



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

Laboratoire de Construction Mécanique

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Génie Mécanique

Titre

**Etude et modélisation du comportement d'une opération
d'usinage : application au procédé de fraisage**

Proposé et encadré par :
Mr. Temmar

Réalisé par :
Zouaoui Oussama
Ammour Abderaouf

Année universitaire 2019/2020

Remerciements

Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à notre promoteur
Monsieur Temmar Mustapha.

Nous les remercions de nous avoir encadrés, orientés, aidés et conseillés.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs,
intervenants et toutes les personnes qui, par leurs paroles, leurs écrits, leurs
conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions durant nos recherches.

Nous remercions nos chers parents qui ont suivi de loin et de près nos
recherches.

Enfin, nous remercions tous nos proches, nos collègues ainsi que nos chers
amies et amis qui nous ont accordés leurs sincères amitiés et confiances ; à
qui nous devons notre reconnaissance et notre attachement.

À tous ces intervenants, nous présentons nos remerciements, notre respect
et notre gratitude.

Dédicace

Nous dédions ce mémoire à :

Nos parents :

- ✓ Nos mères, qui ont œuvré pour notre réussite, de par leur amour, leur soutien, tout les sacrifices consentis et leurs précieux conseils, pour leur assistance et leur présence dans nos vies, recevez à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de nos sentiments et de notre éternelle gratitude.
- ✓ Nos pères, qui peuvent être fiers et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour nous aider à avancer dans la vie. Puisse ALLAH faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent que vous nous avez consacré.
- ✓ Nos sœurs et frères qui n'ont cessé d'être pour nous des exemples de persévérance, de courage et de générosité.
- ✓ Nos enseignants du Département de Mécanique de notre Université qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

Sommaire :

Introduction7

Chapitre I :

procèdes de fraisage.....10

I.1.INTRUCTION :.....10

Pour le montage sur la broche, on distingue :.....11

Les autres caractéristiques principales sont :.....13

I.2.LES ANGLES.....14

- L'angle de coupe
- L'angle de dépouille
- L'angle de taillant

Les principaux angles dans le cas du fraisage en bout.....17

Chapitre II :

Types de fraisage :.....18

Le fraisage conventionnel ou en opposition :.....19

Fraisage en bout20

La comparaison21

Chapitre III :

ETUDE DE L'INFLUENCE DES PARAMETRES DE COUPE.....27

III-1 INTRODUCTION :.....28

III-2 INFLUENCE SUR LES EFFORTS ET LES PUISSANCES DE COUPE.....29

III-2-1 Formules d'effort de coupe F_c et d'puissance de coupe P_c :.....29
a- Cas du fraisage centré29
B- Cas du fraisage décalé :.....30
III-2-2 Calcule d'effort et puissance de coupe :.....33

III-3 INFLUENCE SUR LA RUGOSITE DE SURFACE :.....36
III-4 CONCLUSION :39

CHAPITRE IV

SIMULATION NUMERIQUE DE : EFFORT DE COUPE ET PUISSANCE DE COUPE40
IV.1/ INTRODUCTION :
IV.2/ METHODE DES PLANS D'EXPERIENCE :
IV.2.1/ DEFINITION :.....41
IV.2.2 / NOTION D'ESPACE EXPERIMENTAL ET TERMINOLOGIE :.....42
VI.2.2.A. Le facteur :
IV.2.2.B.La réponse :.....45
IV.2.2.C.Surface de réponse :.....45
ON DE MODELISATION MATHEMATIQUE ET APPLICATION :.....46
IV.3 /ETUDE DE LA RUGOSITÉ :.....52
IV.3.1 / Fraisage en opposition :
IV.3.2 /Fraisage en avalant :.....54
CHAPITRE V :
Conclusion générale :.....57
Liste des symboles :.....
Bibliographie :

Résumé

Le fraisage est un procédé d'usinage réalisable sur des machines outils appelées fraiseuses. Il permet la réalisation des pièces prismatiques ou de révolution, de profils spéciaux tel qu'hélices, cames, engrenages...

L'outil –appelé fraise- est toujours animé d'un mouvement de rotation autour de son axe M_c (mouvement de coupe).

Il est situé et bloqué sur un porte - fraise, lui-même fixé dans la broche de la machine.

Un ensemble de chariots se déplaçant suivant trois axes orthogonaux, permet d'animer la pièce d'un mouvement d'avance dans l'espace M_a (mouvement d'avance) noté encore M_f

Un mouvement de pénétration (M_p) donné à la pièce (et dans certaines machines particulières à l'outil) est indispensable pour régler la surépaisseur à enlever à chaque passe.

summary

Milling is a machining process that can be carried out on machine tools called milling machines. It allows the production of prismatic parts or revolution, special profiles such as propellers, cams, gears ...

The tool - called a cutter - is always animated with a rotational movement around its axis M_c (cutting movement).

It is located and blocked on a mill holder, itself fixed in the machine spindle.

A set of carriages moving along three orthogonal axes, makes it possible to animate the part with a forward movement in the space M_a (forward movement) also noted M_f

A penetrating movement (M_p) given to the part (and in some machines specific to the tool) is essential to adjust the extra thickness to be removed with each pass.

ملخص

الطحن هو عملية تصنيع يمكن إجراؤها على الأدوات الآلية
تسمى آلات الطحن.

يسمح بإنتاج الأجزاء المنشورية أو

ثورة، ملامح خاصة مثل المراوح، الكاميرات، التروس...

الأداة - تسمى القاطع - دائمًا ما تكون متحركة بحركة دورانية حول المحور

(حركة القطع) **Mc** .

إنه موجود ومنغلق على حامل طاحونة، وهو نفسه مثبت في محور دوران الآلة

مجموعة من العربات التي تتحرك على طول ثلاثة محاور متعامدة،

تجعل من الممكن تحريك الجزء بحركة أمامية في الفضاء،

كما لاحظ

MA حركة الى الامام

MF حركة اختراق

MP تعطي للجزء

وفي بعض الآلات الخاصة بالأداة ضرورية لضبط

يتم إزالة السماكة الزائدة مع كل تمريرة.

Introduction

Le fraisage est, dans son principe, un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) faisant intervenir, en coordination, le mouvement de rotation d'un outil à plusieurs arêtes (mouvement de coupe) et l'avance rectiligne d'une pièce (dit mouvement d'avance).

Aujourd'hui, toutefois, on a également un déplacement de l'outil par rapport à la pièce, lequel peut s'effectuer pratiquement dans n'importe quelle direction.

L'outil de fraisage, la fraise, comporte plusieurs arêtes de coupe dont chacune enlève une certaine quantité de métal sous forme de copeaux.

Notre travail consiste à étudier ce procédé de fraisage et d'utiliser comme référence une opération d'usinage de ce procédé. Dans ce cas-là, on va étudier l'influence des paramètres de coupe sur l'usinage comme :

- Effort de coupe en fonction de l'avance fraisage centré,
- Puissance de coupe en fonction de l'avance fraisage centré,
- Effort de coupe en fonction de l'avance fraisage décalé,
- Puissance de coupe en fonction de l'avance fraisage décalé,
- Influence de la rugosité sur l'état de surface.

Après avoir déterminé ces paramètres, nous allons appliquer la méthode des plans d'expérience pour mettre en valeur les résultats obtenus et faire une comparaison, par la suite.

CHAPITRE I

1. procédés de fraisage

I.1 INTRODUCTION :

Le fraisage est un procédé de fabrication mécanique par enlèvement de matière faisant intervenir, en coordination, le mouvement de rotation d'un outil à plusieurs arêtes (Mc) et l'avance rectiligne d'une pièce (Ma).

Le plus souvent, le fraisage est utilisé pour produire des surfaces planes, des épaulements et des rainures, contournage, etc.

Aujourd'hui, on a également un déplacement de l'outil par rapport à la pièce, lequel peut s'effectuer pratiquement dans n'importe quelle direction.

L'outil de fraisage, la fraise, comporte plusieurs arêtes de coupe dont chacune enlève une certaine quantité de métal sous forme de copeaux

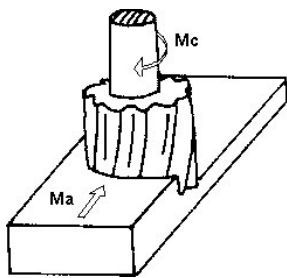
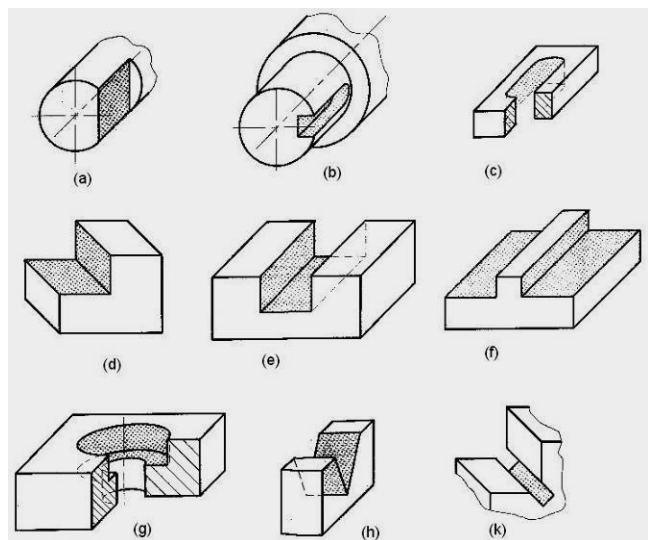


Figure
1aaaaaaaaaytgkghh



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

- Mouvement de rotation de la fraise qui est entraîné par la broche de la

machine, Mc (mouvement rapide circulaire de coupe);

- Mouvement de translation de la pièce qui est fixée sur la table de la machine, Ma (mouvement lent rectiligne uniforme d'avance).

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

On rencontre trois types de fraises :

- **les fraises à une taille :**

Elles coupent uniquement sur la périphérie ; de faible épaisseur, elles sont utilisées pour tronçonner ; de forte épaisseur, elles permettent la réalisation de plans ;

- **les fraises à deux tailles :**

Elles coupent sur la périphérie et en bout.

- **les fraises à trois tailles :**

Elles coupent sur la périphérie et sur chacune des extrémités (en bout et sur la face opposée).

Les fraises à deux tailles portent une queue conique (cylindrique pour les petits diamètres) permettant de les monter directement en bout de broche.

Les fraises à une ou trois tailles sont généralement montées sur l'arbre porte-fraises d'une machine à fraiser horizontale.

Les fraises sont fabriquées :

- monoblocs en acier rapide (ARS) ;

L'acier rapide étant coûteux, les fraises de grandes dimensions sont constituées d'un corps en acier de construction mécanique et de dents rapportées en acier rapide ;

- à dents ou à lames amovibles en ARS ou en carbure.

Pour le montage sur la broche, on distingue :

- les fraises à queue (cylindrique lisse ou à méplat, conique à cône morse ou 7/24) ;
- les fraises à trou (alésage cylindrique lisse, avec clavetage, avec filetage et centrage ou alésage conique).

**Figure : Fraises en acier rapide****Figure : Fraises en carbure**

Les autres caractéristiques principales sont :

- **le type de denture :**
Droite, hélicoïdale à gauche ou à droite, sans denture (lames, etc.);
- **la forme des dents :**
Triangulaire, arrondie, avec listel, etc.;
- **la forme de l'arête :**
Lisse interrompue ou à profil rond ;
- **le sens de la coupe ;**
- **les principaux angles.**

I.2 les angles :

Les principaux angles dans le cas du fraisage en roulant ou de profil

La figure présente les principaux angles dans le cas du fraisage en roulant:

- l'angle de coupe normal φ_n ;
- l'angle de coupe orthogonal φ_0 ;
- l'angle de dépouille normal φ_n ;
- l'angle de dépouille orthogonal φ_0 ;
- l'angle d'inclinaison d'arête φ_s ;

- **L'angle de coupe** φ_n agit principalement sur la puissance et la formation du copeau plus φ est positif, moins les forces de coupe sont élevées. Plus il est petit ou négatif, plus la dent est résistante.
- **L'angle de dépouille** φ_n est l'angle compris entre l'arête coupante et le plan tangent au diamètre de la fraise. Son rôle consiste à éviter le frottement entre le dos de la dent et la surface usinée. Il doit être aussi faible que possible, de manière à ne pas affaiblir la dent. Il est choisi en fonction de l'avance, de la vitesse de coupe, du diamètre de la fraise (inversement proportionnel) et du mode de fraisage.
- **L'angle de taillant** est fonction des deux précédents : $\varphi + \varphi + \varphi = 90^\circ$

Les angles de coupe, de dépouille, etc. ne sont pas constants mais varient du début à la fin de l'engagement de la dent dans le métal. Avec le fraisage en opposition, l'angle de coupe est plus petit au début de la passe et plus grand quand l'outil quitte la pièce.

Le sens de coupe de la fraise est dit à droite (coupe à droite) lorsque la fraise tourne dans le sens des aiguilles d'une montre. Dans le cas contraire, il s'agit d'un sens de coupe à gauche.

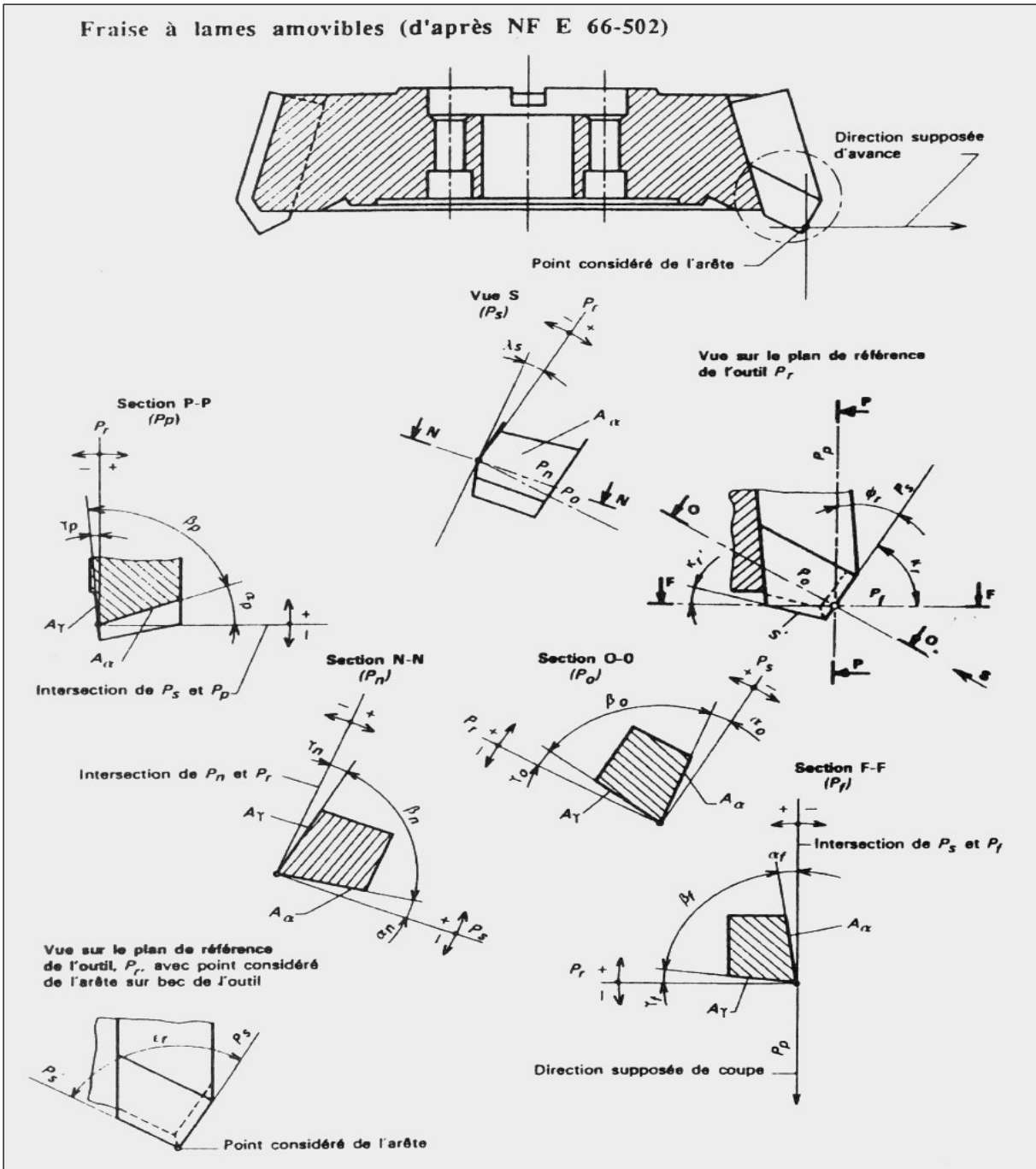
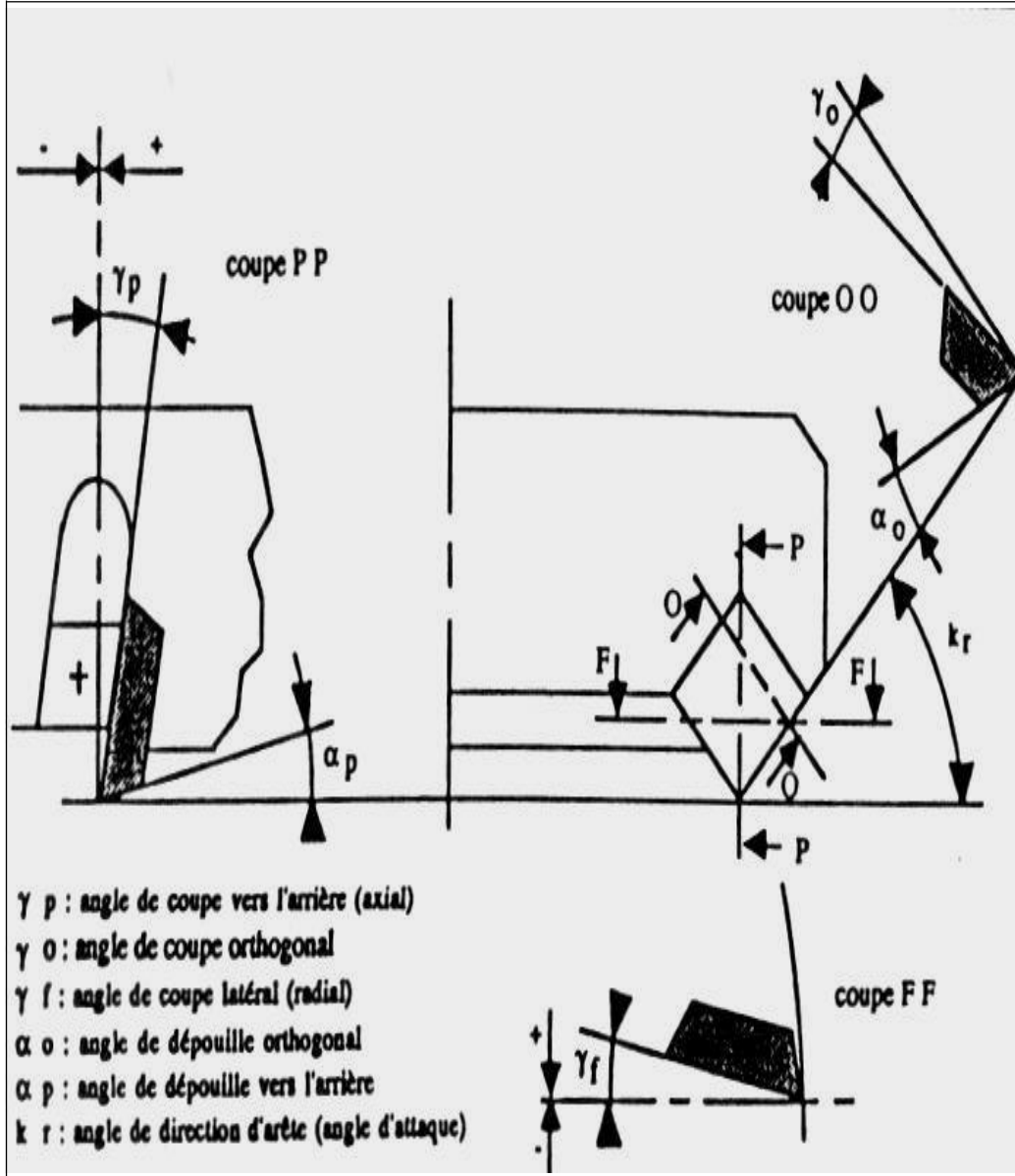


Figure:

Les principaux angles dans le cas du fraisage en roulant ou de pro

Figure :
Les principaux angles dans le cas du fraisage en bout



Les principaux angles dans le cas du fraisage en bout

En surfaçage les angles importants sont:

- l'angle de direction d'arête φ_r (angle d'attaque) ;
- l'angle de coupe vers l'arrière φ_p (axial) ;
- l'angle de coupe latéral φ_f (radial).

L'angle de direction d'arête φ_r détermine l'élongation du copeau, soit le rapport entre son épaisseur et sa largeur. Il a une grande influence sur la répartition des forces de coupe axiales et radiales. Il peut prendre des valeurs de 90° (dressage) à 0° (finition). Pour le surfaçage, les valeurs usuelles sont 70° , 60° et 45° .

L'angle de coupe radial (latéral) φ_f peut prendre des valeurs situées entre -15° et $+25^\circ$. Il a une grande influence sur la puissance consommée. Lorsqu'il est positif, les copeaux sont entraînés vers l'intérieur de la fraise ; lorsqu'il est négatif, ils sont entraînés vers l'extérieur.

L'angle de coupe axial (vers l'arrière) φ_p peut prendre des valeurs situées entre -5° et $+15^\circ$. Il a une grande influence sur le sens des efforts axiaux et sur la résistance des plaquettes aux chocs. Lorsqu'il est positif, les copeaux sont entraînés vers le haut, ce qui est intéressant pour l'usinage des matières à copeaux longs. Lorsqu'il est négatif, les copeaux restent dans la chambre à copeaux qui doit alors être de capacité suffisante.

CHAPITRE II

II. types de fraisage

▪ **II.1. Le fraisage conventionnel ou en opposition :**

La direction d'avance de la pièce est à l'opposé du sens de rotation de la fraise dans la zone de coupe. L'épaisseur des copeaux, nulle au départ, augmente jusqu'à la fin de la passe. Il s'en suit que le métal est écroui jusqu'à ce que l'épaisseur devienne égale à l'épaisseur du copeau taillé minimale.

Les forces de coupe élevées tendent à séparer la fraise de la pièce. La fraise doit être engagée à force dans la pièce, ce qui crée un effet de frottement ou de galetage accompagné d'un fort dégagement de chaleur. Les forces de coupe ont également tendance à soulever la pièce au-dessus de la table de la machine, ce qui oblige donc à faire très attention à la tenue du montage.

Ce mode de travail peut être employé sur n'importe quelle machine.

II.2. Le fraisage en avalant ou en concordance :

La direction d'avance est la même que le sens de rotation de la fraise. La fraise démarre avec une forte épaisseur de copeau. Cela évite l'effet de galetage, avec réduction du dégagement de chaleur et de la tendance à l'écrouissage.

Cette forte épaisseur de copeau est un élément favorable à l'obtention d'une bonne rugosité. Les forces de coupe tendent à presser la pièce contre ses appuis, par contre le jeu axial de fonctionnement du système vis-écrou de commande de déplacement de la table est constamment rattrapé. Ce procédé ne peut donc être utilisé que sur des fraiseuses munies d'un dispositif de compensation des jeux du système vis écrou afin d'éviter que la table se déplace par à-coups.

Le fraisage en avalant est à préférer chaque fois que la machine, le système de fixation de l'outil et la pièce le permet.

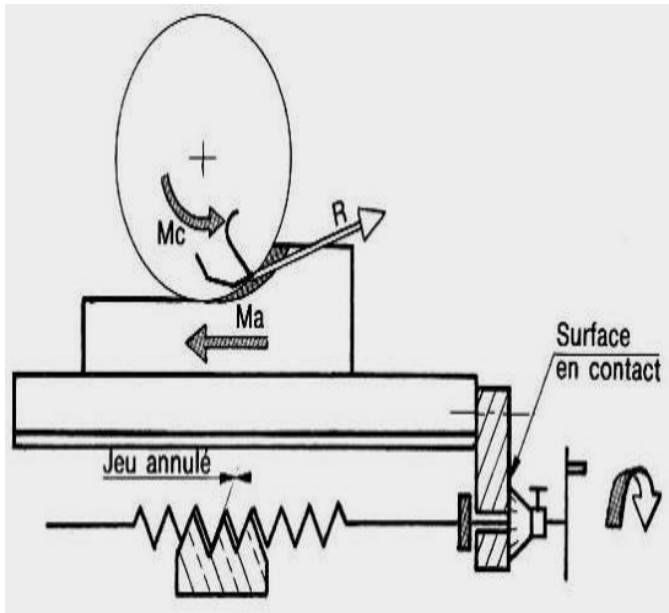


Figure : Fraisage conventionnel

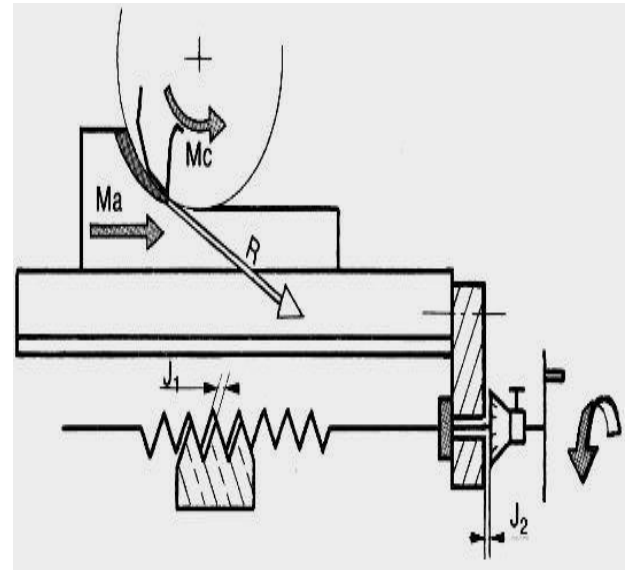


Figure : Fraisage en avalant.

Génération des surfaces planes

Fraisage en roulant

- * Dans le fraisage en roulant, l'axe de la fraise est parallèle à la surface à usiner.
- * La forme du copeau enlevé par une dent est semblable à une virgule.
- * L'épaisseur du copeau n'est pas constante.
- * De ce fait, l'effort de coupe est variable au cours de la passe.

L'état de surface de la pièce est meilleur en fraisage en avalant qu'en fraisage en opposition ; par contre, on peut rencontrer des problèmes en fraisage en avalant lorsque la matière usinée a une croûte dure (pièces de fonderie à croûte trempée, calamine, etc.)

Fraisage en bout

Dans ce procédé, l'axe de la fraise est perpendiculaire à la surface fraisée.

On l'utilise souvent pour obtenir des surfaces planes.

L'aspect de la surface usinée est caractérisé par une série de lignes sécantes (cycloïdes) correspondant aux traces laissées par les dents de la fraise sur la pièce.

L'intervalle compris entre deux cycloïdes consécutives représente l'épaisseur du copeau dans la direction de l'avance (l'autre dimension est la profondeur de passe).

On constate que cette épaisseur varie tout au long de la trajectoire de coupe de la dent.

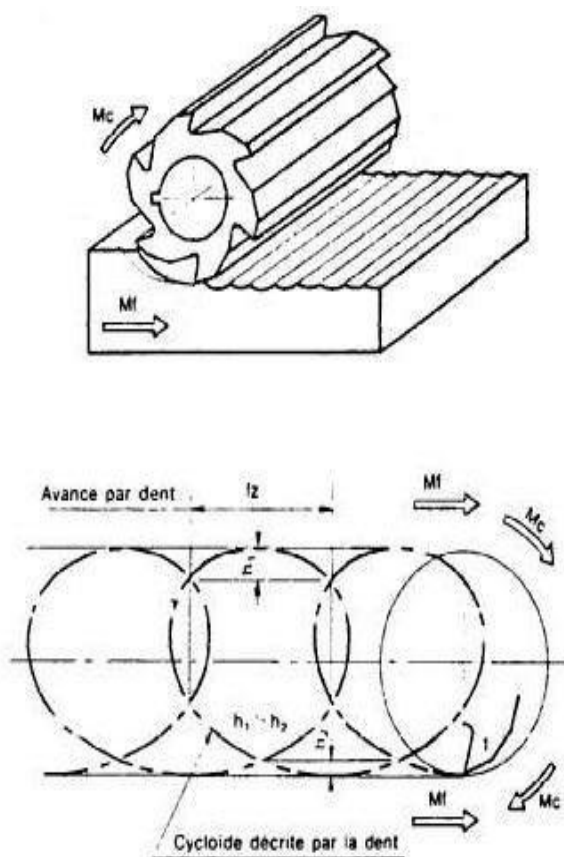


Figure : Fraisage en roulant

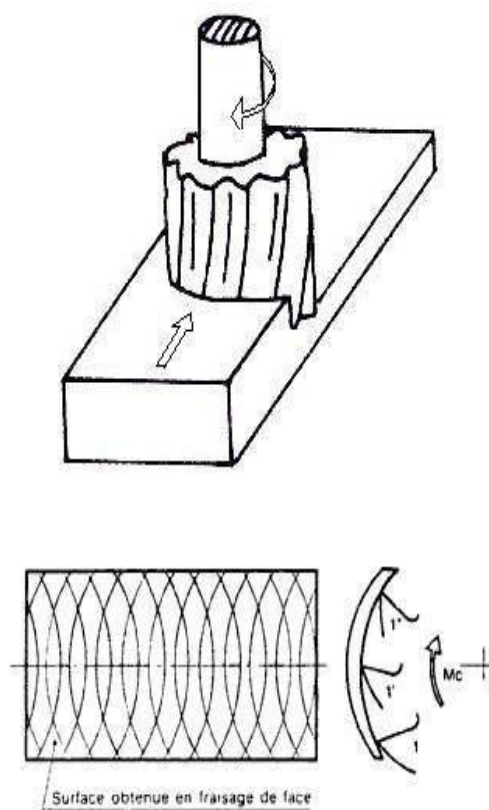


Figure : Fraisage en bout

La position relative pièce/fraise est un paramètre important.

La zone fraisée peut en effet être partiellement en opposition et partiellement en concordance ; la frontière entre les deux zones étant un plan contenant l'axe de la fraise et la vitesse d'avance ; d'un côté de ce plan la vitesse de coupe et d'avance forment un angle aigu (fraisage en concordance) ; de l'autre côté, elles forment un angle obtus (fraisage en opposition).

Lorsque, par exemple, le diamètre de la fraise est supérieur à la dimension transversale (par rapport à l'avance) de la pièce usinée, il convient de désaxer la pièce par rapport à l'axe de la fraise dans le but d'obtenir une zone fraisée en opposition plus large que la zone fraisée en concordance et une résultante des efforts de coupe ayant une composante de sens opposé au déplacement de la pièce.

II.3.La comparaison

Fraisage en opposition et en concordance

Fraisage en opposition

Caractéristiques du fraisage en opposition

o L'attaque de la dent se fait avec une épaisseur nulle, ce qui peut entraîner un refus de coupe (copeau mini) sur la surface à générer

o Ce frottement entraîne une usure supplémentaire

o L'attaque se fait sur une surface écrouie par la dent précédente

o Les efforts de coupe sont importants (refus de coupe)

o Les efforts de coupe tendent à faire sortir la pièce de la mise en position (efforts vers le haut)

o Seul ce mode de travail peut être utilisé sur les fraiseuses ayant des vis sans rattrapage de jeux

Fraisage en bout

o La surface plane est obtenue par l'enveloppe de la trajectoire de la pointe d'outil.

o Si l'axe de rotation n'est pas perpendiculaire à la surface on usine une surface concave.

o La surface est composée de courbes

o Croisées, le copeau ayant une épaisseur sensiblement constante si largeur fraisée

<0.7*diamètre de la fraise.

o On préférera toujours le fraisage en bout.

o L'attaque de la dent se fait avec l'épaisseur maximale (pas de copeau mini)

o La sortie de la dent se fait sur la surface à générer avec une épaisseur nulle mais le copeau est déjà créé ce qui facilite la coupe

o Les dents attaquent sur l'épaisseur maximale ce qui génère des chocs, il est intéressant d'avoir plusieurs dents en prise pour limiter les chocs

o Si on attaque sur une surface brute de fonderie on a une usure rapide

o Les efforts de coupe plaquent la pièce sur ses appuis

o La machine doit être équipée d'une avance de table sans jeu (vis à bille)

o Rugosité un peu meilleure a utilisé pour matériaux écrouis sables

Fraise en roulant

o L'attaque de la dent se fait avec l'épaisseur maximale (pas de copeau mini)

o La sortie de la dent se fait sur la surface à générer avec une épaisseur nulle mais le copeau est déjà créé ce qui facilite la coupe

o Les dents attaquent sur l'épaisseur maximale ce qui génère des chocs, il est intéressant d'avoir plusieurs dents en prise pour limiter les chocs

o Si on attaque sur une surface brute de fonderie on a une usure rapide

o Les efforts de coupe plaquent la pièce sur ses appuis

o La machine doit être équipée d'une avance de table sans jeu (vis à bille)

Fraisage en concordance

l'avance de la dent est opposée à l'avance pièce.

L'avance de la dent de même sens que l'avance pièce

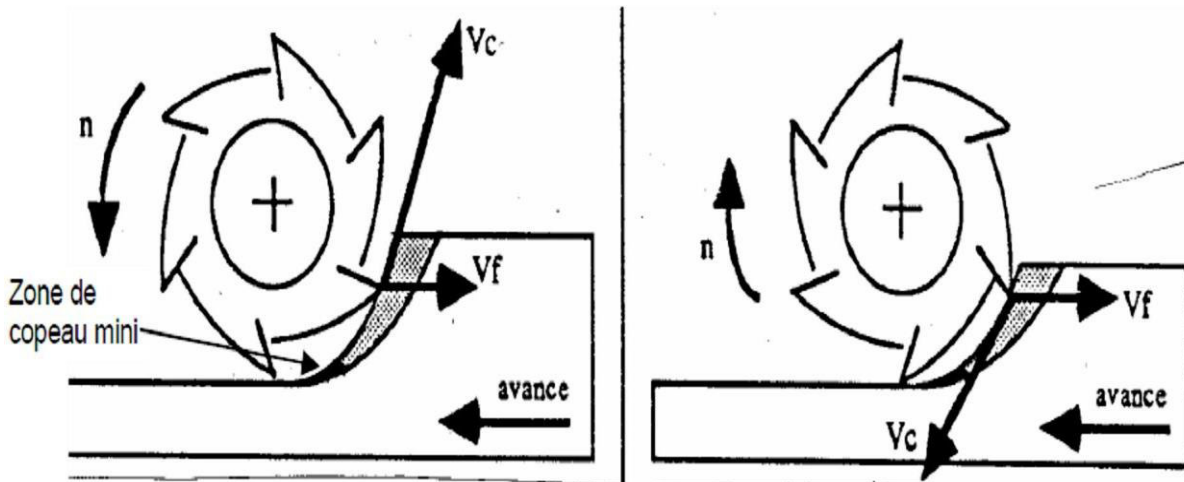


Figure. Fraisage en opposition et en concordance

Fraisage en bout

fraisage en roulant

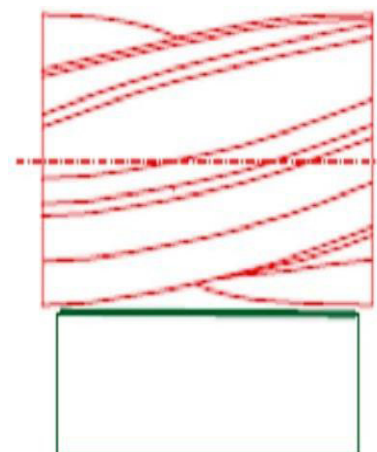
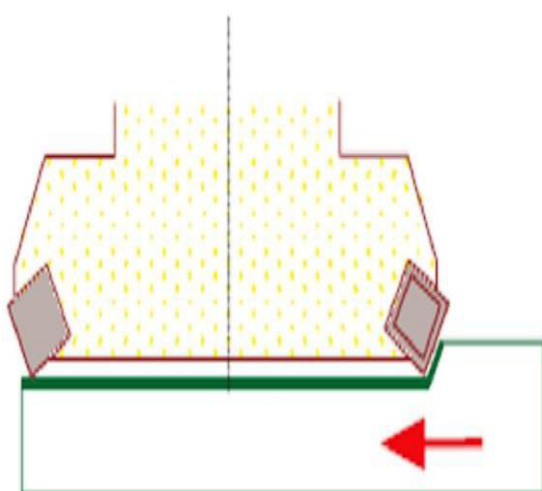
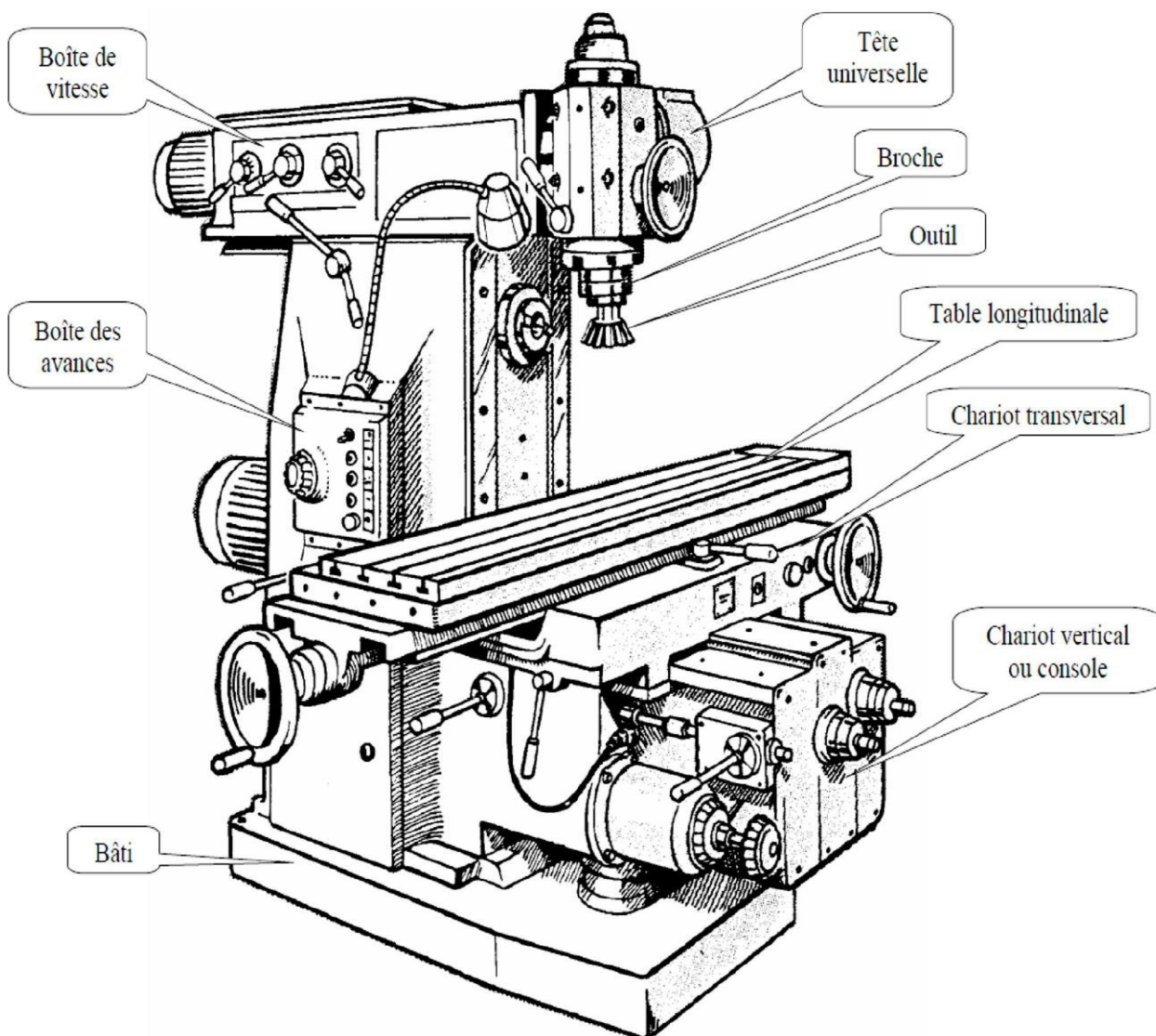


Figure. Fraisage en en bout & frisage en roulant.

II.4. Les fraiseuses :

Les fraiseuses ont supplanté certaines machines pour l'usinage de surfaces planes.

Ces machines peuvent également servir pour des opérations de contournage.



le travail en opposition :

L'effort tangentiel de coupe et l'avance sont de sens opposés. L'usinage commence en théorie avec une épaisseur de coupe nulle.

La fraise glisse au début sur la surface de coupe sans l'usiner avant de pénétrer dans la pièce à usiner.

La capacité de coupe s'amplifie au fur et à mesure de la progression de la dent.

L'effort de coupe, en augmentant tend à soulever la pièce à usiner de sa fixation.

L'outil travaille dans de moins bonnes conditions, *la rugosité augmente.*

Le travail en avalant ou en concordance:

L'effort tangentiel de coupe et l'avance sont de même sens.

La dent de la fraise pénètre dans la pièce en détachant une épaisseur de coupe maximale.

L'effort de coupe qui en résulte est élevé.

Cet effort a pour conséquence de presser la pièce et de la pousser dans le sens de l'avance: *solution favorable à l'obtention d'une bonne rugosité.*

Dans le fraisage en concordance la résultante R des efforts de coupe est dirigée dans le même sens que le M_f .

Elle tend à faire plaquer la pièce sur la table, mais également à entraîner celle-ci en raison des jeux fonctionnels du système vis-écrou.

Ce procédé ne peut être utilisé que sur des fraiseuses spéciales, munies d'un dispositif de compensation des jeux du système vis - écrou, afin d'éviter que la table ne se déplace par à-coups.

Dans le fraisage en bout :

La zone fraisée est simultanément en opposition et en concordance; il convient cependant de désaxer légèrement la pièce, par rapport à l'axe de la fraise, dans le but d'obtenir :

- Une zone fraisée en opposition plus large que la zone fraisée en concordance.
- Une composante axiale F_r de la résultante des efforts de coupe de sens opposé au déplacement de la pièce.

CHAPITRE III

ETUDE DE L'INFLUENCE DES PARAMETRES 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 et aussi sur l'état de surface des pièces usinées.

De la partie expérimentale, on déterminera les efforts et les rugosités en fonction de plusieurs avances par dent f_z et le tout sera interprété par des graphes pour bien démontrer cette influence.

Etant donné que la partie expérimentale a été annulée du fait du confinement et du Covid 19, nous nous sommes basés sur les données transmises par notre promoteur.

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'avancement **F_f**, parallèle à la direction de l'avance.
- L'effort de pénétration **F_p**, perpendiculaire au précédent.

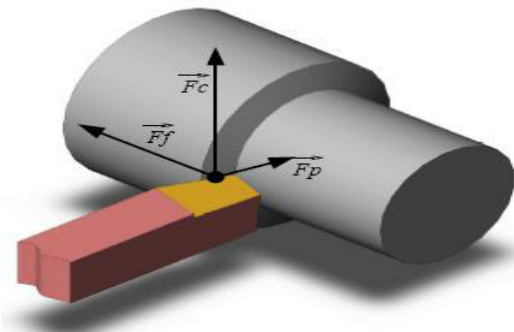


Figure III.1 : Les efforts outil pièce en tournage.

La fraise étant portée par son axe **O**, les efforts **F_f** et **F_p** admettent la résultante **F** qui passe obligatoirement par **O**.

$$\mathbf{F}_f = (0,2 \text{ à } 0,3) \mathbf{F}_c$$

$$\mathbf{F}_p = (0,4 \text{ à } 0,5) \mathbf{F}_c$$

$$F = \sqrt{(0,25 \times F_c)^2 + (0,45 \times F_c)^2 + F_c^2} \cong 1,12 F_c \quad (\text{III.1})$$

On prend généralement : **F** \approx **F_c**

III-2-1 Formules d'effort de coupe F_c et d' puissance de coupe P_c :

a- Cas du fraisage centré :

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

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

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.

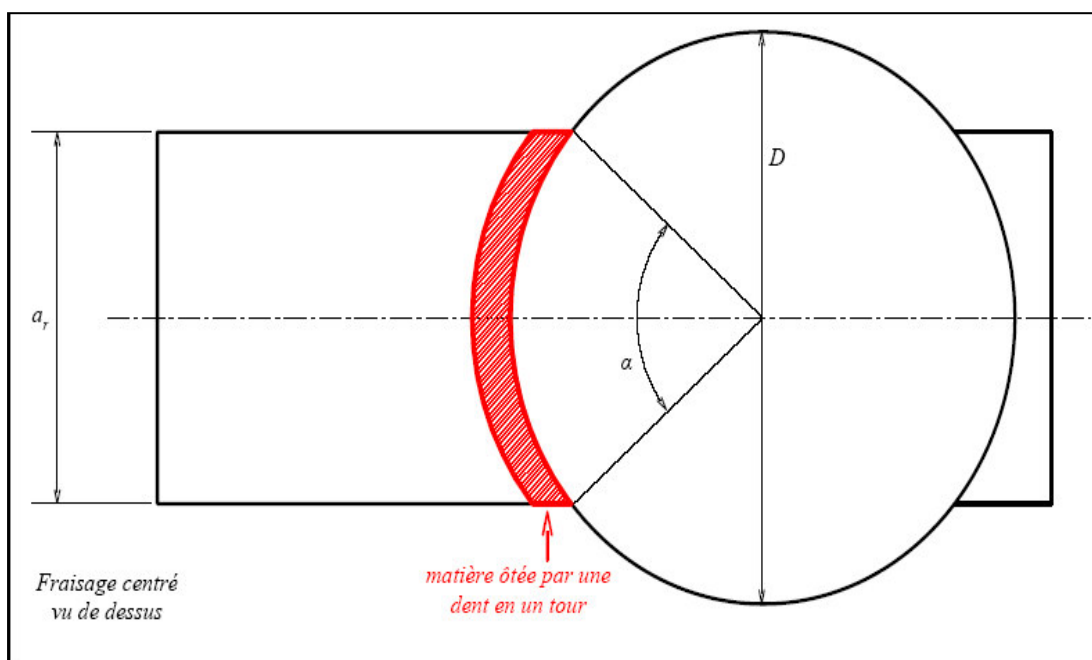


Figure III.2 : Cas de fraisage centré.

-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 :

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

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

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

b-Cas du fraisage décalé :

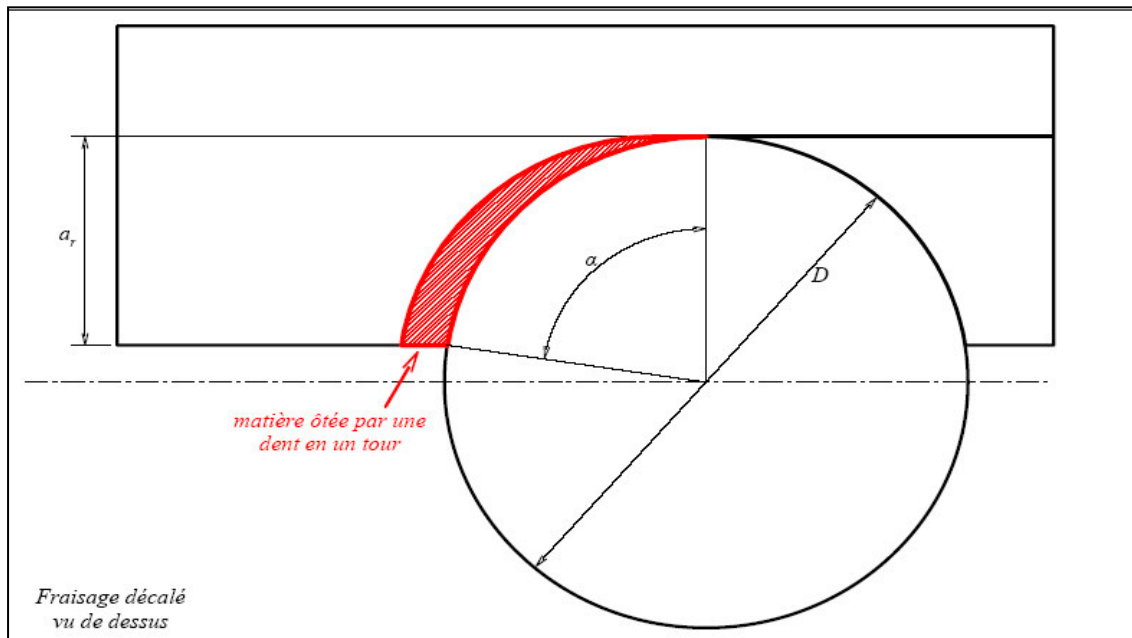


Figure III.3 : Cas de fraisage décalé.

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).

$$h_m = e_m \sin K_r \quad (III.9)$$

$$\text{Donc } h_m = \frac{2 f_z a_r}{D \alpha} \sin K_r \quad (III.10)$$

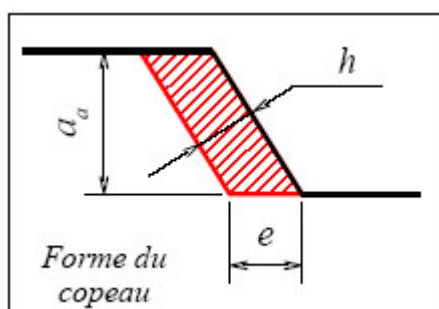


Figure III.4 : Forme du copeau.

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

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

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

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

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

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

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

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

h_m peut être aussi déterminé selon le tableau joint dans l'annexe I.

Avec les valeurs des h_m déterminées h_m et de la matière de la pièce à usiner, on peut valoriser K_c selon le tableau joint dans l'annexe II.

III-2-2 Calcule d'effort et puissance de coupe :

On calcule l'effort et puissance de coupe pour cinq valeurs d'avance dans les deux cas de fraisage centré et décalé et on prendre les paramètres suivants :

$$a_r = 50 \text{ mm.} \quad a_a = 1 \text{ mm.}$$

La matière de la pièce usiné: XC35.

$D = 60 \text{ mm}$. $Z = 6 \text{ dent}$.

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

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

On trouve les valeurs pressantes sur les tableaux :

a- Fraisage centré :

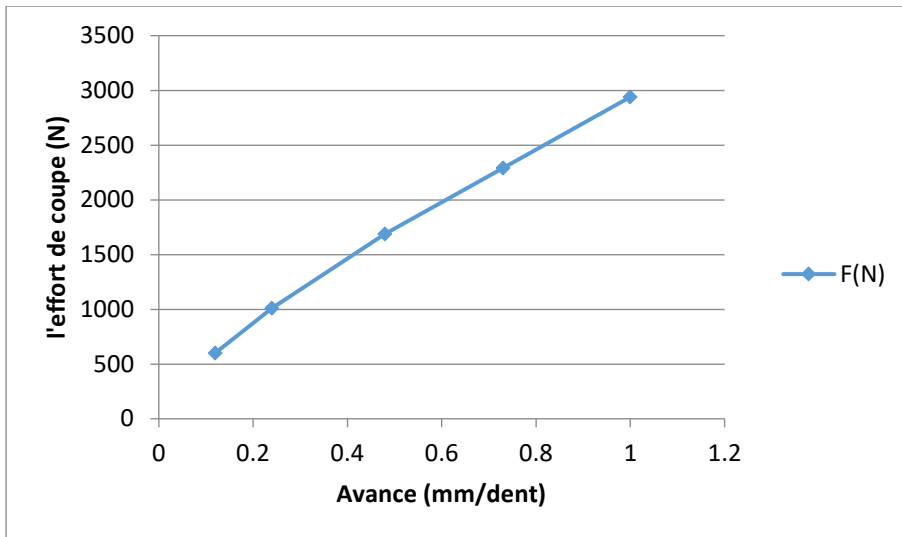
$F(N)$	$f_z(\text{mm}/\text{dent})$	$a_a(\text{mm})$	$a_r(\text{mm})$	$h_m(\text{mm})$	$K_c(N/\text{mm}^2)$	$P_c(Kw)$
601,9	0,12	1	50	0,1	3150	0,80
1008,91	0,24	1	50	0,2	2640	1,34
1689,17	0,48	1	50	0,4	2210	2,25
2289,96	0,73	1	50	0,6	1970	3,05
2939,6	1	1	50	0,8	1850	3,91

Tableau III.3: Résultats fraisage centré.

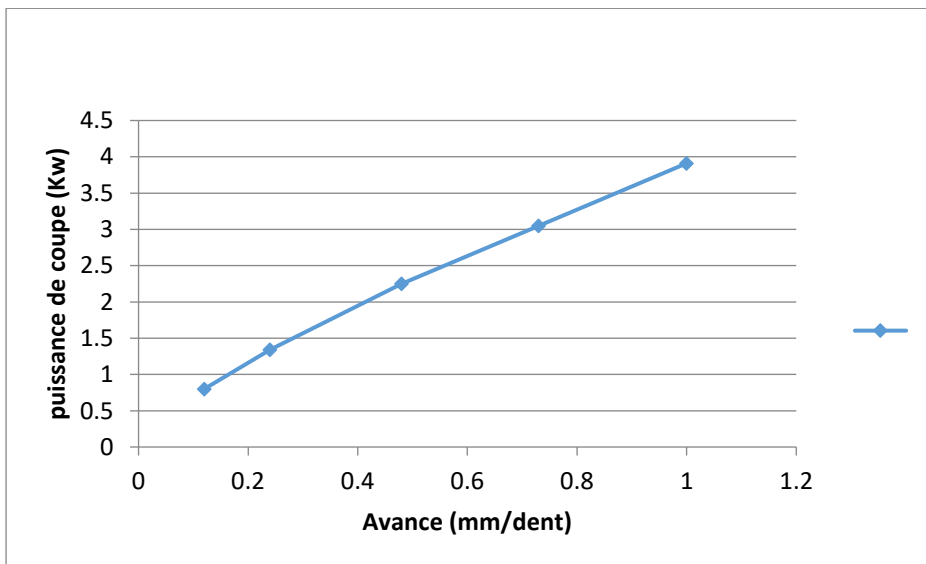
b- Fraisage décalé :

$F(N)$	$f_z(\text{mm}/\text{dent})$	$a_a(\text{mm})$	$a_r(\text{mm})$	$h_m(\text{mm})$	$K_c(N/\text{mm}^2)$	$P_c(Kw)$
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
2429,46	0,73	1	50	0,5	1970	3,24
3041,40	1	1	50	0,7	1850	4,06

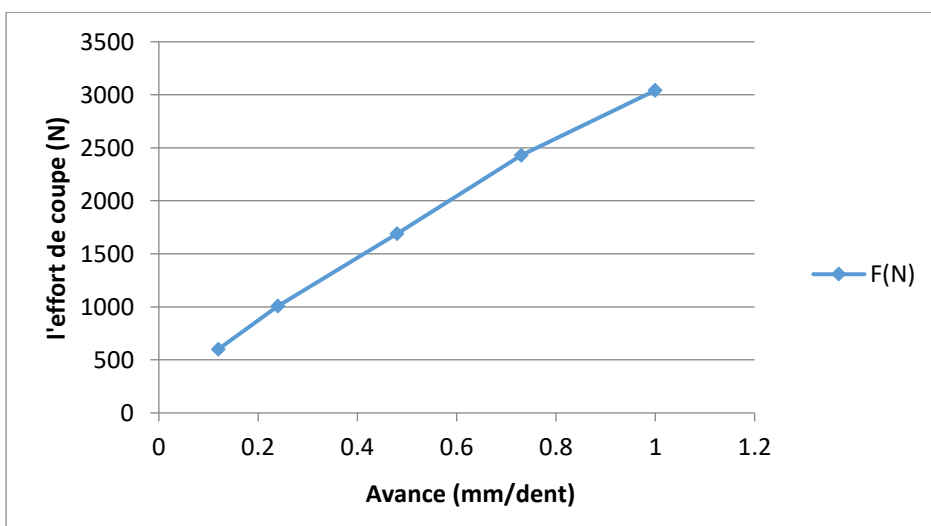
Tableau III.4: Résultats fraisage décalé.



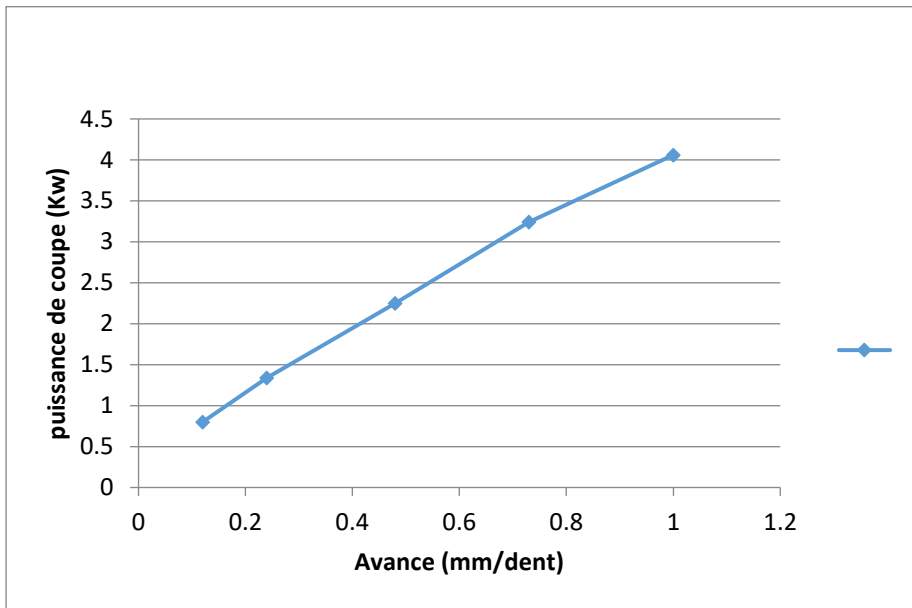
Grphe III.1 : Effort de coupe en fonction de l'avance fraisage centré.



Grphe III.2 : Puissance de coupe en fonction de l'avance fraisage centré.



Graphe III.3 : Effort de coupe en fonction de l'avance fraissage décalé.



Graphe III.4 : Puissance de coupe en fonction de l'avance fraissage 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 fraissage centré et décalé. Lorsque le paramètre f_z augmente, l'effort et la puissance de coupe augmentent aussi.

III-3 INFLUENCE SUR LA RUGOSITE DE SURFACE :

III-3-1 Formules : [1]

Avec une fraise à faux rond figure III.5, la valeur de la rugosité théorique est donnée par :

$$R_t = 125 \frac{f_z^2 \times Z^2}{R} \quad (\text{III.17})$$

R_t : La rugosité théorique (mm).

f_z : L'avance par dent (mm/dent).

Z: nombre des dents.

R: rayon de la fraise (mm).

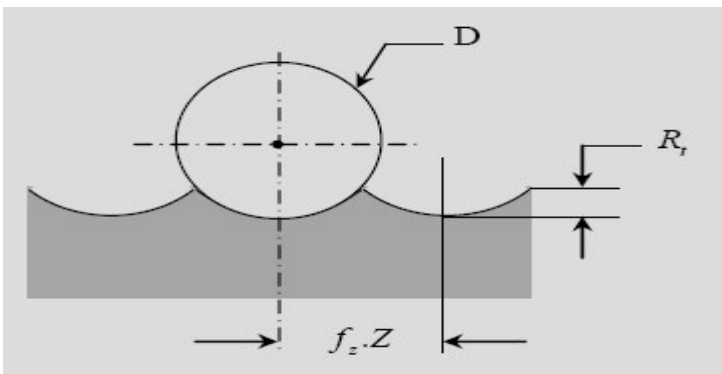


Figure III.5: Rugosité théorique.

Avec une fraise sans faux-rond, la surface produite est une suite de cycloïdes et la rugosité théorique s'exprime par :

$$R_t = 125 \frac{f_z^2}{\frac{D \pm f_z \times Z}{2} \pm \frac{\pi}{2}} \quad (\text{III.18})$$

+: Fraisage en opposition.

–: Fraisage en avalant.

III-3-2 Calcule de la rugosité :

La rugosité est déterminée pour 7 valeurs différentes d'avance f_z et pour les deux cas du procédé de fraisage (en avalant en en opposition). Le tableau suivant résume ces résultats :

a- Fraisage en opposition:

Z	f_z (mm/dent)	D (mm)	R_t (mm)
---	-----------------	--------	------------

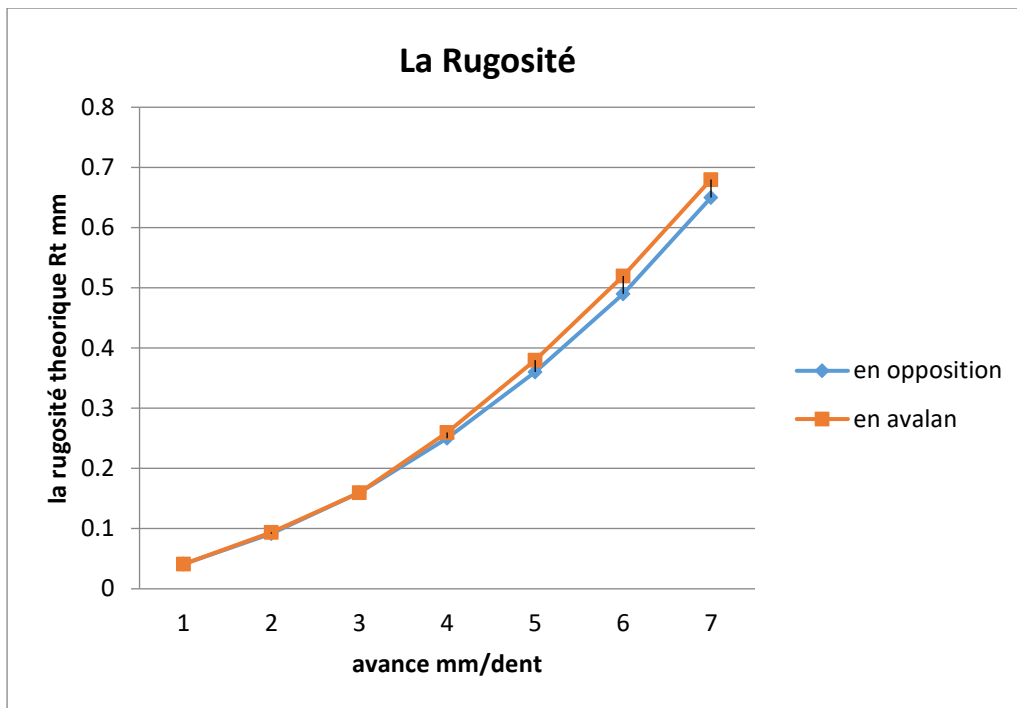
6	0,1	50	0,041
7	0,15	60	0,092
8	0,2	70	0,16
10	0,25	80	0,25
11	0,3	90	0,36
12	0,35	100	0,49
13	0,4	110	0,65

Tableau III.5 : Résultats de R_t fraisage en opposition.

b- Fraisage en avalant :

Z	f_z (mm/dent)	D (mm)	R_t (mm)
6	0,1	50	0,041
7	0,15	60	0,094
8	0,2	70	0,16
10	0,25	80	0,26
11	0,3	90	0,38
12	0,35	100	0,52
13	0,4	110	0,68

Tableau III.6 : Résultats de R_t fraisage en avalant.



Grphe III.5 : La rugosité en fonction d'avance pour deux cas de fraisage.

A partir de ses deux courbes de se graphe on observe que on a presque les mêmes influences sur les deux cas de fraisage en avalant et en opposition. Lorsqu'on augmente l'avance la rugosité augmente aussi.

III-4 CONCLUSION :

De cette partie expérimentale, on détermine que l'avance est un paramètre essentiel pour l'obtention d'un bon état de surface d'une pièce à usiner. Elle a une grande influence sur cet état.

Lors du procédé de fraisage, il faut diminuer les efforts et les puissances de coupe et la rugosité ; pour cela, il faut diminuer l'avance par dent.

CHAPITRE IV

SIMULATION NUMERIQUE DE : EFFORT DE COUPE ET PUISSANCE DE COUPE

IV.1/ INTRODUCTION :

A travers ce chapitre, nous avons utilisé une méthode de simulation, appelée Plan d'Expérience, pour simuler les résultats du chapitre précédent.

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

A cet effet, 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).

IV.2/ METHODE DES PLANS D'EXPERIENCE :

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/ DEFINITION :

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 EXPERIMENTAL 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.

VI.2.2.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

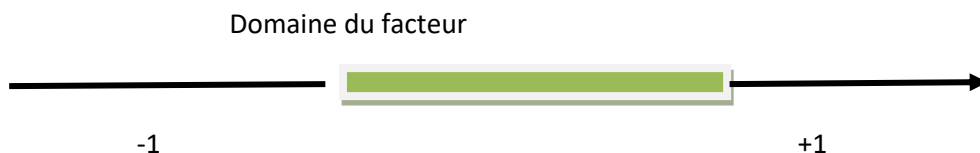


Figure IV.1 : Domaine de variation d'un seul facteur

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.

La figure VI.2 montre le domaine de variation de deux facteurs :

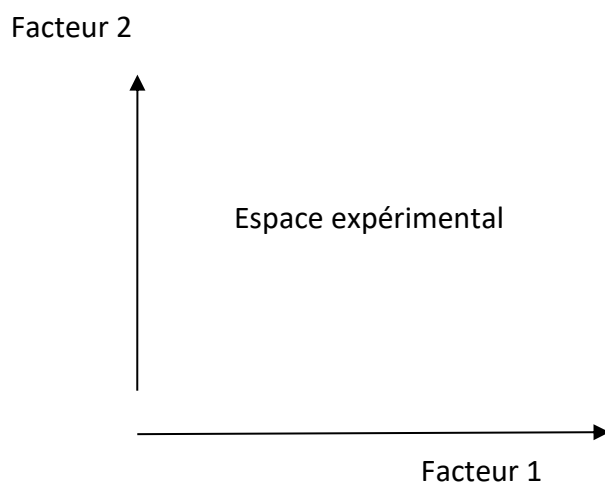


Figure IV.2 : Domaine de variation de deux facteurs

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.

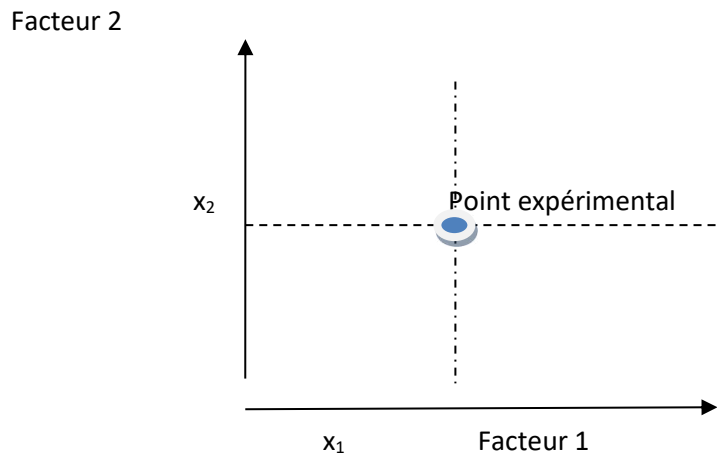


Figure VI.3 : Points expérimentaux dans l'espace expérimental.

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

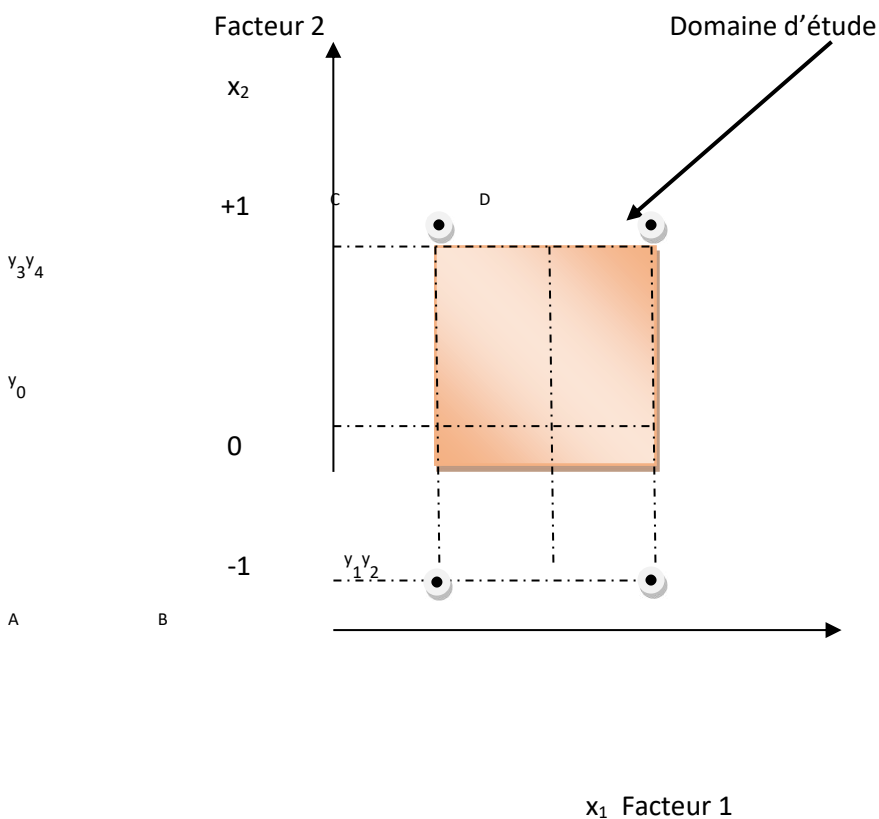


Figure IV.4 : Domaine d'étude pour le cas de 2 facteurs

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

IV.2.2.B. La réponse :

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

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.

IV.2.2.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 :

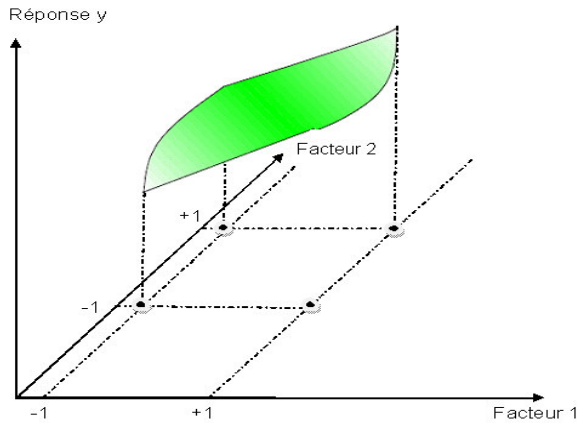


Figure IV.5 : Représentation d'une surface de réponse

IV.2.3/ NOTION DE MODELISATION MATHEMATIQUE 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. [5.4].

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 :

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

La forme développée pour notre cas s'écrit :

$$y_i = a_0 + a_1x_{i,1} + a_2x_{i,2} + a_3x_{i,3} + a_{12}x_{i,1}x_{i,2} + a_{13}x_{i,1}x_{i,3} + a_{23}x_{i,2}x_{i,3} + a_{11}x_{i,1}^2 + a_{22}x_{i,2}^2 + a_{33}x_{i,3}^2 \quad \text{(IV.3)}$$

Avec :

x_1 = Avance par dent,

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

x_3 = Effort de coupe.

Ces 3 paramètres (x_1, x_2, x_3) agissent sur la réponse "y", donc sur l'effort de coupe et sur la puissance de coupe.

Facteur	unité	maximum	minimum
L'avance par dent (f_z)	mm/dent	1	0.12
Pression spécifique de coupe (K_c)	N/mm ²	1850	3150

Tableaux IV.1 : Les 2 facteurs, leurs unités, leurs maximums et leurs minimums.

Facteur 1	Facteur 2	Réponse 1 : l'effort de coupe (N)	Réponse 2 : la puissance de coupe (kw)
1	3150	5015.92	6.68
0.12	1850	353.5	0.47
1.00	1850	2945.85	3.92
0.12	3150	601.91	0.8

Tableau IV.2 : Les 2 facteurs et leurs réponses

Ce tableau peut être interprété dans la figure suivante :

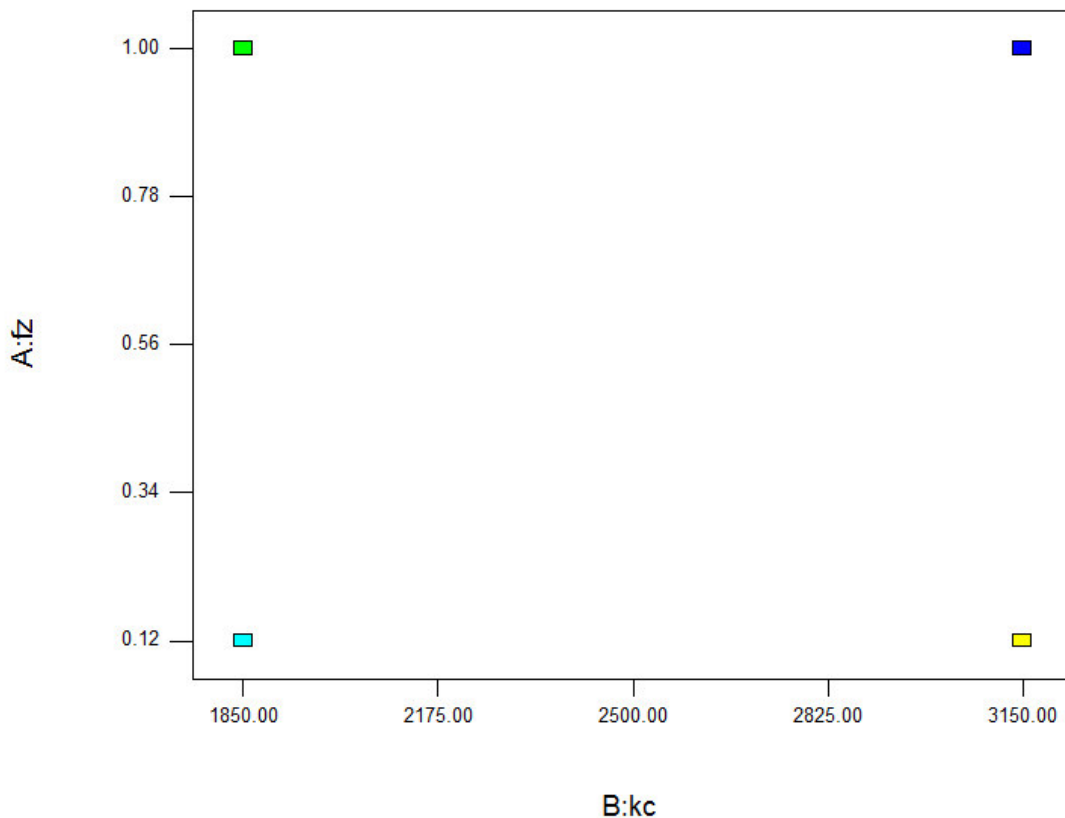


Figure IV.6. : Domaine d'étude de l'avance et de la pression spécifique de coupe

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 :

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

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 la réponse 1 : l'effort de coupe**

Facteur	Coefficient estimé
a_0	2229.30
a_1	1751.59
a_2	579.62
a_{12}	455,41

Notre équation devient :

$$y = 2229,30 + 1751,59 x_1 + 579,62 x_2 + 455,41 x_1 x_2 \text{ (IV.6)}$$

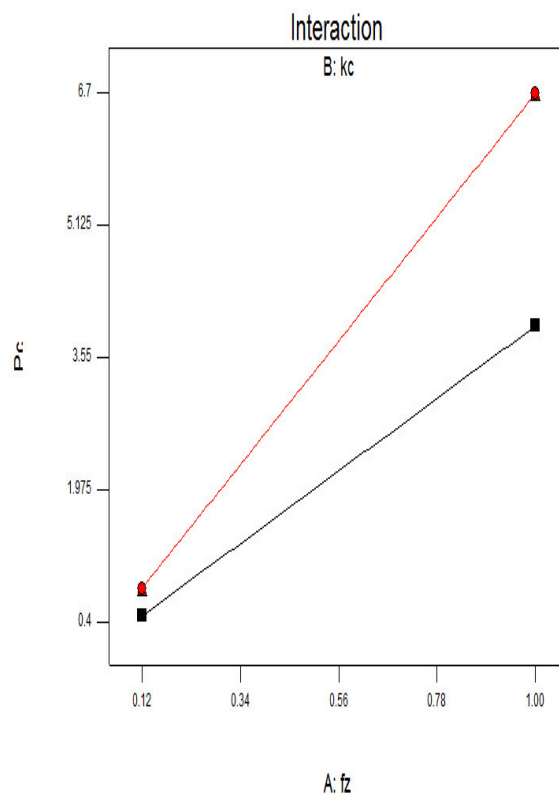
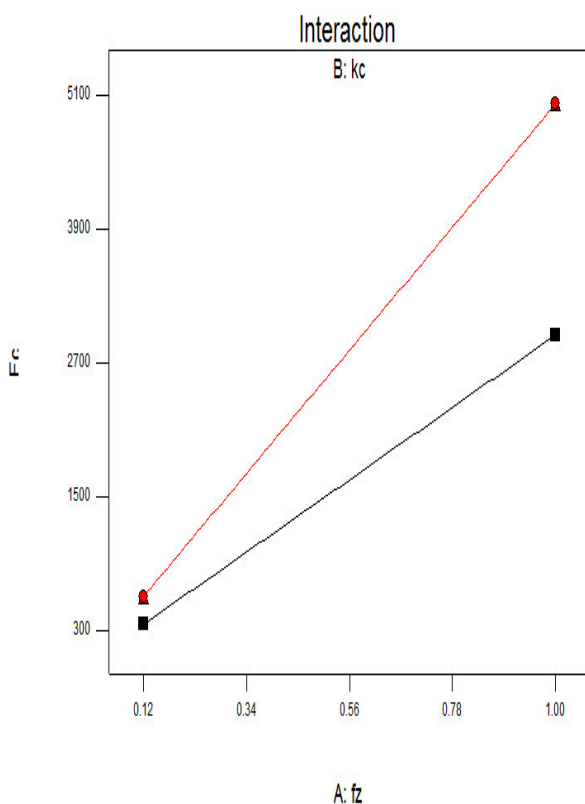
- **2eme cas la réponse 2 : la puissance de coupe**

Facteur	Coefficient estimé
a_0	2.97
a_1	2.33
a_2	0.77
a_{12}	0.61

Notre équation devient :

$$y = 2,97 + 2,33 x_1 + 0,77 x_2 + 0,61 x_1 x_2 \quad (\text{IV.7})$$

Du tableau précédent et des résultats d'application de l'équation IV.7, 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)

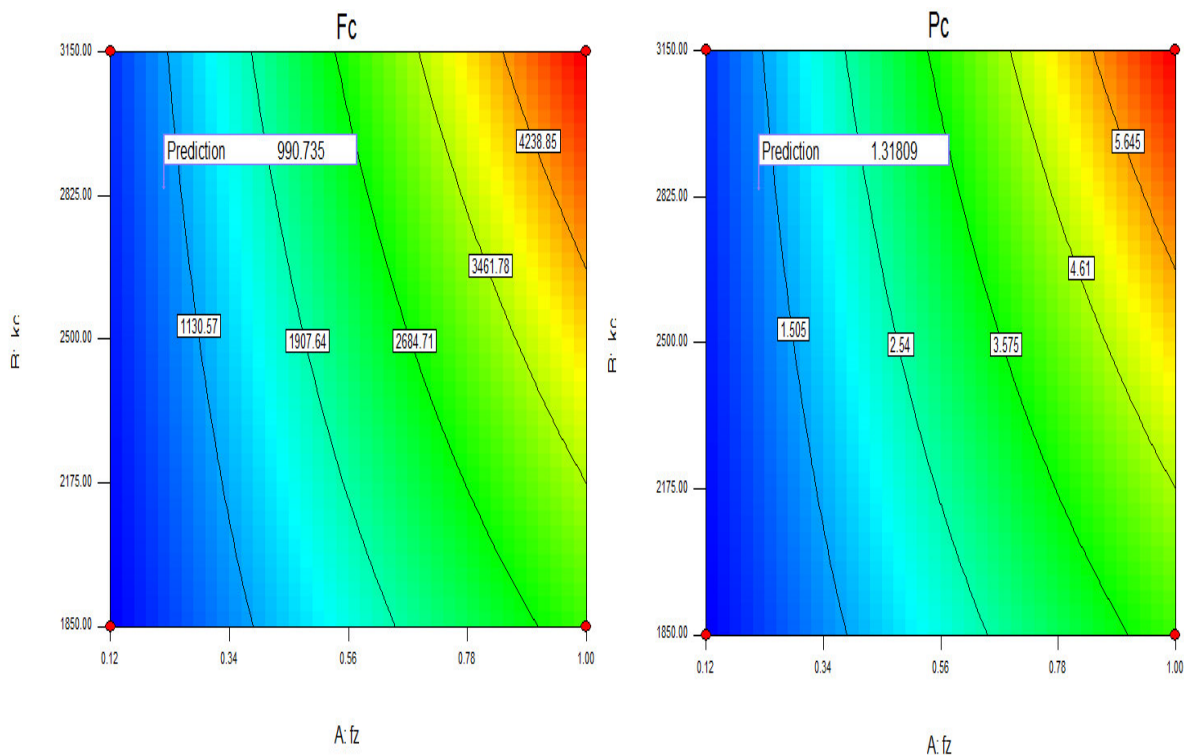


Figure IV.8 :

contours de réponses pour Fc et Pc

De les figures IV.7 et IV.8, on la prédiction de toute valeur de l'effort de coupe pouvant se faire dans le domaine d'expérience même en cas de non réalisation des expériences.

IV.3 /ETUDE DE LA RUGOSITÉ :

IV.3.1 / Fraisage en opposition :

Facteur	unité	maximum	Minimum
L'avance par dent (fz)	mm/dent	0.4	0.1
Le diamètre (D)	mm	110	50
Nombre de dents	dents	13	6

Tableau IV.3: Les trois facteurs, leurs unités, leurs maximums et leurs minimums

Facteur 1(avance par dent)	Facteur 2 (diamètre)	Facteur 3 (nombre de dents)	Réponse (rugosité) mm
0.4	110	13	0.35
0.4	50	6	0.77
0.4	50	13	0.75
0.1	110	13	0.02
0.1	110	6	0.02
0.4	110	6	0.35
0.1	50	6	0.04
0.1	50	13	0.04

Tableau IV.4 : les trois facteurs et leurs réponses

Ce tableau peut être interprété dans la figure suivante :

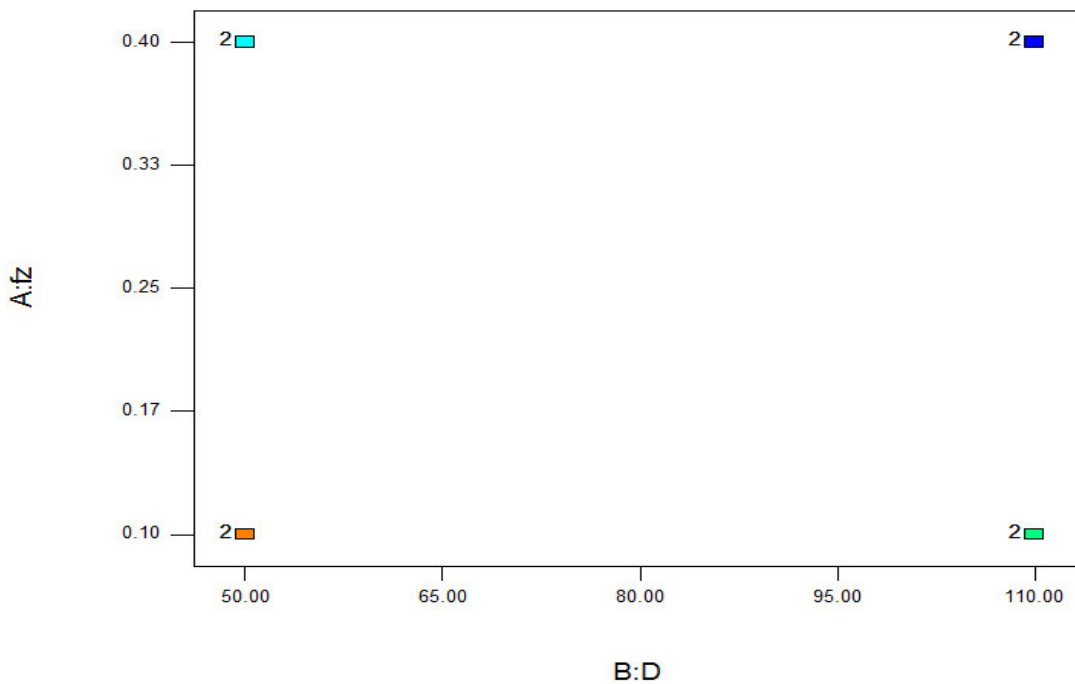


Figure IV.9 : domaine d'étude de diamètre et de l'avance par dent

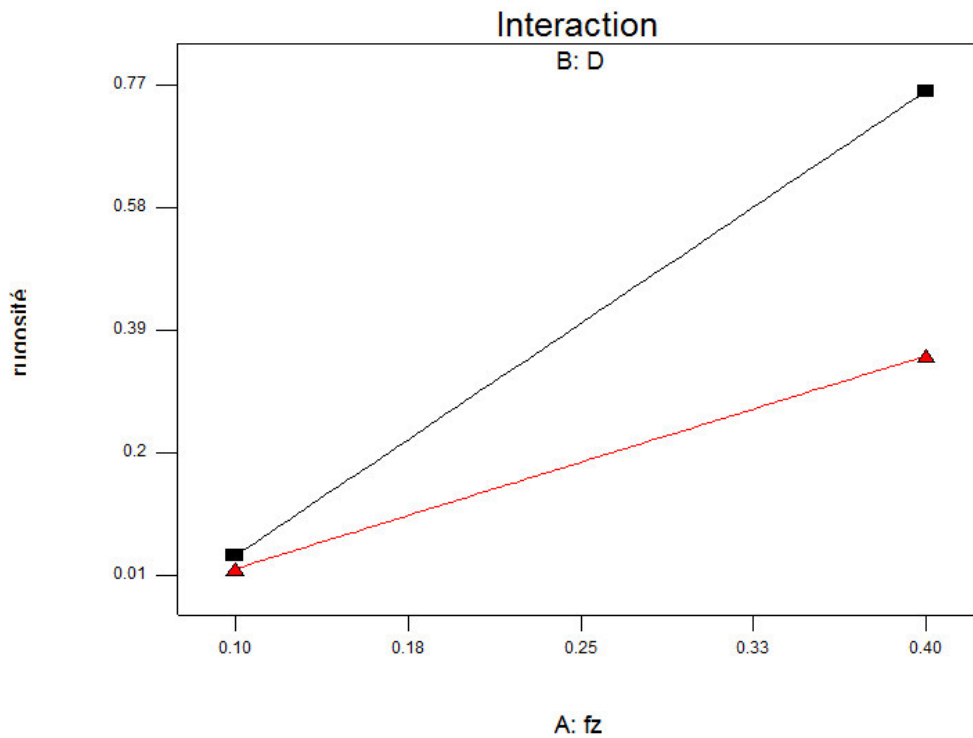


Figure IV.10 : Rapport Rugosité/Avance

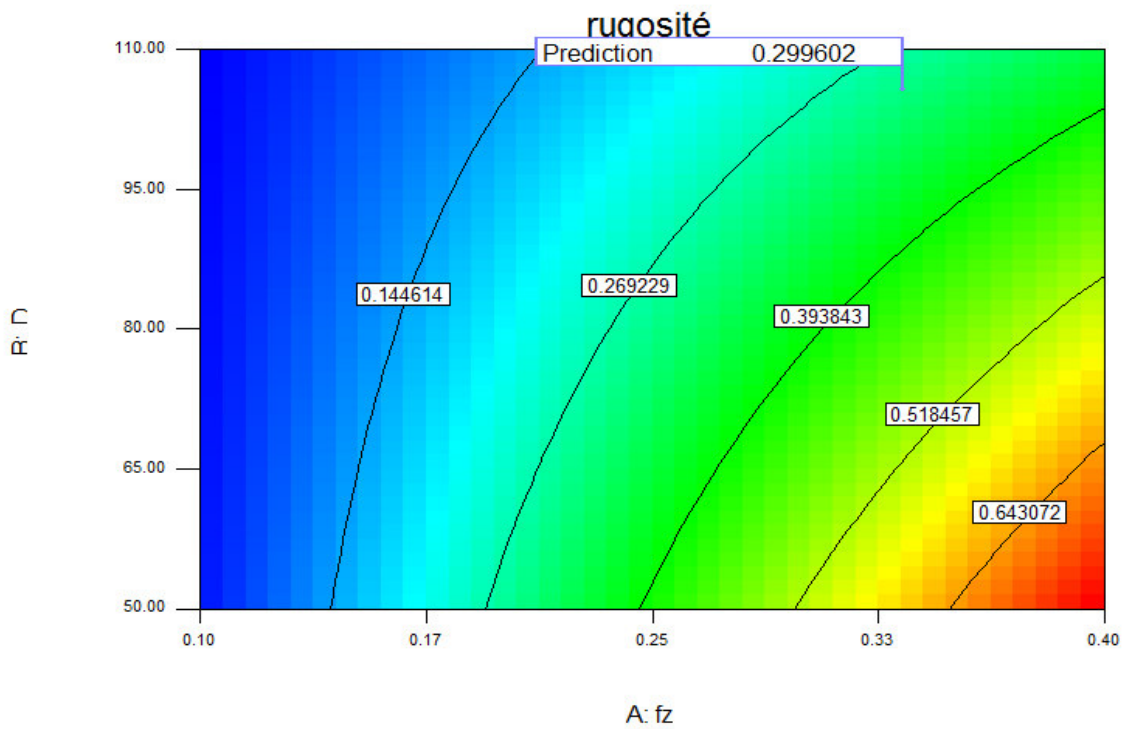


Figure IV.11 : contours de réponse pour le fraisage en opposition

IV.3.2 /Fraisage en avalant :

Facteur	unité	maximum	Minimum
L'avance par dent (fz)	mm/dent	0.4	0.1
Le diamètre (D)	mm	110	50
Nombre de dents	dents	1	6

Tableau IV.5 : Les trois facteurs, leurs unités, leurs maximums et leurs minimums

Facteur 1(avance par dent)	Facteur 2 (diamètre)	Facteur 3 (nombre de dents)	Réponse (rugosité) mm
0.1	110	6	0.02
0.4	50	13	0.85
0.4	50	6	0.82
0.1	50	13	0.05
0.4	110	13	0.37
0.1	50	6	0.05
0.1	110	13	0.02
0.4	110	6	0.36

Tableau IV.6 : les trois facteurs et leurs réponses

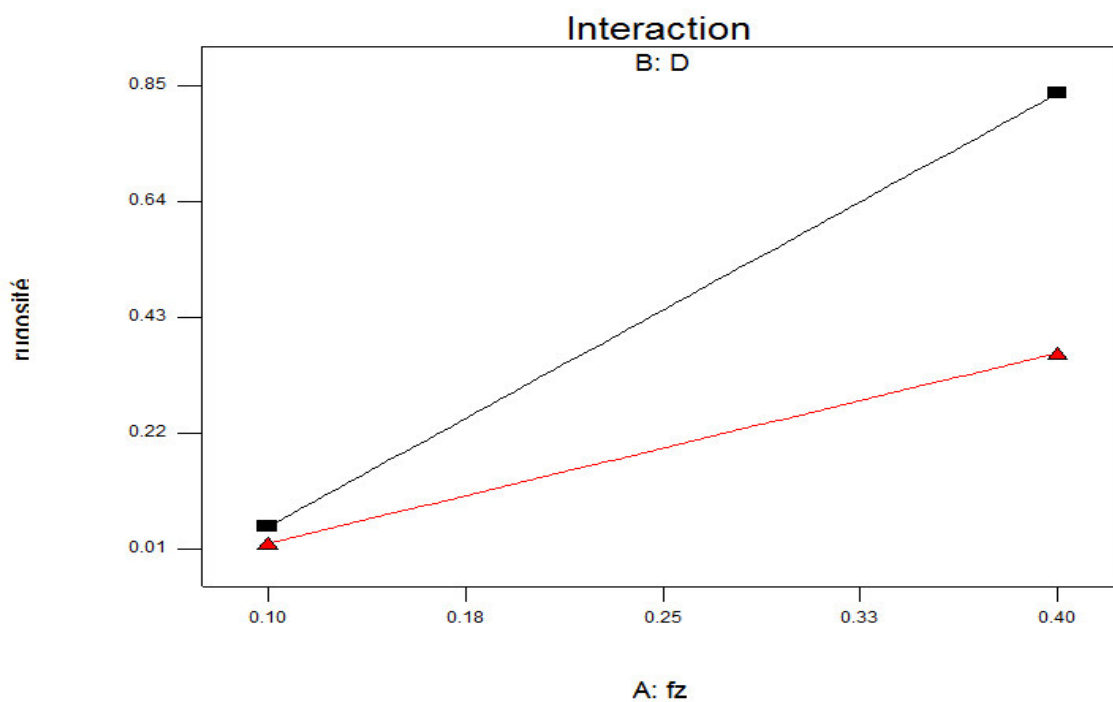


Figure IV.12 : Rapport Rugosité/Avance

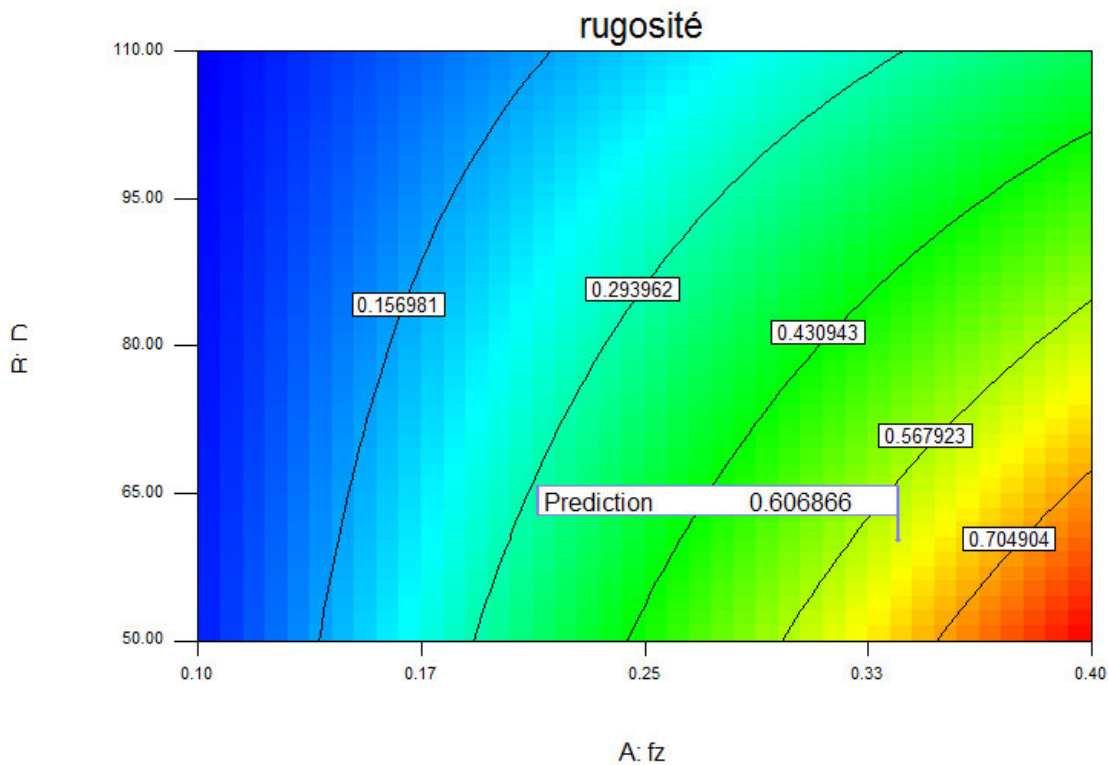


Figure IV.13 : contours de réponse pour le fraisage en avalant

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 générale

Notre travail consistait à étudier le procédé de fraisage et d'utiliser comme référence une opération d'usinage de ce procédé. Nous avons étudié l'influence des paramètres de coupe sur l'usinage.

Après avoir déterminé ces paramètres, nous avons appliqué la méthode des plans d'expérience pour mettre en valeur les résultats obtenus et faire une comparaison, par la suite.

De ce travail, on peut conclure que :

- L'effet simultané des paramètres de coupe ne peut pas être montré et illustré par un graphique, seule l'équation polynomiale (modèle) peut donner 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.

liste des symboles

Mc: Mouvement de coupe

Ma : Mouvement d'avance

Mp: Mouvement de profondeur

Vc: Vitesse de coupe m/min

D:Diamètre de la pièce mm

L : Longueurmm

N:Vitesse de rotation de la pièce tr/min

α : L'angle de dépouille (°)

γ :L'angle de coupe (°)

β : L'angle de taillant (°)

ϕ : L'angle de direction d'avance (°)

Rt :L'écart totale de la Rugosité μm

: Vitesse angulaire rad/s

a: Profondeur de passe mm

f: L'avance de l'outil. mm

IV : La vitesse de rotation de l'axe tour/min

POM: Pièce / Outil de pièce / Machine -outil

ξ : Facteur d'amortissement

\emptyset : L'angle de cisaillement (°)

A: L'amplitude des vibrations re : Rayon du bec de l'outil

μ :Angle varie avec un pas de $\Delta\theta$ de $0-360^\circ$ (°)

$\Delta\theta$: Section radial de la spiral,

ω_0 : Pulsation propre (rad/s)

T0: La période [s]

f_z : Fréquence propre rad/s

Fc : L'effort de coupe N

Kc : Force de coupe par unité de surface (valeur indicative à partir de Sandvik). s : (profondeur de passe (mm) * l'avance de coup [mm])

m: Masse de la pièce kg

ρ : Masse volumique k g. m⁻³

E: Module de Young GPa

Kx: Raideur équivalente dans la direction N/m

Cx : Coefficient d'amortissement Ns/m

h : Epaisseur de coupe mm

b: Largeur de coupe mm

Zi : L'altitude de chaque point

Kr : Angle de direction d'arête (°)

Bibliographie

- [1] Temmar.M, Cours de fabrication mécanique, Département de mécanique, Faculté de Technologie, Université Saad Dahlab de Blida, 2019.
- [2] Bourdet.P, La coupe des métaux, Polycopié, Ecole Normale Supérieure de Cachan, version V5, octobre 2004.
- [3] N.S.atcherkane, Machines travaillant par enlèvement de métal, société des publications mécanique Paris , France 1959.
- [4]D.Gelin and M.Vincent, Element de fabrication .Les Editions Foucher , 1995.
- [5]Alain Passeron, «fraisage»,Techniques de L'Ingénieur, BM7086, 1997
- [6]Jean-Pierre cordebois et coll, « Fabrication Par Usinage », DUNOD, Paris 2003
- [7] Rocardier, « Cours sur le fraisage - Usinage Cours Technologie », 2011
- [8]M.Balazinski, Fabrication mécanique avancée, MEC 4530,Ecole polytechnique de Montréal Canada .
- [9] [thèse doctorat : comportement dynamique du systemepiece /outil / machine (pom en rectification plane passe profonde par Mamadou DIEYE 2006)].
- [10][Ispas et al, 1999],ISPAS C ., GHEORGHIU H.,PARAUSANU I.,ANGHEL V. Vibrations des systèmes Technologique. EditureAgir,Série : Ingénierie Mécanique , Bucuresti , 1999.
- [11][Ryder et al, 1975]. RYDER G.H. ? BENNET M.D. Mechanics of machines. MacMillan, London, 1975.
- [12] thèse doctorat : étude des vibrations auto entretenues en coupe tridimensionnelle : nouvelle modélisation appliquée au tournage par ClaudiuFlorinelBisu 2007
- [13] Benmohammed, 1996, BenmohamedB, Identification des lois d'effort de coupe de fraisage en régime dynamique. Thèse de Doctorat de Mécanique, L'Ecole Nationale superiere d'Arts et Métier-France,N d'ordre : ,1996
- [14] Ispas et al, 1998, ISPAS C ,PREDINCEA N ., ZAPCIU M,MOHORA C.,BOBOC D