



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



**Projet de fin d'études
Pour l'obtention de diplôme de
Master en Conception Mécanique**

Titre

**Application de la méthode des plans d'expériences pour la
détermination de la température lors du contact Pièce-Outil :
Cas d'une opération de chariotage**

Proposé et encadré par :

Dr M.Temmar

N.Melzi

Etudié par :

O.Charfi

A.Lemiti

Année universitaire 2016/2017

Remerciements

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

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

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

Nous remercions Monsieur **Temmar Mustapha** et Mademoiselle **Melzi Nesrine** pour avoir accepté de diriger cette thèse, et dont l'aide précieuse nous été indispensable sur le plan scientifique et humain.

Nos très cordiaux remerciements vont aussi à tous nos enseignants pour tous les efforts conjugués tout au long de notre formation.

Dédicaces



Je dédie ce travail à:

Mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles

de ce long chemin,

Ma mère qui a été à mes côtés et m'a soutenu durant toute ma vie, et mon

père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis.

Mes chères sœurs.

A mon cher frère.

A KH hajder

A tous ma famille

Mon binôme: Oussama

Mes amis et nass-el bureau

Toute la promo : CM 2017

Tous ce qui m'aiment et que j'aime.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire de fin d'études

*A mon très cher père et à la mémoire de ma très chère mère en témoignage
de ma reconnaissance envers le soutien, les sacrifices et tous les efforts qu'ils
ont fait pour mon éducation ainsi que ma formation.*

A mon cher frère

A mes chères sœurs

Mon binôme: Abdennour.

Mes amis

A tous ma famille

Toute la promo : CM 2017.

Table des matières

Table des matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I

I.1. Généralité sur l'usinage	2
I.2. Les machines	3
I.3. Le tournage	3
I.4. Principe de tournage	3
I.5. Les tours	4
I.5.1. Classification des machines de tour	5
I.6. Différentes opérations de tournage	5
I.7. Conditions de coupe en tournage	6
I.7.1. Vitesse de coupe	6
I.7.2. Vitesse d'avance vf	7
I.7.2.1. Les types d'avances	7
I.7.3 Profondeur de passe « a »	8
I.8. Nuances des outils de coupe	8
1.8. Usure des outils	9
1.8.1. Phénomènes d'usure.....	9
1.8.1.1. Usure par effet mécanique	9
1.8.1.2. Usure par effet physico-chimique	9
1.8.2. Manifestation de l'usure	10
1.8.3. Durée de vie.....	11
1.8.3.1. Modèle de Taylor (1907)	12
1.8.3.2. Autres modèles	12

CHAPITRE II

II.1. Introduction	13
II.2. Coupe stationnaire / coupe dynamique	13
II.3. Identification des phénomènes vibratoires générés par la coupe	15
II.3.1. Les vibrations libres	15
II.3.2 Les vibrations forcées	15
II.3.2.1 Vibrations forcées externes	16
II.3.2.2 Vibrations forcées internes	16
II.3.3. Les vibrations auto- excitées (le broutage ou « chatter »)	16
II.4. Comportement Mécanique Global Du Système Pièce/ Outil/ Machine (POM)	18
II.4.1. Description du système POM	18

Table des matières

II.4.1.1. Eléments indépendants de l'opération d'usinage.....	19
II.4.1.2. Eléments dépendants de l'opération d'usinage	20
II.4.2. Sources de vibrations du système POM	22
II.4.3. Modélisation du comportement dynamique du système POM	23

CHAPITRE III

III.1 Introduction	24
III.2. Lois de comportement	24
III.2.1 Comportement mécanique de la pièce	25
III.2.2. Critère d'endommagement de Johnson-Cook.....	25
III.3. Application du code des éléments finis ANSYS	25
III.3.1 Mesure de la température	26
III.3.2 Applications	28
III.3.3 Distribution des contraintes à l'interface outil/pièce	29

CHAPITRE IV

IV.1. Méthode des plans d'expérience	31
IV.1.1. Définition	31
IV.1.2. Notion d'espace expérimental et terminologie	32
IV.1.2.1. Le facteur	32
IV.1.2.2. La réponse	35
IV.1.2.3. Surface de réponse	36
IV.1.3. Notion de modélisation mathématique et application	37
IV.2. Introduction à notre modèle	37
IV.2.1. Effet des paramètres de coupe sur la température	40
IV.2.2. Modélisation mathématique	40
IV.2.3. Les courbes d'iso-réponses	41
IV.2.4. Surface de réponse de la variation de la réponse	43
 conclusion generale	 45

Liste des figures

Figure I. 1 : Principe de l'usinage	2
Figure I. 2 : Action de coupe.....	2
Figure I. 3 : Procédure de tournage.....	3
Figure I. 4 : Principe de tournage.....	4
Figure I. 5 : Composantes d'un tour de l'atelier d'usinage du Département de Mécanique. ...	4
Figure I. 6 : Différentes opérations de tournage	5
Figure I. 7 : Conditions de coupe.....	6
Figure I. 8: Vitesse de coupe.....	6
Figure I. 9: Vitesse d'avance vf , Avance par tour f	7
Figure I. 10: Différentes types d'avance	7
Figure I. 11: Les profondeurs de passe.	8
Figure I. 12: Comparaison des matériaux de coupe.	9
Figure I. 13: Phénomènes d'usure	10
Figure I. 14 : Différentes zones de la durée de vie	11
Figure I. 15: Modèle de Taylor (1907)	12
Figure I. 16 : Partie CD	12

Figure II. 1 : Modèle de la coupe stationnaire	14
Figure II. 2: Modèle de la coupe dynamique	14
Figure II. 3: schéma structural de la coupe dynamique	15
Figure II. 4: Schématisation du phénomène de régénération de la surface.	17
Figure II. 5: Effet du couplage des modes directionnels	18
Figure II. 6: Machine-outils.....	19
Figure II. 7: Comportement dynamique du système POM.....	23

Figure III. 1: Prédiction de la température de contact	27
Figure III. 2: Distribution de la température à l'interface outil/copeau.....	28
Figure III. 3: Variation des contraintes équivalentes de Von-Mises	29

Figure IV. 1: Domaine de variation d'un seul facteur	33
Figure IV. 2: Domaine de variation de deux facteurs	34
Figure IV. 3: Points expérimentaux dans l'espace expérimental	34
Figure IV. 4: Domaine d'étude pour le cas de 2 facteurs	35
Figure IV. 5: Représentation d'une surface de réponse	36
Figure IV. 6: Modèle de fonctionnement des paramètres de l'essai	38
Figure IV. 7: l'effet et interaction de la vitesse de coupe et de l'avance sur la température ..	40
Figure IV. 8: Influences des coefficients du modèle mathématique sous forme d'histogramme et sectorielle.....	41
Figure IV. 9: courbes d'iso-réponses par intervalles	41

Figure IV. 10: courbes d'iso-réponses exprimant la variation de la température en fonction des paramètres de coupe.....	42
Figure IV. 11: Courbe de réponse exprimant la variation de la température en fonction des paramètres de coupe	43
Figure IV. 12: Graphe des réponses observées en fonction des réponses prédites.....	44
Figure IV. 13: Diagramme des résidus	44

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1 Manifestation de l'usure	12
Tableau III.1 les valeurs de la température obtenues	27
Tableau IV. 1: Les 2 facteurs ; leurs unités, leurs maximums et leurs minimums	39

Liste des symboles

Liste des symboles

V_c : vitesse de coupe (m/min)

V_f : Vitesse d'avance (mm/tr)

N : fréquence de rotation (tr/min)

D : Diamètre (mm)

M_e : Mouvement de coupe

M_f : Mouvement d'avance

f : L'avance (mm)

a : Profondeur de passe (mm)

Introduction Générale :

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

Notre travail, application de la méthode des plans d'expériences pour la détermination de la température lors du contact pièce outil : cas d'une opération de chariotage, va nous permettre de prendre un exemple d'une des opérations de tournage et de la simuler par la suite.

Notre travail se divise en quatre chapitres :

Dans le chapitre I, une recherche bibliographique introduira les notions nécessaires sur l'usinage en général et sur le procédé de tournage en particulier.

Le chapitre II sera consacré à la coupe des métaux, les différents mouvements en particulier ainsi que l'étude du système POM : Pièce/Outil de coupe/Machine outil.

Dans le chapitre III, un exemple d'une opération de chariotage sera étudié afin de déterminer la température lors du contact de la pièce avec l'outil de coupe.

Le chapitre IV sera consacré à l'application de la méthode des plans d'expériences. La simulation numérique de notre exemple sera appliquée dans cette partie.

La dernière partie sera consacrée à la conclusion générale.

I.1. Généralité sur l'usinage :

L'usinage par enlèvement de matière est le moyen le plus fiable pour obtenir des pièces de précision, à partir de pièces moulées, extrudées ou forgées

On appelle usinage toute opération de mise en forme par enlèvement de matière à l'aide d'une machine-outil destinée à conférer à une pièce des dimensions et un état de surface (écart de forme et rugosité) situés dans un intervalle de tolérance donné (Figure I.1).



Figure I. 1 : Principe de l'usinage

L'enlèvement de matière est obtenu par une action mécanique de compression jusqu'à cisaillement mettant en œuvre un outil coupant en contact avec la pièce à usiner (Figure I.2), où le phénomène de coupe ne peut être obtenu que si l'outil est plus dur que la pièce.

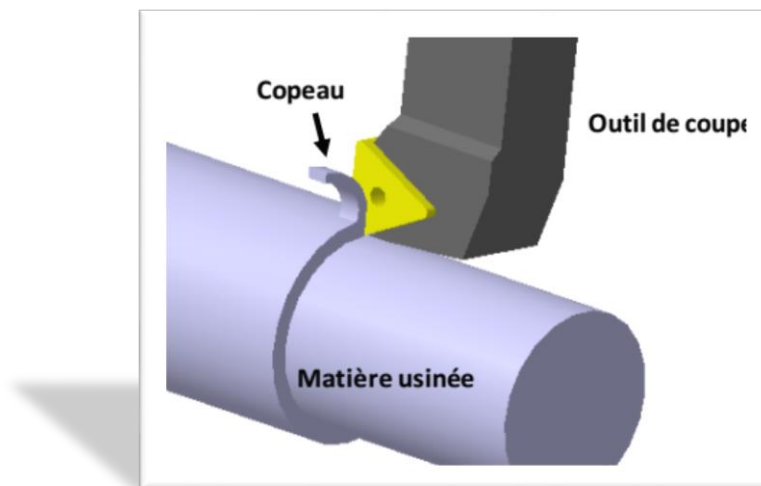


Figure I. 2 : Action de coupe.

I.2. Les machines :

Les machines sont classées en deux catégories :

- Fraisage : L'outil tourne, la pièce se déplace par rapport à l'outil. Cela permet de réaliser des formes planes, des moules...
- Tournage : La pièce tourne, l'outil se déplace par rapport à la pièce : pour réaliser des pièces de révolution.

I.3. Le tournage :

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils à arête unique. La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principal du procédé, l'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce. La combinaison de ces deux mouvements, ainsi que la forme de la partie active de l'outil, permettent d'obtenir des usinages de formes de révolution (cylindres, plans, cônes ou formes de révolution complexes). [1]

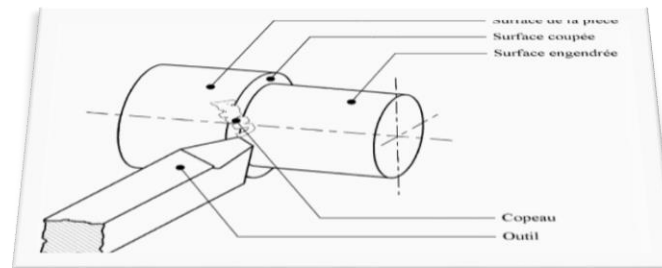


Figure I. 3 : Procédure de tournage

I.4. Principe de tournage :

La pièce est animée d'un mouvement circulaire uniforme c'est le mouvement de coupe M_e .

L'outil est animé d'un mouvement de translation parallèle ou oblique par rapport à l'axe de rotation c'est le mouvement d'avance M_f .

Dans son mouvement, la pointe de l'outil décrit une ligne appelée génératrice qui transforme la pièce en un solide de révolution, en faisant varier le déplacement de l'outil (Mouvement radial) il sera possible d'obtenir tous les solides de révolution tels que cylindre, cône, sphère, etc.

Le tournage permet également le façonnage des formes intérieures par perçage, alésage, taraudage [1]

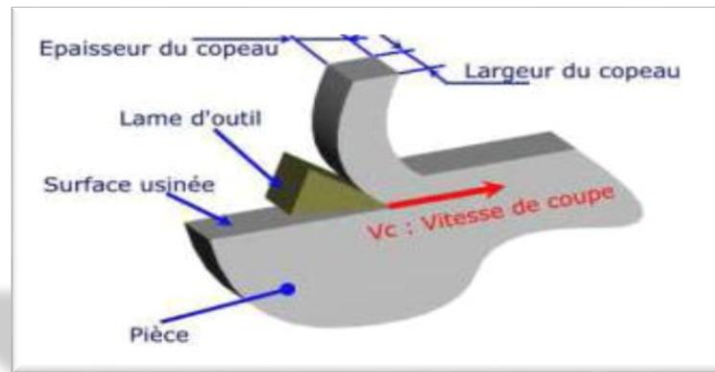


Figure I. 4 : Principe de tournage [1]

I.5. Les tours :

Les tours (Figure. I.5) permettent de réaliser des surfaces de révolution et hélicoïdales (filetage): cylindres, cônes et plans (génératrice perpendiculaire à l'axe de révolution). L'utilisation principale de ces machines est l'usinage des arbres. La pièce, généralement tenue par le mandrin, a un mouvement de rotation (mouvement de coupe) transmis par la broche. L'outil peut se déplacer en translation suivant deux directions. Ces deux directions, perpendiculaires entre elles, appartiennent à un plan auquel l'axe de la broche est parallèle. Le premier mouvement de translation est parallèle à l'axe de la broche. Le deuxième mouvement de translation est perpendiculaire à l'axe de la broche. [1]

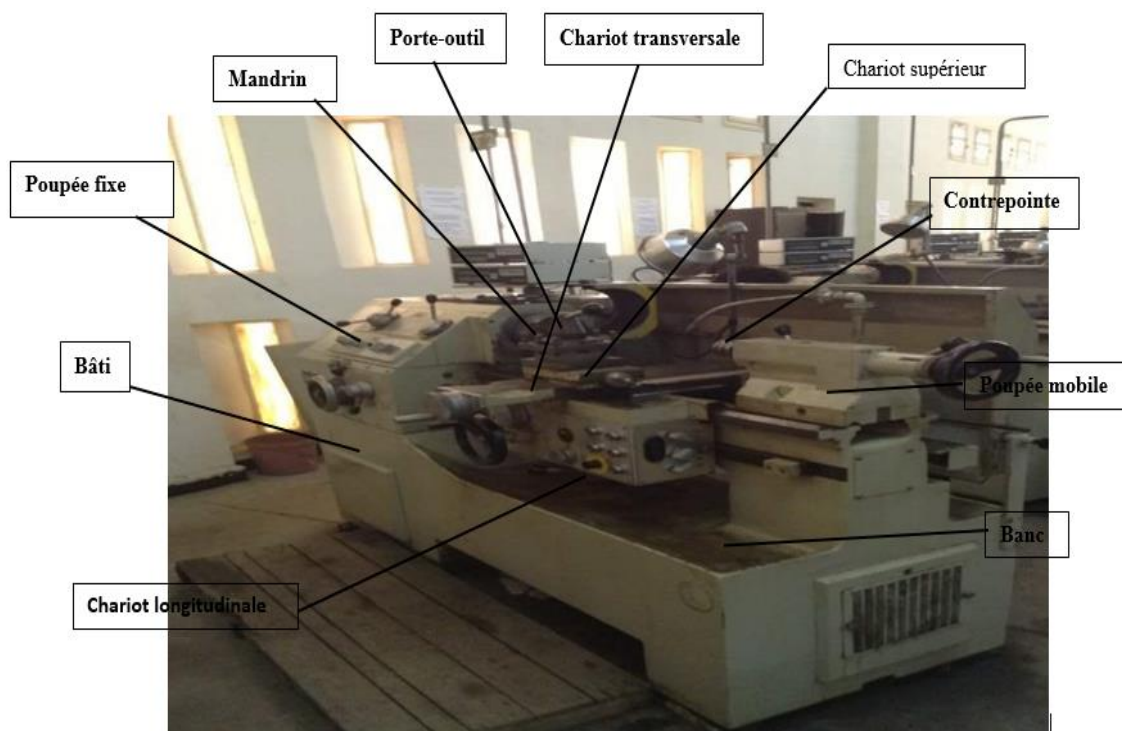


Figure I. 5 : Composantes d'un tour de l'atelier d'usinage du Département de Mécanique.

I.5.1. Classification des machines de tour :

Les machines-outils les plus courantes utilisées pour le tournage sont:

- Les tours parallèles à charioter et à fileter
- Les tours à copier
- Les tours semi-automatiques
- Les tours automatiques
- Les tours automatiques multibroches
- Les tours à commande numérique

I.6. Différentes opérations de tournage:

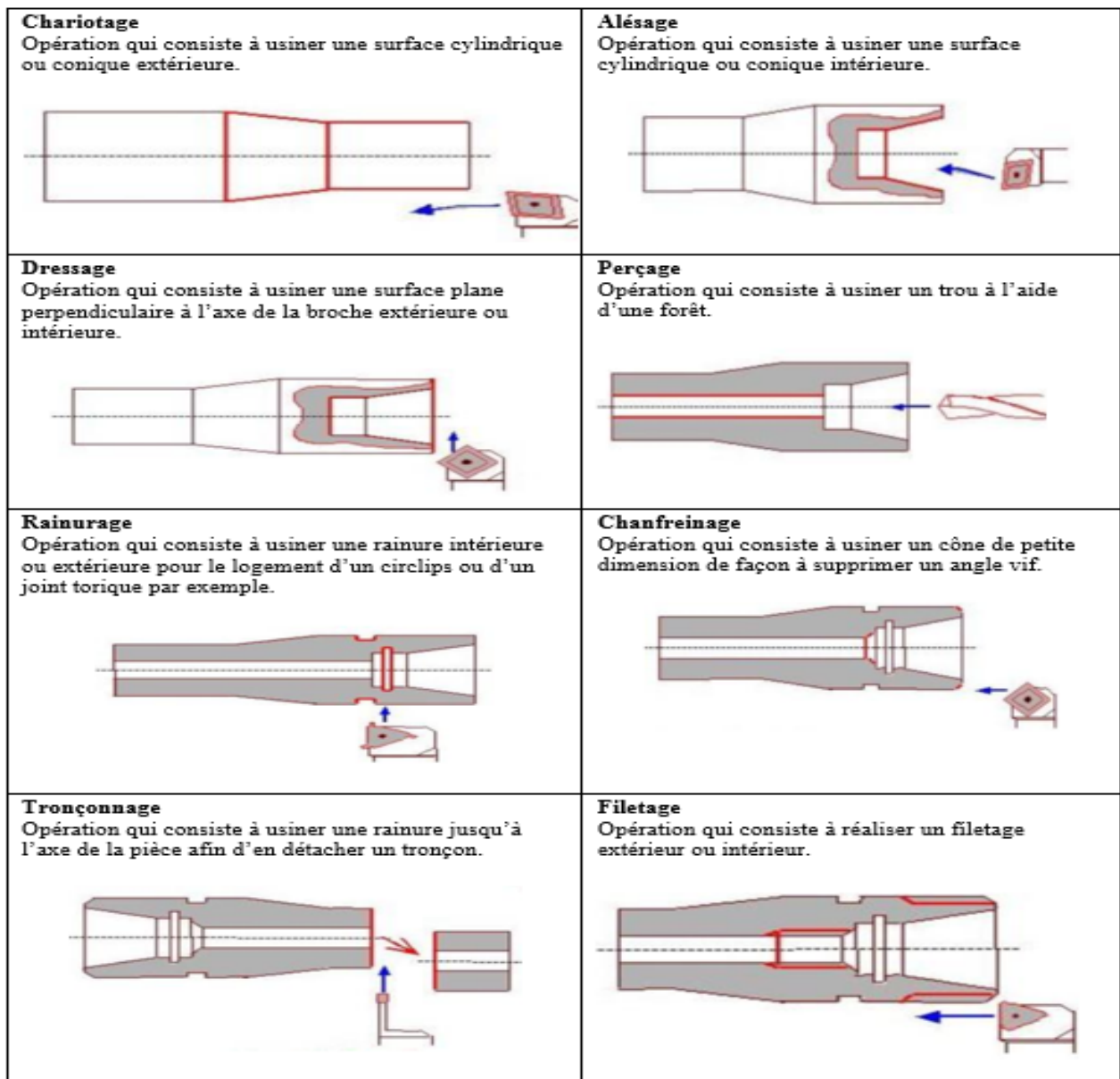


Figure I. 6 : Différentes opérations de tournage

I.7. Conditions de coupe en tournage :

Les paramètres de coupe sont choisis mécaniques de la matière à usiner et de l'outil. Ils sont indépendants de la machine utilisée et des caractéristiques géométriques de la pièce et de l'outil.

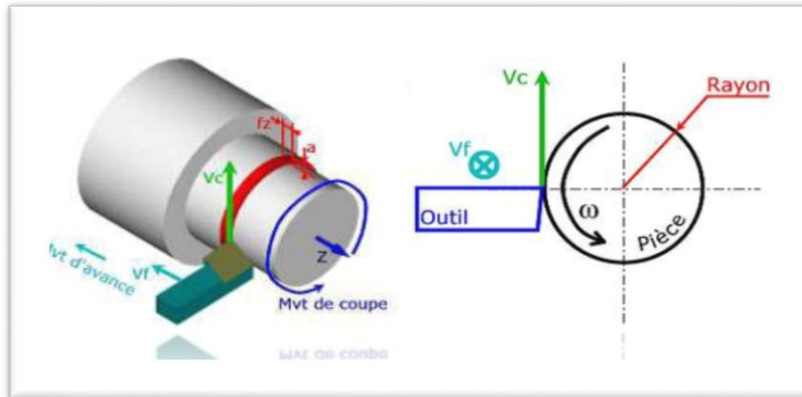


Figure I. 7 : Conditions de coupe

I.7.1. Vitesse de coupe :

La pièce est entraînée sur le tour à une certaine vitesse ω rad/s (soit N tr/min), cette vitesse angulaire étant communiquée par la broche de la machine via le porte-pièce. Compte tenu du diamètre de la pièce au point d'usinage situé sur un diamètre, la vitesse relative de la pièce en ce point par rapport à l'outil (supposé fixe par rapport à la machine) vaut: [1]

$$v_c = \frac{\pi \times D \times N}{1000} \quad \left(\frac{m}{min} \right) \quad (I.1)$$

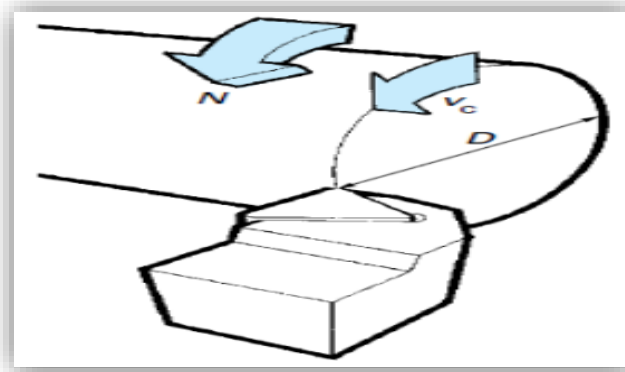


Figure I. 8: Vitesse de coupe

Cette vitesse est appelée vitesse de coupe soit, avec les unités traditionnelles de la fabrication mécanique :

v_c : vitesse de coupe (m/min)

D : Diamètre de la pièce (mm)

N : Fréquence de rotation (tr/min)

Il convient d'observer que la vitesse de coupe n'est constante que si la vitesse de broche et le diamètre de la pièce demeurent inchangés.

I.7.2. Vitesse d'avance v_f :

La vitesse d'avance V_f (mm / min) est la vitesse à laquelle la machine déplace l'outil par rapport au bâti.

L'avance par tour f (mm / tr) est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce a effectué une révolution. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée. L'avance influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent. [1]

$$V_f = N \times f \text{ (mm / min)} \tag{I-2}$$

V_f : vitesse d'avance (mm / min)

f : L'avance (mm)

N : Fréquence de rotation (tr / min)

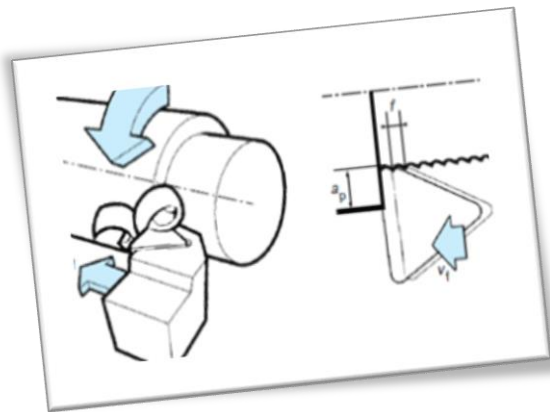


Figure I. 9: Vitesse d'avance v_f , Avance par tour f

I.7.2.1. Les types d'avances :

On distingue :

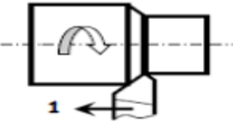
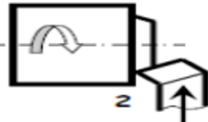
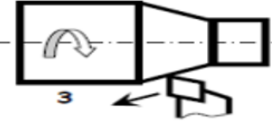
<p><u>a) Avance longitudinal</u> On appelle avance longitudinale si l'outil se déplace parallèlement à l'axe de l'ébauche.</p> 	<p><u>b) Avance transversale</u> On appelle avance transversale si l'outil se déplace perpendiculairement à l'axe de l'ébauche.</p> 	<p><u>c) Avance oblique</u> On appelle avance oblique si l'outil se déplace sous un angle par rapport à l'axe de l'ébauche.</p> 
---	--	--

Figure I. 10: Différentes types d'avance

I.7.3 Profondeur de passe « a » :

La profondeur de passe notée a en (mm), correspond à la longueur de l'arête de coupe engagée dans la matière, dans le cas de la coupe orthogonale, et à la différence entre le rayon de la pièce avant et après usinage, dans le cas du tournage. La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arête de l'outil. [2,3]

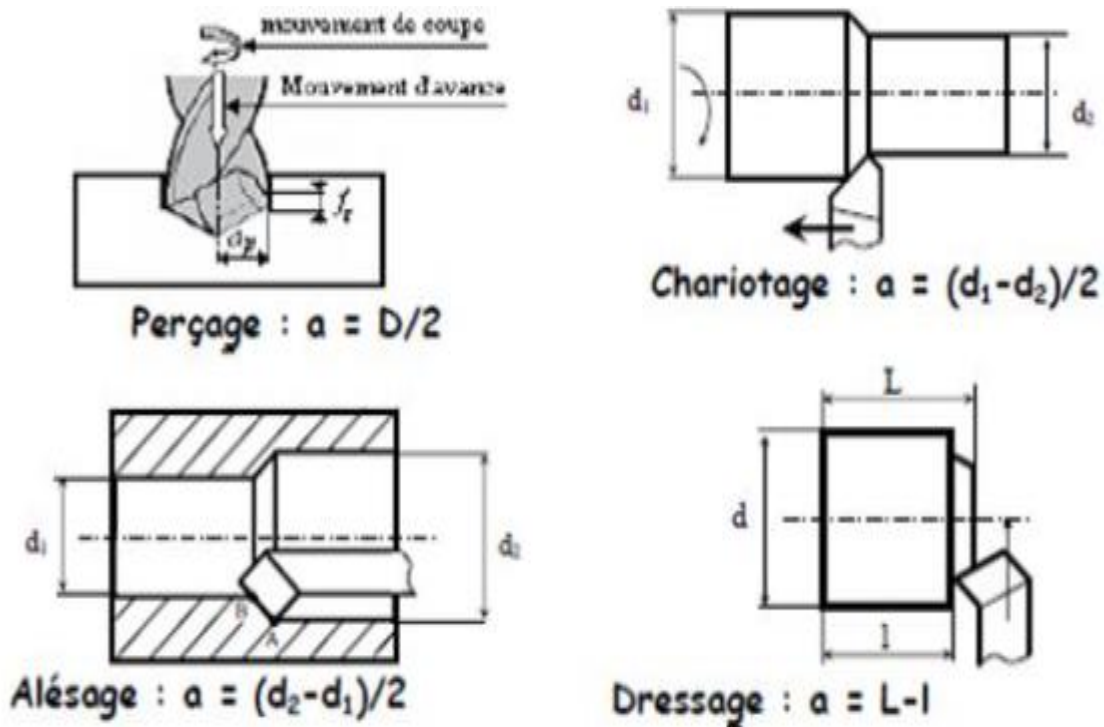


Figure I. 11: Les profondeurs de passe. [4]

I.8. Nuances des outils de coupe:

L'usinage des aciers durcis par trempe nécessite l'utilisation de matériaux coupants ayant d'excellentes propriétés de dureté à hautes températures, de résistance à l'usure et de stabilité chimique. C'est l'avènement des outils comme les carbures micro-grains revêtus, les céramiques, les CBN et le diamant qui a rendu possible l'exploitation industrielle de cette technologie. Les conditions optimales d'usinage pour un couple outil-matière donné ne sont pas faciles à déterminer. Elles doivent être établies par une série de tests rigoureux. La Figure I.12 présente les matériaux des outils pour une exploitation dans le tournage des matériaux durs. En outre, les matériaux sont également caractérisés par leurs géométries. [5]

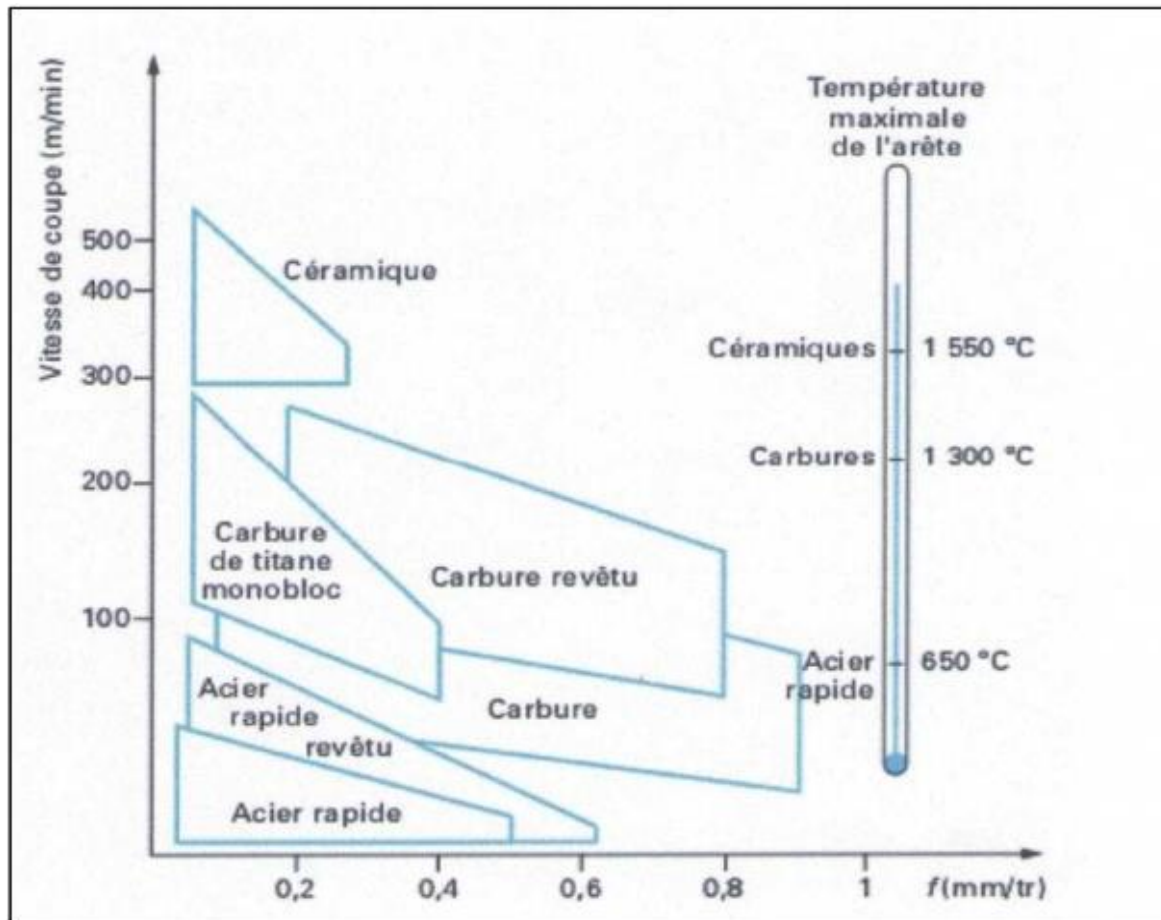


Figure I. 12: Comparaison des matériaux de coupe. [5]

1.8. Usure des outils :

1.8.1. Phénomènes d'usure :

1.8.1.1. Usure par effet mécanique :

- **Usure adhésive** (régie par l'équation de Burwell et Strang). Soit « Ar » surface réelle de contact, « Aa » surface apparente de contact, on peut avoir $Ar/Aa=10^{-5}$. Les pressions de contact sont donc très grandes et le risque d'avoir adhésion important.
- **Usure abrasive (à sec)** : les particules de métal se glissent entre l'outil et la pièce.
- **Usure érosive** : même phénomène que précédemment, en présence d'un lubrifiant. [6]

1.8.1.2. Usure par effet physico-chimique :

- **Usure corrosive** : au contact de l'air, d'un lubrifiant, à haute température. Transfert des particules de l'outil vers le copeau.
- **Usure par diffusion** : apparaît pour des vitesses élevées.

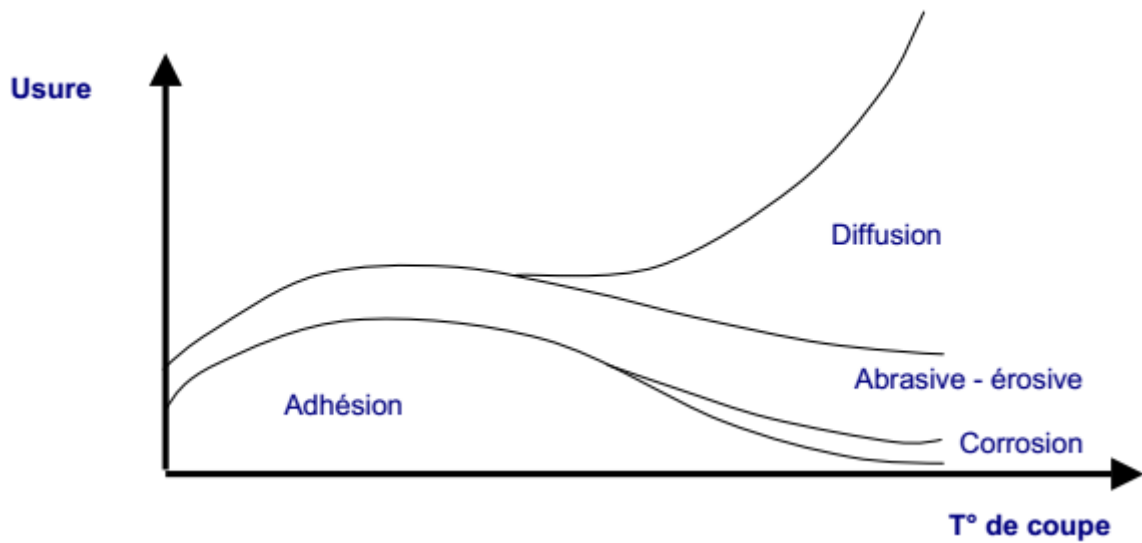


Figure I. 13: Phénomènes d'usure [6]

1.8.2. Manifestation de l'usure :

Nom	Allure	Effets	Cause	Remède
Usure en dépouille VB		L'usure en dépouille est la plus importante. Elle influence directement la cote fabriquée, et l'état de surface	Vc trop important	Réduire Vc ou changer de nuance de plaquette. Revêtement Al2O3 (Pour les matériaux réfractaires avec des plaquettes céramiques, il faut au contraire augmenter Vc)
Usure en cratère		Elle entraîne une fragilité de l'arête. Lorsque l'usure a progressé jusqu'à l'arête secondaire, l'état de surface devient médiocre	Usure par diffusion due à une température trop importante sur la face de coupe.	Choisir une plaquette avec un γ positif. Prendre une plaquette revêtue. Réduire Vc puis Vf
Déformation plastique		L'arête de coupe s'est déformée entraînant une dépression de l'arête et un renflement sur la face de dépouille	Efforts de coupe trop importants. Température de coupe trop importante	Lubrifier. Réduire Vf Réduire Vc
Ecaillage		Petite fracture entraînant un état de surface médiocre et une usure en épouille excessive.	Nuance trop fragile Géométrie trop fragile Arête rapportée	Prendre une nuance tenace. Augmenter β et le chanfrein de bec. Réduire l'avance au début de la coupe

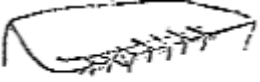
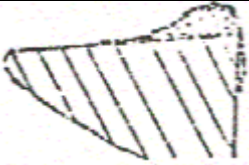

Usure en peigne		Des fissures perpendiculaires à l'arête entraînent son effritement	Elle est due à des fluctuations thermiques lors de l'usinage : Arrosage intermittent Usinage intermittent.	Sélectionner une nuance tenace offrant une bonne résistance aux chocs thermiques. Pratiquer un arrosage abondant ou usiner à sec
Arête rapportée		Un copeau se dépose sur la plaquette, entraînant un état de surface médiocre	Vc trop faible Géométrie mal adaptée au matériau	Augmenter Vc. Revoir les catalogues (cas de l'inox, de certains aluminium)
Rupture		Risque d'endommager la pièce, le porte outil	Nuance trop fragile. Charge excessive sur la plaquette. Choc lors de l'usinage (plan de joint)	Prendre une nuance tenace. Réduire Vf et a. Dans ce cas : augmenter la profondeur de passe pour absorber le choc

Tableau I. 1: Manifestation de l'usure [6]

1.8.3. Durée de vie:

La durée de vie est mesurée sur l'usure en dépouille :

Dans la zone b : VB en mm. On adopte comme critère d'usure $VB^*=0.3$. [6]

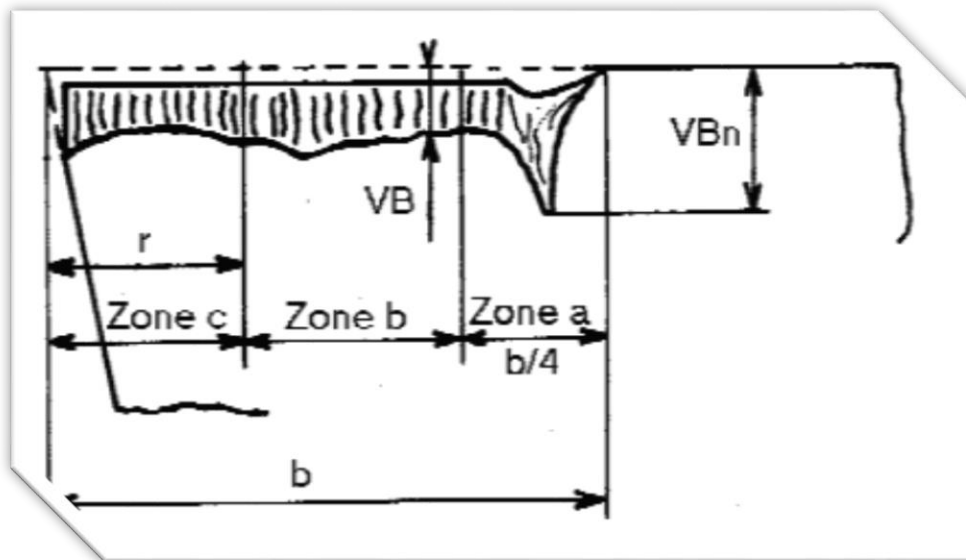


Figure I. 14 : Différentes zones de la durée de vie

1.8.3.1. Modèle de Taylor (1907) :

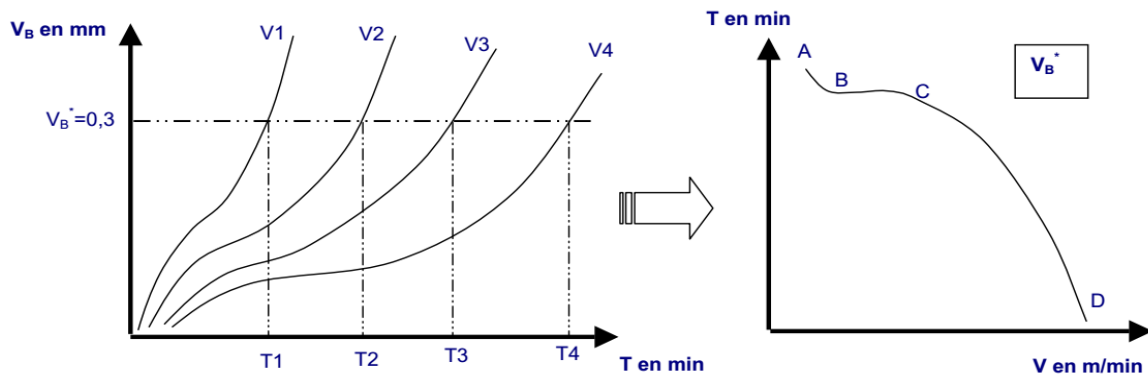


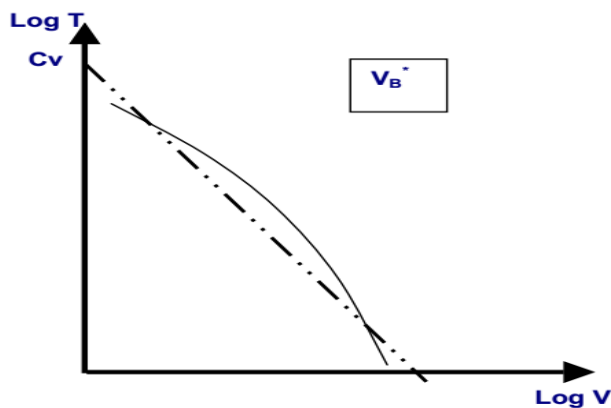
Figure I. 15: Modèle de Taylor (1907) [6]

AB - Forte usure : stabilisation

BC - Usure constante

CD - Usure accélérée

En gardant uniquement la partie CD sur une feuille log



$$T = C_v * V^n \quad (I.3)$$

Avec C_v et n constant.

La durée de vie est donnée pour une usure $V_B^* = 0.3 \text{ mm}$

Remarque : « n » négatif. [6]

Figure I. 16 : Partie CD [6]

1.8.3.2. Autres modèles :

- Modèle de Gilbert (1950) (ou Taylor généralisé)

Il prend en compte l'influence de l'avance et de la profondeur de passe :

$$T = c_v \cdot s^x \cdot a^y \cdot v_n \quad (I.4)$$

- Modèle de Kronenberg (1968).

Il donne une vitesse finie pour une durée de vie nulle : $T + K = C1.V^n \quad (I.5)$

- Modèle de Köning – Depiereux (1969) :

Modèle très proche des résultats expérimentaux mais nécessitant des moyens de calculs

importants : $T = e^{(-aV^\gamma - \gamma s^\mu - \delta a^\lambda)}$ [6]. (I.6)

II.1. Introduction :

Lors d'une opération d'usinage, les phénomènes mis en jeu sont extrêmement complexes et non linéaires. De nombreux paramètres, souvent couplés entre eux, interviennent et peuvent engendrer des vibrations du système pièce/outil/machine (**POM**). Ce qui se traduit le plus souvent, par une qualité dimensionnelle et d'état de surface médiocre, ainsi que par une accélération de l'usure de l'outil.

Nous allons, dans cette partie, définir les notions de coupe stationnaire et de coupe dynamique et par la suite énumérer les principaux phénomènes pouvant influencer le comportement vibratoire de la coupe. Nous classerons ces phénomènes en fonction du type de réponses fournies par le système :

- les vibrations libres.
- les vibrations forcées que nous répartirons en deux catégories : celles qui sont extérieures au processus de coupe et celles qui sont propres au processus de coupe.
- les vibrations auto-excitées. (le broutage ou « chatter ») [7]

II.2. Coupe stationnaire / coupe dynamique :

La (Figure II.1) montre le modèle de la coupe orthogonale, généralement accepté, pour des conditions stationnaires. Dans ce modèle la machine, l'outil et la pièce sont considérés comme parfaitement rigides. Le seul processus étudié est l'interaction outil/pièce qui conduit à la formation du copeau, et qui est le résultat des déformations plastiques successives dans les zones de déformations figurées.

Dans le modèle de la coupe stationnaire les paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance, épaisseur de copeau, profondeur de passe) et ceux caractérisant la géométrie de la coupe (les angles de coupe, l'orientation de vecteur vitesse effective, l'angle de cisaillement) sont considérés comme constants :

- Par conséquent, les relations qui décrivent le processus sont des relations algébriques, appropriées pour les processus stationnaires. [7]

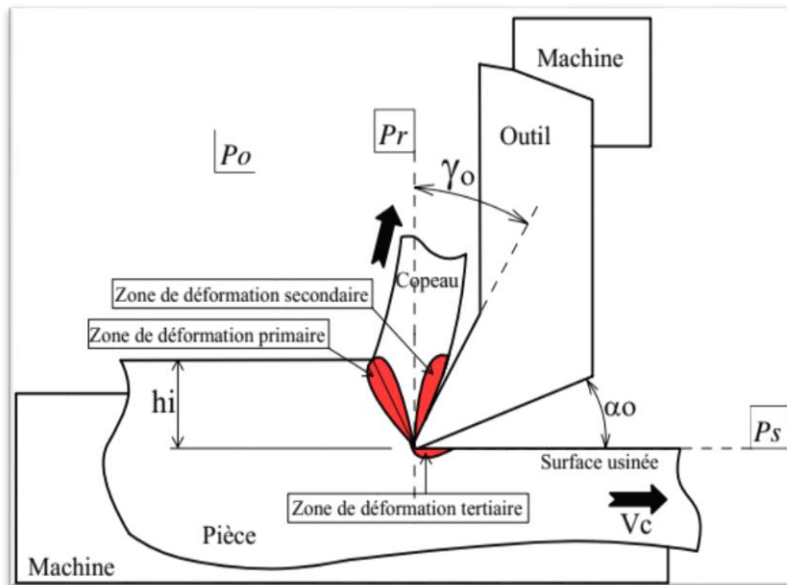


Figure II. 1 : *Modèle de la coupe stationnaire [7]*

Dans le modèle de la coupe dynamique (Figure II.2), la structure de la machine, la dynamique de l'outil et de la pièce, ainsi que le processus de génération de la surface usinée sont considérés.

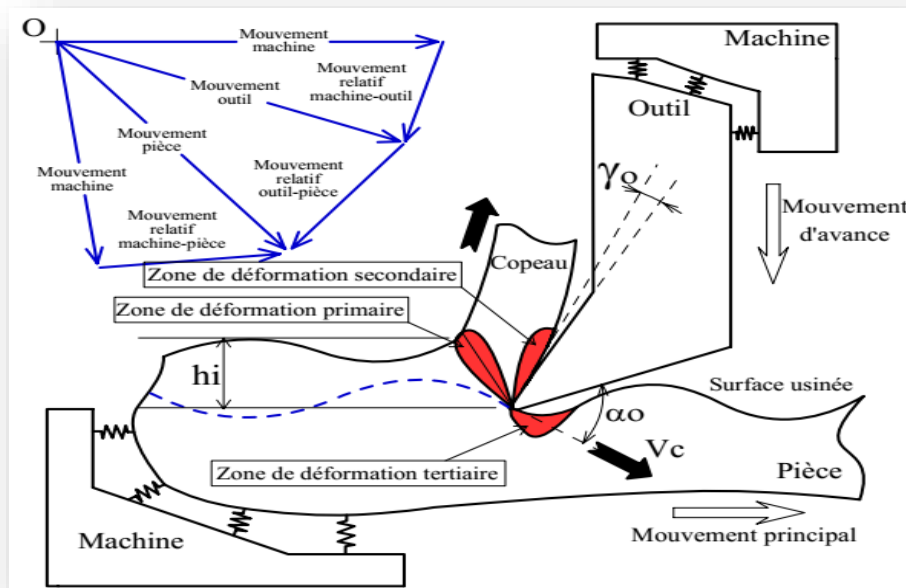


Figure II. 2: *Modèle de la coupe dynamique [7]*

La coupe, en tant que processus physique, ferme la boucle qu'elle forme avec la dynamique du système POM (Figure II.3). Les équations décrivant la génération de la surface usinée remplacent les équations de compatibilité de déformations pour les systèmes mécaniques en général. [7].

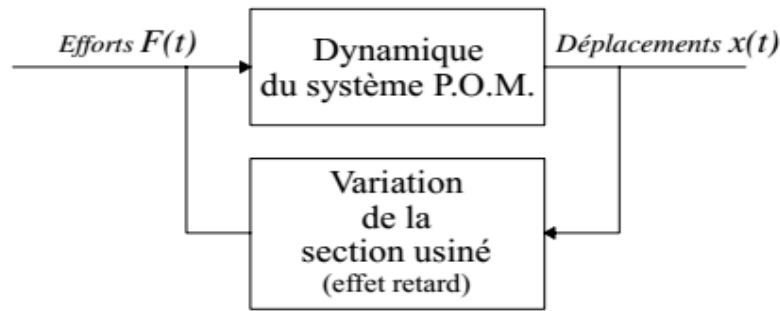


Figure II. 3: schéma structural de la coupe dynamique [7]

Dans le cas de la coupe quasi-stationnaire, mais aussi dans le cas de certains régimes vibratoires fortement amortis, pour lesquels les variations d'amplitudes et le retard sont relativement faibles, on peut considérer le modèle de la coupe stationnaire. De même, lorsque l'on souhaite prédire certains phénomènes vibratoires (surtout quand on envisage de déterminer les conditions limites pour lesquelles les vibrations démarrent), le modèle de la coupe stationnaire peut fournir des résultats satisfaisants. Par contre, pour la modélisation des phénomènes vibratoires permanents, ou pour lesquels les amplitudes peuvent provoquer une interruption de la coupe, on doit absolument considérer un modèle de coupe dynamique.

II.3. Identification des phénomènes vibratoires générés par la coupe :

II.3.1. Les vibrations libres :

Les sources des vibrations libres se caractérisent par leur impulsivité et leur non périodicité. C'est pourquoi, elles sont très difficiles à identifier. Un système suffisamment amorti, sera presque insensible à ce genre d'excitations, ce qui est le cas de toutes machines-outils correctement conçues. Comme sources possibles, on peut citer, les irrégularités géométriques aperiodiques de la pièce à usiner, des entrées en matière brusques, ou encore des erreurs dans les consignes de déplacements des axes mobiles (mauvaise programmation ou problèmes d'asservissements). [7]

II.3.2 Les vibrations forcées :

Les vibrations forcées généralement considérées dans les problèmes d'usinage, sont celles dues à la discontinuité de la coupe (cas de pièces n'ayant pas de symétrie de révolution, en tournage). Dans le cas de la superfinition, d'autres sources, souvent considérées de second ordre, doivent être prises en compte.

L'utilisation d'un modèle dynamique de la coupe (Figure II.3) nécessite de séparer les vibrations forcées en deux sous-familles [7] : celles qui affectent directement la dynamique de la machine (dites vibrations forcées externes) et celles qui affectent le processus de coupe lui-même (dites vibrations forcées internes).

II.3.2.1 Vibrations forcées externes :

Ce type d'excitation trouve comme sources la présence et le fonctionnement de mécanisme dans un environnement proche de la machine, comme par exemple un groupe hydraulique, la défaillance d'un élément constituant de la machine-outil (roulements, axes) ou bien, la présence d'un balourd sur un élément tournant de la machine. Dans tous les cas, la machine vibre à la même fréquence que l'excitation et l'amplitude des vibrations dépend de la réponse de la structure, à la fréquence imposée par la source.

Les vibrations forcées externes, sont souvent simples à identifier dans la mesure où elles sont liées à la rotation d'un élément de la machine.

La fréquence d'excitation est donc la fréquence de rotation de cet élément ou une de ses harmoniques. Par exemple, la fissuration d'un arbre se détecte, dans la plupart des cas, par une fréquence d'excitation égale à deux fois la fréquence de rotation de ce dernier.

II.3.2.2 Vibrations forcées internes :

A la différence des vibrations forcées externes, les vibrations forcées internes ne peuvent apparaître que lors du processus d'enlèvement de matière. En effet, le phénomène de coupe est le siège de nombreuses sources vibratoires que nous allons recenser :

- la formation d'arête rapportée (B.U.E.= Built Up Edge).
- la formation du copeau
- l'effet friction, Le talonnement.
- la variation de la géométrie de coupe instantanée.
- les hétérogénéités du matériau usiné.

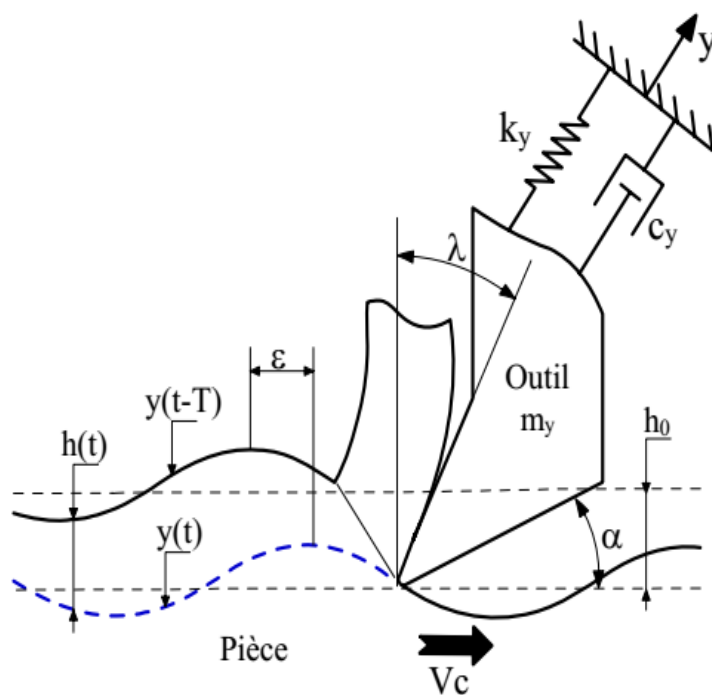
II.3.3. Les vibrations auto- excitées (le broutage ou « chatter »):

Nous avons pu voir précédemment que de nombreux phénomènes ont été étudiés comme étant sources de vibrations et d'instabilités lors des opérations d'usinage. Cependant, la plupart des auteurs semblent s'accorder sur le fait que les vibrations auto-excitées ou broutage constitue le phénomène le plus critique que l'on puisse rencontrer. C'est pourquoi les vibrations auto-excitées ont été sources de nombreuses études au siècle dernier et le sont encore actuellement [7]. Ces études mettent en avant deux causes de vibrations auto-excitées : la régénération de la surface et le couplage des modes.

➤ la régénération de la surface:

Au cours d'une phase d'usinage, la matière est enlevée par des passes successives (correspondant, en tournage, à chaque tour de la pièce).

Durant chaque passe, de nombreux phénomènes, dont nous venons de dresser la liste, perturbent la coupe. Ces phénomènes, par les variations des efforts de coupe qu'ils provoquent, excitent les vibrations du système Pièce/Outil/Machine (**POM**) (Figure II.4). Puis, elles sont entretenues par les ondulations laissées sur la surface usinée à la passe précédente $y(t-T)$. Le déphasage ε , qui existe entre les ondulations laissées par ces deux passes successives, induit une épaisseur de copeau non déformée instantanée $h(t)$ variable dont dépend le niveau des efforts de coupe. Le système est ainsi auto-excité.



- h_0 : épaisseur de copeau non déformée initiale
- $h(t)$: épaisseur de copeau non déformée instantanée
- $y(t)$: surface générée lors de la passe en cours
- $y(t-T)$: surface générée lors de la passe précédente
- ε : déphasage entre la passe en cours et la passe précédente
- k_y, c_y, m_y : Raideur, amortissement et masse équivalente du système à 1 dll

Figure II. 4: Schématisation du phénomène de régénération de la surface.

➤ **Le couplage des modes directionnels:**

L'effet du couplage des modes, introduit par Tlustý [8], qui considère le broutement comme un couplage entre deux modes orthogonaux de l'outil, ou de la pièce, sous l'effet des efforts de coupe. Ce couplage engendre un mouvement relatif elliptique de l'extrémité de l'outil par rapport à la pièce, provoquant ainsi un déséquilibre des conditions d'usinage pouvant entraîner une instabilité [16].

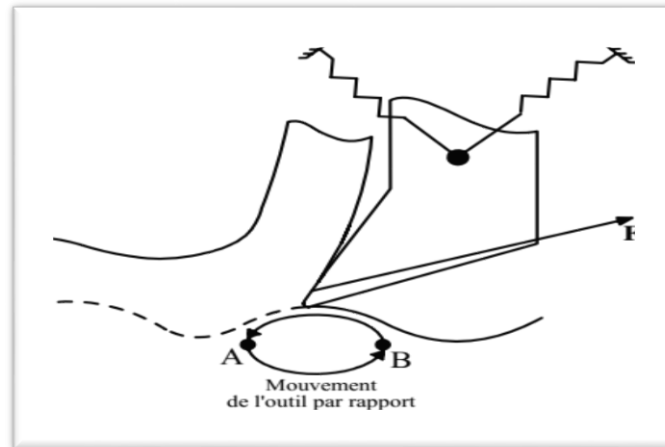


Figure II. 5: Effet du couplage des modes directionnels [9]

La Figure II.5 montre un outil possédant deux modes vibratoires.

La partie BA de la trajectoire correspond à une dissipation d'énergie de l'outil dans la coupe, car l'outil « avance » dans la matière et assiste le processus de coupe. En revanche, la partie AB correspond à une dissipation d'énergie de la coupe dans l'outil. La profondeur de coupe au cours de la partie AB est supérieure à la profondeur de coupe au cours de la partie BA. Il en résulte une accumulation d'énergie dans l'outil.

En fonction de la forme de l'ellipse (donc des conditions de coupe), l'outil dissipera l'énergie superflue en vibrant à la fréquence à laquelle il peut en amortir le plus (c'est à dire à sa fréquence naturelle). Si l'amortissement est suffisant, l'usinage sera stable sinon il sera instable [9].

II.4. Comportement Mécanique Global Du Système Pièce/ Outil/ Machine (POM) :

La machine-outil est un ensemble complexe mettant en œuvre un ou plusieurs procédés, des éléments de structure fixes (bâtis, glissières) ou mobiles (broches et arbres tournants dans des paliers) ainsi qu'une partie commande. La machine-outil est donc un véritable système qui doit être étudié comme tel. Tous les éléments, qu'ils soient actifs ou passifs, interagissent. La machine a un comportement dynamique dont ne saurait rendre compte l'étude séparée de chacun de ses éléments. [10]

II.4.1. Description du système POM:

La plupart des ouvrages traitant de la machine-outils se répartissent généralement en deux types. Les uns l'abordent de façon encyclopédique et /ou descriptive, tels les travaux de [11], [12], [13], [14]. Ces auteurs décrivent distinctement les organes de chaque machine dont le calcul n'est abordé que de façon assez générale. Les autres [12] abordent le système POM au travers d'applications expérimentales particulières.

Malgré leurs diversités apparentes, les machines-outils ont pratiquement les mêmes structures et sont composées des mêmes éléments de base. La constitution générale d'une machine-outil (figure II.6) permet de distinguer deux parties :

- une partie indépendante de l'opération d'usinage.
- une partie dépendante de l'opération d'usinage.

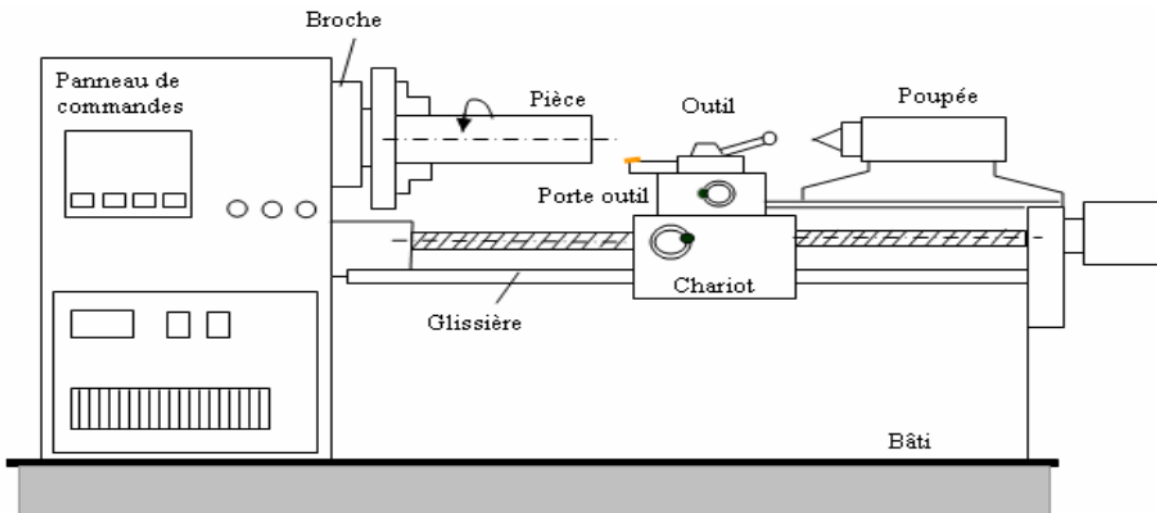


Figure II. 6: Machine-outils.

II.4.1.1. Éléments indépendants de l'opération d'usinage:

Les éléments identifiés comme étant indépendant de l'opération d'usinage sont :

- Bâti,
- ensemble chariot-glissière,
- broche,
- commande d'avance,
- commande de puissance, directeur de commande.

II.4.1.1.1. Bâti :

Le rôle du bâti est multiple. D'une part, il sert d'intermédiaire entre le sol et les éléments actifs de la machine, d'autre part, il réalise la liaison entre la pièce à usiner et les outils.

II.4.1.1.2. Chariot-glissière:

La glissière confère au chariot un seul degré de liberté correspondant à une translation. Il est communément convenu que la liaison idéale chariot-glissière doit être sans jeu et ne faire intervenir qu'un frottement de type hydrodynamique. Dans la réalité, il convient de noter la présence de jeux et de frottements de types plus complexes.

II.4.1.1.3. Broche:

La broche est un corps tournant qui possède un seul degré de liberté par rapport à la structure de la machine. La machine comporte les paliers qui retirent à la broche cinq degrés de liberté. Ces paliers ont une grande importance pour la qualité de la machine. Ils doivent être rigides et ne doivent présenter que de très faibles jeux, afin d'éviter des mouvements relatifs non souhaités entre la broche et le bâti donc entre la broche et la pièce. Assez souvent la broche est cependant l'élément le plus souple de la machine.

II.4.1.1.4. Commande de puissance:

La commande de puissance de la machine pose des problèmes qui ont pour origine la liaison entre le moteur et la broche. Essentiellement deux techniques sont utilisées. La courroie qui paraît être arrivée au bout de son potentiel tant en vitesse qu'en puissance transmise et la transmission directe qui présente des problèmes sérieux dus à l'encombrement qu'elle impose à la broche ou à l'ensemble moteur-broche quand ils sont montés en ligne.

II.4.1.1.5. Directeur de commande :

Le directeur de commande a le rôle d'animation de l'ensemble de la machine. En particulier, c'est lui qui assure le déplacement relatif de l'outil par rapport à la pièce selon la trajectoire prévue. Il est responsable du maintien des conditions de coupe à leurs valeurs programmées. Le directeur de commande opère en boucle fermée au niveau de l'asservissement en position et en vitesse pour chacun des axes de la machine. Mais cela signifie seulement qu'il asservit la position d'un point particulier de la chaîne cinématique (chariot, vis à billes,...) pour chaque axe numérisé. Il n'y a pas de mesure directe de la position de l'outil par rapport à la pièce. Cette position est donc tributaire des déformations qui interviennent à la fois en deçà (déformation du bâti, des glissières, de vis à billes,...) et au-delà (déformation de la broche, des chariots, des outils, des pièces et des porte-pièces) des mouvements asservis.

II.4.1.2. Eléments dépendants de l'opération d'usinage :

Dans cette deuxième partie, nous regroupons les éléments suivants :

- la pièce,
- l'outil de coupe,
- le porte - outil,
- le porte – pièce

II.4.1.2.1. la pièce :

La pièce est considérée comme une partie intégrante du système d'usinage. Il ne sert à rien d'avoir une machine de très grande rigidité et très haute qualité si la pièce à usiner se déforme sous l'effet des efforts de coupe ou de bridage. Les pièces peuvent être réparties en trois catégories : pièces massives, pièces flexibles et autres. Les pièces massives, peu déformables, ne jouent pas un rôle important dans la dynamique du système **POM** autrement que par leur masse qui abaisse les fréquences propres [17]. Les pièces flexibles sont celles, au contraire, qui confèrent au système **POM** l'essentiel de ses caractéristiques : raideur, modes propres, amortissement, etc. La flexibilité peut être seulement locale, dans le cas d'un usinage de voile mince par exemple. Ces deux cas conduisent à des simplifications de la modélisation du système **POM**. Les autres types de pièces constituent des cas intermédiaires. Dans le cas où la pièce présente une flexibilité élevée, par exemple un cylindre à parois minces, la caractérisation dynamique du système usinant devient plus difficile parce que le processus de coupe devient instable, et la déformation de la pièce est inévitable [18]. Les auteurs [19] proposent un modèle pour le comportement dynamique de la pièce et obtiennent un processus de coupe stable par l'introduction d'un amortissement supplémentaire. [10]

I.4.1.2.2. l'outil de coupe :

L'outil de coupe peut être unique ou multiple. Il constitue une partie essentielle dans l'étude du comportement statique et dynamique d'une machine-outils. C'est par l'étude du phénomène d'interaction de l'outil avec la pièce que nous obtenons les forces de coupe engendrées durant l'usinage. Les outils peuvent se répartir en trois catégories : indéformables (fraises à surfacer), souples (barres d'alésage longues, fraises deux tailles longues, fraises de finition, fraises hémisphériques dans le cadre d'usinage de moule, etc.) et intermédiaires.

II.4.1.2.3. Le porte – outil :

Le porte-outil assure la liaison entre l'outil et la machine. La notion de l'interface (cône, denture, liaison prismatique, etc.) confère au porte-outil des caractéristiques particulières de raideur et d'amortissement qui sont très dépendantes de la qualité, de la géométrie et de l'état d'usure de l'interface [17] , [15]. [10]

II.4.1.2.4. le porte – outil :

Le porte-pièce assure le maintien en position de la pièce par rapport à l'élément auquel il est rattaché (broche ou chariot). Les actions qu'il exerce sur la pièce contribuent à la fois à la déformer, à la renforcer et à augmenter la rigidité. Sur le plan dynamique, la prise en compte

globale de l'ensemble (pièce, porte-pièce) est nécessaire sauf dans le cas de pièces particulièrement déformables ne pouvant pas être soutenues.

II.4.2. Sources de vibrations du système POM :

Les causes d'excitation du système **POM** peuvent être directement liées à l'usinage ou provenir d'autres sources. Ces dernières sont principalement les défauts d'équilibrage, les défauts liés à la chaîne cinématique et les oscillations provenant de l'asservissement de pilotage. Les différentes causes peuvent évidemment se superposer. Les sources d'excitation qui sont liées à l'usinage sont de quatre types :

1. le premier est la coupe elle-même, soit en raison de l'hétérogénéité du matériau qui conduit à une répartition statistique des micro-duretés, soit en raison de l'instabilité de l'écoulement du copeau. Les fréquences d'excitation sont généralement assez élevées, de quelques kHz à quelques dizaines de kHz [11], [17].
2. le deuxième est dû aux discontinuités d'usinage. Il se rencontre en fraisage et en tournage discontinu. Chaque choc, à l'établissement ou à la rupture du contact entre une arête de coupe et de la pièce, conduit à un régime transitoire. La fréquence des chocs dépend de la vitesse de rotation de la broche, du nombre d'arêtes et de la configuration de la pièce. Elle varie de 10 Hz à 1 kHz,
3. le troisième est celui d'une excitation périodique. Il peut prendre la forme d'une variation continue et cyclique de la sollicitation. C'est le cas du tournage d'une pièce excentrée ou la reprise d'un alésage dont l'avant trou est excentré. Le comportement est différent selon la valeur relative de la vitesse de rotation par rapport aux fréquences propres du système **POM**. Il est également possible d'avoir une répétition de discontinuités. Si la durée du phénomène transitoire est courte, il s'agit d'une succession de discontinuités sans interférences entre elles, [10]
4. le dernier, appelé phénomène de régénération, est lié au fait qu'à chaque tour l'outil ré-usine la surface qu'il a généré au tour précédent. Des termes retardés apparaissent introduisant des non-linéarités dans les équations de la dynamique régissant le comportement du système **POM**. Dans tous les cas, le comportement dynamique de ce système dépend d'un couplage qui s'établit entre la réponse de la structure mécanique et l'interaction de l'outil avec la pièce. Les déformations de la structure du système **POM** sous l'action des forces de coupe entraînent des variations des paramètres de fonctionnement du couple outil/pièce, qui, à leur tour, modifient les efforts de coupe [17] figure II.7.

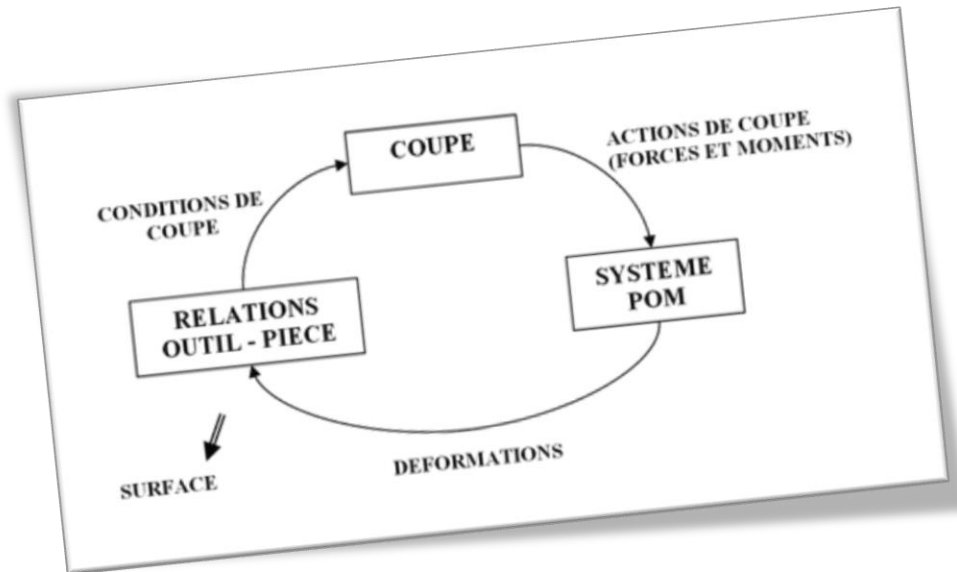


Figure II. 7: Comportement dynamique du système POM

II.4.3. Modélisation du comportement dynamique du système POM : [10]

D’après [17] il est généralement admis que le comportement dynamique du système POM peut être décrit par l’équation :

$$[M].(\ddot{\vec{q}}) + [C].(\dot{\vec{q}}) + [K].(\vec{q}) = (\overline{F(t)}). \tag{II.1}$$

Avec :

(\vec{q}) Le vecteur des degrés de liberté du système **POM** caractérisé par les matrices de masse [M], d’amortissement [C] et de rigidité [K].

Le deuxième membre dépend directement du modèle de la loi de coupe retenue. A priori, tous les termes de l’équation varient au cours du temps. Cependant, sous certaines conditions [20]. Lorsque nous isolons le système mécanique qui est constitué de l’ensemble **POM** pour modéliser le comportement dynamique du dispositif d’usinage, nous considérons les matrices de masse, d’amortissement et de raideur comme constantes. Ceci simplifie le calcul du premier membre des équations (II.1). Le caractère non linéaire du système différentiel est dû essentiellement à la nature complexe des efforts de coupe, qui implique la relation suivante :

$$(\overline{F(t)}) = (F(q(t), q(t - T), \dots, q(t), q(t - T), \dots)) \tag{II.2}$$

III.1 Introduction :

La température de coupe, générée à l'interface outil - copeau, est le facteur le plus influant sur l'usinabilité des métaux. En effet, l'élévation des températures de coupe provoque une diminution de la résistance à l'abrasion des outils et active les phénomènes de diffusion des composés du substrat vers le copeau [21].

Dans cette partie de notre travail, on s'intéresse à la mesure de la température lors d'une opération de chariotage du procédé de tournage de l'acier XC48, du fait que la connaissance de la température de coupe est très importante car elle a une grande influence dans le choix des matériaux et les conditions de coupes optimales.

Une étude mathématique sera effectuée dans le chapitre IV nous permet de modéliser la température par la méthode des plans d'expériences. Cette étude a pour but d'optimiser les paramètres de coupe et de montrer l'influence de telles conditions sur le processus de coupe et de déduire laquelle des valeurs de température permettent de se rapprocher d'une usure nulle. Des modèles numériques simulant l'usinage ont déjà été réalisés avec le logiciel d'éléments finis ANSYS intégrant la loi de Johnson-Cook.

Il y a plusieurs paramètres importants à prendre en compte pour la modélisation de l'usinage. Nous cherchons donc à simuler en élément finis la formation du copeau en trois dimensions et son détachement du bloc de matière. Nous avons ensuite affiné notre modèle en modifiant la dimension des composants pour avoir un résultat précis.

Nous utiliserons pour notre démarche de simulation, la version explicite du logiciel ANSYS.

III.2. Lois de comportement :

Le choix de la loi de comportement adaptée est primordial dans l'établissement d'un modèle numérique. Pour décrire le comportement mécanique et thermomécanique de la pièce en Acier XC48 afin de simuler la coupe orthogonale 3D, la loi de type Johnson Cook a été choisi.

III.2.1 Comportement mécanique de la pièce :

Un modèle 3D de coupe orthogonale basé sur une approche lagrangienne a été employé pour mener à bien une analyse couplée thermomécanique dans le code de calcul ANSYS.

Le modèle se compose ici d'une pièce déformable et d'un outil rigide.

III.2.2. Critère d'endommagement de Johnson-Cook :

La loi d'endommagement de Johnson et Cook est utilisée comme critère de rupture ductile. Ce critère fait apparaître les trois mêmes termes :

- La contrainte équivalente ;
- La vitesse de déformation ;
- Et les températures (Ambiante, transition et fusion du matériau).

III.3. Application du code des éléments finis ANSYS :

Le code des éléments finis ANSYS 15.0.7 est utilisé dans cette partie pour simuler le comportement du mécanisme de contact par frottement des deux corps (pièce et outil) lors d'une opération de chariotage de procédé de tournage. Ce code possède des algorithmes de gestion du contact avec frottement basés sur la méthode des multiplicateurs de Lagrange, ou bien une méthode de Lagrangien augmentée.

Pour commencer l'étude, la création du modèle sur ANSYS Workbench est une étape très importante, il faut sélectionner l'analyse explicite dynamique pour spécifier le type de résolution, cette dernière représente la modélisation de la pièce et de l'outil.

La deuxième étape consiste à définir le matériau. Les matériaux vont être sélectionnés dans la bibliothèque de logiciel en caractérisant pour chaque pièce les propriétés mécaniques et physiques.

Dans la troisième étape, on choisit le type de maillage, plus les mailles sont petites plus la précision est grande, puis on doit définir les conditions aux limites et chargement.

La dernière étape de cette analyse est l'obtention des résultats, le logiciel nous donne des solutions schématiques selon le type de résolution.

III.3.1 Mesure de la température :

Il existe de nombreuses méthodes pour mesurer la température au cours de l'usinage.

- La thermographie infrarouge.
- Les thermocouples.
- Thermométrie IR avec fibre optique et thermomètre à micro résistance.
- Etc.

Dans notre cas, nous avons intégré une caméra infrarouge au dispositif expérimental afin de mesurer la température à l'interface outil -pièce.

L'usinage des pièces s'est déroulé sur un Tour parallèle de Marque Knuth, de modèle Turnado 230/1500 et de puissance 7.5 KW. La tension du moteur est égale à 400 V. La matière de la pièce cylindrique de dimensions 30x100mm est de l'acier XC 48.

Les essais de coupe ont été conduits selon plusieurs vitesses de coupe et avances.

Pour les conditions de coupe, on a pris deux cas :

- ✚ Le 1^{er} cas : $f = 0,4mm$ et $Vc = 300m/min$
- ✚ Le 2^{ème} cas : $f = 0,2mm$ et $Vc = 120m/min$

La figure suivante présente le principe et la chaîne de mesure de la température de contact lors d'une opération de chariotage de l'acier XC48 à l'aide d'une caméra infrarouge de marque « FLIR Thermo VisionTM A40».

Les caractéristiques de la caméra sont les suivantes :

- ✓ Champ de vision / la distance de focus min 24 ° x 18 ° / 0,3 m
- ✓ La résolution spatiale (IFOV) 1,3 mrad
- ✓ Sensibilité thermique @ 50/60Hz 0,08 ° C à 30 ° C
- ✓ Type de détecteur Matrice à plan focal (FPA), micro bolomètre non refroidi
- ✓ Gamme spectrale de 7,5 à 13 μm
- ✓ Plage de température : - 40 ° à + 2000°C (3632 ° F)
- ✓ Précision (% de la lecture) ± 2 ° C ou ± 2%
- ✓ LOGICIEL : Therma-CAM Researcher Professional 2.9

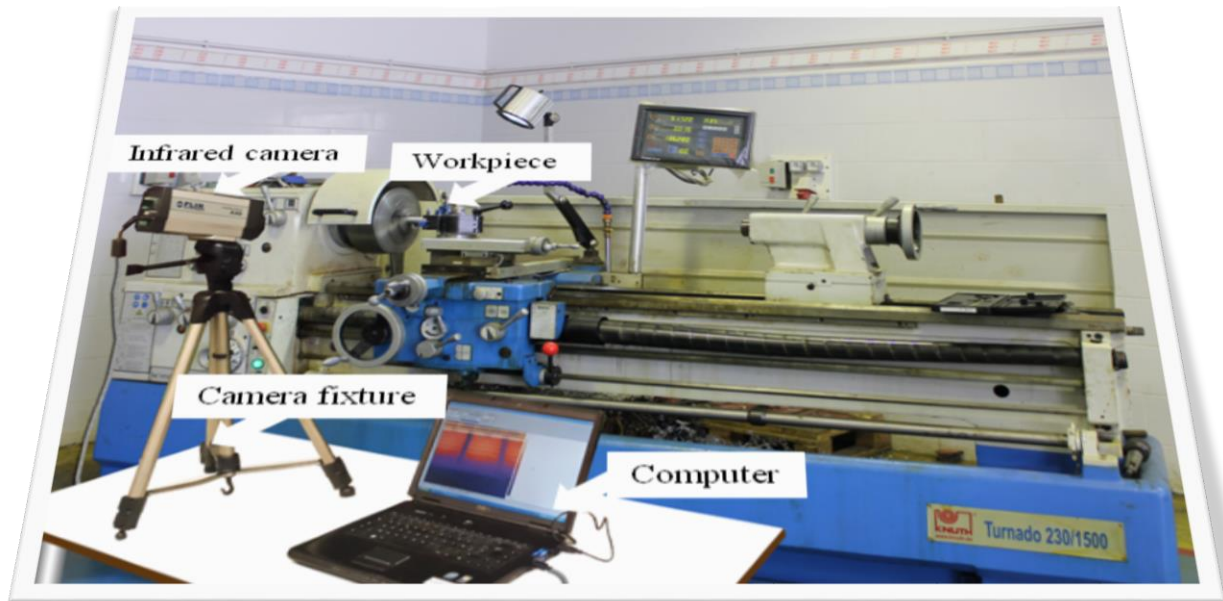


Figure III.1: Prédiction de la température de contact

Le tableau suivant représente les valeurs de la température obtenues :

Essais	Vitesse de coupe (m/min)	Avance (mm/tr)	Valeurs expérimentales de la température (°C)
1	300	0.4	820,42
2	300	0,2	751,53
3	120	0,4	703
4	120	0,2	670,67

Tableau III. 1: les valeurs de la température obtenues

Notre travail se focalisera sur les conditions de contact thermique à l'interface outil/pièce /copeau en usinage. L'objectif principal est l'étude du contact outil pièce.

On va explorer les différentes lois représentant l'interaction entre l'outil et la pièce. On a utilisé la loi de comportement de Johnson- Cook pour la modélisation de la pièce.

On va varier les paramètres de coupe qui sont l'avance et la vitesse de coupe de manière à voir la température optimale à l'interface outil/pièce/copeau.

La détermination de la température de coupe va nous permettre de connaître :

- L'évaluation de l'usinabilité qui est estimé par les forces de coupe, la température et la durée de vie de l'outil.
- L'appréciation du rôle de variation des paramètres de l'usinage sur la température de coupe pour avoir une meilleure économie d'usinage.
- Le prélèvement de la distribution de la température le long de l'outil, pièce et copeau.

La méthode par élément fini permet de diminuer le besoin d'expérimentation.

L'étude mathématique qui sera effectuée par la suite nous permet d'optimiser les conditions de coupe afin d'évaluer l'impact de ces conditions sur la température.

III.3.2 Applications :

Dans notre modèle numérique d'usinage en 3D, nous arrivons à obtenir la formation d'un copeau et à définir l'influence de la vitesse de coupe sur le profil de la température à l'interface outil-copeau, On observe convenablement le déchirement de la matière formant un copeau, les résultats sont illustrés dans les figures suivantes.

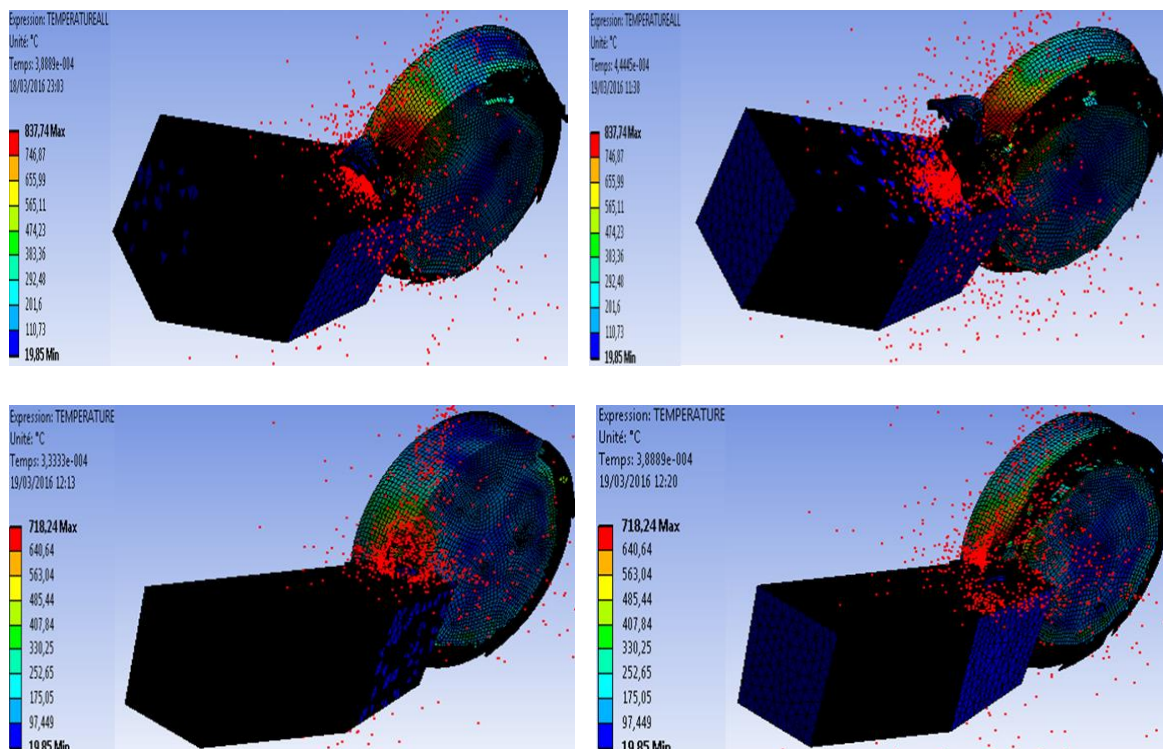


Figure III.2: Distribution de la température à l'interface outil/copeau

III.3.3 Distribution des contraintes à l'interface outil/pièce:

Les distributions du champ de la contrainte équivalente de Von Mises sont présentées dans notre simulation.

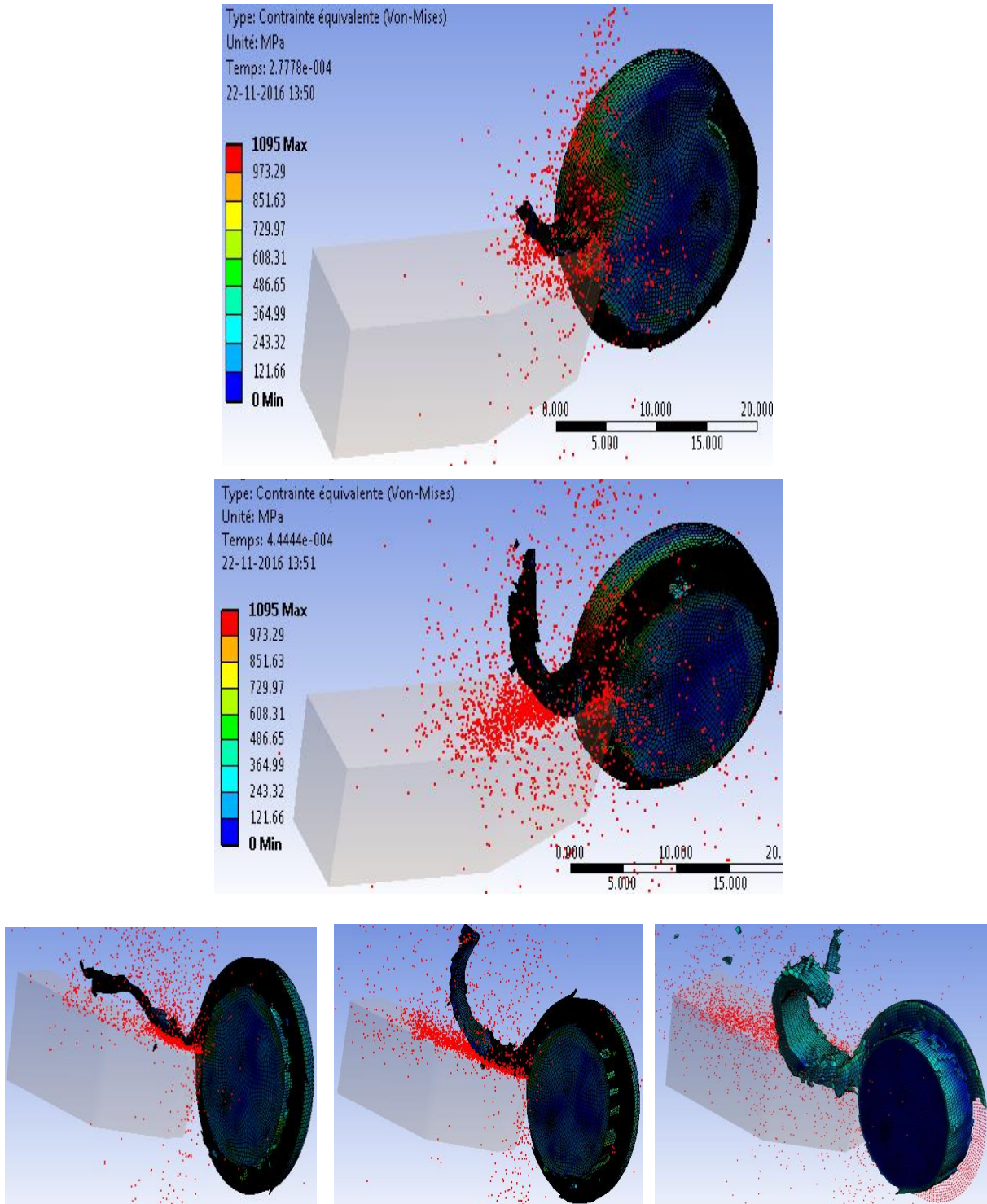


Figure III.3 : Variation des contraintes équivalentes de Von-Mises

On voit sur les figures que la température de la pièce au contact avec l'outil varie. Pour une vitesse de coupe de 300 m/min, la température atteint une valeur maximale $T_{max}=837,74^{\circ}\text{C}$ par contre $T_{max}=718,24^{\circ}\text{C}$ pour une vitesse de coupe de 120m/min (flamme rouge). Cette différence est essentiellement due à la zone de contact entre la pièce et l'outil : plus elle est importante, plus la température est élevée. Ces résultats montrent que la température dans la zone de coupe augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe

En adoptant la méthode Lagrangienne, la température est uniformément distribuée sur les surfaces et la morphologie du copeau est meilleure.

Le phénomène de conduction est représenté en rouge ; par contre les dégradations des couleurs correspondent au phénomène de convection. La partie éloignée de la surface de contact qui est complètement refroidie est colorée en bleue. Plus la conductivité thermique du matériau est faible, plus la température est élevée.

IV.1. Méthode des plans d'expérience :

Parmi les méthodes de simulations existantes, nous avons utilisé celle des plans d'expérience pour simuler nos résultats expérimentaux. [21].

Dans les différentes recherches, les essais sont obligatoires. Or ces essais sont trop souvent conduits sans méthodologie et les résultats obtenus sont le plus souvent mal exploités.

La méthode des plans d'expériences permet une meilleure organisation des essais accompagnant des résultats expérimentaux et ces essais 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. [22].

IV.1.1. Définition :

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

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

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

Les principaux avantages de cette méthode sont :

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

Cette méthode permettra une interprétation rapide et infaillible des résultats en fournissant un modèle expérimental précis du système étudié, et donnera le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. On devra suivre alors des règles

mathématiques et adopter une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur.

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

IV.1.2. Notion d'espace expérimental 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.

IV.1.2.1. 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 :

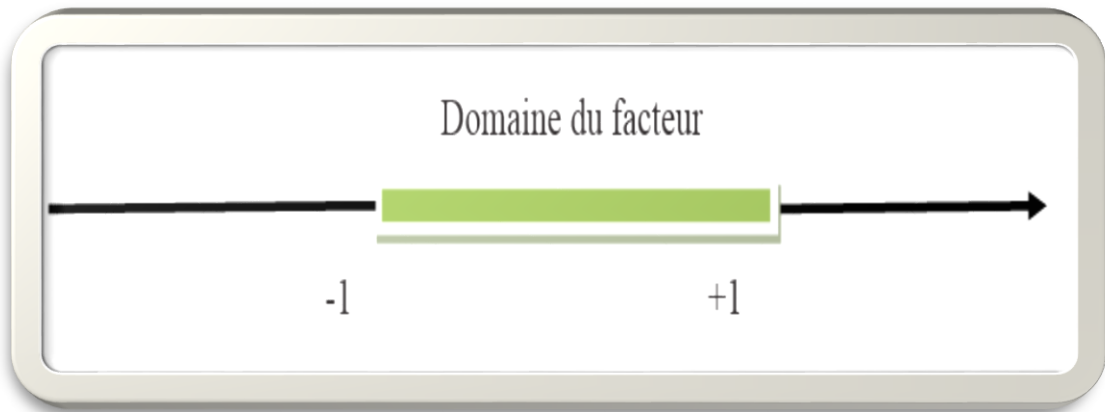


Figure IV. 1 : Domaine de variation d'un seul facteur

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 IV.2 montre le domaine de variation de deux facteurs :

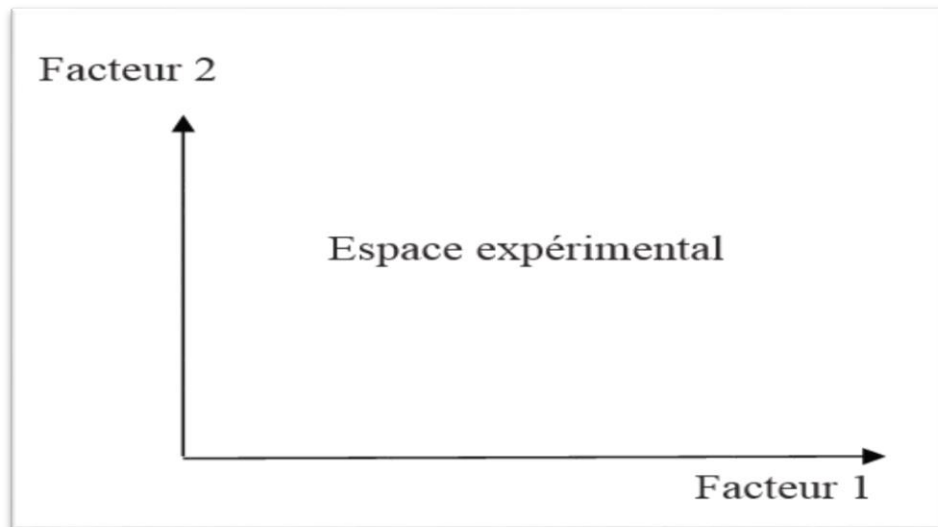


Figure IV. 2: Domaine de variation de deux facteurs

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.

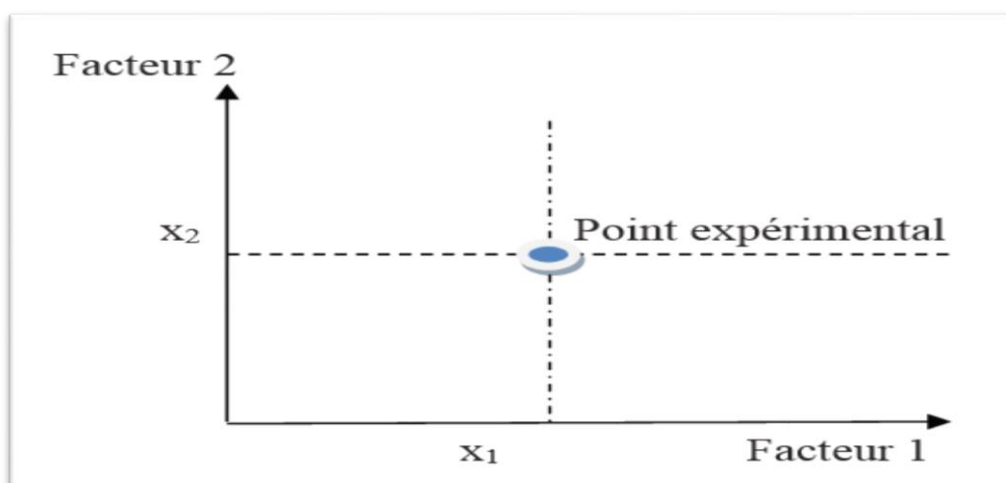


Figure IV. 3: Points expérimentaux dans l'espace expérimental

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

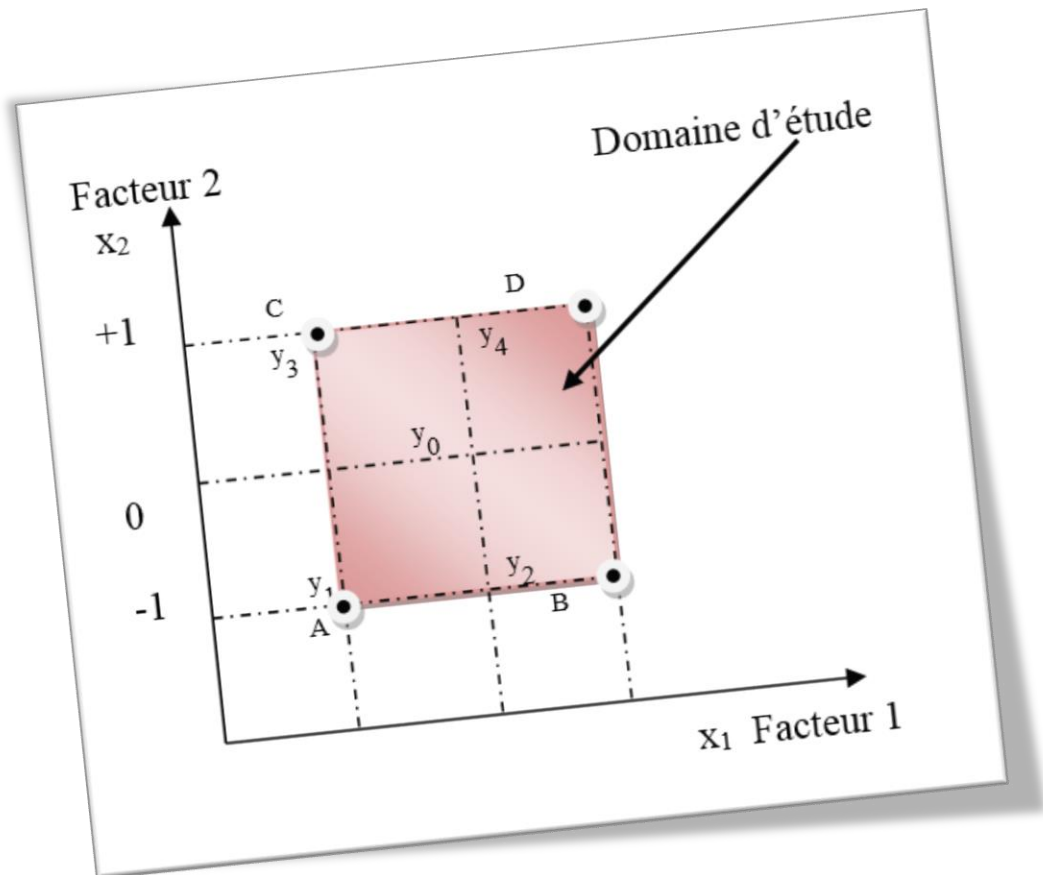


Figure IV. 4: Domaine d'étude pour le cas de 2 facteurs

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

IV.1.2.2. La réponse :

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

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

IV.1.2.3. Surface de réponse :

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

Cela définit le modèle mathématique à priori ou modèle postulé.

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

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

On attribue un axe à une réponse et cet axe est orthogonal à l'espace expérimental. A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui définissent une surface appelée la surface de réponse.

La figure IV.5 représente une surface de réponse :

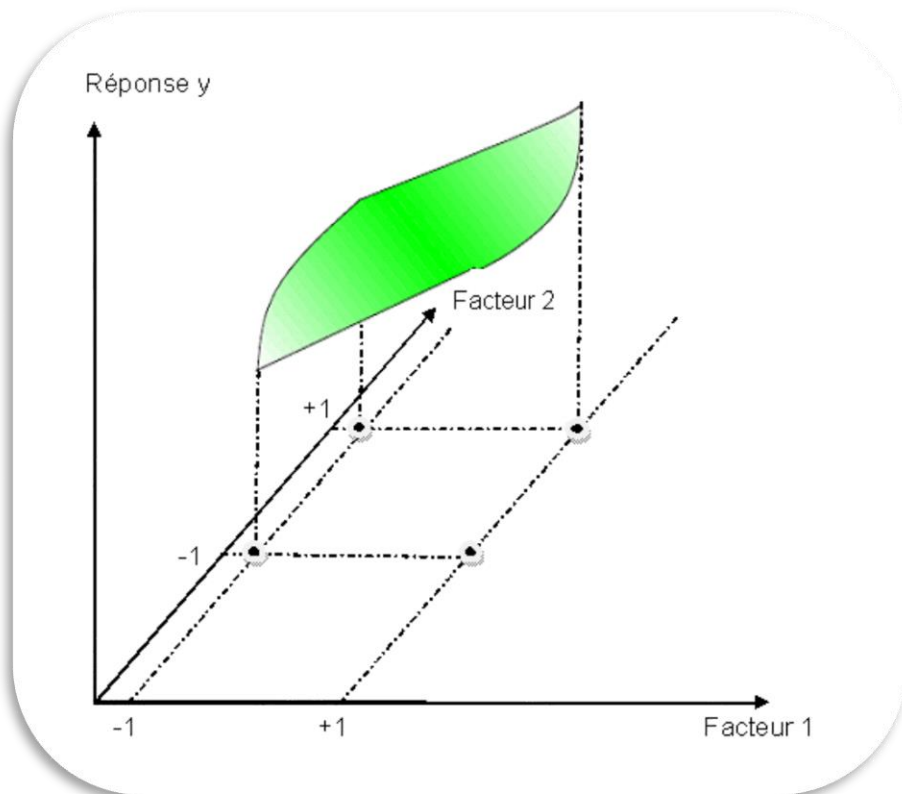


Figure IV. 5: Représentation d'une surface de réponse

IV.1.3. Notion de modélisation mathématique et application :

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

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

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

Le principe consistera à planifier nos essais en utilisant des tables ayant la propriété d'orthogonalité pour configurer les combinaisons des facteurs à tester. [23].

IV.2. Introduction à notre modèle :

Pour prévoir l'effet des conditions de coupe sur la température et modéliser la réponse étudiée, une méthode a été faite afin de réduire le nombre d'expériences et de décrire l'influence des conditions de coupe sous l'effet des facteurs : c'est la méthode des plans d'expériences.

On s'intéresse dans cette partie à l'influence des paramètres de coupe sur la température du matériau XC48. Dans ce cadre, il est judicieux d'appliquer une modélisation du comportement par la méthode des plans d'expériences.

Cette technique va nous permettre de répondre à nos exigences, et de voir essentiellement la réaction du matériau XC48 au cours des essais.

Le modèle qui sera obtenu par la suite va nous faciliter la prévision de la température en n'importe quel point du domaine expérimentale.

Dans notre cas, nous avons tenu compte de deux paramètres de coupe (deux facteurs) les plus influents qui sont, la vitesse de coupe avec deux niveaux (deux valeurs expérimentales) ainsi que l'avance pour connaître l'effet de chaque facteur sur la température ainsi que leur combinaison afin de déduire laquelle des valeurs de ces facteurs permet de s'approcher d'une usure nulle.

On n'a pas pris en considération la profondeur de passe du fait qu'elle n'a aucun effet significatif sur la mesure de la température de coupe.

Le but de cette méthode est de voir la variation de la température en fonction de deux paramètres de régime de coupe (V_c, f). Ces derniers représentent les paramètres d'entrée selon la figure IV.6. Au moyen d'un modèle mathématique qui sera établi, la réponse du système en l'occurrence la température est représentée par "T".

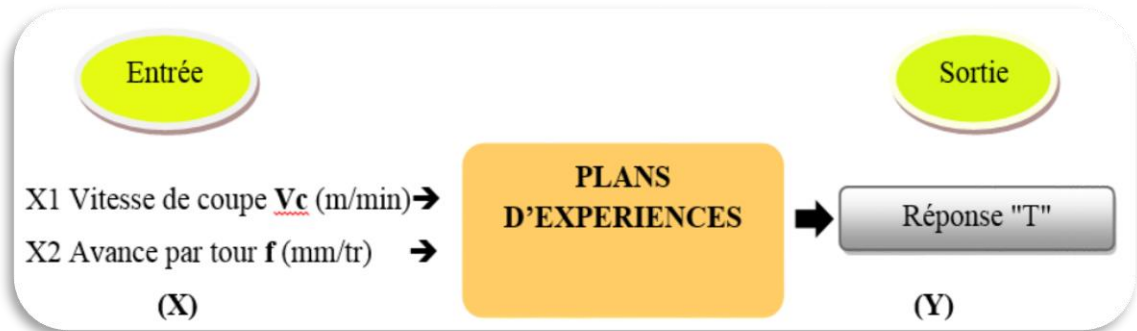


Figure IV. 6: Modèle de fonctionnement des paramètres de l'essai

La température à l'interface outil/pièce/copeau peut être exprimée en termes de paramètres de coupe, à savoir la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe, sous sa forme générale :

$$Y = \text{fonction}(V_c, a_p, f)$$

Dans notre cas: a_p n'est pas pris en considération du fait qu'il n'a aucun effet significatif.

L'optimisation de la température a été effectuée à l'aide de logiciels de plans d'expériences, ce dernier a été créé en 2004 par l'éditeur El-Mossaoui Hichem **Docteur en mathématiques** à l'université Saad Dahlab de Blida

Le logiciel Hide génère trois types de versions :

- ✚ **Hide 1** pour les variables centrées réduites,
- ✚ **Hide 2** concerne les variables réelles,
- ✚ **Hide 3** s'applique aux plans non conventionnels.

Dans notre cas on s'intéresse à la première version Hide 1.

Ce programme permet d'effectuer les tâches suivantes :

- ✓ Calcul des effets et des interactions entre les facteurs (donc le modèle mathématique),

- ✓ Analyse statistique et coefficients du modèle,
- ✓ Les iso-réponses et les surfaces de réponses,
- ✓ Courbes de niveau de la fonction d'erreur de prédiction.....etc.

En tenant compte des objectifs à atteindre, il est impératif d'établir la liste des réponses expérimentales à étudier et ensuite de faire une proposition d'un modèle mathématique. Pour cela, on doit d'abord obtenir des réponses réelles par un test expérimental réalisé dans les laboratoires spécialisés.

La matrice des essais est présentée dans le tableau suivant :

N° essai	Facteur 1 Vc (m/min)	Facteur 2 f (mm/tr)	Réponse Température (°C)
1	-1	-1	670.67
2	1	-1	751.53
3	-1	1	703
4	1	1	820.42
Niveau -1	120	0.2	
Niveau +1	300	0.4	

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

Ce tableau comprend quatre colonnes, la première identifie les essais, la seconde ainsi que la troisième nous indique les valeurs des deux effets aux différents tests et enfin la quatrième nous montre les résultats obtenus appelés aussi réponses. L'essai n°1 est celui pour lequel les deux facteurs étudiés sont aux niveaux bas, 120m/min (ou - 1 en unités codées), 0.2mm/tr (ou - 1 en en unités codées). La ligne 4 comporte les valeurs des deux facteurs avec les niveaux hauts, 300m/min (+1 en unités codées), 0.4mm/tr (+1 en unités codées). Les lignes intermédiaires 2 et 3 représentent les combinaisons de valeurs des deux effets. Ce tableau est intitulé tableau d'expérimentations dans le cas d'utilisation des unités physiques habituelles, par contre s'il emploie les unités codées comme le montre le Tableau IV.1. Ce tableau est appelé un plan d'expériences. Ce type de représentations est adéquat lorsque les effets ne possèdent pas les mêmes unités et les mêmes échelles.

IV.2.1. Effet des paramètres de coupe sur la température :

La figure IV.7. montre l'interaction et l'effet des paramètres de coupe sur la température : on remarque que la valeur de la température augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe et l'avance.

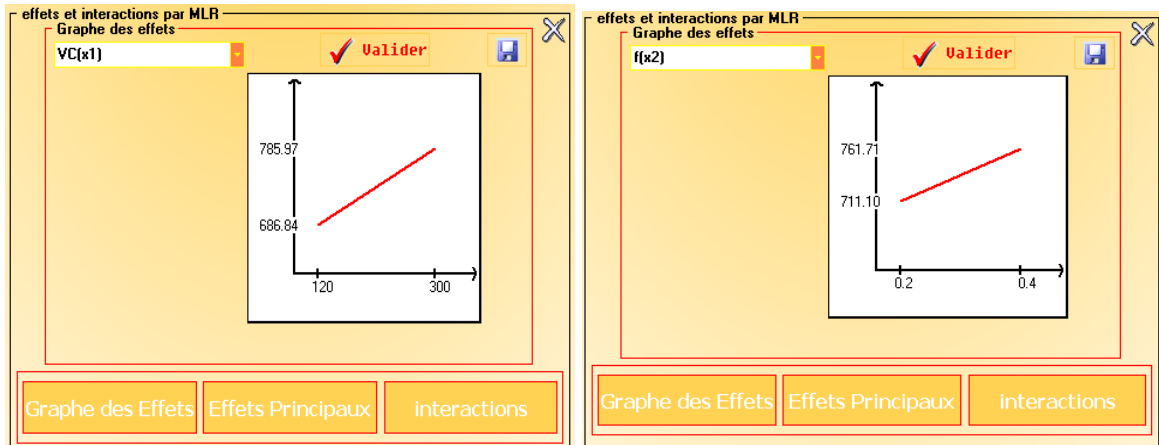


Figure IV. 7: l'effet et interaction de la vitesse de coupe et de l'avance sur la température

IV.2.2. Modélisation mathématique :

Après avoir estimé les coefficients du modèle, On peut maintenant établir le modèle mathématique : c'est un polynôme du premier degré, qui relie la réponse aux facteurs. Le modèle développé peut être utilisé efficacement pour prédire la température de coupe lors de l'opération de chariotage, il prend la forme suivante :

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 \tag{IV.2}$$

Avec :

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

a_1 = l'effet de la vitesse de coupe,

a_2 = l'effet de l'avance,

a_{12} = l'interaction entre a_1 et a_2 ,

Une fois les coefficients calculés on établit le modèle mathématique suivant :

$$T = 736.4050 + 49.54x_1 + 25.3050x_2 + 9.14x_1 * x_2 \tag{IV.3}$$

Ce modèle mathématique représente convenablement le phénomène étudié dans le domaine expérimental. L'intérêt de modéliser la réponse est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences.

A partir de ce modèle, on peut obtenir des courbes de réponses et d'iso-réponses illustrant la variation de la température de coupe en fonction des paramètres des régimes de coupe (V_c , f).

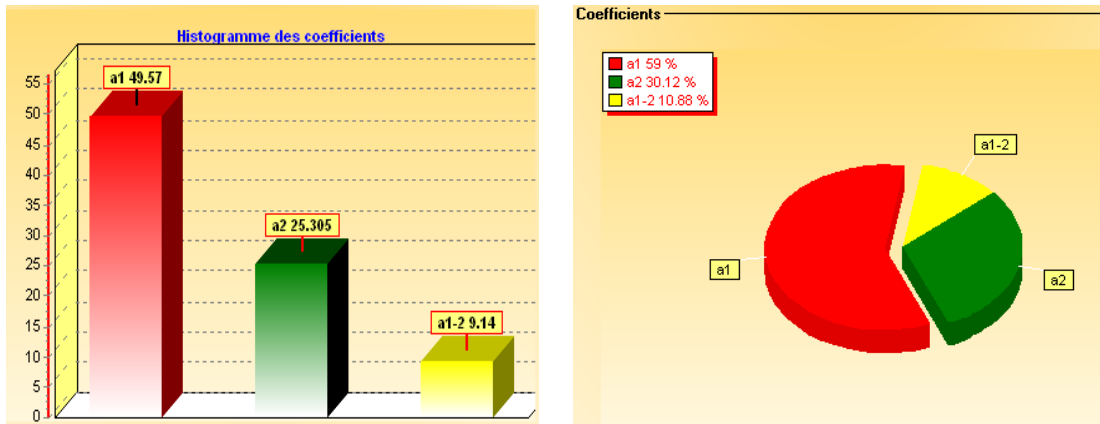


Figure IV. 8: Influences des coefficients du modèle mathématique sous forme d'histogramme et sectorielle

IV.2.3. Les courbes d'iso-réponses :

Les iso-réponses montrent clairement que quel que soit l'avance enregistrée, l'augmentation de la vitesse de coupe fait augmenter la température. A titre d'exemple Figure IV.9 Pour une avance de 0.3 mm/tr, on a varié la vitesse de coupe de 163,20m/min à 263.10 m/min.

La figure ci-dessus illustre le résultat de notre modèle mathématique, à partir de ces résultats obtenus, on peut constater que la vitesse de coupe est le facteur le plus influant sur l'augmentation de la température.

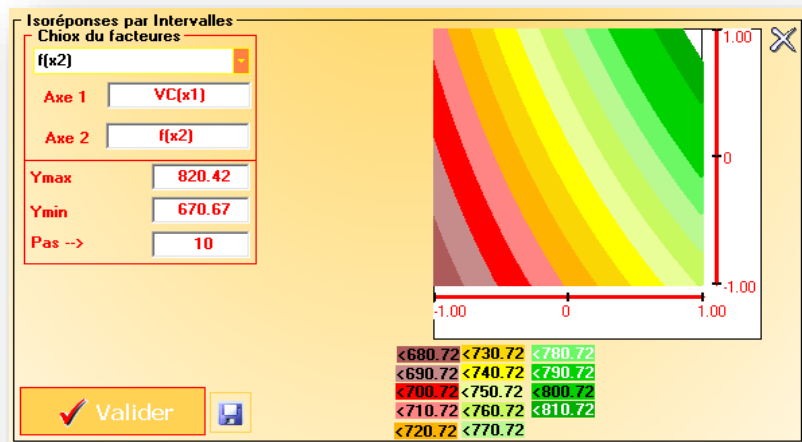


Figure IV. 9: courbes d'iso-réponses par intervalles

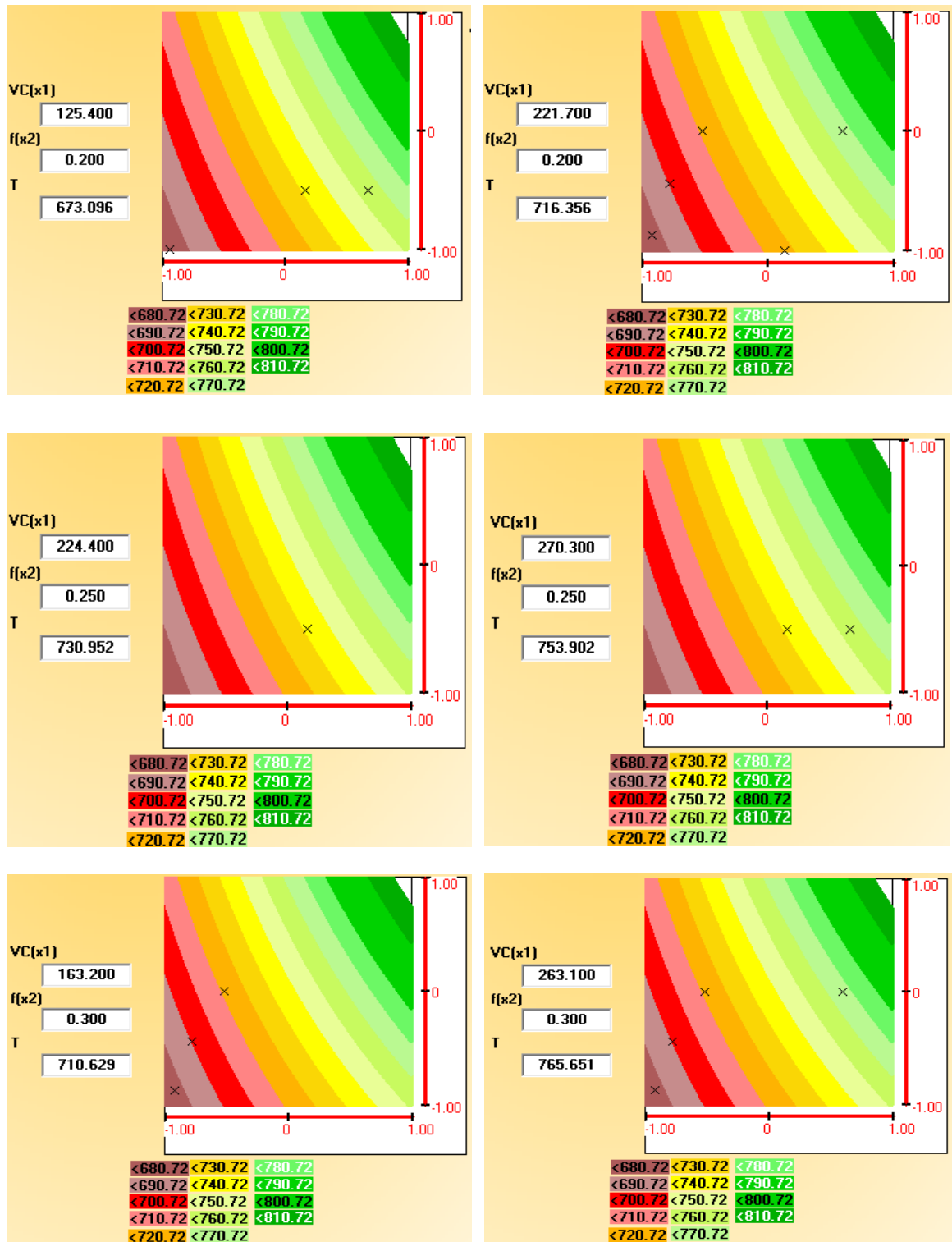


Figure IV. 10: courbes d'iso-réponses exprimant la variation de la température en fonction des paramètres de coupe

IV.2.4. Surface de réponse de la variation de la réponse :

L'équation du modèle mathématique nous permet de visualiser la variation de la réponse sous forme de surface dans l'espace tracée dans un repère à trois axes. Il est possible aussi de projeter cette surface sur un plan afin d'obtenir des courbes qu'on appelle les iso-réponses, cela nous donne une autre vision d'analyse sous un autre angle qui permet de compléter les surfaces de réponse.

La figure illustre la variation de la température en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance. Elle permet de voir le comportement des deux facteurs utilisés sur la réponse qui est la température.

Cette représentation est obtenue par le logiciel Matlab.

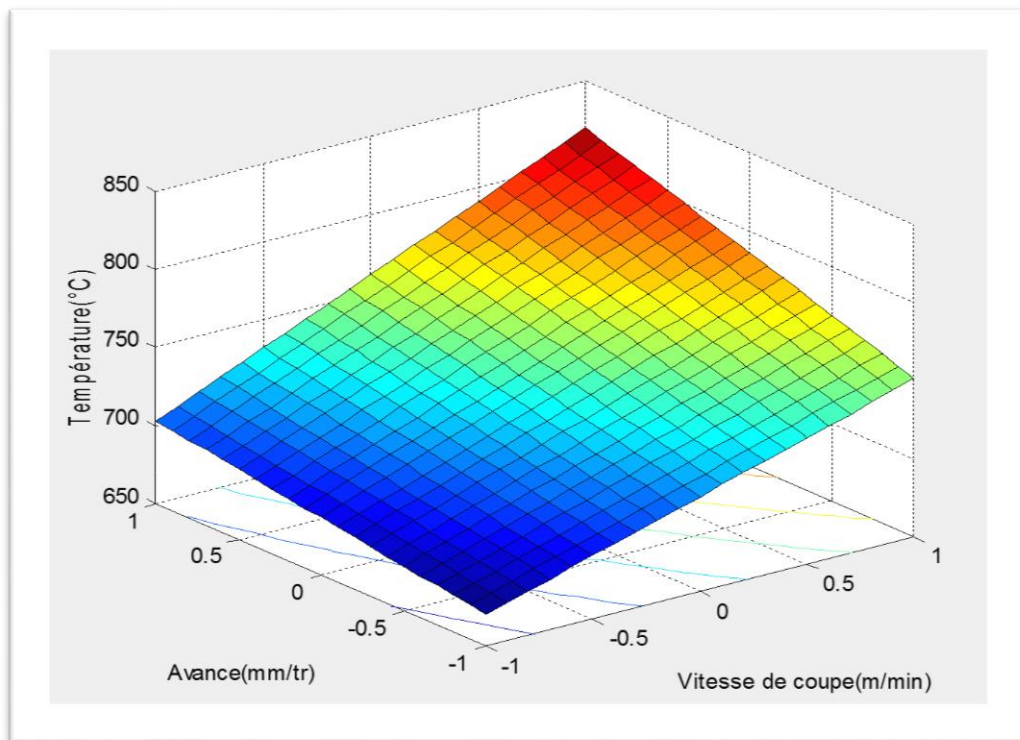


Figure IV. 11: Courbe de réponse exprimant la variation de la température en fonction des paramètres de coupe

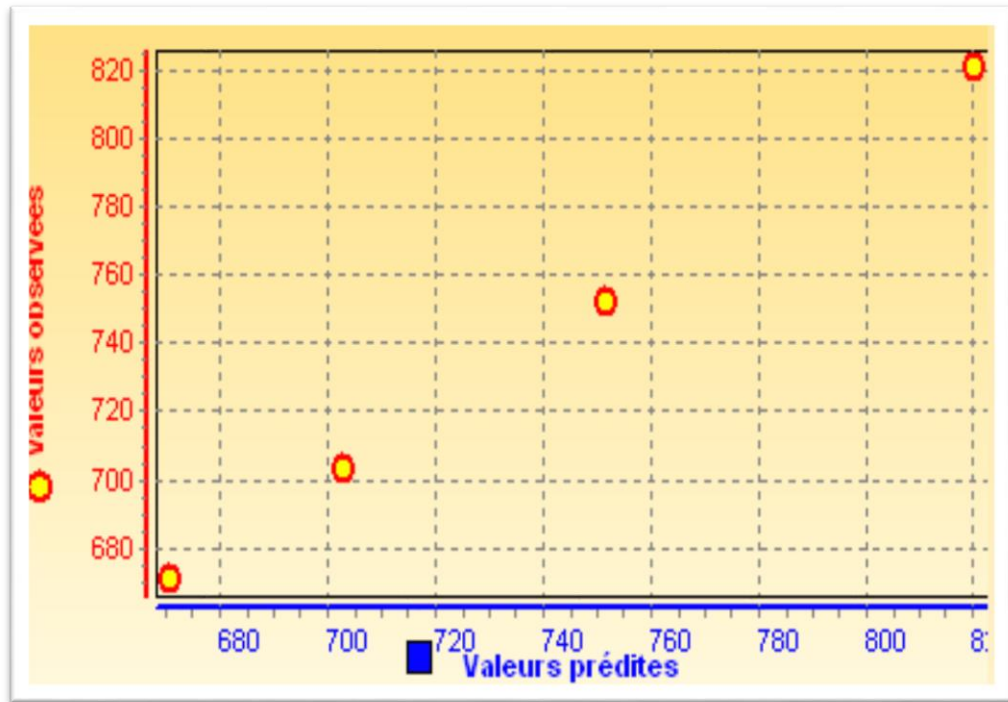


Figure IV. 12: Graphe des réponses observées en fonction des réponses prédites

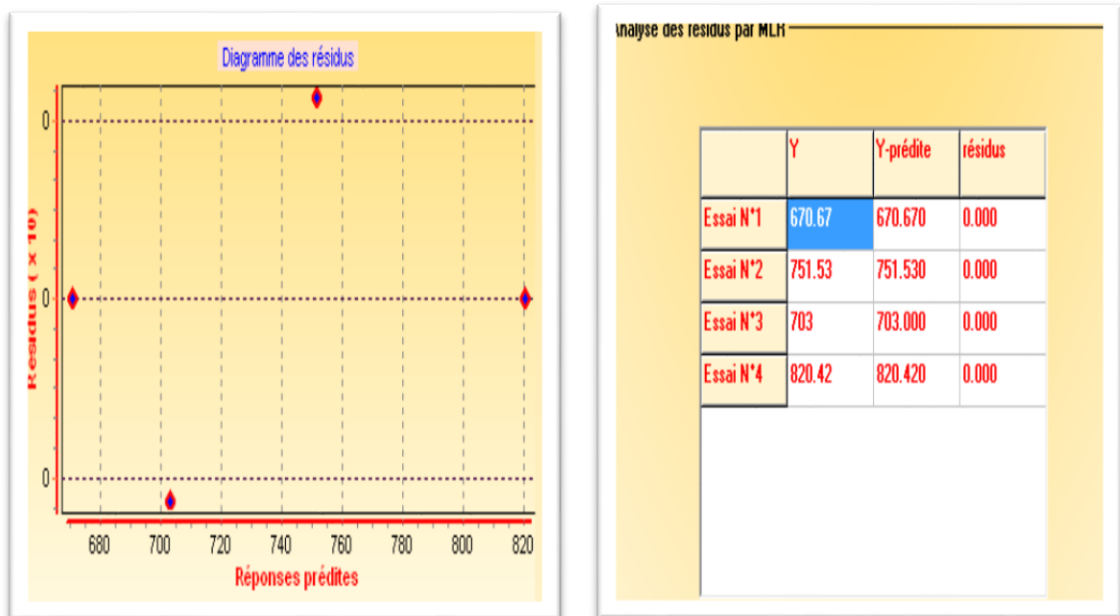


Figure IV. 13: Diagramme des résidus

Conclusion générale

Conclusion générale :

Nous avons présenté dans cette partie l'application de la méthode des plans d'expériences dans le but d'optimiser les conditions de coupe en usinage de l'acier XC48.

Après avoir estimé les coefficients, le modèle mathématique pourra prédire d'une façon fiable la température moyenne à l'interface outil/pièce/copeau lors d'une opération de chariotage développé sur la base d'observations expérimentales.

L'expression analytique ainsi élaborée reliant chaque réponse étudiée aux facteurs et interactions influents a été établie pour mettre en évidence les corrélations qui les lient avec les différentes représentations graphiques.

A travers des résultats obtenus on a pu constater que :

- ✓ L'augmentation de la vitesse de coupe fait augmenter la température.
- ✓ L'interaction des deux paramètres c'est-à-dire l'augmentation de la vitesse de coupe et de l'avance résulte une augmentation de la réponse qui est la température
- ✓ La vitesse de coupe est le facteur le plus influant sur la réponse

La détermination de la température de coupe nous a permis :

- L'évaluation de l'usinabilité qui est estimé par les forces de coupe, la température et la durée de vie de l'outil.
- L'appréciation du rôle de variation des paramètres de l'usinage sur la température de coupe pour avoir une meilleure économie d'usinage.
- Le prélèvement de la distribution de la température le long de l'outil, pièce et copeau.

Références

Références

- [1] Debbache Abdellatif, Optimisation Multi-Passe des Régimes de Coupe En Chariotage, Mémoire de Master, p (02-10), 2011
- [2] Alexandre Toumine, Cours d'usinage, Groupe Conception Production, INSA de Lyon, France.
- [3] J. L. Fanchon« Guide des Sciences et Technologie Industrielle » Edition Nathan Paris France, 1994
- [4] Rocardier, Cours sur le Tournage - Usinage Cours Technologie, 2011
- [5] Sebhi, Amar, Etude tribologique des outils de coupe et aciers, THESE, page22, 2013
- [6] Philippe, Depeyre, fabrication mécanique La coupe des métaux, Livre, Licence et Technologie et Mécanique – Université de la Réunion, p 20-22, v 2004/2005
- [7] CROLET, Arnaud, Thèse de doctorat, contribution à l'étude de l'influence du comportement vibratoire du système POM sur la qualité de surface obtenue en tournage de super finition, p37, 2008.
- [8]. TLUSTY, J. and M. POLACEK. The stability of the machine tools against selfexcited vibration in machining. In Proceedings of the international research in production engineering conference, 1963. 1963. Pittsburgh.
- [9]. PRUVOST, F., Les broches, Etude dynamique, in Conception et Calcul des Machines Outils, P.P.U. Romandes, Editor. 1995. p. 115-170.
- [10] Claudiu-Florinel Bisu, THÈSE de doctora, N° d'ordre : 3375 ,Etude des vibrations auto-entretenues en coupe tridimensionnelle : nouvelle modélisation appliquée au tournage, p40, 2007
- [11] [Ispas et al, 1999] ISPAS C., GHEORGHIU H., PAROUSANU I., ANGHEL V. Vibrations des systèmes Technologiques. Editure Agir, Série : Ingénierie Mécanique, Bucurest, 1999
- [12] [Amsted et al, 1987] AMSTED B. H., P.F. O. , BEGEMAN M. L. Manufacturing Process. John Wiley and Sons, New York, 8ème édition, 1987.
- [13] [Town, 1971] TOWN H. C. The design and construction of machine tools. Iliffe Books, London, 1971.

Références

- [14] [Ryder et al, 1975] RYDER G. H. , BENNET M. D. Mechanics of machines. Macmillan, London, 1975
- [15] [Ispas et al, 1998] ISPAS C., PREDINCEA N., ZAPCIU M., MOHORA C. , BOBOC D. Machines-outils- Essais et Réception (titre original : Maşini Unelte-Încercare si RecepŃie). Editura Tehnica, Bucarest, 1998
- [16]. PEIGNE, G., Etude et simulation des effets dynamiques de la coupe sur la stabilité et la qualité géométrique de la surface usinée: application au fraisage de profil, in Mécanique - Energetique, INPG: Grenoble. p. 161, 2003.
- [17] [Benmohammed, 1996] BENMOHAMMED B. Identification des lois d'effort de coupe de tounage en régime dynamique. Thèse de Doctorat de Mécanique, L'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers -France, N° d'ordre : , 1996
- [18] [Mehdi et al, 2002a] MEHDI K., RIGAL J.-F. , PLAY D. Dynamic behavior of thin wall cylindrical workpiece during the turning process PART I: Cutting process simulation. Trans of ASME, J. of Manufact. Sc. and Engng, Vol. 124, 2002a, pp. 562-568.
- [19] [Mehdi et al, 2002b] MEHDI K., RIGAL J.-F. , PLAY D. Dynamic behavior of thin wall cylindrical workpiece during the turning process PART II: Experimental approach and validation. Trans of ASME, J. of Manufact. Sc. and Engng, Vol. 124, 2002b, pp. 569-580.
- [20] [Dekelbab, 1995] DEKELBAB K. Modélisation et simulation du comportement dynamique de l'ensemble pièce outilmachine en usinage à l'outil coupant. Thèse de Doctorat, ENSAM-Paris - France, N° d'ordre : , 1995.
- [21] Elmoossaoui H. Design of experiments software (Hide). Magister Thesis. Saad Dahlab University of Blida, Algeria, 2004,
- [22] Charles, J. P., Hannane, F., El-Mossaoui, H., Zegaoui, A., Nguyen, T. V., Petit, P., & Aillerie, M. (2014). Faulty PV panel identification using the Design of Experiments (DoE) method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 57, 31-38,
- [23] Charles, J. P., Aillerie, M., Petit, P., Hannane, F., & El Mossaoui, H. (2015). Warning of accidental shadowing of a PV generator in operation analyzed with the DoE method. *Solar Energy*, 122, 455-463.