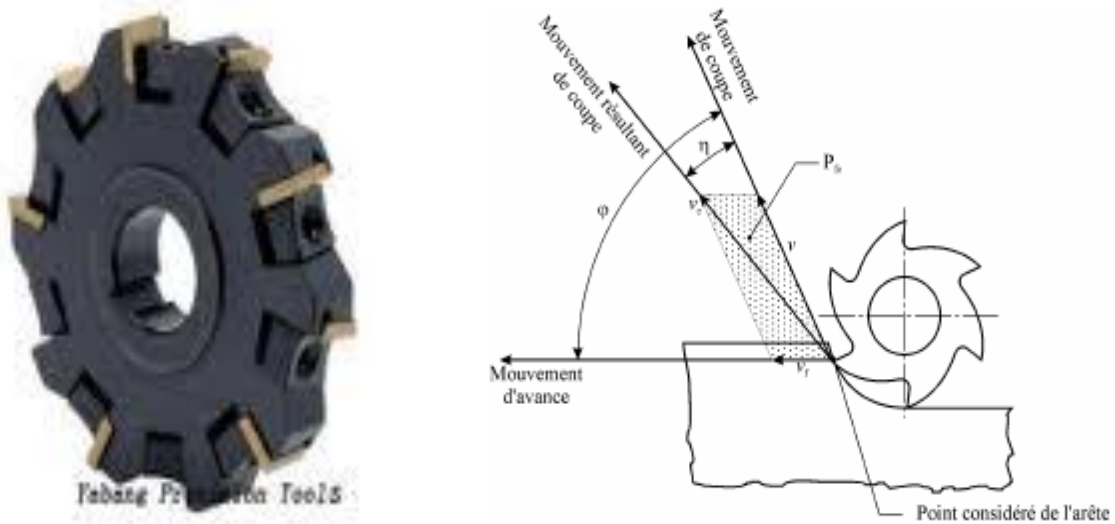
➤ **Mouvement d'avance Ma**

Au mouvement de coupe, vient s'ajouter un autre mouvement relatif entre l'outil et la pièce, le mouvement d'avance, nécessaire à la génération de la surface de la pièce. Il peut être composé de plusieurs mouvements mais seulement de façon à ce qu'au moins une de ses composantes soit rectiligne. Le mouvement d'avance est caractérisé par la vitesse d'avance  $v_f$  qui est une

vitesse instantanée du mouvement d'avance du point considéré de l'arête de coupe par rapport à la pièce. Elle est exprimée soit en mm/min soit en mm/tour.



**Figure I.5 :** Mouvements de l'outil et de la pièce en tournage



**Figure I.6 :** Mouvements de l'outil et de la pièce en fraisage

➤ **Mouvement de profondeur  $M_p$**

Les paramètres d'usinage sont des grandeurs qui caractérisent les mouvements de l'outil et de la pièce à usiner ainsi que les valeurs de la surépaisseur d'usinage et de la section de coupe.

Le mouvement de profondeur  $M_p$  est un mouvement perpendiculaire aux mouvements de coupe et d'avance. Il détermine la pénétration de l'outil dans la pièce (l'épaisseur du copeau à enlever).

Pour enlever de la matière en cours d'usinage, deux mouvements sont nécessaires : mouvement de coupe et mouvement d'avance. D'une manière générale, ces mouvements de coupe peuvent être donnés soit par la pièce soit par l'outil.

Pour obtenir un travail satisfaisant (bon état de la surface usinée, rapidité de l'usinage, usure modérée de l'outil,...), on doit régler les paramètres de coupe.

Plusieurs critères permettent de définir les paramètres de coupe :

➤ **Ordre de grandeur de la vitesse de coupe :**

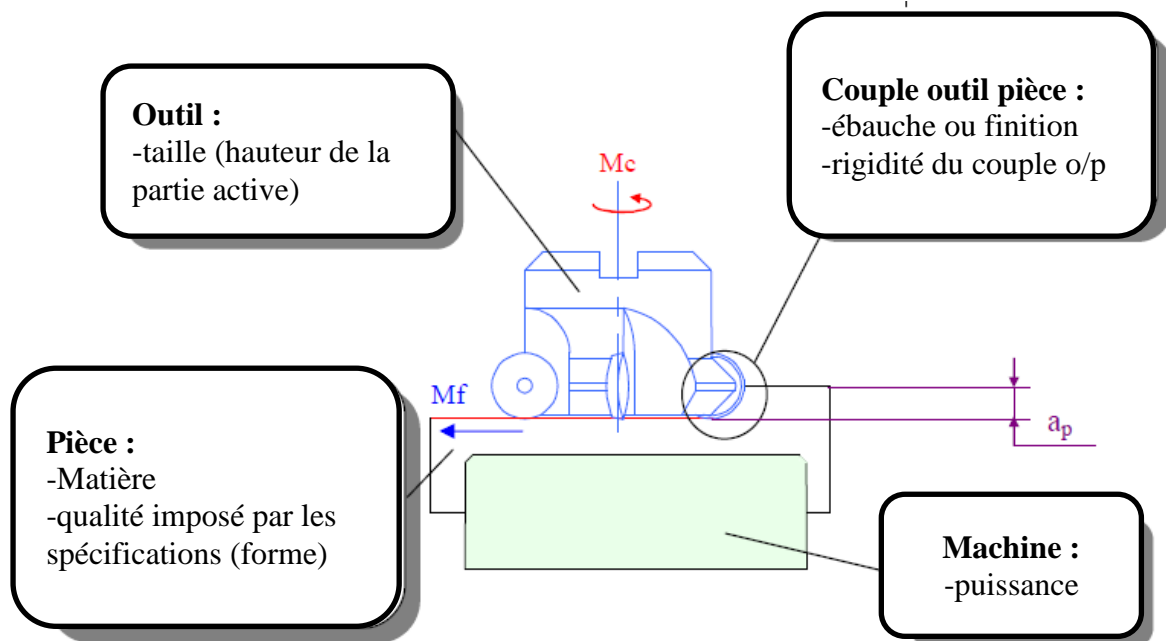
Le tableau I.1 suivant illustre cet ordre de grandeur :

	Alliages ferreux						Alliages de cuivre		Alliages d'aluminium	
	Acier Rm = 40 à 50 MPa	Acier Rm = 40 à 50 MPa	Acier Rm = 40 à 50 MPa	Acier Rm = 40 à 50 MPa	Acier Rm = 40 à 50 MPa	Fonte douce	Bronze	Cuivre Laiton	Aluminium	Duralumin
	E355 C10 C20	C30 C40	C50 C60	C70 C80	100C6	FGL200				
Acier Rapide Supérieur ARS	25	20	15	10	5	25	20	55	150	100
Carbures métalliques	150	120	100	80	50	80	90	150	300	250

**Tableau I.1 :** Ordre de grandeur de la vitesse de coupe

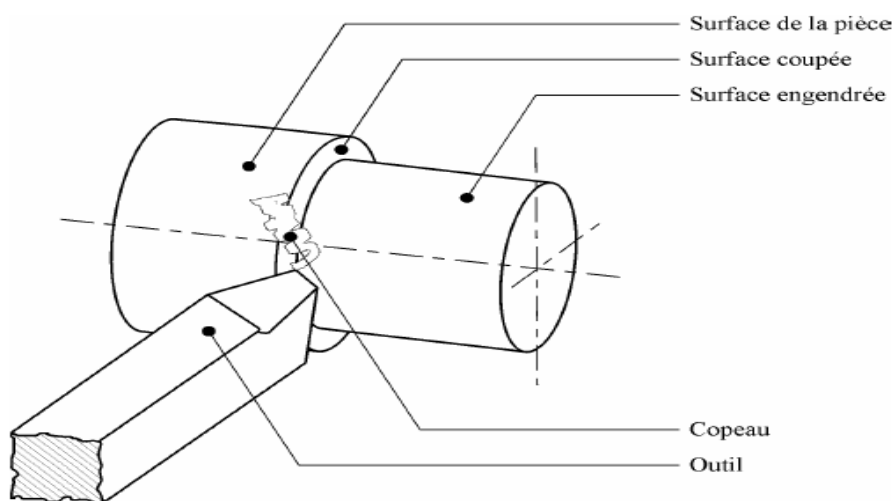
➤ **Facteurs influant sur la profondeur de passe :**

La figure suivante I.7 suivante illustre ces facteurs :



**Figure I.7 :** Facteurs influant sur la profondeur de passe [2]

La figure suivante illustre les principaux éléments d'une pièce à usiner et d'un outil. La surface de la pièce sujette à l'usinage est appelée surface de la pièce. Elle peut être brute (résultant de différents procédés comme moulage, forgeage, laminage, etc.) ou obtenue par usinage au cours d'opérations précédentes. La surface engendrée (ou surface usinée) est une surface désirée, générée par le processus d'enlèvement de matière (un outil de coupe au cours d'usinage). Les deux surfaces sont reliées par une surface engendrée intermédiaire (générée pendant l'usinage par une arête coupante) appelée surface coupée.



**Figure I.8 :** Surfaces de la pièce

### ➤ Principaux modèles de calcul durée de vie de l'outil de coupe

Compte tenu de la complexité du phénomène, il n'existe pas de loi mathématique simple permettant de calculer la "durée de vie" de l'outil. [3].

Parmi ces lois, on trouve :

#### A. Loi de Taylor :

Ce modèle établi par Taylor en 1906 est caractérisé par l'équation :

$$T = C_v \cdot V^N \quad (I.2)$$

C'est une loi où le coefficient  $C_v$  et l'exposant  $n$  sont des constantes.  $T$  est la durée de vie. La constante  $C_v$  semble être une caractéristique du matériau à usiner et des conditions de coupe, l'exposant  $n$ , souvent appelé coefficient de Taylor, est influencé par le matériau de l'outil, le matériau usiné, ainsi que le type d'usinage. [4].

#### B. Loi de Gilbert

Ce modèle, qui date de 1950, est en fait une généralisation de la loi de Taylor pour prendre en considération l'influence de l'avance et de la profondeur de passe. Il est caractérisé par l'équation :

$$T = k^{a_3} v_c^{-a_3} f^{a_2} a^{a_1}$$

$a_1, a_2, a_3$  ; Constantes et  $K$ : Constante dépendant du matériau usiné. [5]

#### C. Loi de Kronenberg

Ce modèle, qui date de 1968 ne prend pas en compte l'influence de l'avance et de la profondeur de passe, tout comme la loi de Taylor. Il est caractérisé par l'équation : [6]

$$T + K = c \cdot v^n$$

Où  $k$  est une constante.

Il est à noter que la constante  $C$  et le coefficient  $n$ , n'ont pas les mêmes valeurs que dans la loi de Taylor.

#### D. Loi de König-Depiereux

Dans ce modèle, qui date de 1969, on tient compte de l'influence de l'avance et de la profondeur de passe. Il est caractérisé par l'équation : [2]

$$T = \exp(\alpha v^\nu, \gamma f^\mu, \delta a^\lambda)$$



## Chapitre II : Le Procédé de fraisage

### II.1/ Généralités :

**Le fraisage est un procédé d'usinage principalement destiné à obtenir des surfaces planes ou prismatiques. Contrairement au tour, c'est l'outil (la fraise) qui est animé d'un mouvement de rotation. La fraise comporte un certain nombre de tranchants, chacun ne coupe que sur une certaine partie de la rotation. [3]. [7].**

La pièce est fixée sur un chariot donnant l'avance et la profondeur.

On distingue deux types de fraisage :

- Le fraisage en rouleau (surface de face) ou la face usinée, uniquement des plans, est perpendiculaire à l'axe de la rotation de la fraise,
- Le fraisage en bout (surfaçage de profil) ou la face usinée est parallèle à l'axe de rotation de la fraise permet la réalisation de toutes surfaces prismatiques.

Il existe également deux manières de pénétrer la matière :

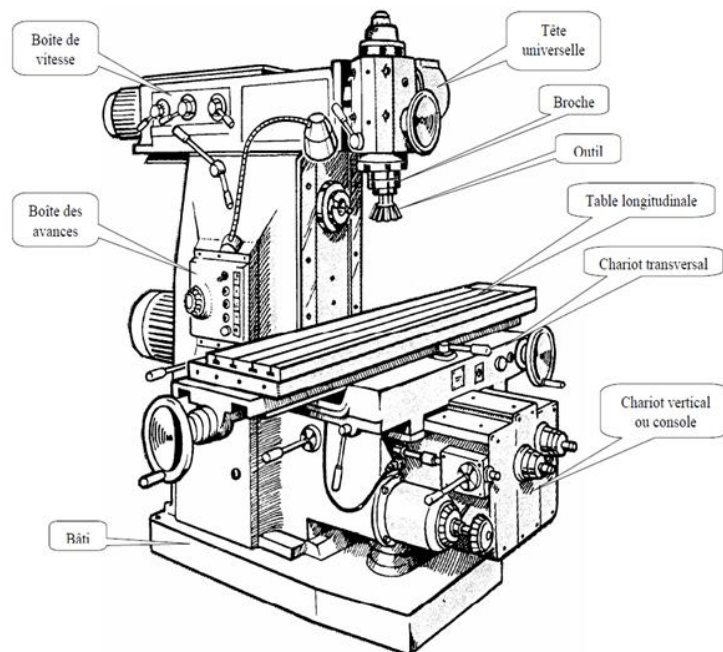
En **fraisage conventionnel** (en remontant) :

- La coupe tend à soulever la pièce ; un bon clamage est important,
- La coupe s'oppose au mouvement d'avance ; pas de risque de tirer la table contre l'autre flanc de sa vis mère,
- Le copeau a une épaisseur nulle au départ ; la fraise frotte avant de couper, donnant un moins bon fini de surface.

En **fraisage en avalant**, les dents attaquent la matière directement en subissant un choc. La puissance absorbée est moins importante d'environ 10%. Le fraisage en avalant est donc meilleur, mais deux conditions doivent être remplies :

- Pas de jeu dans le mécanisme d'avance ; les machines modernes sont équipées de backlash eliminator (éliminateur de jeu) ou encore de vis à billes (machines CNC).
- Avoir toujours au moins une dent en prise (chocs dans la transmission).

## II.2/ Fraiseuse :



**Figure II.1 :** Fraiseuse universelle

### II.2.1/ Caractéristiques principales d'une fraiseuse :

- Capacités dimensionnelles :
  - Course de la table,
  - Hauteur sous broche,
  - Type de cône de broche et rainures.
  
- Performances :
  - Puissance,
  - Fréquence de rotation.

### II.2.2/ Exemples de fraiseuses :

**Fraiseuse horizontale :** Elle utilise des fraises montées sur un arbre porte-fraise horizontal. Elle est utilisée pour le surfacage, pour l'exécution de rainures et de profils rectilignes.

**Fraiseuse universelle :** Elle dérive de la fraiseuse horizontale. Elle permet, aussi bien, d'employer des fraises montées sur un arbre porte-fraise horizontal que sur une broche verticale. Elle peut également, assumer différentes inclinaisons. Elle est utilisée pour exécuter de nombreuses formes de fraisage, y compris les formes hélicoïdales.

**Fraiseuse verticale :** Elle est équipée d'une broche porte-fraise verticale et inclinable. Elle est employée soit pour le surfacage, soit pour l'exécution de rainures et de contours droits ou circulaires.

**Fraiseuse pour outillage :** Elle est une machine très souple, aux multiples possibilités de mouvements de têtes horizontales et verticales ainsi que la table porte-pièce. Elle est employée pour le fraisage de pièce légères, mais de formes compliquées.

**Fraiseuse à banc fixe ( genre raboteuse ) :** C'est une fraiseuse de production. Elle peut travailler en même temps, avec une plusieurs fraises montées sur un ou plusieurs arbres. Elle est utilisée pour dresser des pièces de grandes dimensions.

**Fraiseuse à fileter :** Conçue uniquement pour le taillage de vis.

**Fraiseuse à copier ou à reproduire :** Elle est munie d'un dispositif qui permet de reproduire des contours même compliqués, suivant un modèle ou gabarit qui guidera la fraise le long de la forme à exécuter. Elle est utilisée pour l'exécution de pièces aux formes compliquées et irrégulières.

### **II.2.3/ Mouvement de la fraiseuse horizontale :**

a) Mouvement de coupe : rotation à la broche

b) Mouvement d'avance et de profondeur : translation rectiligne sur le chariot

#### **Remarque :**

Des mouvements plus complexes sont possibles sur d'autres types de fraiseuses.

Dans certains cas, c'est la broche qui peut se déplacer.

## II.2.4/ Fixation de la pièce :

Le serrage se fait en **étau** **parallèles**.

### Remarque :

- Après fixation de l'étau sur la table, il faut contrôler au comparateur, le parallélisme du mors avec le déplacement de la table,
- Fixer l'étau pour que l'arête de l'outil soit dirigée vers le mors fixe plus apte à résister aux efforts que le mors mobile,
- Fixer la pièce dans l'étau pour que la pièce ressorte des mâchoires.

**Bridage des pièces :** si les dimensions ou les formes de la pièce ne permettent pas l'utilisation d'étau, on utilise le bridage.

## II.3/ Fraise (Outil) :

La **fraise** est un outil qui permet d'usiner la matière. Elle est généralement utilisée sur une fraiseuse pour faire du fraisage.

Les fraises sont définies par :

- Le type ou nombre de surfaces taillées,
- La denture,
- La forme (cylindrique,... ),
- Le diamètre,
- La fixation.



**Figure II.2 :** Exemples de fraise

Il faudra bien faire attention à ne pas confondre le **sens de coupe** et le **sens de l'hélice**.

Suivant le sens de coupe, les fraises sont :

- Soit à coupe à droite,
- Soit à coupe à gauche.

Suivant l'inclinaison des arêtes de coupe, on distingue :

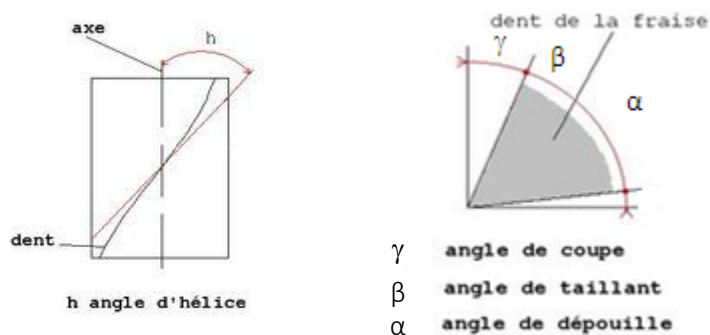
- Les dentures droites,
- Les dentures hélicoïdales (avec l'hélice à gauche ou à droite),
- Les dentures à double hélice alternée.

Parmi les groupes de matériaux entrants dans la composition des fraises, on trouve :

- Les fraises en acier rapide,
- Les fraises en carbure monobloc,
- Les fraises à plaquettes carbure amovibles ou brasées,
- Les fraises diamant.

### **II.3.1/ Principaux éléments géométriques de la fraise :**

Il s'agit du diamètre et de l'angle :



**Figure II.3 :** Paramètres de fraise

- Angles d'affûtage,

- Angle d'hélice : Cet angle est formé par la tangente à l'hélice de la dent par rapport à l'axe de la fraise. Pour l'usinage des métaux tendres, cet angle est grand.
- Angle de taillant : C'est l'angle qui constitue la partie coupante de la dent de la fraise. Plus il est aigu, plus il est fragile.
- Angle de coupe ou pente d'affûtage : Cet angle influe sur la façon dont se forme le copeau sur la face de coupe. Plus il est grand, plus l'effort de coupe diminue.
- Angle de dépouille : C'est l'angle qui évite le frottement (talonnage) de l'arrière de la dent sur la partie de la pièce déjà usinée.

### **II.3.2/ Montage des fraises :**

Le montage le plus classique est le montage par mandrin.

Par exemple, on utilise une douille de type standard américain, le cône creux est type morse sur lequel s'emmanche la queue de la fraise et son tenon.



**Figure II.4 :** Montage de fraise

### **II.3.3/ Nombre de dents :**

Le choix du nombre de dents en prise dépend de trois critères :

- Avoir toujours au moins une dent en prise ( chocs ),
- Le couple nécessaire dépend du nombre de dents en prise,
- Le copeau doit pouvoir se loger entre les dents.

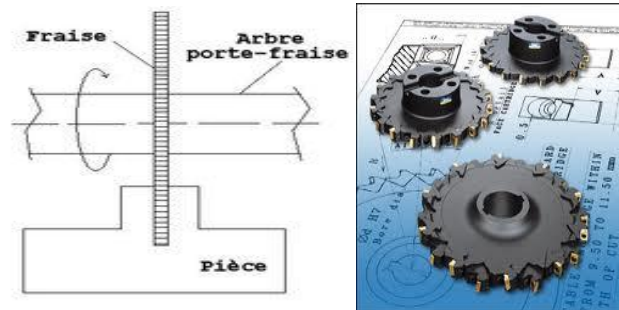
### **II.3.4/ Outils de fraisage :**

Quelques modèles de fraise :

**a) La fraise scie :**

Il existe plusieurs **fraises scies** : 1 taille, 3 tailles et à denture Heller.

La fixation de la fraise scie se fait la plupart du temps sur un mandrin porte fraises à bagues ou un mandrin à pompe. Dans les deux cas l'entraînement de la fraise se fait au moyen d'une clavette insérée dans le mandrin. La fraise scie trouve son utilité dans les dégagements d'angle, dans le sciage de deux parties qui doivent avoir une certaine élasticité ou pour l'usinage de rainures étroites et très profondes qui ne seraient pas réalisables avec une fraise à rainurer (dans ce cas, la fraise scie à 3 tailles est préférable ). Son inconvénient : étant souvent de grand diamètre, son dégagement n'est pas aisé.

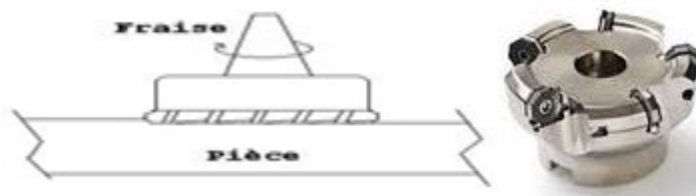


**Figure II.5 :** Fraise scie

**b) La fraise à surfacer :**

Il existe plusieurs types de **fraise à surfacer** :

- la fraise 1 taille à surfacer,
- la fraise cloche à surfacer,
- la fraise à surfacer-dresser ( qui permet de surfacer de très près un épaulement ).

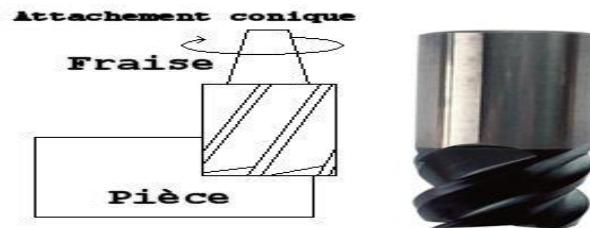


**Figure II.6 :** Fraise à surfacer

**c) La fraise à 2 tailles :**

La **fraise cylindrique 2 tailles** peut être utilisée pour plusieurs usages:

- Elle peut surfacer avec sa face plane,.
- Le contournage est fréquemment réalisé avec sa périphérie,
- Mais sa fonction principale réside dans l'usinage d'épaulements.



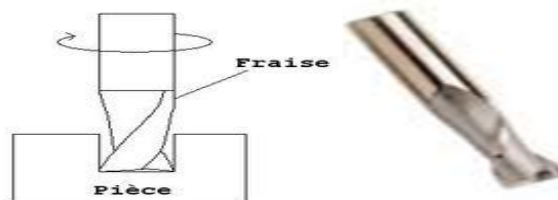
**Figure II.7 :** Fraise à 2 tailles

**d) La fraise à rainurer 2 dents :**

La **fraise à rainurer 2 dents** est une fraise qui sert à usiner des rainures droites ou circulaires, là où la fraise 3 tailles ne peut effectuer cette opération d'usinage.

Ce type de fraise existe aussi avec coupe centrale : une des deux dents a une arête de coupe plus grande, sa longueur est égale au rayon. Cela permet de plonger dans la matière sans faire de perçage au préalable.

La fraise à rainure 2 dents se présente avec un attachement à queue cylindrique pour les petits diamètres et à queue conique pour les gros diamètres.



**Figure II.8 :** Fraise à rainurer 2 dents

**e) La fraise pour rainures en T :**

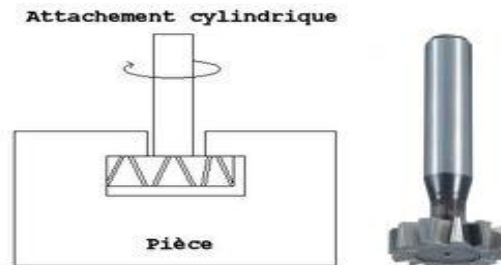
Cette fraise qui ressemble à une fraise 3 tailles, sert à usiner les deux parties qui sont en retrait dans une rainure en T.

Les rainures en T sont très employées sur les machines-outils (tables) et également sur de nombreux outillages pour la fixation de matériels.



Cette fraise se trouve soit en attachement conique, soit en attachement cylindrique. Elle est très souvent à denture alternée, mais on la trouve également en denture droite.

Pour l'usinage, il faut tout d'abord faire une rainure droite (col de la rainure) avec une fraise 3 tailles, puis usiner les deux parties en retrait de la rainure en T.

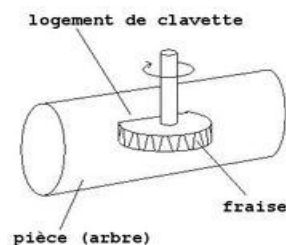


**Figure II.9 :** Fraise pour rainure en T

**f) La fraise pour logement de clavette-disque :**

Elle est à denture droite ou à denture alternée. Son attachement est principalement la queue cylindrique. Ses dimensions sont normalisées, car les clavettes sont des éléments mécaniques également normalisés.

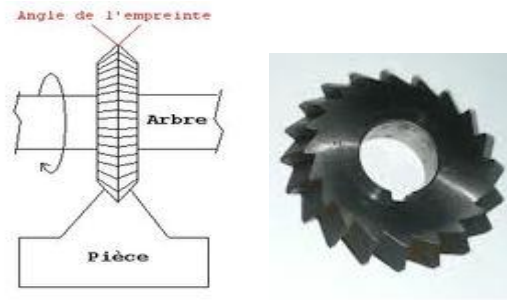
L'usinage se fait en une seule passe de plongée.



**Figure II.10 :** Fraise pour logement de clavette-disque

**g) La fraise isocèle :**

La **fraise isocèle** est une fraise à 2 tailles qui est utilisée pour usiner des empreintes à un angle précis (par exemple usinage d'un vé, voir schéma). Sa denture est droite. La valeur de l'angle peut prendre différentes valeurs :  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$



**Figure II.11 :** Fraise isocèle

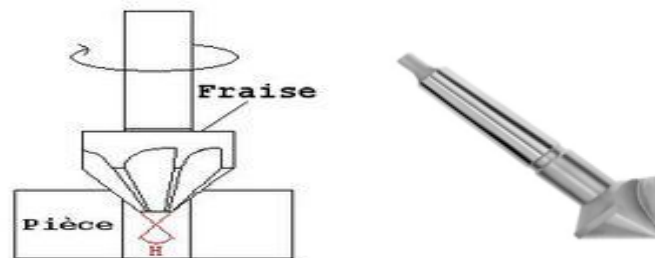
**h) La fraise à chanfreiner :**

La **fraise à chanfreiner** est une fraise qui est disponible avec deux valeurs de l'angle de pointe H : **60° et 90°**.

Elle sert comme son nom l'indique à faire des chanfreins sur des bords de trous ou sur des arêtes rectilignes ou courbes.

Cette fraise se trouve avec attachement à queue cylindrique pour l'usinage de chanfreins sur les arêtes de pièces et la fraise à queue conique est préférée pour chanfreiner les trous.

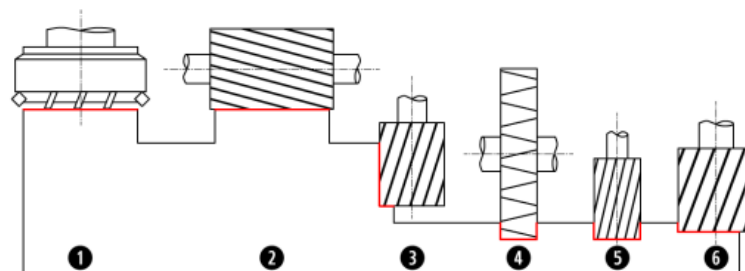
Ce n'est pas une fraise à gros débit de copeaux, elle casse les angles.



**Figure II.12 :** Fraise à chanfreiner

**II.4/ Les différentes opérations :**

On peut citer les opérations suivantes :



**Figure II.13 :** Opération de fraisage

Avec :

1 = Surfaçage de face

2 = Surfaçage de profil

3 = Surfaçage de dressage prédominant profil

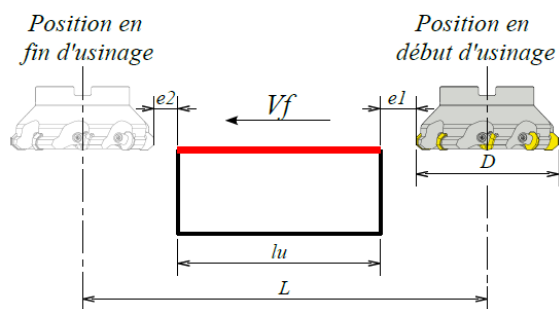
4 = Rainurage 3 Tailles

5 = Rainurage 2 Tailles

6 = Rainurage de dressage prédominant face

## II.5/ Calcul du temps d'usinage :

On détermine le calcul d'usinage de la manière suivante :



$$T_t = \frac{L}{azn}$$

$$T_t = \frac{\frac{\emptyset}{2} + e_1 + l_u + e_2 + \frac{\emptyset}{2}}{azn}$$

$$T_t = \frac{e_1 + l_u + e_2 + \emptyset}{azn}$$

## Chapitre III : Paramètres de coupe et leurs influences

### III.1/ Introduction :

Parmi les paramètres de coupe influant sur la qualité de l'état de surface, on peut citer le paramètre cinématique à savoir l'avance par dent  $f_z$  (mm/dent). Celle-ci correspond à la distance que la dent va parcourir à chaque tour de la fraise dans la pièce à usiner.

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'influence de ces paramètres sur les efforts et les puissances de coupe. De la partie expérimentale, on déterminera les efforts de plusieurs avances par dent  $f_z$  et le tout sera interprété par des graphes pour bien démontrer cette influence.

La partie expérimentale a été faite au niveau de l'atelier d'usinage de notre département mécanique. [8].

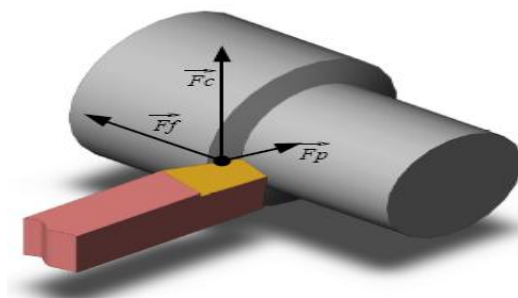
### III.2/ Influence sur les efforts et les puissances de coupe :

L'étude et l'évaluation des forces de coupe présente un intérêt en usinage principalement : [9]

- Pour dimensionner les outils et les éléments de machine-outil.
- Pour évaluer la puissance de coupe et permettre ainsi le choix rationnel d'une machine-outil.

Les efforts qui s'appliquent successivement à chaque dent de l'outil sont :

- L'effort tangentiel de coupe  $F_c$  normal au rayon qui abouti à l'arête coupante.
- L'effort d'avance  $F_f$ , parallèle à la direction de l'avance.
- L'effort de pénétration  $F_p$ , perpendiculaire au précédent.



**Figure III.1 :** Les efforts outil pièce en tournage

En supposant que la fraise est portée par son axe  $O$ , les efforts  $F_f$  et  $F_p$  admettent la résultante  $F$  qui passe obligatoirement par cet axe  $O$ .

$$F_f = (0,2 \text{ à } 0,3) F_c$$

$$F_p = (0,4 \text{ à } 0,5) F_c$$

$$F = \sqrt{(0.25 \times F_c)^2 + (0.45 \times F_c)^2 + F_c^2} \cong 1.12 F_c \quad (\text{III.1})$$

On prend généralement :  $F \approx F_c$

### III.2.1/ Effort de coupe $F_c$ et Puissance de coupe $P_c$ :

#### a- Cas du fraisage centré :

La valeur de l'effort de coupe est donnée par la formule :

$$F_c = K_c A_d \quad [\text{N}] \quad (\text{III.2})$$

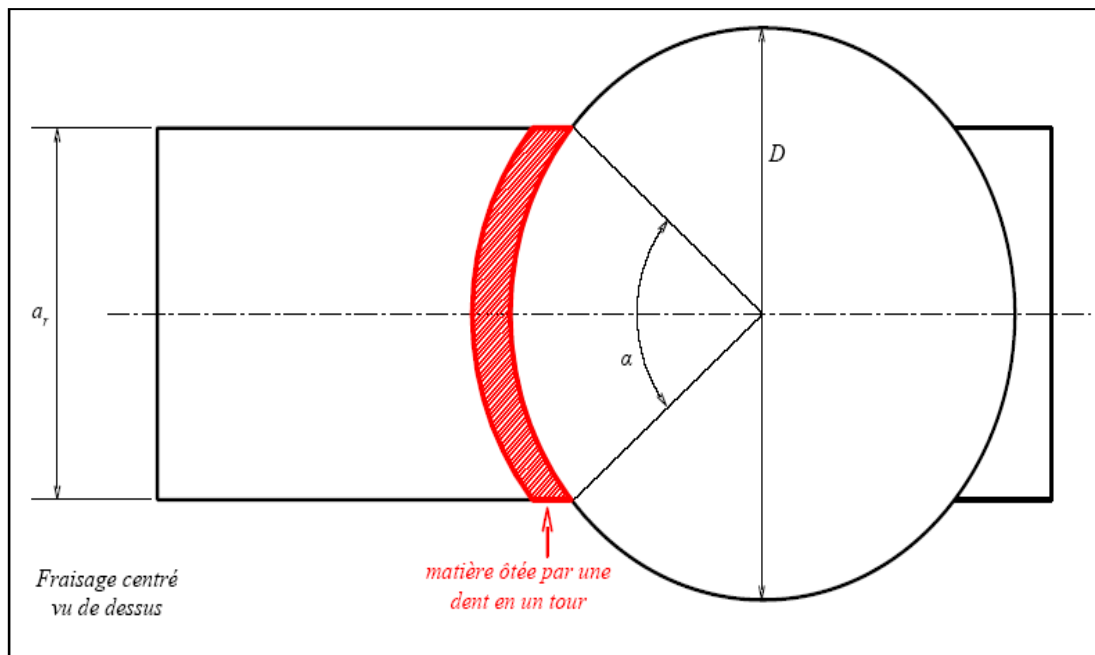
Avec :

-  $K_c$ : Pression spécifique de coupe dépendant du matériau et de l'épaisseur moyenne du copeau [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ].

-  $A_d$ : Section du copeau [ $\text{mm}^2$ ].

#### Remarque :

Pour cela on fait l'hypothèse que l'effort de coupe est réparti uniformément sur tout le copeau et que la variation de la vitesse de coupe sur la surface du copeau est négligeable.



**Figure III.2 :** Cas de fraisage centré

-Section moyenne du copeau sur un tour :

$$A_{dm} = \frac{2 \times f_z \times a_r \times a_a}{\alpha \times D} \quad (\text{III.3})$$

$f_z$  : L'avance par dent [ $\text{mm}/\text{dent}$ ].

$a_r$  : Largeur de la pièce à usiner [mm].

$a_a$  : La profondeur de passe [mm].

$D$  : Diamètre de la fraise.

-Calcul du nombre de dents en prises :  $Z'$

La fraise à  $Z$  dents au total donc sur une portion d'angle  $\alpha$  de la fraise on a :

$$Z' = \frac{\alpha}{2\pi} Z \quad (\text{III.4})$$

Formules finales :

$$F_C[N] = \frac{K_C \times f_Z \times a_r \times a_a}{\pi \times D} \quad (\text{III.5})$$

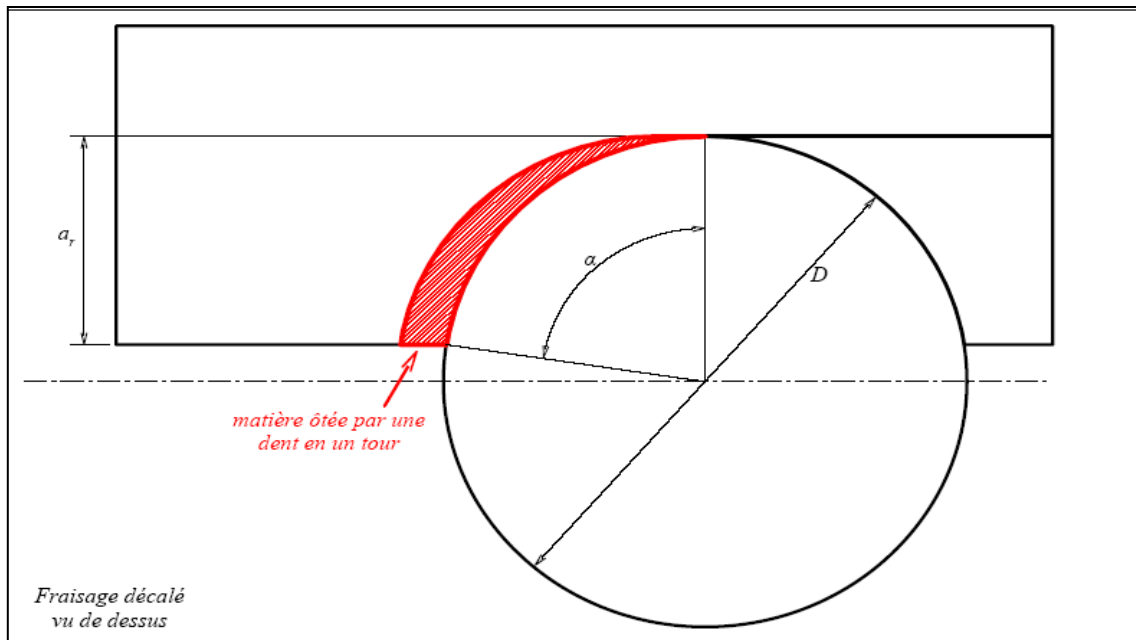
**La puissance de coupe pour une dent :**

$$P_{C1\text{ dent}} = F_C \times V_C \quad (\text{III.6})$$

$$P_C[KW] = \frac{K_C \times f_Z \times a_r \times a_a \times V_C}{\pi \times D \times 60 \times 1000} \quad (\text{III.7})$$

$$P_C[KW] = \frac{K_C \times a_r \times a_a \times V_f}{60 \times 10^6} \quad (\text{III.8})$$

**b- Cas du fraisage décalé :**



**Figure III.3 :** Cas de fraisage décalé

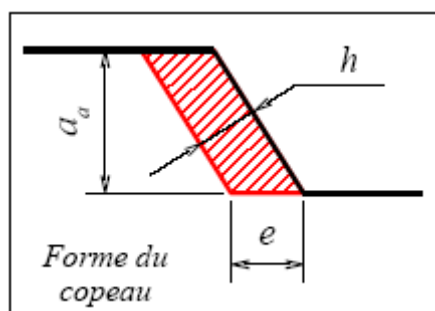
On a exactement les mêmes formules de  $F_c$  et  $P_c$  la différence c'est dans la pression spécifique de coupe  $K_c$ .

**Détermination de  $K_c$  :**

Les tableaux donnant la pression spécifique de coupe  $K_c$  en fonction de  $h_m$  (épaisseur moyenne du copeau).

$$h_m = e_m \sin K_r \tag{III.9}$$

Donc 
$$h_m = \frac{2 f_z a_r}{D \alpha} \sin K_r \tag{III.10}$$



**Figure III.4 :** Forme du copeau

**-Pour le fraisage centré :**  $K_r = 75^\circ$

On a 
$$\alpha = 2 \arcsin \left( \frac{a_r}{D} \right) \tag{III.11}$$

$$\text{Donc: } h_m = \frac{f_z a_r \sin K_r}{D \arcsin\left(\frac{a_r}{D}\right)} \quad (\text{III.12})$$

$$\text{Finalement on a } h_m [\text{mm}] = \frac{360 f_z a_r \sin K_r}{2\pi D \arcsin\left(\frac{a_r}{D}\right)} \quad (\text{III.13})$$

**-Pour le fraisage décalé :  $K_r = 90^\circ$**

$$\text{On a } \alpha = \arcsin\left(1 - \frac{2a_r}{D}\right) \quad (\text{III.14})$$

$$\text{Donc } h_m = \frac{2 f_z a_r \sin K_r}{D \arcsin\left(1 - \frac{2a_r}{D}\right)} \quad (\text{III.15})$$

$$\text{Finalement } h_m [\text{mm}] = \frac{360 f_z a_r \sin K_r}{\pi D \arcsin\left(1 - \frac{2a_r}{D}\right)} \quad (\text{III.16})$$

### III.2.2/ Calcul d'effort et puissance de coupe :

Les paramètres sélectionnés pour notre expérience sont représentés dans le tableau III.1 et III.2.

De ces paramètres et de notre expérience, on calcule l'effort et puissance de coupe pour cinq valeurs d'avance dans les deux cas de fraisage centré et décalé selon les paramètres suivants :

$$a_r = 45 \text{ mm}$$

$$a_a = 0.5 \text{ mm}$$

Longueur de la pièce = 190 mm

Diamètre de la pièce = 140 mm

La matière de la pièce à usiner: XC35

Diamètre de la fraise = 60 mm

Z = 6 dent

$V_c = 80 \text{ m/min}$

$K_r = 75^\circ$  fraisage centré,  $90^\circ$  fraisage décalé

a- **Fraisage centré :**

F(N)	$f_z$ ( $\frac{\text{mm}}{\text{dent}}$ )	$a_a$ (mm)	$a_r$ (mm)	$h_m$ (mm)	$K_c$ ( $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ )	$P_c$ (Kw)
<b>612.11</b>	0,12	0.5	45	0,1	3150	0,80
<b>1072.21</b>	0,24	0.5	45	0,2	2640	1,34



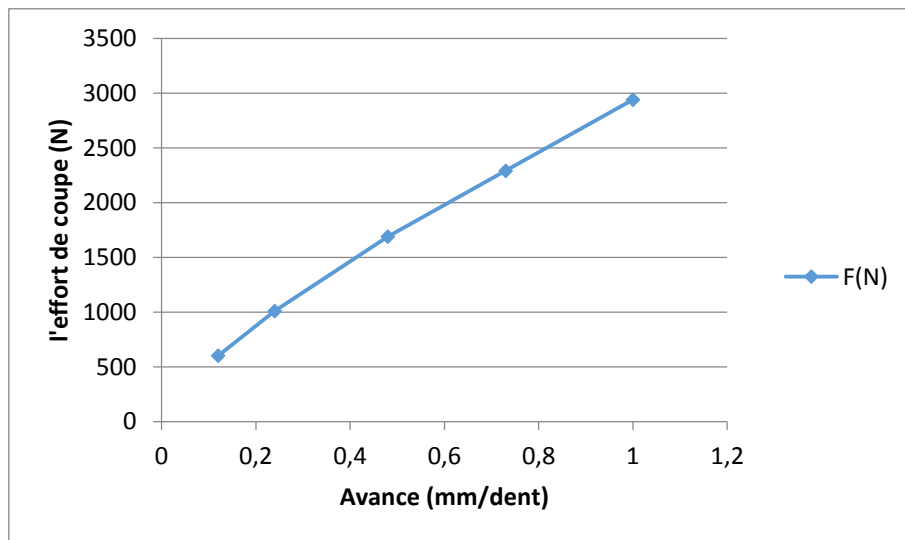
<b>1653.12</b>	0,48	0.5	45	0,4	2210	2,25
<b>2212.36</b>	0,73	0.5	45	0,6	1970	3,05
<b>2845.12</b>	1	0.5	45	0,8	1850	3,91

**Tableau III.1:** Fraisage centré.

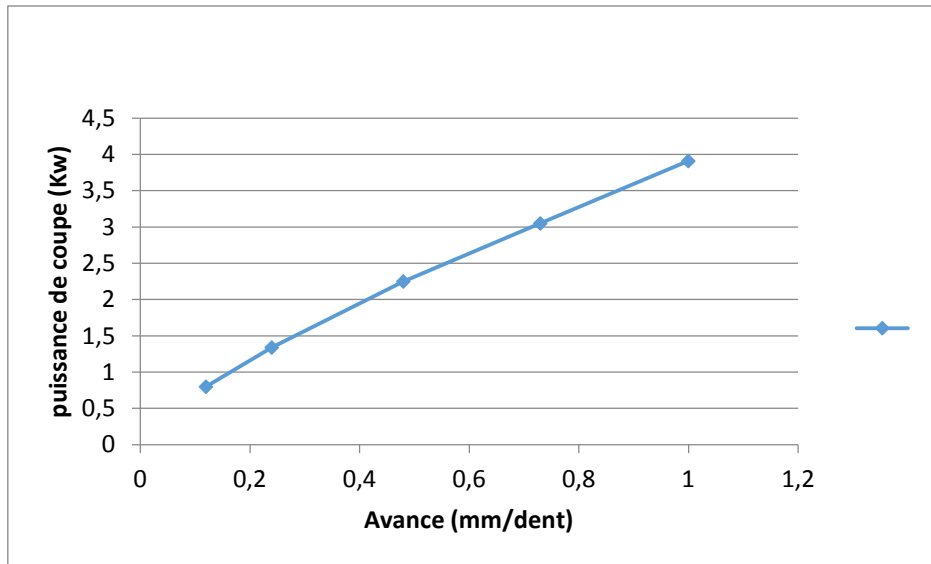
b- Fraisage décalé :

<b>F(N)</b>	<b><math>f_z</math>(mm/dent)</b>	<b><math>a_a</math>(mm)</b>	<b><math>a_r</math>(mm)</b>	<b><math>h_m</math>(mm)</b>	<b><math>K_c</math>(N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b><math>P_c</math>(Kw)</b>
<b>612.11</b>	0,12	1	50	0,1	3150	0,80
<b>1072.21</b>	0,24	1	50	0,2	2640	1,34
<b>1653.12</b>	0,48	1	50	0,4	2210	2,25
<b>2399.12</b>	0,73	1	50	0,5	1970	3,24
<b>2982.32</b>	1	1	50	0,7	1850	4,06

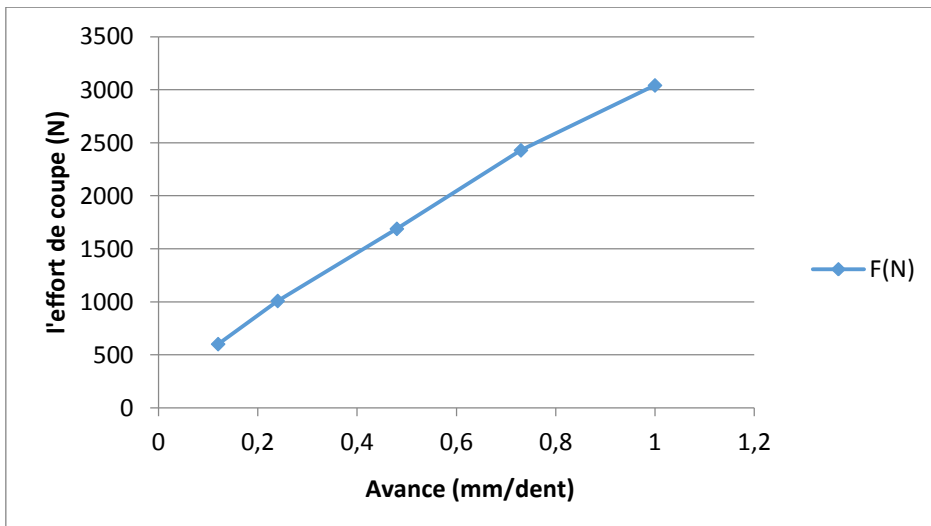
**Tableau III.2:** Fraisage décalé.



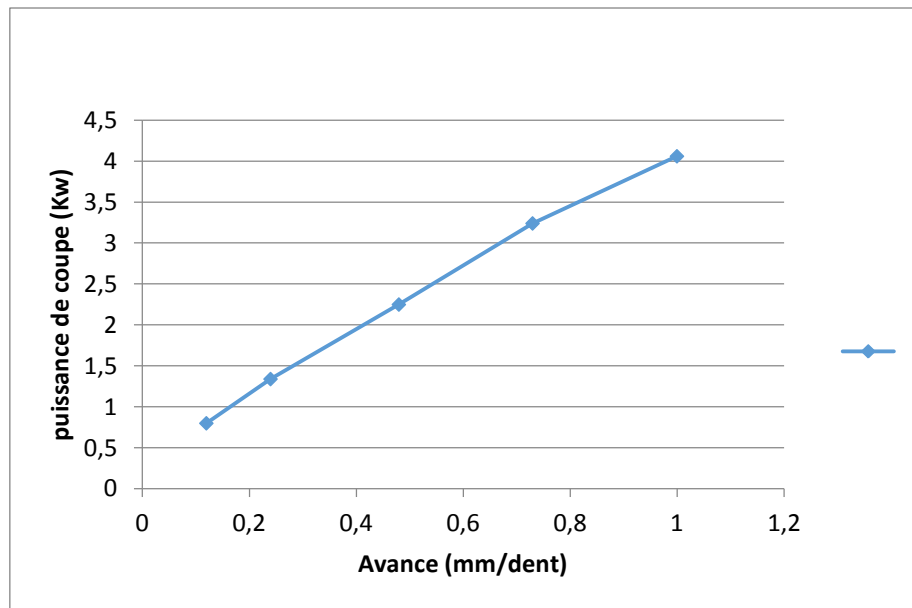
**Graphe III.1 :** Effort de coupe en fonction de l'avance fraisage centré.



**Figure III.5 :** Puissance de coupe en fonction de l'avance fraisage centré.



**Figure III.6 :** Effort de coupe en fonction de l'avance fraisage décalé.



**Figure III.7 :** Puissance de coupe en fonction de l'avance fraisage décalé.

Les graphes précédents montrent qu'on a presque la même influence de l'avance par dent  $f_z$  sur l'effort et la puissance de coupe dans les deux opérations de fraisage centré et décalé. Lorsque le paramètre  $f_z$  augmente, l'effort et la puissance de coupe augmentent aussi.

### **III.3/ Optimisation multi-objective :**

Les variables définissant les conditions de coupe en fraisage sont des grandeurs géométriques et cinématique intervenant dans la dynamique de coupe et la nature du milieu dans lequel est effectuée la coupe (lubrification). Les variables retenues pour une opération de fraisage sont :

- Pour les grandeurs géométriques :

La profondeur de passe  $a$  (en mm).

- Pour la grandeur cinématiques :

La vitesse de coupe  $V_c$  en (m/min).

L'avance par  $f$  (en mm /tr).

Le problème du choix des conditions de coupe consiste à déterminer les valeurs des variables de coupe ( $f$ ,  $a$ ,  $V_c$ ) pour chaque opération élémentaire d'usinage en prenant en compte les limites de performance des éléments de la cellule élémentaire d'usinage qui se traduisent par des contraintes établies à partir de lois de coupe et qui font intervenir les variables de coupe avec lesquelles le domaine des solutions réalisables est borné.

D'une manière générale, la détermination des paramètres de coupe nécessite une bonne connaissance des facteurs d'incidence relatifs au couple outil-matière à l'opération d'usinage et à l'environnement.

**Fonctions objectives :**

**Contraintes de problème :**

- L'avance par tour  $f$  doit être comprise entre deux valeurs extrêmes programmables sur la machine-outil :

$$f_{min} \leq f \leq f_{max} \quad (III.17)$$

- La vitesse de coupe  $V_c$  doit être dans les limites de validité du modèle de la loi de la durée de vie établie pour la couple outil-machine :

$$V_{c \min} \leq V_c \leq V_{c \max} \quad (III.18)$$

- **Limitation sur la puissance de coupe**

La puissance nécessaire à la coupe doit être inférieure à une puissance limite :

$$P = C_p \cdot V_c^b \cdot f^c \cdot a^d \leq P_{max} \quad (III.19)$$

$C_p, b, c, d$  : coefficients spécifique et exposantes de la puissance de machine

$P_{max}$  : le maximum autorisé de puissance pour toutes les opérations

- **Limitation sur la température de coupe**

Le facteur de contrôle est la température d'interface outil-coupeau qui doit être inférieure à une température  $\theta_{max}$  :

$$\theta = C_m V_c^m f^p a^q \leq \theta_{max} \quad (III.20)$$

$C_m, m, p, q$  : coefficients spécifique et exposantes de la température de coupe.

- **Limitation sur l'effort de coupe**

L'effort de coupe doit être inférieur à une force de coupe limite ;

$$F = C_f \cdot V_c^x \cdot f^y \cdot a^z \leq F_{max} \quad (III.21)$$

$C_f, x, y, z$  : coefficients spécifique et exposantes de la force de coupe.

$F_{max}$  : le maximum autorisé de la force de coupe pour toutes les opérations.

### Modèle d'optimisation retenu :

L'opération de fraisage sera répartie en plusieurs passes.

Pour chaque passe, on cherchera à déterminer la vitesse de coupe  $Vc$  et l'avance par tour  $f$ .

Par conséquent, le problème de minimisation de temps et coût d'usinage sera exprimé par le modèle suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimiser } F = (Tu, Cu) \\ \text{sous} \\ f_{min} \leq f \leq f_{max} \\ Vc_{min} \leq Vc \leq Vc_{max} \\ C_p \cdot V_c^b \cdot f^c \cdot a^d \leq P_{max} \\ C_s \cdot V_c^e \cdot f^g \cdot a^i \leq R_{max} \\ C_m \cdot V_c^m \cdot f^p \cdot a^q \leq \theta_{max} \\ C_f \cdot V_c^x \cdot f^y \cdot a^z \leq F_{max} \end{array} \right. \quad \text{(III.22)}$$

## **Chapitre IV : Simulation numérique des efforts de coupe**

### **IV.1/ Introduction :**

Après avoir étudié lors des précédents chapitres la notion de coupe et les efforts de coupe, nous allons simuler nos résultats expérimentaux à travers l'application d'une méthode de simulation. Pour notre cas, nous avons opté pour la méthode des plans d'expérience. Le but est de déterminer toutes les valeurs possibles de nos paramètres du chapitre précédent.

Cette méthode suffit seulement de prendre deux valeurs : une minimale et une maximale.

Le reste des résultats sera déterminé entre cet intervalle (minimal et maximal).

### **IV.2/ Méthode des plans d'expérience :**

Parmi les méthodes de simulations existantes, nous avons utilisé celle des plans d'expérience pour simuler les résultats du chapitre précédent.

La méthode des plans d'expériences permet une meilleure organisation des expériences accompagnant des résultats expérimentaux et ces expériences seront applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries.

Les plans d'expérience servent à optimiser l'organisation des essais afin d'obtenir le plus de renseignements possibles avec le minimum d'expériences. Elle permet également d'obtenir la meilleure précision possible sur la modélisation des résultats. [10].

#### **IV.2.1/ Définition :**

Les plans d'expériences sont une méthode de calcul d'une fonction décrivant un phénomène à  $n$  variables indépendantes basé sur les statistiques.

Sir Ronald Fisher (1890-1962), l'un des fondateurs de la statistique inductive moderne, introduit la notion de plan d'expérience. Durant les années 20, son travail se fera dans une station expérimentale agricole où il sera amené à réaliser un nombre important d'expériences. Son intérêt était de trouver une méthode réduisant le nombre d'expériences réalisées et augmentant la précision des expériences. [11].

Cependant, c'est Genichi Taguchi, ingénieur et statisticien Japonais qui va démocratiser cette méthode afin que les techniciens puissent en bénéficier.

Les principaux avantages de cette méthode sont :

- Diminution du nombre d'essais,
- Etude d'un grand nombre de facteurs,
- Détection des interactions entre facteurs,
- Modélisation des réponses étudiées,
- Précision optimale des résultats.

Cette méthode permettra une interprétation rapide et infaillible des résultats en fournissant un modèle expérimental précis du système étudié, et donnera le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. On devra suivre alors des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur.

La compréhension de cette méthode est basée sur deux notions essentielles : la notion d'espace expérimental et la notion de modélisation mathématique des grandeurs étudiées.

#### **IV.2.2/ Notion d'espace expérimentale et terminologie :**

Ce paragraphe rappelle les principaux termes utilisés dans la méthode des plans d'expériences qui sont :

- Le facteur,
- La réponse,
- La surface de réponse.

##### **A- Le facteur :**

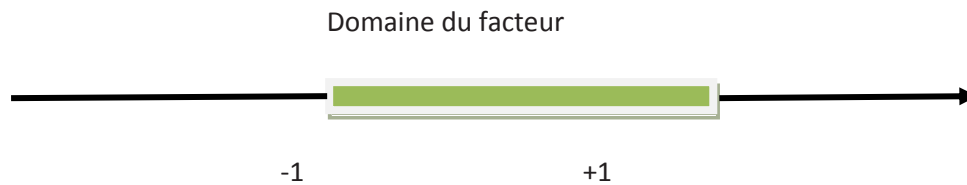
Lors de l'étude, les variables à étudier sont appelées facteurs. Ces derniers varient généralement entre deux bornes :

- La borne inférieure,
- La borne supérieure.

Lors de l'application des plans d'expérience, le facteur varie entre le niveau bas et le niveau haut qui sont représentés respectivement par -1 et + 1. L'ensemble de toutes les valeurs prises par le facteur entre le niveau bas et le niveau haut est dénommé le domaine de variation du facteur ou plus

simplement le domaine du facteur. Un facteur peut prendre plusieurs niveaux à l'intérieur de son domaine de variation.

La figure IV.1 représente le domaine de variation d'un seul facteur



**Figure IV.1 :** Domaine de variation d'un seul facteur

Avec :

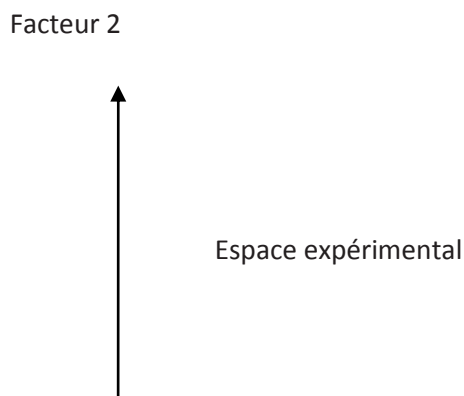
-1 : niveau bas

+1 : niveau haut

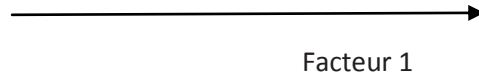
Les facteurs étudiés peuvent être des variables continues que l'on ne peut pas ordonner ou des variables discontinues que l'on peut ordonner. On parlera alors de facteurs continus, de facteurs discrets et de facteurs ordonnables.

Un facteur est représenté par un axe orienté. Si le facteur est continu, cet axe est gradué selon une certaine échelle. Si le facteur est ordonnable, on indique l'ordre choisi sur l'axe.

S'il y a 2 facteurs, le second facteur est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur : son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. L'espace créé est appelé espace expérimental.





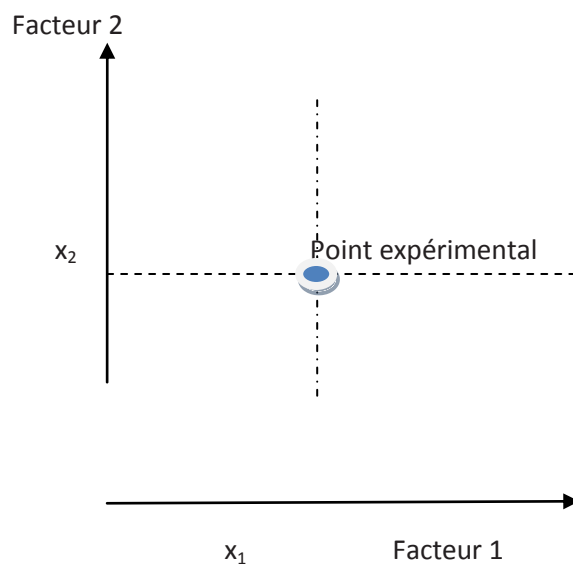


**Figure IV.2 :** Domaine de variation de deux facteurs.

Les niveaux des facteurs peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental.

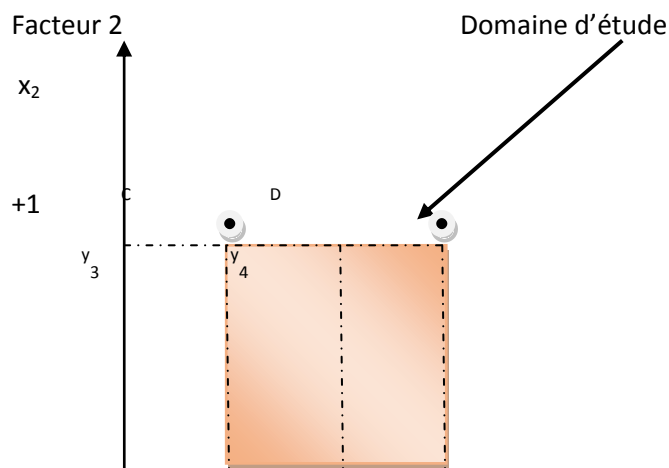
Une expérience donnée est alors représentée dans ce système d'axes par un point : Ce point est appelé point expérimental ou point d'expérience.

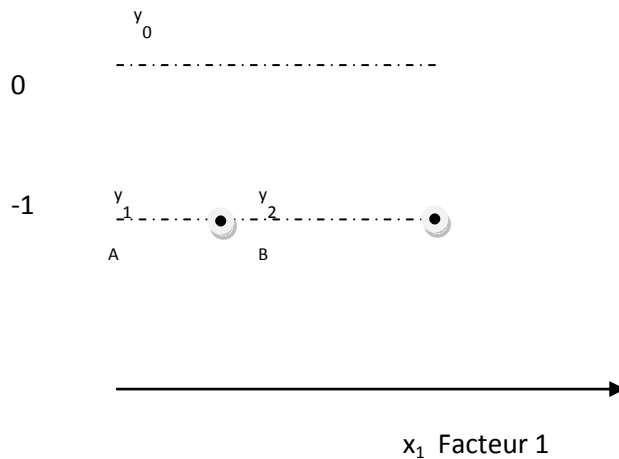
Un plan d'expériences représente un ensemble de plusieurs points expérimentaux. Ces derniers sont illustrés dans la figure IV.3



**Figure IV.3 :** Points expérimentaux dans l'espace expérimental.

La figure IV.4 schématise plusieurs expériences bien définies représentées par des points répartis dans le domaine d'étude :





**Figure IV.4 :** Domaine d'étude pour le cas de 2 facteurs.

Cette manière de représenter une expérimentation par un ensemble de points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de plan d'expériences.

**B- La réponse :**

Les grandeurs intéressant l'expérimentateur et mesurées à chaque expérience sont appelées réponses.

Le choix des réponses est un problème difficile qui ne relève pas de la théorie des plans d'expériences. Ce n'est qu'après une analyse minutieuse des phénomènes, des enjeux, des objectifs et des contraintes de l'étude que l'on peut définir la ou les bonnes réponses.

**C- Surface de réponse :**

En l'absence de toute indication sur la fonction liant la réponse aux facteurs, on se guide, à priori, par une loi d'évolution.

Cela définit le modèle mathématique à priori ou modèle postulé.

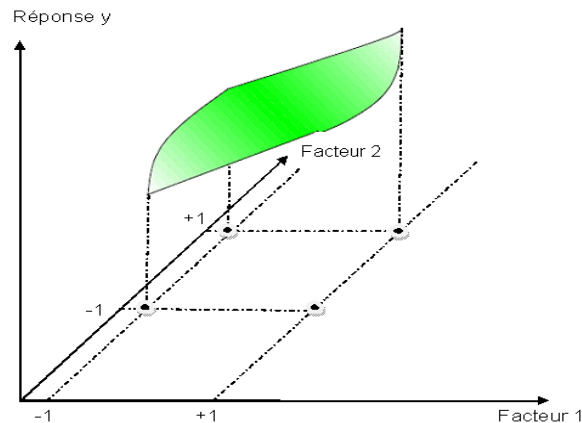
Quand on recherche le lien existant entre une grandeur d'intérêt,  $y$ , et des variables,  $x_i$ , on se référera aux plans d'expériences si l'on étudie une fonction de type :

$$Y = f(x_i) \tag{IV.1}$$

On attribue un axe à une réponse et cet axe est orthogonal à l'espace expérimental.

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

La figure IV.5 représente une surface de réponse :



**Figure IV.5 :** Représentation d'une surface de réponse.

### **IV.2.3/ Notion de modélisation mathématique et application :**

Quand on veut connaître la dépendance d'une variable de sortie F d'un cas précis, plusieurs interrogations sont posées:

- Quels sont les facteurs les plus influents ?
- Existe-t-il des interactions entre les facteurs (corrélations) ?
- Peut-on linéariser le processus en fonction de ces facteurs et le modèle ainsi obtenu est-il prédictif ?
- Comment minimiser le nombre de points de mesure du processus pour obtenir le maximum d'informations ?
- Existe-t-il des biais dans les résultats des mesures ?

La méthode du plan d'expérience répond à ces questions et sera ainsi appliquée à notre cas.

Le principe consistera à planifier nos essais en utilisant des tables ayant la propriété d'orthogonalité pour configurer les combinaisons des facteurs à tester. [27].

### **IV.3/ Modélisation de l'effort et puissance de coupe :**

On prend le cas de fraisage centré.

La modélisation par plans d'expériences, dans le cas de l'effort de coupe et la puissance de coupe, se fait par modèle mathématique sous la forme polynomiale suivante :

$$y_i = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=j+1}^k a_{ij} x_i x_j \quad (\text{IV.2})$$

La forme développée pour notre cas s'écrit :

$$y_i = a_0 + a_1 x_{i,1} + a_2 x_{i,2} + a_3 x_{i,3} + a_{12} x_{i,1} x_{i,2} + a_{13} x_{i,1} x_{i,3} + a_{23} x_{i,2} x_{i,3} + a_{11} x_{i,1}^2 + a_{22} x_{i,2}^2 + a_{33} x_{i,3}^2 \quad (\text{IV.3})$$

Avec :

$x_1$  = Avance par dent,

$x_2$  = Pression spécifique de coupe dépendant du matériau et de l'épaisseur moyenne du copeau,

Ces 2 paramètres ( $x_1, x_2$ ) agissent sur la réponse "y", donc sur l'effort de coupe et sur la puissance de coupe.

Facteur	Minimum	Maximum
Avance par dent (mm/dt)	0.50	1.50
Pression spécifique de coupe (N/mm <sup>2</sup> )	1625	2572

**Tableau IV.1 :** Facteur minimal et facteur maximal

Facteur 1	Facteur 2	Réponse 1	Réponse 2
-----------	-----------	-----------	-----------

0.50	2572	4812.00	6.54
1.50	1625	345.00	0.52
0.50	1625	2725.13	3.76
1.50	2572	582.25	0.77

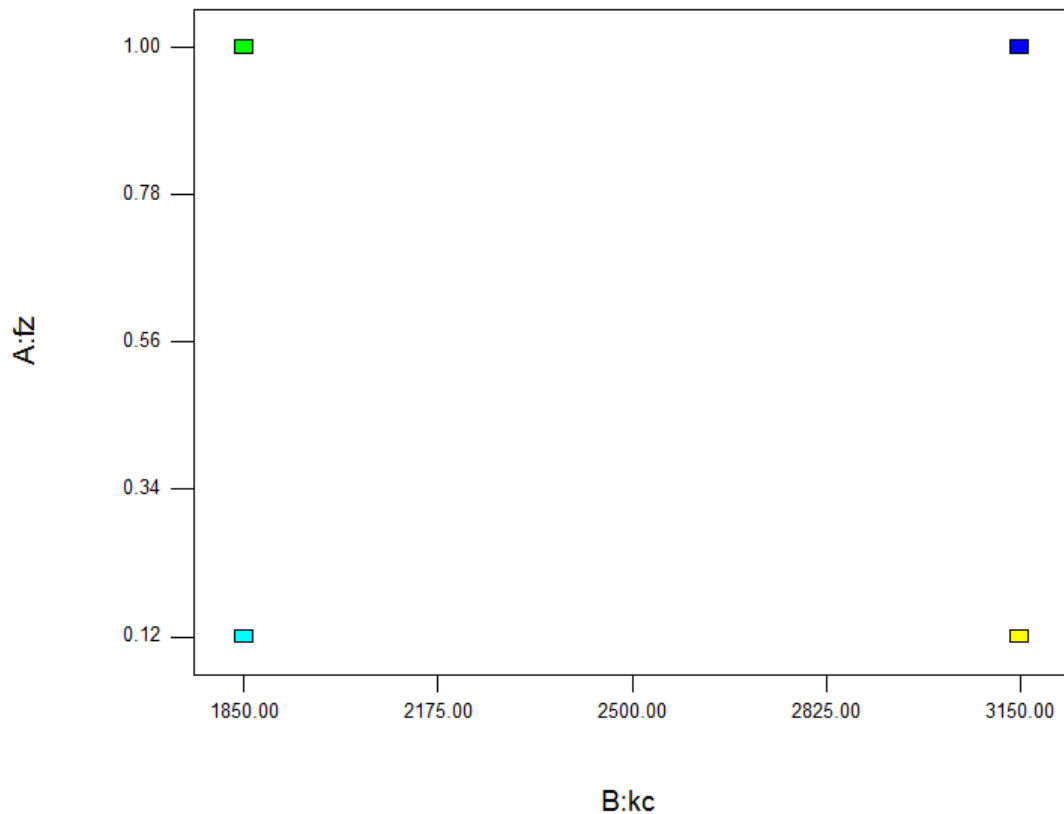
**Tableau IV.2** : Facteurs 1 et 2 et réponses

Avec :

Réponse 1 = Effort de coupe

Réponse 2 = Puissance de coupe

Ces résultats sont illustrés dans la figure suivante :



**Figure IV.6** : Domaine d'étude de l'avance et de la pression spécifique de coupe.

Dans cette figure, nous constatons l'existence des niveaux bas et des niveaux hauts. Les résultats seront donc déterminés à partir de cet intervalle.

La forme codifiée s'écrit comme suit en utilisant l'équation suivante :

$$x_i = \frac{u_i - \left( \frac{u_{\min i} + u_{\max i}}{2} \right)}{\left( \frac{u_{\max i} - u_{\min i}}{2} \right)} \quad (\text{IV.4})$$

Les valeurs doivent être comprises entre (-1) et (+1) :

Avec :

$x_i$  = Valeur codifiée à trouver,

$u_i$  = Valeur réelle du paramètre,

$u_{\max}$  = Valeur maximale du paramètre,

$u_{\min}$  = Valeur minimale du paramètre.

Ainsi,  $y$  peut être représenté de la manière suivante :

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{12} x_1 x_2 \quad (\text{IV.5}) \quad (\text{pour le plan factoriel})$$

Avec :

$a_0$  = la valeur moyenne de l'effet des deux facteurs,

$a_1$  = A l'effet de l'avance par dent,

$a_2$  = B l'effet de la pression spécifique de coupe,

$a_{12}$  = AB l'interaction entre  $a_1$  et  $a_2$ .

- **1<sup>er</sup> cas de la réponse 1 : Effort de coupe**

Facteur	Coefficient estimé
$a_0$	2118.20
$a_1$	1644.20
$a_2$	545.12
$a_{12}$	438.21

**Tableau IV.3** : Coefficients estimés des facteurs

Notre équation devient :

$$y = 2118.20 + 1644.20x_1 + 545.12x_2 + 438.21x_1 x_2 \quad (\text{IV.6})$$

- **2<sup>ème</sup> cas de la réponse 2 : Puissance de coupe**

Facteur	Coefficient estimé
---------	--------------------

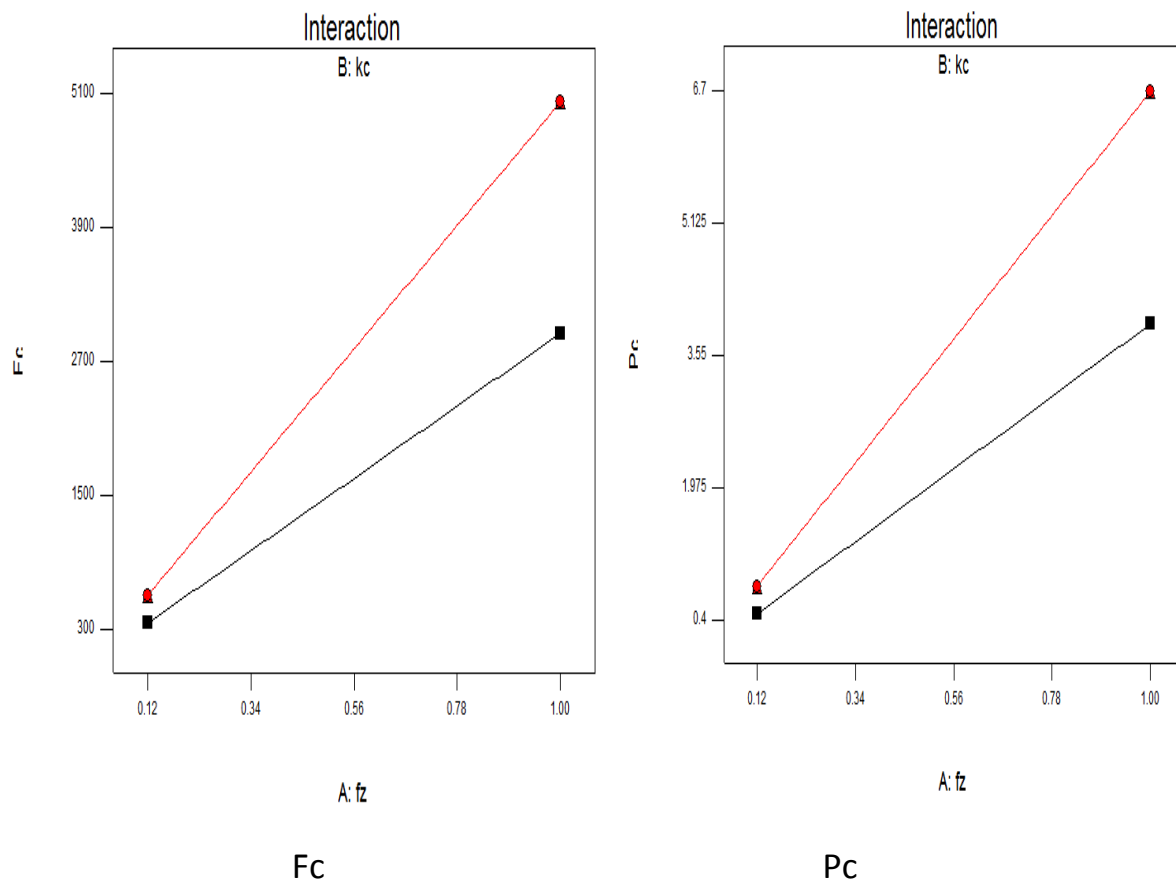
$a_0$	2.77
$a_1$	2.16
$a_2$	0.57
$a_{12}$	0.54

**Tableau IV.4 :** Les coefficients estimés des facteurs.

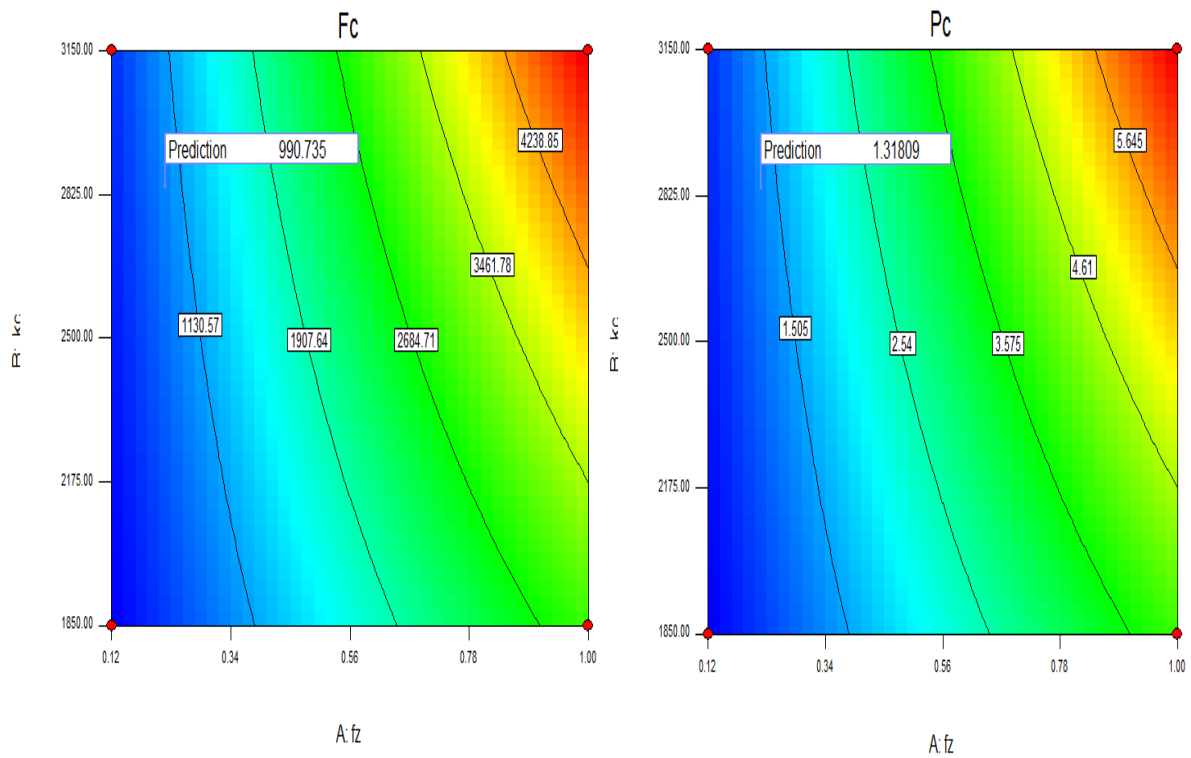
Notre équation devient :

$$y = 2.77 + 2.16 x_1 + 0.57 x_2 + 0.54 x_1 x_2 \quad (\text{IV.7})$$

De tableaux précédents et des résultats d'application des équations citées, nous constatons que conformément aux résultats du chapitre précédent, le coefficient estimé est de l'ordre décroissant.



**Figure IV.7 :** Cas minimal (low value)



**Figure IV.8 :** Contours de réponses pour Fc et Pc.

A travers les figures, on obtient toute valeur de l'effort de coupe pouvant se faire dans le domaine des expériences même en cas de non réalisation des expériences.

Après avoir procédé à une opération de surfacage au niveau de notre atelier d'usinage de notre département de mécanique, nous nous sommes intéressés à déterminer les différents facteurs.

Pour le cas de notre expérience, on a les caractéristiques suivantes :

Longueur de la pièce = 190 mm,

Diamètre de la pièce = 140 mm.

Paramètre	Valeur	Paramètre	Paramètre
$V_{c \text{ min}}$	25.00 m /min	$P_{\text{max}}$	$C_t$
$V_{c \text{ max}}$	220 m /min	$F_{\text{max}}$	$C_0$
$f_{\text{min}}$	0.25mm/tr	$\theta_{\text{max}}$	$a_1$



$f_{\max}$	0.65mm/tr	$t_R$	$a_2$
$R_{\max}$	7.00 $\mu\text{m}$	$t_h$	$a_3$
$R_{f\max}$	3.00 $\mu\text{m}$	$t_{cs}$	K

**Tableau IV.5 :** Paramètres d'usinage

Cette opération est répartie en quatre passes (04). À l'aide de la programmation géométrique, les profondeurs de passe sont calculées.

Elles sont comme suit :

$$a_1 = 1,50 \text{ mm},$$

$$a_2 = 2,5 \text{ mm},$$

$$a_3 = 3,0 \text{ mm},$$

$$a_4 = 5.25 \text{ mm}.$$

Ce travail sera minimisé simultanément sous les contraintes liées à l'effort de coupe et la puissance.

Prenons les expressions de cette optimisation issue du modèle considéré du chapitre précédent et en remplaçant les paramètres d'usinage par les valeurs du tableau précédent, on trouve :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{minimiser} \left\{ \begin{array}{l}
 T_u = 91,84 \cdot f^{-1} V_c^{-1} + 1,862 \cdot 10^{-9} \cdot a^{1,5} f^{0,27} \cdot V_c^{3,5} + 1,72 \\
 C_u = 734,76 f^{-1} V_c^{-1} + 1,638 \cdot 10^{-7} a^{1,5} f^{0,27} V_c^{3,5} + 13,76
 \end{array} \right. \\
 \\
 \text{avec les contraintes} \\
 \mathbf{0,25 \leq f \leq 0,65} \\
 \mathbf{25 \leq V_c \leq 220} \\
 \\
 \mathbf{0,373 \cdot V_c^{0,91} \cdot f^{0,78} \cdot a^{0,75} \leq 5} \quad \text{(IV.8)} \\
 \\
 \mathbf{14,785 \cdot V_c^{-1,52} \cdot f^{1,004} \cdot a^{0,25} \leq 7} \\
 \\
 \mathbf{74,96 V_c^{0,4} \cdot f^{0,2} \cdot a^{0,105} - 17,8 \leq 500} \\
 \\
 \mathbf{844 \cdot V_c^{-0,1013} \cdot f^{0,725} \cdot a^{0,75} \leq 1100}
 \end{array} \right.$$

Le modèle considéré représente un problème d'optimisation multi-objectif.

Les variables d'optimisation sont l'avance par tour  $f$  et la vitesse de coupe  $V_c$ .

Ces variables sont notées :

$$x_1 = f, \quad x_2 = V_c.$$

À l'aide d'un programme de Matlab, et en utilisant les données suivantes :

$$\mathbf{0,25 \leq f \leq 0,65}$$

$$\mathbf{25 \leq V_c \leq 220}$$

On obtient les résultats suivants :

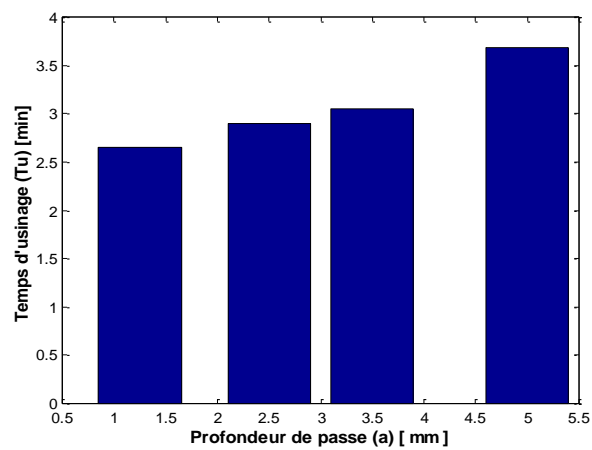
<b>a[mm]</b>	<b>f[mm /tr]</b>	<b>Vc[m/min]</b>
<b>1,50</b>	<b>0.60</b>	<b>112</b>
<b>2,50</b>	<b>0.60</b>	<b>110</b>
<b>3,00</b>	<b>0.60</b>	<b>85</b>
<b>5.25</b>	<b>0.60</b>	<b>95</b>

**Tableau IV.6 :** Résultats

L'étude théorique a montré que les objectifs considérés sont contradictoires.

La minimisation de l'un de ces objectifs conduit à la maximisation de l'autre.

Les résultats trouvés sont alors les meilleurs compromis.



**Figure IV.9 :** Comparaison des résultats

**Application la méthode des plans d'expérience :**

A travers nos résultats, nous allons essayer de déterminer toutes les valeurs possibles de nos paramètres.

A cet effet, et comme il a été cité précédemment, il nous suffit seulement de prendre deux valeurs : une minimale et une maximale. Le reste des résultats seront déterminés entre cet intervalle (minimal et maximal).

Dans notre cas : il y a 3 facteurs ( $x_1, x_2, x_3$ ) qui agissent sur les réponses ( $y_1, y_2$ ), donc sur le coût et le temps d'usinage.

Ainsi, les facteurs sont :

1. La profondeur de passe
2. La vitesse de coupe
3. L'avance

Les réponses sont

1. Effort de coupe
2. Puissance de coupe

Facteur	Unité
---------	-------

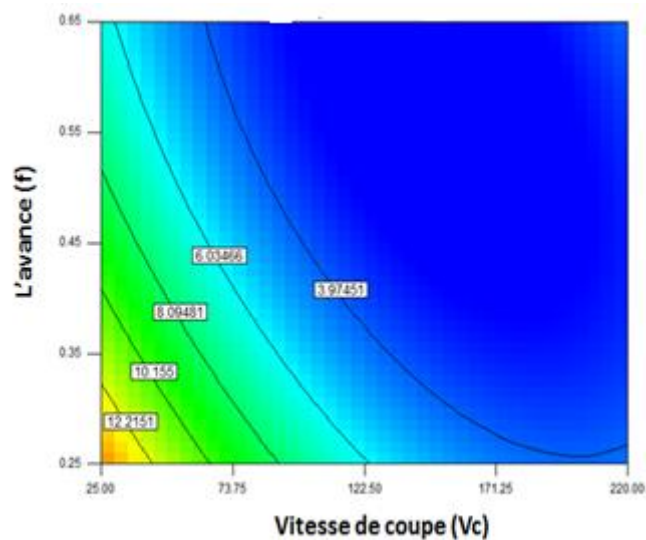
<b>Vitesse de coupe (Vc)</b>	m/min
<b>Avance (f)</b>	mm/tr
<b>Profondeur de passe (a)</b>	mm

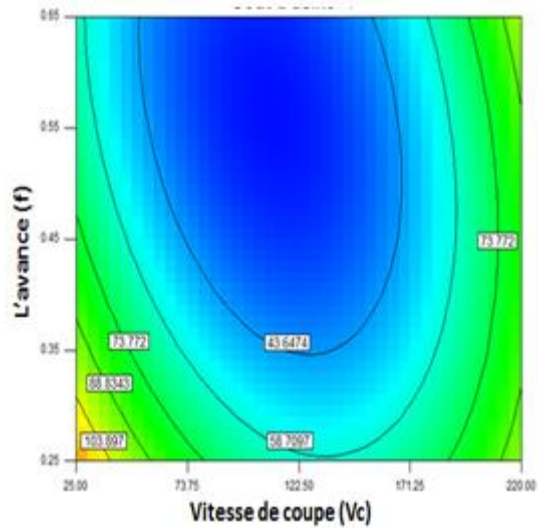
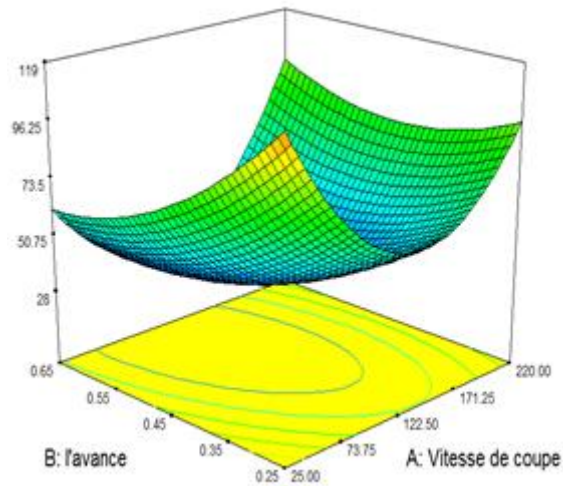
**Tableau IV.7 :** Les facteurs

Le tableau du plan d'expérimentation est dressé de la façon suivante :

<b>Facteur 1</b> la profondeur de passe (a) (mm)	<b>Facteur 2</b> La vitesse de coupe (Vc) (m/m)	<b>Facteur 3</b> L'avance f (mm/tr)
1.50	92.23	0.60
2.50	141.34	0.55
3.00	95.27	0.60
5.25	139.85	0.43

**Tableau IV.8:** Les 3 facteurs et leurs réponses





**Figure IV.10 :** Variation de la fonction objective en fonction de Vc et f

On peut constater que le calcul des efforts de coupe à partir de la mesure des différents paramètres (facteurs) ont été bien étudié. En multipliant les différentes expériences (plan d'expériences) il est possible de déduire les efforts appliqués sur l'outil (réponses).

Malgré la simplicité de la méthode des plans d'expériences, celle-ci nous donne de bons résultats comme cela est visible sur la figure IV.10.

De cette figure IV.10, on déduit l'effet simultané des paramètres ne peut pas être montré et illustré par un graphique, seule l'équation polynomiale (modèle) donnant un résultat. La prédiction de toute valeur de l'effort de coupe peut se faire dans le domaine d'expérience même en cas de non réalisation des expériences, aussi, seules deux valeurs (minimale et maximale) peuvent être utilisées pour déterminer toute valeur comprise dans ce domaine.

## Conclusion générale

Au cours de ce travail, nous avons étudié une synthèse des travaux de recherche sur les phénomènes d'usinage du procédé de fraisage et plus particulièrement lors des opérations du fraisage. Ces travaux nous ont permis de poser et d'étudier ce phénomène d'usinage pour le cas du fraisage périphérique.

Notre travail nous a permis de mettre en place les concepts théoriques liés à l'usinage par le procédé de fraisage. La forte implication des efforts de coupe dans la stabilité du système usinant nous a poussé à nous intéresser à la loi de coupe. Étant donné la complexité géométrique d'un tel outil de coupe, nous nous sommes basés sur une méthode de détermination de loi de coupe existante. Cette méthode ne prend pas en compte les effets thermodynamiques de la coupe. Leurs effets sur la stabilité de la coupe ne sont pas établis. Nous avons ainsi pu mettre au point une méthodologie propre à nos moyens d'usinage. Certains efforts pourraient être déterminés par des modèles numériques de la coupe, mais étant donné le temps alloué à notre Projet de Fin d'Etudes, il nous a semblé préférable dans un contexte de temps d'utiliser une méthode simple et rapide pouvant être déterminée expérimentalement.

Notre travail avait pour but de simuler une opération de procédé de fraisage. Notre recherche bibliographique nous a permis d'étudier les principales méthodes de modélisation de l'usinage avec enlèvement de copeaux.

De cette étude, on conclut que :

- L'effet simultané des paramètres ne peut pas être montré et illustré par un graphique, seule l'équation polynomiale (modèle) donnant un résultat,
- La prédiction de toute valeur de l'effort de coupe peut se faire dans le domaine d'expérience même en cas de non réalisation des expériences,
- Seules deux valeurs (minimale et maximale) peuvent être utilisées pour déterminer toute valeur comprise dans ce domaine.



## Bibliographie

- [1] A. Belloufi, Cours Procédés de Fabrication, Master Maintenance Industrielle, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2010
- [2] D. Gelin, M. Vincent, Elément de Fabrication, Copyright ,1995
- [3] Procédés d'usinage, Souhir Gara, ingénieur de l'ENI de Tunis
- [4] F. Taylor, On the art of metal cutting, Trans. ASME, 28 (1907) 31-350
- [5] W. Gilbert, Economics of machining, Machining theory and practice, (1950) 465-485
- [6] M. Kronenberg, Replacing the Taylor formula by a new tool life equation, International Journal of Machine Tool Design and Research, 10 (1970) 193-202
- [7] M.E.L.Bennegadi, Coupe des métaux, Polycopié de fabrication mécanique et productique, Faculté de Génie Mécanique, USTO Mohamed Boudiaf, Oran
- [8] A. Belloufi, M. Assas, Optimisation Multi-Critère des Conditions de Coupe en Fraisage, JENM 2011, Ouargla, 2010
- [9] S. Adima, Technologie des Fabrications Mécaniques, Deuxième partie, ENSEM de Casablanca, 2015
- [10] M.G.Vigier, Pratique des plans d'expérience, les éditions d'organisation, pp 190, 1988
- [11] Jacques Goupy, Plans d'expériences pour surfaces de réponse, Edition Dunod, 2001