

Table des matières

Introduction Générale.....	2
I. Généralité sur le tournage	4
1.1. Introduction.....	4
1.2. Le tournage	4
1.2.1. Principe	4
1.3. Principe physique de la coupe des métaux.....	5
1.4. Coupe orthogonale	5
1.5. Formation du copeau	7
1.5.1. Morphologies des copeaux	8
1 .6 . Types de copeaux	10
1.6.1. Les copeaux continus.....	10
1.6 .3. Les copeaux discontinus sous segmentés	10
1.7. Etude cinématique de la coupe orthogonale.....	12
1. 8. Résistances à la coupe	13
1.8.1. Introduction.....	13
1.9. Système de force.....	14
1.9.1. Force de coupe.....	14
1.9.2. Influence de la profondeur de passe et de l'avance	14
II. Modélisation Analytique.....	15
2.1. Modélisation classique de la coupe orthogonale.....	16
2.2. Modèle de Merchant (1940-45).....	17
2.2.1. Hypothèses de la théorie.....	17
2.2.2. Modèle physique de la coupe.....	17
2.2.3. La déformation par cisaillement ϵ :	21
III. Approche semi-expérimentale	22
3 .1. Introduction.....	23
3.2. Etude Expérimentale.....	23
3. 2.1 .Conditions des Expériences	23
3.3. Plans d'expériences	25
3.3.1. Définition des plans d'expérience.....	25

3. 3.2. Plans a plusieurs niveaux.....	27
3 .4. Resultats des essais	30
3.4.1. Evaluation semi expérimentale des efforts de coupe	32
3.4.2. Les copeaux obtenus.....	34
3.4.3. Interprétations des résultats	36
Conclusion Générale	53
Références bibliographiques	54

Liste des figures

Figure. 1.1 : Principe du tournage	4
Figure 1.2 : Configurations de la coupe orthogonale	5
Figure 1.3 : Cinématique et géométrique d'une coupe orthogonale [3]	6
Figure 1.4 : Champ et types de déformation	7
Figure 1.5 :Trois formes basiques des copeaux (a) copeau droit, (b) copeaucourbé dans le plan de la face de coupe, (c) copeau courbé dans le plan orthogonal à la face de coupe[JAW_93].....	8
Figure 1.6 : Les différentes formes macrographiques de copeaux [4].....	9
Figure 1.7 : (a) Copeau continu formé en coupe orthogonale, (b) Coupe orthogonale avec arête rapportée, acier 0.13% C	10
Figure 1.8 : Copeau discontinu.....	10
Figure 1.9 : Cinématique de la coupe orthogonale	11
Figure 1.10 : Les actions de contact exercées sur l'outil. [6]	12
Figure 1.11 : Schéma des composantes des efforts de coupe. [6]	13
Figure 1.12 : Section droite d'un copeau [7, 8].....	14
Figure 2.1 : Principaux acteurs de la modélisation analytique des procédés d'usinage.....	17
Figure 2.2 : Définition du cercle des efforts combinés(Merchant) [9].....	18
Figure 2.3 : Déformation par cisaillement. [12]	22
Figure 3.1. Espace expérimental.....	27
Figure 3.2. Point expérimental	28
Figure 3.3.Plans à plusieurs niveaux	29
Figure 3.4 : Variation de la composante axiale en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance lors de l'usinage avec (p=0.5mm).....	40
Figure 3.5 : Variation de la composante axiale en fonction de la vitesse de coupe et l'avance lors de l'usinage avec (a=0.11mm/tr)	45

Figure 3.6 : Evolution des composantes de l'effort de coupe en fonction lors de l'avance et profondeur de passe lors de l'usinage avec le (Vc=50 m/min)..... 50

Liste des photos

Photo 3.1 : Tour parallèle SN40 C N	25
Photo 3.2 : Outil de coupe en chariotage	26
Photo 3.3 : Eprouvette	26
Photo 3.4. Montage Mixte	31
Photo 3.5. Photo de l'expérience	31
Photo 3.6 : Mecromètre numérique	32
Photo 3.7 : Mesurer d'épaisseur du copeau.....	32
Photo 3.8. Les copeaux continus	36
Photo 3.9 :Les copeaux discontinus.....	38

Liste des tableaux

Tableau 01 : Plan d'expériences de plusieurs niveaux.....	30
Tableau 02 : Valeurs limites (Vc, a, p)	30
Tableau 03 : Valeurs limites (Vc, a, p, N)	31
Tableau 04 : Résultats des essais	33
Tableau 05 : Résultats des essais:	34
Tableau 06 : Résultats des essais des efforts des coupes	35
Tableau 07 : Résultats des expériences suivant la méthode Plan d'expériences.	38
Tableau 08 : Résultats des expériences suivant la méthode Plan d'expériences.	39
Tableau 09 : Résultats des expériences suivant la méthode Plan d'expériences.	40

Liste des symboles

Mc : Le mouvement de coupe

Ma : Le mouvement d'avance

MP : Le mouvement de pénétration

h_c : Epaisseur du copeau(mm)

h : L'épaisseur de coupe (mm)

C_h : le rapport de coupe (mm)

V_c : Vitesse de coupe (m/min)

V_f : Vitesse de frottement (m/min)

V_s : Vitesse de cisaillement (m/min)

F_x : Composante axiale (daN)

F_y : Composante radiale (daN)

F_{xy} : I 'effort de pénétration(daN)

F_z : Composante aux principaux(daN)

R : Résultant de coupe (daN)

a : Avance par tour (m/min)

p : profondeur de passe (mm)

N : Fréquence de rotation (tr/min)

Φ : L'angle de cisaillement ($^{\circ}$)

γ : Angle de coupe ($^{\circ}$)

α : Angle de dépouille ($^{\circ}$)

β : Angle de pointe ($^{\circ}$)

L : La longueur (mm)

D : Le diamètre (mm)

ε : *La déformation par cisaillement*(mm)

η : L'angle de frottement. ($^{\circ}$)

μ : Le coefficient de frottement apparent(daN)

HB : La dureté Brinell.

As : La surface de la zone de cisaillement(mm^2)

Introduction Générale

Introduction Générale

La mise en forme des pièces mécaniques par enlèvement de matière est encore aujourd’hui une technique très répandue. L’usinage en particulier est un procédé complexe qui fait depuis longtemps l’objet de nombreuse recherche, cette recherche expérimentale montre que l’augmentation de la vitesse de coupe et la température influe sur la durée de vie de l’outil.

L’obtention des formes requises d’une pièce par enlèvement de matière est encore à ce jour le procédé de fabrication le plus répandu. Malgré les progrès réalisés par les procédés de mise en forme des matériaux (fromage, fonderie...), l’usinage se révèle nécessaire pour l’obtention des produits finaux [1]. L’objectif principal de l’usinage est l’augmentation du taux de productivité, la diminution du temps et du coût de production. Pour atteindre cet objectif on utilise les méthodes d’optimisation des conditions de coupe [2], afin de réduire au maximum les efforts de coupe qui surgissent lors d’une opération d’usinage. La détermination expérimentale de ces efforts se fait généralement par mesure dynamométrique. L’inexistence des équipements de mesure au niveau l’atelier du hall technologique de notre faculté, nous a poussés à proposer une méthode semi-expérimentale permettant d’évaluer les efforts de coupe en appliquant le modèle de Merchant (forces combinées) combinée à la mesure de l’épaisseur du copeau après formation. Afin d’atteindre notre objectif, ce travail est composé des chapitres suivants :

Le premier chapitre traite sur les généralités de l’usinage, et les mécanismes de la formation du copeau en coupe orthogonale.

Dans le deuxième chapitre nous présentons une étude basée sur une modélisation mécanique qu’on applique à une coupe orthogonale, et à travers laquelle nous avons développé des relations analytiques liant les paramètres cinématiques et géométriques aux efforts de coupe.

Le troisième chapitre est dédié à la démarche expérimentale, et l’utilisation de la méthode des plans d’expérience afin de réduire au maximum le nombre des essais, présente les résultats atteints ; et discute une méthode d’optimisation de ces résultats.

CHAPITRE I :

Généralité sur

Le tournage

I. Généralité sur le tournage

1.1. Introduction

L'usinage par enlèvement de matière, consiste à réduire progressivement les dimensions de la pièce par enlèvement du métal à froid sans déformation de la matière utilisant un outil.

Dans ce chapitre nous présentons une généralité sur le tournage, qui contient des définitions. Les conditions de coupe et la géométrie d'outil plus les paramètres techno-économiques de production (temps, coût).

1.2. Le tournage

1.2.1. Principe

Le tournage est le procédé d'usinage le plus répandu. Il consiste à usiner par enlèvement de métal (copeau) des surfaces de révolution cylindrique et conique, extérieures et intérieures, des surfaces profilées, des filetages..., à l'aide d'un outil généralement à arête unique normalisée.

L'opération de tournage est réalisée par la combinaison de trois mouvements (fig.1.1)

- Le mouvement de coupe Mc caractérisé par la rotation de la broche et la pièce qui en est solidaire.
- Le mouvement d'avance Ma caractérisé par le déplacement lent de l'outil dans le sens longitudinal, transversal ou oblique par rapport à l'axe de la broche.
- Le mouvement de pénétration Mp caractérisé par le déplacement lent de l'outil dans une direction généralement perpendiculaire à Ma . Ce mouvement permet la mise en position de l'outil par rapport à la pièce.

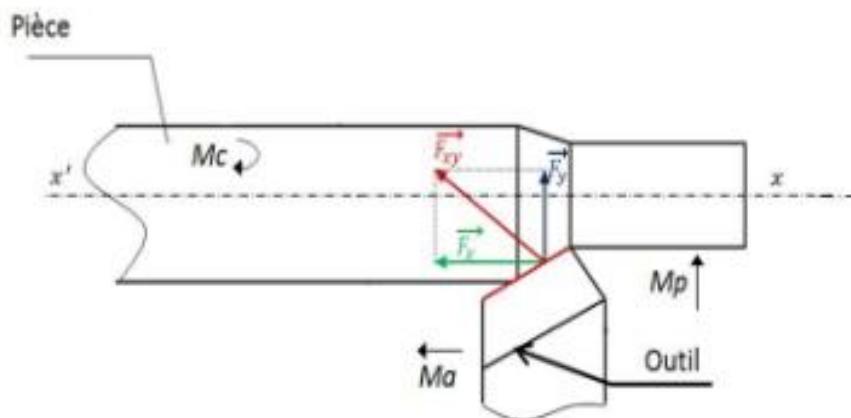


Figure. I.1 : Principe du tournage

1.3. Principe physique de la coupe des métaux

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. A titre d'exemple l'optimisation du choix des outils et la prédiction de leur durée de vie. L'évaluation des efforts de coupe ... 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.

Le phénomène de coupe est de caractère très complexe. Afin de simplifier le mécanisme de formation du copeau, on revient à une configuration de coupe assez simple «coupe orthogonale ».

1.4. Coupe orthogonale

La coupe orthogonale est une configuration particulière où l'arête de coupe doit être perpendiculaire à la direction de la vitesse de coupe (V_c) et à la direction de la vitesse d'avance (V_a) de l'outil. Dans ce cas particulier d'usinage, la largeur du cylindre à paroi mince devient l'équivalent de la profondeur de passe.

La figure I.2 présente les deux configurations de coupe orthogonale généralement utilisées.

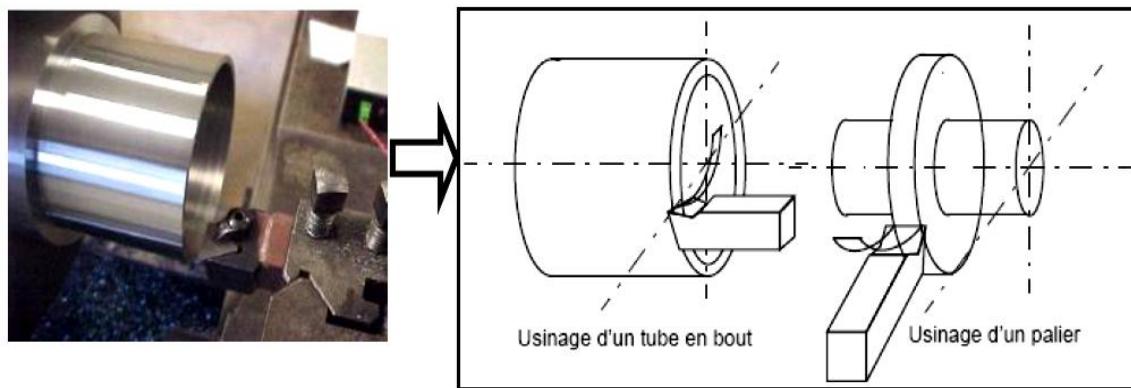


Figure I.2 : Configurations de la coupe orthogonale

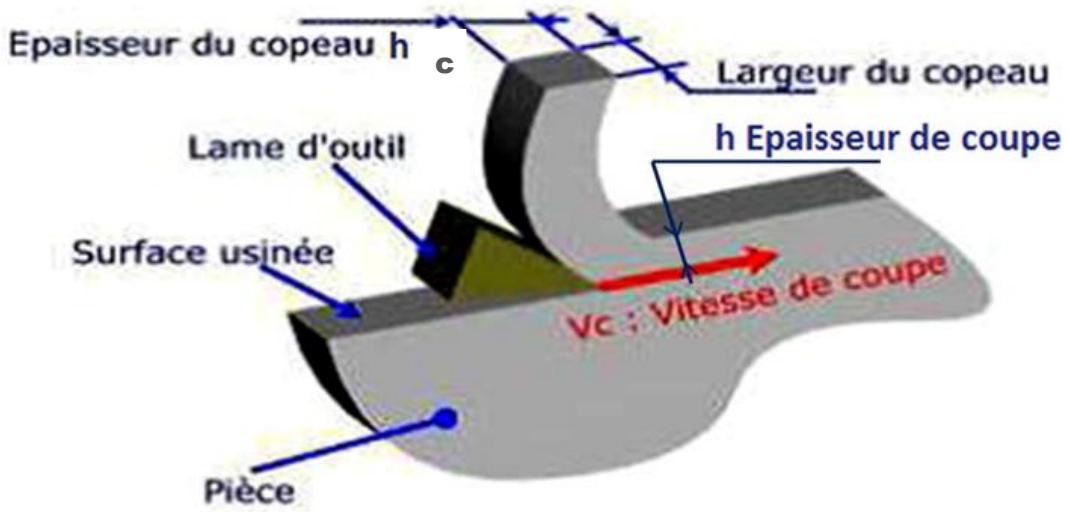


Figure I.3 : Caractéristiques cinématiques et géométriques d'une coupe orthogonale [3]

Vu que la largeur du copeau reste importante par rapport à son épaisseur (avance), la coupe orthogonale peut se ramener à un problème plan (déformation plane). Cette configuration présente l'avantage de simplifier la coupe (réduction du nombre de paramètres) au niveau expérimental et au niveau de la modélisation analytique et numérique. De plus, la configuration en coupe orthogonale favorise l'instrumentation de l'usinage. (Fig1.3).

Pour mieux cerner le mécanisme de formation du copeau, il est nécessaire de définir clairement les grandeurs géométriques et cinématiques de base d'une coupe orthogonale (fig. I.3).

L'outil génère sur la pièce une épaisseur de coupe h , égale à l'avance (a). Après sa transformation en copeau, cette couche de métal augmente d'épaisseur et devient (h_c).

Ce gonflement du copeau dû à la compression de l'outil sur la pièce, est caractérisé par le rapport de coupe $C_h = h / h_c$ qui est toujours $< à 1$ (0.76 – 0.8)

1.5. Formation du copeau

La matière de la pièce en déformation sous l'action d'un outil de coupe, au lieu de se rompre, ou de se détacher à une courte distance de son bec, elle comprime et s'écoule le long de sa face de coupe. La déformation apparaît en premier lieu, sous forme de déformation élastique qui devient par la suite permanent. Ensuite, elle atteint une limite. Au-dessus de cette limite le copeau se détache de la pièce.

Ces déformations sont localisées entre la matière non déformée et le copeau (fig. I.4).

Ces trois zones correspondent à :

⊕ Zone de cisaillement primaire (ZI) : elle est caractérisée par la formation d'une bande de cisaillement qui fait un angle ϕ avec la surface usinée.

Cette bande de cisaillement est caractérisée par une localisation de la déformation et par un échauffement très intense qui peut engendrer des changements de phases.

⊕ Zone de cisaillement secondaire (ZII) : l'écoulement de la matière sur la face de coupe de l'outil engendre la formation de cette zone. Elle est caractérisée par un fort écrouissage de la matière qui subit de grandes déformations. C'est une zone de frottement et de glissement intenses entraînant une forte génération de chaleur.

⊕ Zone de cisaillement tertiaire (ZIII) : lorsque l'outil avance, sa face de dépouille frotte sur la surface générée ce qui engendre de grandes déformations et un échauffement important de la surface de la pièce usinée. La génération importante de chaleur, peut conduire à des changements microstructuraux et affecter l'intégrité de surface (rugosité et contraintes résiduelles).

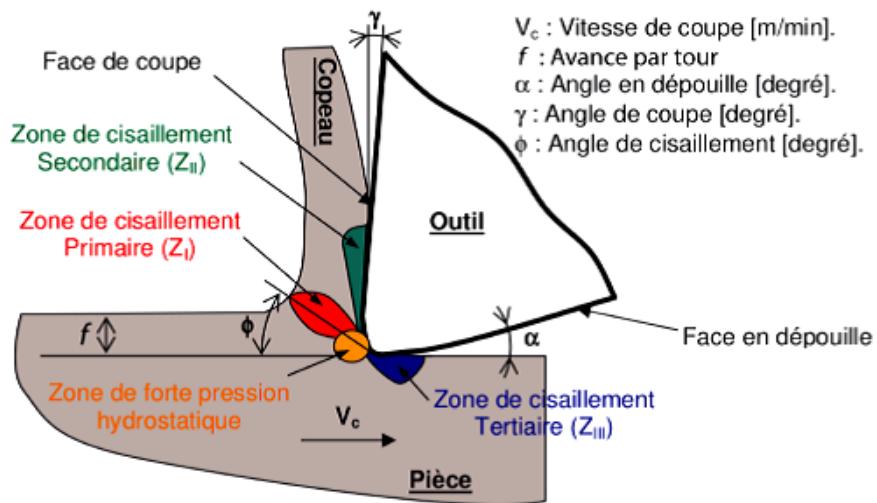


Figure I.4 : Champ et types de déformation [4]

1.5.1. Morphologies des copeaux

La première classification concerne l'usinage avec un outil de coupe à face plane, pour laquelle il y a trois cas basiques selon Jawahir et al. [JAW_93]. Ces trois cas sont illustrés sur la figure 1.3.

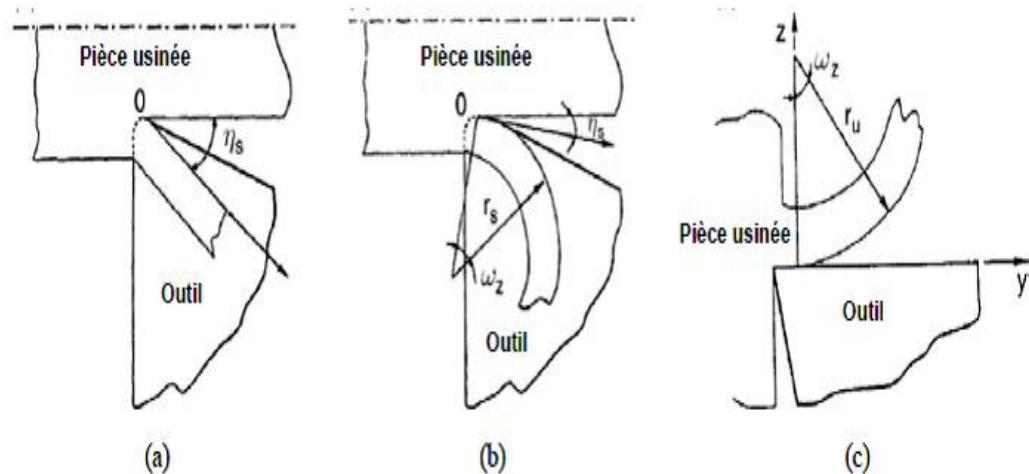


Figure I.5 : Trois formes basiques des copeaux (a) copeau droit, (b) copeau courbé dans le plan de la face de coupe, (c) copeau courbé dans le plan orthogonal à la face de coupe, [4]

Un copeau droit incliné d'un angle rs qui indique la direction d'écoulement du copeau, Figure 1.6.a,

- ✚ Un copeau courbé dans le plan de la face de coupe de l'outil ; le rayon de courbure est noté ici (rs), Figure 1.6.b,
- ✚ Un copeau courbé dans le plan perpendiculaire à la face de coupe de l'outil ; le rayon de courbure est noté ici ru , Figure 1.6.c.

Une autre classification de différentes morphologies de copeaux est proposée par la norme ISO 3685-1977, celle-ci est basée sur la taille et le profil des copeaux, Figure 1.7.

La forme des copeaux varie et dépend des conditions d'usinage et du couple outil/matière. Le tableau II présente les différentes formes macrographiques de copeaux obtenus en usinage, classées selon la norme ISO DIS 3685.

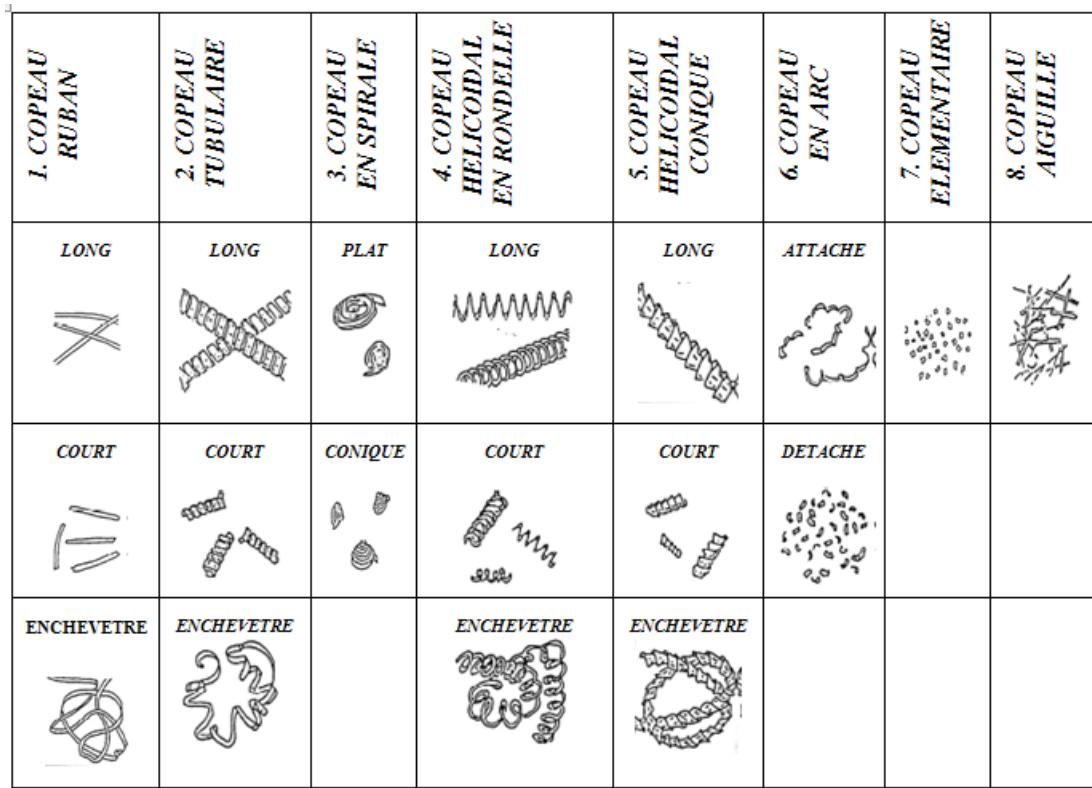


Figure 1.6 : Les différentes formes macrographiques de copeaux [5].

1 .6. Types de copeaux

En fonction des conditions de coupe et du couple outil/matière, des copeaux de morphologies très différentes peuvent être formés. On les classe traditionnellement en trois catégories :

1.6.1. *Les copeaux continus*

Formés dans un état de déformation plastique stationnaire (associés à une coupe stable) : les champs de déformation, des vitesses de déformation et de la température sont constants dans le temps.

1.6 .2.*Les copeaux discontinus ou segmentés*

Formés dans un état de déformation plastique non stationnaire ; les copeaux sont composés d'éléments plus ou moins connectés entre eux. On parle aussi de copeaux ondulants ou festonnés, de copeaux à localisation de déformation ou encore de copeaux à dents de scies. La segmentation des copeaux est très influencée par les phénomènes de fissuration, de rupture, d'instabilité et de localisation des déformations plastiques. La coupe est alors qualifiée d'instable.

- ⊕ La vitesse de coupe joue un rôle fondamental sur la stabilité de la coupe. La quantité de chaleur dégagée dans les zones de coupe croît avec la vitesse de coupe, de telle sorte que la température s'élève avec cette dernière.
- ⊕ La segmentation des copeaux est donc principalement observée dans le domaine des grandes vitesses de coupe. Bien que qualifié d'instable, ce phénomène peut être recherché car il est associé à une baisse des efforts et à une amélioration de l'évacuation des copeaux.

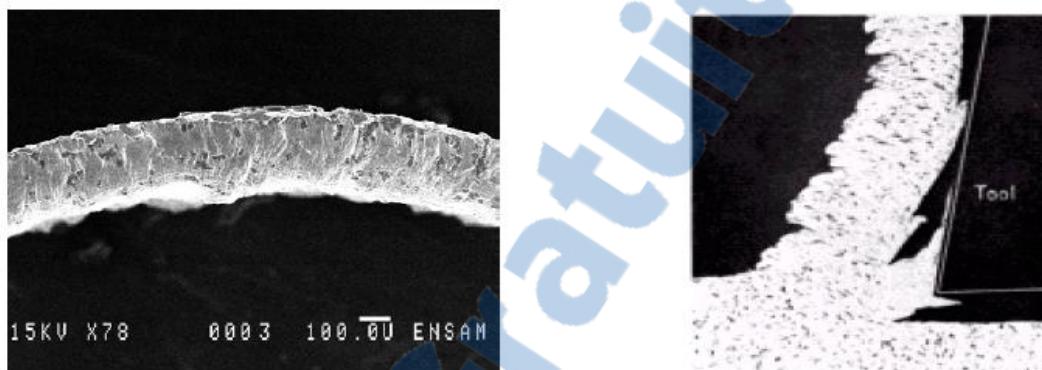


Figure 1.7 : (a) Copeau continu formé en coupe orthogonale, (b) Coupe orthogonale avec arête rapportée, acier 0.13% C [6]

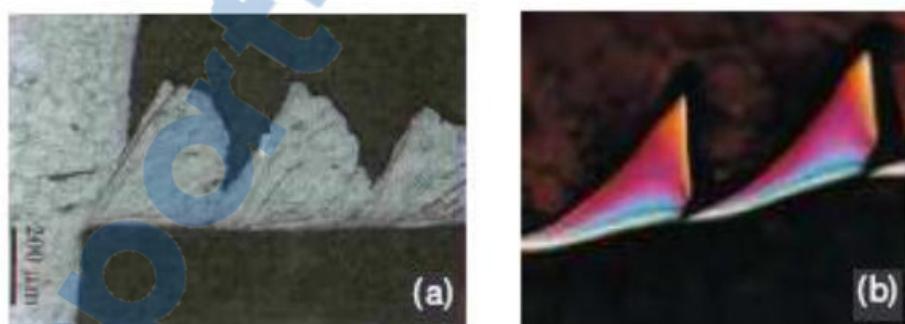


Figure 1.8 : Copeau discontinu

- (a) acier austénitique inoxydable usiné avec un outil carbure
- (b) acier à roulement 100Cr6 à 62HRc usiné avec un outil en céramique renforcé SIC. [6]

La forme des copeaux varie et dépend des conditions d'usinage et du couple outil/matière. Le tableau II présente les différentes formes macrographiques des copeaux obtenus en usinage, classées selon la norme ISO DIS 3685.

1.7. Etude cinématique de la coupe orthogonale

Le rapport de compression ou le rapport de coupe $C_h < 1$ qui exprime l'épaississement du copeau essentiellement dû à la compression et au frottement intense à interface entre le copeau et la face de coupe.

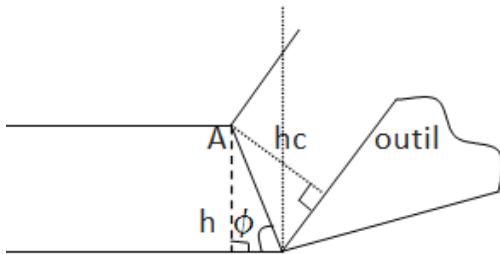


Figure I.9 : Cinématique de la coupe

$$C_h = \frac{h}{h_c} \quad \text{toujours} < 1$$

$$\sin \Phi = \frac{h}{OA} \quad \text{et} \quad \sin \left(\frac{\pi}{2} - \Phi + \gamma \right) = \frac{h_c}{OA}$$

$$C_h = \frac{h}{h_c} = \frac{\sin \Phi}{\sin \left(\frac{\pi}{2} - \Phi + \gamma \right)}$$

$$C_h = \frac{h}{h_c} = \frac{\sin \Phi}{\cos (\gamma - \Phi)}$$

$$\cos (\gamma - \Phi) = \cos \gamma \cdot \cos \Phi + \sin \gamma \cdot \sin \Phi$$

$$C_h = \frac{1}{\sin \gamma + \frac{\cos \gamma}{\tan \Phi}}$$

(I.1)

$$\tan \Phi = \frac{C_h \cdot \cos \gamma}{1 - C_h \cdot \sin \gamma}$$

D'après les (fig. 1.9) il existe trois vitesses importantes pendant la formation du copeau

V_c : vitesse de coupe.

V_f : vitesse de frottement.

V_s : vitesse de cisaillement.

D'après la conservation du flux de matière et les principes de la cinématique, les vitesses forment un diagramme fermé. (Fig. 1.10) :

D'après le théorème des sinus.

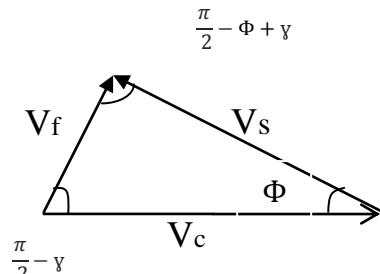
$$V_s = (v_c \cos(\gamma)) / (\cos(\Phi - \gamma))$$

$$V_f = (v_c \sin(\Phi)) / (\cos(\Phi - \gamma))$$

$$V_f V_s$$

$$\frac{\pi}{2} - \gamma V_c \Phi$$

$$\frac{V_c}{\cos(\Phi - \gamma)} = \frac{V_{cop}}{\sin \Phi} = \frac{V_s}{\cos \gamma}$$



D'où l'expression de la vitesse du copeau V_f :

$$V_f = \frac{\sin \Phi}{\cos(\Phi - \gamma)} V_c$$

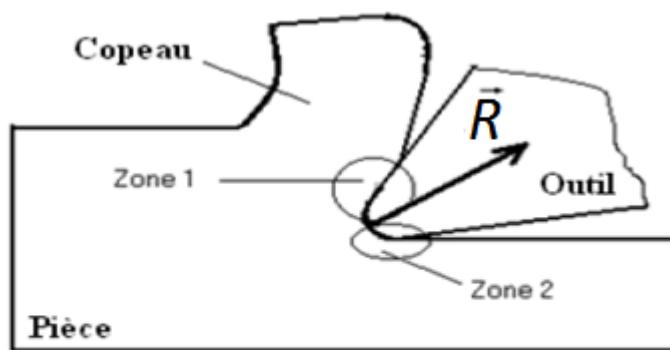
La vitesse de coupe et l'angle effectif de coupe γ sont connus ; l'angle de cisaillement φ est déterminé par la géométrie de la coupe orthogonale qui permet

$$V_s, V_f.$$

1. 8. Résistances à la coupe

1.8.1. Introduction

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



Zone 1: action copeau / outil (1)
Zone 2: action pièce / outil (2)

$$R = \text{action (1)} + \text{action (2)}$$

Figure I.10 : Les actions de contact exercées sur l'outil. [7]

1.9. Système de force

En plus des informations concernant la stabilité de la coupe, la connaissance des efforts de coupe nous renseigne sur les déformations plastiques et la puissance mécanique fournie qui est nécessaire à l'enlèvement de la matière. Elle permet de délimiter la zone de coupe en choisissant des valeurs des efforts acceptables pour l'outil.

1.9.1. Force de coupe

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans les trois directions privilégiées, peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage. La résultante de coupe R , utilisée en pratique, est la somme des trois composantes (Fig. 1.11).

- F_z : Composante tangentielle ou composante principale de coupe. C'est la composante agissant dans la direction de la vitesse de coupe, elle a la plus grande valeur absolue.
- F_x : Composante d'avance ou composante axiale. C'est la composante agissant dans la direction de la vitesse d'avance.
- F_y : Composante de refoulement ou composante radiale. C'est la composante agissant dans une direction perpendiculaire aux deux autres.

Les valeurs relatives F_x et F_y dépendent de l'orientation de l'arête de coupe.

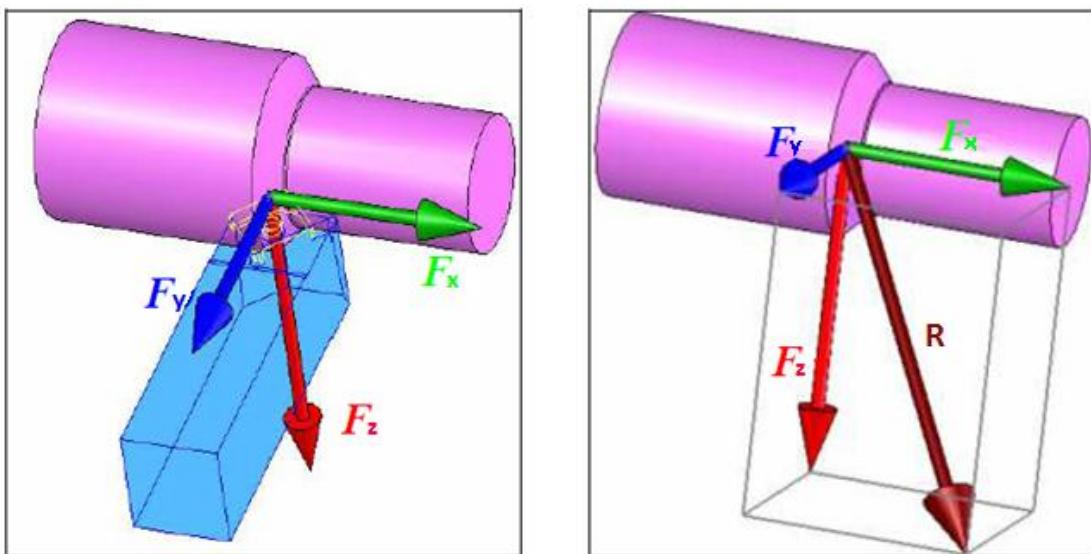


Figure. I.11 : Schéma des composantes des efforts de coupe. [7]

La connaissance des efforts de coupe est à la base de puissance nécessaire à la coupe. Elle est nécessaire pour l'évaluation du rendement mécanique d'une machine-outil. La valeur des efforts de coupe sert à dimensionner les organes de machine et à prévoir les déformations des pièces. Elle intervient dans la précision d'usinage, dans les conditions d'apparition des vibrations, ou broutage, et indirectement dans la formation de l'état de surface. Enfin, les efforts de coupe, étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal, dans le processus de formation du copeau. D'après la figure 1.10, la force de coupe résultante FR , étant une diagonale du parallélépipède elle sera donnée par l'expression :

$$R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$

1.9.2. Influence de la profondeur de passe et de l'avance

Avec l'augmentation des ces deux facteurs, la section droite du copeau s'accroît, de même que le volume du métal déformé. Il en résulte que le métal résiste plus à la formation du copeau et la valeur des composantes F_x , F_y et F_z nécessaire pour assurer la coupe. En chariotage, la profondeur de passe intervient d'une manière plus accentuée sur les efforts de coupe que l'avance. [8, 9]

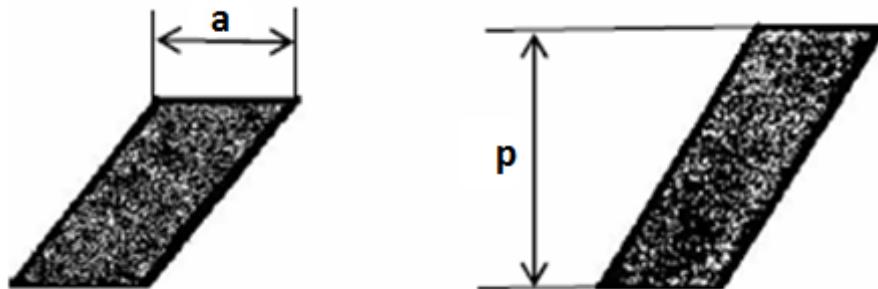


Figure 1.12. Section droite d'un copeau [8,9]

Chapitre II :

Modélisation

Analytique

II. Modélisation Analytique

2.1. Modélisation classique de la coupe orthogonale

La modélisation de la formation du copeau en conditions de coupe conventionnelles n'est pas obsolète vis-à-vis de l'évolution récente vers les grandes vitesses de coupe. L'intérêt de sa présentation dans ce contexte est que les modèles classiques sont avant tout des modèles géométriques. Ils ont commencé à formaliser des constatations expérimentales, d'un point de vue géométrique (plans de cisaillement, zones de cisaillement). Les approches de l'évaluation des efforts de coupe proposées sont souvent uniquement géométriques ou empiriques.

En passant par Merchant, Oxley ou Gilormini, Bothrooyd tous se sont intéressés à la modélisation de la coupe des métaux (Figure 2.1).

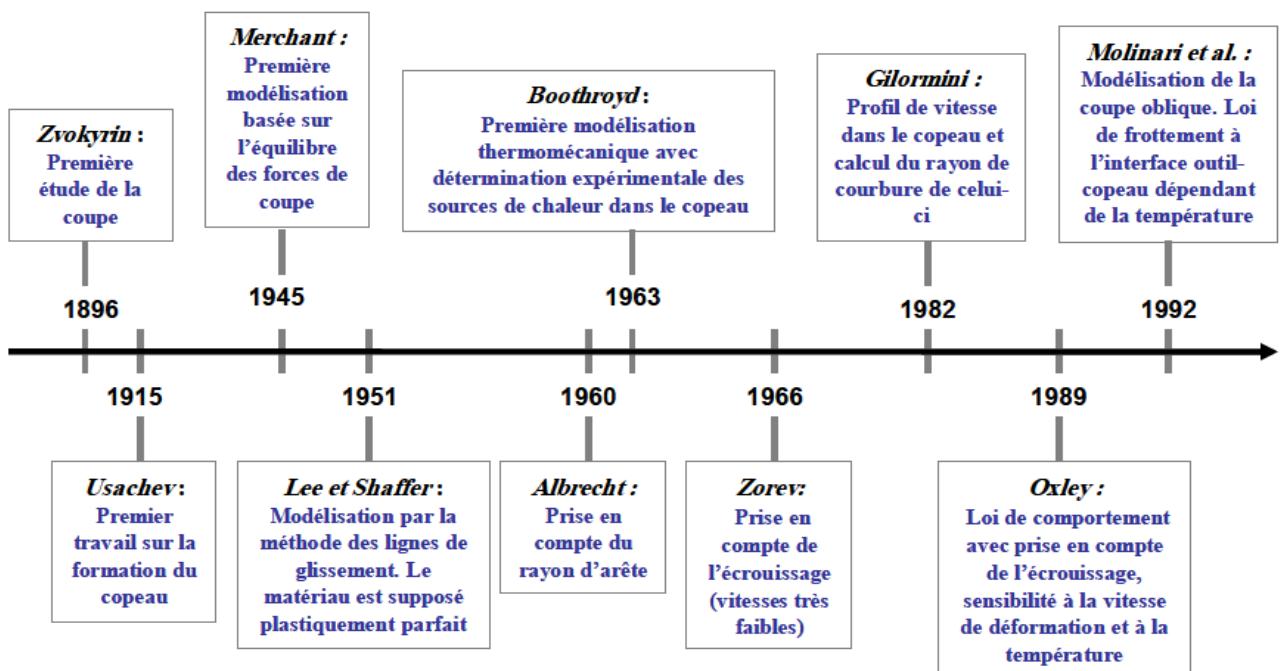


Figure 2.1 : Principaux acteurs de la modélisation analytique des procédés d'usinage [10].

Le but de notre travail visite l'évaluation des efforts de coupeaux cours d'usinage stable. Le modèle des efforts combinés (Merchant) est un modèle permanent mécanique et répond à notre besoin.

2.2. Modèle de Merchant (1940-45)

2.2.1. Hypothèses de la théorie

- ✚ On se place dans le cadre de la coupe orthogonale (pour se ramener à un problème plan), en régime stationnaire.
- ✚ Le rayon de bec de l'outil est nul.
- ✚ Le système machine-pièce-outil-porte outil est supposé parfaitement rigide.
- ✚ L'épaisseur du copeau est constante, et égale à l'avance par forme.
- ✚ La vitesse de coupe est choisie de façon à obtenir un copeau sans formation de l'arête rapportée (copeau adhérent).
- ✚ L'avance par tour est grande devant la dimension moyenne des cristaux.
- ✚ Le copeau se forme par glissement interne, suivant des « plans de cisaillement ».

2.2.2. Modèle physique de la coupe

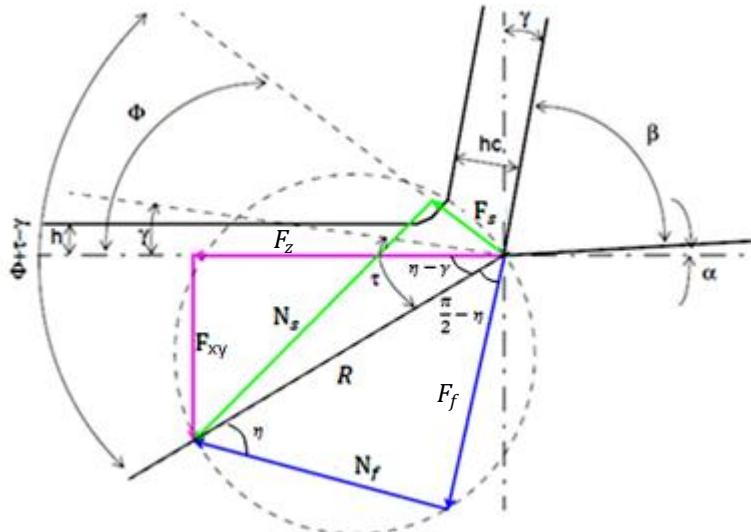


Figure 2.2 : Définition du cercle des efforts combinés(Merchant) [10]

Les autres hypothèses du modèle sont les suivantes :

- ⊕ Le copeau est supposé se former dans des conditions stationnaires en déformation plane.
- ⊕ Le matériau usiné est supposé parfaitement plastique et de contrainte d'écoulement en cisaillement τ .
- ⊕ Le frottement à l' interface outil-copeau est du type Coulomb (coefficient, angle η). Il est supposé constant quelques soient les conditions de coupe.
- ⊕ La zone secondaire de cisaillement dû au frottement à l'interface Outil-copeau n'est pas prise en compte.
- ⊕ L'angle de cisaillement Φ minimise la puissance totale dissipée lors de la coupe.

Les données du problème sont :

- ⊕ La vitesse de coupe V_c , l'angle de coupe γ , la profondeur de passe (p) et la largeur de coupe (b) et l'avance (a).

⊕ -Le comportement de matériau usiné est donné par la contrainte de cisaillement τ .

⊕ Les conditions de frottement à l'interface outil-copeau sont données par l'angle η de frottement

⊕ Le modèle permet de déterminer les paramètres suivants :

L'angle de cisaillement Φ .

⊕ F_z l'effort de coupe principal,

⊕ F_{xy} l'effort de pénétration.

⊕ L_c la longueur de contact outil-copeau.

⊕ h_c l'épaisseur du copeau.

⊕ L'hypothèse d'un comportement parfaitement plastique impose que la contrainte de cisaillement le long de (OA) soit constante. La pression est, elle aussi supposée uniforme dans le plan primaire de cisaillement. La résultante des forces de cisaillement F_s dans le plan (OA) est donnée par la relation suivante [11] :

La surface de la zone de cisaillement vaut : $A_s = \frac{A_0}{\sin \Phi}$, $\tau = \frac{F_s}{A_s}$

Remarque :

Dans ces modèles on va déterminer les paramètres suivants :

-dans la coupe orthogonale l'épaisseur de coupe égale l'avance $h = a$ (mm/tr)

-l'angle de cisaillement Φ qui dépend du rapport de coupe C_h .

$$C_h = h/h_c$$

h_c : épaisseur de copeau

$$\tan \Phi = \frac{C_h \cdot \cos \gamma}{1 - C_h \cdot \sin \gamma}$$

L'épaisseur du copeau fermé h_c est mesurée à la surface de la section coupée vaut :

$$A_0 = b \cdot h = p \cdot a$$

$$\sin \Phi = \frac{A_0}{A_s}$$

$\tau = 0.185 \cdot HB$ (HB dureté Brinell du matériau à usiner). Théorie de la plasticité.

Donc :

$$F_s = 0.185 \cdot HB \cdot \frac{p \cdot a}{\sin \Phi} \quad (II.1)$$

Le diagramme des efforts combinés à la zone d'interface copeau, outil, pièce (fig. 2.2).

Nous permettons d'écrire :

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{R} = \vec{F_f} + \vec{N_f} \\ \vec{R} = \vec{F_z} + \vec{F_{xy}} \\ \vec{R} = \vec{F_s} + \vec{N_s} \end{array} \right.$$

Dans le hall de technologie de la faculté, nous manquons de dynamomètre pour mesurer les efforts de coupe F_f , F_{xy} , F_z , puisque la force de cisaillement peut être connue par la théorie de la plasticité ($\tau = 0.185 \cdot HB$), nous pouvons déterminer des relations qui lient les efforts de coupe à l'effort de cisaillement

$$F_z = f(F_s, \dots)$$

$$F_{xy} = f(F_s, \dots)$$

$$F_f = f(F_s, \dots)$$

D'après les diagrammes des forces combinées représentés par la figure (2.1), on peut citer les relations suivantes :

$$\begin{cases} F_f = R \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \eta\right) \\ N_f = R \cdot \cos \eta \\ F_z = R \cdot \cos(\eta - \gamma) \\ F_{xy} = R \cdot \sin(\eta - \gamma) \\ F_s = R \cdot \cos(\Phi + \eta - \gamma) \\ N_s = R \cdot \sin(\Phi + \eta - \gamma) \end{cases}$$

$$\frac{F_f}{F_s} = \frac{R \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \eta\right)}{R \cdot \cos(\Phi + \eta - \gamma)} \longrightarrow F_f = 0.185 \cdot HB \frac{A_0}{\sin \Phi} \cdot \frac{\sin \eta}{\cos(\Phi + \eta - \gamma)} \quad (II.2)$$

$$\frac{F_z}{F_s} = \frac{R \cdot \cos(\eta - \gamma)}{R \cdot \cos(\Phi + \eta - \gamma)} \longrightarrow F_z = 0.185 \cdot HB \frac{A_0}{\sin \Phi} \cdot \frac{\cos(\eta - \gamma)}{\cos(\Phi + \eta - \gamma)} \quad (II.3)$$

$$\frac{F_{xy}}{F_s} = \frac{R \cdot \sin(\eta - \gamma)}{R \cdot \cos(\Phi + \eta - \gamma)} \longrightarrow F_{xy} = 0.185 \cdot HB \frac{A_0}{\sin \Phi} \cdot \frac{\sin(\eta - \gamma)}{\cos(\Phi + \eta - \gamma)} \quad (II.4)$$

On définit également à partir des efforts l'angle de frottement η et le coefficient de frottement apparent μ :

$$\mu = \frac{F_f}{N_f} = \tan \eta \quad (II.5)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial \Phi} = 0$$

$$\cos(2\Phi + \eta - \gamma) = 0$$

$$\Phi = \frac{\pi}{4} - \frac{\eta - \gamma}{2}$$

2.2.3. La déformation par cisaillement ε :

Rapportons-nous au schéma de la figure qui représente le détail au niveau de l'extrémité d'un plan de glissement au voisinage de l'outil.

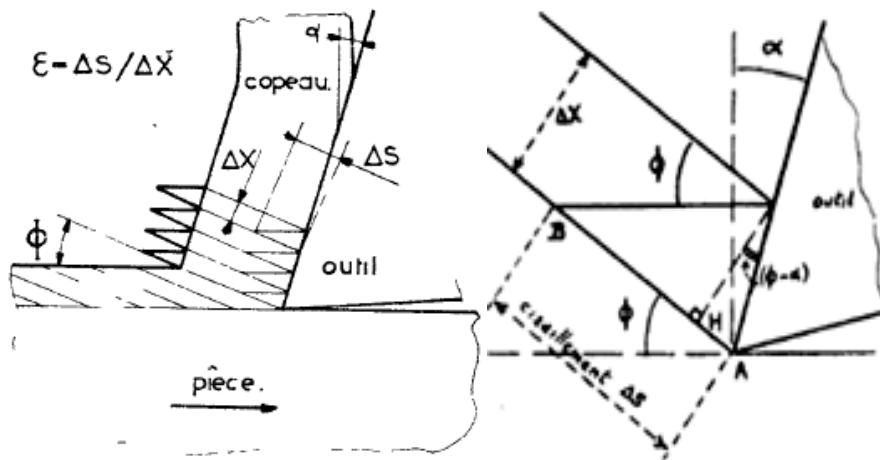


Figure 2.3 : Déformation par cisaillement. [12]

Chaque élément d'une épaisseur Δx est déplacé d'une distance Δs par rapport à l'élément voisin. Le cisaillement peut être exprimé par l'équation suivante :

$$\varepsilon = \frac{\Delta s}{\Delta x}$$

Déterminée par :

$$\Delta s = BH + HA = \Delta x \tan^{-1} \Phi + \Delta x \tan (\Phi - \alpha)$$

$$\longrightarrow \boxed{\varepsilon = \tan^{-1} \Phi + \tan (\Phi - \alpha)} \quad (II.6)$$

Chapitre III :

Approche

Semi-expérimentale

III. Approche semi-expérimentale

3 .1. Introduction

En cours d'usinage, la variation des efforts de coupe sollicite l'outil, de façon inégale et produit des vibrations auto-entretenues qui limitent sévèrement les performances d'une machine-outil, tant sur le plan qualitatif que quantitatif et réduit la durée de vie de l'outil de coupe.

La détermination de l'effort de coupe devient alors une nécessité accrue pour la mise en œuvre d'un usinage stable et équilibré. Elle sert aussi à l'évaluation de la puissance de coupe et le dimensionnement des éléments de la machine-outil.

Cette évaluation peut se faire soit par mesure directe à l'aide d'un dynamomètre, soit par mesure indirecte en mesurent l'épaisseur du copeau (h_c) combinée à la modélisation mécanique de Merchant développée au chapitre précédent.

3.2. Etude Expérimentale

3. 2.1. Conditions des Expériences

A. Machine-outil

Tour parallèle SN40 C N (fig. 3.1)

P : puissance du moteur : 10 (kW)

D : distance entre pointes : 1560(mm)

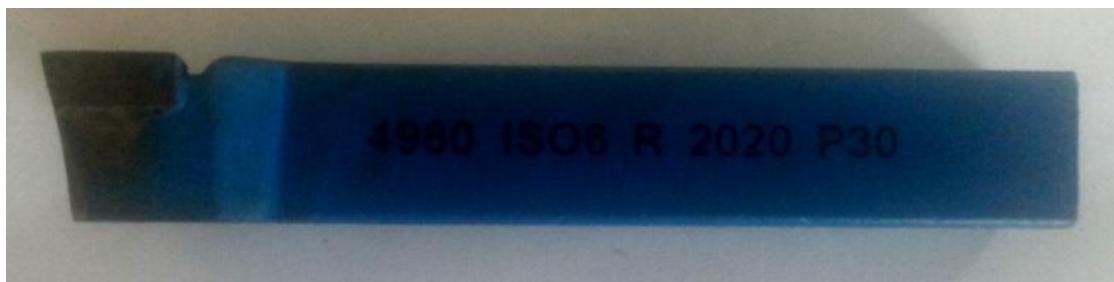


Photo 3.1 : Tour parallèle SN40 C N**B. Outil**

Outil neuf en C. M afin d'éviter des erreurs dues à l'usure (fig. 3.2)

Caractéristique géométrique :

- ✓ Angle de coupe : $\gamma = 10^\circ$
- ✓ Angle de dépouille : $\alpha = 5^\circ$
- ✓ Angle de pointe : $\beta = 75^\circ$

**Photo 3.2 : Outil de coupe en chariotage****C. Eprouvette**

L'éprouvette utilisée est une pièce en acier de dureté brinell ($HB = 55 \text{ daN/mm}^2$), de longueur ($L = 300 \text{ mm}$), et de diamètre ($D = 50 \text{ mm}$).

Nous avons subdivisé la pièce en 5 parties égales afin d'avoir une combinaison de variation.

Paramètres de coupe (V_c, a, p).

**Photo 3.3 : Eprouvette**

Remarque : tous les essais ont été réalisés sans lubrification.

La combinaison de variation des paramètres de coupe nous donne un nombre d'essais très important (5^3 environ 125 essais). Afin de réduire le nombre d'essais, nous avons organisé nos essais suivant la méthode du Plan d'expériences.

3.3. Plans d'expériences

3.3.1. Définition des plans d'expérience

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles [13]. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt, y , et des variables, x_i .

Il faut penser aux plans d'expériences si l'on s'intéresse à une fonction du type :

$$y = f(x_i)$$

Dans notre cas, y représente les composantes des efforts de coupe, et x_i des variations des conditions de coupe.

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expérience. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse [14]. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur.

La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle *d'espace expérimental* et celle de *modélisation mathématique* des grandeurs étudiées.

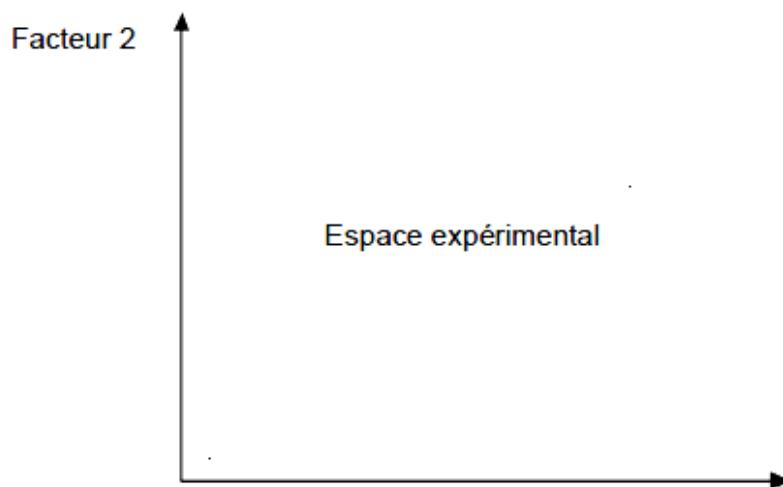


Figure 3.1. Espace expérimental

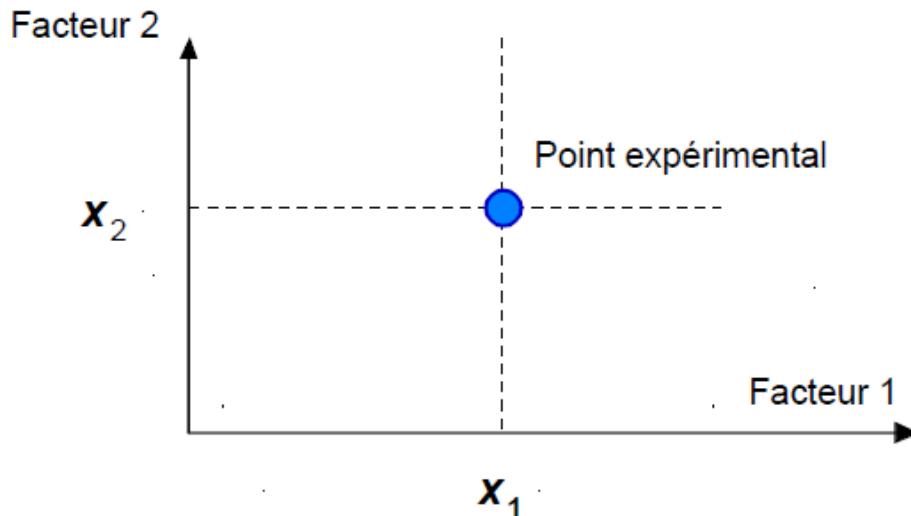


Figure 3.2. Point expérimental

Il existe plusieurs méthodes de plans d'expériences, parmi lesquels on peut citer.

- Plans factoriels complets à deux niveaux.
- Plans factoriels fractionnaires à deux niveaux.
- Plans à deux niveaux.
- Plans à plusieurs niveaux.
- Plans pour surfaces de réponse.
- Plans de mélanges.
- Plans booléens.
- Plans optimaux.
- Plans pour simulations numériques.

Nous allons maintenant appliquer les notions et les propriétés que nous venons de décrire aux plans d'expériences le plus classique et économique ainsi que le plan deux niveaux.

On choisit d'appliquer cette méthode pour découvrir les effets et l'interaction des différents paramètres d'usinage sur les efforts de coupe sans pour autant multiplier les essais. Ce plan d'expérience est constitué.

- 1- Des données des entrées qui sont les 3 variables explicatives (paramètres de coupe V_c , a , p).
- 2- Les données de sorties qui sont les variables expliquées (efforts de coupe F_z , F_{xy}).

3. 3.2. Plans à plusieurs niveaux

Les plans à plusieurs niveaux sont très utilisés parce qu'ils sont économiques en nombre d'essais.

Il faut donner à chaque facteur le nombre de niveaux nécessaires aux exigences de l'étude.

Nous avons trois variables (V_c , a , p) et pour chaque variable nous allons prendre cinq essais, par combinaison de trois variables nous obtenons 125 essais, ce qu'est très long à réaliser. Les plans à plusieurs niveaux peuvent être utiles pour réduire le nombre d'essais. Ce sont des plans fractionnaires N^{q-1} , pour notre cas, les essais sont réduits à ($5^{3-1}=25$) donc 25 au lieu de 125 essais. La disposition des points expérimentaux est telle que tous les niveaux sont représentés et qu'il n'y a pas de répétition. La (figure 3) illustre un plan à deux niveaux pour trois variables.

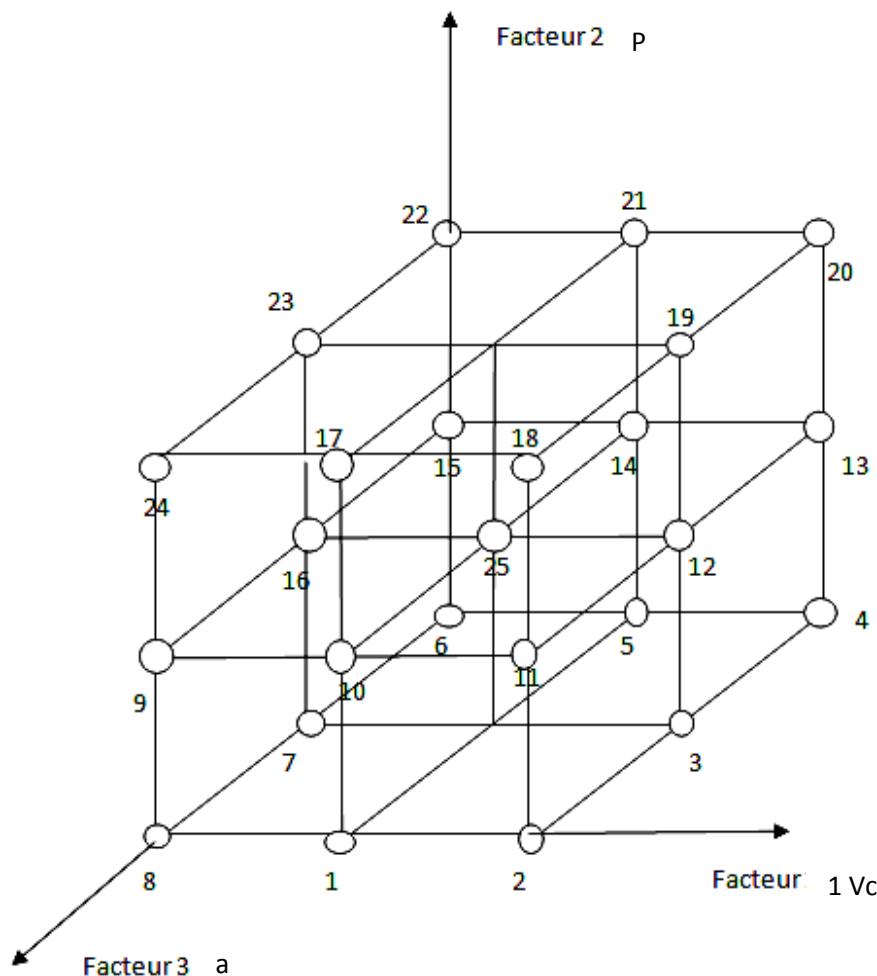


Figure3.3. Plans à plusieurs niveaux

Tableau III .01 : Plan d'expériences à plusieurs niveaux

N°	Varient de V _c	Varient de p	a (mm/tr)
01	1	1	1
02	1	2	2
03	1	3	3
04	1	4	4
05	1	5	5
06	2	1	2
07	2	2	3
08	2	3	4
09	2	4	5
10	2	5	1
11	3	1	3
12	3	2	4
13	3	3	5
14	3	4	1
15	3	5	2
16	4	1	4
17	4	2	5
18	4	3	1
19	4	4	2
20	4	5	3
21	5	1	5
22	5	2	1
23	5	3	2
24	5	4	3
25	5	5	4

Tableau III.02 : valeurs limites (V_c, a, p)

Cod	V _c (m/min)	p (mm)	a (mm/tr)
1	50	0.5	0.11
2	70	0.8	0.2
3	90	1.1	0.4
4	110	1.5	0.64
5	130	2	0.8

Pour chaque combinaison intervient la variabilité des paramètres de coupe :

V_c : vitesse de coupe (m/min)

a : Avance de l'outil (mm/tr)

p : Profondeur de passe (mm)

Tableau III.03 : valeurs limites (Vc, a, f,N)

Cod	Vc (m/min)	p (mm)	a (mm/tr)	N (tr /min)
1	50	0.5	0.11	350.318 (355)
2	70	0.8	0.2	497.611(500)
3	90	1.1	0.4	657.712(700)
4	110	1.5	0.64	759.98(700)
5	130	2	0.8	947.83(1000)

NB : Les valeurs de N (tr/min) qui sont entre parenthèses sont transformées en valeurs qui existent dans le M_O.

**Photo 3.4. Montage Mixte****Photo 3.5. Photo de l'expérience**

3.4. Résultats des essais

Après chaque essai réalisé, nous avons pris des échantillons de copeaux obtenus, et mesuré l'épaisseur h_2 de chaque échantillon à l'aide d'un micromètre numérique.



Photo 3.6 : Micromètre numérique



Photo 3.6 : Mesure de l'épaisseur du copeau h_e

Tableau III. 04 : tableau de plan d'expérience avec résultats

N°	Varient de Vc	Varient de p	Varient de a	h _c (mm)	C _h (mm)
01	1	1	1	0.13	0.733
02	1	2	2	0.28	0.714
03	1	3	3	0.28	0.714
04	1	4	4	0.7	0.914
05	1	5	5	0.95	0.673
06	2	1	2	0.24	0.833
07	2	2	3	0.54	0.740
08	2	3	4	0.89	0.89
09	2	4	5	0.7	0.914
10	2	5	1	0.15	0.733
11	3	1	3	0.17	0.647
12	3	2	4	0.36	0.555
13	3	3	5	0.52	0.769
14	3	4	1	0.50	1.28
15	3	5	2	0.9	0.888
16	4	1	4	0.16	0.687
17	4	2	5	0.295	0.689
18	4	3	1	0.45	0.888
19	4	4	2	0.47	1.361
20	4	5	3	1.1	0.727
21	5	1	5	0.155	0.709
22	5	2	1	0.27	0.740
23	5	3	2	0.49	0.816
24	5	4	3	0.71	0.901
25	5	5	4	1	0.8

Tableau III.05 : Résultats des essais :

N°	Vc (m/min)	p (mm)	a(mm/tr)	p.a =A ₀ (mm ²)	Φ(°)
01	50	0.5	0.11	0.055	39.488
02	50	0.8	0.2	0.16	38.694
03	50	1.1	0.4	0.44	38.694
04	50	1.5	0.64	0.96	38.480
05	50	2	0.8	1.6	38.060
06	70	0.5	0.2	0.1	43.741
07	70	0.8	0.4	0.32	39.861
08	70	1.1	0.64	0.704	45.957
09	70	1.5	0.8	1.8	38.480
10	70	2	0.11	0.22	39.522
11	70	0.5	0.4	0.2	35.602
12	90	0.8	0.64	0.512	31.131
13	90	1.1	0.8	0.88	41.088
14	90	1.5	0.11	0.165	58.281
15	90	2	0.2	0.4	45.874
16	110	0.5	0.64	0.32	38.060
17	110	0.8	0.8	0.64	38.494
18	110	1.1	0.11	0.121	45.874
19	110	1.5	0.2	0.3	60.156
20	110	2	0.4	0.8	39.283
21	130	0.5	0.8	0.4	38.449
22	130	0.8	0.11	0.088	39.861
23	130	1.1	0.2	0.22	43.045
24	130	1.5	0.4	0.6	38.480
25	130	2	0.64	1.28	42.427

3.4.1. Evaluation semi expérimentale des efforts de coupe

Les résultats de la variation des composantes des efforts de coupe pour les différentes combinaisons des éléments du régime de coupe (V_c, a, p) sont représentés dans le tableau 06.

Les valeurs des composantes des efforts de coupe sont obtenues par les relations, du modèle mécanique de Merchant développées précédemment dans le chapitre II.

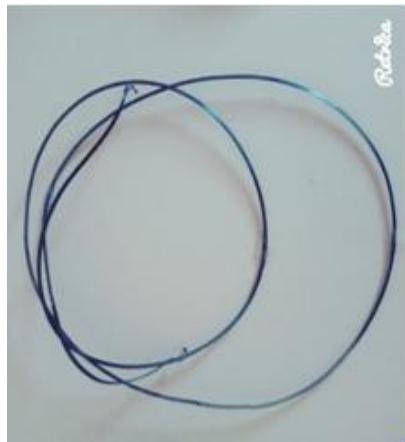
Tableau III.06 : Résultats de calculs des efforts des coupes

N°	F_z (daN)	F_{xy} (daN)	R (daN)
01	1.359	0.171	1.369
02	4.063	0.582	4.104
03	11.174	1.601	11.288
04	24.591	3.627	24.857
05	41.616	6.130	42.065
06	2.128	0.633	2.220
07	7.814	0.921	7.868
08	13.842	0.359	13.846
09	30.739	4.534	30.746
10	5.428	0.681	5.470
11	5.683	1.190	5.950
12	17.282	5.304	18.077
13	20.536	1.872	20.621
14	2.077	0.987	2.299
15	7.843	0.221	7.846
16	8.323	1.302	8.424
17	16.810	2.604	17.010
18	2.372	0.670	2.464
19	5.061	0.622	5.099
20	19.908	2.598	20.076
21	10.268	1.522	10.380
22	2.148	0.253	2.162
23	4.798	0.223	4.803
24	21.419	1.986	21.510
25	28.191	1.708	28.242

3.4.2. Les copeaux obtenus

En majorité les copeaux obtenus, sont des copeaux continus et discontinus

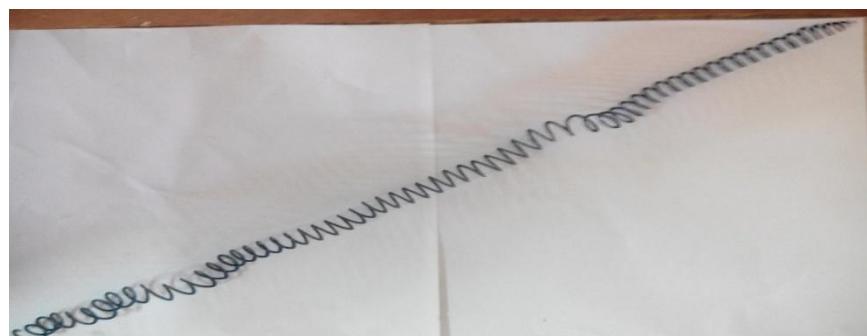
A. *Les copeaux continus :*



(a) : $V_C = 130$ m/min
 $p = 0.5$ mm
 $a = 0.8$ mm/tr



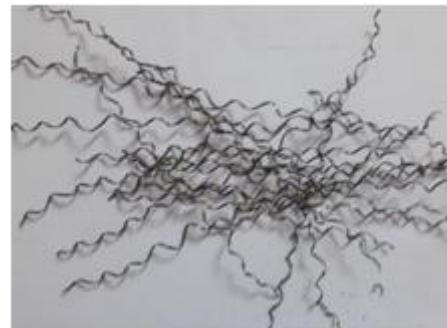
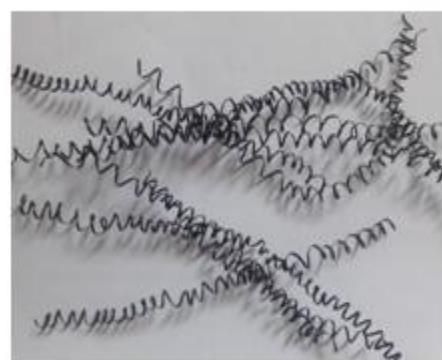
(b) : $V_C = 90$ m/min
 $p = 0.11$ mm
 $a = 1.5$ mm/tr



(c) : $V_C = 50$ m/min
 $p = 2$ mm
 $a = 0.8$ mm/tr

Photo 3.7. Les copeaux continus

B. *Les copeaux discontinus*(d) : $V_c=110\text{ m/min}$ $p=0.5\text{ mm}$ $a=0.8\text{ mm/tr}$ (e) : $V_c=130\text{ m/min}$ $p=0.5\text{ mm}$ $a=0.8\text{ mm/tr}$ (f) : $V_c=110\text{ m/min}$ $p=0.8\text{ mm}$ $a=0.8\text{ mm/tr}$ (g) : $V_c=130\text{ m/min}$ $p=1.5\text{ mm}$ $a=0.4\text{ mm/tr}$ (h) : $V_c=50\text{ m/min}$ $p=0.5\text{ mm}$ $a=0.11\text{ mm/tr}$ (i) : $V_c=90\text{ m/min}$ $p=0.5\text{ mm}$ $a=0.4\text{ mm/tr}$

(j) : $V_c = 70\text{m/min}$ $p = 0.5\text{mm}$ $a = 0.2\text{mm/tr}$ (k) : $V_c = 70\text{m/min}$ $p = 2\text{mm}$ $a = 0.11\text{mm/tr}$ (l) : $V_c = 90\text{m/min}$ $p = 0.5\text{mm}$ $a = 0.4\text{mm/tr}$ (m) : $V_c = 50\text{m/min}$ $p = 1.5\text{mm}$ $a = 0.64\text{mm/tr}$ (n) : $V_c = 110\text{m/min}$ $p = 2\text{mm}$ $a = 0.4\text{mm/tr}$ (o) : $V_c = 130\text{m/min}$ $p = 2\text{mm}$ $a = 0.64\text{mm/tr}$ **Photo 3.8 : Les copeaux discontinus**

3.4.3. Interprétations des résultats

Tableau III.07 : Résultats des expériences suivant la méthode Plan d'expériences

(a) : Pour $p=0.5\text{mm}$.

V_c (m/min)	a (mm/tr)	R (daN)	Débit (mm³/min)
50	0.11	1.369	$2.75.10^3$
70	0.2	2.220	7.10^3
90	0.4	5.806	18.10^3
110	0.64	8.424	$35.2.10^3$
130	0.8	10.380	52.10^3

(b) : Pour $p=0.8\text{mm}$

V_c (m/min)	a (mm/tr)	R (daN)	Débit (mm³/min)
50	0.2	4.104	8.10^3
70	0.4	7.878	$22.4.10^3$
90	0.64	18.077	$64.08.10^3$
110	0.8	17.010	$70.4.10^3$
130	0.11	2.162	$11.41.10^3$

(c) : Pour $p=1.1\text{mm}$

V_c (m/min)	a (mm/tr)	R (daN)	Débit (mm³/min)
50	0.4	11.288	22.10^3
70	0.64	13.846	$49.28.10^3$
90	0.8	20.621	$79.2.10^3$
110	0.11	2.382	$13.31.10^3$
130	0.2	4.803	$28.6.10^3$

(c): Pour $p=1.5\text{mm}$

V_c (m/min)	a (mm/tr)	R (daN)	Débit (mm³/min)
50	0.64	24.856	48.10^3
70	0.8	31.140	84.10^3
90	0.11	2.299	$14.85.10^3$
110	0.2	5.099	33.10^3
130	0.4	21.510	78.10^3

(e) : Pour $p=2\text{mm}$

V_c (m/min)	a (mm/tr)	R (daN)	Débit (mm³/min)
50	0.8	42.065	80.10^3
70	0.11	5.470	$15.44.10^3$
90	0.2	7.846	36.10^3
110	0.4	20.076	88.10^3
130	0.64	28.242	$166.4.10^3$

NB : **Débit = $V_c a x p \times 10^3 \text{ mm}^3/\text{min}$**

On rassemble les séries les plus favorable, c'est-à-dire celles qui donnent la plus faible résultante et le plus grand débit dans le tableau ci-dessous.

(f) : Tableau récapitulatif

V_c (m/min)	a (mm/tr)	p (mm)	R (daN)	Débit (mm³/min)
50	0.11	0.5	1.369	$2.75.10^3$
70	0.11	2	5.470	$15.44.10^3$
90	0.11	1.5	2.299	$14.85.10^3$
110	0.11	1.1	2.382	$13.31.10^3$
130	0.11	0.8	2.162	$11.41.10^3$

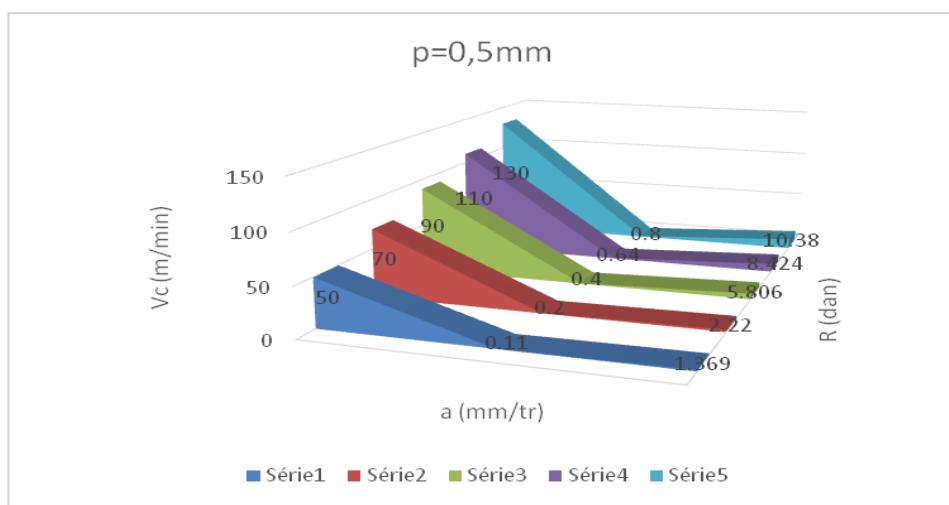


Figure 3.4 (a). Variation de la résultante en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance lors de l'usinage avec ($p = 0.5 \text{ mm}$)

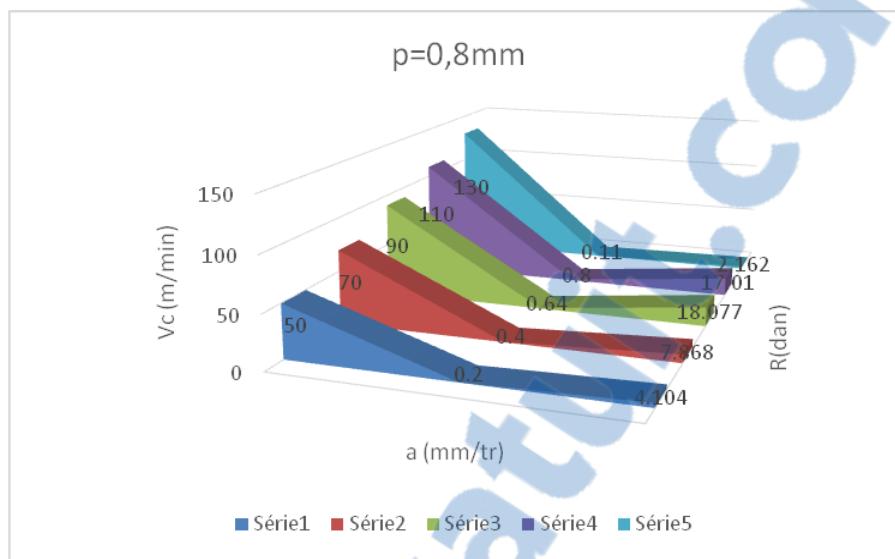


Figure 3.4(b). Variation de la résultante en fonction de la vitesse de coupe et profondeur de passe lors de l’usinage avec ($p = 0.8$ mm)

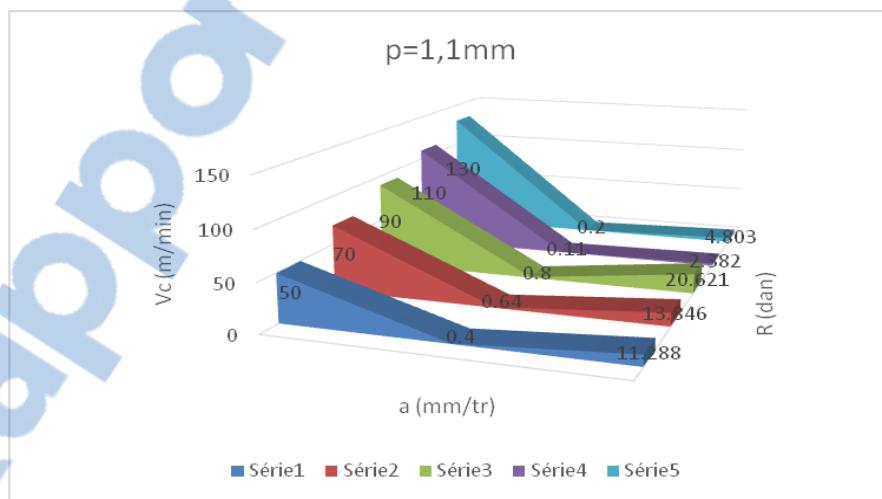


Figure 3.4(c). Variation de la résultante en fonction de la vitesse de coupe et profondeur de passe lors de l’usinage avec ($p = 1.1$ mm)

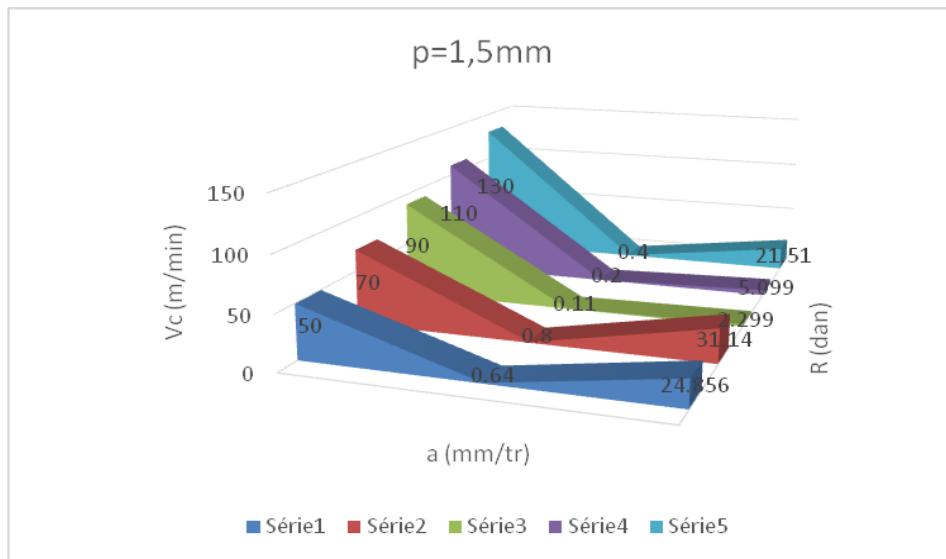


Figure 3.4(d). Variation de la résultante en fonction de la vitesse de coupe et profondeur de passe lors de l'usinage avec ($p = 1.5$ mm)

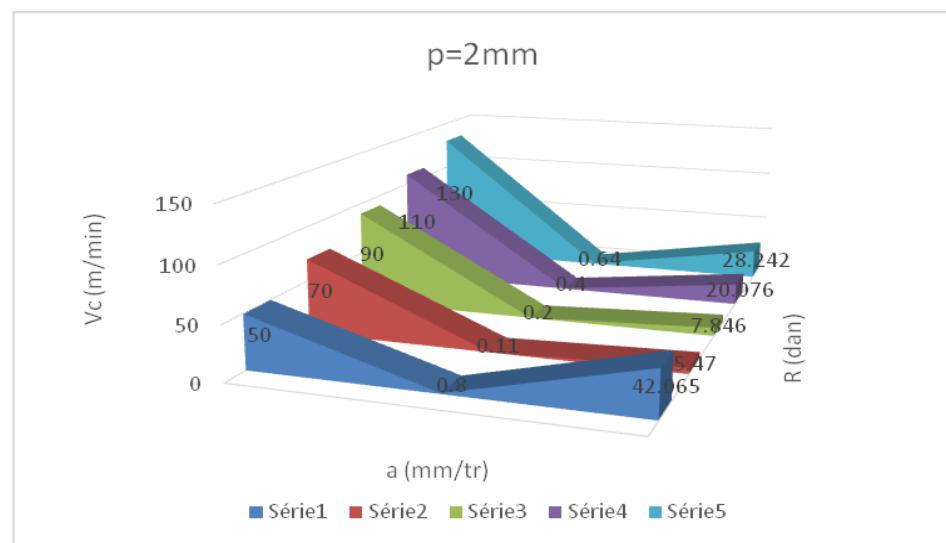


Figure 3.4(e). Variation de la résultante en fonction de la vitesse de coupe et profondeur de passe lors de l'usinage avec ($p = 2$ mm)

Les figures 3.4, illustrent graphiquement la variation de la résultante de coupe R en fonction de la combinaison de variation de la vitesse de coupe V_c , et de l'avance par tour a suivant le plan d'expérience pour différentes profondeurs de passe. On remarque d'après ces graphes que la valeur minimale de la résultante de coupe R pour les cinq séries d'expériences avec une augmentation de la profondeur de passe est obtenue pour une valeur constante de l'avance a ($a=0.11$ mm/tr), mais avec des vitesses de coupe différentes.

Afin de déterminer les valeurs optimums des paramètres de coupe, nous avons évalué le débit représentant le volume du copeau enlevé par minute, et suite aux résultats obtenus, il s'avère que les paramètres utilisés dans la **troisième série** donnent la valeur minimale de la résultante de coupe avec un débit maximum.

L'observation des résultats semi expérimentaux illustrés dans le tableau récapitulatif indique que la série N° 3 des essais expérimentaux donne les valeurs optimums des conditions de coupe permettant un usinage stable avec un minimum d'effort et une meilleure production.

Le copeau obtenu lors de l'usinage avec ces conditions choisis comme optimum est continu (photo.3.8) l'état de surface obtenu est meilleur.

Il s'agit donc de valeurs suivantes :

Vc = 90 m/min

a= 0.11mm/tr

p= 1.5mm



Photo 3.9 : copeau continu



Tableau III. 08 : Résultats des expériences suivant la méthode Plan d'expériences(a) : Pour $a=0.11\text{mm/tr}$

V_c (m/min)	p (mm)	R (daN)	Débit (mm³/min)
50	0.5	1.478	$2.75.10^3$
70	2	5.464	$15.4.10^3$
90	1.5	2.088	$14.85.10^3$
110	1.1	2.452	$13.31.10^3$
130	0.8	2.159	$11.44.10^3$

(b) : pour $a=0.2\text{mm/tr}$

V_c (m/min)	p (mm)	R (daN)	Débit (mm³/min)
50	0.8	4.104	8.10^3
70	0.5	2.220	7.10^3
90	2	7.846	36.10^3
110	1.5	5.099	33.10^3
130	1.1	4.803	$28.6.10^3$

(c): pour $a=0.4\text{mm/tr}$

V_c (m/min)	p (mm)	R (daN)	Débit (mm³/min)
50	1.1	11.288	22.10^3
70	0.8	7.868	$22.4.10^3$
90	0.5	5.806	18.10^3
110	2	20.076	88.10^3
130	1.5	21.510	78.10^3

(d): pour $a=0.64\text{mm/tr}$

V_c (m/min)	p (mm)	R (daN)	Débit (mm³/min)
50	1.5	24.857	48.10^3
70	1.1	13.846	$49.28.10^3$
90	0.8	18.077	$46.08.10^3$
110	0.5	8.424	$35.2.10^3$
130	2	20.076	$166.4.10^3$

(e): pour $a=0.8\text{mm/tr}$

V_c (m/min)	p (mm)	R (daN)	Débit (mm³/min)
50	2	42.065	80.10^3
70	1.5	31.344	112.10^3
90	1.1	20.621	$79.2.10^3$
110	0.8	17.010	$70.4.10^3$
130	0.5	10.380	52.10^3

On rassemble les séries les plus favorable, c'est-à-dire celles qui donnent la plus faible résultante et le plus grand débit dans le tableau ci-dessous.

(f) : Tableau récapitulatif

V_c (m/min)	p (mm/tr)	a (mm)	R (daN)	Débit (mm³/min)
50	0.5	0.11	1.478	$2.75.10^3$
70	0.5	0.2	2.220	7.10^3
90	0.5	0.4	5.806	18.10^3
110	0.5	0.64	8.424	$35.2.10^3$
130	0.5	0.8	10.380	52.10^3

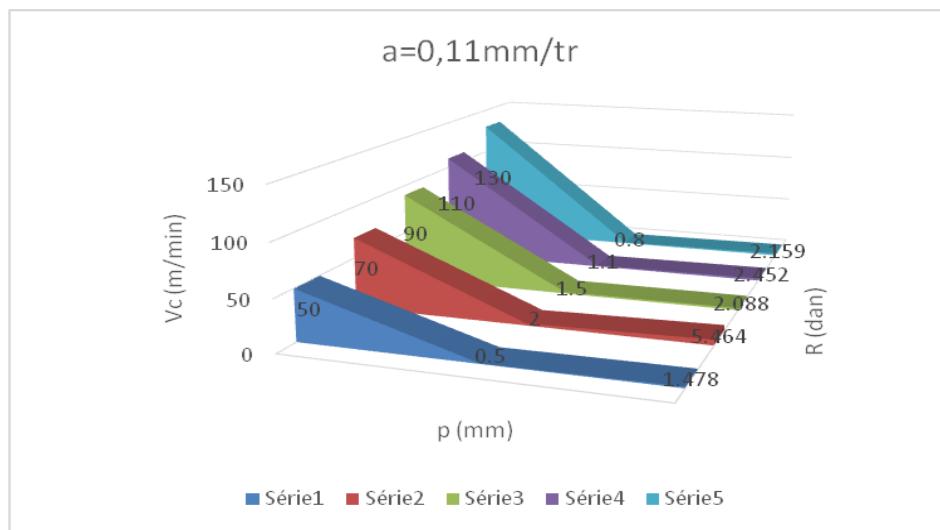


Figure3.5(a). Variation de la composante axiale en fonction de la vitesse de coupe et l'avance lors de l'usinage avec ($a=0.11\text{mm/tr}$)

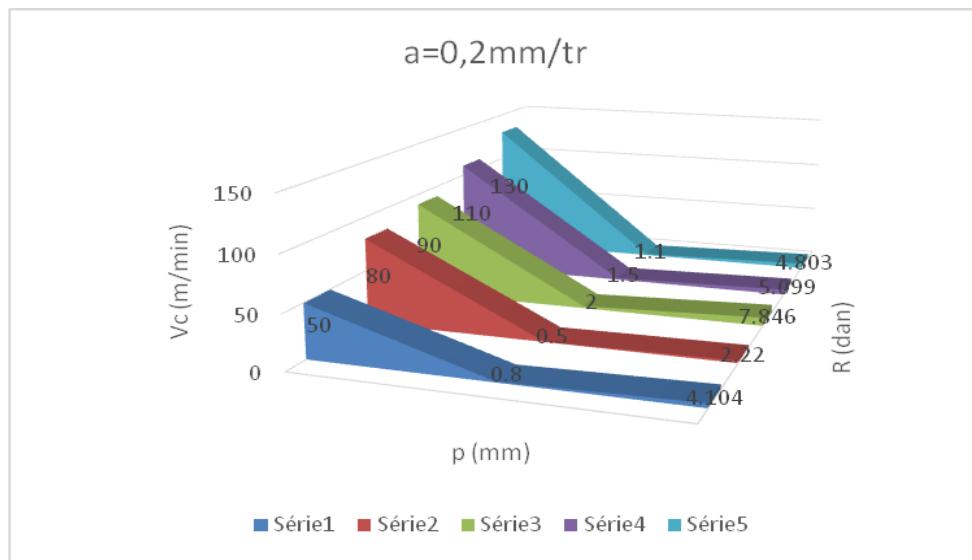


Figure3.5(b). Variation de la composante axiale en fonction de la vitesse de coupe et l'avance lors de l'usinage avec ($a=0.2\text{mm/tr}$)

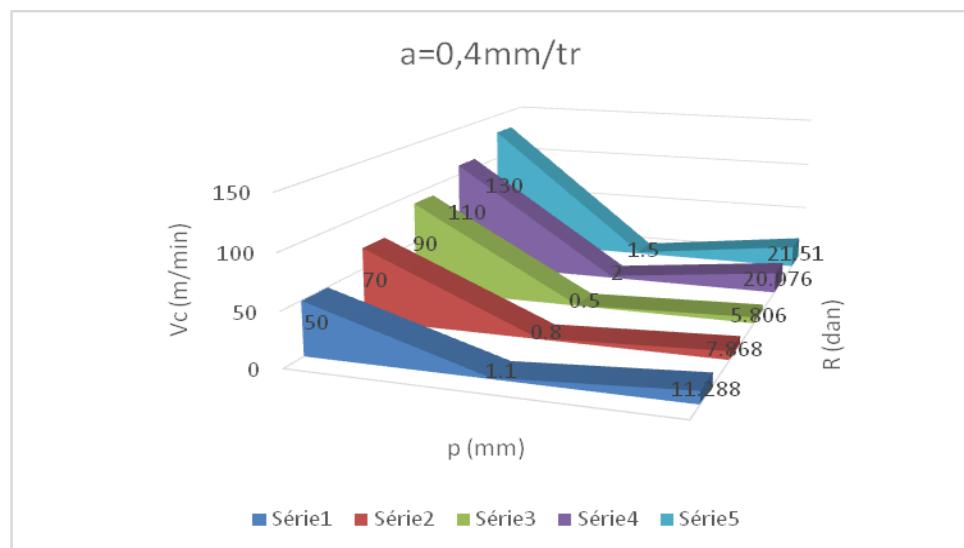


Figure3.5(c). Variation de la composante axiale en fonction de la vitesse de coupe et l'avance lors de l'usinage avec ($a=0.4\text{mm/tr}$)

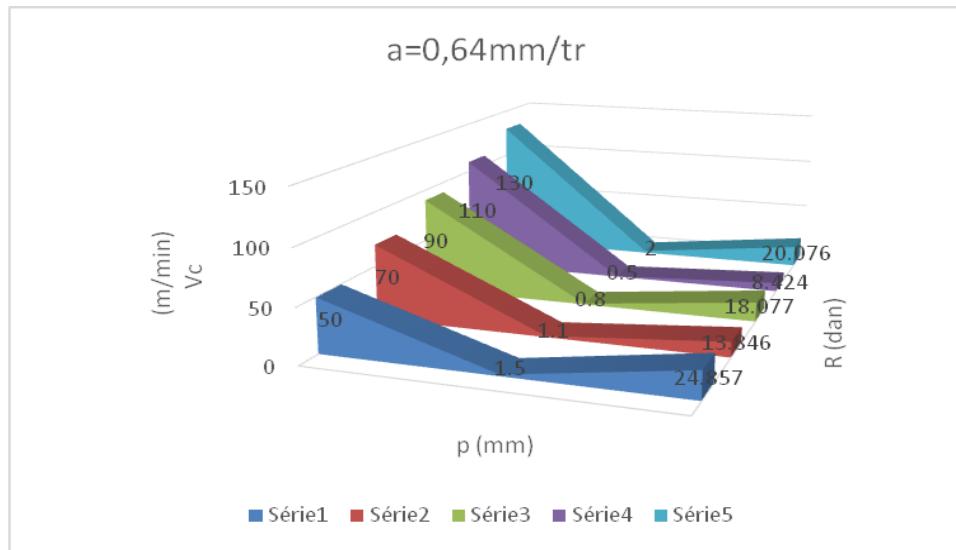


Figure3.5(d). Variation de la composante axiale en fonction de la vitesse de coupe et l'avance lors de l'usinage avec ($a=0.64\text{mm/tr}$)

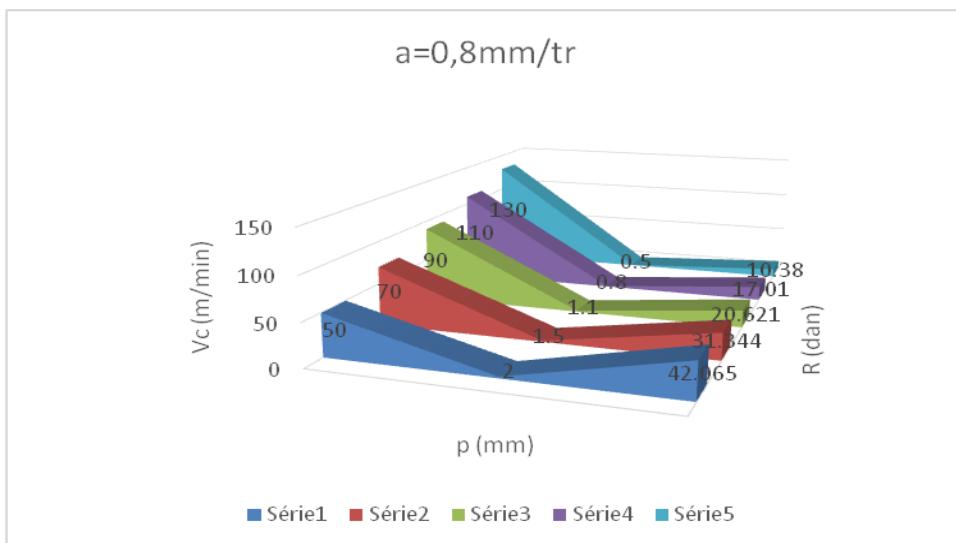


Figure3.5(e). Variation de la composante axiale en fonction de la vitesse de coupe et l'avance lors de l'usinage avec ($a=0.8\text{mm/tr}$)

Les figures 3.5, illustrent graphiquement la variation de la résultante de coupe R en fonction de la combinaison de variation de la vitesse de coupe V_c , et de profondeur de passe p , suivant le plan d'expérience pour différentes valeur de l'avance. On remarque d'après ces graphes que la valeur minimale de la résultante de coupe R pour les cinq séries d'expériences avec une augmentation de la profondeur de passe est obtenue pour une valeur constante de l'avance a ($a=0.5\text{mm/tr}$), mais avec des vitesses de coupe différentes.

Afin de déterminer les valeurs optimums des paramètres de coupe, nous avons évalué le débit représentant le volume du copeau enlevé par minute, et suite aux résultats obtenus, il s'avère que les paramètres utilisés dans la **troisième série** donnent la valeur minimale de la résultante de coupe avec un débit maximum.

L'observation des résultats semi expérimentaux illustrés dans le tableau récapitulatif indique que la série N° 3 des essais expérimentaux donne les valeurs optimums des conditions de coupe permettant un usinage stable avec un minimum d'effort et une meilleure production.

Il fallait un compromis entre les valeurs qui donnent en même temps une valeur réduite de l'effort de coupe résultant R et une valeur importante du débit.

Les valeurs trouvées :

Vc = 90 m/min

a= 0.4mm/tr

p=0.5mm



Photo 3.10 : copeau discontinu

Par contre nous avons remarqué que le copeau enlevé est discontinu, donc un état de surface moins bon.

Tableau III. 09 : Résultats des expériences suivant la méthode Plan d'expériences.

(a) : pour $V_c=50\text{m/min}$

P (mm)	a (mm/tr)	R (daN)	Débit (mm³/min)
0.5	0.11	1.369	2.75.10³
0.8	0.2	4.104	8.10³
1.1	0.4	11.288	22.10³
1.5	0.64	24.857	48.10³
2	0.8	42.065	80.10³

(b) : pour $V_c=70\text{m/min}$

P (mm)	a (mm/tr)	R (daN)	Débit (mm³/min)
0.5	0.2	2.220	7.10³
0.8	0.4	7.868	22.4.10³
1.1	0.64	13.846	49.28.10³
1.5	0.8	30.746	84.10³
2	0.11	5.470	15.4.10³

(c): pour $V_c=90\text{m/min}$

P (mm)	a (mm/tr)	R (daN)	Débit (mm³/min)
0.5	0.4	5.950	18.10³
0.8	0.64	18.077	46.08.10³
1.1	0.8	20.621	79.2.10³
1.5	0.11	2.299	14.85.10³
2	0.2	7.846	36.10³

(d): pour $V_c=110\text{m/min}$

P (mm)	a (mm/tr)	R (daN)	Débit (mm³/min)
0.5	0.64	8.424	35.2.10³
0.8	0.8	17.010	70.4.10³
1.1	0.11	2.464	13.31.10³
1.5	0.2	5.099	33.10³
2	0.4	20.076	88.10³

(e): pour $V_c=130\text{m/min}$

P (mm)	a (mm/tr)	R (daN)	Débit (mm³/min)
0.5	0.8	10.380	52.10³
0.8	0.11	2.162	11.44.10³
1.1	0.2	4.803	28.6.10³
1.5	0.4	21.510	78.10³
2	0.64	28.242	166.4.10³

On rassemble les séries les plus favorable, c'est-à-dire celles qui donnent la plus faible résultante et le plus grand débit dans le tableau ci-dessous.

(f) : Tableau récapitulatif

p (mm)	a (mm/tr)	V_c (m/min)	R (daN)	Débit (mm³/min)
0.5	0.11	50	1.369	2.75.10³
0.5	0.2	70	2.220	7.10³
1.5	0.11	90	2.299	14.85.10³
1.1	0.11	110	2.464	13.31.10³
0.8	0.11	130	2.162	11.44.10³

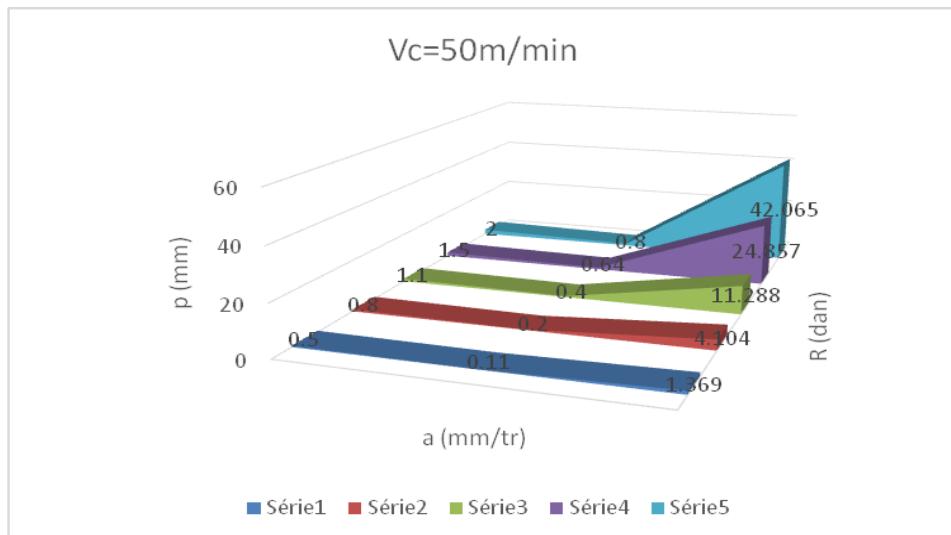
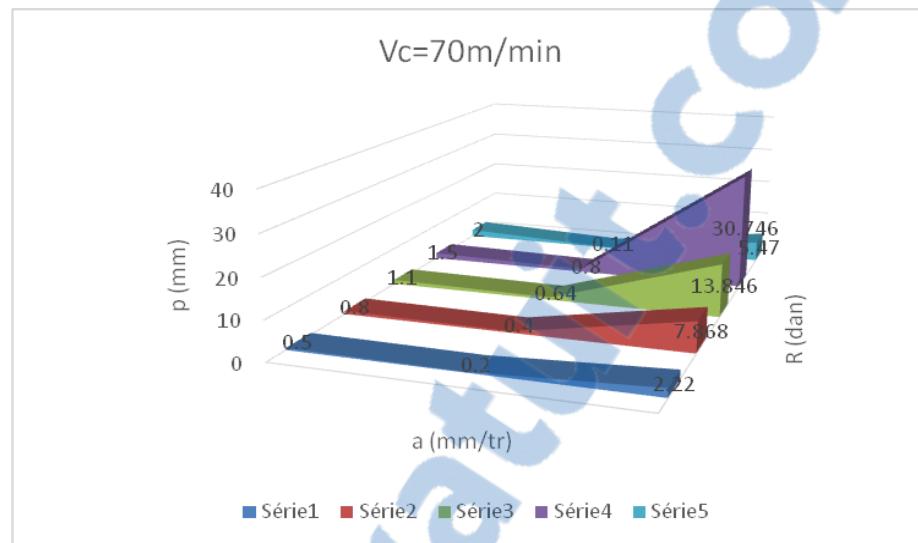


Figure3.6(a). Variation de la composante axiale en fonction de profondeur de passe et l'avance lors de l'usinage avec ($V_c=50\text{m/min}$)



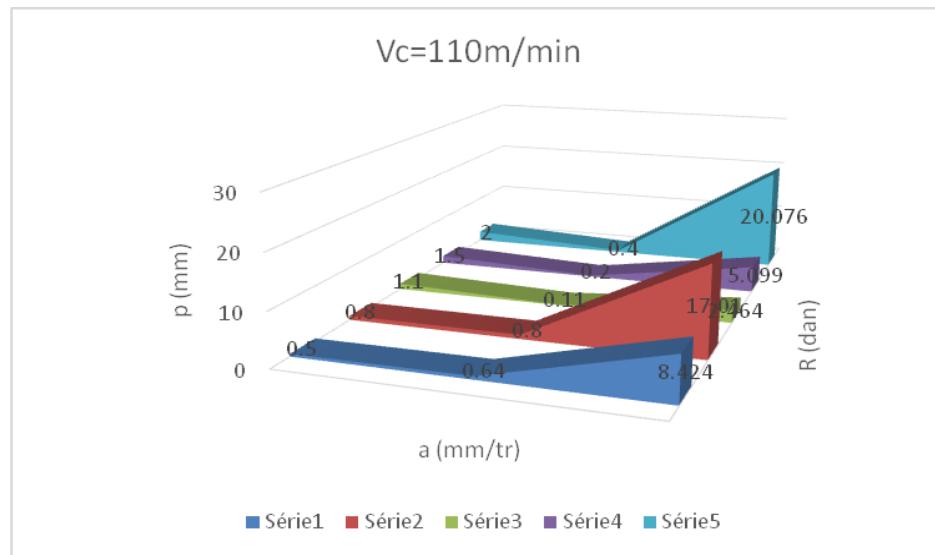


Figure3.6(d). Variation de la composante axiale en fonction de profondeur de passe et l'avance lors de l'usinage avec ($V_c=110\text{m/min}$)

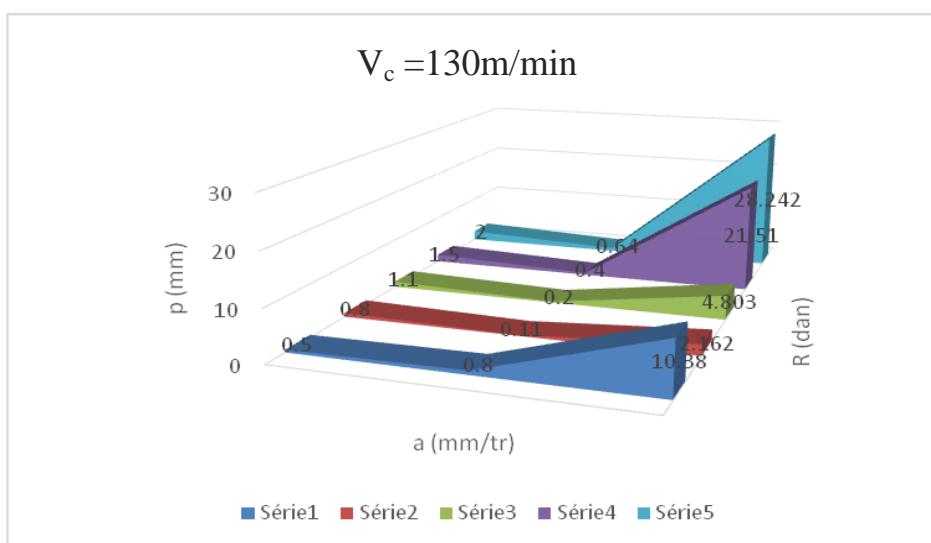


Figure3.6(e). Variation de la composante axiale en fonction de profondeur de passe et l'avance lors de l'usinage avec ($V_c=130\text{m/min}$)

Les figures 3.6, illustrent graphiquement la variation de la résultante de coupe R en fonction de la combinaison de variation de l'avance a_d , et de profondeur de passe p , suivant le plan d'expérience pour différentes valeur de la vitesse de coupe V_c . On remarque d'après ces graphes que la valeur minimale de la résultante de coupe R pour les cinq séries d'expériences avec une augmentation de la profondeur de passe est obtenue pour une valeur constante de l'avance a ($a=0.11\text{mm/tr}$), mais avec des vitesses de coupe différentes.

Afin de déterminer les valeurs optimums des paramètres de coupe, nous avons évalué le débit représentant le volume du copeau enlevé par minute, et suite aux résultats obtenus, il s'avère que les paramètres utilisés dans la **troisième série** donnent la valeur minimale de la résultante de coupe avec un débit maximum.

L'observation des résultats semi expérimentaux illustrés dans le tableau récapitulatif indique que la série N° 3 des essais expérimentaux donne les valeurs optimums des conditions de coupe permettant un usinage stable avec un minimum d'effort et une meilleure production.

Le copeau obtenu lors de l'usinage avec ces conditions choisis comme optimum est continu (fig.3.11), et l'état de surface obtenu est meilleur.

Il s'agit donc des valeurs suivantes :

Vc = 90 m/min

a= 0.11mm/tr

p= 1.5mm



Photo 3.11 : copeau continu

Les résultats optimums trouvés pour le premier et le troisième cas d'usinage sont identique avec un meilleur état de surface et une meilleure stabilité de coupe, les copeaux enlevés dans les deux séries d'usinage sont continus. Alors que dans le deuxième cas, les valeurs trouvées donnent un état de surface moins bon et une coupe moins stable (copeau discontinu).

Par conséquent les valeurs optimums qu'on doit choisir sont donc les suivantes :

$V_c = 90 \text{ m/min}$

$a = 0.11 \text{ mm/tr}$

$p = 1.5 \text{ mm}$

Il s'agit donc d'une nouvelle approche d'optimisation, permettant d'obtenir les meilleures conditions de coupe possible en tournage, et par conséquent une telle approche est extrêmement utile dans l'industrie manufacturière.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'amélioration du tri pique « Qualité – coût – production » en usinage nécessite une optimisation des conditions de coupe permettant une réduction des paramètres influant. L'un des paramètres les plus influant sur ce tri pique est bien la résistance à la coupe qui s'impose afin de travailler dans des conditions favorables au respect de la qualité d'usinage et de la productivité.

L'évaluation analytique et/ou expérimentale des efforts de coupe en tournage est donc plus que nécessaire pour la mise en œuvre d'une coupe stable et équilibrée.

Ce modeste travail traite la prédiction des efforts de coupe en cours de tournage en utilisant des relations analytiques basées sur le modèle mécanique des forces combinées (modèle de Merchant), et sur la mesure de l'épaisseur du copeau après sa formation pour différentes variations des paramètres de coupe (v_c , a , p).

En première étape, nous avons discuté la complexité des phénomènes qui régissent un processus d'usinage en fabrication mécanique qui fait intervenir un champ de connaissances pluridisciplinaire pour circonscrire la prédiction de la qualité d'usinage liée à la réduction des efforts de coupe. Par conséquent la gestion optimale de ce processus de coupe nécessite l'utilisation d'hypothèses simplificatrices telle que la coupe orthogonale.

En deuxième étape, nous présentons le modèle analytique de Merchant puis le développement des relations liant les paramètres géométriques et cinématiques aux efforts de coupe.

En troisième étape, l'approche semi expérimentale à été développée. Après avoir présenté les plans d'expérience, nous avons sélectionné un plan à deux niveaux totalisant 25 essais au lieu de 125.

Enfin, nous déterminons des valeurs semi expérimentales sur la base de mesure indirecte de l'épaisseur du copeau h_c à l'aide d'un micromètre numérique, et appliquée aux relations analytiques développées par le modèle mécanique de Merchant. Les valeurs obtenues tabulées sont d'une grande capacité de prédiction.

Les valeurs optimales de paramètre de coupe (v_c , a , p) sont obtenues en considérant comme critère d'optimalité la réduction de l'effort de coupe résultant et l'augmentation de la capacité d'usinage (débit).

En perspective, nous souhaitons, synthétiser et développer une loi générale régissant la variation des efforts de coupe en fonction des paramètres cinématiques et géométrique influant une opération d'usinage.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **P.Padila**, « Production Mécanique », DUNOD 1986.
- [2] **M. Assas, N. Belhattab, M. Djenane**, « Optimization of Metal Working Based on Combined Criterion», RevueMorskoy Vestnik N2, Leningrad. Russia juin, 2003.
- [3] **Jean-Pierre cordebois et coll**, « Fabrication Par Usinage », DUNOD, Paris 2003
- [4] **I. S. Jawahir et C. A. van Luttervelt**. Recent developments in chip control research and applications. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 42(2):659 – 693, 1993.
- [5] **S. Bahi**. Modélisation hybride du frottement local à l'interface outil-coopeau en usinage des alliages métalliques. *Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers de Bordeaux*, 2010.
- [6] **D. Molinari A,Dudzinski** (1992) Stationary shear band in high-speed machining. C.R. Acad. Sci. Paris. 315 (II), 399-405.1992.
- [7] **R. Laheurte**, « Application de la théorie du second gradient à la coupe des matériaux »Thèse de doctorat. Université de Bordeaux, Ecole Doctorale Des Sciences Physiques et De l'Ingénieur. 2004.
- [8] **M.A. Yalles**, Etude du comportement à l'usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur, Thèse de doctorat, Université de Annaba, 194 p. 2005.
- [9] **S. Belhadi, M.A. Yallese, L. Boulanouar & N. Ouelâa**, Influence des conditions de coupe sur la rugosité de l'acier 45NiCrMo16 traité usiné avec un outil CBN, pp. 109-115, REVUE COST, N°03.2009.
- [10] **P.Bourdet** - La coupe des métaux – polycopie de la CODEGEM de l'ENS de Cachan.2007.
- [11] **M. Habak**, « Etude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier à roulement 100cr6 ». Thèse de doctorat. Ecole doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur, 2006.

- [12] **A. Moufki, A.Molinari, D. Dudzinski**– Modelling of orthogonal cutting - First French and German Conference on High Speed Machining – p.8-28, Juin 1997.
- [13] **GOUPY Jacques** «Introduction aux Plans d'expériences». Dunod. Paris. (2001).
- [14] **E. P.BOX George, G.HUNTER William, HUNTER J. Stuart** «Statistics for Experimenters» deuxième édition. John Wiley and Sons. New-York. (2005).

RESUM

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la maintenance industrielle.

Afin de réduire au maximum les efforts de coupe qui surgissent lors d'une opération d'usinage. La détermination expérimentale de ces efforts se fait généralement par mesure dynamométrique. L'inexistence des équipements de mesure au niveau l'atelier du hall technologique de notre faculté, nous a poussés à proposer une méthode semi-empirique permettant d'évaluer les efforts de coupe en appliquant le modèle mécanique Merchant (modèle des forces combinées).

L'évaluation de ces efforts de coupe, se fait par la mesure de l'épaisseur du coupeau après sa formation, à l'aide d'un micromètre en faisant varier les trois principaux paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance par tour et la profondeur de passe).

Afin de déduire le nombre d'essais, nous avons appliqués la méthode des plans d'expérience à plusieurs niveaux.

Les résultats optimums sont obtenus en tenant compte de deux critères, l'effort de coupe minimum avec un débit maximum. La valeur obtenue s'avère satisfaisante, et répondent aux objectifs attendus.

التلخيص

العمل المقدم في هذه الورقة هو جزء من الصيانة الصناعية.

من أجل تقليل خفض القوات التي تنشأ خلال عملية بالقطع .

تحديد التجريبية من هذه الجهد هو عادة قياس عزم الدوران. عدم وجود معدات القياس في ورشة عمل قاعة التكنولوجية من أعضاء هيئة التدريس، أدى بنا إلى اقتراح طريقة شبه تجريبية لتقدير القوات الناتجة من خلال تطبيق النموذج الميكانيكي نموذج مارشا القوات المشتركة

تقدير هذه القوات القطع، هو عن طريق قياس سمك قطع بعد تشكيلها، لمساعدة من الميكرومتر تختلف المعلومات القطع الرئيسية الثلاثة (سرعة القطع ...)

للاستدلال على عدد من الاختبارات، وطبقنا طريقة التصميم التجاري على عدة مستويات

يتم الحصول على نتيجة أفضل الاعتبار الواجب على كمبيوتر، الحد الأدنى من الجهد القطع مع أقصى قدر من الإنتاجية . القيمة التي تم الحصول عليها تبين ما يلي وتنسجم إلى الأهداف المرجوة.

Abstract

The work presented in this paper is part of the industrial maintenance. In order to minimize cutting forces that arises during a machining operation. The experimental determination of these efforts is usually done by dynamometer. The lack of measurement equipment in the workshop of technological hall of our faculty let us to propose a semi-empirical method for evaluating the cutting forces by applying the mechanical model of Merchant (Combined Forces Model).

The evaluation of these cutting forces is effectuated by measuring the cutting thicknesses after its formation, using of a micrometer varying the three main cutting parameters (cutting speed, feed per revolution and cutting depth, plans).

In order to reduce the number of tests, we applied the experimental method with several levels.

The optimum result is obtained with respect to two criteria, the minimum cutting effort maximum cutting capacity. The value obtained seems to be satisfied and respond to the expected objectives.

