

UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA 01
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de fin d'études
Pour l'obtention de diplôme de
Master en Fabrication Mécanique et Productique

Titre :

Application de la méthode des plans d'expérience
pour le cas des efforts de coupe d'une opération de fraisage

Proposé et encadré par :
Mr M.Temmar

Etudié par :
M.Bousnina
M.R.Bousnina
B.Ouali

Année universitaire 2020/2021

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 deux méthodes différentes : La méthode des plans d'expérience et l'application du logiciel Matlab.

Bibliographie

- [1] **A.Toumine**, Cours d'usinage, Groupe conception production, INSA de Lyon, France
- [2] **J. L. Fanchon**, Guide des sciences et technologies industrielles, Edition Nathan Paris, France, 1994
- [3] **L. Pimbaud, G. Layes et J. Moulin**, Guide pratique de l'usinage, tome 1, Edition Hachette, France. 2003
- [4] **D. Gelin, M. Vincent**, Eléments de fabrication, Les Editions Foucher, 1995
- [5] **G. Paquet**, Guide de l'usinage, les Guides Industriels Edition Delagrave, France, 2000
- [6] **Groupe Kisler France**, Mesure des efforts de coupe, www.kisler.com.
- [7] **E .J.Armarego, S.Verezub et P.Samaranayake**, The effects of coatings on the cutting process, friction, forces and predictive cutting models in machining operations, Journal of Engineering Manufacture, n° 216, pp. 347-356, 2002
- [8] **N.S. Atcherkane**, Les machines travaillant par enlèvement de métal, Société des publications mécaniques Paris, France
- [9]**L. GAZAL et R RECORDIER**, Erreurs de forme et de position, Article R1220, Technique de l'ingénieur, 1991
- [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

Chapitre I : Généralités sur l'usinage et Procédé de fraisage

I.1/ Introduction :

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.

Aujourd'hui, des machines à commandes numériques, c'est-à-dire équipées d'un système informatique, permettent d'automatiser partiellement ou totalement la procédure.

I.2/ 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, l'ingénieur 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 pose 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 contre partie, 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 Grandes Vitesses où les vitesses de rotation, des outils de fraisage par exemple, deviennent très importantes.

I.3/ Processus d'usinage :

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

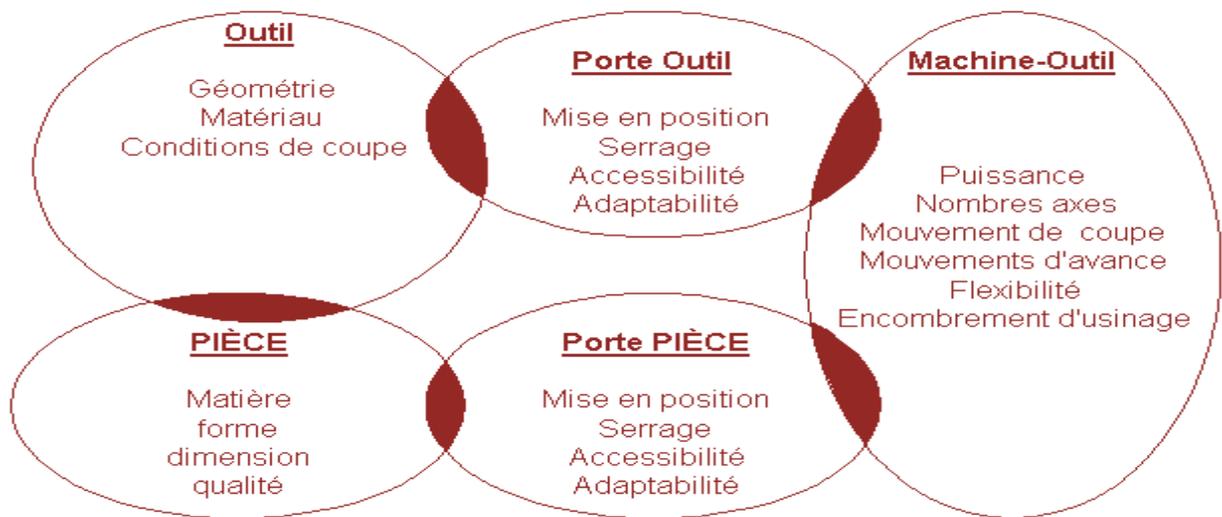


Figure I.1 : Définition du système POM : Pièce/Outil de coupe/Machine-outil

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.4/ Procédé 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 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.5/ Fraisage :

Notre travail consiste à étudier ce procédé.

Le fraisage est un procédé d'usinage par enlèvement de la matière. Il est caractérisé par le recours à une machine-outil appelée fraiseuse et l'utilisation d'un outil de coupe spécial (à arêtes multiples) appelé fraise. La fraiseuse est particulièrement adaptée à l'usinage des surfaces plates et permet également, si la machine est équipée de commande numérique, de réaliser tout type de formes mêmes complexes.

La coupe en fraisage s'effectue habituellement avec des dents placées sur le périphérique et / ou sur l'extrémité d'un disque ou d'un cylindre.



Figure I.2 : Procédé de fraisage

I.5.1/ Types de fraisage :

Le mouvement d'avance, en principe, est dirigé dans le sens contraire à la rotation, mais il peut parfois être dirigé dans le sens de la rotation.

Nous allons citer quelques types de fraisage

Fraisage en opposition : Dans le fraisage en opposition les dents de la fraise attaquent la pièce tangentiellement à la surface à usiner. Avant de pénétrer dans la matière, les dents glissent sur la pièce, en provoquant un frottement considérable. Au fur est à mesure que les dents avancent, elles pénètrent dans la matière et enlèvent un copeau en forme de virgule.

Avantage :

- L'engagement de la dent n'est pas fonction des caractéristiques de surface de la pièce usinée
- Les souillures ou écailles de la surface n'affectent pas la durée de vie de l'outil.
- Le procédé de coupe est adouci, d'autant plus que les dents de la fraise sont affûtées.

Inconvénients :

- L'outil a tendance de trembler.
- La pièce usinée a tendance d'être décalée vers le haut, ce qui implique d'importants blocages.

- Usure plus rapide de l'outil qu'en fraisant en avalant.
- Les copeaux tombent devant la fraise – évacuation difficile.
- La force ascendante a tendance à relever la pièce usinée.
- Plus de puissance est requise à cause d'une friction accrue.
- La surface de finition n'est pas bonne à cause de l'évacuation des copeaux.

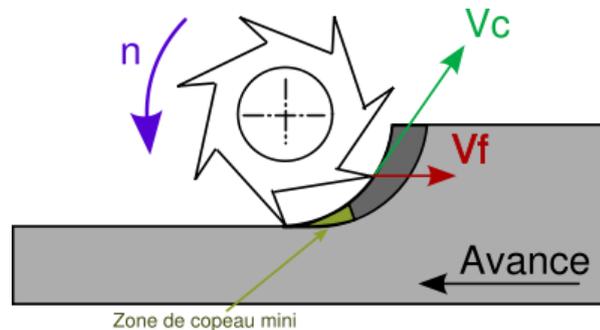


Figure I.3 : Fraisage en opposition

Fraisage en avalant : Dans le fraisage en avalant ou en concordance, les dents attaquent la surface à usiner avec une épaisseur conséquente de copeau à enlever, et subissent un choc. Ce système est adopté sur des fraiseuses qui possèdent un dispositif de rattrapage de jeu entre les vis de commande et leurs écrous.

- **Avantage :**

- Les forces de coupe vers le bas permettent de maintenir la pièce usinée en place, particulièrement pour les parties peu épaisses.
- Evacuation plus facile des copeaux – Les copeaux sont évacués derrière la fraise.
- Moins d'usure – diminution de 50% de la durée de vie de l'outil.
- Finition de surface améliorée – Les copeaux sont moins emmenés par la dent.
- Moins de puissance requise – on peut utiliser une fraise avec un angle de coupe élevé.
- Le fraisage en avalant exerce une force sur la pièce à usiner.

- **Inconvénients :**

- Lors de l'engagement des dents dans la pièce usinée les forces ont un impact important, c'est pourquoi cette opération doit avoir un montage rigide, et tout jeu doit être éliminé.
- Le fraisage en avalant ne convient pas à l'usinage de pièces ayant un mauvais état de surface, telles que les pièces de forge et moulées. En effet les écailles sur la matière causent une usure excessive et abîment les dents, réduisant ainsi la durée de vie.

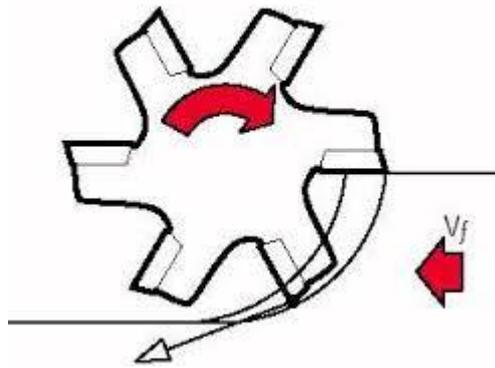


Figure I.4 : Fraisage en avalant

Rainurage :

L'usinage des rainures ou encoches est une opération typique du fraisage. La rainure peut être exécutée avec une fraise à trois tailles sur fraiseuse horizontale, ou avec une fraise à queue sur fraiseuse verticale. Au moyen de la fraise à trois tailles on obtient une rainure mieux usinée, surtout sur les flancs, qui ont de ce fait, une meilleure géométrie que celle obtenue par des fraises à queue. En effet, cette dernière peut être sujette à une rotation légèrement excentrée et à de petits fléchissements latéraux, ce qui a pour résultats de rendre moins régulière la face usinée et la géométrie des rainures. Dans certains cas particulier, comme celui de la figure B par exemple, il n'est pas possible d'employer une fraise disque et on doit nécessairement recourir à l'utilisation d'une fraise à queue.

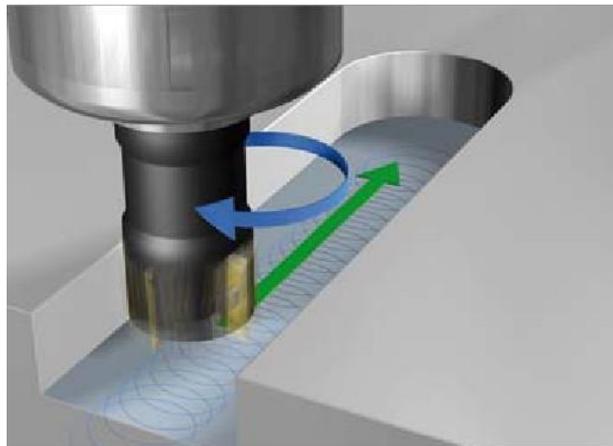


Figure I.5 : Rainurage

I.5.2/ Fraise :

L'outil employé pour le fraisage est la fraise. La fraise est un outil multiple, formé par plusieurs taillants disposés radialement sur une circonférence. Au moyen d'une fraise, il est possible d'usiner des surfaces planes ou courbes, des rainures, des dentures, etc.

I.5.3/ Caractéristiques d'une fraise :

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

a-Sens de coupe :

Les fraises sont dites « en coupe à droite » si, en vue de dessus par rapport à la broche de la machine, elles tournent dans le sens horaire appelé aussi sens anti-trigonométrique). C'est 95 % des cas. Elles sont dites « en coupe à gauche » si elles tournent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (sens antihoraire ou trigonométrique) environ 5 % des fraises 2 tailles.

b-Type de denture :

L'inclinaison des arêtes de coupe peut varier d'une fraise à l'autre, la fraise peut être à :

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

c-La forme :

Suivant le profil des génératrices par rapport à l'axe de l'outil, on distingue : les fraises cylindriques, coniques et les fraises de forme.

I.5.4/ Principaux éléments géométriques de la fraise :

La forme géométrique des taillants d'une fraise, est soumise, comme pour tous les outils qui travaille par enlèvement de copeaux, à trois angles fondamentaux formés par les faces A et P qui déterminent les angles de coupe ou angles d'affutage α , β et γ .

Pour les fraises à denture hélicoïdale, on tient compte de l'angle δ , qui détermine l'inclinaison de l'arête tranchante par rapport à l'axe de la fraise, et qui est appelé angle d'attaque.

a-Angle d'hélice ou angle d'attaque δ : C'est l'angle compris entre l'axe longitudinal de la fraise et l'inclinaison de la denture. L'angle sera faible (environ 5°) pour l'usinage de métaux à copeaux courts tels que la fonte et ira en augmentant pour les métaux légers (aluminium) (25°) ou l'usinage des aciers spéciaux : inox par exemple.

b-Angle de taillant β : C'est l'angle qui constitue la partie coupante de la dent de la fraise. Plus il est aigu, plus il est fragile.

c-Pente d'affûtage ou Angle de coupe γ : 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. L'angle de coupe est plus important pour l'aluminium que pour la fonte par exemple.

d-Angle de dépouille α : C'est l'angle qui évite le frottement (talonnage) de l'arrière de la dent sur la partie de la pièce déjà usinée.

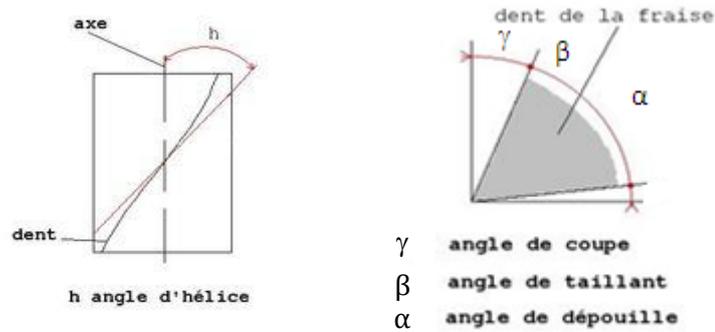


Figure I.6 : Angles d'affutages

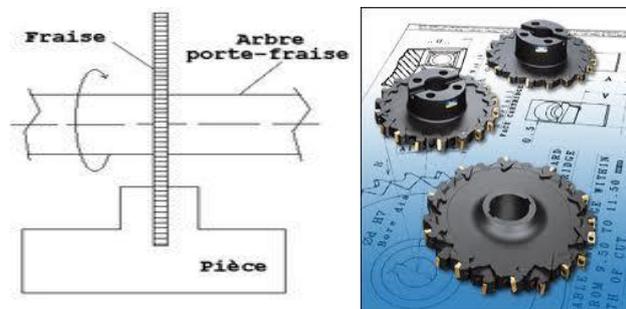
I.5.4/ Exemples des principales fraises :

Les fraises peuvent être à queue ou à trou. On distingue principalement quatre familles de fraises :

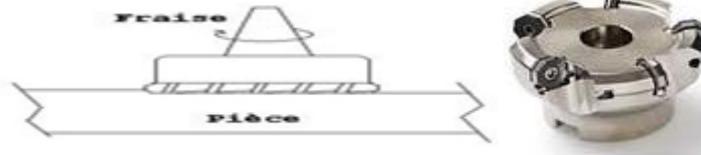
- Les fraises à surfacer et à contourner.
- Les fraises disques.
- Les fraises à rainurer.
- Les fraises de profil.

Ci-joint, quelques modèles de fraise :

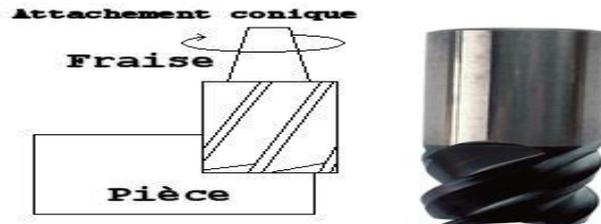
a) La fraise scie :



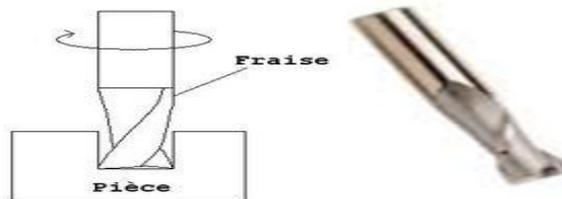
b) La fraise à surfacer :



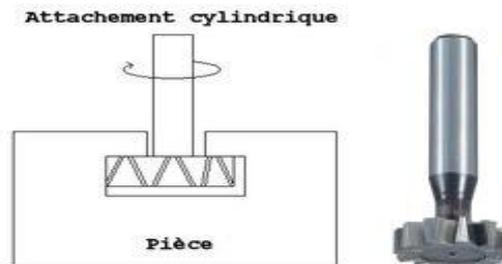
c) La fraise à 2 tailles :



d) La fraise à rainurer 2 dents :



e) La fraise pour rainures en T :

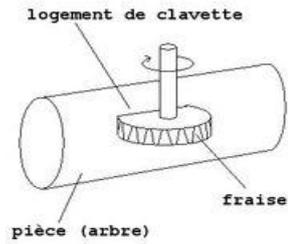


Cette fraise qui ressemble à une fraise 3 tailles, sert à usiner les deux parties qui sont en retrait dans une rainure en T.

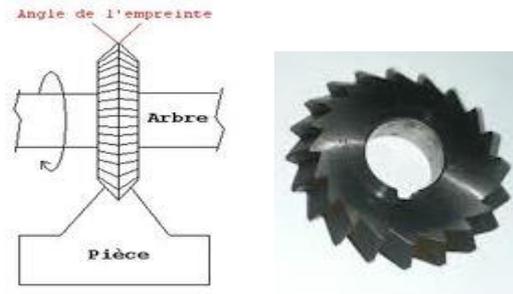
Les rainures en T sont très employées sur les machines-outils (tables) et également sur de nombreux outillages pour la fixation de matériels.

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.

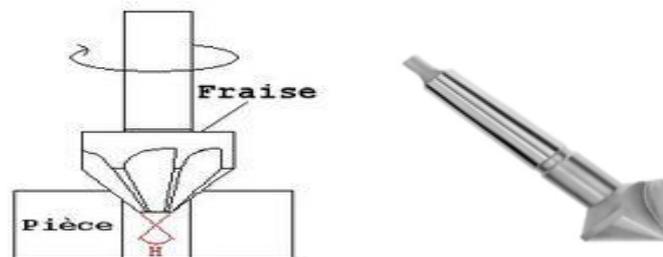
f) La fraise pour logement de clavette-disque :



g) La fraise isocèle :



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



Pour le montage, le plus classique est le montage : mandrin, cône.

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 I.7 : Montage de fraises

I.6/ Fraiseuses :

Les machines-outils utilisées pour le fraisage sont appelées fraiseuses. Ces fraiseuses se **caractérisent par la position de l'arbre porte fraise ou de la broche, et par la possibilité de** mouvement de la table porte-pièce ainsi que par leur rendement (production unitaire ou de série). On distingue essentiellement trois types de fraiseuses :

- Les fraiseuses mono broche d'outillage (horizontale, verticale et universelle)
- Les fraiseuses mono broche de production (à cycle, à commande numérique...)
- Les fraiseuses multibroches (à table rotative, à banc fixe...).

A/ 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.

B/ 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.

C/ 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.

D/ 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 pièces légères, mais de formes compliquées.

E/ 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.

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

G/ 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.

La figure suivante représente une fraiseuse universelle.

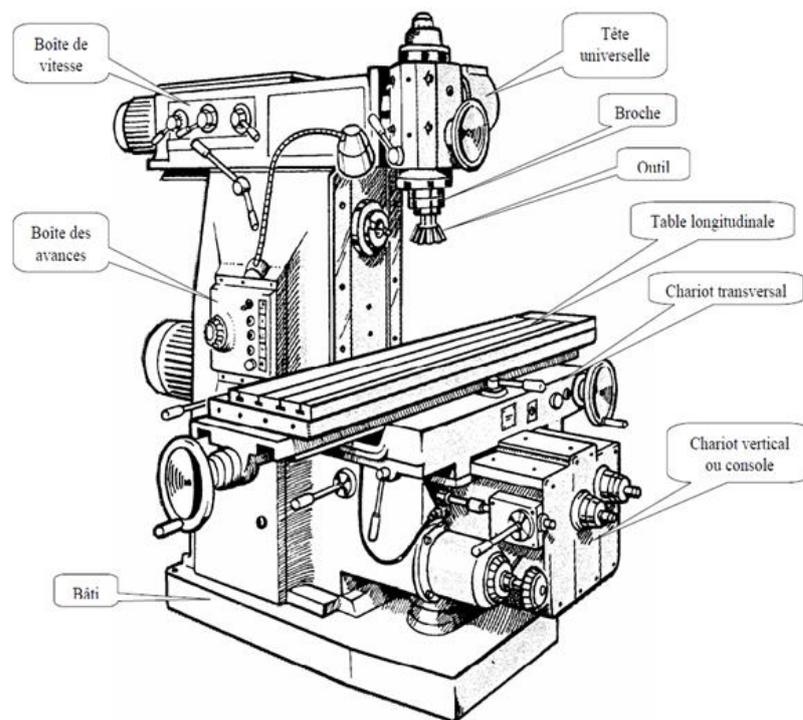


Figure I.8 : Fraiseuse universelle

I.7/ Mouvements relatifs entre l'outil et la pièce à usiner :

Les mouvements relatifs, entre l'outil et la pièce, exigés par le fraisage sont le mouvement de coupe, le mouvement d'avance et le mouvement de pénétration.

- **Mouvement de coupe M_c :** C'est le mouvement principal qui produit l'enlèvement de la matière, il est donné par la rotation de l'outil.
- **Mouvement de pénétration M_p :** C'est le mouvement rectiligne qui règle la profondeur de la pénétration dans la matière. Il est généralement donné à la pièce, mais dans certaines machines particulières il est donné à l'outil.
- **Mouvement d'avance M_a :** C'est le mouvement rectiligne donné à la pièce pendant l'usinage. L'outil rencontre ainsi constamment de la matière à enlever.

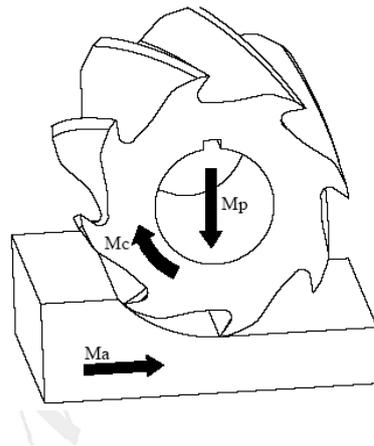


Figure I.9 : Mouvements relatifs en fraisage

I.8/ Lubrification :

La lubrification ou le graissage est un ensemble de techniques permettant de réduire le frottement, l'usure entre deux éléments en contact et, en mouvement l'une par rapport à l'autre. Elle permet souvent d'évacuer une partie de l'énergie thermique engendrée par ce frottement, ainsi que d'éviter la corrosion... Dans ces situations, les écoulements fluides sont parallèles aux surfaces, ce qui simplifie leur description et leur calcul (théorie de la lubrification).

On parle de lubrification dans le cas où le lubrifiant (mécanique) est liquide et de graissage dans le cas où il est compact.

En mécanique, on lubrifie les pièces de métal ou de céramique avec un corps gras, comme de l'huile ou de la graisse. Les lubrifiants sont des produits liquides, pâteux ou solides d'origine minérale (hydrocarbures pour l'essentiel), animale, végétale ou synthétique.

Son rôle permet de changer le coefficient de frottement entre deux éléments afin de faciliter le glissement ou le roulement entre elles ainsi que d'éviter ou de minimiser l'usure et les échauffements.

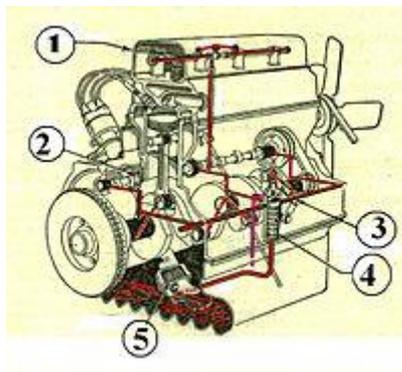
Les lois physiques qui régissent ce domaine (la tribologie) sont très complexes et sont fondées à la fois la résistance des matériaux et la mécanique des fluides. Il est intéressant de comprendre des phénomènes tels que :

- la formation d'un coin d'huile ou d'un film d'huile entre deux pièces en mouvements,
- la notion d'épilamen,
- le changement de propriétés physiques des huiles en fonction de la pression et de la température.



Figure I.10 : Lubrification ponctuelle

La première méthode consiste à mettre le lubrifiant avant le mouvement ou durant le mouvement. Cela peut se faire de manière manuelle, par exemple en déposant des gouttes d'huile avec une burette, en plaçant de la graisse avec les doigts (si celle-ci n'est pas toxique), ou bien en appliquant le lubrifiant avec un pinceau. C'est par exemple le cas de la lubrification d'une chaîne de vélo, des gonds d'une porte... Cette lubrification peut aussi s'effectuer par projection à l'aide d'un aérosol (bombe).



- 1=culbuteurs,
- 2=Arbre à cames,
- 3=vilebrequin,
- 4=filtre,
- 5=pompe

Figure I.11 : Lubrification continue

La lubrification continue touche tous les mécanismes en mouvement et est constituée par un système de conduites qui amène, par l'intermédiaire d'une pompe, le lubrifiant vers les divers organes (paliers, coussinets, roulement à billes) à lubrifier. Le lubrifiant retourne au bac pour y être réfrigéré puis remonte en traversant un filtre qui retient les impuretés.

- C'est le cas notamment de l'huile pour un moteur à combustion interne. Le lubrifiant se dégrade, en particulier sous l'effet de la forte chaleur, et se charge en débris d'usure : il faut donc vidanger régulièrement le réservoir et le remplir avec du lubrifiant neuf. Dans certains

cas (qui a tendance à se généraliser), l'huile passe par un radiateur de refroidissement, avant de retourner lubrifier les organes qui utilisent le même fluide (moteur, boîte-pont, turbo).

- Dans le cas des moteurs à deux temps, le carburant est mélangé avec un pourcentage d'huile spéciale (appelée huile 2 temps) qui assure le graissage des organes en mouvement. Il n'y a pas, ensuite, de récupération d'huile, car celle-ci est brûlée en même temps que le carburant.
- Sur les machines fixes par rapport au sol, on peut également faire tremper la mécanique dans un lubrifiant liquide, on parle alors de *bain d'huile* ou de barbotage. Comme dans le cas des moteurs thermiques, le carter doit être rempli en respectant les niveaux mini et maxi.
- Le graissage à bague : le système est utilisé dans les paliers pour le graissage des tourillons et consiste en une bague, posée librement sur l'arbre, et d'un diamètre suffisamment grand pour tremper dans un réservoir à la partie inférieure du palier. Pendant le mouvement de rotation de la bague, l'huile qui y adhère est entraînée pour venir graisser le tourillon.
- L'usinage des pièces mécaniques nécessite une lubrification afin d'assurer le refroidissement des outils et des pièces et de limiter les efforts de coupe au strict nécessaire permettant l'enlèvement de matière (copeaux).

Dans le cas d'une lubrification automatique, l'appareil peut être équipé d'un bac de récupération qui permet de retraiter le lubrifiant en excès ou usagé.

Les machines-outils : tour, fraiseuse, etc, .., outre le lubrifiant pour le fonctionnement du mécanisme, utilisent des huiles de coupe pour faciliter le refroidissement de la pièce usinée et de l'outil, le glissement du copeau sur l'outil, augmenter la vitesse de coupe.

- Lubrification continue : Le lubrifiant est généralement versé en jet continu et ensuite, récupéré dans un bac sous la machine, filtré et renvoyé dans le circuit. Le fluide employé est de l'huile de synthèse ou un mélange, de 5 à 10 % d'huile soluble (lubrifiant) et d'eau (réfrigérant), appelé *eau de savon* de par sa couleur laiteuse.
- Lubrification ponctuelle : peut aussi se faire de manière automatique, en général sous forme d'aérosol ; c'est le cas par exemple de l'usinage avec un tour à commande numérique. Ou avec un pinceau et un fluide spécifique pour le métal à usiner : huile de lin, pétrole (pour l'aluminium).

Chapitre II : Généralités sur la coupe des métaux

II.1/ Principe de la coupe des métaux :

Lors d'un usinage par enlèvement de matière, on se retrouve, dans la majorité des cas, dans la configuration suivante figure II.1 :

- Une lame d'outil 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.

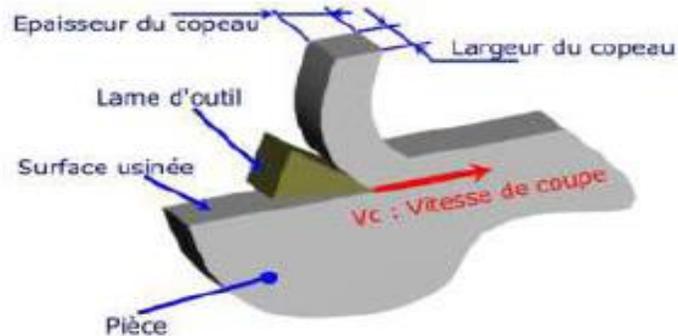


Figure II.1 : Configuration de la coupe.

Un examen plus approfondi du mécanisme de la coupe nous conduit à observer qu'il procède grâce à trois mouvements principaux perpendiculaires entre eux figure II.2.

Mouvement de coupe « MC » : C'est un mouvement qui participe directement au détachement de la matière sous forme de copeaux pendant la course de travail.

Mouvement d'avance « Ma » : C'est le mouvement qui a pour but de décaler latéralement une quantité à dite avance, pour que l'outil puisse à la nouvelle course de travail détacher d'autres copeaux.

Mouvement de pénétration « Mp » : C'est le mouvement qui détermine l'épaisseur de la couche de métal à enlever à chaque opération qui prend le nom de passe.

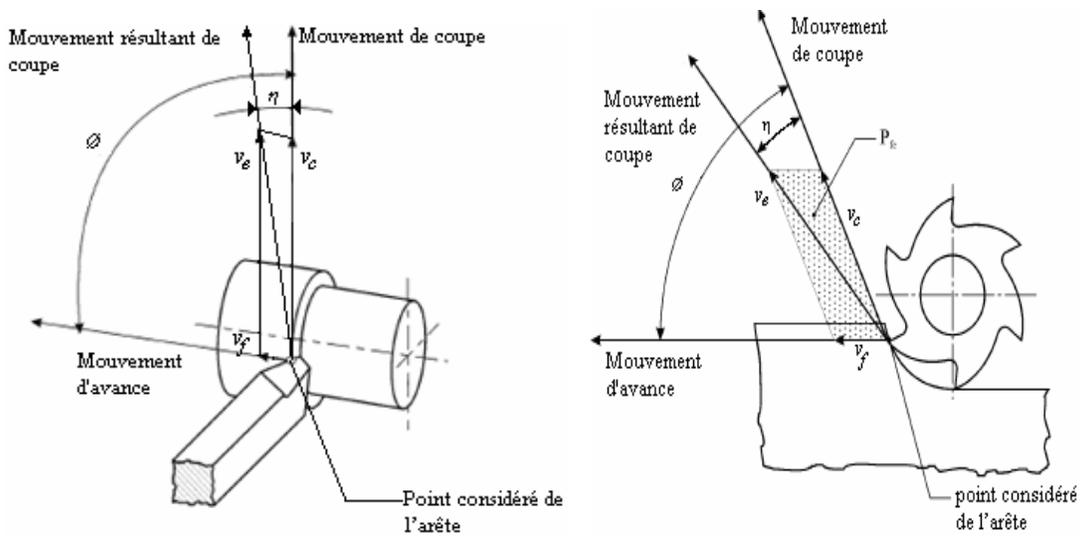


Figure II-2 : Les mouvements de coupe

Pour obtenir un travail satisfaisant (bon état de la surface usinée, rapidité de l'usinage, usure modérée de l'outil, ...) on doit régler les paramètres de la coupe ; où, il y a plusieurs critères qui permettent de définir les paramètres de la coupe, comme le montre la figure suivante :

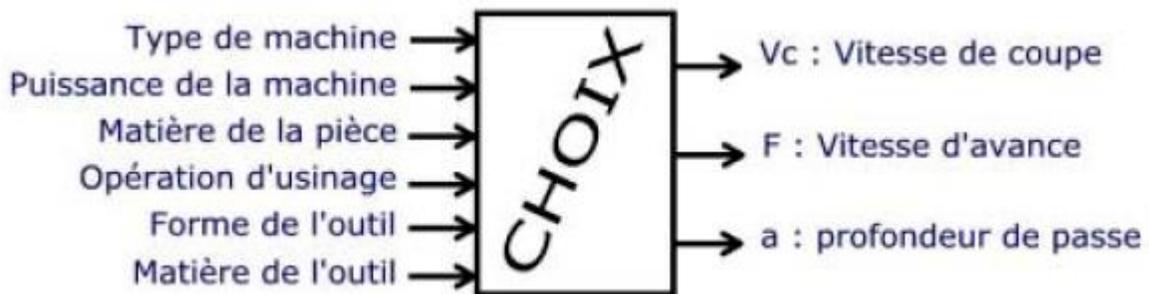


Figure II.3 : Les choix des paramètres de coupe

- Suivant le type d'opération à réaliser, il faut choisir la méthode d'usinage, et donc choisir la machine à utiliser. Donc il faut choisir entre tournage, fraisage ou perçage.
- Pour la matière il est évident que les efforts de coupe ne sont pas les mêmes si vous usinez une pièce en polystyrène ou en acier. Donc la matière influe sur des choix relatifs à la puissance machine (entre autre).
- En ce qui concerne l'opération d'usinage c'est la même idée que pour le type de machine. Idem pour la forme de l'outil. Cependant, la matière de l'outil influe sur l'usure de l'outil et sa durée du fait que c'est l'outil qui doit usiner la pièce et non l'inverse.

Tous ces critères sont intimement liés et étant donné que l'objectif final est d'obtenir une pièce usinée dans de bonnes conditions. Pour cela, il faut déterminer certains paramètres spécifiques :

- La vitesse de coupe : V_c
- La vitesse d'avance : F (ou V_f)
- La profondeur de passe : a

II.2/ Paramètres de coupe :

Les paramètres de la coupe, représentés dans la figure II.4, sont, d'une part, des grandeurs qui caractérisent les déplacements de l'outil et de la pièce usinée (**paramètres de coupe cinématiques**) et, d'autre part, les valeurs des surépaisseurs d'usinage et des dimensions de coupe (**paramètres de coupe géométriques**).

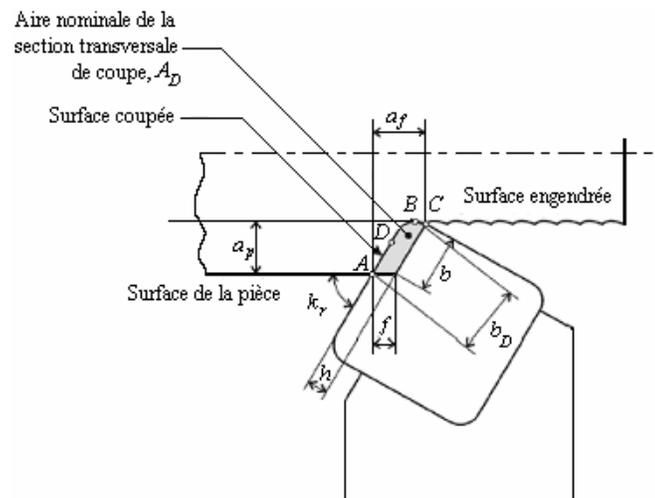


Figure II.4 : Dimensions de coupe dans le cas de tournage

Où :

a_p – profondeur de coupe ; a_f – engagement de l'arête ; f – avance ; h – épaisseur de coupe ;
 b – largeur de coupe ; b_D – largeur nominale de coupe ; k_r – angle de direction d'arête ;
 D – point principal de l'arête. (Ces sont des paramètres géométriques de coupe.)

On appelle surépaisseurs d'usinage général la couche de métal ou de matériau enlevée au cours de l'exécution de toutes les opérations d'usinage de la surface donnée de la pièce. Elle est égale à la différence de dimension de l'ébauche et de la pièce finie d'usinage. On appelle surépaisseur d'usinage inter opérationnelle la couche du métal ou de matériau qui reste après la passe donnée pour l'exécution de la passe d'usinage successive. Le choix des surépaisseurs est une opération très importante. La grandeur de la surépaisseur intervient dans la quantité des copeaux. L'enlèvement

des couches superflues de métal demande du temps, de l'énergie électrique, etc. les surépaisseurs trop grandes diminuent donc la productivité et la rentabilité d'usinage. Il faut chercher à diminuer les surépaisseurs d'usinage générale et inter opérationnelles, surtout dans les conditions de grande et très grande série. Par les dimensions et les formes, les ébauches doivent s'approcher au maximum de la pièce finie.

La détermination des paramètres de coupe à une grande importance dans la production industrielle, car a titre d'exemple des régimes réduits augmentent considérablement le temps d'exécution de la pièce à usiner, et élèvent le prix de revient, aussi bien des régimes élevés ne sont pas avantageux non plus, parce que l'outil s'use rapidement, ce qui nous oblige à le changer très souvent, donc on aura toujours le même résultat que précédemment (augmentation du prix de revient de la pièce). Pour cela, les paramètres adoptés doivent être optimums pour assurer un prix de revient minimum de la pièce avec une plus grande productivité.

II.4.1/ Vitesse de coupe « Vc » :

C'est le déplacement d'un point de l'arête tranchante de l'outil par rapport à la surface de coupe en une unité de temps.

II.4.1.1/ Vitesse linéaire d'un point en rotation :

On l'évalue en parcours circconférentiel, c'est à dire en longueur de circonférence de la pièce parcourue. En désignant par **D** le diamètre du cercle décrit en millimètres [mm], par **N** la vitesse de rotation en tour par minutes [tr/min] et par **Vc** la vitesse linéaire en mètre par minute [m/min], on aura :

a- Exemple de tournage :

En tournage, le mouvement de coupe anime principalement la pièce (pièce tournante).

$$Vc = \frac{\pi \times D \times N}{1000} [m/min] \quad (II.1)$$

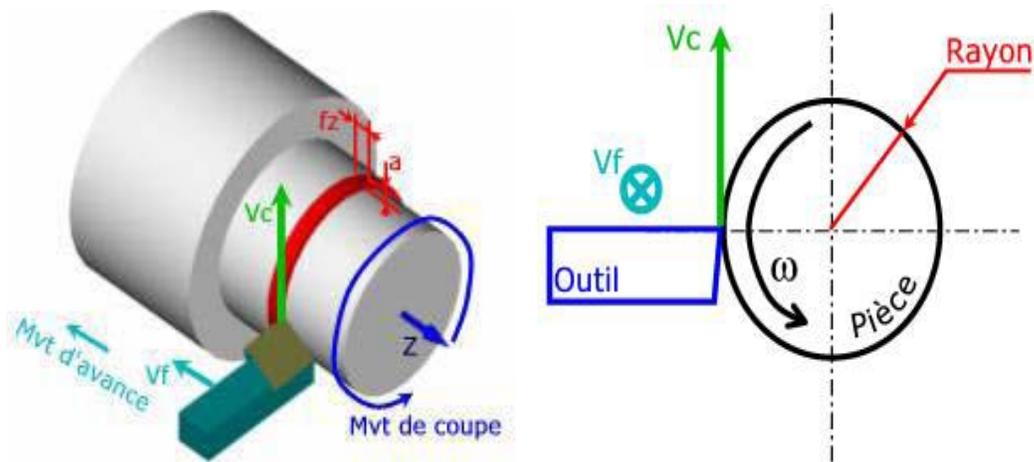


Figure II.5 : Vitesse de coupe en tournage.

On en déduit la vitesse de coupe V_c , qui déterminera la vitesse de rotation de la pièce que l'on doit régler sur machine.

$$N = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times D} \quad [tr/min] \quad (II.2)$$

Le diamètre « D » correspond à la position de la pointe de l'outil, ce qui engendre deux cas de figures :

- On usine parallèlement à l'axe de broche. La surface générée est un cylindre
 $D =$ diamètre du cylindre.
- On usine perpendiculairement à l'axe de broche. La surface générée est un plan
 $D = 2/3$ diamètre maxi du plan.

b- Exemple de fraisage :

En fraisage, le mouvement de coupe anime l'outil (fraise tournante), la même formulation est applicable ; cependant le diamètre « D » correspond au diamètre de la fraise.

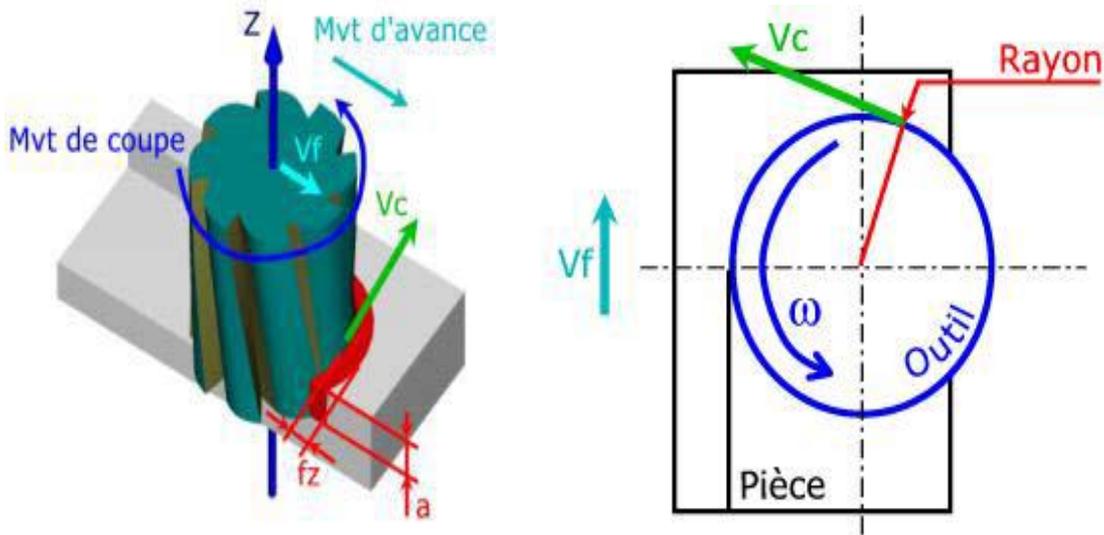


Figure II.6 : Vitesse de coupe en fraisage.

II.4.1.2/ Vitesse de coupe dans le cas du mouvement de coupe rectiligne :

Le mouvement de coupe rectiligne est généralement alternatif, car il ne peut être continu. A chaque course de travail, la vitesse augmente depuis zéro jusqu'à la valeur maximale.

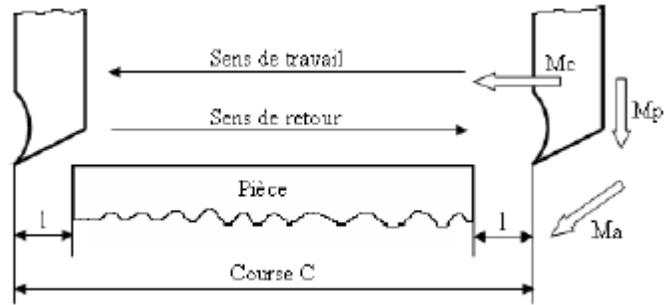


Figure II.7 : Vitesse de coupe en rabotage

On admet alors que la vitesse est constante pendant toute la course de travail **C** et qu'elle correspond à la vitesse moyenne. En mouvement alternatif (rabotage par exemple), un battement comprend une course de travail (détachement du copeau) et une course de retour (à vide). On admet que la course travail et la course retour sont effectuées dans des temps égaux. Le nombre de battements par minute est désigné par **N** [Bat/min] et la course **C** par [mm], la longueur de travail parcourue par l'outil sera :

$$e = C \times N \text{ [mm/min]} \tag{II.3}$$

Vu que la course de travail est égale à la course retour et que les deux courses sont effectuées dans des temps égaux, d'où $t = 1/2$. Se qui nous donne une vitesse de coupe :

$$V_c = e / t = 2 \times C \times N \times 10^{-3} \text{ [m/min]} \quad (\text{II.4})$$

II.4.2/ Vitesse d'avance V_f et avance par tour f :

La vitesse d'avance V_f , est une vitesse instantanée du mouvement d'avance du point considéré de l'arête de coupe par rapport à la pièce figure II.8. Elle est exprimée soit en [mm/mn] soit en [mm/tour].

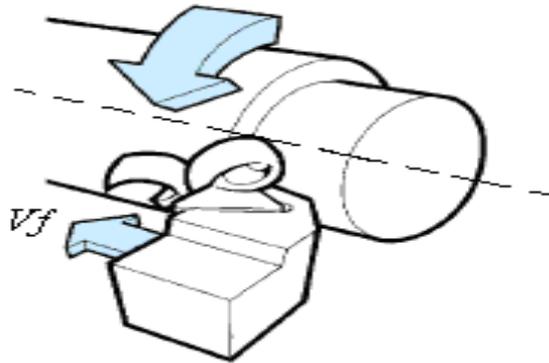


Figure II.8 : Vitesse d'avance V_f

L'avance notée f (figure II.9), correspond à la différence de déplacement de l'outil entre deux itérations ou deux révolutions (une révolution de la pièce dans le cas du tournage).

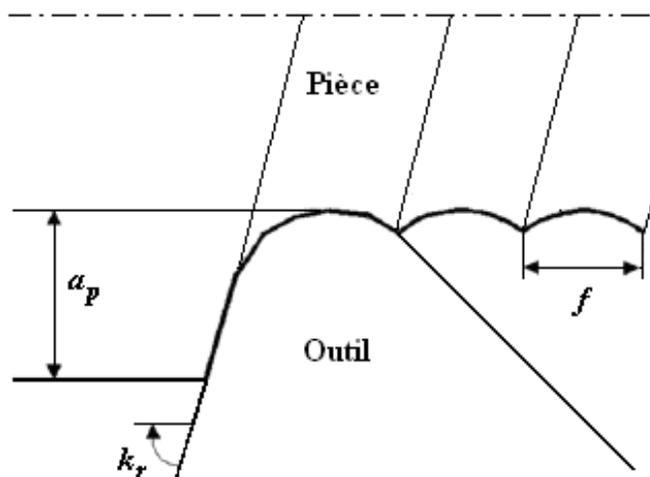


Figure II.9 : L'avance f dans le cas de tournage

II.4.2.1/ Vitesse d'avance V_f en tournage et fraisage :

Dans le cas de tournage la vitesse d'avance V_f [mm/min] est donnée par la formule suivante :

$$Vf = fz \times N \text{ [mm/min]} \quad (\text{II.5})$$

fz en [mm/ (tr. dent)] correspond à la capacité de coupe de l'arête coupante pour une rotation de 1 tour de la pièce. En d'autre terme, c'est la distance que l'arête de coupe va parcourir à chaque tour de la pièce.

En **fraisage** la vitesse d'avance Vf [mm/min] est égale à :

$$Vf = Z \times fz \times N \text{ [mm/min]} \quad (\text{II.6})$$

Où Z est le nombre de dents de la fraise, fz en [mm/ (tr. dent)] correspond à la distance que la dent va parcourir à chaque tour de la fraise.

II.4.3/ Profondeur de passe :

La profondeur de passe notée a en [mm], correspond à la longueur de l'arête de coupe engagée dans la matière, dans le cas de la coupe orthogonale, et à la différence entre le rayon de la pièce avant et après usinage, dans le cas du tournage. La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arête de l'outil.

Les différents types de profondeurs :

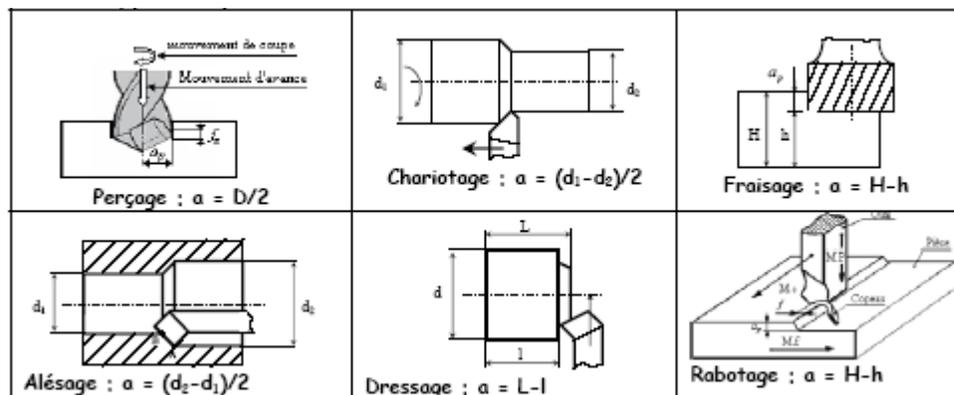


Figure II.10 : Profondeur de passe

II.5/ Formation et types de copeau :

L'analyse des mécanismes de formation du copeau lors du processus d'usinage est le pas fondamental pour toute étude dans le domaine de la coupe, à titre d'exemple l'optimisation du choix des outils et prédiction de leur durée de vie. Durant ce processus, différents phénomènes peuvent avoir lieu tels que les déformations plastiques, le contact et le frottement entre l'outil et la

pièce, les effets thermiques, l'usure, etc. Si l'on examine la courbe de traction d'un acier, on observe trois zones :

- **oa** : Déformation élastique (réversible)
- **ab** : Ecoulement du métal
- **bc** : Déformation plastique (irréversible)
- à partir de **c** : Rupture

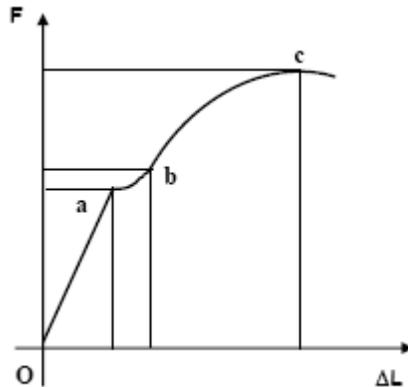


Figure II.11 : Courbe de traction d'un acier.

Dans le cadre de la formation du copeau, nous nous intéresserons à la déformation plastique, qui consiste dans le glissement de certaines couches de la matière par rapport à d'autres suivant des plans de cisaillement. Ces glissements provoquent :

- La modification de la forme, des dimensions et des positions relatives des grains du métal.
- Un échauffement important et modifications des propriétés de la matière à usiner.

La figure suivante résume le principe de la formation du copeau :

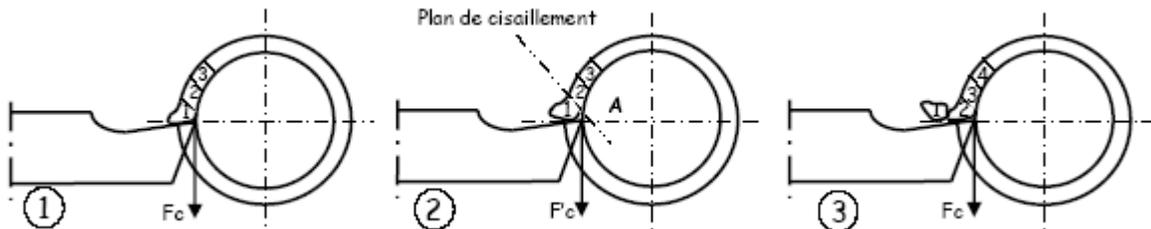


Figure II.12 : Mécanisme de la formation du copeau

- **En 1** : l'arête coupante a pénétré dans la matière qui, ne pouvant s'écouler normalement, vient s'arc-bouter sur la face de coupe et se trouve fortement comprimée. L'effort de coupe augmente jusqu'à la valeur maximale **F_c**.

- **En 2** : une crique due au cisaillement consécutif à la compression se manifeste en **A**, et la portion de copeau **1** glisse sur la face de coupe, accentuant l'importance de la crique. L'effort de coupe diminue simultanément jusqu'à la valeur minimale **F_c'**.

- **En 3** : le copeau est de nouveau comprimé et l'effort de coupe augmente.

Le cycle est continu, et les efforts dus à l'action de coupe varient périodiquement très nettement pour les aciers, avec une plus grande fréquence pour la fonte (copeaux parcellaires), plus faiblement pour les métaux tendres.

Les copeaux sont classés selon trois types de copeaux :

a) Copeau discontinu :

A lieu pendant l'usinage de l'acier à vitesse de coupe faible **V_c = (5 à 10) m/min**. Les éléments du copeau sont liés entre eux très faiblement.

b) Le copeau cisailé :

A lieu pendant l'usinage de l'acier à vitesse de coupe moyenne **V_c = (80 à 100) m/min** ; la surface du copeau en regard de l'outil est lisse, alors que la surface opposée on voit des entailles qui définissent bien la direction des éléments isolés du copeau liés les uns aux autres.

c) Le copeau continu :

A lieu pendant l'usinage de l'acier à vitesse de coupe grande **V_c > 100 m/min**. Pendant l'usinage des métaux friables (fontes, bronze, alliage d'aluminium), on distingue le copeau fragmenté. Il est constitué d'éléments arrachés de la matière de base ; de formes variées qui ne sont pas liés les uns aux autres. La pente d'avancée se forme immédiatement, le long de toute la surface de cisaillement suivant laquelle s'effectue la séparation entre le copeau et le métal de base. Un tel copeau laisse une surface usinée rugueuse couverte de creux et de crêtes importants.

II.6/ Notion d'état de surface :

On appelle états de surface les irrégularités des surfaces dues au procédé d'élaboration de la pièce (usinage, moulage, etc.). Ils sont, le plus souvent, mesurés avec des appareils à palpeur à pointe de diamant, appelés **profilomètres**, qui relèvent le profil de la surface suivante.

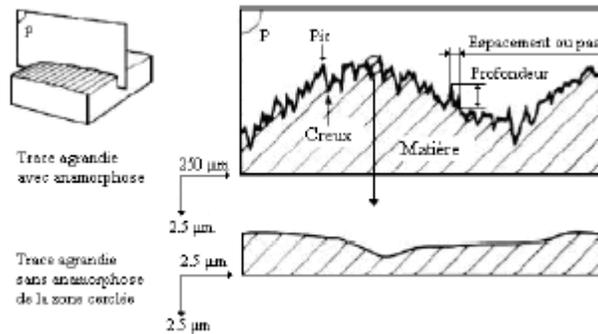


Figure II.13 : Relevé d'un profil d'état de surface

Sur la surface d'une pièce obtenue par usinage, on distingue quatre principaux types de défauts, d'ordre macro où micro géométrique :

1. Écarts de forme et de position.
2. Ondulations (défauts périodiques).
3. Signature du procédé d'élaboration : stries, sillons (défaut périodique ou pseudopériodique).
4. Défauts accidentels ; arrachements, piqûres, etc.

La rugosité comprend les irrégularités le plus souvent sensibles à l'ongle : par exemple, traces d'outil d'une pièce usinée, « grain » d'une surface sablée où revêtue. Pour les pièces mécaniques, ce sont généralement des irrégularités de pas inférieur à 500 µm, avec un ratio largeur/profondeur dans la plage 100/1 à 5/1. La rugosité influe sur l'aptitude au frottement (particulièrement pendant la période de rodage), l'usure, l'adhésivité des revêtements, la résistance à la flexion et aux efforts alternés, à la corrosion, etc.

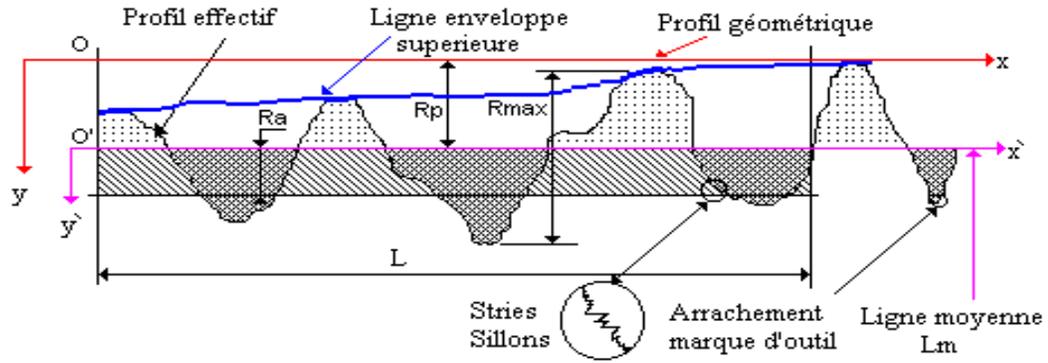


Figure II.14 : Rugosité

Lors de l'usinage, les facteurs influant sur la rugosité sont l'avance de l'outil, son affûtage, les ondulations de sa face de coupe, le brise-copeaux, le rayon de pointe, la qualité et le filtrage du lubrifiant, le diamantage de la meule en rectification, les vibrations de haute fréquence, etc.

Suivant les procédés d'usinage et les conditions de coupe utilisés, la surface usinée est plus ou moins rugueuse. La valeur maximale du défaut de rugosité est indiquée par un chiffre en micron qui augmente quand la profondeur des stries augmente. On peut reconnaître le mode de génération d'une surface à la forme des stries selon la figure suivante :

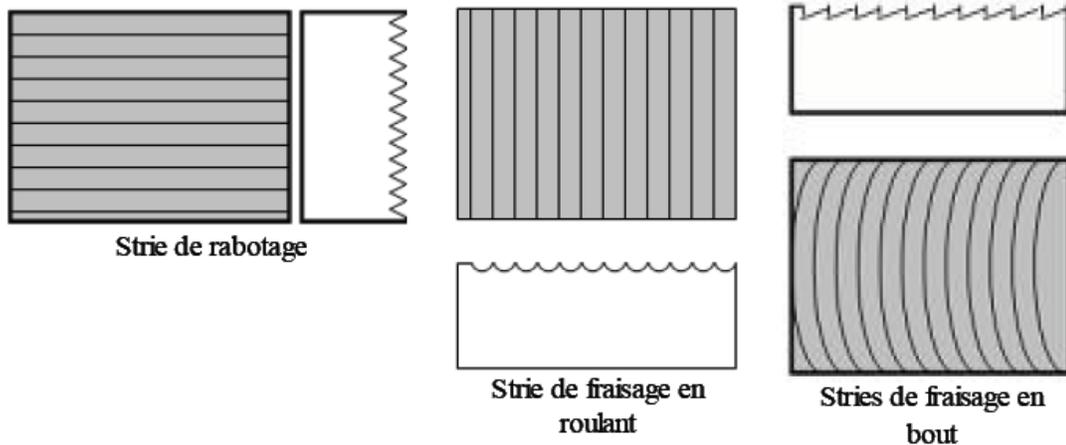


Figure II.15 : Forme de stries obtenues par différents procédés d'usinage.

Les facteurs intervenant sur l'obtention de l'état de surface sont :

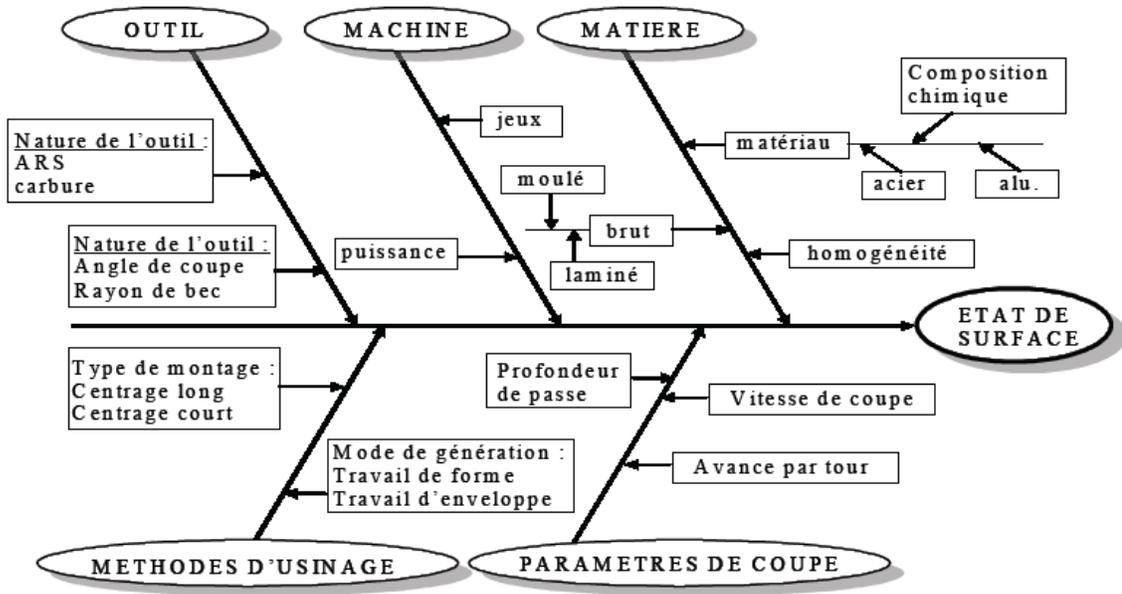


Figure II.16 : Facteurs intervenant sur l'obtention de l'état de surface.

Parmi les divers facteurs qui affectant l'état de surface d'une pièce mécanique, les facteurs dominants sont la géométrie de l'outil de coupe, l'avance, et les vibrations relatives entre l'outil et la pièce.

- **Arête rapportée :**

Sous l'influence d'éléments perturbateurs : températures, frottements ; il peut arriver que le copeau continu adhère à l'outil où il en résulte la formation d'une couche appelée "**arête rapportée**" sur l'arête coupante de l'outil et susceptible de créer des perturbations dans l'usinage. L'importance de cette arête rapportée augmente jusqu'à ce qu'elle soit évacuée vers le copeau ou vers la pièce ; dans ce dernier cas, il peut en résulter une altération de l'état de surface de la pièce. On arrive à éliminer l'arête rapportée en augmentant la vitesse de coupe et en diminuant l'avance c'est à dire en réduisant le rendement de l'usinage, parfois l'emploi de lubrifiants appropriés permet d'éviter cette réduction.

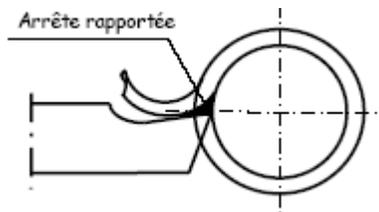


Figure II.17 : Arête rapportée

- **Usure des outils :**

L'usure des outils de coupe est un des phénomènes physico- chimiques les plus complexes. Elle influe sur la géométrie de l'outil ainsi que sur la qualité de la pièce. Elle est due par son apparition aux causes suivantes :

- Frottements outil-copeau, outil-pièce et pièce-copeau (usure abrasive).
- Déformations plastiques de la matière de la partie active de l'outil.
- Echauffement important dû à la coupe.
- L'émiettement de l'outil (arrachement de petites particules métal).

L'usure peut être sous plusieurs formes :

*L'usure abrasive est particulière à tous les outils, elle est la cause principale de l'emoussage de l'outil.

*L'usure due aux déformations plastiques de la matière de l'outil est surtout pour les outils en aciers à faible teneur en éléments d'alliages (acier rapide).

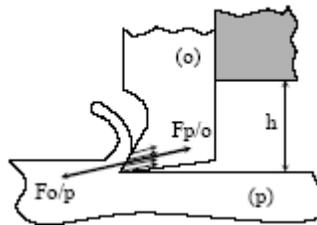


Figure II.18 : Courbe (θ° , T[min])

* L'usure provoquée par une haute température de coupe se manifeste plus fortement dans les aciers au carbone et les aciers rapides, par suite de leurs résistances à chaud relativement faible. L'usure est d'autant plus rapide que la température de la partie active est plus élevée comme la montre la figure :

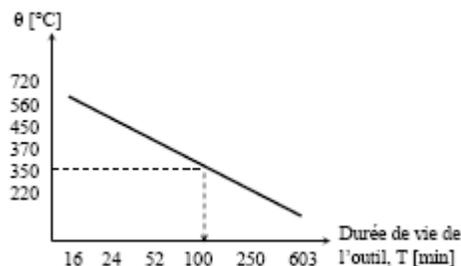


Figure II.19 : Courbe (θ° , T[min])

Une autre série d'expériences de tournage dont l'objectif consistait à déterminer la vitesse « v_c » en fonction du temps T pour un usinage à sec et un autre avec lubrification, donne les résultats suivants :

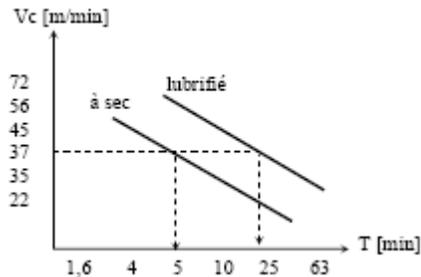


Figure II.20 : Influence de la lubrification

Ce que l'on constate sur la figure, qu'avec une lubrification bien adoptée au travail à réaliser permet d'augmenter considérablement la durée de vie de l'outil, d'où une diminution de l'usure.

* Les outils en carbures métalliques s'usent généralement à cause de l'émiettement c'est à dire l'arrachement de petites particules du métal de l'outil, tandis qu'ils restent fortement résistants à l'usure par frottement.

- **Types d'usures :**

En fonction des conditions de coupe, l'usure peut se produire suivant la **surface de dépouille**, suivant la **surface d'attaque** ou suivant les deux surfaces en même temps:

- **L'usure de la surface de dépouille** est particulière aux outils qui enlèvent le copeau de faible épaisseur (inférieur à 0,1mm) avec une vitesse de coupe trop grande (supérieure à 80 m/min) ainsi que lors de l'usinage de métaux à copeau friables (fontes, bronze, etc...).
- **L'usure de la surface d'attaque** se produit lors de l'usinage des matières plastiques avec des outils qui enlèvent les copeaux dont l'épaisseur est supérieur à 0,5 mm, la vitesse est variée de 20 à 30 m/min, dans cette zone se forme l'arête rapportée qui protège la surface de dépouille contre l'usure. Elle commence par l'apparition d'un petit creux qui s'élargit avec le temps.

L'usure simultanée des surfaces de dépouille et d'attaque est particulière aux outils qui enlèvent les copeaux dont l'épaisseur varie de 0,1 à 0,5 mm. La vitesse de coupe est assez grande. L'arête tranchante disparaît, la coupe suivante devient impossible donc l'outil doit être raffûté.

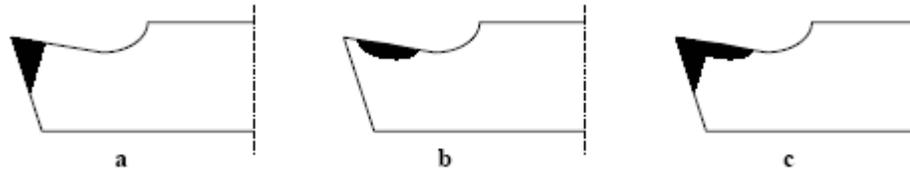


Figure II.21 : Outil en acier rapide

Dans le cas des outils en carbure métalliques travaillant habituellement avec des vitesses de coupe élevées ce qui ne permet pas la formation de l'arête rapportée. C'est pourquoi après un certain temps passé durant l'usinage, toute la surface d'attaque y compris l'arête tranchante s'expose à l'usure. L'usure des deux surfaces forme une nouvelle arête tranchante (figure II.22) qui se renouvelle durant la coupe.

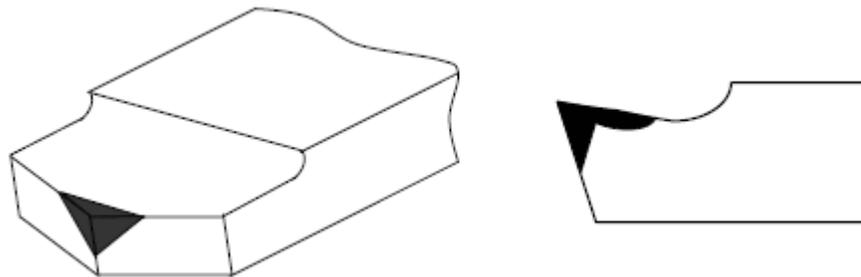


Figure II.22 : Outil en carbure métallique.

L'émiettement est la cause principale de l'usure des outils en carbure métallique. Il se fait par suite de broutements se produisant pendant l'usinage à des vitesses relativement faibles (inférieure à 50 m/min).

- **Dépendance ente l'usure et le temps :**

La relation entre la valeur de l'usure et le temps représentée par la courbe figure II.23 peut-être divisée en trois périodes :

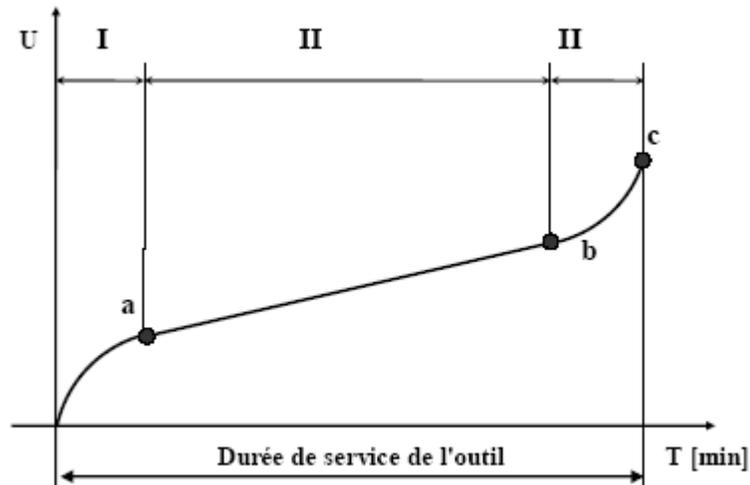


Figure II.23 : Courbe d'usure

- **Période I** : Usure initiale ou rodage (à éviter pour les réglages)
- **Période II** : Usure normale ou domaine normal d'utilisation de l'outil
- **Période III** : Usure accélérée (catastrophique) danger de rupture.

-**La première période** : est celle du rodage (usure initiale qui donne lieu à une usure intense, plus les surfaces de frottements sont nettes, et plus l'évolution de l'usure est faible dans le même intervalle de temps.

-**La deuxième période** : est celle de l'usure normale, elle est définie par la progression de l'usure en fonction de la durée de travail pendant la deuxième période, l'augmentation de l'usure en unité de temps est une constante.

-**La troisième période** : est celle où l'usure atteint un certain degré. Les conditions de coupe et de frottements changent pour établir la troisième période qui est celle de l'usure accélérée (usure catastrophique). Le temps des deux premières périodes où l'outil peut travailler sans réaffûtage constitue la durée de service de l'outil qui est le temps de travail.

Chapitre III : Influence des paramètres de coupe

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.

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 :

- 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 aboutit 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.

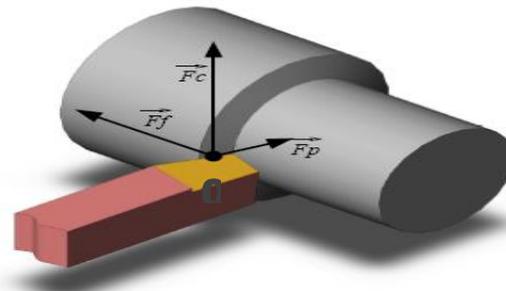


Figure III.1 : Les efforts outil pièce en tournage

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 :

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

Avec :

- K_c : Pression spécifique de coupe dépendant du matériau et de l'épaisseur moyenne du copeau [N/mm^2].
- A_d : Section du copeau [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.

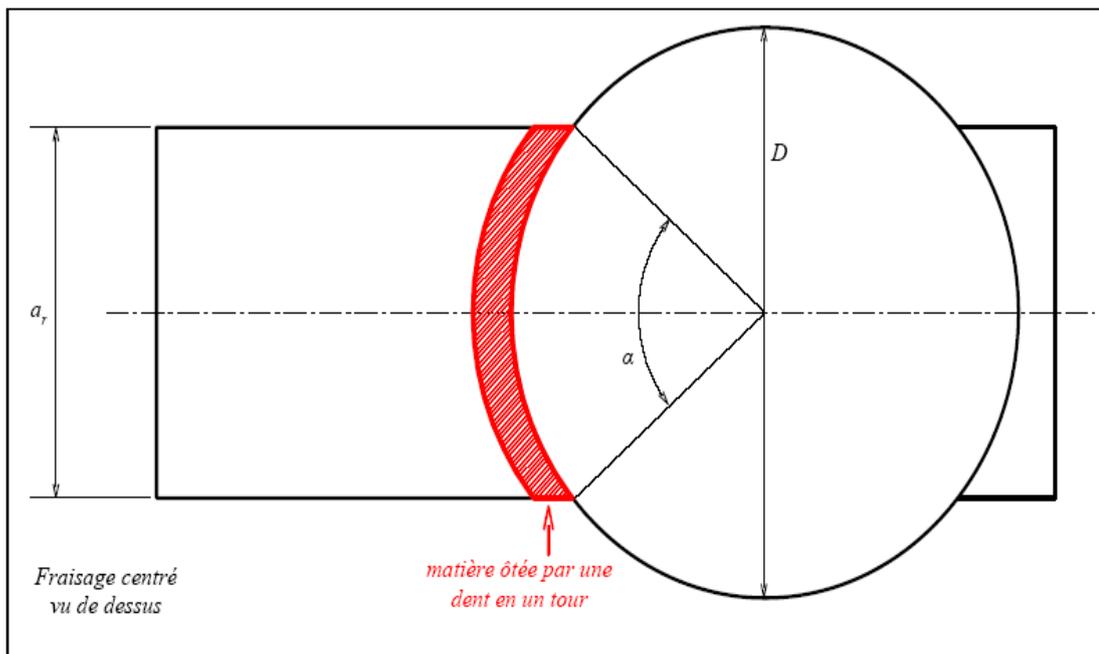


Figure III.2 : Cas de fraisage centré

-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 [mm/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 α 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 :

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

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

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

b- Cas du fraisage décalé :

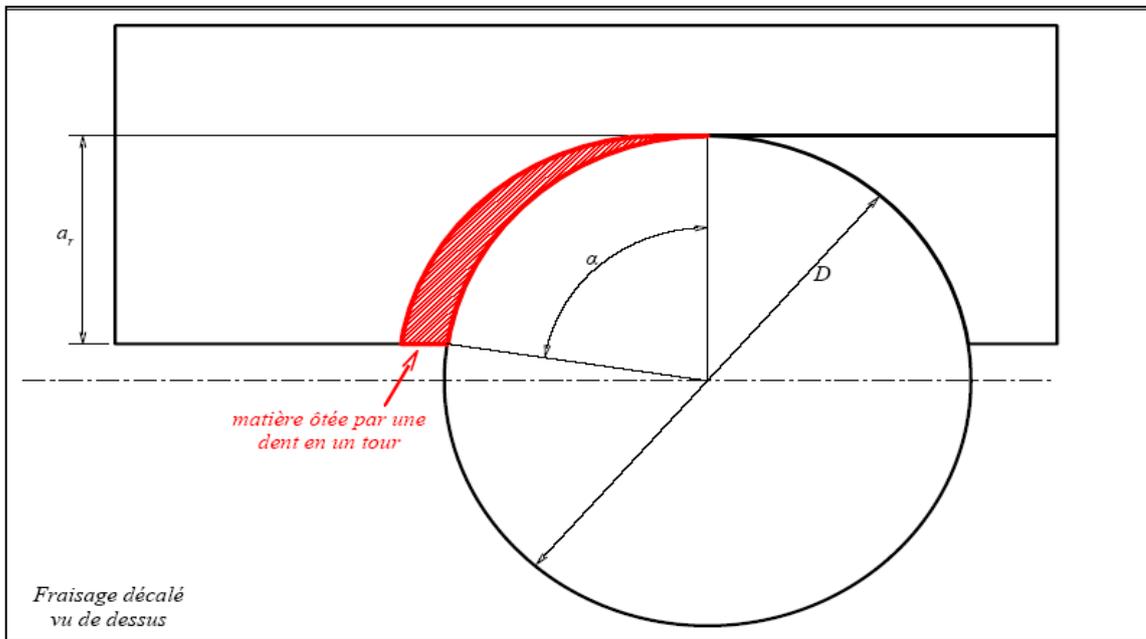


Figure III.3 : Cas de fraisage décalé

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

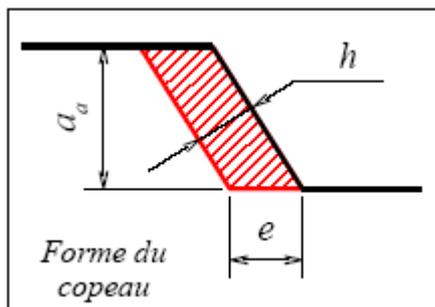


Figure III.4 : Forme du copeau

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

$$\text{On a} \quad \alpha = 2 \operatorname{arc} \sin \left(\frac{a_r}{D} \right) \quad (\text{III.11})$$

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

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

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

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

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

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

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

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 et on prendra les paramètres suivants :

$$a_r = 50 \text{ mm}$$

$$a_a = 1 \text{ mm}$$

Longueur de la pièce = 195 mm

Diamètre de la pièce = 150 mm

La matière de la pièce usinée: XC35

Diamètre de la fraise = 60 mm

Z = 6 dent

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

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

a- Fraisage centré :

F(N)	f_z (mm/dent)	a_a (mm)	a_r (mm)	h_m (mm)	K_c (N/mm ²)	P_c (Kw)
601,9	0,12	1	50	0,1	3150	0,80
1008,91	0,24	1	50	0,2	2640	1,34

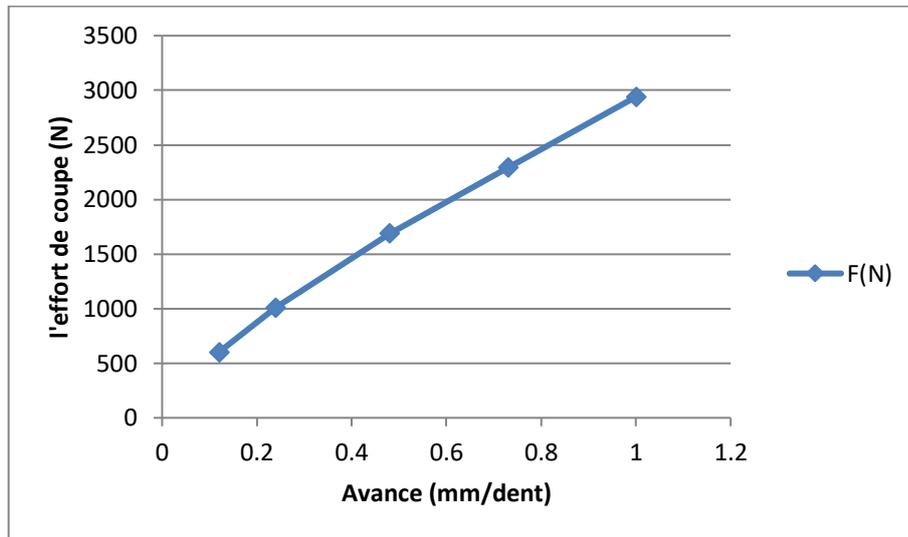
1689,17	0,48	1	50	0,4	2210	2,25
2289,96	0,73	1	50	0,6	1970	3,05
2939,6	1	1	50	0,8	1850	3,91

Tableau III.1: Fraisage centré.

b- Fraisage décalé :

F(N)	f_z(mm/dent)	a_a(mm)	a_r(mm)	h_m(mm)	K_c(N/mm²)	P_c(Kw)
601,9	0,12	1	50	0,1	3150	0,80
1008,91	0,24	1	50	0,2	2640	1,34
1689,17	0,48	1	50	0,4	2210	2,25
2429,46	0,73	1	50	0,5	1970	3,24
3041,40	1	1	50	0,7	1850	4,06

Tableau III.2: Fraisage décalé.



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

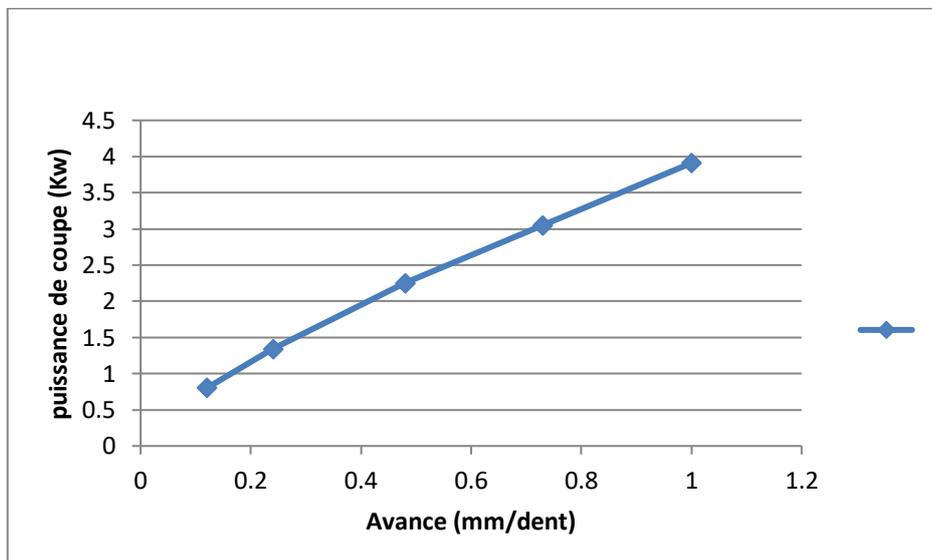


Figure III.5 : Puissance de coupe en fonction de l'avance fraisage centré.

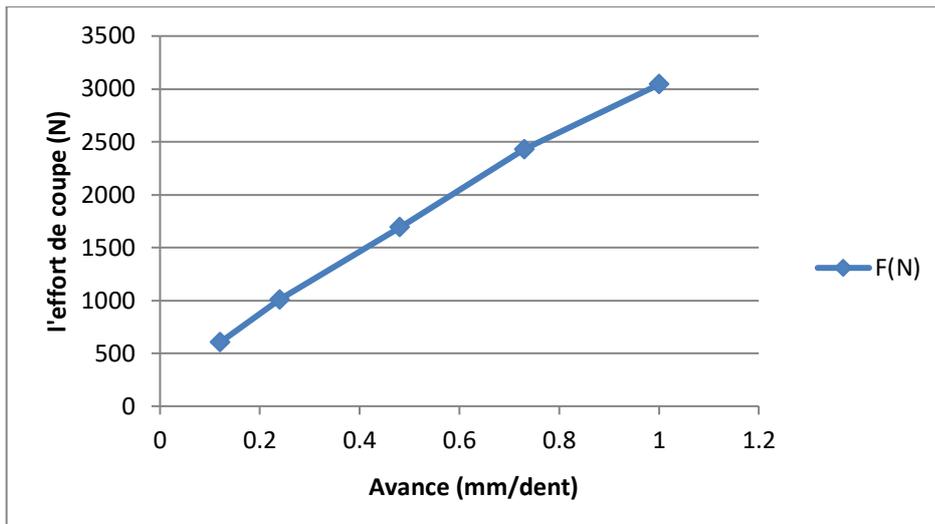


Figure III.6 : Effort de coupe en fonction de l'avance fraisage décalé.

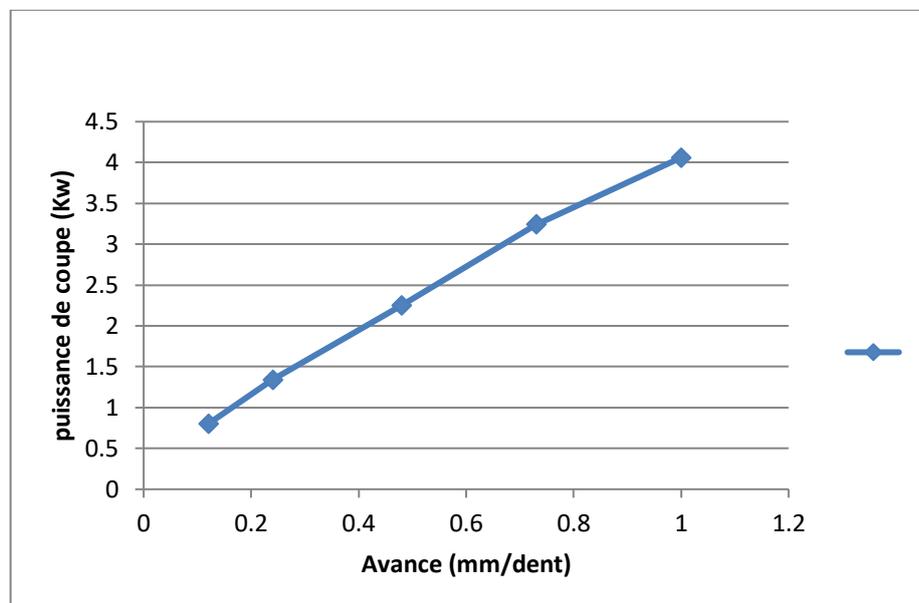


Figure III.7 : Puissance de coupe en fonction de l'avance fraisage décalé.

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 :

III.3.1/ Définition :

Un problème multiobjectif ou multicritère peut être défini comme un problème dont, on recherche l'action qui satisfait un ensemble des contraintes et optimise un vecteur de fonction-objectifs.

$$x=(x_1 , x_2 , \dots , x_n) \quad (III.17)$$

Avec x_i les variable du problème et n est le nombre de ces variables.

Le vecteur de fonction objectif sera noté

$$f: f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)) \quad (\text{III.18})$$

Avec f_i les objectifs ou critères de décision et k le nombre d'objectif.

Nous considérons que les objectifs sont des fonctions à minimiser, Un problème d'optimisation recherche l'action x^* telle que les contraintes $g_i(x^*)$ soient satisfaites pour

$i = 1, \dots, m$, et qu'elle optimise la fonction $f: f(x^*) = (f_1(x^*), f_2(x^*), \dots, f_k(x^*))$

III.3.2/ Optimisation des conditions de coupe :

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 de choix des conditions de coupe consiste à déterminer les valeur des variables de coupe (f , a , V_c) pour chaque opération élémentaire d'usinage en prenant en compte les limites de performance des élément 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 solution réalisable 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 :

- Temps d'usinage :

La production maximale sera atteinte lorsque le temps de fabrication unitaire sera minimal.

Le temps d'usinage unitaire est le temps nécessaire à la réalisation d'une passe sur une pièce. C'est la somme des temps machine, temps de changement de l'arête, temps retour de l'outil et le temps de montage et démontage de la pièce.

Il s'exprime par la relation :

$$T_u = t_m + t_{cs} \left(\frac{t_m}{T} \right) + t_R + t_h \quad (III.19)$$

Avec :

$$t_m = \frac{\pi D L}{1000 V_c f}$$

La durée de vie de l'outil T est donnée par la loi de TAYLOR développée (loi de GILBERT).

$$V_c f^{a1} a^{a2} T^{a3} = K \quad (III.20)$$

Donc : $T = K^{\frac{1}{a3}} V_c^{-\frac{1}{a3}} f^{-\frac{a1}{a3}} a^{-\frac{a2}{a3}}$

En remplaçant t_m et T par ses expressions et en prennent :

$$A = \frac{\pi D L}{1000}$$

Le temps total d'usinage sera :

$$T_u = A \cdot V_c^{-1} f^{-1} + t_{cs} \cdot A \cdot V_c^{\frac{1-a3}{a3}} \cdot f^{\frac{a1-a3}{a3}} \cdot K^{\frac{-1}{a3}} \cdot a^{\frac{a2}{a3}} + t_h + t_R \quad (III-21)$$

• **Coût d'usinage :**

Le critère de coût de production d'une pièce fabriquée par l'enlèvement de matière s'écrit comme suivant :

$$C_u = C_0 \cdot t_m + (C_0 \cdot t_{cs} + C_t) \left(\frac{t_m}{T} \right) + C_0(t_h + t_R) \quad (III.22)$$

De la même manière que pour le temps, le coût sera :

$$C_u = C_0 A \cdot V_c^{-1} f^{-1} + A \cdot V_c^{\frac{1-a3}{a3}} \cdot f^{\frac{a1-a3}{a3}} \cdot K^{\frac{-1}{a3}} \cdot a^{\frac{a2}{a3}} \cdot (t_{cs} C_0 + C_t) + C_0(t_h + t_R) \quad (III.23)$$

Contraintes de problème :

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

$$f_{min} \leq f \leq f_{max}$$

• 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 :

$$V_{c \min} \leq V_c \leq V_{c \max}$$

• **Limitation sur la puissance de coupe**

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

$$P = C_p \cdot V_c^b \cdot f^c \cdot a^d \leq P_{\max} \quad (\text{III.24})$$

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 l'état de surface**

L'état de surface résultante d'usinage doit être inférieur à une rugosité maximale imposée :

$$R_a = C_s V_c^e f^g a^i \leq R_{\max} \quad (\text{III.25})$$

C_s, V_c, e, f, g, i : coefficients spécifique et exposantes de la rugosité de surface résultante.

R_{\max} : le maximum autorisé de rugosité de surface.

- **Limitation sur la température de coupe**

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

$$\theta = C_m V_c^m f^p a^q \leq \theta_{\max} \quad (\text{III.26})$$

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 ;

$$F = C_f \cdot V_c^x \cdot f^y \cdot a^z \leq F_{\max} \quad (\text{III.27})$$

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 V_c et l'avance par tour f .

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

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{minimiser } \mathbf{F} = (\mathbf{Tu}, \mathbf{Cu}) \\
 \text{sous} \\
 f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \\
 Vc_{\min} \leq Vc \leq Vc_{\max} \\
 C_p \cdot V_c^b f^c a^d \leq P_{\max} \\
 C_S V_c^e f^g a^i \leq R_{\max} \\
 C_m V_c^m f^p a^q \leq \theta_{\max} \\
 C_f \cdot V_c^x \cdot f^y \cdot a^z \leq F_{\max}
 \end{array} \right\} \text{et} \quad (\text{III.28})$$

Chapitre IV : Application d'une 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.

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.

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

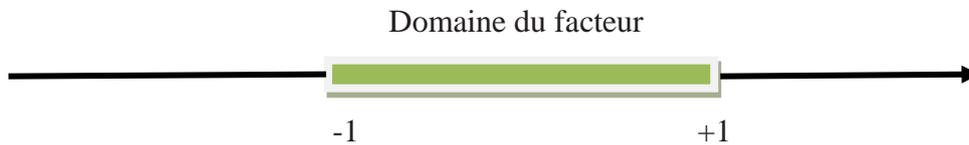


Figure IV.1 : Domaine de variation d'un seul facteur

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.

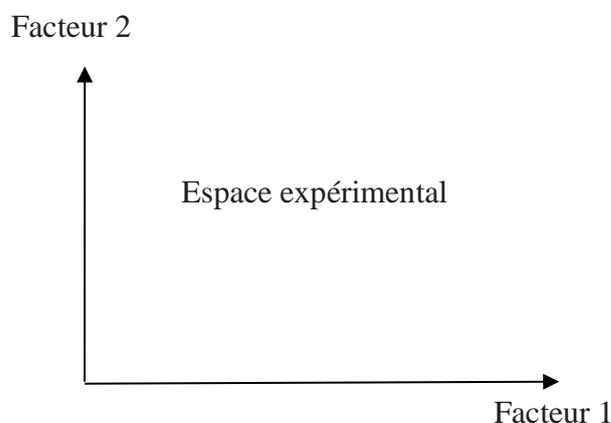


Figure IV.2 : Domaine de variation de deux facteurs.

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

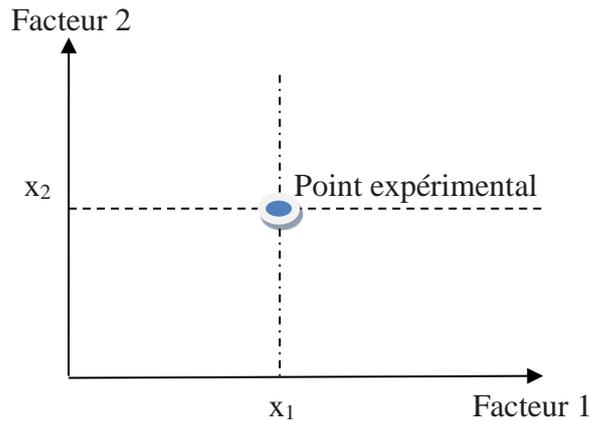


Figure IV.3 : Points expérimentaux dans l'espace expérimental.

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

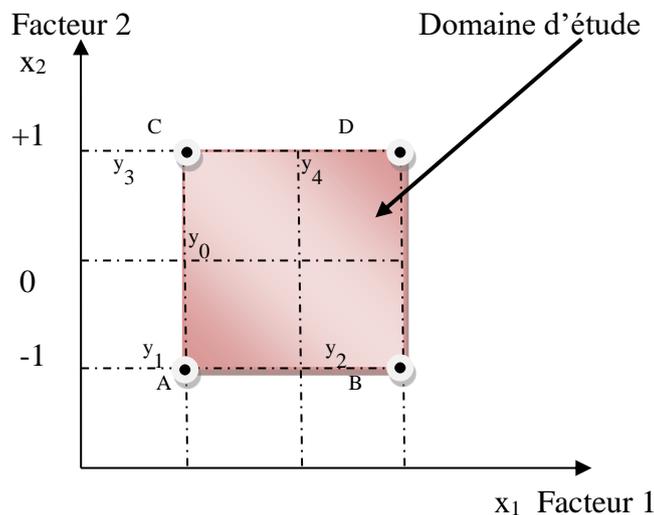


Figure IV.4 : Domaine d'étude pour le cas de 2 facteurs.

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 :

$$Y = f(x_i) \quad (IV.1)$$

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 :

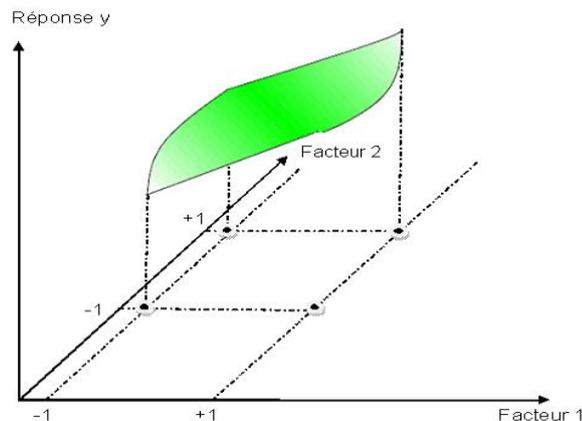


Figure IV.5 : Représentation d'une surface de réponse.

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.

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)	1.00	0.09
Pression spécifique de coupe (N/mm ²)	1788	3012

Tableau IV.1 : Facteur minimal et facteur maximal

Facteur 1	Facteur 2	Réponse 1	Réponse 2
1.00	3012	4987.12	6.63
0.09	1788	350.00	0.49
1.00	1788	2911.62	3.96
0.09	3012	601.75	0.82

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 :

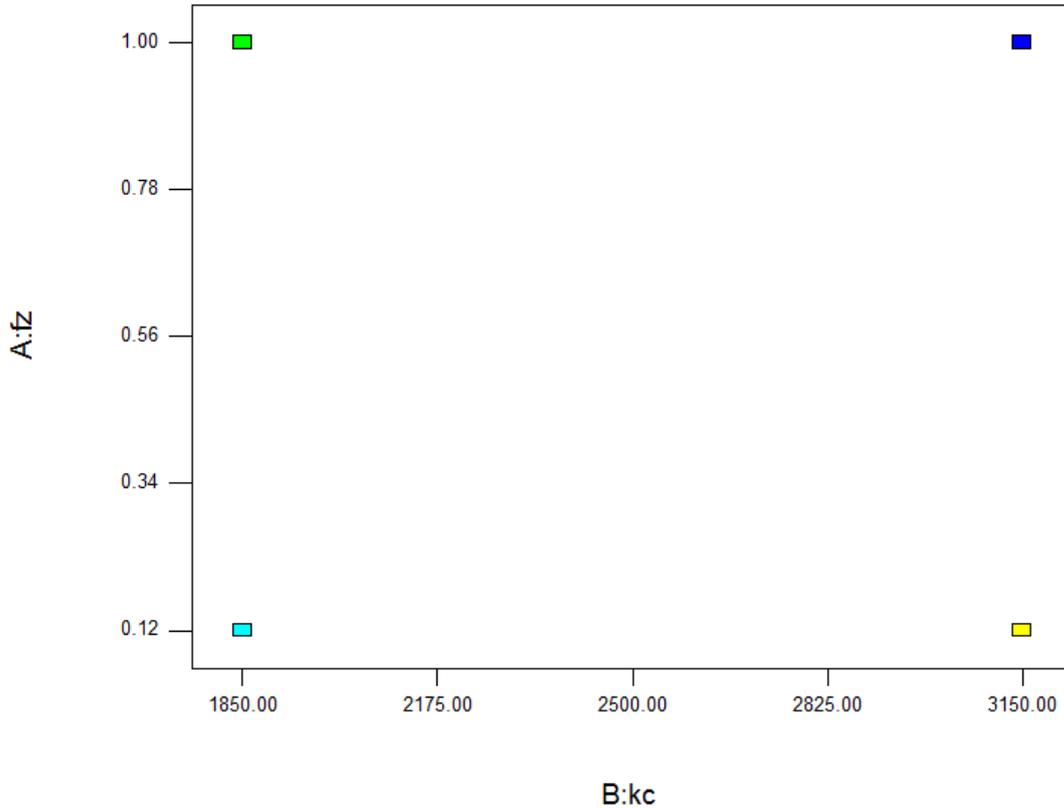


Figure IV.6 : Domaine d'étude de l'avance et de la pression spécifique de coupe.

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^{er} cas de la réponse 1 : Effort de coupe**

Facteur	Coefficient estimé
a_0	2219.25
a_1	1688.13
a_2	560.23
a_{12}	445.18

Tableau IV.3 : Coefficients estimés des facteurs

Notre équation devient :

$$y = 2219.25 + 1688.13 x_1 + 560.23x_2 + 445.18x_1 x_2 \quad (\text{IV.6})$$

- **2^{ème} cas de la réponse 2 : Puissance de coupe**

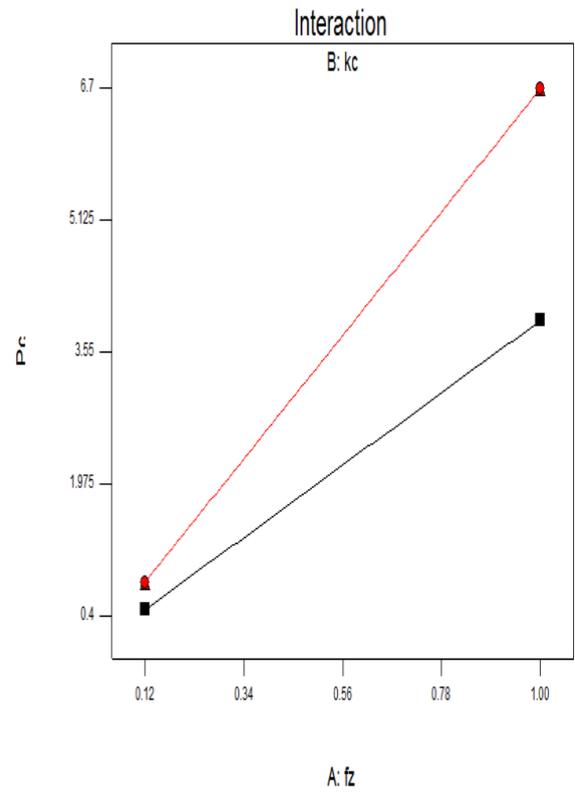
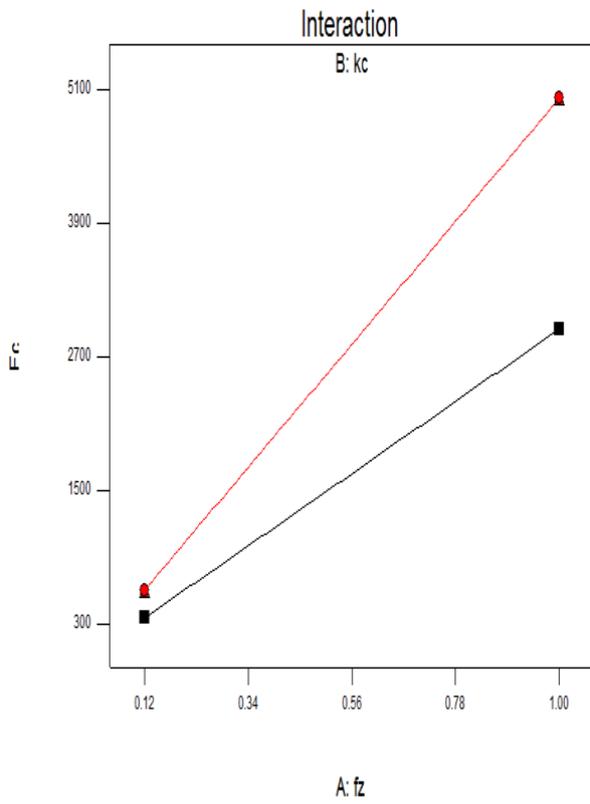
Facteur	Coefficient estimé
a_0	2.88
a_1	2.23
a_2	0.69
a_{12}	0.62

Tableau IV.4 : Les coefficients estimés des facteurs.

Notre équation devient :

$$y = 2,88 + 2,23 x_1 + 0,69 x_2 + 0,62 x_1 x_2 \quad (\text{IV.7})$$

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.



Fc

Pc

Figure IV.7 : Cas minimal (low value)

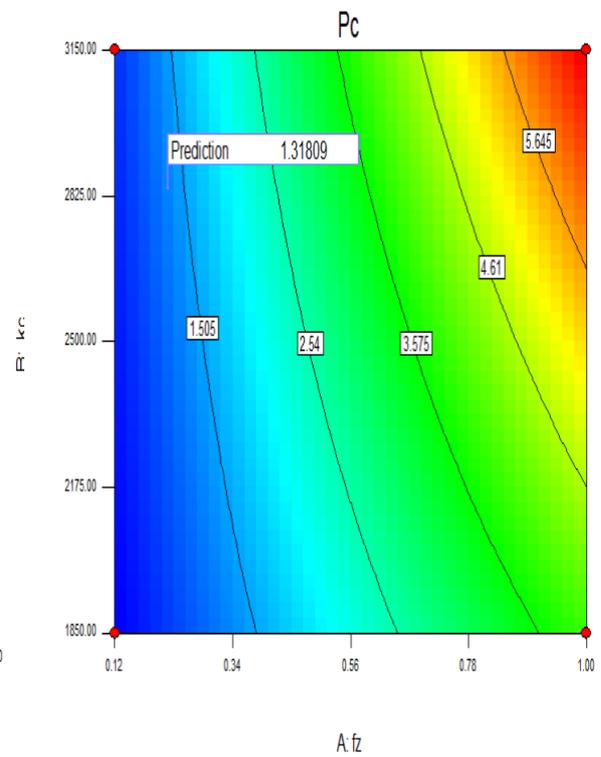
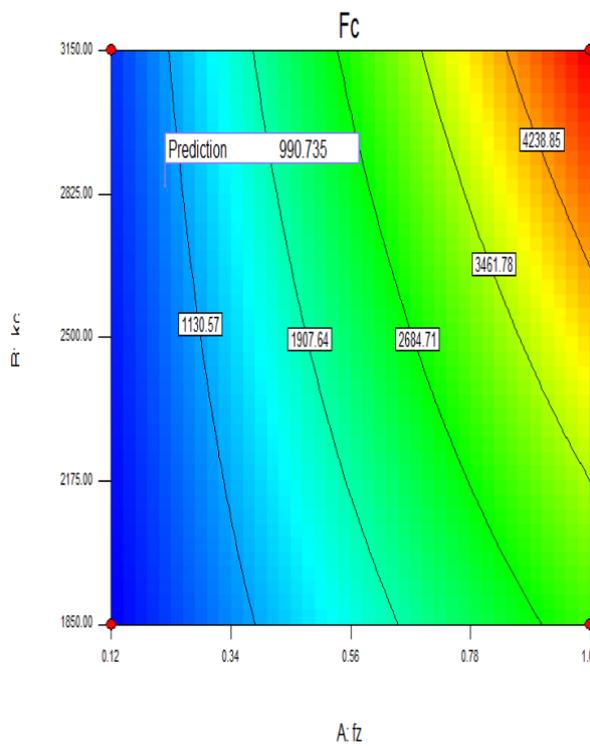


Figure IV.8 : Contours de réponses pour Fc et Pc.

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

IV.4/ Détermination du temps d'usinage et du cout d'usinage :

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 le cout d'usinage. Ce calcul a été basé sur des valeurs déterminées à partir de notre recherche bibliographique.

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

Longueur de la pièce = 195 mm,

Diamètre de la pièce = 150 mm.

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
V_c min	25.00 m /min	P_{max}	5.00 KW	C_t	40.00DA/arrête
V_c max	220 m /min	F_{max}	1100N	C_0	08.00 DA/min
f_{min}	0.25mm/tr	θ_{max}	500°C	a_1	0,28
f_{max}	0.65mm/tr	t_R	0,12min /pass	a_2	0,33
R_{max}	7.00 μ m	t_h	1,6min /Pièce	a_3	0,22
$R_{f\ max}$	3.00 μ m	t_{cs}	0,5min /arrête	K	193,30

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 :

$a_1 = 1,25$ mm,

$a_2 = 2,5$ mm,

$a_3 = 3,5$ mm,

$a_4 = 5$ mm.

Dans ce travail, nous allons minimiser simultanément le coût et le temps d'usinage sous les contraintes liées à l'effort de coupe, la puissance, la température d'interface et la rugosité. Prenons les expressions du coût, temps, effort de coupe, puissance et rugosité issues du modèle considéré du chapitre précédent et en remplaçant les paramètres d'usinage par les valeurs du tableau précédent, on trouve :

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

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 :

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

Ce problème peut être résolu à l'aide de la première méthode multi-objectif. La fonction `fminimax` de Matlab travail avec la méthode Min-Max qui est basée sur le principe de minimisation de la valeur maximale des écarts à chaque itération. Cette procédure permet à la fin de trouver le meilleur compromis qui sera considéré comme solution optimale.

L'utilisation de cette fonction nécessite la déclaration des objectifs et des contraintes.

● **Fonction - objectif**

La fonction-objectif est un vecteur de deux composantes, le temps et coût d'usinage ; $F = (f_1, f_2)$

D'où : $f_1 = T_u$, $f_2 = C_u$

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

$$0,25 \leq f \leq 0,65$$

$$25 \leq V_c \leq 220$$

On obtient les résultats suivants :

A[mm]	f[mm /tr]	Vc[m/min]	Cu[DA/min]	Tu[min]
1,25	0.65	110	26.8801	2.7749
2,50	0.65	100	30.2901	3.0095
3,50	0.65	80	32.2529	3.1493
5.00	0.65	92	38.9289	3.5506

Tableau IV.6 : Résultats du problème multiobjectif

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.

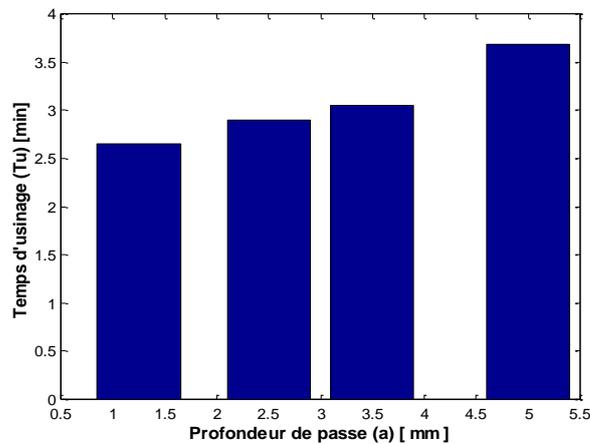


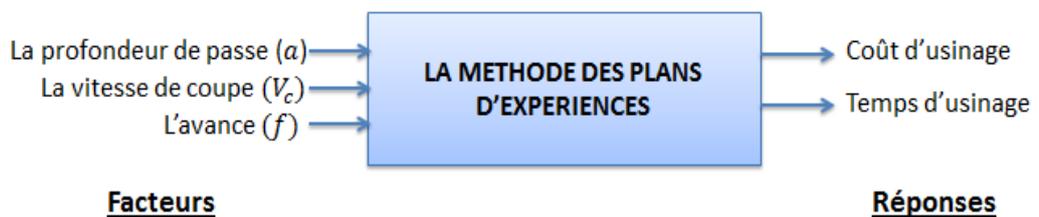
Figure IV.9 : Comparaison des résultats

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 come 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.



Facteur	Unité	Minimum	Maximum
Vitesse de coupe (V_c)	m/min	25.00	220
Avance (f)	mm/tr	0,25	0,65
Profondeur de passe (a)	Mm	1,25	5.00

Tableau IV.7 : Les facteurs : Unités, maximums et minimums

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

Facteur 1 la profondeur de passe (a) (mm)	Facteur 2 La vitesse de coupe (V_c) (m/min)	Facteur 3 L'avance f (mm/tr)	Réponse 1 Coût d'usinage (DA)	Réponse 2 Temps d'usinage (min)
1.25	94.81	0.65	27,0736	3.2295
2.71	143.98	0.50	36,4346	3.2425
3.65	98.13	0.65	31,0052	3.3680
5	141.55	0.49	53,0728	3.6235

Tableau IV.8: Les 3 facteurs et leurs réponses

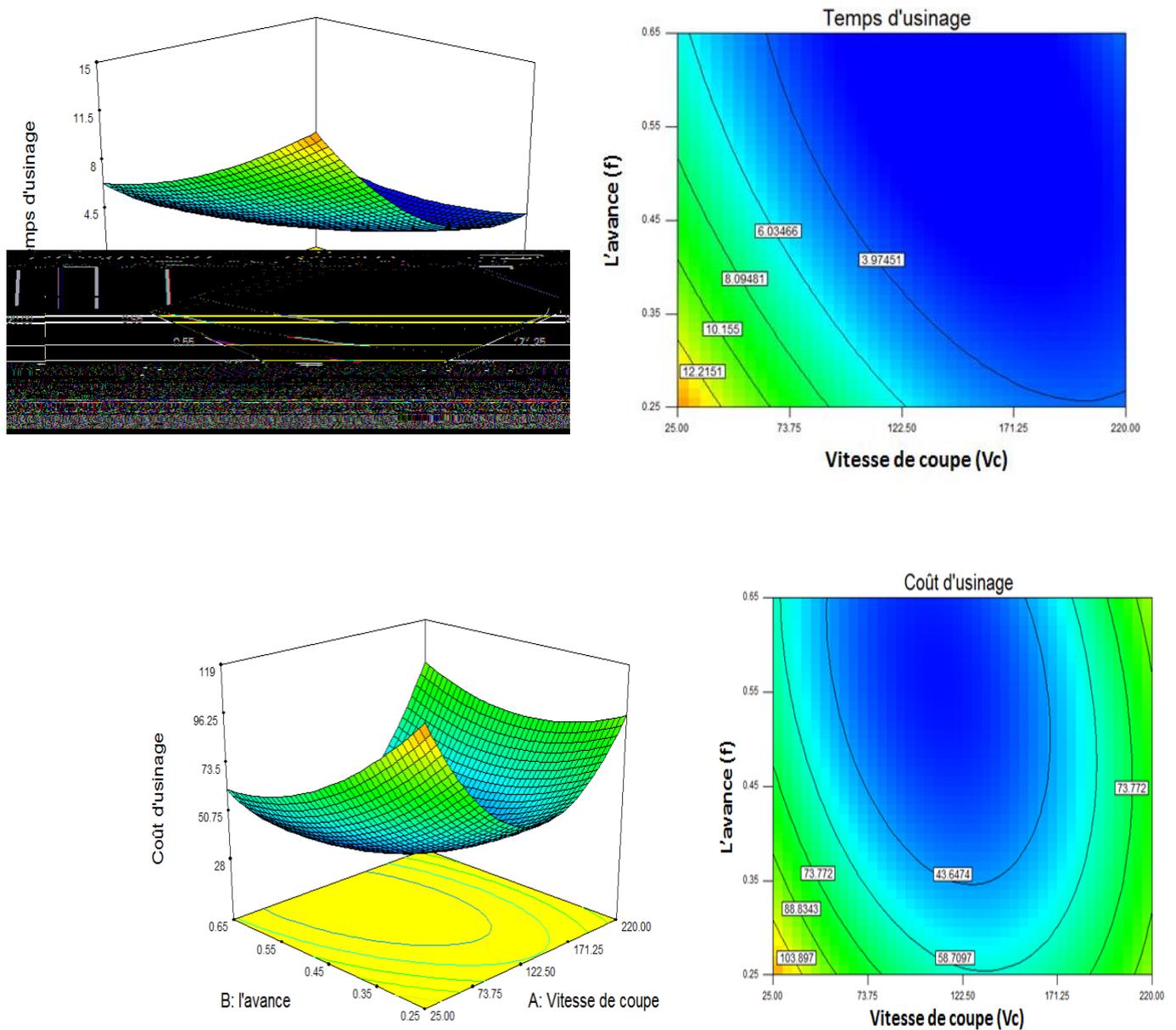


Figure IV.10 : Variation de la fonction objective en fonction de V_c et f

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.

CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés à étudier une opération de fraisage.

La première partie de notre recherche bibliographique a montré qu'il est nécessaire de connaître l'évolution du procédé d'usinage. Le procédé de fraisage a été étudié du fait que notre travail s'est concentré sur une opération de ce procédé.

La deuxième partie de notre recherche bibliographique a montré l'importance de la coupe des métaux qui parfois est difficilement réalisable car d'une part, elle est sujette aux conditions de coupe et d'autre part, les paramètres de coupe utilisés lors de l'usinage influent d'une manière importante sur l'état de surface. Cependant, l'utilisation adéquate des paramètres de coupe peut améliorer cet état de surface.

Dans notre travail, nous avons présenté les résultats des simulations relatives à notre expérience. Tous les programmes ont été réalisés et simulés avec la méthode des plans d'expérience et le logiciel Matlab. Nous avons, pour chaque paramètre, fait varier leurs niveaux dans une plage de valeurs prédéfinies en vue de connaître l'évolution de ces paramètres lors du procédé d'usinage. Les résultats ont montré qu'on pouvait obtenir toute valeur de l'effort de coupe pouvant se faire dans le domaine d'expérience même en cas de non réalisation des expériences. La prochaine étape devait minimiser simultanément le coût et le temps d'usinage sous les contraintes liées à l'effort de coupe, la puissance, la température d'interface et la rugosité. Les résultats des simulations ont permis de confirmer les résultats expérimentaux.