



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

Laboratoire des structures

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Fabrication Mécanique et Productique

Développement et modélisation de l'usure des outils de coupe
par la méthode des surfaces de réponses : application au
tournage

Proposé et encadré par :
Dr.MelziNesrineRezaliSoumia
Pr.Temmar Mustapha

Réalisé par :
Behloul Amel

Année universitaire 2018/2019

Dédicace

JE dédie ce modeste travail à :

Mon très cher père et ma très chère Mère qui sont sans cesse à mes

Cotés ;

Mes très chers frères et mes très chères sœurs qui m'ont toujours

Soutenu ;

« Meriem et Ranim »

Toute ma famille ;

Tous mes amis et mes collègues.

SOUMIA

Dédicace

À mes très chers parents ;

*Aucun acte ou expression ne pourra exprimer mes sentiments
envers vous et mes frères Mohamed et Kamel et Yacine aucun
mot ne pourra exprimer ma gratitude envers vous mes très*

chers frères

Pour tout l'amour et le soutien que vous m'avez offert, je vous

dis

MERCI

*À toute ma famille ; à ma binôme Rezali Soumiaque je remercie
pour ses efforts.*

À tous mes chers amis.

Amel

Remerciements

Nous remercions Dieu tout puissant qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Par tradition, et à travers cette page de remerciements, nous remercions Pr TEMMAR MUSTAPHA et Dr MELZI NESRINE pour avoir accepté de diriger ce mémoire, et dont l'aide précieuse nous a été indispensable sur le plan scientifique et humain.

Nos remerciements s'adressent à tout le personnel de l'atelier d'usinage du Département de Mécanique de l'Université KASDI MERBAH de Ouargla.

Nous voudrions remercier le chef département de l'université KASDI MERBAH OUARGLA et l'étudiant ABDELALI MESBAH pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Nos très cordiaux remerciements s'adressent aux membres du jury et aussi à tous nos enseignants pour tous les efforts conjugués tout au long de notre formation.

Aussi, nous tenons à saluer toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la concrétisation de ce travail.

Liste desFigure

Chapitre 1 :

Figure.I.1 : les axes de déplacements d'une fraiseuse.....	3
Figure.I.2 : Mouvements de coupe et d'avance en tournage.....	3
Figure .I.3: Principe de tournage.....	4
Figure. I.4: surfaces de la pièce.....	5
Figure. I.5: Composantes d'un tour	5
Figure. I .6 : Montage en l'air.....	7
Figure. I.7 : Montage mixte.....	7
Figure. I.8 : Montage entre-pointe.....	8
Figure. I .9: Chariotage	8
Figure. I.10: Alésage.....	8
Figure. I.11: Dressage	9
Figure I.12: Perçage	9
Figure. I.13: GORGEAGE.....	9
Figure. I.14: CHANFREINAGE	10
Figure. I.15: Tronçonnage	10
Figure. I.16: Filetage.....	10
Figure. I.17 : Les choix des paramètres de coupe	11
Figure. I.18 : Vitesse de coupe V_c	11
Figure. I.19 Vitesse d'avance	12
Figure. I.20: Les profondeurs de passe.....	13
Figure. I.21 : Configuration de coupe	13
Figure. I.22 : Arêtes et parties actives d'un outil de tournage	14
Figure. I.23 : Mouvement relatif outil/ pièce en tournage	15
Figure. I.24 : Exemples de différentes plaquettes de tournage disponible	15
Figure. I.25 : Domaines d'emploi des divers matériaux à outil coupant	16
Chapitre 2 :	
Figure II.1 : Les zones des cisaillements.....	18
Figure II.2 : Critère d'usure VB	20
Figure II.3 : Partie active de l'outil.....	20
Figure II.4 : Evaluation du mécanisme d'usure en fonction de la température de coupe.....	22
Figure II.5 Formes d'usure classique d'une plaquette d'usinage.....	23

Figure II.6: Caractérisation des formes d'usure des outils.....	24
Chapitre 3 :	
Figure III.1: Machine de tour.....	28
Figure III.2 : Eprouvette brute.....	29
Figure III.3 : Eprouvette servant aux essais.....	29
Figure III.4 : Outil à pastille utilisé.....	31
Figure III.5 : Pastilles utilisées.....	31
Figure III.6 : Microscope optique pour la mesure d'usure.....	32
Figure III.7 : Microscope utilisé	32
Chapitre 4 :	
Figure IV.1 :L'environnement du système.....	35
Figure IV.2 : mise en œuvre des plans d'expériences.....	35
Figure IV.3: Le domaine du facteur.....	36
FigureIV.4: L'espace expérimental.....	36
Figure IV.5: Les points expérimentaux.....	37
Figure IV.6 : Le domaine d'étude.....	37
Figure IV.7 : la surface de réponses.....	38
Figure IV.8 : modèle de fonctionnement des paramètres de l'essai.....	40
Figure IV.9 : Domaine d'étude des différents paramètres de coupe.....	43
Figure IV.10 : effet et interaction des conditions de coupe sur l'usure.....	45
Figure IV.11 : courbes d'iso-réponses exprimant la variation de l'usure en fonction des paramètres de coupe.....	46
Figure IV.12 : courbe de réponse exprimant la variation d'usure en fonction des paramètres de coupe.....	48
Figure IV.13: Organigramme utilisé.....	49
Figure IV.14 : courbe de réponse exprimant la variation d'usure en fonction des paramètres de coupe.....	50
Figure IV.15 : Courbes d'iso-réponses exprimant la variation de l'usure en fonction des paramètres de coupe	51

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralité sur l'usinage	
I.1 Introduction	2
I.2 Procédé de fraisage	2
I.3 Procédé de tournage	3
I.3.1 Surfaces de la pièce.....	4
I.4 Les tours.....	5
I.4.1 Classification des machines de tournage.....	6
I.4.2 Régimes de coupe.....	7
I.5 Support et entraînement des pièces sur un tour.....	7
I.5.1 Montage en l'air.....	7
I.5.2 Montage mixte	7
I.5.3 Montage entre-pointes	8
I.6 Opérations de tournage	8
I.6.1 Chariotage.....	8
I.6.2 Alésage	8
I.6.3 Dressage	9
I.6.4 Contournage	9
I.6.5 Gorgeage	9
I.6.6 Chanfreinage	10
I.6.7 Tronçonnage	10
I.6.8 Filetage	10
I.7 Conditions de coupe	11
I.7.1 Vitesse de coupe V_c	11
I.7.2 Vitesse d'avance V_f et avance par tour f	12
I.7.3 Profondeur de passe « a »	12
I.8 Paramètres géométriques de coupe	13
I.8.1 Éléments d'outil	13
I.8.2 Faces et arêtes de l'outil	14
I.9 Outil de coupe à plaquette rapportée	15
I.10 Matériaux de l'outil	16

Chapitre II : mécanisme de l'usure

II.1 Introduction.....	17
II.2 Paramètres classiques associés à la coupe	17
II.2.1 Vitesse de coupe	17
II.2.2 Avance.....	17
II.2.3 Profondeur de passe	17
II.2.4 Matériau usiné.....	17
II.2.5 Lubrification	18
II.3 Formation du copeau	18
II.4 Durée de vie d'un outil de coupe.....	19
II.5 L'usure des outils de coupe.....	20
II.5.1 Usure par effets mécaniques	21
II.5.2 Usure par effets physico-chimiques.....	21
II.5.3 Manifestations de l'usure.....	22
II.5.4 Critères d'usure.....	25
II.6 Détermination des lois expérimentales d'usure.....	25
II.6.1 Conditions opératoires	25
II.6.2 Mesure de l'usure.....	26
II.7 Les méthodes optiques sont nombreuses	26
II.7.1 Méthodes mécaniques	26
II.7.2 Méthodes radioactives.....	27
II.7.3 Méthodes analytiques.....	27
II.7.4 Méthodes diverses.....	27

Chapitre III : étude expérimentale

III.1 Introduction.....	28
III.2 Equipements utilisés.....	28
III.2.1 Tour utilisé.....	28
III.2.2 Matière usinée.....	29
III.2.3 Description de porte plaquette	30
III.2.4 Description des plaquettes.....	31
III.2.5 Le microscope pour mesure de l'usure.....	31
III.3 conclusion.....	32

Chapitre VI : Application de la méthode des plans d'expériences

IV.1 Introduction	34
IV.2 Principaux Avantages Des Plans D'expériences.....	35
IV.3 Notion d'espace expérimental.....	36
IV.4 Notion de surface de réponse.....	38
IV.5 Modélisation mathématique de la réponse.....	39
IV.6 Application de la méthode des plans d'expériences.....	39
IV.6.1 Présentation du problème	39
IV.6.2 Proposition d'un modèle.....	40
IV.7 Obtention et mesure des réponses.....	41
IV.8 Modélisation mathématique	41
IV.9 Domaine d'étude.....	42
IV.10 Effet des paramètres de coupe sur l'usure.....	44
IV.11 Les courbes d'iso réponse.....	45
IV.12 surface de réponse de la variation de la réponse.....	46
IV.13 Verification Des Resultats.....	48
IV.14 Conclusion.....	52
Conclusion générale.....	53
Bibliographie.....	54
Annexe.....	56

Liste des tableaux :

Tableau III.1: Caractéristique mécanique du XC48.....30

Tableau IV.1 : Résultats de l'usure en dépouille (VB) en fonction des paramètres de coupe.....41

Introduction générale

L'usinage par enlèvement de matière occupe un espace présumé dans la fabrication, c'est la méthode qui permet de produire des formes complexes et très précises sans changement des caractéristiques de la matière usinée.

Le tournage est l'un des procédés d'usinage les plus utilisés dans l'industrie mécanique. Ainsi, le choix des paramètres de coupe optimaux (vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe) est très important afin d'assurer un meilleur état de surface des pièces usinées et la durée de vie des outils de coupe, qui ont une grande relation avec l'usure de l'interface outil-pièce. Le résultat d'un bon choix de conditions de coupe peut être constaté par une diminution de cette usure[1].

Dans ce travail, nous proposons une méthode d'optimisation permettant de déterminer un modèle mathématique de l'usure en dépouille en appliquant le plan d'expériences. Ce modèle met en évidence la relation entre les éléments du régime de coupe (la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passes) et les réponses étudiées (Usure en dépouille). Notre travail se divise en quatre chapitres :

Le premier chapitre porte sur une recherche bibliographique sur les procédés d'usinage et les différents phénomènes liés aux procédés de tournage.

Le deuxième chapitre s'intéresse aux différents types de l'usure des outils de coupe, une brève introduction sur les généralités de la coupe des métaux est faite.

Le troisième chapitre concerne les équipements utilisés (Machine-outil, Matière usinée, porte plaquette, plaquettes et un microscope pour la mesure de l'usure).

Dans le chapitre quatre, ayant pris connaissance des différents phénomènes liés au procédé de tournage, nous allons utiliser la méthode des plans d'expériences afin d'étudier l'impact des conditions de coupe sur l'usure.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale

I.1 Introduction :

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

L'usinage concerne en premier lieu les matériaux métalliques et la plupart des objets métalliques d'utilisation courante qui ont subi déjà une ou plusieurs opérations de mise en forme. La mise en forme par usinage concerne également, mais de manière moins conséquente en général, toutes les autres classes de matériaux (céramiques, polymères, bois et matériaux dérivés, matériaux composites, verres, semi-conducteurs, etc..), selon des modalités spécifiques, dépendant des caractéristiques du procédé et du matériau.

Il existe deux manières pour générer la surface recherchée : Soit par le travail de forme, soit par le travail d'enveloppe. Dans le cas du travail de forme, c'est la forme de l'outil qui conditionne la surface finalement obtenue. Dans le cas du travail d'enveloppe, c'est la trace de l'arête de l'outil qui travaille (le point générateur) qui donne la surface finale [2].

I.2 Procédé de fraisage :

Le fraisage est un procédé de fabrication où l'enlèvement de matière sous forme de copeaux résulte de la combinaison de deux mouvements : la rotation de l'outil de coupe, d'une part, et l'avancée de la pièce à usiner d'autre part.

Le fraisage est habituellement réalisé par une machine-outil, la fraiseuse qui est particulièrement adaptée à l'usinage de pièces prismatiques et permet également, si la machine est équipée de commande numérique, de réaliser tous types de formes même complexes. L'outil classiquement utilisé est la fraise [3].

A/Fraisage vertical:

Le fraisage se caractérise par un mouvement de coupe circulaire à l'outil (l'axe de l'outil est appelé Z) et deux mouvements selon les axes X et Y perpendiculaires à Z.

B/Fraisage en bout et fraisage en roulant :

La fraise travaille à la fois par son extrémité (en bout) et par sa périphérie (en roulant). On dit dans ce cas qu'il s'agit d'une fraise à 2 tailles. Les états de surface sont différents :

- rosaces pour le travail en bout
- Ondulations parallèles pour le travail en roulant [3].

C/Fraisage horizontal :

L'axe de la broche est horizontal.

D/Fraisage en opposition et fraisage en avalant :

Dans le fraisage en opposition, le mouvement de coupe de la fraise tend à s'opposer au mouvement d'avance de la pièce. Au contraire dans le fraisage en avalant, la fraise tend à augmenter le mouvement d'avance et donc, à avaler la pièce.

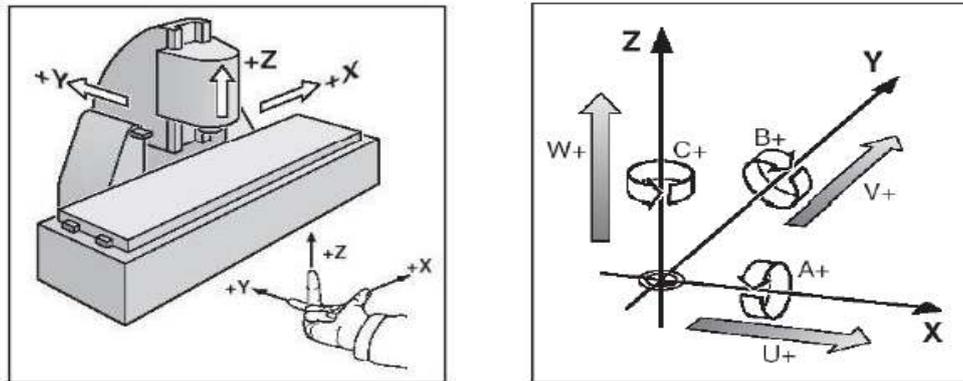


Figure.I.1 : les axes de déplacements d'une fraiseuse [3].

I.3 Procédé de 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 [4].

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).

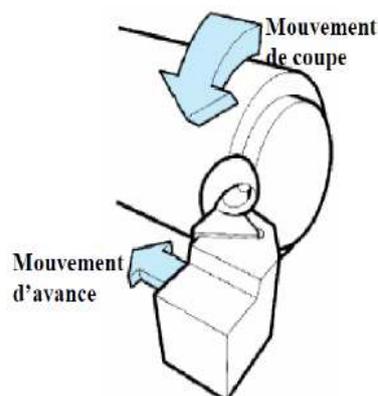


Figure.I.2 : Mouvements de coupe et d'avance en tournage [4].

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 de plusieurs forme (cylindre, cône, sphère, etc.). Le tournage permet également le façonnage des formes intérieures par perçage, alésage, taraudage [5].

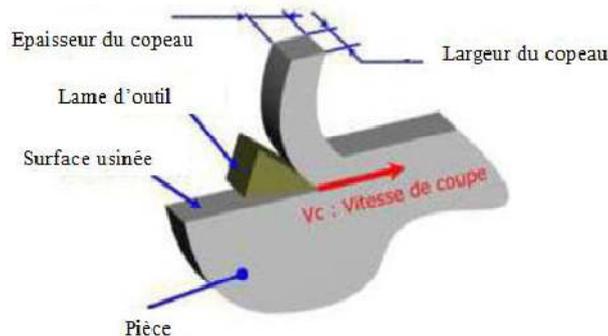


Figure .I.3: Principe de tournage [6].

L'utilisation principale de ces machines est l'usinage des arbres. La pièce, généralement tenue par le mandrin, qui 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 [7].

I.3.1 Surfaces de la pièce :

Les principaux éléments d'une pièce à usiner, la surface de la pièce sujette à l'usinage est appelée surface de la pièce. Elle peut être brute (résultant de différents procédés comme moulage, forgeage, laminage, etc..) ou obtenue par usinage au cours d'opérations précédentes.

La surface engendrée (ou surface usinée) est une surface désirée, générée par le processus d'enlèvement de matière (un outil de coupe au cours d'usinage). Les deux surfaces sont reliées par une surface engendrée intermédiaire (générée pendant l'usinage par une arête coupante) appelée surface coupée (figure I.4).

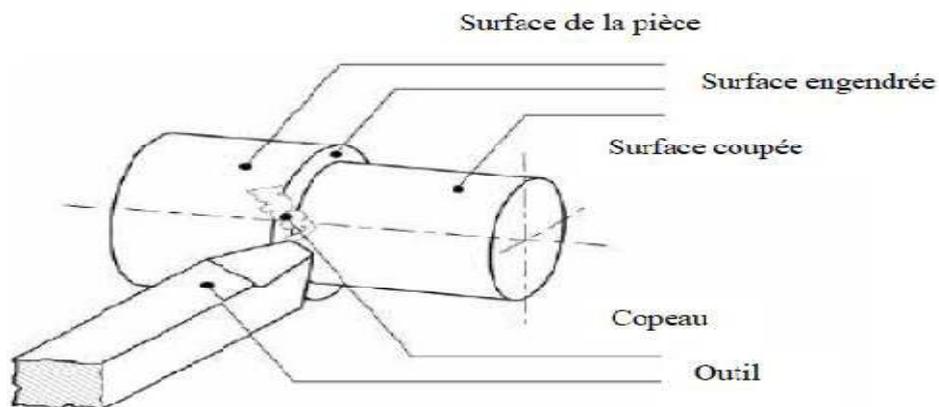


Figure. I.4: surfaces de la pièce [4].

I.4 Les tours :

Les tours (voir 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 [8].

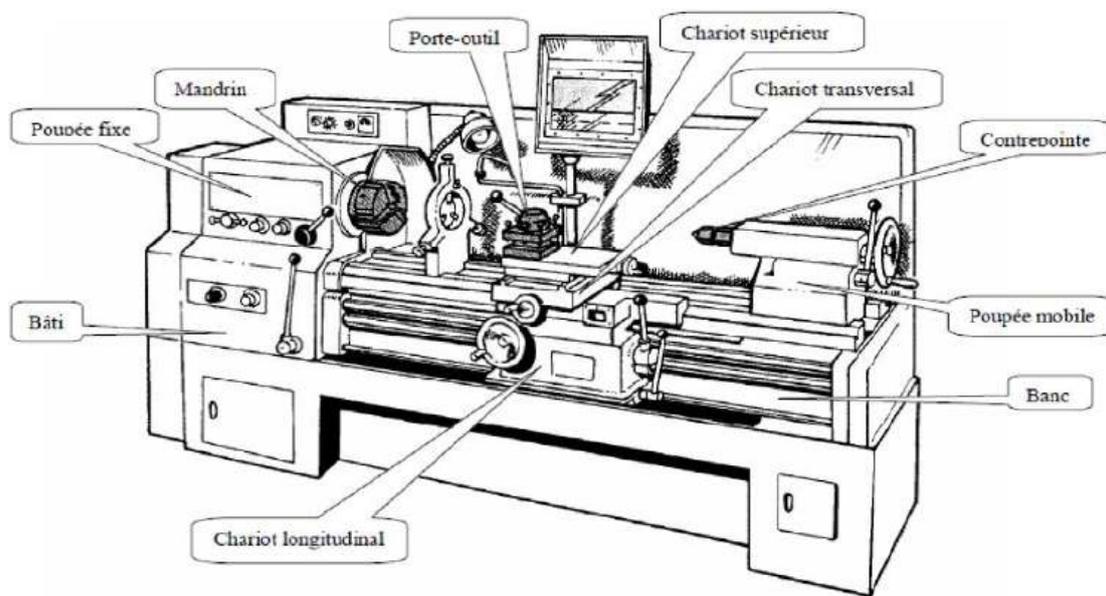


Figure. I.5: Composantes d'un tour [9].

I.4.1 Classification des machines de tournage :

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

A/ Les tours parallèles à charioter et à fileter :

Ces machines sont utilisées pour les travaux unitaires ou de petites et moyennes séries sur des pièces très simples. Ces tours sont peu flexibles. Seules les surfaces dont les génératrices sont parallèles ou perpendiculaires à l'axe de la broche sont réalisables en travail d'enveloppe [10].

B/ Les tours semi-automatiques :

Ce sont des tours équipés d'un traînard semblable à celui d'un tour parallèle avec une tourelle hexagonale indexable munie de 6 postes d'outils animée d'un mouvement longitudinal contrôlé par des butées. Les outillages spécialement conçus pour la machine permettent des opérations simples et précises. La commande de ces tours peut être manuelle ou en partie automatique. La flexibilité de ces machines est très limitée. On les utilisera pour des travaux de moyenne série [10].

C/ Les tours automatiques :

Plusieurs outils sont montés tangentiellement à la pièce. Les mouvements sont obtenus par des cames qui donnent la vitesse d'avance et la course de chaque outil. Une came est spécifique à une opération et à une pièce. Ces tours sont entièrement automatiques. Ces machines n'ont aucune flexibilité. Elles conviennent pour les très grandes séries [10].

D/ Les tours automatiques multibroches :

Ce type de tour comportera par exemple huit broches. Huit outils soit un par broche travaillent en même temps et effectuent une opération différente. Ce sont les broches qui tournent d'un huitième de tour pour présenter la pièce devant l'outil suivant. Lorsque les broches ont effectuées un tour complet la pièce est terminée. Il est possible de travailler dans la barre. Sur ce type de tour les réglages sont longs et le temps de passage d'une série à l'autre immobilise la machine. Ce tour sera réservé pour les grandes et très grandes séries à des pièces de dimensions réduites à cause de l'espacement entre les broches [10].

E/ Les tours à commande numérique :

Comme en copiage la génératrice de la pièce peut être quelconque mais ici la trajectoire de l'outil est obtenue par le déplacement simultané de deux axes dont les positions successives sont données par un calculateur travaillant à partir d'un programme propre à la pièce. Ces tours sont équipés d'un magasin d'outils et éventuellement d'un système de chargement des pièces. La flexibilité de ces machines est très grande et particulièrement bien adapté pour le travail unitaire ou les petites séries répétitives [10]

I.4.2 Régimes de coupe :

A/ Ebauche :

C'est l'opération qui consiste à enlever le maximum de copeaux en un minimum de temps sans s'intéresser à l'état de surface. Il faut donc choisir de grandes profondeurs de passe et de grandes avances [11].

B/ Finition :

C'est l'opération qui consiste à finir la pièce aux cotes prescrites. Il faut donc choisir des grandes vitesses de coupe et de petites avances en obtiens des surfaces de grandes qualité [11].

I.5 Support et entraînement des pièces sur un tour :

Il existe trois principaux montages de la pièce à usiner sur le tour :

I.5.1 Montage en l'air :

C'est un montage sur mandrin effectué pour les pièces courtes ($L < 4D$). Une des extrémités est fixée sur le mandrin alors que l'autre reste libre.

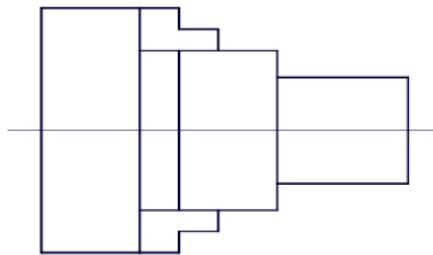


Figure. I.6 : Montage en l'air [11].

I.5.2 Montage mixte :

Il est utilisé pour des pièces relativement longues ($4D < L < 8D$). Une des deux extrémités est fixée sur le mandrin alors que l'autre extrémité est soutenue par de la poupée mobiles.

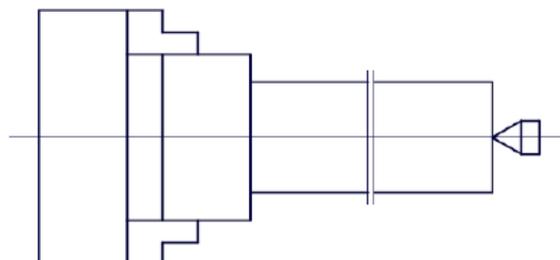


Figure. I.7 : Montage mixte [11].

I.5.3 Montage entre-pointes :

Pour l'usinage des pièces longues ($L > 8D$), on utilise le montage entre pointes. La pièce est soutenue par ses deux extrémités par deux pointes plus lunette.

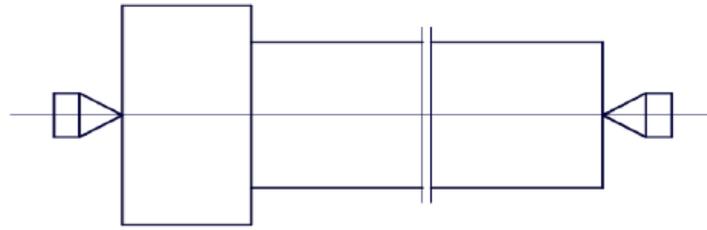


Figure. I.8 : Montage entre-pointe [11].

I.6 Opérations de tournage :

I.6.1 Chariotage :

Le mouvement d'avance (mouvement de l'outil) est une translation rectiligne parallèle à l'axe de révolution de la pièce, et cet usinage aura pour effet de réduire le diamètre de la pièce.

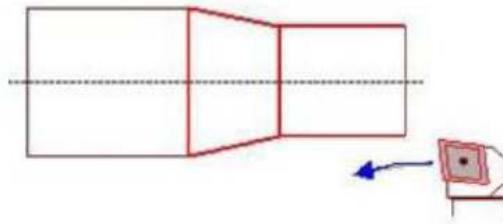


Figure. I.9: Chariotage [10].

I.6.2 Alésage :

Cette opération consiste à usiner une surface cylindrique ou conique intérieure. Le mouvement d'avance est similaire à celui en chariotage.

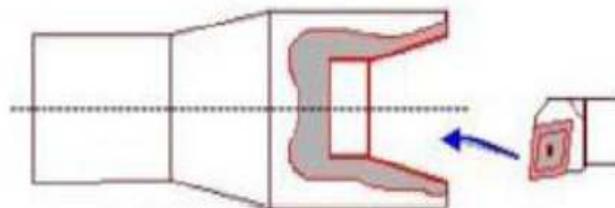


Figure. I.10: Alésage [10].

I.6.3 Dressage :

Opération qui consiste à usiner une surface plane perpendiculaire à l'axe de la broche extérieure ou intérieure, ce qui diminue la longueur.

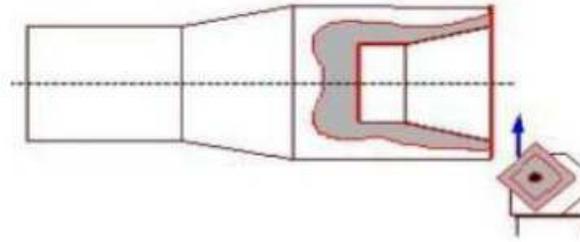


Figure. I.11: Dressage [10].

I.6.4 Contournage :

On donnant à l'outil une trajectoire plane quelconque, on peut obtenir une forme de révolution quelconque.

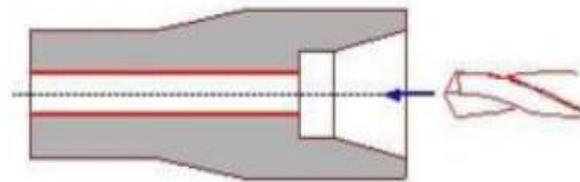


Figure I.12:Contournage [10].

I.6.5 Gorgeage :

Opération qui consiste à usiner une gorge intérieure ou extérieure pour le logement d'un clips ou d'un joint torique par exemple.

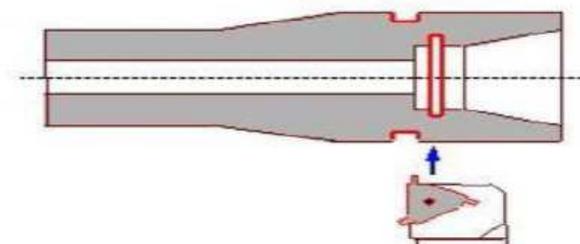


Figure. I.13: GORGEAGE [10].

I.6.6 Chanfreinage :

Opération qui consiste à usiner un cône de petite dimension de façon à supprimer un angle vif.

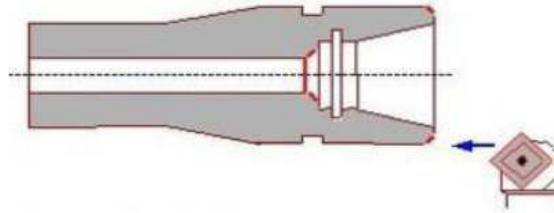


Figure. I.14: CHANFREINAGE [10].

I.6.7 Tronçonnage :

Opération qui consiste à usiner une rainure jusqu'à l'axe de la pièce afin d'en détacher un tronçon.

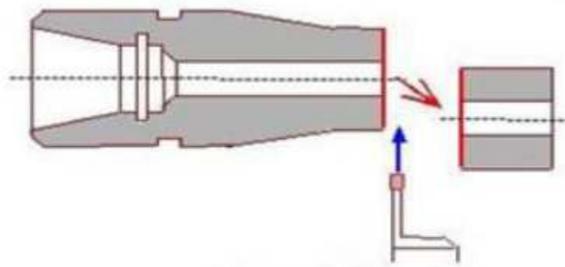


Figure. I.15: Tronçonnage [10].

I.6.8 Filetage :

Opération qui consiste à réaliser un filetage extérieure ou intérieure, le mouvement d'avance est combiné avec le mouvement de coupe.

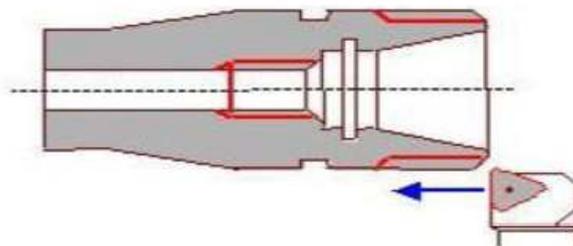


Figure. I.16: Filetage [10].

I.7 Conditions de coupe :

Avant de réaliser une opération de tournage, il est nécessaire de bien choisir les conditions de coupe pour obtenir un bon résultat (précision, état de surface ...) :

Il y a plusieurs critères qui permettent de définir les conditions de coupe notamment :

- Le type de la machine (mécanisme, gamme des vitesses,...)
- La puissance de la machine
- La matière de l'outil (ARS, carbure...)
- La matière usinée (acier, aluminium...)
- Le type de l'opération (perçage, chariotage, surfacage...)
- L'utilisation éventuelle de lubrification (destiné à refroidir ou/et à diminuer le frottement)[1].

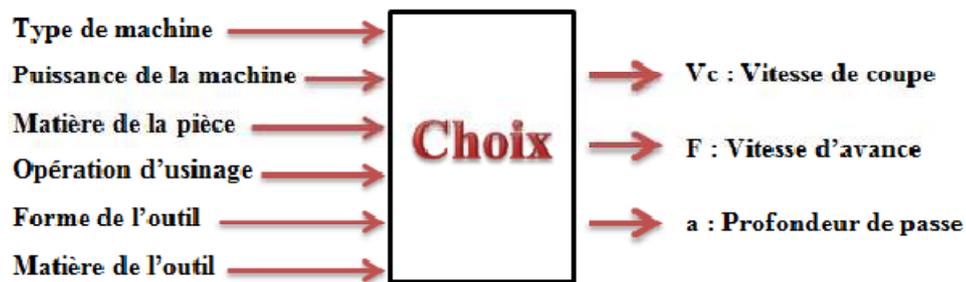


Figure. I.17 : Les choix des paramètres de coupe [12].

I.7.1 Vitesse de coupe V_c :

La pièce est entraînée sur le tour à une certaine vitesse angulaire ω , cette vitesse étant communiquée par la broche de la machine vers la porte pièce.

La vitesse relative de la pièce en ce point par rapport à l'outil est donnée par la formule suivante :

$$V_c \text{ (m/min)} = D/2 \text{ (m)} \times \omega \text{ (red/min)}$$

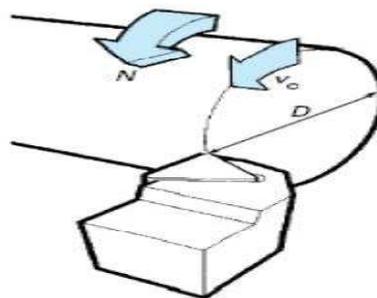


Figure. I.18 : Vitesse de coupe V_c [13].

La vitesse de la broche est donnée par l'expression suivante :

$$N(\text{tr/min}) = \frac{1000 \times V_C \text{ (m/min)}}{\pi \times D \text{ (mm)}}$$

I.7.2 Vitesse d'avance V_f et avance par tour f :

La vitesse d'avance (mm/min), que la figure (I. 18) montre, est la vitesse laquelle la machine déplace l'outil par rapport au bâti. L'avance par tour (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. La vitesse d'avance V_F est donnée par la formule suivante [13].

$$V_F(\text{mm}) = f(\text{mm/tr}) \times N(\text{tr/min})$$

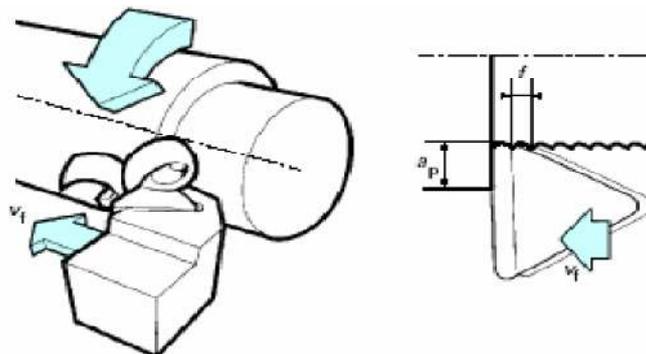


Figure. I.19 Vitesse d'avance [13].

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 [10].

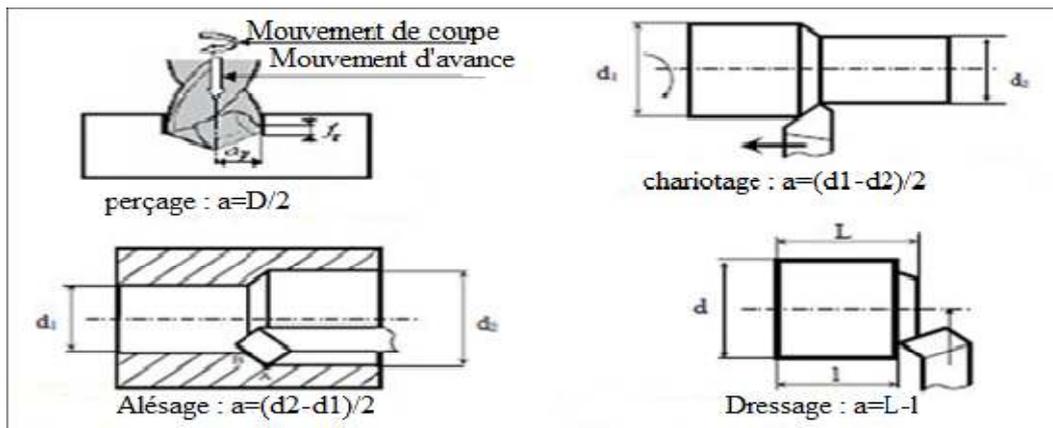


Figure. I.20: Les profondeurs de passe [10].

I.8 Paramètres géométriques de coupe :

La distance entre la surface de la pièce et la surface engendrée est appelée profondeur de coupe a_p . Cependant, afin d'arriver à la dimension finale de la pièce, on doit souvent effectuer plusieurs passes. La passe est définie comme la couche de matière de la pièce qui doit être enlevée par un passage unique de l'outil de coupe. La partie de matière usinée entre la surface de la pièce et la surface finale désirée (après avoir effectué toutes les passes nécessaires) est appelée surépaisseur d'usinage. On appelle la coupe, la couche de matière qui est enlevée par une action unique de la partie active et transformée en copeaux. Ces différents paramètres sont illustrés à la figure (I.21).

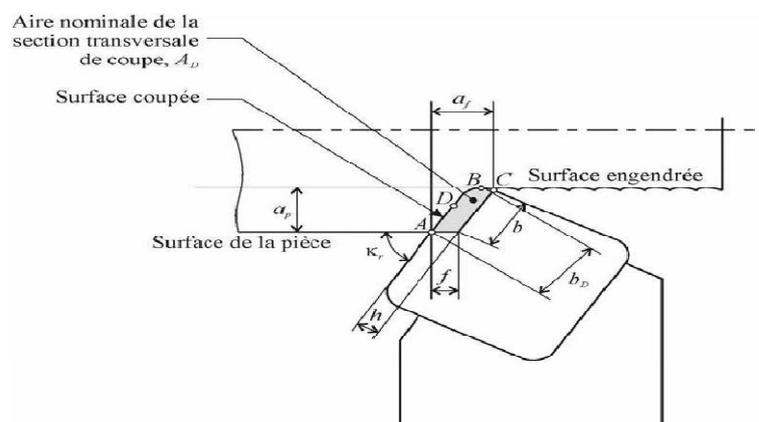


Figure. I.21 : Configuration de coupe [14].

I.8.1 Éléments d'outil :

Il existe une grande diversité d'outils de coupe. Toutefois, les principaux éléments des différents outils sont semblables. Ainsi, afin de simplifier la compréhension de différents éléments définissant un outil quelconque, nous nous baserons sur un outil de coupe en tournage. Les définitions peuvent ensuite être déduites pour tout autre type d'outil [14].

I.8.2 Faces et arêtes de l'outil :

Un outil coupant est constitué d'un corps d'outil et peut comporter une ou plusieurs parties actives, intersection de deux surfaces (Figure I. 22). La partie active peut être constituée du même matériau que le corps, on parle alors d'outils monoblocs (carbures et aciers rapides) ou d'un matériau différent (inserts rapportés ou plaquettes pour les carbures, les cermets, les céramiques, les poly cristallins de bore ou de diamant). La (figure I. 22) précise le vocabulaire relatif aux différentes parties actives d'un outil de tournage. En plus de cette description de la géométrie locale des outils, il existe une norme (ISO 1831) permettant de décrire les différentes parties constitutives des outils de tournage à plaquettes rapportées, systématiquement utilisés aujourd'hui

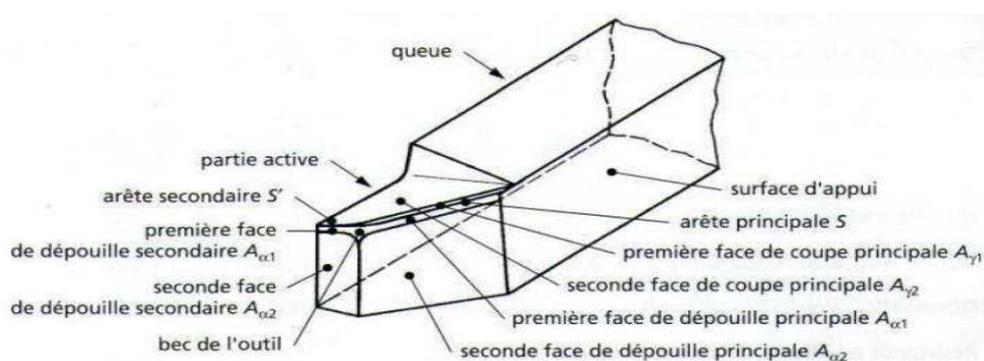


Figure. I.22 : Arêtes et parties actives d'un outil de tournage [5].

La partie de l'outil impliquée directement dans la coupe est appelée taillant. Elle est limitée par trois faces, la face de coupe le long de laquelle glisse le copeau et les deux faces de dépouille (principale et secondaire) le long desquelles passent les surfaces coupée et engendrée [5].

On appelle une arête un bord de la face de coupe destiné à l'enlèvement de matière. Dans un outil de tournage simple, on peut distinguer une arête principale intersection entre la face de coupe et la face de dépouille principale, et une arête secondaire, intersection entre la face de coupe et la face de dépouille secondaire. La jonction des arêtes principale et secondaire forme le bec de l'outil. Il peut être droit, arrondi ou représenter l'intersection vive des deux arêtes [5]. Généralement, un outil possède un mouvement de coupe et un mouvement d'avance.

On en déduit dès lors un vecteur résultant du mouvement relatif outil/ pièce exprimé par le vecteur V_e . A partir de là, on peut définir deux systèmes d'angles d'un outil de coupe. On définit soit les angles d'outil « en main » par rapport à la direction supposée de coupe V_e (repère nécessaire à la fabrication des outils), soit les angles d'outils « en travail » par rapport à la direction réelle de coupe $c V$ (repère nécessaire pour connaître les angles effectifs durant la

coupe). A l'aide de ces repères, on établit une série de plans et d'angles normalisés permettant de décrire la géométrie locale des outils [5].

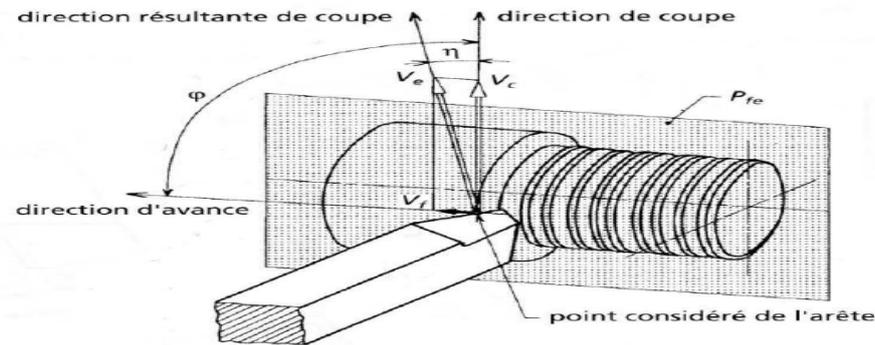


Figure. I.23 : Mouvement relatif outil/ pièce en tournage [9].

I.9 Outil de coupe à plaquette rapportée :

Les outils de tournage actuels sont constitués la plupart du temps d'un porte-plaquette muni d'un dispositif de fixation de la plaquette et d'une plaquette interchangeable constituée d'une matière plus dure et comportant plusieurs arêtes de coupe. Le changement d'arête de coupe intervient lorsque l'arête en service a atteint un degré d'usure qui l'empêche de respecter les tolérances des cotes à réaliser, ou la rugosité spécifiée, ou encore qui risque d'entraîner la rupture à plus ou moins brève échéance. Pour effectuer le choix d'un outil de tournage, les paramètres à prendre en compte sont les suivants: [2].

- Matière de la pièce, usinabilité.
- Configuration de la pièce : forme, dimension, surépaisseurs d'usinage.
- Limitations : tolérances, état de surface.
- Machine : type, puissance, conditions d'utilisation et caractéristiques.
- Stabilité, rigidité de la prise de pièce et de la pièce



Figure. I.24 : Exemples de différentes plaquettes de tournage disponible [15].

I.10 Matériaux de l'outil :

La partie active des outils de coupe et donc les matériaux servant à leur constitution doivent posséder certaines propriétés :

- Une bonne résistance mécanique au frottement - résistance à l'usure.
- Une bonne résistance aux chocs - ténacité.
- Une bonne résistance à la pénétration - dureté.
- Une bonne résistance à la chaleur - garder ces propriétés à haute température (par exemple dureté à chaud).
- Une bonne résistance à la pression.
- Une grande stabilité chimique vis-à-vis du matériau usiné et de l'atmosphère environnante (air, liquide de coupe, etc.).
- Une faible adhésion avec le matériau usiné sous haute pression et haute température.
- Un bas prix d'achat et de mise en forme, ainsi que l'abondance des éléments de composition.

Le diagramme (figure I.25) est donné à titre indicatif pour situer les différents domaines des matériaux à outil. Il est représentatif des conditions normales d'utilisation de ces outils, en ébauche, pour les aciers et les fontes. Il ne peut être utilisé pour choisir les conditions de coupe.

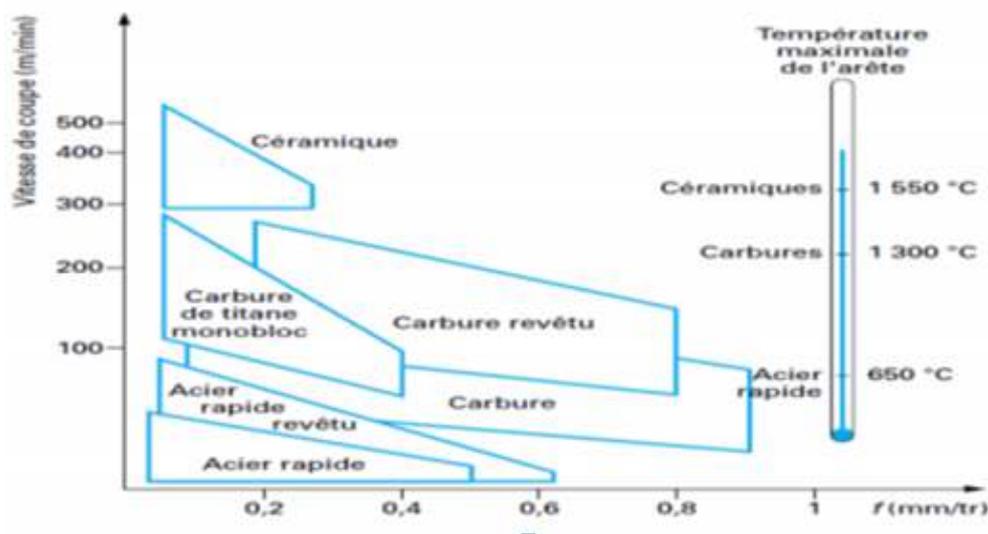


Figure. I.25 : Domaines d'emploi des divers matériaux à outil coupant[16].

II.1 Introduction :

L'usure est un ensemble complexe de phénomènes difficiles à interpréter, amenant une émission de débris avec perte de masse, de cote, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces [17].

L'usure comporte une part importante de réactions chimiques ; des couches superficielles chimiquement inertes peuvent parfois se révéler plus résistantes au frottement que des couches dures, surtout en présence de milieux agressifs. Elle est généralement combattue à cause de ses effets négatifs mais elle présente aussi des aspects favorables tels que l'affûtage des outils, la finition d'une surface par rectification

La qualité de la pièce produite en usinage dépend principalement de l'état de l'outil de coupe utilisé. Ce dernier est exposé à l'endommagement au cours de l'opération d'usinage à cause des frottements avec la pièce à usiner et les copeaux générés Braun et al (1986). D'où l'intérêt de prédire sa durée de vie au cours de l'usinage avant dégradation du processus d'usinage.

II.2 Paramètres classiques associés à la coupe :

On peut observer deux grands groupes de paramètres dans le processus de coupe. Le premier est formé par la matière usinée et les conditions de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, lubrification)

II.2.1 Vitesse de coupe :

La température de coupe étant croissante avec la vitesse de coupe, ce paramètre aura une très grande influence sur l'usure

II.2.2 Avance :

Les grandes avances font augmenter l'intensité des efforts de coupe, et diminuent la durée de vie de l'outil.

II.2.3 Profondeur de passe :

La variation de la profondeur de passe modifie légèrement l'écoulement de la chaleur le long de l'arête tranchante, son influence reste modeste sur l'usure.

II.2.4 Matériau usiné :

Son influence sur l'usure dépend de ses propriétés physiques (conductibilité thermique), de ses propriétés mécaniques (pression spécifique de coupe) et de ses propriétés chimiques (% de certains éléments d'addition) [18].

II.2.5 Lubrification :

Son influence intervient faiblement sur le coefficient de frottement pièce/outil et copeau/outil, mais permet la baisse de la température de la partie active de l'outil.

II.3 Formation du copeau :

Dans l'usinage des métaux, l'outil exerce des forces mécaniques sur la pièce, ce qui entraîne la formation de copeau qui est caractérisé par l'apparition des quatre zones (voir la figure II.1).

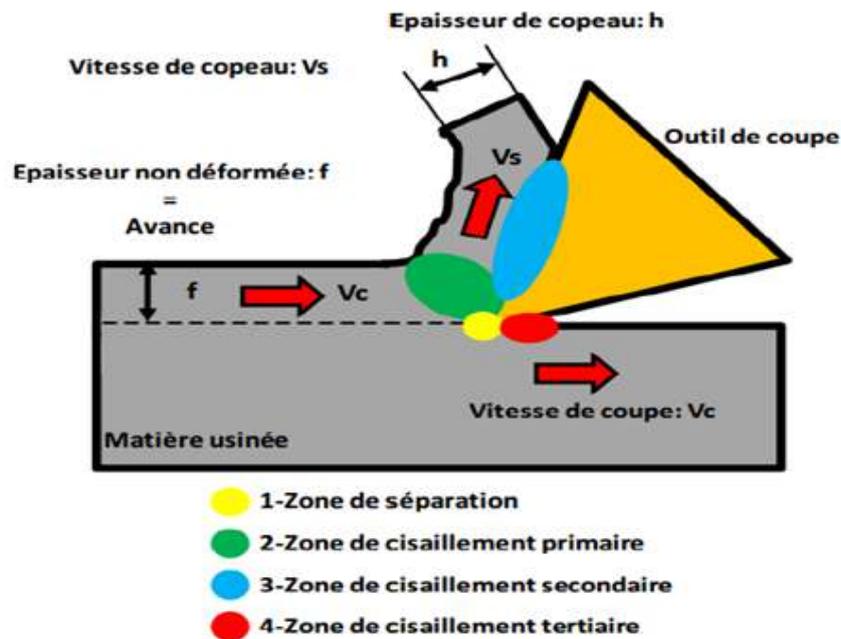


Figure II.1 : Les zones des cisaillements[19].

- **Zone 1** : C'est la zone de la séparation de la pièce à usiner en deux sous l'action de l'outil de coupe (arête de coupe). Elle est caractérisée par une déformation intense de la matière. Ces déformations sont parmi les causes de la genèse des contraintes résiduelles en surface. Une arête rapportée se forme par soudure de la matière de la pièce sur l'outil dans cette zone. En effet le copeau atteint une température permettant de le rendre collant mais, à ce stade, il refroidit suffisamment vite pour s'adhérer à la plaquette.
- **Zone 2** : Cette zone est dénommée zone de cisaillement primaire (ZCP). Cette zone est le siège de sollicitations importantes.
- **Zone 3** : Le copeau s'écoule avec une vitesse qui vaut entre $1/3$ et $1/2$ de la vitesse de coupe.

Cette diminution de la vitesse est expliquée par le fait que l'épaisseur du copeau déformé est différente de celle non déformé, en plus les phénomènes d'adhésion ralentissent d'avantage

l'écoulement de la matière ce qui donne lieu à un cisaillement plastique de la matière. Cette zone de cisaillement présente les déformations supplémentaires de la matière usinée au-delà de la zone de cisaillement primaire. Dans ce contexte, cette zone est dénommée zone de cisaillement secondaire (ZCS). Elle est caractérisée par des frottements de glissement intenses, qui entraîne une augmentation de la température. Cette température élevée active le phénomène d'usure par diffusion des atomes du copeau vers l'outil.

L'existence des particules dures à l'interface outil copeau dans cette zone déclenche aussi l'usure par abrasion ce qui se traduit par une usure en cratère.

- **Zone 4** : Il est également nécessaire de présenter la zone limitée par le rayon de l'arête de l'outil et la face de dépouille de l'outil, où les frottements de glissement se produisent. Les phénomènes produits dans cette zone « zone de cisaillement tertiaire » sont responsables de l'obtention de l'état de la surface usinée et ont pour conséquence l'usure en dépouille [19].

II.4 Durée de vie d'un outil de coupe :

La durée de vie d'un outil est caractérisée par le temps mis pour atteindre la valeur limite du critère d'usure considérée dans des conditions de coupe données

Généralement on choisit comme critère d'usure l'un des trois critères suivants :

- Défaillance brutale due à la déformation plastique de l'arête. Ce critère n'est employé que pour les outils en acier rapide ou les outils en céramique.
- Usure frontale, employé pour tous les outils, caractérisés soit par l'usure frontale Moyenne soit par l'usure frontale maximale.
- Usure en cratère, employé seulement pour les outils en carbure métallique, caractérisé par la profondeur du cratère

La durée de vie est mesurée sur l'usure en dépouille dans la zone b (figure II.2) en mm . [4].

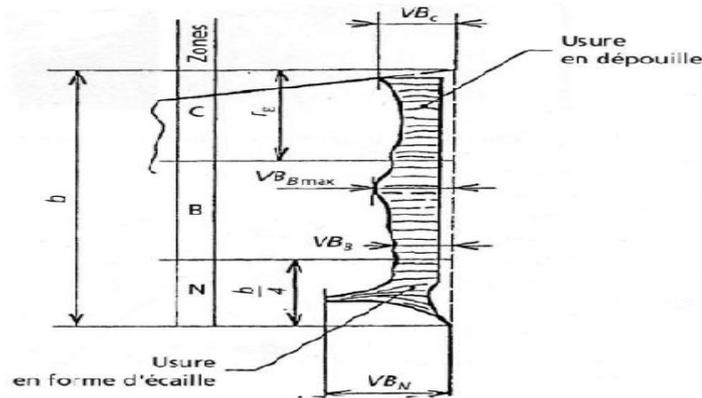


Figure II.2: Critère d'usure VB [10].

On détermine la durée de vie de l'outil est fonction des différents paramètres, soit:

- Les conditions de coupe.
- Le matériau et la géométrie de l'outil.
- Le matériau et l'état physique de la pièce.
- La lubrification.
- Généralement seules les conditions de coupe sont prises en considération et on établit des lois d'usure pour des outils parfaitement définis pour un matériau usiné donné et dans des conditions de lubrification déterminées.

II.5 L'usure des outils de coupe :

Dans l'usinage des métaux, on constate que la forme géométrique et l'état physique de l'outil sont modifiés par l'action combinée des forces de coupe et par la température atteinte par le tranchant. Ces modifications qui augmentent progressivement avec la durée d'usinage, sont couramment regroupées sous le terme usure de l'outil. Elles se manifestent sur la partie active de l'outil.

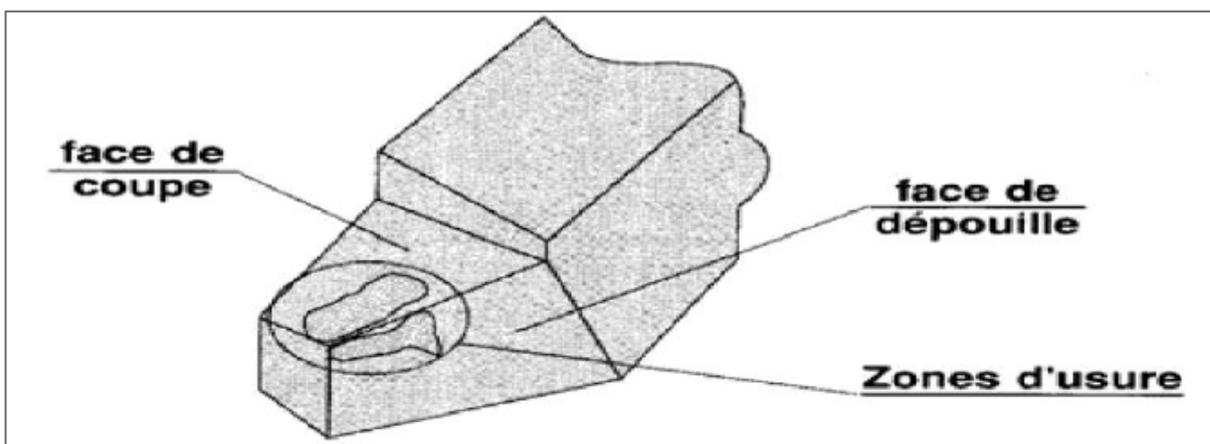


Figure II.3 : Partie active de l'outil [20].

L'usure, d'après la définition normalisée, est la perte progressive de matière de la surface active d'un corps par suite du mouvement relatif d'un autre corps sur cette surface. Dans la formation du copeau, la partie tranchante de l'outil en mouvement relatif avec la pièce et le copeau est soumise à des sollicitations mécaniques et thermiques très intenses qui provoquent son usure et sa détérioration rapide [20].

L'étude détaillée du phénomène d'usure révèle différentes formes:

II.5.1 Usure par effets mécaniques :

- a) **Usure adhésive** : Il y a transfert de métal d'une surface sur l'autre pendant leur mouvement relatif dû à un processus de soudure en phase solide (même avec un lubrifiant).
- b) **Usure abrasive** : Le déplacement de matière est produit par des particules dures ou des protubérances dures contenues dans les matériaux en contact.
- c) **Usure érosive** : Le mécanisme d'usure est le même que précédemment, seulement, les particules dures sont véhiculées par un fluide.
- d) **Usure par fatigue** : Les particules se détachent par la fatigue résultant d'une variation cyclique de contraintes.

II.5.2 Usure par effets physico-chimiques :

a) Usure corrosive :

- Corrosion au contact de l'air ou du lubrifiant, du matériau naissant.
- Corrosion chimique au niveau des molécules.
- Corrosion électrochimique au niveau des ions ; on observe un transfert des particules de l'outil dans le copeau [20].

b) Usure par diffusion :

Elle n'apparaît qu'à une certaine vitesse, donc à une certaine température.

Les divers mécanismes d'usure en fonction du régime de coupe sont représentés sur la (figure II.4) Ces phénomènes dépendent essentiellement du régime de coupe, donc de la température de coupe.

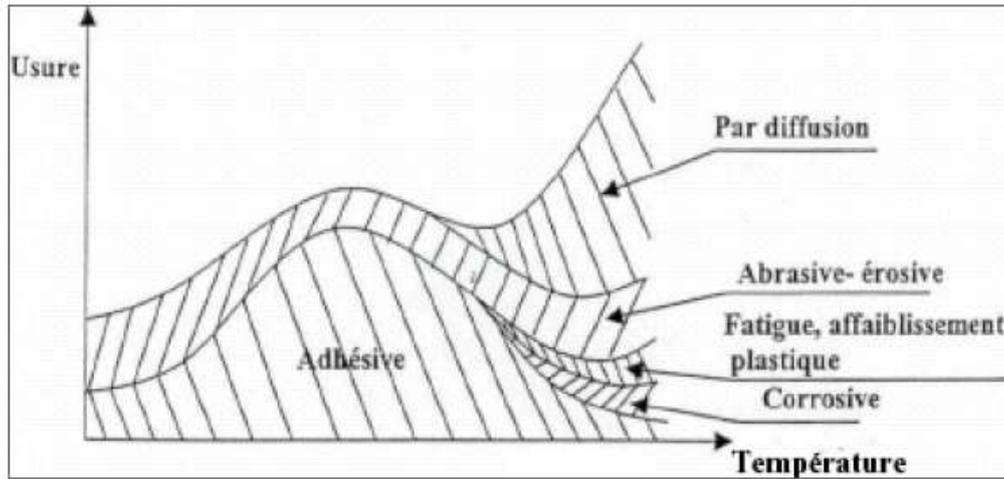


Figure II.4 : Evaluation du mécanisme d'usure en fonction de la température de coupe [20].

Le frottement copeau-outil donne lieu à des phénomènes de grippage et d'arrachement, ce qui correspond à l'usure adhésive. A partir d'une certaine vitesse, donc d'une certaine température correspondant à l'apparition d'une couche de glissement facile et d'une arête rapportée, l'usure adhésive devient moins importante et se traduit par un changement de pente sur la courbe. Si l'on augmente la vitesse de coupe, le mécanisme d'usure par diffusion entre alors en jeu. Avec l'intensification des effets thermiques, il peut apparaître une usure par effet d'oxydation, l'amélioration relative apportée par l'apparition de la couche de glissement facile se trouve alors neutralisée. Si l'on augmente encore la vitesse, l'usure par diffusion croît de façon très importante. L'usure par déformation plastique est due en fait à l'affaissement de l'arête de coupe sous l'action des efforts de coupe et ceci d'autant plus rapidement que la température à proximité du bec de l'outil augmente. L'usure par corrosion est due à la corrosion provoquée par le contact des deux matériaux constituant la pièce et l'outil et particulièrement sous l'effet des lubrifiants.

II.5.3 Manifestations de l'usure :

L'observation de la partie active de l'outil fait apparaître des formes d'usure. On peut rencontrer diverses formes d'usure selon la nature des matériaux en présence (outil-pièce), selon les conditions extérieures dues à l'environnement et enfin selon le régime de coupe.

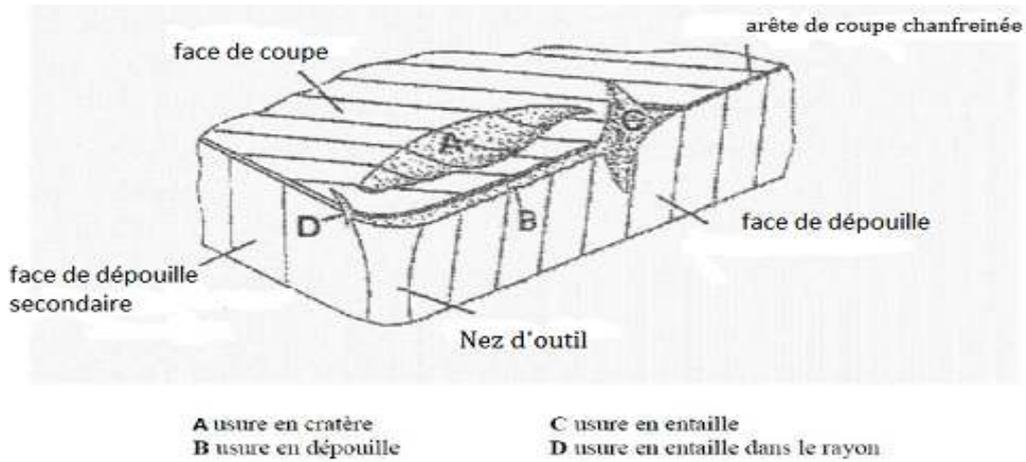


Figure II.5 Formes d'usure classiques d'une plaquette d'usinage [20].

a) Usure en cratère :

Elle s'observe sur la face d'attaque de l'outil sous la forme d'une cuvette obtenue par frottement intense du copeau, figures (II.5 et II.6). Cette forme d'usure, symbolisée par les lettres KT, se manifeste principalement lors de travaux d'ébauche, à faible vitesse de coupe et à forte avance, sur des matériaux abrasifs. L'effort très important exercé par le copeau sur la face d'attaque entraîne des pressions également très importantes qui créent, avec le mouvement relatif copeau-outil, des températures élevées favorables à l'usure par diffusion.

Elle se rencontre plus fréquemment sur les outils en carbure métallique et en céramique qui offrent une structure plus favorable que les outils en acier rapide. L'usure sur ces derniers se stabilise après sa naissance par un écrouissage superficiel du métal. On caractérise l'usure en cratère par la profondeur KT, le rapport KT/KM ou par l'angle de cratérisation γ_c .

b) Usure en dépouille :

Elle s'observe sur la face en dépouille principale de l'outil et symbolisée par les lettres VB. Elle apparaît suivant une bande striée brillante et parallèle à l'arête de coupe, figures (II.5 et II.6). Cette déformation se traduit par un affaissement plastique de la pointe de l'outil caractérisé par la valeur de la flèche S_{vp} , et par un renflement sur les faces en contre dépouille. Il s'en suit une modification importante de la géométrie de la pointe de l'outil qui nuit à la précision et à l'état de la surface usinée.

L'affaissement plastique entraîne une usure frontale vers la pointe de l'outil zone C, de valeur VC généralement supérieure à la valeur VB dans la zone centrale B, et une déformation importante du cratère, figure (II.6). Celui-ci présente alors une profondeur maximale au niveau de l'arête secondaire de l'outil. Elle se manifeste lors de travaux de finition, à forte vitesse de coupe et à faible avance; elle est due conjointement aux températures élevées qui se produisent

le long de l'arête de coupe et au frottement continu de la surface de la pièce sur la face en dépouille de l'outil. Sur le plan pratique, cette forme d'usure est la plus importante puisqu'elle conditionne simultanément l'état de surface de la pièce usinée et la précision dimensionnelle. On la caractérise par la distance entre l'arête de coupe initiale et la droite associée aux crêtes situées sur la face en dépouille. Dans certains cas, on peut la caractériser par VB_{max} [20].

c) Usure par effondrement d'arête :

Cette forme d'usure se manifeste surtout sur des outils en acier rapide et plus généralement, lorsque la vitesse de coupe est trop importante, également lorsque la dureté du matériau à usiner est supérieure à celle de l'outil ou que la structure du matériau à usiner n'est pas homogène et présente des points durs.

d) Usure en entaille :

Elle s'observe le long de l'arête de coupe à la hauteur du diamètre périphérique de la pièce et est due à un écrouissage local. Elle se manifeste par une entaille qui se traduit par un VN très important devant le VB , figure (II.6). Cette entaille provoque un affaiblissement du bec de l'outil qui peut aller jusqu'à la rupture.

e) Usure par fissuration :

Cette forme d'usure est causée par un choc thermique. On peut observer ce type d'accident sur les outils en carbures métalliques soumis à un travail de coupe lubrifié par intermittence ; ceci est particulièrement évident sur les outils de fraisage qui connaissent à la fois, chocs thermiques et chocs mécaniques.

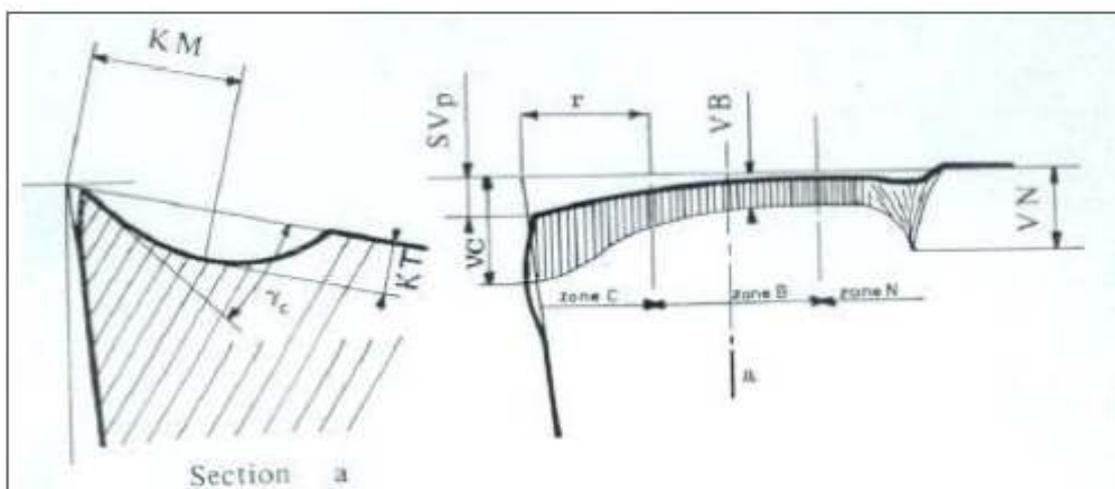


Figure II.6: Caractérisation des formes d'usure des outils[20].

II.5.4 Critères d'usure :

Les critères usuellement utilisés et notamment ceux recommandés par la norme en vigueur concernant l'usure des outils de coupe (norme, NF E 66 505), se rangent en deux catégories :

a) Les critères directs :

Les plus utilisés sont ceux de l'usure en dépouille limite VB_{MAX} et l'usure en cratère limite KT_{MAX} .

b) Les critères indirects :

Ils sont basés sur la variation de certaines grandeurs physiques de la coupe en fonction de l'usure de l'outil (efforts, rugosité). Pour des usinages courants en mécanique générale ou en outillage, les limites acceptables pour l'usure en dépouille et l'usure en cratère sont les suivantes :

- Une largeur moyenne de la bande d'usure frontale de 0,3 mm si elle est uniforme, ou une largeur maximale $VB = 0.5$ mm, (figure II.4).
- Une profondeur maximale du cratère égale à : $KT = (0.1 + 0.3 a)$ mm où a représente l'avance en mm/tr, (figure II.6).

II.6 Détermination des lois expérimentales d'usure :

D'un point de vue pratique, l'usure en dépouille est la plus importante à considérer puisqu'elle détermine l'état de surface de la pièce usinée et la précision dimensionnelle. Dans le cas des outils en acier rapide, les mesures de l'usure frontale présentent une dispersion importante due principalement à l'hétérogénéité des aciers à outils et de la matière usinée et à la présence d'une zone morte au voisinage du bec, qui se traduit par l'apparition d'une arête qui protège la face en dépouille dans certains cas (copeau adhérent). Le critère d'usure pour ce matériau à outil est généralement "l'effondrement d'arête". Par contre, l'expérience montre que l'évolution de l'usure des outils à plaquettes dites "à jeter" peut être définie de façon satisfaisante par la seule mesure de l'usure en dépouille ou de l'usure en cratère dans une large plage des paramètres de coupe. Pour des paramètres de coupe élevés (provoquant une élévation de température entre outil et copeau) l'usure par diffusion s'accélère ce qui favorise une évolution rapide de la cratérisation.

II.6.1 Conditions opératoires :

La norme NF E 66505 prévoit et définit les conditions des essais de coupe en tournage, le respect de ces propositions permettra de comparer les essais faits par différents laboratoires. Ils précisent :

- La nature de la matière à usiner.
- L'outil à utiliser.

- Les conditions de coupe à afficher.
- Le liquide de coupe à employer.

Les essais se pratiquent sur un tour à variation continue de vitesse équipé d'un compte-tour de bonne précision. La machine étant réglée à une vitesse de coupe désirée, on mesure l'évolution de l'usure en fonction du temps. Pour chaque essai, il faut observer l'usure pour au moins quatre vitesses de coupe différentes et pour chaque mesure, il est recommandé de faire au moins trois relevés pour limiter les dispersions. Pour obtenir une courbe significative "durée d'outil-vitesse de coupe", il est indiqué d'échelonner les vitesses de coupe de telle façon que la durée de vie de l'outil varie du simple au double. Pour respecter ceci, on choisira la vitesse de coupe dans une série géométrique des nombres normaux (NF E 66505).

Chaque essai sera accompagné d'un dossier précisant au regard de la norme les conditions pour l'installation et la conduite de la manipulation. On trouvera les indications suivantes :

- La qualité métallurgique et géométrique de l'éprouvette à usiner.
- Les conditions de coupe : avance, profondeur de passe, type de travail, vitesse de coupe stabilisée.
- L'état général de la machine : vibrations, caractéristiques cinématiques, etc..
- L'opération de mesurage de l'usure considérée (mode opératoire et temps de mesure).
- La désignation normalisée de l'outil testé [20].

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, les moyens et les techniques mis en œuvre pour la réalisation de notre étude expérimentale de l'usure des outils de coupe ainsi que le matériau utilisé sont exposés. Cela consiste en une présentation des différents équipements utilisés servant au suivi de l'évolution de l'usure.

Nous présentons également la démarche utilisée pour la planification et les conditions de réalisation des expériences.

L'usinage des pièces s'est déroulé au niveau de département de mécanique de l'université KASDI MERBAH OUARGLA (laboratoire de technologie « EL-BEHW »)

Notre étude : Optimisation de l'usure lors d'une opération de chariotage par la méthode des plans d'expériences a pour but d'étudier l'évolution de l'usure de l'acier XC48 en fonction des différentes conditions de coupe (la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe). L'objectif est de déterminer les paramètres de coupe qui permettent de minimiser l'usure.

III.2 Equipements utilisés :

III.2.1 Tour utilisé :

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour à charioter et à fileter modèle EMCO MAXIMAT V13, de puissance sur la broche est égale à 6,6 kW, Les nombres de tours disponibles sur la machine sont de 30 au 2500 (tr/min). Les avances sont: 0.08 /0.2 (mm/tr).



Figure III.1: Tour utilisé

III.2.2 Matière usinée :

Le matériau utilisé est un acier de nuance XC48 selon la norme AFNOR et nommé AISI 1045 selon la norme AISI. Il est destiné à la fabrication de pièces mécaniques, de semelles de matrices et de chemins de roulements. Cet alliage est d'une dureté de 180 HB.

Les éprouvettes utilisées sont des cylindres pleins de longueur 300 mm et de diamètre 40 mm maintenues sur la machine en montage mixte (barre fixée sur le tour par un mandrin à trois mors concentriques d'un côté, et de l'autre côté par une contre-pointe).



Figure III.2 : Epreuve brute

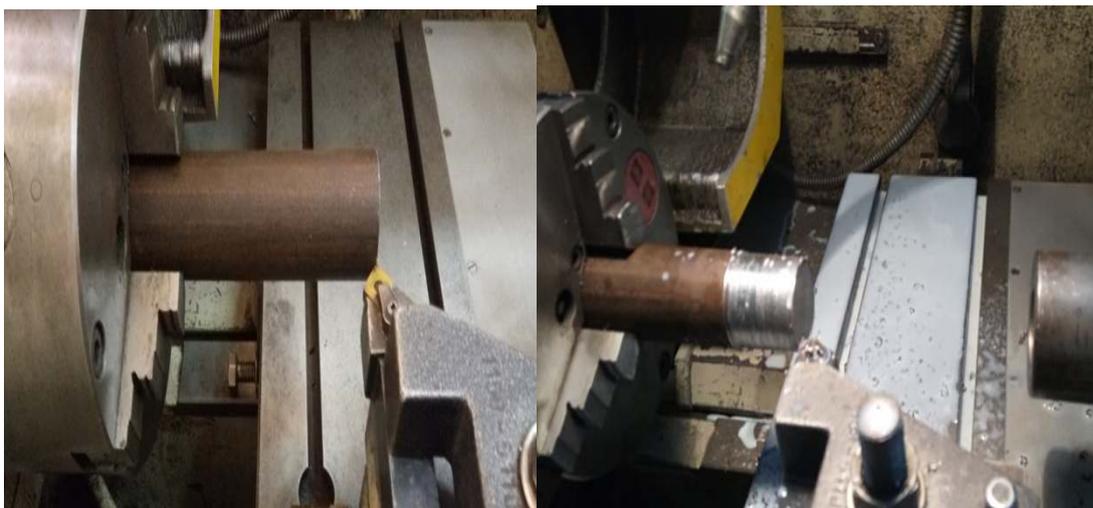


Figure III.3 : Epreuve servant aux essais.

1. Propriétés :

Acier carbone à teneur plus élevée que pour les aciers C35 et C40, utilisé en mécanique générale de par sa bonne usinabilité et ses caractéristiques mécaniques.

Apte aux traitements thermiques : ex. à l'huile 820 - 860°C.

2. Domaines d'application

Pièces soumises aux chocs et nécessitant une bonne résistance : axes, engrenages, vis sans fin, paliers, pignons, boulonnerie, forge (leviers, arbres).

3. Caractéristiques mécaniques moyennes (état normalisé)

Rm (N /mm)	Re(N/mm)
560 /620	275/340

Tableau III.1: Caractéristique mécanique du XC48

Avec :

Rm : c'est la résistance maximale.

Re: c'est la résistance élastique.

III.2.3 Description de porte plaquette :

Le rôle de porte plaquette est important à plusieurs titres :

- ✚ Il permet de maintenir l'outil en position rigide pendant l'usinage.
- ✚ Il oriente la plaquette dans l'espace. En effet, il contribue à la géométrie de coupe de l'outil.

La figure suivante montre l'outil à pastille utilisé :



Figure III.4 : Outil à pastille utilisé

III.2.4 Description des plaquettes :

La plaquette (figure III.5) choisie est en carbure de tungstène (WC) revêtue avec le titane (TIN).



Figure III.5 : Pastilles utilisées

III.2.5 Le microscope pour mesure de l'usure :

Pour la mesure de l'usure de l'outil nous avons utilisé un microscope optique (Figure III.6 et III.7).



Figure III.6 : Microscope optique pour la mesure d'usure.

Les caractéristiques du microscope sont les suivantes :

- Pouvoir grossissant : x 4 à x 400
- Focal 1, 10 et 100 au choix de l'utilisateur.

Les caractéristiques de la caméra G5 sont :

- Pouvoir grossissant : x 4
- Norme vidéo : Pal ou NTSC
- Résolution 5 millions de pixel
- Equilibrage des blancs : automatique ou manuel.

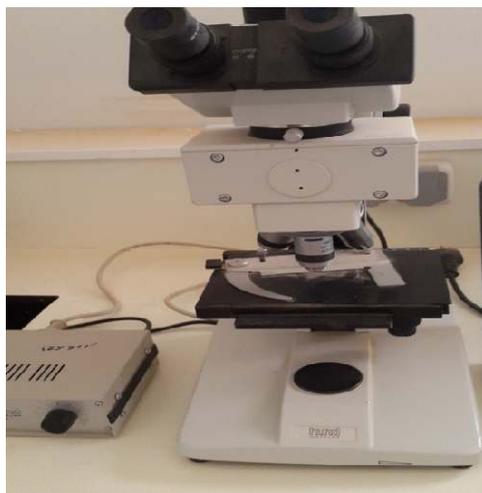


Figure III.7 : Microscope utilisé

III.3 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les équipements et le matériel utilisé pour la mesure de l'usure.

L'étude mathématique qui sera effectuée par la suite nous permet d'optimiser les conditions de coupe, de montrer l'influence de telles conditions sur le processus de coupe et de déduire laquelle des valeurs permettent de se rapprocher d'une usure nulle permettant d'augmenter la durée de vie de l'outil de coupe.

IV.1 Introduction :

Parmi les méthodes de simulations existantes, nous avons utilisé celle des plans d'expérience pour simuler nos résultats expérimentaux [22].

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 [23].

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

$$Y=f(x_i) \quad (4.1)$$

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur. Les principes fondamentaux de cette science seront indiqués et les principaux plans seront passés en revue.

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

Leur utilisation vise aux buts suivants :

- détermination des facteurs clés dans la conception d'un nouveau produit ou d'un nouveau procédé
- optimisation des réglages d'un procédé de fabrication ou d'un d'appareil de mesure
- prédiction par modélisation du comportement d'un procédé

Le scientifique est souvent amené à comprendre comment réagit un système en fonction des facteurs susceptibles de le modifier. Pour visualiser cette évolution, il mesure une réponse et va ensuite essayer d'établir des relations de cause à effet entre les réponses et les facteurs.

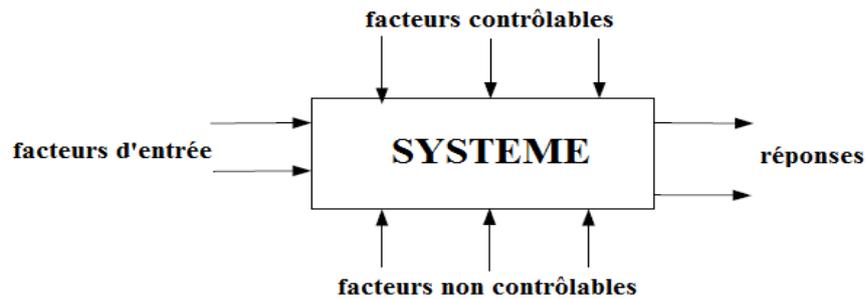


Figure IV.1 :L'environnement du système.

IV.2 Principaux Avantages Des Plans D'expériences :

Les principaux avantages de cette méthode sont :

- Diminution du nombre d'essais.
- Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs.
- Détection des interactions entre facteurs.
- Modélisation des réponses étudiées.
- Précision optimum des résultats.

La méthode des plans d'expériences permet une interprétation rapide et sans équivoque en fournissant un modèle expérimental précis du système étudié.

La méthodologie des plans d'expériences s'articule selon les trois étapes suivantes :

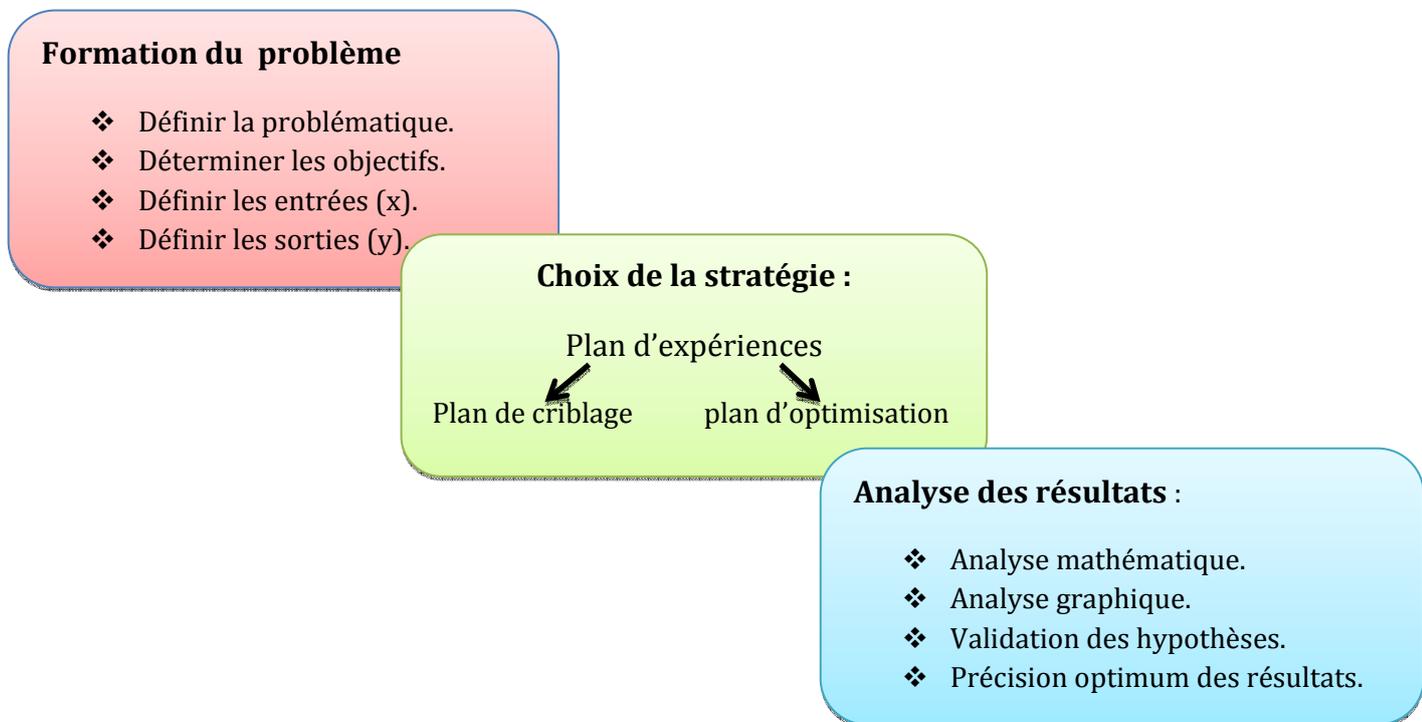


Figure IV.2 : mise en œuvre des plans d'expériences.

IV.3 Notion d'espace expérimental :

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la réponse, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme «variable» on utilisera le mot facteur. La réponse dépend donc de un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure IV.3). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée niveau. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut.

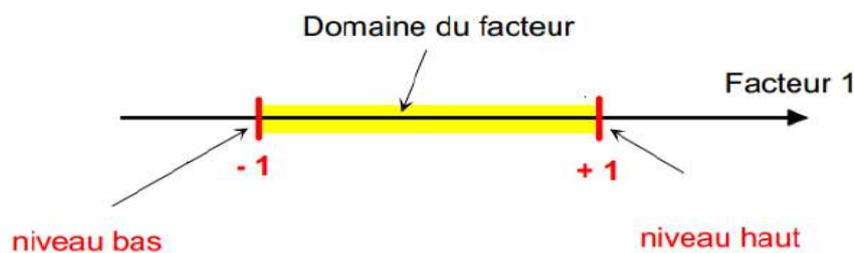


Figure IV.3: Le domaine du facteur [24].

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par $+1$. S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté.

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par $+1$. S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté.

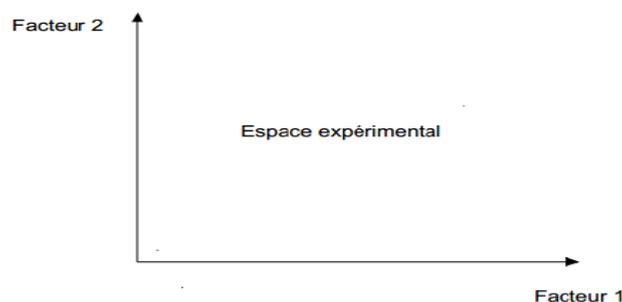


Figure IV.4: L'espace expérimental [24].

Le niveau x_1 du facteur 1 et le niveau x_2 du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (Figure IV.5). Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.

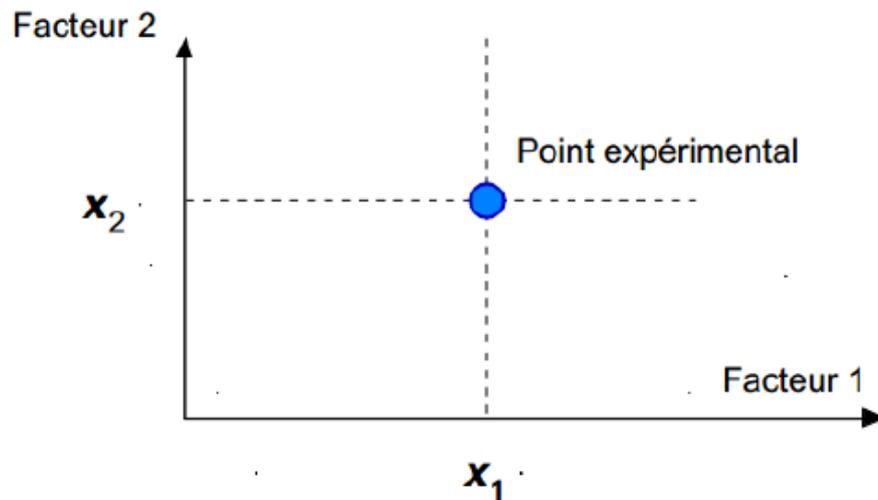


Figure IV.5: Les points expérimentaux [24].

Le regroupement des domaines des facteurs définit le domaine d'étude. Ce domaine d'étude est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies, est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude (Figure IV.6).

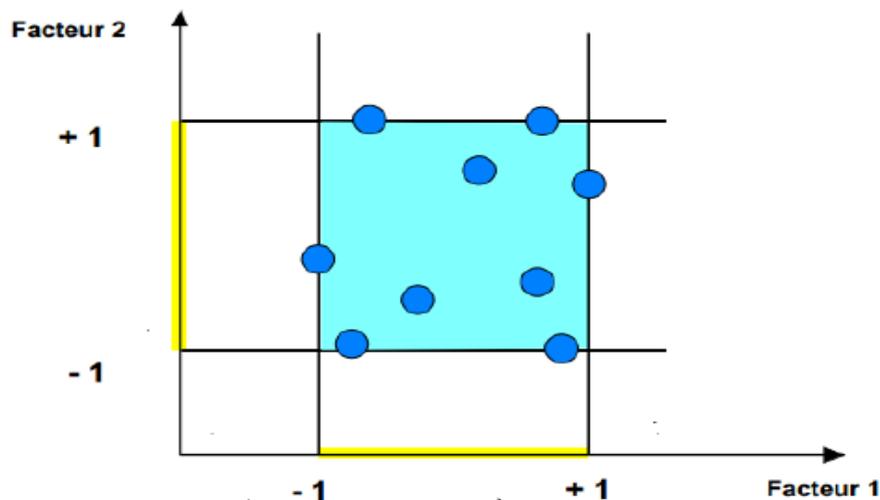


Figure IV.6 : Le domaine d'étude [24].

Les définitions qui ont été données s'appliquent bien aux variables continues. Mais il existe d'autres types de variables. Il y a les variables discrètes comme par exemple des personnes : Julien, Arthur, Louis, Simon et Nathan. On peut encore parler d'espace expérimental mais il n'aura pas les mêmes propriétés que l'espace des variables continues. Il y a également les grandeurs ordonnables comme, par exemple, des distances qui peuvent être courtes, moyennes et longues. Là aussi, la notion d'espace expérimental existe toujours mais cet espace possède des propriétés différentes des deux premiers [24].

IV.4 Notion de surface de réponse :

Les niveaux x_i représentent les coordonnées d'un point expérimental et y est la valeur de la réponse en ce point. On définit un axe orthogonal à l'espace expérimental et on l'attribue à la réponse. La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. Un plan à deux facteurs utilise un espace à trois dimensions pour être représenté : une dimension pour la réponse, deux dimensions pour les facteurs [24].

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 se localisent sur une surface appelée la surface de réponse (Figure IV.7).

Le nombre et de l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On cherche à obtenir la meilleure précision possible sur la surface de réponse tout en limitant le nombre d'expériences.

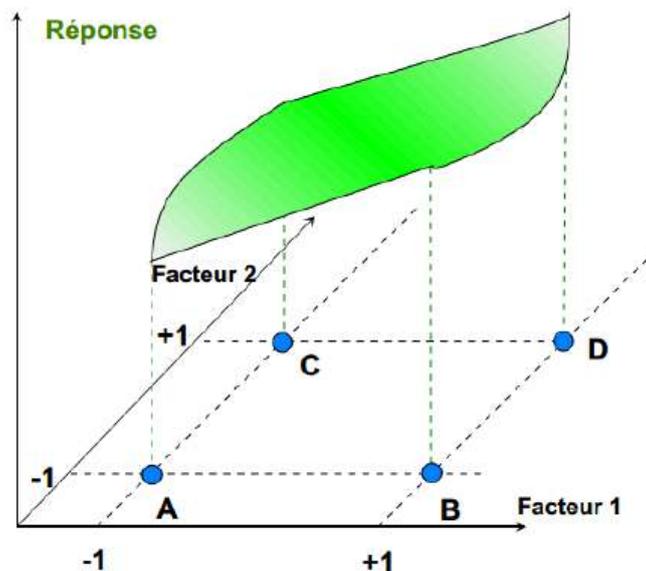


Figure IV.7 : la surface de réponses [25].

IV.5 Modélisation mathématique de la réponse :

En l'absence de toute information sur la fonction qui lie la réponse aux facteurs, on se donne a priori une loi d'évolution dont la formulation la plus générale est la suivante :

$$y = f(x_1, x_2, x_3 \dots \dots x_n) \quad (4.2)$$

Cette fonction est trop générale et il est d'usage d'en prendre un développement limité de Taylor-Mac Laurin, c'est-à-dire une approximation. Si les dérivées peuvent être considérées comme des constantes, le développement précédent prend la forme d'un polynôme de degré plus ou moins élevé :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ii} x_i^2 + \dots \quad (4.3)$$

- y : Est la grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur ; c'est la réponse ou la grandeur d'intérêt.
- x_i : Représente un niveau du facteur i .
- x_j : Représente un niveau du facteur j .
- $a_0 a_i a_{ij} a_{ii}$: Sont les coefficients du polynôme.

Ce modèle est appelé le modèle a priori ou le modèle postulé. Les modèles établis sont des modèles de prévision valables dans le domaine d'étude, domaine que l'on doit toujours préciser. Ce ne sont pas des modèles théoriques basés sur des lois physico-chimiques ou mécaniques. Dans quelques rares cas, il est possible d'utiliser des lois physiques théoriques connues [25].

IV.6 Application de la méthode des plans d'expériences :

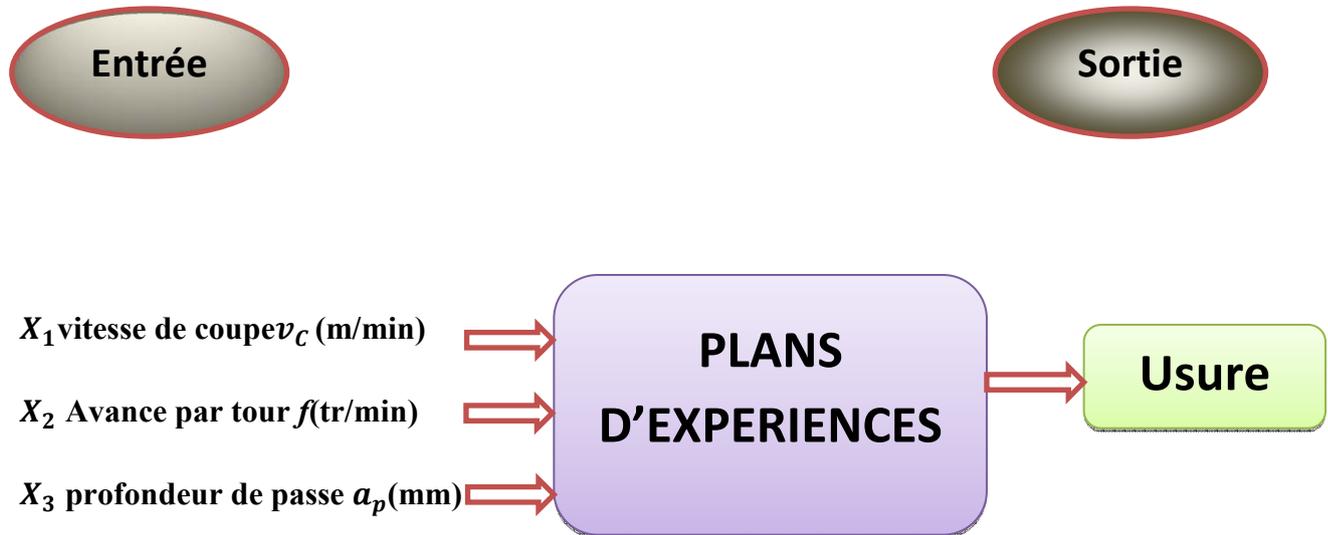
IV.6.1 Présentation du problème :

Après avoir pris connaissance du principe de la méthode des plans d'expériences ; nous savons maintenant que cette technique va nous permettre de répondre à nos exigences, dans le but de prévoir l'effet des conditions de coupe sur l'usure et modéliser la réponse étudiée, 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 l'usure. Dans ce cadre, il est judicieux d'appliquer une modélisation du comportement par la méthode des plans d'expériences.

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

Le but de cette méthode est de voir la variation de l'usure en fonction de trois paramètres de régime de coupe ($V_c, f; a_p$). Ces derniers représentent les paramètres d'entrée selon la (Figure IV.8) Au moyen d'un modèle mathématique qui sera établi, la réponse du système en l'occurrence l'usure en dépouille est représentée par « VB ».



(X)(Y)

Figure IV.8 : modèle de fonctionnement des paramètres de l'essai.

IV.6.2 Proposition d'un modèle :

L'usure de l'outil de coupe peut être exprimée en termes de paramètres de coupe à savoir la vitesse de coupe, l'avance et profondeur de passe. Sous sa forme générale :

$$Y = \text{fonction}(v_c, f, a_p) \quad (4.4)$$

L'optimisation de l'usure a été effectuée à l'aide de logiciels de plans d'expériences Design Expert 7.

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.

IV.7 Obtention et mesure des réponses :

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.

Les résultats expérimentaux des essais de chariotage de l'acier XC48 avec un outil en carbure de tungstène (WC) sont illustrés dans le tableau suivant :

N° essai	Facteur 1 V_c (m/min)	Facteur 2 F (tr/min)	Facteur 3 a_p (mm)	usure
1	220	0.08	2.5	0.163
2	220	0.08	1	0.141
3	90	0.08	2.5	0.098
4	90	0.08	1	0.073
5	220	0.20	2.5	0.287
6	220	0.20	1	0.190
7	90	0.20	2.5	0.109
8	90	0.20	1	0.082

Tableau IV.1 : Résultats de l'usure en dépouille (VB) en fonction des paramètres de coupe.

IV.8 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 l'usure lors d'une opération de chariotage, il prend la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 Y = & a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + a_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + a_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 \\
 & + a_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

Avec :

Y : représente la valeur de la réponse

x_1 : représente la valeur lue dans la matrice d'expérience (valeur de facteur 1)

x_2 : représente la valeur lue dans la matrice d'expérience (valeur de facteur 2)

x_3 : représente la valeur lue dans la matrice d'expérience (valeur de facteur 3)

a_0 : La valeur moyenne de l'effet des trois facteurs

a_1 : L'effet de la vitesse de coupe

a_2 : L'effet de l'avance

a_3 : L'effet de profondeur de passe

a_{12} : L'interaction entre a_1 et a_2

a_{13} : L'interaction entre a_1 et a_3

a_{23} : L'interaction entre a_2 et a_3

a_{123} : L'interaction entre a_1 ; a_2 et a_3

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

$$\begin{aligned}
 VB = & \\
 & -1.23932 \cdot 10^{-3} + 5.82906 \cdot 10^{-4} \cdot x_1 + 0.11389 \cdot x_2 + 0.039624 \cdot x_3 - 5.55556 \cdot 10^{-4} \cdot x_1 \cdot x_2 \\
 & - 2.64957 \cdot 10^{-4} \cdot x_1 \cdot x_3 - 0.26966 \cdot x_2 \cdot x_3 + 3.11966 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (4.6)
 \end{aligned}$$

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 l'usure en fonction des paramètres de coupe (Vc, f, ap).

IV.9 Domaine d'étude :

La Figure IV.9 montre le domaine d'étude des différents paramètres de coupe.

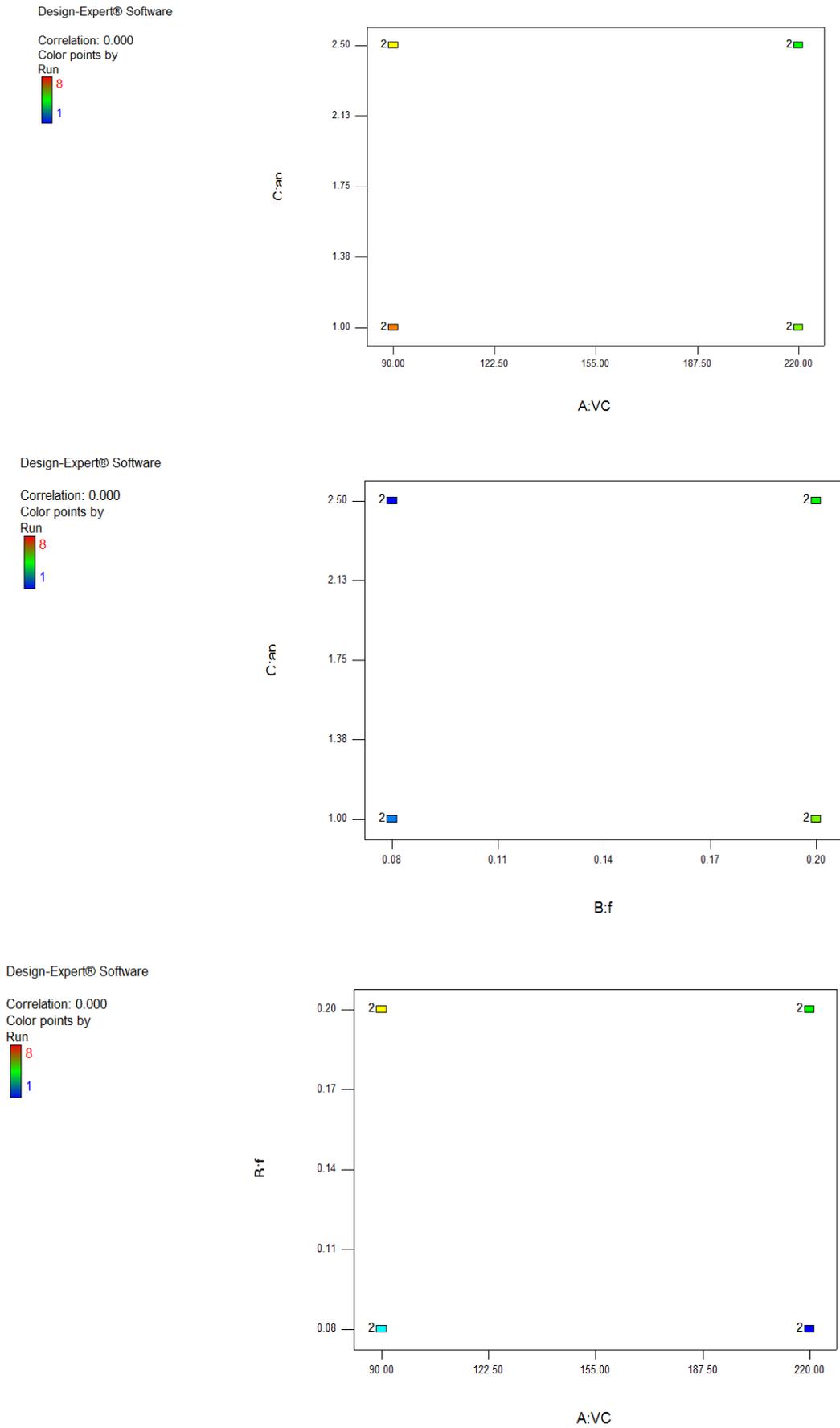


Figure IV.9 : Domaine d'étude des différents paramètres de coupe.

IV.10 Effet des paramètres de coupe sur l'usure :

(La figure IV.10) montre l'interaction et l'effet des paramètres de coupe sur l'usure : on remarque que la valeur de l'usure augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe et l'avance.

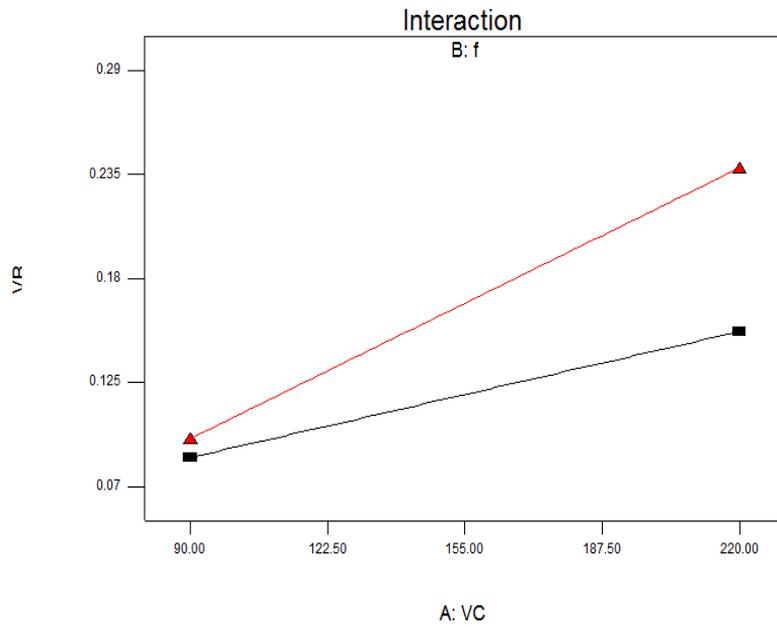
Design-Expert® Software

VB

- B- 0.080
- ▲ B+ 0.200

X1 = A: VC
X2 = B: f

Actual Factor
C: ap = 1.75



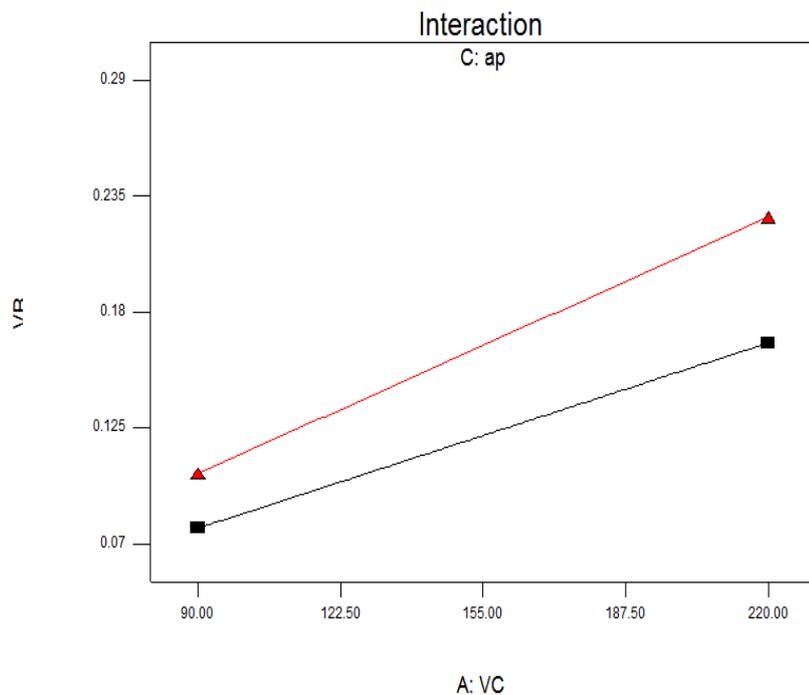
Design-Expert® Software

VB

- C- 1.000
- ▲ C+ 2.500

X1 = A: VC
X2 = C: ap

Actual Factor
B: f = 0.14



Design-Expert® Software

VB

- C- 1.000
- ▲ C+ 2.500

X1 = B: f
X2 = C: ap

Actual Factor
A: VC = 155.00

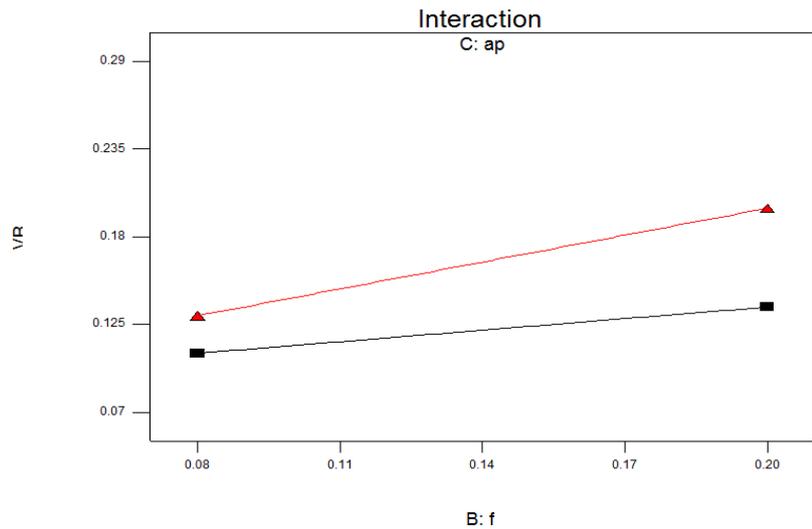


Figure IV.10 : effet et interaction des conditions de coupe sur l'usure.

IV.11 Les courbes d'iso réponse :

Les iso-réponses montrent clairement que quel que soit l'avance enregistrée, l'augmentation de la vitesse de coupe fait augmenter l'usure. A titre d'exemple (Figure IV.11): Pour une avance de 0.19 mm/tr, et une vitesse de 206.76m/min on obtient une usure de 0.220mm.

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 l'usure.

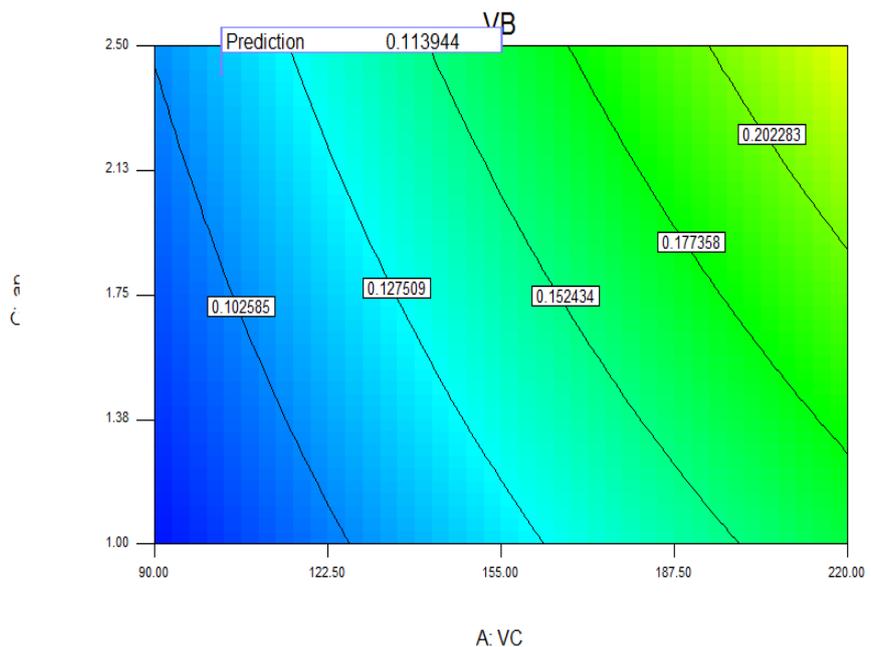
Design-Expert® Software

VB

- 0.287
- 0.073

X1 = A: VC
X2 = C: ap

Actual Factor
B: f = 0.14



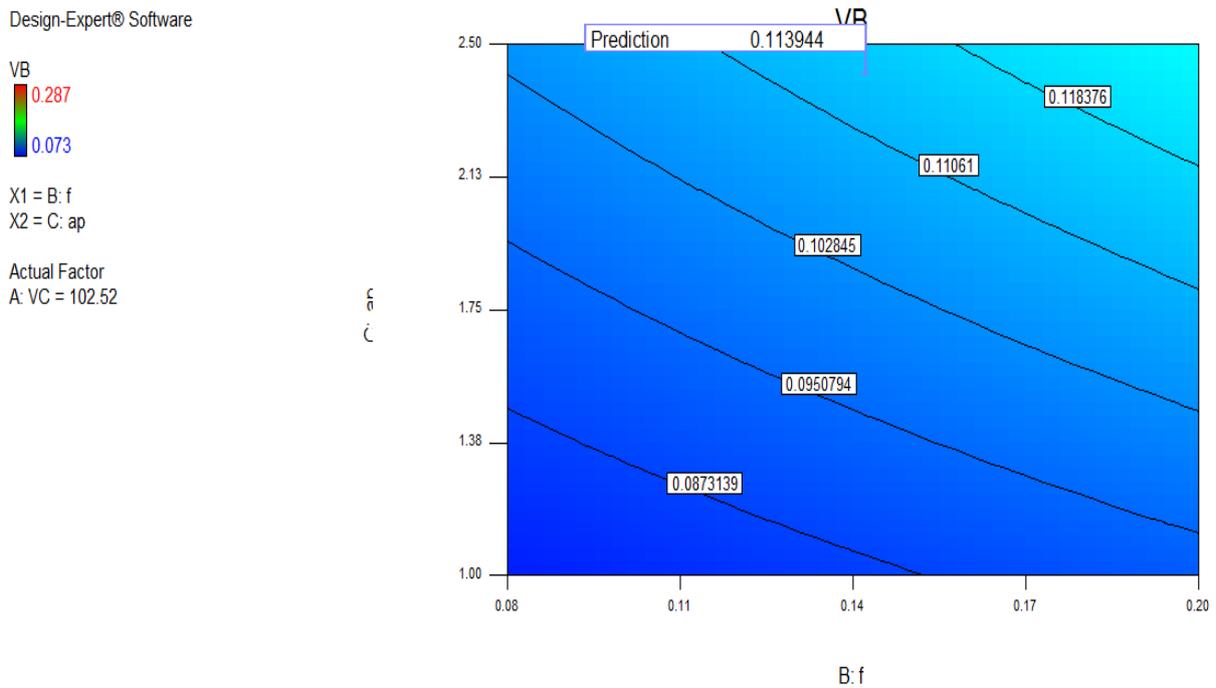
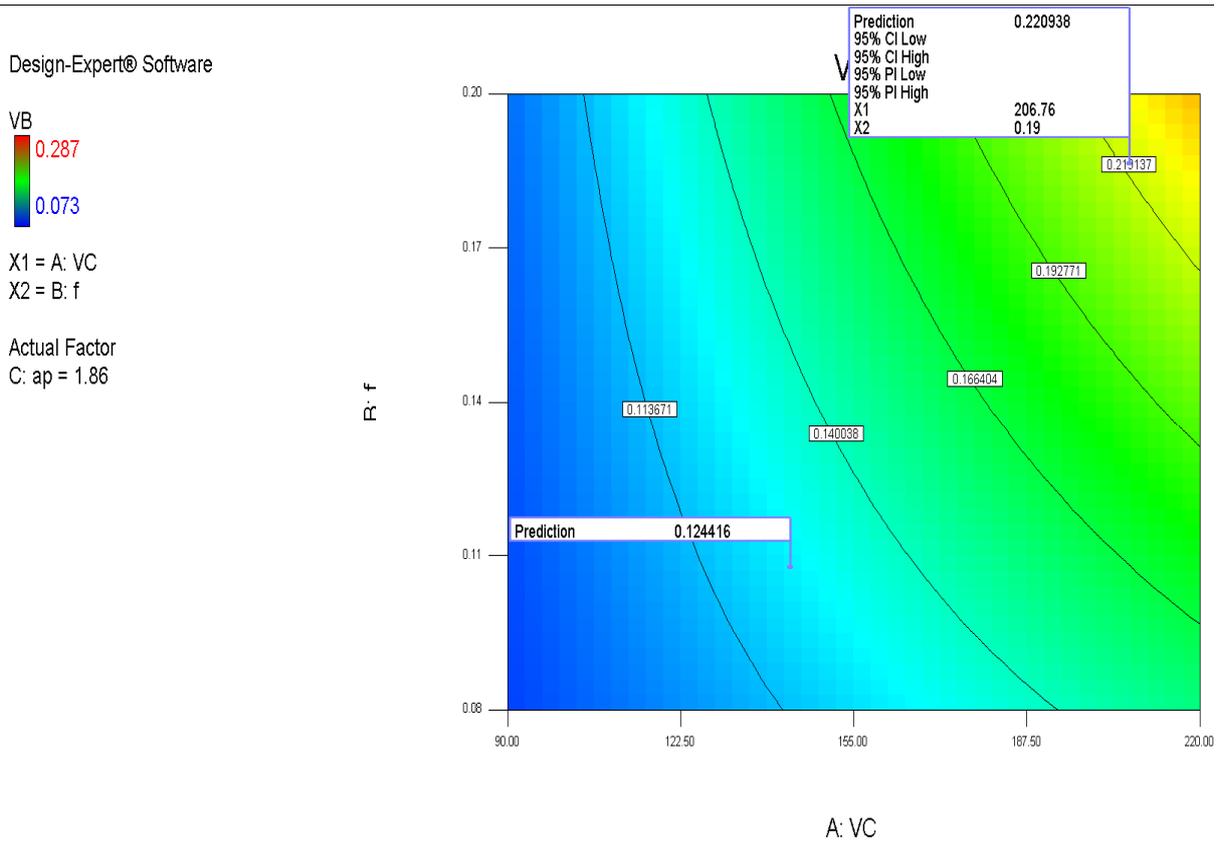


Figure IV.11 : courbes d'iso-réponses exprimant la variation de l'usure en fonction des paramètres de coupe

IV.12 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 (IV.12) illustre la variation de l'usure en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe. Elle permet de voir le comportement des trois facteurs utilisés sur la réponse qui est l'usure en dépouille (VB).

Design-Expert® Software

VB

0.287

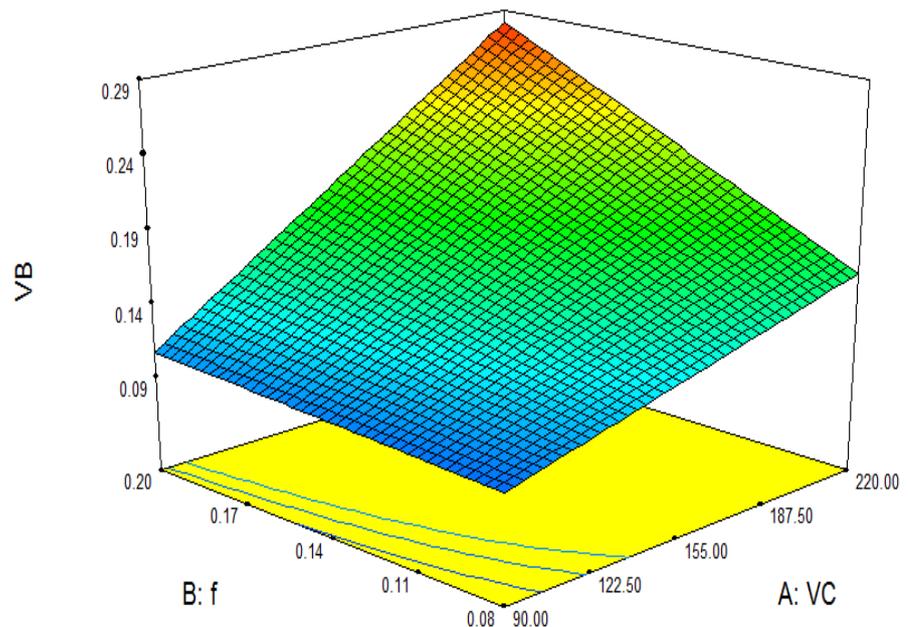
0.073

X1 = A: VC

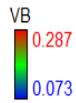
X2 = B: f

Actual Factor

C: ap = 2.42

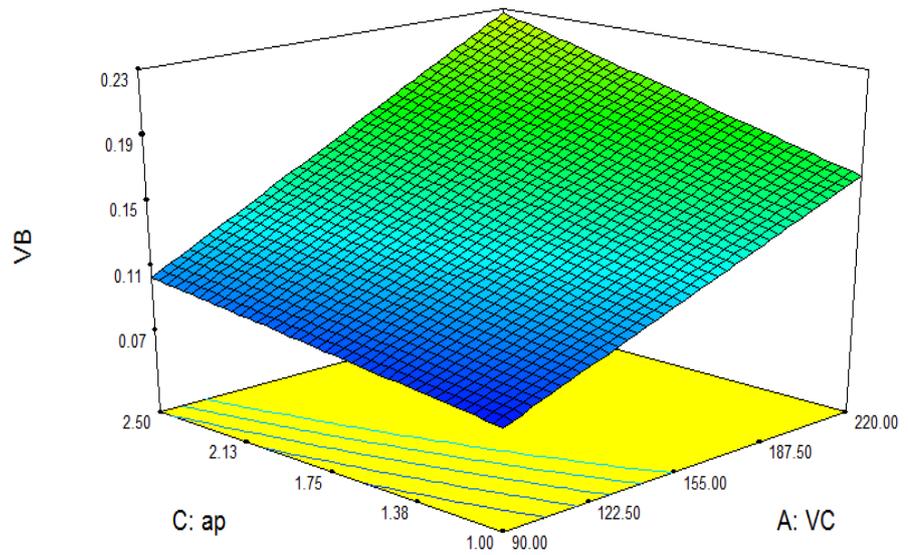


Design-Expert® Software



X1 = A: VC
X2 = C: ap

Actual Factor
B: f = 0.14



Design-Expert® Software



X1 = B: f
X2 = C: ap

Actual Factor
A: VC = 102.52

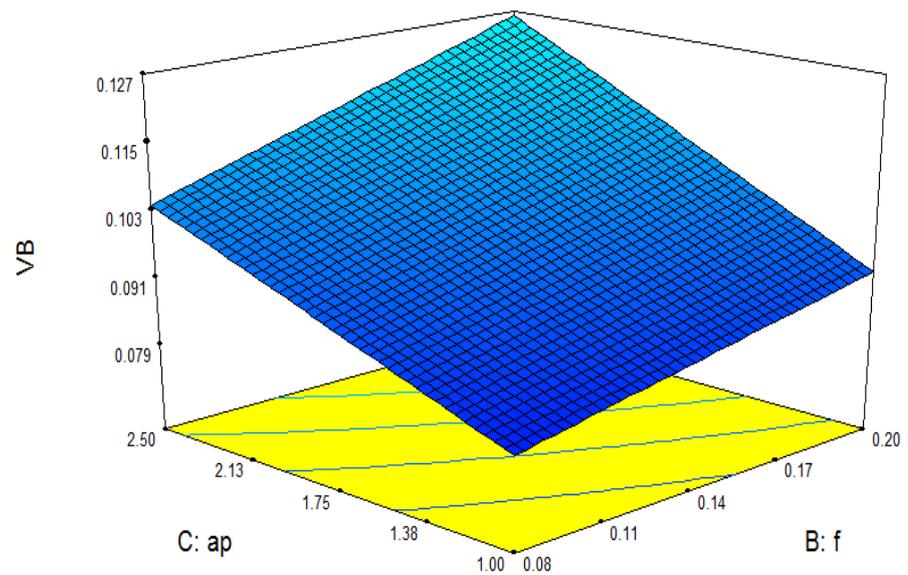
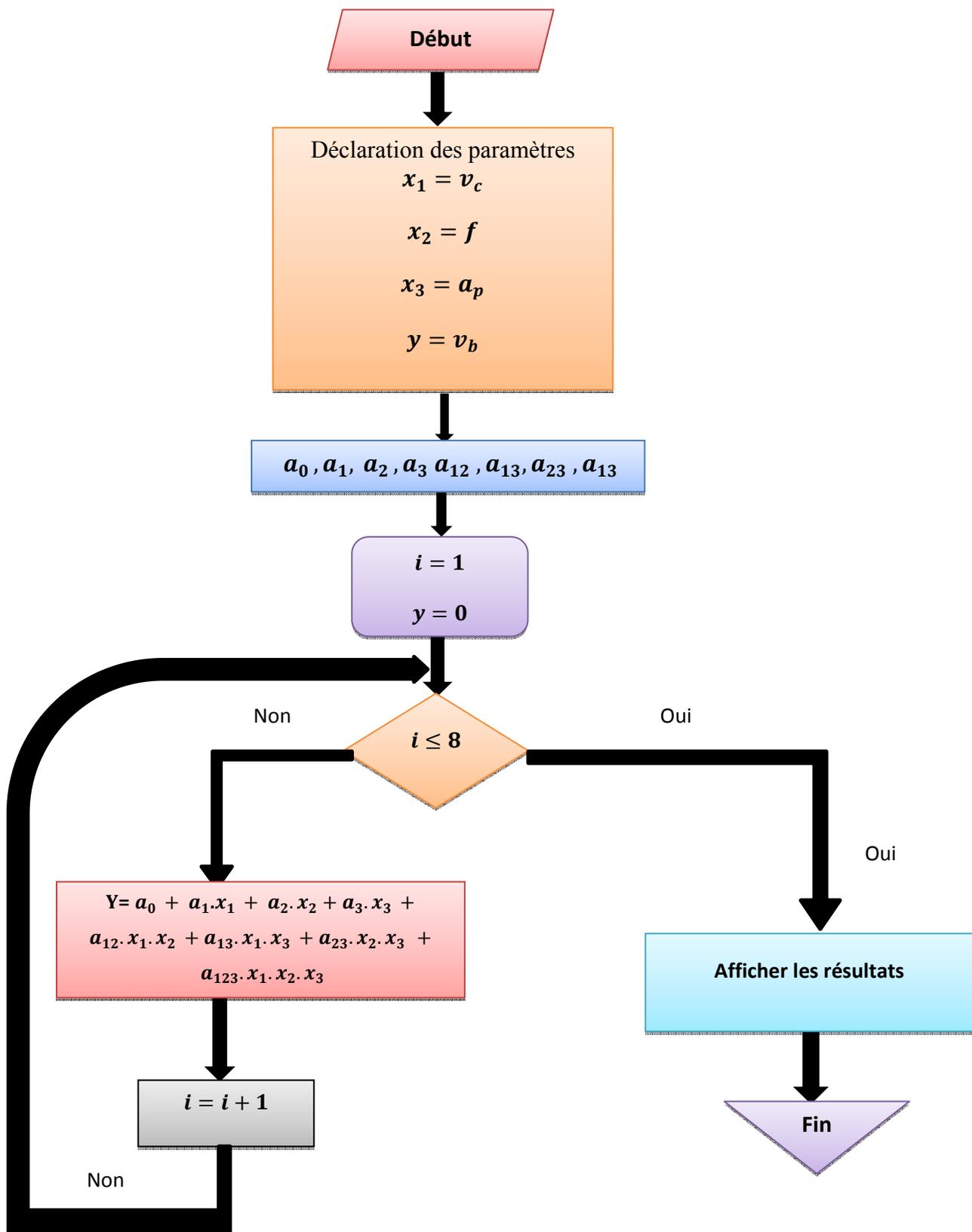


Figure IV.12 : courbe de réponse exprimant la variation d'usure en fonction des paramètres de coupe.

IV.13 Verification Des Resultats :

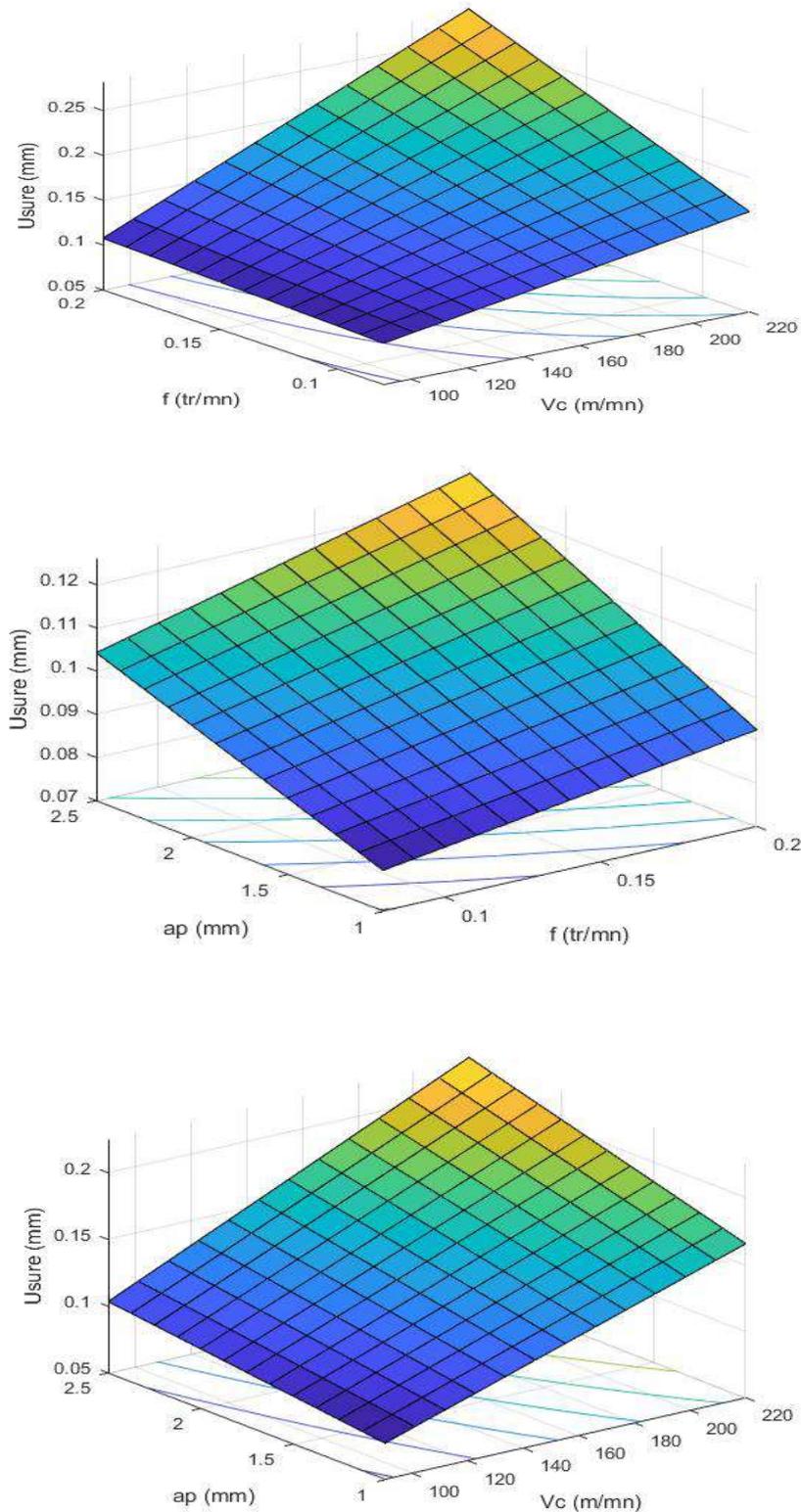
Dans le cadre de notre étude et pour vérifier le modèle développé par la méthode des plans d'expériences, une autre étape a été faite, cette dernière consiste à définir l'équation mathématique, les interactions entre les facteurs et les surfaces de réponses par le MATLAB.

L'organigramme utilisé est le suivant :

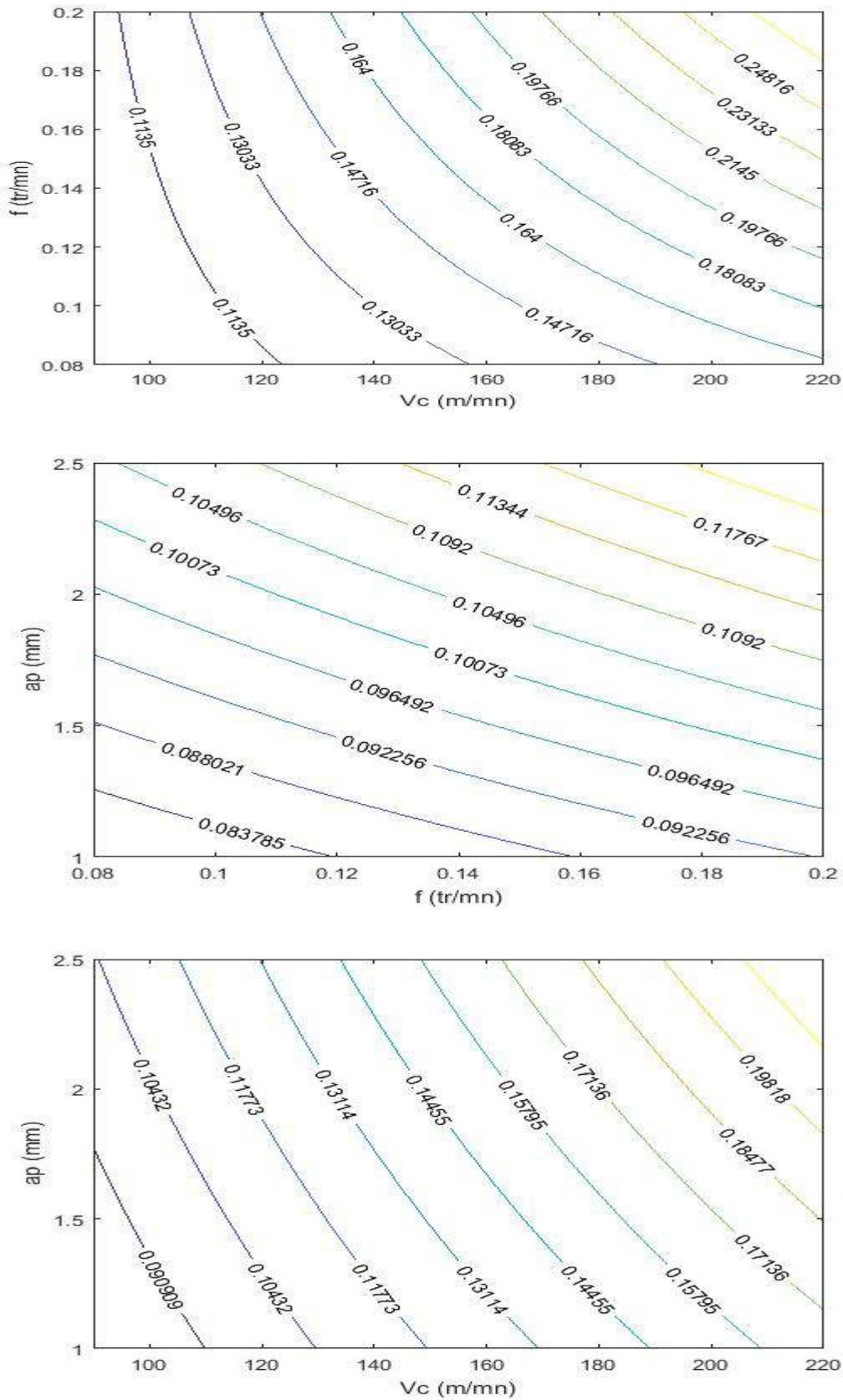


FigureIV.13: Organigramme utilisé.

Les résultats obtenus sont les suivants :



FigureIV.14 : courbe de réponse exprimant la variation d'usure en fonction des paramètres de coupe.



FigureIV.15 : Courbes d'iso-réponses exprimant la variation de l'usure en fonction des paramètres de coupe

L'effet de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur l'usure en dépouille VB de l'outil est clairement montré sur les figures (IV.14) et (IV.15).

Les résultats trouvés par programmation MATLAB, montrent que la méthode utilisée est favorablement comparée avec les résultats expérimentaux,

L'effet des paramètres du procédé sur l'usure est démontré. Ce processus est vérifié par la méthode des plans d'expériences et par la programmation MATLAB et globalement, les résultats sont les mêmes.

IV.14 Conclusion :

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 l'usure 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 l'usure.
- ✓ L'interaction des trois paramètres c'est-à-dire l'augmentation de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe résulte une augmentation de la réponse qui est l'usure.
- ✓ La vitesse de coupe est le facteur le plus influant sur la réponse.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail concerne la sélection de l'ensemble optimal des paramètres de coupe afin d'obtenir des faibles valeurs de l'usure de l'outil de coupe pendant l'opération de chariotage de l'acier XC48 qui va aider à l'augmentation de la durée de vie de l'outil de coupe.

La première partie de notre recherche bibliographique a montré qu'il est nécessaire de connaître l'évolution du procédé d'usinage ainsi que toutes les étapes importantes lors du processus de fabrication. Le procédé de tournage a été étudié du fait que notre travail s'est concentré sur une opération de ce procédé.

La deuxième partie de notre recherche bibliographique s'est consacrée sur l'usure des outils de coupe.

Dans le troisième chapitre, nous avons pu concevoir et monter un appareil de mesure de l'usure avec une précision acceptable, le microscope a permis de mettre en évidence l'évolution de l'usure lors de l'usinage de l'acier XC48.

Par la méthode des plans d'expériences, on conclut que :

- L'augmentation de chacun des facteurs influant comme : la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe font augmenter l'usure.
- Les faibles vitesses permettent de diminuer l'usure.

Bibliographie

- [1]. R. GHOUINI, « Amélioration des paramètres technologiques de coupe en tournage », Université d'Ouargla, 2011.
- [2]. R. BERGHIDA, « Impact de la signature des outils de coupe sur la variation de la Géométrie des pièces mécaniques », Université de Constantine, 2006.
- [3]. Meca0444-usinage-2017.
- [4]PASSERON, Tournage, Techniques de L'Ingénieur, BM7086, 1997.
- [5] J.P. CORDEBOIS, COLL, Fabrication Par Usinage, DUNOD, Paris 2003.
- [6] F. AMIER, Etude Comportementale de l'Outil – Pièce en Tournage, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran.
- [7] A. TOUMINE, Cours de Fabrication, Usinage par Enlèvement de Copeaux, 2007.
- [8]H. HADJSAD, Choix Optimal d'une Technique D'optimisation des Conditions de Coupe en Tournage, Mémoire de Master, Université KASDI MERBAH Ouargla, 2014.
- [9] «Cours de Fabrication», Génie Mécanique, 2005.
- [10] ROCDACIER, Cours sur le Tournage - Usinage Cours Technologie, 2011.
- [11] S. BENLAHMIDI, H. AOUCI, Tournage, TP Production/ 2ème année GM&P, Ecole Nationale Supérieure de Technologie.
- [12] Détermination Des Paramètres De Coupe, Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail-MAROC-.
- [13] M. RAHOU, F. SEBAA, Automatisation des Instruction d'Usinage Cas Paramètres de Coupe, Mémoire de Master Université, ABOU BAKER BELKAID, Tlemcen, 2007.
- [14]J. VERGNAS, Usinage, Technologie et Pratique, Génie Mécanique DUNOD, ISBN 2-04-011186-7, Bordas, Paris 1982.
- [15]A. Maurel-Pantel, « Etude expérimentale et modélisation par éléments finis du procédé de fraisage », Université de Franche-Comté, 2009
- [16] [http:// ::googleweblight.com/httpwww.cours-et-exercices.com/2016](http://googleweblight.com/httpwww.cours-et-exercices.com/2016) choix des matériaux de l'outil usinage .
- [17] M. DIEYE. Comportement dynamique du système Pièce - Outil -Machine (POM) en rectification plane passe profonde. PHD THESIS, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Metz, 2002.].
- [18] ABDELKRIM Mourad « Etude de l'influence de la température de coupe dans l'usure Des outils et sur les caractéristiques métallurgiques des Alliages usinés » UNIVERSITE DE BATNA 2008

- [19]. H. BEN ABDELALI, « Caractérisation et modélisation des mécanismes tribologiques aux Interfaces outils-pièces en usinage à sec de l'acier C45 », Ecole Centrale de Lyon, 2013.
- [20]KARA-ALI Djamal ABDELILLAHI, Contribution à la modélisation Coupe-paramètres d'usinage à l'aide de la Méthode de Traitement de Données par Groupe, Soutenu le : 26/10/2013
- [21] [Y. Ohbuchi and T. Obikawa. Adiabatic shear in chip formation with negative rake angle. International Journal of Mechanical Sciences, 47(9):1377–1392, September 2005.].
- [22] [M.G.Vigier, Pratique des plans d'expérience, les éditions d'organisation, pp 190, 1988]
- [.23] [Jacques Goupy, Plans d'expériences pour surfaces de réponse, Edition Dunod, 2001].
- [24] J. GOUPY, « LES PLANS D'EXPERIENCES », 2006.
- [25]. I. YAHIAOUI, « Les plans d'expériences Initiation à la construction et l'analyse des plans Factoriels complets à deux niveaux et du plan composite centré » Université A. MIRA de Bejaia, 2015.

PROGRAMME MATLAB:

```

vc=[220;220;90;90;220;220;90;90];
f=[0.08;0.08;0.08;0.08;0.2;0.2;0.2;0.2];
ap=[2.5;1;2.5;1;2.5;1;2.5;1];
usure=[0.163;0.141;0.098;0.073;0.287;0.190;0.109;0.0820];
X=[ones(size(usure)),vc,f,ap,vc.*f,vc.*ap,f.*ap,vc.*f.*ap];
a=X\usure;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
vvc=[90:32.5/3:220];
ff=[0.08:0.03/3:0.2];
aap=[1:0.375/3:2.5];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[A,B]=meshgrid(vvc,ff);
C=2.42;
Z=a(1)+a(2).*A+a(3).*B+a(4).*C+a(5).*A.*B+a(6).*A.*C+a(7).*B.*C+a(8).*A.*B.*C;
figure(1)
surfc(A,B,Z)
xlabel('Vc (m/mn)')
ylabel('f (tr/mn)')
zlabel('Usure (mm)')
pause
% [x,y]=contour(A,B,Z,10)
% clabel(x,y)
% pause
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[A,C]=meshgrid(vvc,aap);
B=0.14;
Z=a(1)+a(2).*A+a(3).*B+a(4).*C+a(5).*A.*B+a(6).*A.*C+a(7).*B.*C+a(8).*A.*B.*C;
figure(2)
surfc(A,C,Z)
xlabel('Vc (m/mn)')
ylabel('ap (mm)')
zlabel('Usure (mm)')
pause
% [x,z]=contour(A,C,Z,10)
% clabel(x,z)
% pause
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[B,C]=meshgrid(ff,aap);
A=102.52;
Z=a(1)+a(2).*A+a(3).*B+a(4).*C+a(5).*A.*B+a(6).*A.*C+a(7).*B.*C+a(8).*A.*B.*C;
figure(3)
surfc(B,C,Z)
xlabel('f (tr/mn)')
ylabel('ap (mm)')
zlabel('Usure (mm)')
% pause
% [y,z]=contour(B,C,Z,10)
% clabel(y,z)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

1/Design-Expert :

Design – Expert est un progiciel statistique de Stat-Ease. spécifiquement dédié à la conception d'expériences (DOE). Design – Expert propose des tests comparatifs, le criblage, la caractérisation, l'optimisation, la conception de paramètres robustes, la conception de mélanges et la conception combinée. Design – Expert fournit des matrices de test permettant d'analyser jusqu'à 50 facteurs. La signification statistique de ces facteurs est établie par analyse de variance (ANOVA). Des outils graphiques aident à identifier l'impact de chaque facteur sur les résultats souhaités et à révéler des anomalies dans les données.

Les plans d'expériences pour optimiser ses processus qualité et de fabrication Design-Expert nous offre les dernières techniques d'analyse de données multi variées et de plans d'expériences, permettant ainsi de réduire votre nombre d'expériences, et donc le temps et le coût de développement de vos produits tout en vous assurant les meilleurs procès. Il contient également des techniques d'analyse de données multi variées poussées, de fonctions d'optimisation élaborées et d'outils de visualisation sophistiqués (2D, 3D, rotations).

Design Expert est un logiciel de référence. Il possède des fonctionnalités poussées tout en étant très simple d'utilisation.

2/Des Outils Varies Et Performants :

1. Plans de criblage factoriels à deux niveaux :

Identifiez les facteurs prépondérants qui affectent vos procédés ou vos produits de façon à obtenir des améliorations en rupture.

2. Plans factoriels généraux :

Découvrez-la (les) meilleure(s) combinaison(s) de facteurs qualitatifs (catégoriels).

3. Plans en Surface de Réponse (Réponse Surface Mödling : RSM) :

Trouvez les réglages optimaux d'un processus pour atteindre des performances élevées.

3/Un logiciel intuitif :

Design-Expert permet de manipuler facilement des graphiques 3D pour voir les surfaces de réponse sous tous les angles. Utilisez votre souris pour positionner des étiquettes et explorer les courbes de niveaux sur les graphiques 2D interactifs. La fonction d'optimisation numérique

trouve l'allocation optimale pour des douzaines de requêtes en simultané ! Une visibilité accrue, une polyvalence des outils et des fonctions, et de nombreuses autres fonctionnalités toujours plus pertinentes permettent à Design-Expert 7 d'être simple à utiliser tout en étant puissant et complet.