

M1531.680

**Université du 8 mai 1945 – Guelma**  
**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département de Génie Mécanique**



**Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du**  
**diplôme de MASTER**

Option : Conception et Production Industrielle

Présenté par : KOUICEM AMIN

---

***Modélisation de l'usure et de la rugosité de***  
***surface lors de l'usinage de l'acier X2CrNi18-9***

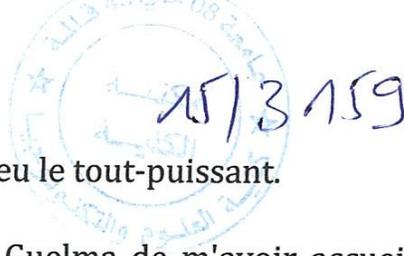
---

Sous la Direction de :

**Pr. YALLESE M.A.**

**Année universitaire 2014/2015**

# REMERCIEMENTS



Je remercie en premier Dieu le tout-puissant.

Merci à l'université de 08 Mai 1945 Guelma de m'avoir accueilli durant mes études universitaires, en particulier ma formation MASTER.

Je remercie le laboratoire LMS de l'université de Guelma, d'avoir mis à ma disposition les moyens qui ont permis la réalisation de ce travail.

Je remercie mon encadreur le Professeur *YALLESE Mohamed Athman* pour m'avoir encadré et fait confiance durant la réalisation de ce travail.

Enfin, je remercie tout le personnel technique et administratif du département de Génie Mécanique de l'université de Guelma. Je remercie tous ceux qui ont de loin ou de près ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

## Nomenclature

ANOVA	Analyse de la variance.
$a_p$	Profondeur de passe (mm).
CVD	Dépôt chimique vapeur.
$f$	Avance par tour (mm/tr).
Frés	Effort de coupe résultant (N).
$F_x$ ( $F_a$ )	Effort de coupe axial (N).
$F_y$ ( $F_r$ )	Effort de coupe radial (N).
$F_z$ ( $F_c$ )	Effort de coupe tangentiel (N).
$K_x$ ( $K_a$ )	Pression de coupe axiale ( $N/mm^2$ ).
$K_y$ ( $K_r$ )	Pression de coupe radiale ( $N/mm^2$ ).
$K_z$ ( $K_c$ )	Pression de coupe tangentielle ( $N/mm^2$ ).
KT	Profondeur d'un cratère (mm).
PVD	Dépôt physique vapeur.
$P_c$	Puissance de coupe (w).
$P$	Puissance absorbée par la machine (w).
$R_a$	Rugosité moyenne arithmétique ( $\mu m$ ).
RSM	Méthodologie de la surface de réponse.
$t$ ( $T_c$ )	Temps de coupe.
VB	Hauteur de l'usure en dépouille (mm).
$V_c$	Vitesse de coupe (m/min).
$\alpha$	Angle de dépouille principal (degré).
$\gamma$	Angle d'attaque (degré).
$\chi$	Angle de direction principal (degré).

# *Table des matières*

## CHAPITRE I

### ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I-1 Introduction	1
I-2 Introduction sur la coupe des métaux	1
I-3 Définition de l'usinabilité :	2
I-3-1 Critère d'évaluation l'usinabilité :	3
I-3-2 Facteurs influençant l'usinabilité	3
a) La résistance mécanique	3
b) Les caractéristiques thermiques	3
d) Les compositions chimiques	4
I-3-3 Méthodes d'essais pour la détermination de la tenue de coupe des outils	5
a) Essai d'usure de longue durée à vitesse constante	5
b) Essai d'usure à vitesse croissante:	5
I.4: Matériaux de coupe	5
I-4-1 Évolution des matériaux des outils de coupe	7
I-5 Revêtement pour outils coupants	8
I-5.1 Fonction d'un revêtement en usinage	9
I-5.2 Propriétés des revêtements	9
I-5.3 Types de revêtements	10
I.6-Endommagement des outils de coupe	13
I.6-1: Usure des outils de coupe	14
I.6.2: Formes d'usure	14
I.6.3 Usure des arêtes de coupe	15
a) Usure en dépouille	15
b) Usure en cratère	16
c) Arête rapportée	16
d) Usure en entaille	16
e) Déformation plastique	17
f) Usure en peigne	17
g) Ecaillage ou rupture de l'arête	17
I.7: Rugosité des surfaces usinées	18
I.7.1: Les principaux défauts des surfaces	18
I.7.2: Les principaux critères de rugosité	19
I-8 Usinage des Aciers inoxydables	20
I-8-1 Définition	20
I-8-2 Types d'aciers inoxydables	20
I-8-3 Rôle des éléments d'addition	21
I-8-4 Influence des propriétés physiques	21

a)Effet de la conductivité thermique	21
b)Rôle du coefficient de dilatation	23
c)Influence du coefficient de frottement	23
I-8-5 Usinage des aciers inoxydables	23
I-9 Les efforts de la coupe	24
I-9-1 Définition et intérêt de leur mesure :	24
I-9-2 Influence des différents facteurs sur les composantes de l'effort de coupe :	25
a)Les propriétés mécaniques du matériau à usiner	25
b)Influence de la profondeur de passe et l'avance	25
c)Influence de la vitesse de coupe :	26
d)Influence de l'angle d'attaque	26
e)Influence de l'angle de direction principale	26
f)Influence de matériau de coupe	26
g)Influence des l'usure en dépouille :	27
I-10- Travaux de recherches concernant l'usinage des aciers inoxydables	27
I-11 Conclusion	32
I-12 Position du problème	33

## **Chapitre II**

### **Procédure expérimental**

II-1 Introduction	35
II-2 Matériels utilisés	35
II-2-1 Machine-outil	35
II-2-2 Le matériau utilisé pour les essais d'usinage	35
II-2-3 Plaquette de coupe	38
II-2-4 Porte outil	39
II-2-5 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe	40
II.2.6. Microscope pour la mesure de l'usure en dépouille VB	43
II.2.7. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité	44
II-2-8 Autres équipements	45
II-3 Conditions de coupe	45
II.4. PROCEDURE EXPERIMENTALE	46
II.4.1. Essais par plans d'expériences	46
II.4.2. Plans d'expériences	47
II-5 Planification des expériences	51
II-5-1 Méthode de planification des expériences	51
II-6 Réponses et variables	53
II-7 Conclusion	53

## Chapitre III

### Étude de l'Usinabilité de l'acier X2CrNi18-9

III.1 Introduction	55
III-2 Essais réalisés	55
III-3 Evolution des efforts de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe	55
III-3-1 Influence de la vitesse de coupe	56
III-3-2 Influence de l'avance	57
III-3-3 Influence de la profondeur de passe	58
III-4 Evolution des pressions de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe	59
III-4-1 Influence de la vitesse de coupe	59
III-4-2 Influence de l'avance	60
III-4-3 Influence de la profondeur de passe :	61
III-5 Evolution de la rugosité en fonction des paramètres du régime de coupe	62
III-5-1 Influence de la vitesse de coupe	62
III-5-2 Influence de l'avance	63
III-5-3 Influence de la profondeur de passe	64
III-6 - Effet des conditions de coupe sur la puissance de coupe	65
III-6-1- Effet de la vitesse de coupe sur la puissance de coupe	65
III-6-2- Effet de l'avance sur la puissance de coupe	66
III-6-3- Effet de la profondeur de passe sur la puissance de coupe	67
III-7 Conclusion	67

## Chapitre IV

### Modélisation mathématique de l'usure VB et la rugosité de la surface par MSR

IV-1 Introduction	70
IV.2. TESTE DE VALIDITÉ DES MODÈLES	71
IV.3. OPTIMISATION	73
IV.4. Modélisation de l'usure en dépouille et de la rugosité de la surface en fonction des paramètres d'usinage	75
IV.4.1. Modélisation de la rugosité de surface Ra en fonction des paramètres d'usinage	77
a)Analyse de la variance pour la rugosité Ra	77
b)Facteurs influents	77
c)Analyse de régression : Ra en fonction de Vc, f et t	80
d.Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées	82
IV.4.2. Modélisation de l'usure en dépouille VB en fonction des paramètres de coupe	84
a)Analyse de la variance (ANOVA) pour l'usure en dépouille VB	84

b)Facteurs influents	85
c)Analyse de régression : VB en fonction de $V_c$ , f et t	87
d.Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées	89
IV.5. Optimisation des conditions de coupe pour VB et Ra	91
IV.6. Modélisation de la tenue (T) en fonction des paramètres d'usinage	94
a)Analyse de la variance pour la tenue (T)	94
b)Facteurs influents	95
c)-Analyse de régression : (T) en fonction de $V_c$ et f	97
d)Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées	98
IV.7. Optimisation des conditions de coupe pour la tenue (T)	99
IV-8. Conclusions	101

# Listes des figures

## Chapitre I

<b>Figure I-1</b>	<i>Processus de coupe et critères d'usinabilité</i>	2
<b>Figure I-2</b>	<i>Domaine d'emploi des divers matériaux à outil coupant [4]</i>	7
<b>Figure I-3</b>	<i>Augmentation de la productivité en usinage Acier.</i>	7
<b>Figure I-4</b>	<i>Augmentation de la productivité due à l'évolution des matériaux des Outils de coupe.</i>	8
<b>Figure I-5</b>	<i>représentation des exigences envers les revêtements et des paramètres à maîtriser pour répondre aux exigences.</i>	9
<b>Figure I-6</b>	<i>Principaux modes de déposition de revêtement pour outils-coupants</i>	10
<b>Figure I-7</b>	<i>Statistique sur l'évolution de l'utilisation relative des revêtements pour outils-Coupants</i>	12
<b>Figure I-8</b>		14
<b>Figure I-8-1</b>	<i>Usure par abrasion</i>	15
<b>Figure I-8-2</b>	<i>Usure chimique</i>	16
<b>Figure I-8-3</b>	<i>Usure par adhérence</i>	16
<b>Figure I-8-4</b>	<i>Usure par adhérence</i>	17
<b>Figure I-8-5</b>	<i>Usure thermique</i>	17
<b>Figure I-8-6</b>	<i>Usure thermique</i>	17
<b>Figure I-8-7</b>	<i>Usure mécanique</i>	18
<b>Figure I-9</b>	<i>Les différents défauts géométriques de la surface usinée</i>	19
<b>Figure I-10</b>	<i>Caractéristiques du profil [10].</i>	20
<b>Figure I-11</b>	<i>Distribution des sources de chaleur en coupe orthogonale</i>	22
<b>Figure I-12</b>	<i>Conductivité thermique des aciers inoxydables [11].</i>	23
<b>Figure I-13</b>	<i>Les composantes de l'effort de coupe.</i>	25
<b>Figure I-14</b>	<i>Influence de la vitesse de coupe sur l'effort de coupe</i>	26
<b>Figure I-15</b>	<i>L'influence de la vitesse de coupe et l'Avance sur la rugosité de surface de 4A-5A</i>	28
<b>Figure I-16</b>	<i>L'influence de la vitesse de coupe et l'avance sur les efforts de coupe 5A et 4A [14].</i>	28
<b>Figure I-17</b>	<i>de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance sur l'usure de l'outil de 5A et 4A [14].</i>	29
<b>Figure I-18</b>	<i>Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe a) AISI 304, b) AISI 316 [15].</i>	30
<b>Figure I-19</b>	<i>Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe a) AISI 304, b) AISI 316 [15].</i>	30
<b>Figure I-20</b>	<i>Evolution de la rugosité et l'usure en dépouille en fonction de la vitesse de coupe [16].</i>	31
<b>Figure I-21</b>	<i>Evolution de la rugosité et de l'usure en dépouille en fonction</i>	32

- Figure I-22** de la fréquence de rotation [17].  
L'usure en dépouille d'une céramique mixte à base d'alumine [32]  
lors l'usinage d'un acier inoxydable martensitique durci à  
60HRC [18].

## Chapitre II

<b>Figure II-1</b>	Tour parallèle modèle SN 40 C.	35
<b>Figure II-2</b>	Eprouvettes pour différents essais	36
<b>Figure II-3</b>	Plaquette GC2015.	38
<b>Figure II-4</b>	Brise copeau pour Plaquette GC2015.	39
<b>Figure II-4</b>	Porte outil utilisé.	39
<b>Figure II-5</b>	Montage du dynamomètre sur la table de la machine.	40
<b>Figure II-6</b>	Capteur d'effort de coupe <b>KISTLER</b> .	41
<b>Figure II-7</b>	Exemple d'acquisition du logiciel « <b>DYNOWARE</b> ».	42
<b>Figure II-8</b>	Chaîne de mesure des efforts de coupe.	43
<b>Figure II 9</b>	Microscope pour la mesure de l'usure	44
<b>Figure II-10</b>	Mesure de rugosité	44
<b>Figure II-11</b>	Domaine de variation du « facteur », constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut	48
<b>Figure II-12</b>	Définition de l'espace expérimental	49
<b>Figure II-13</b>	Niveaux des facteurs définissant des points expérimentaux dans l'espace expérimental	49
<b>Figure II-14</b>	Définition du domaine d'étude par l'expérimentateur	50
<b>Figure II-15</b>	Définition de la surface de réponse	50

## Chapitre III

<b>Figure III-1</b>	Exemple d'acquisition des efforts de coupe.	56
<b>Figure III-2</b>	Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse pour $f=0.12\text{mm/tr}$ , $a_p=0.5\text{mm}$	57
<b>Figure III-3</b>	Evolution des efforts de coupe en fonction de l'avance; $V_c=113.88\text{m/min}$ , $a_p=0.5\text{mm}$	58
<b>Figure III-4</b>	Evolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe; $V_c=112.31\text{m/min}$ , $f=0.12\text{mm/tr}$	59
<b>Figure III-5</b>	Evolution des pressions de coupe en fonction de la vitesse pour $f=0.12\text{mm/tr}$ , $a_p=0.5\text{mm}$	60
<b>Figure III-6</b>	Evolution des pressions de coupe en fonction de l'avance pour $V_c=113.88\text{m/min}$ , $a_p=0.5\text{mm}$	61
<b>Figure III-7</b>	Evolution des pressions de coupe en fonction de la profondeur de passe pour $V_c=150\text{m/min}$ , $f=0.08\text{mm/tr}$	62
<b>Figure III-8</b>	Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe pour $a_p=0.5\text{m/min}$ , $f=0.08\text{mm/tr}$	63
<b>Figure III-9</b>	Evolution de la rugosité en fonction de l'avance par tour pour $V_c=113.88\text{m/min}$ , $a_p=0.5\text{mm}$	64
<b>Figure III-10</b>	Evolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe pour $V_c=112.31\text{m/min}$ , $f=0.12\text{mm/tr}$	65

<b>Figure III-11</b>	: influence de la vitesse de coupe sur la puissance de coupe, $a_p=0.5\text{mm}$ , $f=0.12\text{mm/tr}$ .	66
<b>Figure III-12</b>	: L'effet de l'avance sur la puissance de coupe, [ $V_c=113.88\text{m/min}$ , $a_p=0.5\text{mm}$ ].	66
<b>Figure III-13</b>	: Effet de la profondeur de passe sur la puissance de coupe, [ $V_c=112.31\text{ m/min}$ , $f=0.12\text{ mm/tr}$ ].	67
<b>Chapitre IV</b>		
<b>Figure IV-1</b>	Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur la rugosité $R_a$	78
<b>Figure IV-2</b>	Graphes des effets de $V_c$ , $f$ et $t$ sur $R_a$ en fonction de $V_c$ , $f$ et $t$ .	79
<b>Figure IV.3</b>	Graphique des interactions des facteurs pour le critère de la rugosité ( $R_a$ ) en fonction de $V_c$ , $f$ et $t$ .	80
<b>Figure IV-4</b>	$R_a$ en fonction de $V_c$ , $f$ et $t$	82
<b>Figure IV-5</b>	.Micro-soudures adhérentes sur la surface usinée et arête rapportée collée sur la plaquette de coupe	82
<b>Figure IV-6</b>	Courbes des valeurs expérimentales et estimées de la rugosité $R_a$	84
<b>Figure IV-7</b>	Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur l'usure en dépouille	85
<b>Figure IV- 8</b>	Graphes des effets de $V_c$ , $f$ et $t$ sur $VB$	86
<b>Figure IV.9</b>	Graphique des interactions des facteurs pour le critère de la l'usure en dépouille $VB$ en fonction de $V_c$ , $f$ et $t$ .	86
<b>Figure IV-10</b>	$VB$ en fonction de $V_c$ , $f$ et $t$	88
<b>Figure IV-11</b>	Micrographe de $VB$ pour GC2015 ( $a_p= 0.15\text{ mm}$ ; $f= 0.08\text{ mm/rev}$ and $V_c = 280\text{ m/min}$ )	89
<b>Figure IV-12</b>	.Courbes des valeurs expérimentales et estimées de l'usure en dépouille $VB$	91
<b>Figure IV.13</b>	Résultat optimales des paramètres étudiés de la rugosité et de l'usure	93
<b>Figure IV.14</b>	Les valeurs des désirabilités des paramètres technologiques de la rugosité et de l'usure	93
<b>Figure IV-15</b>	.Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur la tenue ( $T$ )	95
<b>Figure IV-16</b>	Graphes des effets de $V_c$ , $f$ et $t$ sur la tenue ( $T$ ) en fonction de $V_c$ , $f$ .	96
<b>Figure IV-17</b>	Graphique des interactions des facteurs pour le critère de la tenue ( $T$ ) en fonction de $V_c$ et $f$ .	97
<b>Figure IV-18</b>	( $T$ ) en fonction de $V_c$ , $f$	98
<b>Figure IV-19</b>	.Courbes des valeurs expérimentales et estimées de la tenue ( $T$ )	99
<b>Figure IV.20</b>	Résultat optimales des paramètres étudiés	100
<b>Figure IV.21</b>	Les valeurs des désirabilités des paramètres technologiques	101

## Chapitre I

<i>Tableau I-1</i>	<i>Valeurs approximatives de la conductivité thermique pour une série de matériaux.</i>	<i>4</i>
<i>Tableau I-2:</i>	<i>Différents types de revêtements et leurs significations</i>	<i>11</i>
<i>Tableau I-3</i>	<i>Comparaison des propriétés des modes de déposition PVD et CVD.</i>	<i>12</i>
<i>Tableau I-4</i>	<i>Comparatif des propriétés de certains revêtements de + à +++++</i>	<i>13</i>

## Chapitre II

<i>Tableau II-1</i>	<i>Composition chimique de l'acier X2 Cr Ni 18-9.</i>	<i>37</i>
<i>Tableau II-2</i>	<i>Informations relatives à la plaquette de coupe</i>	<i>38</i>
<i>Tableau II-3</i>	<i>Caractéristiques de porte pluquette utilisé.</i>	<i>39</i>
<i>Tableau II-4</i>	<i>Conditions de coupe pour les essais des efforts de coupe et de la rugosité (essais courte durée).</i>	<i>45</i>
<i>Tableau II-5</i>	<i>Conditions de coupe pour les essais d'usure et de la rugosité en fonction du temps.</i>	<i>46</i>
<i>Tableau II-6</i>	<i>Conditions de coupe pour les essais de la tenue (T)</i>	<i>46</i>
<i>Tableau II-7</i>	<i>Matrice de planification pour un plan 33</i>	<i>52</i>

## Chapitre IV

<i>Tableau IV-1</i>	<i>Résultats de l'usure en dépouille et des critères de la rugosité en fonction des paramètres du régime de coupe et du temps (plan complet N=33).</i>	<i>76</i>
<i>Tableau IV-2</i>	<i>Résultats de l'analyse de variance pour Ra</i>	<i>77</i>
<i>Tableau IV-3</i>	<i>Pourcentage d'erreur entre les valeurs expérimentales et prédites pour Ra</i>	<i>83</i>
<i>Tableau IV-4</i>	<i>Résultats de l'analyse de variance pour l'usure VB</i>	<i>84</i>
<i>Tableau IV-5</i>	<i>Pourcentage d'erreur entre les valeurs expérimentales et prédites pour VB</i>	<i>90</i>
<i>Tableau IV-6</i>	<i>Conditions d'optimisation</i>	<i>92</i>
<i>Tableau IV-7</i>	<i>Optimisation par MSR de la rugosité et de l'usure</i>	<i>92</i>
<i>Tableau IV-8</i>	<i>Résultats de la tenue (T) en fonction des paramètres du régime de coupe (plan complet N=32).</i>	<i>94</i>
<i>Tableau IV-9</i>	<i>Analyse de la variance (ANOVA) pour la tenue (T)</i>	<i>94</i>
<i>Tableau IV-10</i>	<i>Pourcentage d'erreur entre les valeurs expérimentales et prédites pour (T) en fonction (Vc, f)</i>	<i>98</i>
<i>Tableau IV-11</i>	<i>conditions d'optimisation</i>	<i>99</i>
<i>Tableau IV-12</i>	<i>Optimisation par MSR de la tenue (T)</i>	<i>100</i>

## *Introduction générale*

---

### *Introduction générale*

Les aciers inoxydables sont largement utilisés dans les différents domaines à cause de leur résistance à la corrosion. Ils jouent un rôle très important dans l'industrie aéronautique, la fabrication des pièces médicales et dans l'agroalimentaire. Parmi les types de ces aciers il y a les martensitiques, les ferritiques et les austénitiques. Ces derniers présentent des difficultés lors de la coupe à cause de leurs caractéristiques distinguées telles que la haute ductilité, le taux d'écrouissage élevé et le coefficient de frottement élevé.

L'objectif de ce travail est l'étude de l'usinage de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 par la plaquette de coupe carbures revêtus GC2015. Dans une première partie, l'étude de l'évolution des efforts et pression de coupe, de la rugosité et en fonction des variables d'entrée (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe). La deuxième partie porte sur la détermination des modèles mathématiques traduisant l'évolution des différents phénomènes de la coupe en fonction de paramètres du régime de coupe.

Le mémoire de Master réalisé dans le cadre de mon projet de fin d'étude est structuré comme suite :

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique sur la coupe des métaux et sur un état d'art concernant l'usinage des différents aciers inoxydables en se basant sur les divers articles, revues et thèses. Dans ce chapitre, nous avons présenté une introduction sur l'usinabilité et la coupe des métaux, suivie par l'usinage des aciers inoxydables, les matériaux de coupe et leurs caractéristiques et en dernier lieu nous avons présenté les différents phénomènes intervenant dans de la coupe.

Dans le deuxième chapitre nous avons défini une méthodologie de travail qui repose sur la planification des expériences. Nous avons présenté les conditions de coupe ainsi que les équipements et le matériel de mesure utilisés.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté les résultats des différents essais réalisés tels que :

## *Introduction générale*

---

- L'évolution des efforts et des pressions de coupe en fonction des paramètres de coupe ( $f$ ,  $V_c$ ,  $a_p$ ) ;
- L'évolution de la rugosité en fonction des éléments du régime de coupe ( $f$ ,  $V_c$ ,  $a_p$ ).

Dans le quatrième chapitre nous avons présenté une étude statistique (analyse de variance, interactions) basée sur la méthodologie de surface de réponse et cela dans le but de déterminer des modèles mathématiques qui permet à la prédiction de la rugosité, et de l'usure en dépouille cela en fonction des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $T_c$ ).

En fin, nous avons fait une conclusion générale suivie d'une liste de références bibliographiques.

*CHAPITRE I*  
*ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE,*  
*USINAGE DES ACIERS*  
*INOXYDABLES*

### **I-1 Introduction**

L'interaction de l'outil de coupe avec la pièce, dans le but de l'enlèvement de la matière est appelée « usinage ». L'usinage est effectué par la machine, l'outil de coupe et le système de fixation. Un usinage plus rapide et plus efficace est très souhaitable et peut mener à l'épargne du temps et de l'argent. L'efficacité du procédé de l'enlèvement de la matière dépend de nombreux facteurs; parmi eux est l'outil de coupe, vitesses de coupe, la géométrie de l'outil, la matière à usiner et le fluide de refroidissement qui est employé dans le processus.

Pour atteindre une productivité exceptionnelle et des coûts de production réduits, les fabricants ont proposé une large gamme des outils revêtus recommandée pour l'usinage des aciers inoxydables, ces outils de coupe sont plus répandus par rapport aux autres non revêtus à cause de leur longue durée de vie et leurs performances considérables. Dans les opérations du tournage continu, la température de la plaquette rapportée atteint 700°C et plus. On a formé une idée que ces problèmes pourraient être allégés dans une certaine mesure en diminuant la génération de la chaleur, ce qui peut être obtenu en abaissant le frottement et en maintenant la résistante à l'usure stable.

### **I-2 Introduction sur la coupe des métaux**

Il est important de délimiter clairement le domaine de la coupe des métaux et celui très voisin de l'étude de l'usinabilité. La coupe des métaux a pour but d'étudier l'influence de différents facteurs intervenants dans le processus de la coupe sur le comportement d'un matériau (vitesse de coupe, profondeur de passe, avance, arrosage....) en utilisant des outils de compositions variées (acier fondu, acier rapide, carbure, céramique, nitrure de bore cubique CBN) et de géométries différentes.

Au contraire, l'étude de l'usinabilité a pour but de comparer le comportement de différentes matières. Celles-ci étant usinées selon une même méthode d'usinage (tournage par exemple) dont des conditions de coupe toujours identiques à elles-mêmes, à l'aide du même outil tant au point de vue de la composition chimique et traitement thermique qu'au point de vue leur forme et leur affûtage.

### I-3 Définition de l'usinabilité :

L'usinabilité est la capacité d'un matériau M1 à être usiné par un matériau usinant M2. Les critères pouvant permettre d'évaluer l'usinabilité d'un matériau sont nombreux et dépendent non seulement du type d'opération, mais aussi de l'objectif de l'usineur. L'usinabilité peut être évaluée à partir d'une combinaison des paramètres suivants :

- L'évolution des efforts de coupe et de la puissance consommée
- Le débit copeaux
- La durée de vie des outils
- La productivité
- L'intégrité de surfaces

La figure I-1 nous montre une présentation générale de cette notion.

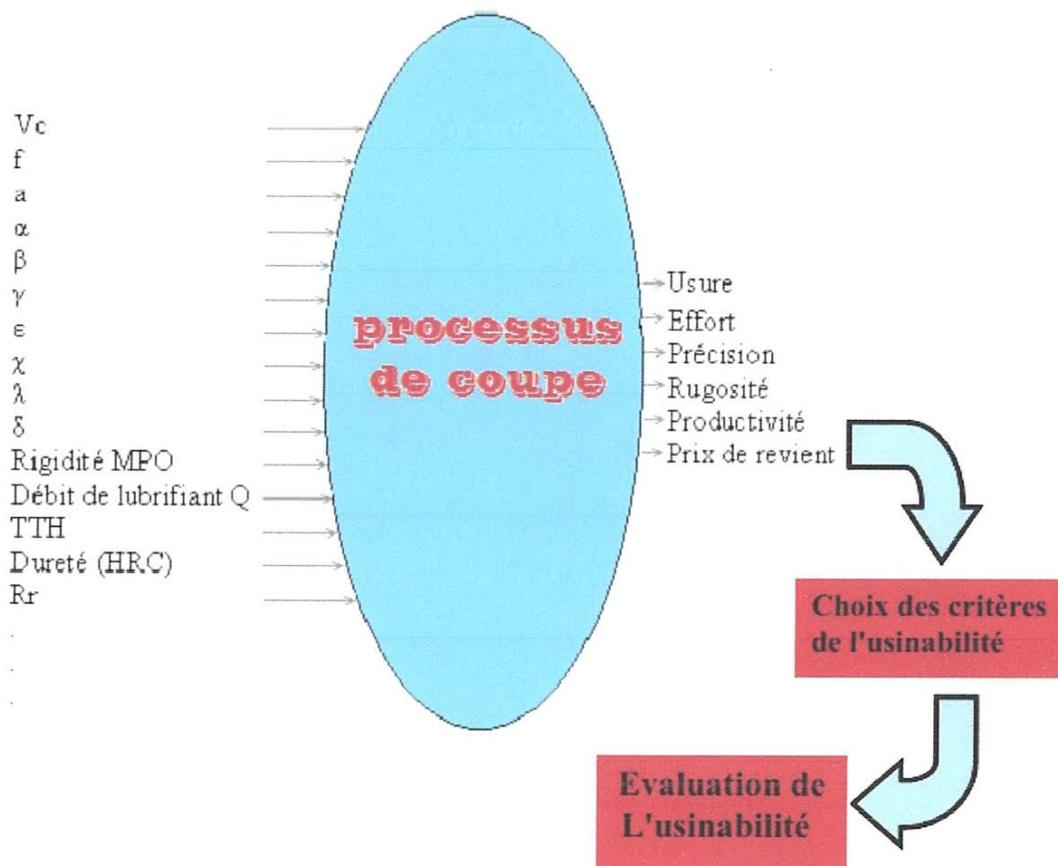


Figure I-1: Processus de coupe et critères d'usinabilité

La notion d'usinabilité dépend donc d'un critère choisi par l'usineur mais reste néanmoins toujours liée à la production au moindre coût et/ou à la meilleure qualité pièce [1].

### **I-3-1 Critère d'évaluation l'usinabilité :**

Les critères pouvant permettre d'évaluer l'usinabilité d'un matériau sont nombreux et dépendent non seulement du type d'opération, mais aussi de l'usineur. Cette notion d'usinabilité reste néanmoins toujours liée à la production au moindre coût. Les principaux paramètres pris en compte lors de la caractérisation de l'usinabilité sont: [2]

- ❖ la durée de vie des outils, éventuellement l'évolution de leurs usures au cours du temps ;
- ❖ les conditions de coupe ;
- ❖ les efforts de coupe et la puissance consommée par la coupe ;
- ❖ le fractionnement du copeau ;
- ❖ l'état de surface obtenu sur la pièce, dont la rugosité ;
- ❖ la productivité.

### **I-3-2 Facteurs influençant l'usinabilité**

#### **a) La résistance mécanique**

On pense couramment que la résistance mécanique, ou la dureté qui lui est équivalente constitue un indice d'usinabilité significatif. En réalité, des aciers dont la dureté est rendue plus élevée par un traitement de trempe et revenu au lieu d'un traitement de recuit, peuvent avoir une usinabilité meilleure dans l'état le plus dur. Ce résultat est valable pour certaines résistances aux environs 800 MPa mais ne peut être étendu aux résistances plus élevées de l'ordre de 1100MPa. On rencontre alors des difficultés d'usinage dues à la résistance élevée du métal à la déformation [3].

#### **b) Les caractéristiques thermiques**

Le *tableau I-1* présente la conductivité thermique de quelques matériaux. Cette caractéristique est en relation étroite avec l'usinabilité car les aciers qui ont une conductivité réduite ne dissipent pas rapidement la chaleur générée lors de la coupe, ce

qui conduit à la concentration de la chaleur au niveau du contact pièce-outil-copeau et par conséquent à l'usure accélérée de l'outil de coupe.

<i>Matériau</i>	<i>Conductivité thermique, W/(m.°K)</i>
Acier inoxydable	12.11 ~ 45.0
Plomb	35.3
Aluminium	200
Or	318
Cuivre	380
Argent	429
Diamant	900 ~ 2320

*Tableau I-1 Valeurs approximatives de la conductivité thermique pour une série de matériaux.*

#### **d) Les compositions chimiques**

L'élément le plus important est le carbone. A basse teneur, l'acier composé de ferrite, est difficile à usiner. L'augmentation du pourcentage (% C) crée des solutions de continuité dans la matière de ferrite par formation de plages de perlite. On atteint un optimum d'usinabilité avec l'acier demi-dur à 0.35 % de carbone. Une augmentation supplémentaire de la teneur en carbone rend l'acier de plus en plus dur et moins usinable.

Le manganèse n'agit pas de façon sensible tant qu'il n'est pas en proportion notable. A forte teneur, il favorise l'écrouissabilité et diminue l'usinabilité. Les éléments d'alliages usuels, comme le nickel ou le chrome n'ont que peu d'influence aux teneurs présentes dans les aciers de construction industriels faiblement alliés. A forte teneur, dans le cas d'aciers spéciaux ils agissent sur la structure et l'écrouissabilité. Les aciers inoxydables de type 18/8 (18% Cr et 8% Ni) par exemple, sont austénitiques, très écrouissables et difficiles à usiner.

### I-3-3 Méthodes d'essais pour la détermination de la tenue de coupe des outils

#### a) Essai d'usure de longue durée à vitesse constante

Pour des conditions de coupe déterminées, on effectue des essais à des vitesses de coupe différentes, et on relève la durée de vie de l'outil, on effectue ainsi plusieurs essais. Cette méthode classique est très sûre, mais elle est assez longue et laborieuse et exige une quantité assez considérable de matière à usiner et plusieurs outils.

#### b) Essai d'usure à vitesse croissante:

Afin d'abrèger la durée des essais et réduire la consommation du métal, on fait travailler l'outil jusqu'à détérioration de l'arête (ou jusqu'à un degré d'usure déterminé), avec des vitesses croissantes suivant une loi bien déterminée:

- croissance continue (par exemple: dressage sur tour d'une face plane, l'outil avance radialement) ;
- la croissance peut être obtenue par chariotage conique ;
- ou croissance par paliers, si le tour est équipé d'un variateur de vitesse.

### I.4: Matériaux de coupe

Les principales matières utilisées pour les outils de tournage modernes sont les suivantes:

- carbures revêtus (GC).
- carbures non revêtus (C).
- cermets (CT).
- céramiques (CC).
- nitrures de bore cubiques (CB).
- diamants polycristallins (CD).

Les **carbures non revêtus** (C) sont obtenus par frittage (métallurgie des poudres) de substance dure (carbures de tungstène, de titane...) et de substance liante (cobalt...) qui confère sa ténacité à la plaquette. Ces carbures non revêtus sont aujourd'hui utilisés dans des opérations spéciales, hors du domaine standard.

Les **carbures revêtus** sont recouverts d'une couche de quelques micromètres de nitrure ou de carbure de titane, ou encore d'oxyde d'aluminium. Ces revêtements, en réduisant les frottements copeau/outil et pièce/outil, améliorent très nettement les possibilités des outils. Ils sont les plus utilisés dans un très grand

nombre d'opérations de tournage, pour tous types d'usinage et pour une grande diversité de matières de pièces. C'est donc le choix à envisager en priorité pour la plupart des opérations d'usinage.

Les **cermets** sont des carbures à base de titane, liés au nickel et/ou au cobalt. Ils conviennent pour l'ébauche légère et la finition dans des conditions favorables, en ce qui concerne la pièce et la machine-outil. La finition est leur spécialité, avec pour caractéristique un état de surface de haute qualité.

Les **céramiques (CC)** constituent un éventail de nuances adaptées à une gamme étendue d'opérations. Cela va de la fonte et de l'acier à l'usinage hautement spécialisé de matières réfractaires et d'aciers trempés. Le besoin de rectification, par exemple, peut être éliminé lorsqu'on recourt aux plaquettes céramiques pour le tournage extrêmement productives quand elles sont utilisées à bon escient, elles exigent toutefois un contexte d'usinage précis en matière de stabilité, de conditions de coupe, d'arête de coupe et de type de coupe. Les plaquettes céramiques sont conçues pour un taux élevé d'enlèvement de matière dans les situations où la précision de cotes et la qualité du fini de surface doivent demeurer inchangées tout au long de la durée de vie de l'outil. Cependant, elles ne conviennent pas pour certaines matières.

Le **nitride de bore cubique (CB)** est une matière très dure, adaptée au tournage d'aciers trempés, de fontes en coquille et d'alliages à base de nickel ou de cobalt. Les impératifs sont ici très rigoureux au niveau des conditions de coupe et de l'arête de coupe. La productivité et la longévité sont nettement supérieures à celles des plaquettes en céramiques et carbures, lorsqu'elles sont utilisées correctement. Les plaquettes en nitride de bore cubique sont destinées en premier lieu à la finition.

Les **diamants polycristallins** ont un domaine d'utilisation complètement différent, étant donné qu'ils sont totalement inappropriés pour les métaux contenant du carbone. Ils sont utilisés en finition et demi-finition pour les métaux non ferreux et les matières non métalliques. La figure I-2 donne l'affectation principale de ces

matières suivant le type de matériau usiné. On peut aussi récapituler les domaines d'emploi des différents matériaux d'outils (en incluant l'acier rapide) [4].

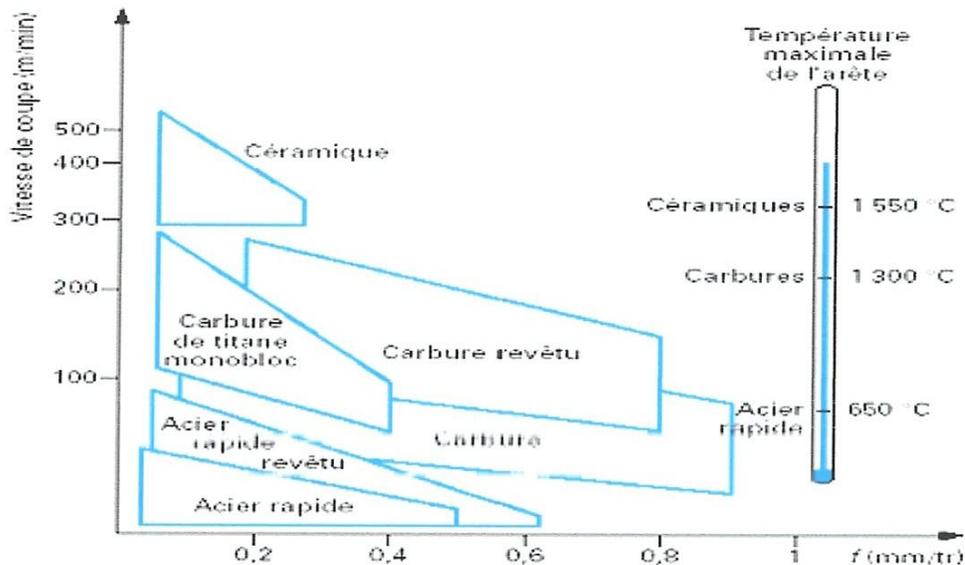


Figure I-2: Domaine d'emploi des divers matériaux à outil coupant [4]

#### I-4-1 Évolution des matériaux des outils de coupe

L'évolution des matériaux constituant les outils de coupe a été une source de gain de productivité très importante pour l'industrie. Elle a entraîné, au cours du XXIème siècle, un doublement de la productivité tous les dix ans : figures 03 et 04 [5].

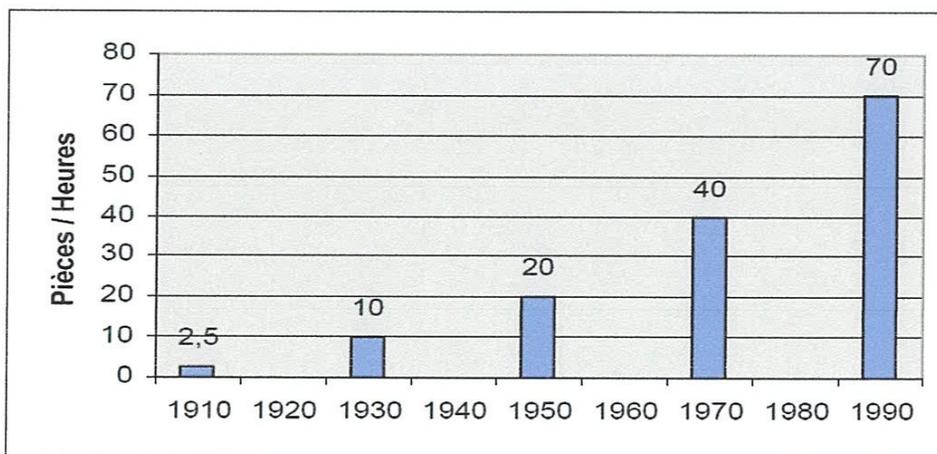


Figure I-3: Augmentation de la productivité en usinage d'acier.

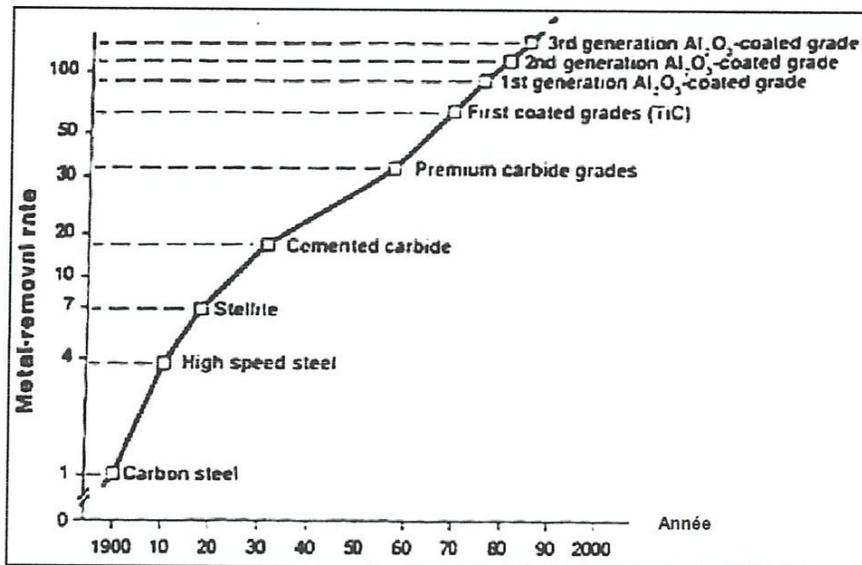


Figure I-4 : Augmentation de la productivité due à l'évolution des matériaux des Outils de coupe.

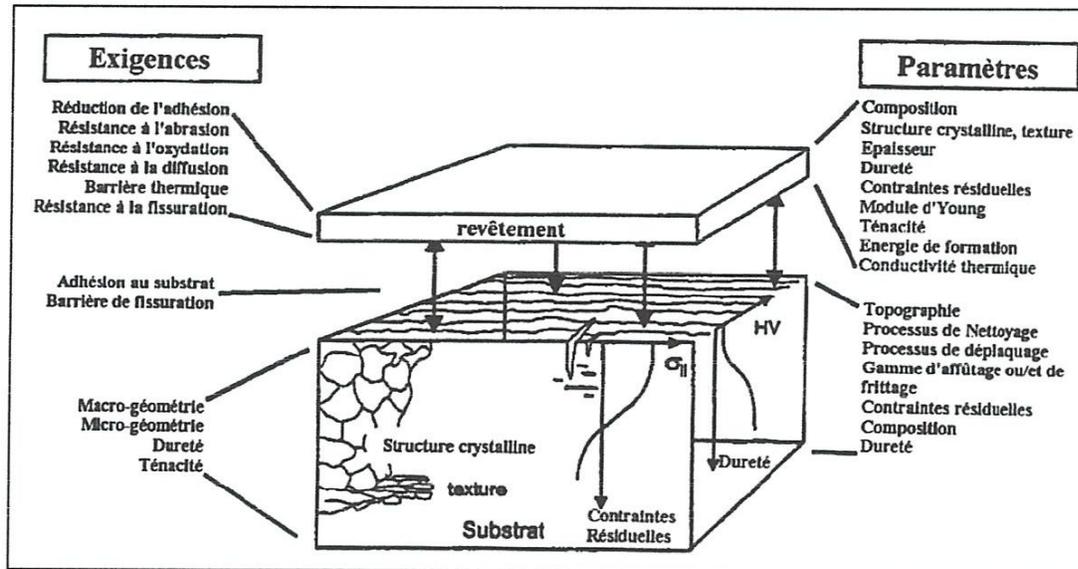
### I-5 Revêtement pour outils coupants

Depuis plus de dix ans, l'utilisation d'outils coupants non-revêtus en usinage tend à disparaître au profit d'outils revêtus. Cette tendance, d'abord instaurée en tournage, est peu à peu généralisée pour tous les outils coupants (fraisage, taillage et perçage) et ce, quelque que soit le matériau substrat (acier rapide ou carbure) [6].

Les revêtements d'outils sont donc principalement conçus pour les protéger contre les nombreuses agressions thermiques et mécaniques auxquelles il est soumis lors d'une opération d'usinage, surtout à grande vitesse, et par conséquent, pour limiter les quatre phénomènes d'usure que sont:

- L'adhésion entre usinant et usiné ;
- L'abrasion de l'usinant par des particules dures provenant de l'usiné ;
- L'oxydation de l'usinant ;
- La diffusion de matière de l'usinant vers l'usiné ;

Comme nous pouvons le voir sur la figure (06), le rôle recherché pour le revêtement est complexe. Il doit à la fois protéger le substrat de l'usure (adhésion, abrasion, oxydation, diffusion), faire office de barrière thermique, résister à la fissuration et tout ceci grâce à un dépôt d'épaisseur très faible.



*Figure I-5: représentation des exigences envers les revêtements et des paramètres à maîtriser pour répondre aux exigences.*

### I-5.1 Fonction d'un revêtement en usinage

Les fonctions que l'on peut exiger d'un revêtement sont avant tout de protéger l'outil contre les agressions extérieures qu'il subit lors d'une opération d'usinage. Ces sollicitations sont d'ailleurs fortement variables d'une technique d'usinage à une autre, et d'une application à une autre [7].

### I-5.2 Propriétés des revêtements

Les fonctions préalablement attribuées à un revêtement doivent en définitif se traduire par des objectifs opérationnels, en lien avec des propriétés physiques quantifiables et/ou qualifiables. Ainsi, il est possible de demander au système substrat + revêtement de répondre au cahier des charges suivant :

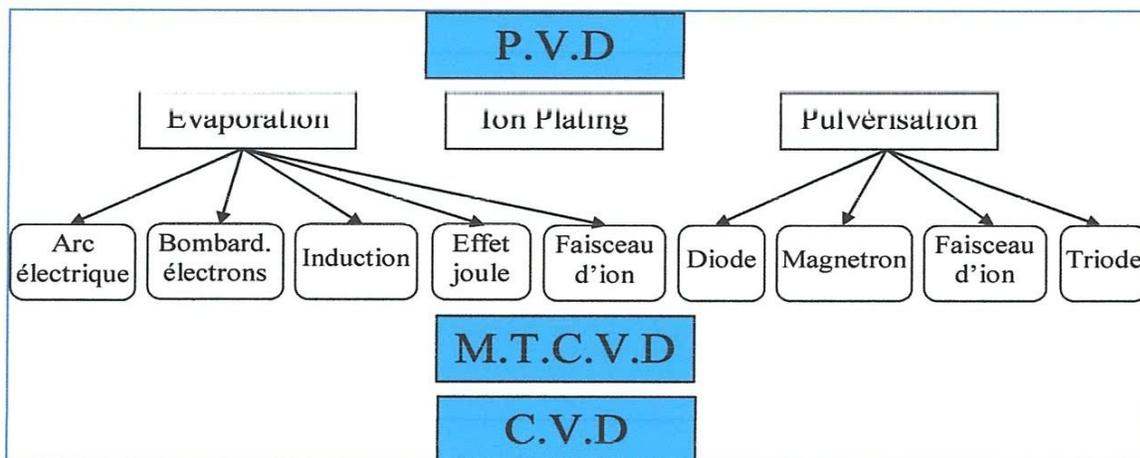
- ❖ Une ténacité élevée ;
- ❖ Une parfaite adhésion sur le substrat ;
- ❖ Une grande résistance à la formation et à la progression des fissures ;
- ❖ Une dureté élevée ;
- ❖ Une inertie chimique élevée ;
- ❖ Une faible conductivité et diffusivité thermiques ;
- ❖ Une haute résistance à l'oxydation ;
- ❖ Une épaisseur adéquate ;

❖ Une fonction barrière de diffusion.

Sachant que ces propriétés doivent être conservées à la plus haute température possible, en lien avec les sollicitations thermiques de l'opération d'usinage visée.

### I-5.3 Types de revêtements

Les revêtements déposés industriellement peuvent se décomposer en 2 familles distinctes : les revêtements déposés par voie physique (Physical Vapor Deposition: PVD) et les revêtements déposés par voie chimique (Chemical Vapor Deposition: CVD) figure (01). Chacune de ces familles possède une variété importante de sous-familles en constante évolution depuis quelques années. Ainsi, les procédés PVD sont basés sur trois types de technologie : l'évaporation, la pulvérisation et le dépôt ionique (ou 'ion-plating'). Chacune de ces sous-familles connaît également des variantes basées sur des moyens différents d'aboutir à l'évaporation ou à la pulvérisation des sources de matière : faisceau d'ions, effet joule, diode, etc.



**Figure I-6:** Principaux modes de dépôt de revêtement pour outils-coupants

L'ensemble de ces procédés permet de déposer des couches de compositions et d'aspects très voisins. Cependant, les modalités de dépôts peuvent entraîner des différences très importantes en termes de texture, adhésion, dureté, etc. Il est important de noter que les technologies de dépôt ont subi de très grandes évolutions ces dernières années. A tel point qu'il est difficile de donner un aperçu exhaustif de l'ensemble des variantes.

Type	Signification	Température	Technique
CVD	Dépôt chimique en phase vapeur	530°	La plus répandue
PVD	Dépôt physique en phase vapeur	200°	Courante
PCVD	Dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma	315°	De plus en plus courante
MTCVD	Dépôt chimique en phase vapeur à moyenne température	425°	Récente

*Tableau I-2: Différents types de revêtements et leurs significations.*

Les dépôts réalisés industriellement par PVD et CVD sont issus de familles très voisines, par contre leurs propriétés résultantes font que certains revêtements sont systématiquement réalisés par une des techniques. Ainsi, dans le domaine des outils-coupants, les procédés CVD produisent couramment les revêtements suivants :

- Revêtements à base de titane : TiC, Ti(C,N), TiN, TiB<sub>2</sub>
- Revêtements céramiques : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>
- Revêtements ‘ultra-dur’ : Diamant, Diamant Like Carbon (DLC)
- Les procédés PVD réalisent plutôt des revêtements du type :
- Revêtements à base de titane : TiC, Ti(C,N), TiN, TiB<sub>2</sub>, (Ti,Al)N
- Revêtements ‘ultra-dur’ : Diamant, Diamant Like Carbon (DLC), cubic Boron Nitride (c-BN)
- Revêtements lubrifiants : MoS<sub>2</sub>, WC/C, CrC/C

Les revêtements de la famille des (TiN), (TiCN) et (TiAlN) sont de loin les plus répandus en usinage comme le montre la figure (02). Ces revêtements doivent leur succès à leurs très bonnes propriétés moyennes dans l’ensemble des applications d’usinage et surtout leurs très bonnes adhésions aux substrats les plus couramment utilisés: acier rapide, carbures, cermet. Les revêtements céramiques se sont beaucoup moins développés du fait de leurs grandes fragilités et de leurs manques d’adhésion.

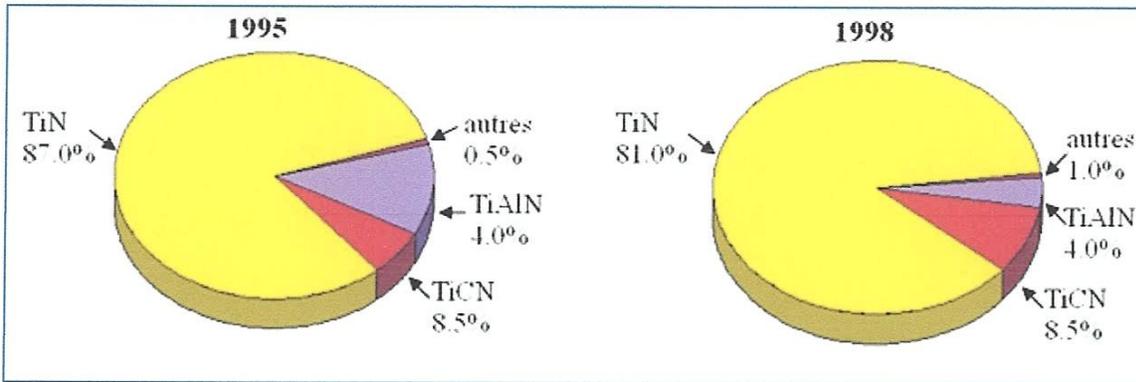


Figure I-7: Statistique sur l'évolution de l'utilisation relative des revêtements pour outils-coupants

De plus, les revêtements à base de titane se déposent aussi bien par les procédés PVD que par les procédés CVD, alors que les revêtements céramiques sont très difficiles à réaliser en PVD. Cela limite ainsi toute une partie des applications sur les outils en acier rapide. Les avantages et les inconvénients des deux techniques sont regroupés dans le tableau 02 :

	Avantages	Inconvénients
<b>PVD</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Investissement limité</li> <li>❖ Faible température de dépôt</li> <li>❖ Bonne adhérence de dépôt</li> <li>❖ Couches en contraintes compressives</li> <li>❖ Nombreuses possibilités de dépôt</li> <li>❖ Bonne acuité d'arête des outils</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Nécessité de réaliser les dépôts sur des pièces de formes voisines</li> <li>❖ Vitesse de dépôt faible</li> <li>❖ Dépôts non uniformes</li> <li>❖ Difficultés pour revêtir des outils à géométrie complexe</li> </ul>
<b>CVD</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Grande pureté des dépôts</li> <li>❖ Grande variété de composition</li> <li>❖ Possibilité de dépôt sur des pièces complexes</li> <li>❖ Bonne adhérence sur substrat carbure</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Température de déposition élevée</li> <li>❖ Investissement élevé</li> <li>❖ Résidus toxiques de déposition</li> <li>❖ Mauvaise acuité d'arête des outils</li> <li>❖ Couches en contraintes de traction</li> <li>❖ Risques d'attaque des substrats par les gazes corrosifs</li> </ul>

Tableau I-3: Comparaison des propriétés des modes de déposition PVD et CVD.

Ainsi dans le cadre d'un usinage continu (perçage, tournage), un revêtement épais et adhérent sera préféré (afin d'accroître la quantité de matière à enlever).

Pour les procédés à coupe interrompue (fraisage, taillage, etc.), il sera privilégié un revêtement tenace, résistant à l'oxydation et ayant des contraintes de compression. Ces conditions privilégient plutôt les revêtements obtenus par PVD. Cette analyse est à moduler avec l'apparition de revêtements MTCVD. Par ailleurs, cela nécessite d'avoir des arêtes arrondies ce qui privilégie l'emploi des dépôts CVD, même si les dépôts PVD peuvent aussi s'appliquer sur des arêtes préalablement rodées. Les opérations de finition nécessitent des arêtes vives, ce qui privilégie plutôt l'emploi de revêtements PVD.

Actuellement, les revêtements les plus couramment utilisés sont les carbures de titane (TiC), les nitrures de titane (TiN), les carbonitrures de titane (TiCN) ou l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Le dépôt choisi dépend du but recherché : résistance à l'usure et/ou à l'oxydation, tenue à la température, réduction du frottement, etc. (tableau 03) La combinaison de plusieurs de ces objectifs oriente les tendances actuelles et futures.

Revêtement	Résistance à l'usure	Résistance chimique	Résistance thermique	Résistance au frottement
TiC	+++++	+	+	+++
TiN	+++	+++	+++	+++++
Ti(C,N)	++	++	++	++++
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	++++	+++++	+++++	++
HfN	+++	++++	++++	++++

*Tableau I-4: Comparatif des propriétés de certains revêtements de + à +++++*

## I.6-Endommagement des outils de coupe

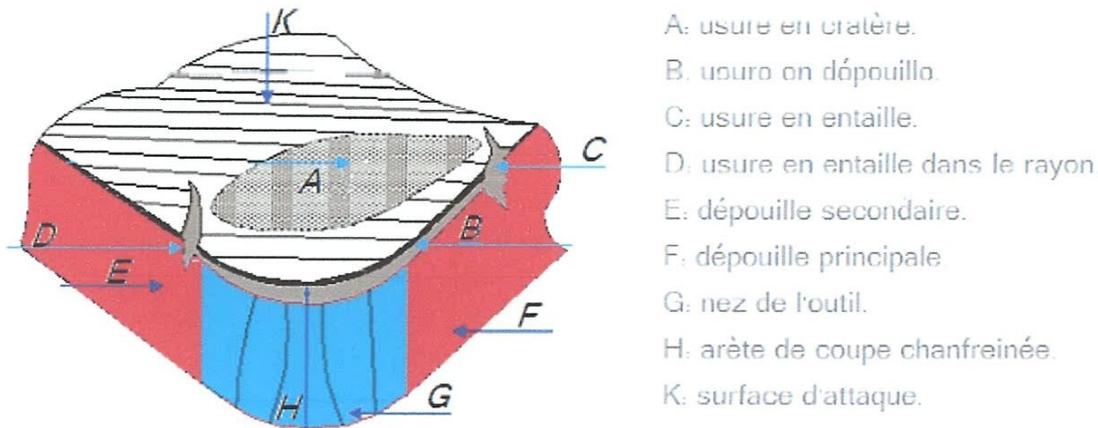
Les outils de coupe ont une géométrie généralement complexe qui résulte assez souvent de mises au point d'atelier purement empiriques, quelquefois d'études plus analytiques à partir de divers critères (résistance à l'endommagement ou qualité de la surface générée), rarement d'une véritable optimisation qui nécessiterait une modélisation de l'écoulement du ou des copeaux [8].

### I.6-1: Usure des outils de coupe

Dans la concurrence du marché, la production industrielle doit perfectionner les méthodes d'usinage en travaillant soit avec une production maximale ou avec un coût minimal. Il arrive parfois que ce dernier passe au second plan et que seule la production maximale importe. On choisira alors une vitesse de coupe supérieure. Plus celle-ci croît ; plus les sollicitations mécaniques et thermiques sur l'arête de coupe augmentent. Par conséquent, les frottements et les pressions élevées qui s'exercent à l'interface copeau / outil, provoquent une usure intense de l'outil [YAL 05].

### I.6.2: Formes d'usure

Les formes d'usure des outils de coupe dépendent des paramètres essentiels déjà évoqués (couple outil - matière, conditions d'usinage), on répertorie également quatre zones principales d'usure, d'une façon générale l'outil est soumis aux 6 modes d'usures définis ci-après (Fig. I-8).



*Figure I-8: Différentes formes d'usure.*

Si l'on fait un inventaire des configurations de coupe que l'on rencontre dans un atelier d'usinage, on observe une très grande diversité des vitesses de coupe (entre 10 et plusieurs milliers de m/min), de la géométrie des copeaux et de leurs conditions d'évacuation, de la rigidité du contact pièce usinée/outil, de la nature et de la géométrie des outils. Dans une telle variété de configurations de coupe, il n'est pas surprenant d'observer une grande variété de faciès de dégradation. Ces mécanismes d'endommagement sont maintenant bien connus, notamment :

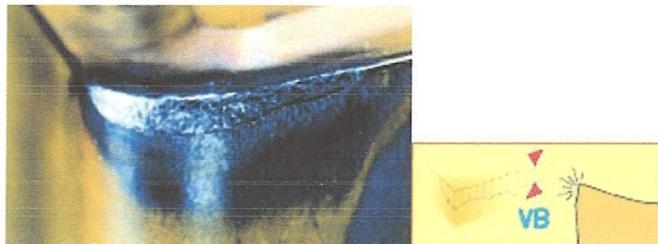
- **l'usure abrasive** : provoquée par la présence d'un troisième corps contenant des particules de haute dureté dans le contact copeau/outil ;
- **l'usure adhésive** : liée au frottement copeau/outil, et qui va prendre de plus en plus d'importance lorsque la vitesse de coupe croît, notamment dans le cas de certains matériaux comme les aciers inoxydables et les alliages à base de nickel ou de cobalt, ainsi que les alliages de titane ;
- **l'usure par diffusion** : que l'on retrouve aux vitesses de coupe élevées, conséquence d'une diffusion du matériau usiné vers l'outil et donc d'une fragilisation de ce dernier (par exemple : usinage de matériaux à base de fer avec des outils en carbures à liant au cobalt) ;
- **l'usure par fatigue mécanique** : qui est liée à l'apparition de phénomènes vibratoires de natures diverses : élimination partielle d'arête rapportée sur l'outil, apparition d'instabilités dans la formation du copeau en passant du copeau continu au copeau segmenté ;
- **l'usure par fatigue thermique** : dans le cas d'outils de très faible conductivité thermique (notamment les céramiques) avec de très grandes vitesses de coupe (UGV par exemple).

### I.6.3 Usure des arêtes de coupe

Pour comprendre les avantages et les limites de chaque matière, il est important de connaître les différents mécanismes d'usure qui agissent sur les outils [9].

#### a) Usure en dépouille

C'est le type le plus courant d'usure et c'est aussi l'usure la plus souhaitable étant donné qu'elle est plus prévisible et stable. Elle est due à l'abrasion exercée par les constituants durs de la matière de la pièce.



*Figure I-8-1: Usure par abrasion*

**b) Usure en cratère**

L'usure en cratère apparaît sur la face de coupe de la plaquette. Elle est provoquée par la réaction chimique entre la matière de la pièce et le matériau de coupe. La vitesse de coupe l'amplifie. Une usure en cratère excessive affaiblit l'arête de coupe qui peut se rompre.



*Figure I-8-2: Usure\_chimique*

**c) Arête rapportée**

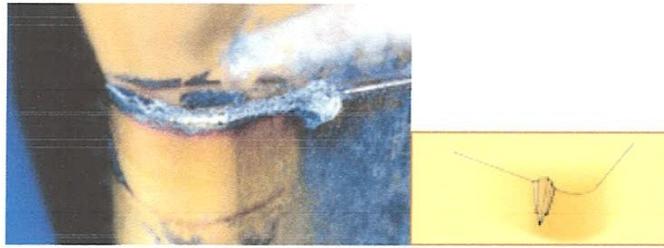
Ce type d'usure est provoqué par le soudage sous pression du copeau sur la plaquette. C'est le type d'usure le plus courant avec les matières collantes telles que les aciers bas carbone, les aciers inoxydables et l'aluminium. Une faible vitesse de coupe accélère la formation d'une arête rapportée.



*Figure I-8-3: Usure\_par\_adhérence*

**d) Usure en entaille**

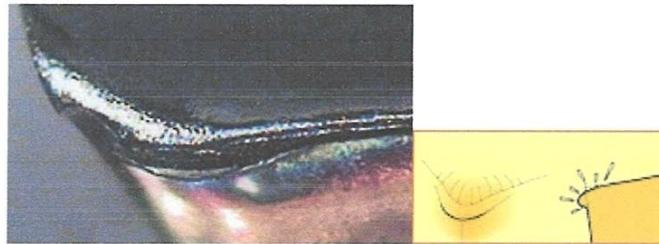
Ce type d'usure se caractérise par une entaille localisée tant sur la face de coupe que sur la face de dépouille, au niveau de la profondeur de coupe. Il est provoqué par l'adhérence (soudage par pression du copeau) et la déformation. Il est courant dans l'usinage des aciers inoxydables et superalliages réfractaires.



*Figure I-8-4: Usure par adhérence*

*e) Déformation plastique*

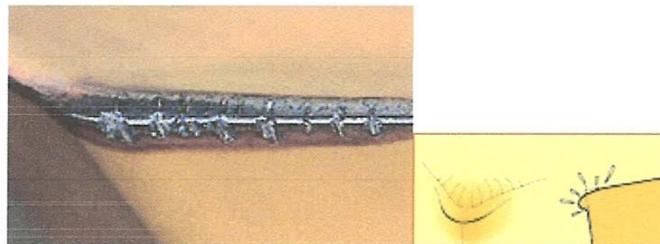
La déformation plastique survient lorsque le matériau de coupe est ramolli par une température trop élevée. De manière générale, plus une nuance est dure et plus le revêtement est épais, meilleure est la résistance à la déformation plastique.



*Figure I-8-5: Usure thermique*

*f) Usure en peigne*

Lorsque l'arête de coupe subit des refroidissements brusques, des fissures perpendiculaires à l'arête apparaissent. Ce type de fissure est fréquent en cas de coupes interrompues, ce qui est courant en fraisage. L'utilisation de l'arrosage aggrave ce phénomène.

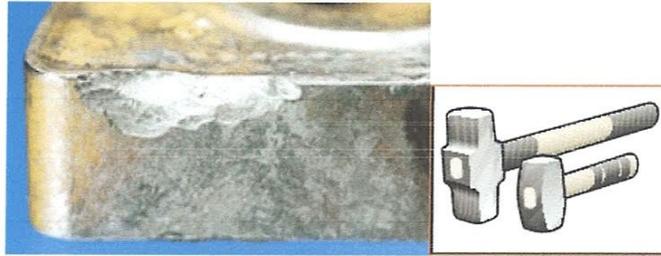


*Figure I-8-6: Usure thermique*

*g) Ecaillage ou rupture de l'arête*

L'écaillage ou la rupture de l'arête survient en cas de surcharge des contraintes de traction mécanique. Celles-ci sont dues à différentes causes telles que le martèlement des copeaux, une profondeur de coupe ou une avance excessives, des

inclusions de sable dans la matière de la pièce, des arêtes rapportées, des vibrations ou une usure excessive de la plaquette.



*Figure I-8-7: Usure\_mécanique*

### **I.7: Rugosité des surfaces usinées**

La surface de la pièce usinée n'est pas parfaite, car elle présente des irrégularités de forme (Macro-géométriques) et des irrégularités de surface (Micro-géométriques), le tout dépend généralement :

1. des procédés de fabrication.
2. de la matière utilisée comme outil de coupe.
3. des vibrations résultantes lors du travail.
4. des propriétés de la matière usinée.

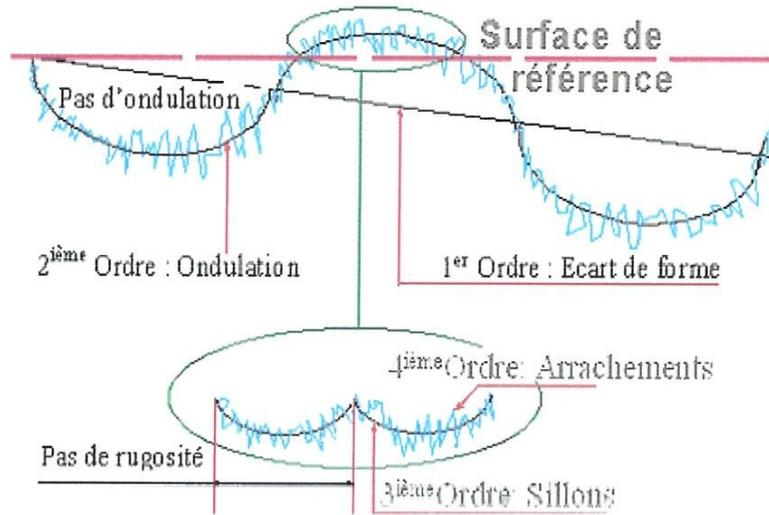
Ces deux types d'irrégularités influent directement sur la destination de la pièce usinée. Il s'agit également de l'étanchéité, glissement, résistance à la corrosion et la résistance à la fatigue...etc. Aussi, plus le bureau d'étude exige un bon état de surface « en fonction de la destination de la pièce », la réalisation sera alors difficile et le coût augmente.

#### **I.7.1: Les principaux défauts des surfaces**

En général les défauts de surface jouent un rôle important dans l'aptitude d'une pièce à remplir une fonction donnée. Ces défauts sont de nature géométrique ou physico-chimique, nous ne nous intéressons ici qu'aux défauts géométriques, qui sont classés conventionnellement sous quatre numéros d'ordre (Fig I-9).

1. défauts du premier ordre : écarts de forme.
2. défauts du deuxième ordre : ondulations.

3. défauts du troisième ordre : sillons.
4. défauts du quatrième ordre : arrachements.



**Figure I-9:** Les différents défauts géométriques de la surface usinée

### I.7.2: Les principaux critères de rugosité

Considérons une coupe locale de la surface usinée perpendiculairement aux sillons d'usinage. Soit OX la ligne moyenne qui divise le profilographe en deux parties. Les principaux critères de rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne (Fig.I-10):

1. la rugosité moyenne arithmétique  $R_a$ : elle représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) par rapport à OX.
2. la rugosité moyenne quadratique RMS : ce critère représente l'écart moyen quadratique par rapport à OX.
3. la rugosité totale  $R_{max}$  : elle représente la hauteur maximale des irrégularités du profil de la rugosité.
4. rugosité totale  $R_t$  : elle représente l'écart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil, relevé sur toute la longueur (L).
5. Rugosité  $R_z$  : elle représente la rugosité totale moyenne.
6. Hauteur de saillie de rugosité  $R_p$  : elle représente la moyenne des  $R_{pj}$ , ce critère permet de différencier des profils qui ne sont pas différenciés par les critères  $R_a$ ,  $R_t$  et  $R_{max}$ , le tout en ( $\mu\text{m}$ ).

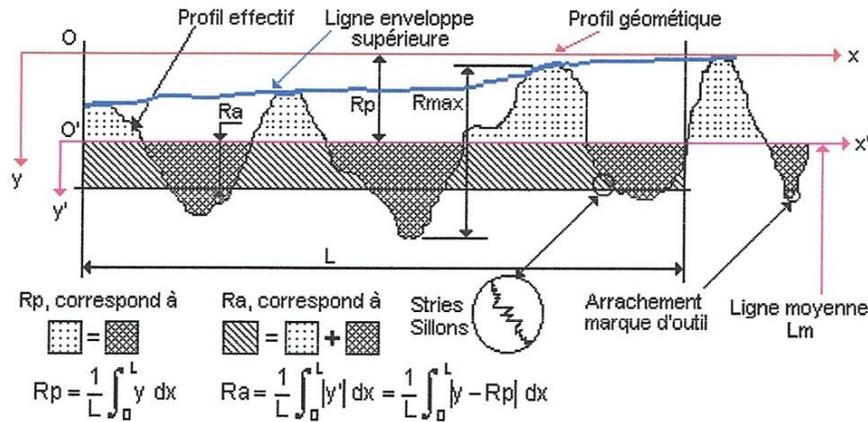


Figure I-

10:

Caractéristiques du profil [10].

### I-8 Usinage des Aciers inoxydables

Parmi les nombreuses techniques de mise en œuvre des aciers inoxydables l'usinage concerne principalement les produits longs (barres).

Les autres opérations d'usinage (perçage, fraisage, taraudage) sur les produits plats ne peuvent être négligées. Dans ce cas, elles précèdent souvent un assemblage à l'aide de moyens mécaniques: vis, boulons, rivets.

À l'usinage qui est l'opération de mise en œuvre par enlèvement de matière à l'aide d'un outil de coupe, on associe le concept d'usinabilité concernant une nuance ou une famille de nuances [11] [12].

#### I-8-1 Définition

Un acier inoxydable est un acier fortement allié dont la teneur en chrome doit être supérieure à 10% ce qui lui assure une résistance aux agents oxydants (résistance à la corrosion) [11].

#### I-8-2 Types d'aciers inoxydables

Les aciers inoxydables peuvent être classés en trois grandes familles:

- **Les austénitiques** sont de loin les plus nombreux, en raison de leur résistance chimique très élevée, de leur ductilité comparable à celle du cuivre ou du laiton, et aussi de leurs bonnes caractéristiques mécaniques élevées. Les teneurs en éléments d'addition tournent autour de 18% de chrome, 10% de nickel et de 0.02 à 0.06% de carbone.

- *Les ferritiques* ne prennent pas la trempe. On trouve dans cette catégorie des aciers réfractaires à haute teneur en chrome (jusqu'à 30%), particulièrement intéressants en présence de soufre.

- *Les martensitiques* sont utilisés lorsque les caractéristiques de résistance mécanique sont importantes. Les plus courants titrent 13% de chrome avec au moins 0.08% de carbone. D'autres nuances sont plus chargées en additions, avec éventuellement un faible pourcentage de nickel [11].

### I-8-3 Rôle des éléments d'addition

- C'est au **chrome** et à lui seul que l'on doit la résistance des aciers inoxydables aux agents oxydants.

- Le **nickel** favorise la formation des structures homogènes de type austénitique, intéressantes pour éviter la corrosion mais à éviter soigneusement dans le domaine du frottement.

- Le **molybdène** et le **cuivre** améliorent la tenue dans la plupart des milieux corrosifs, en particulier ceux qui sont acides, mais aussi dans les solutions phosphoriques, soufrées, etc. Le molybdène accroît la stabilité des films de passivation.

- Le **tungstène** améliore la tenue aux températures élevées des aciers inoxydables austénitiques.

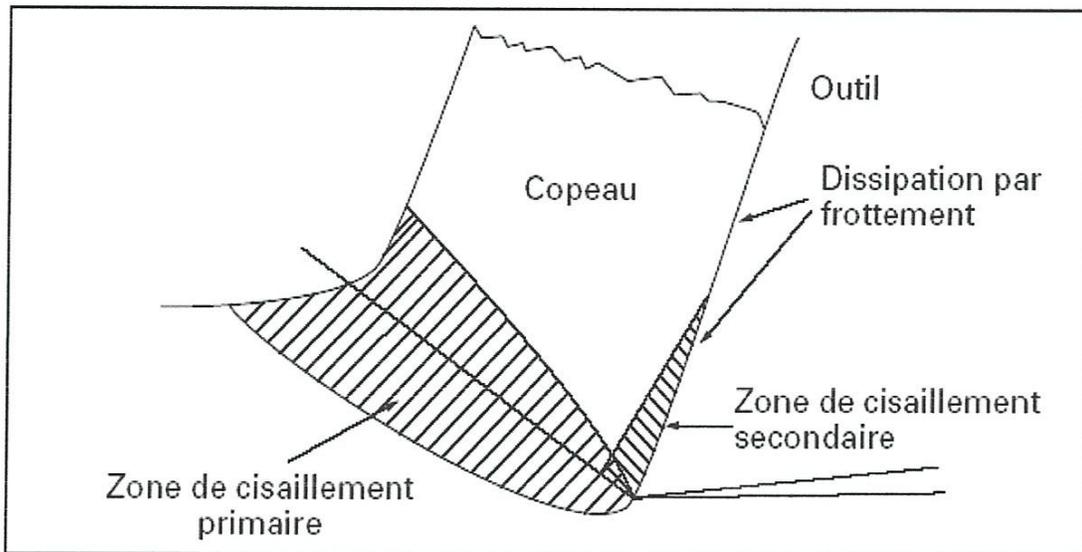
- Le **titane** doit être utilisé à une teneur qui dépasse le quadruple de la teneur en carbone. Il évite l'altération des structures métallurgiques lors du travail à chaud, en particulier lors des travaux de soudure.

### I-8-4 Influence des propriétés physiques

Les propriétés physiques qui jouent un rôle important lors de l'usinage des aciers inoxydables sont la conductivité thermique, les coefficients de frottement et de dilatation.

#### a) Effet de la conductivité thermique

Nous pouvons retenir que les sources de chaleur lors de la formation du copeau sont localisées dans les zones de cisaillement primaire et cisaillement secondaire (*Figure I-11*). Une conductivité thermique élevée évite un échauffement trop important dans la zone de coupe grâce à une bonne évacuation de la chaleur produite à l'interface outil-copeau dans toute l'épaisseur du copeau



*Figure I-11: Distribution des sources de chaleur en coupe orthogonale*

Il s'avère que les aciers inoxydables présentent des conductivités thermiques beaucoup plus faibles que les aciers peu alliés (1.5 à 3 fois plus faibles). Les austénitiques sont de loin les plus défavorisés (*figure I-12*), même si une augmentation de la température diminue leur handicap. Les martensitiques sont les moins pénalisés, mais leur conductivité reste tout de même environ 1.5 fois plus faibles que les aciers peu alliés. Cette mauvaise conductivité a alors pour conséquences:

- Des températures à l'interface outil-copeau élevées et des efforts de coupe importants ;
- Une tendance à des conditions de déformation de type adiabatique aux vitesses de coupe élevées, d'où une instabilité plastique ;
- Une usure des outils par fatigue thermique et par diffusion plus importante.

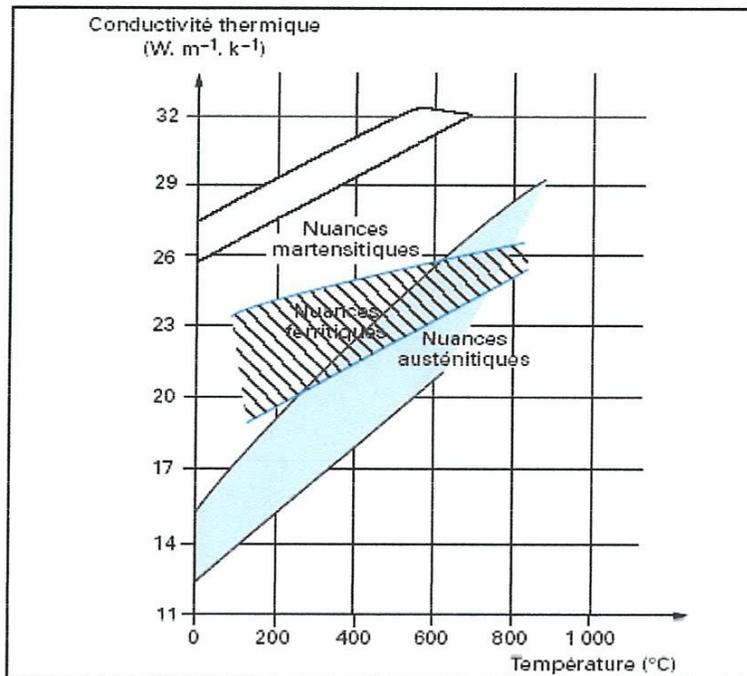


Figure I-12: Conductivité thermique des aciers inoxydables [11].

### b) Rôle du coefficient de dilatation

Les coefficients de dilatation élevés ont une influence directe sur la tenue des cotes et sur les déformations des pièces usinées. Ceci est tout particulièrement vrai pour les austénitiques pour lesquels le cumul de températures de coupe élevées et de forts coefficients de dilatation peut poser des problèmes lorsqu'une grande précision d'usinage est exigée.

### c) Influence du coefficient de frottement

Les aciers inoxydables austénitiques ont des coefficients de frottement élevés, ce qui a pour conséquence une usure rapide des outils ainsi que des risques de collage qui vont conduire à des dégradations d'outil de type adhésion.

En conséquence, les aciers inoxydables, et tout particulièrement les austénitiques, ont des propriétés physiques qui les pénalisent lors de l'usinage. Ceci rend l'usinage des aciers inoxydables très particulier et conduit à des solutions bien spécifiques, que ce soit dans l'amélioration des matériaux ou dans le choix des outils [11].

## I-8-5 Usinage des aciers inoxydables

Du point de vue de l'usinage les aciers inoxydables peuvent être classés en deux catégories [12]:

- **Les aciers ferritiques** et surtout martensitiques s'usinent pratiquement de la même manière que les aciers de construction classiques de même dureté, il est cependant conseillé de réduire légèrement les vitesses de coupe.
- **Les aciers austénitiques** se distinguent des aciers de construction ordinaire par leur faible limite d'élasticité, leur allongement important avant rupture et leur forte aptitude à l'écroutissage, ce qui oblige à modifier les conditions d'usinage dans des proportions parfois très importantes. D'une manière générale il faut utiliser des machines plus puissantes, très rigides, ne vibrant pas, et fixer très énergiquement les pièces que l'on veut travailler. On privilégiera les fortes profondeurs de passe à des vitesses relativement faibles. Pour améliorer l'usinage des aciers inoxydables, les sidérurgistes ont développé deux méthodes. La première consiste à resulfurer des nuances ( $0.15 \leq S \leq 0.35$ ) %. La deuxième prévoit l'inclusion des oxydes durs tels que:  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  ...ou des oxydes malléables à haute température tels que:  $SiO_2-CaO-Al_2O_3$ . La synergie de leurs effets permet des gains de productivité de 45% [12].

### I-9 Les efforts de la coupe

Les efforts de coupe sont à l'origine des déformations plastiques et donc des élévations de température qui se produisent au cours de la coupe. Pour toutes autres conditions de coupe égales, l'augmentation de la vitesse de coupe ne s'accompagne pas d'une variation notable des efforts de coupe (10% de baisse environ), alors que l'augmentation de la vitesse d'avance entraîne une augmentation de la valeur de l'effort tangentiel (relation linéaire: l'effort double environ quand la vitesse d'avance double) [13].

#### I-9-1 Définition et intérêt de leur mesure :

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage (*figure I.13*).

- ❖  $F_z$  : composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe.

- ❖  $F_x$ : composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial en tournage, joue un rôle fondamentale dans le processus de coupe.
- ❖  $F_y$ : composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial, n'a qu'une importance secondaire et disparaît dans le cas de coupe orthogonale pure.

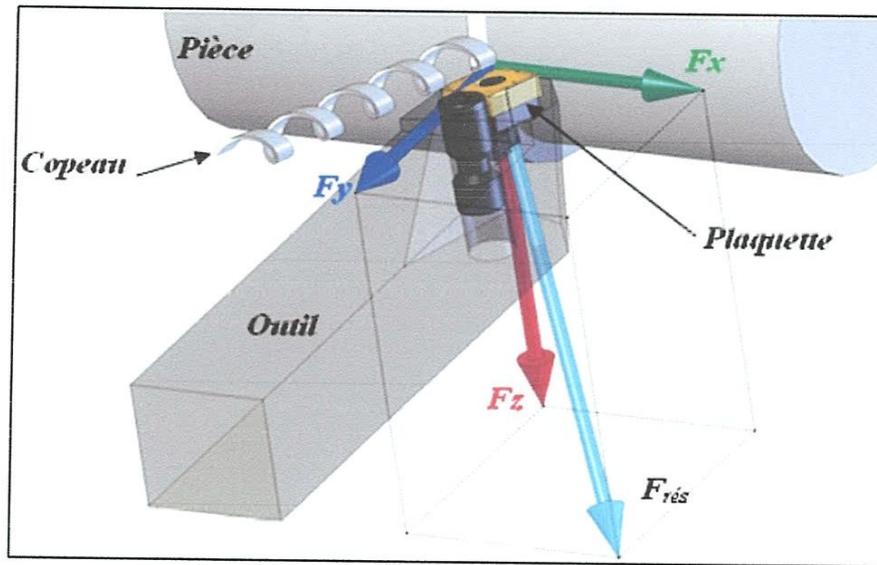


Figure I-13: Les composantes de l'effort de coupe.

#### I-9-2 Influence des différents facteurs sur les composantes de l'effort de coupe :

##### a) Les propriétés mécaniques du matériau à usiner

La valeur de réaction  $F_z$ ,  $F_x$ ,  $F_y$  est proportionnelle à la charge rupture à la traction  $R_t$  et à la dureté HB du métal à usiner.

##### b) Influence de la profondeur de passe et l'avance

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

### c) Influence de la vitesse de coupe :

On peut distinguer 03 zones (figure I.14)

- ✓ **Zone A** : diminution de  $F$  avec les vitesses bases due à une diminution de frottement copeau - outil.
- ✓ **Zone B** : l'apparition de l'arête rapportée provoque une augmentation des frottements et par suite de l'effort tangentiel de coupe.
- ✓ **Zone C** : La  $V_C$  augmente arête rapportée diminue. L'effort tangentiel de coupe  $F$  diminue et se stabilise vers 200m/min.

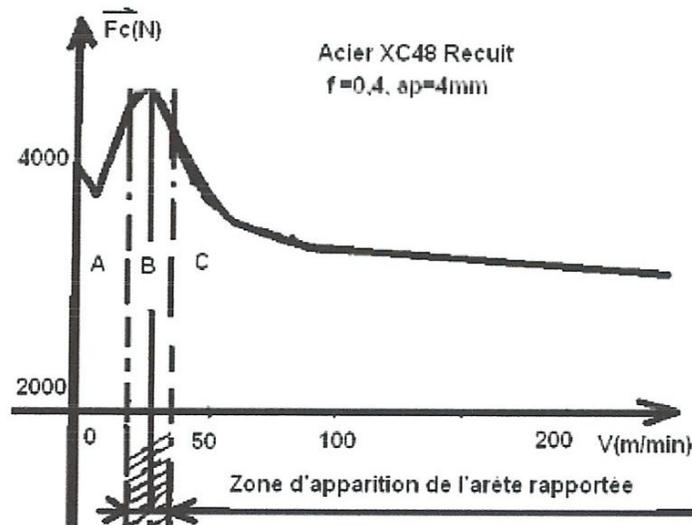


Figure I-14: Influence de la vitesse de coupe sur l'effort de coupe

### d) Influence de l'angle d'attaque

Lorsque  $\phi$  est négatif l'effort tangentiel de coupe est important au fur et à mesure que  $\phi$  augmente, l'effort de coupe diminue et prend une valeur stable à partir de  $30^\circ$ .

### e) Influence de l'angle de direction principale

Avec une avance inchangée, le copeau devient plus fin au fur et à mesure que l'angle diminue. Ceci conduit à une augmentation de l'effort de coupe, la réduction de l'angle de position est limitée par les dégradations croissantes de la stabilité (forte augmentation des efforts d'avances et de pénétration tendance au broutage).

### f) Influence de matériau de coupe

Les matériaux de coupe revêtus, en particulier ceux avec des revêtements TiN ou Ti(C,N), accusent un frottement moindre et des efforts de coupe plus faible que les

matériaux de coupe non revêtus. Les faces d'attaque superfinies (rectifiées, rodées, polies) et dotées d'une arête de coupe dure et tranchante, réduisent les efforts de coupe.

**g) Influence des l'usure en dépouille :**

Les arêtes de coupe usées augmentent les efforts de coupe, en pratique on estime qu'une augmentation de l'effort de coupe 10 % par 0.1mm d'usure sur la surface en dépouille de l'outil.

**I-10- Travaux de recherches concernant l'usinage des aciers inoxydables**

Cette partie récapitule la recherche dans la littérature existante reliée à l'usinage des aciers inoxydables. L'objectif est de faire une étude à partir de ces articles publiés et de comprendre les travaux accomplis concernant l'usinage de ces aciers jusqu'à nos jours. Dans cette recherche on a trouvé que beaucoup d'auteurs ont étudié l'influence de la matière à usiner, le rôle du revêtement et les paramètres de coupe optimaux, l'usure de l'outil, l'influence de revêtements, l'influence de différents types de substrats et l'effet de l'usinage à sec sur l'usinabilité de ces aciers. Plusieurs articles ont été publiés dans ces domaines. Parmi eux on cite :

D. P. Philip et al [14], ont étudié dans ce travail, le tournage de deux qualités différentes d'acier inoxydable duplex à sec avec un outil de coupe revêtu en carbure TiC et TiCN. Les auteurs ont fait une optimisation en utilisant la méthode Taguchi. Les expériences ont été effectuées à trois vitesses de coupe différents (80, 100 et 120 m / min) et avec trois vitesses d'avances différentes (0,04, 0,08 et 0,12 mm / tour) et une profondeur de coupe constante (0,5 mm). Les paramètres de coupe sont optimisés en utilisant le rapport signal sur bruit et l'analyse de variance. Les effets de la vitesse de coupe et l'avance par tour sur la rugosité de surface, l'effort de coupe et l'usure de l'outil ont été analysés.

Les résultats trouvés par les auteurs sont comme suit.

1- Une vitesse de coupe de 100 m/min et une avance par tour 0,04 mm/tr donnent se trouvent la rugosité de surface la plus faible à la fois pour les nuances 5A et 4A. A la vitesse de coupe de 120 m/min et une avance par tour de 0,04 mm/tr se trouvent l'effort de coupe le plus bas pour les nuances 5A et 4A. Une vitesse de coupe de 80 m/min et une avance par tour de 0.04 mm/tr donnent la plus basse usure de l'outil pour les nuances 5A et 4A.

2- l'analyse ANOVA indique que l'avance par tour et la vitesse de coupe affectent la rugosité de surface de la nuance 5A d'environ 64% et 31%, respectivement. L'avance par tour et la vitesse de coupe affectaient l'effort de coupe de la nuance 5A d'environ 53% et 45%, respectivement. La vitesse de coupe et l'avance affectent l'usure de l'outil de la nuance 5A d'environ 92% et 7%, respectivement.

3- L'analyse ANOVA indique que l'avance par tour et la vitesse de coupe affectent la rugosité de surface de la nuance 4A d'environ 63% et 31%, respectivement. L'avance et la vitesse de coupe affectent l'effort de coupe de la nuance 4A d'environ 56% et 42%, respectivement. La vitesse de coupe et l'avance affectent l'usure de l'outil de la nuance 4A d'environ 91% et 9%, respectivement.

4-L'usure de l'outil est due à l'abrasion aux basses vitesses de coupe et en raison de la diffusion, l'adoucissement thermique et entaillage à des vitesses de coupe plus élevées.

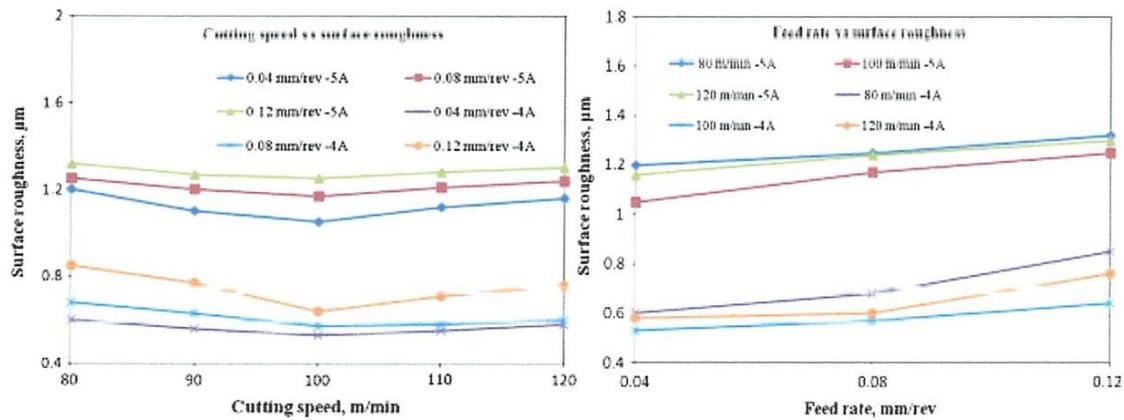


Figure I-15: L'influence de la vitesse de coupe et l'Avance sur la rugosité de surface de 4A-5A [14].

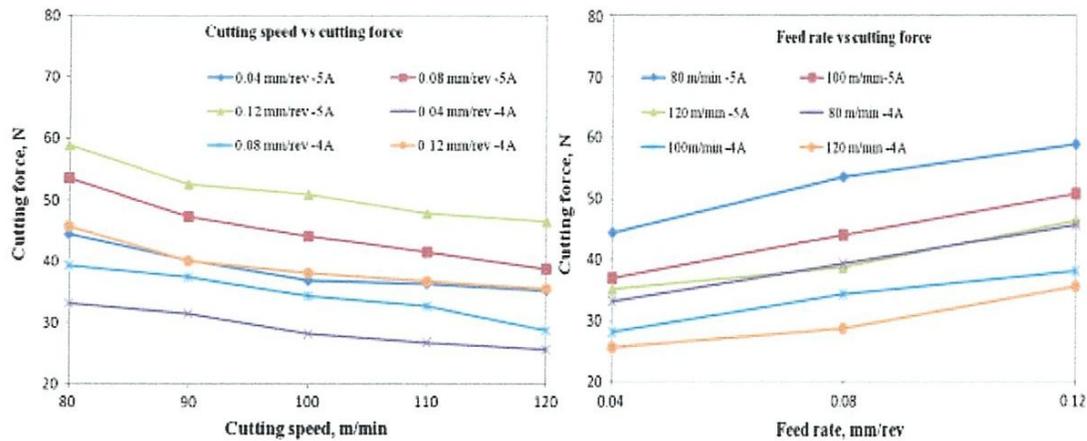
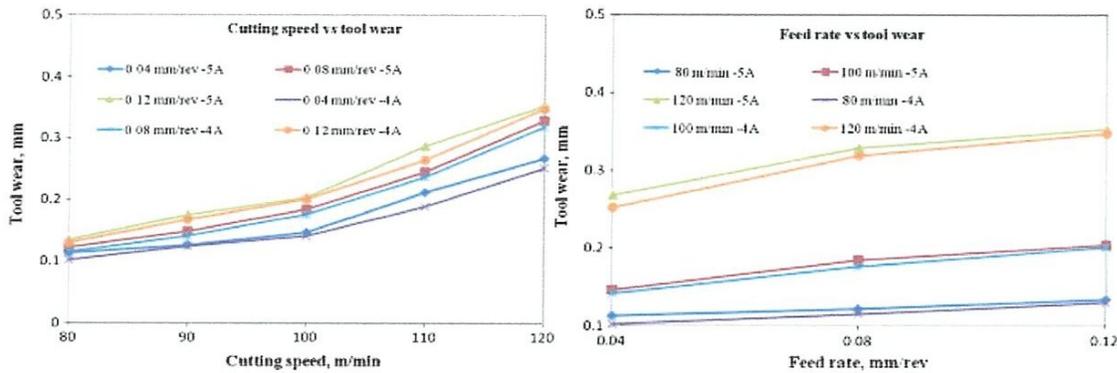


Figure I-16: L'influence de la vitesse de coupe et l'avance sur les efforts de coupe 5A et 4A [14].



**Figure I-17:** L'influence de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance sur l'usure de l'outil de 5A et 4A [14].

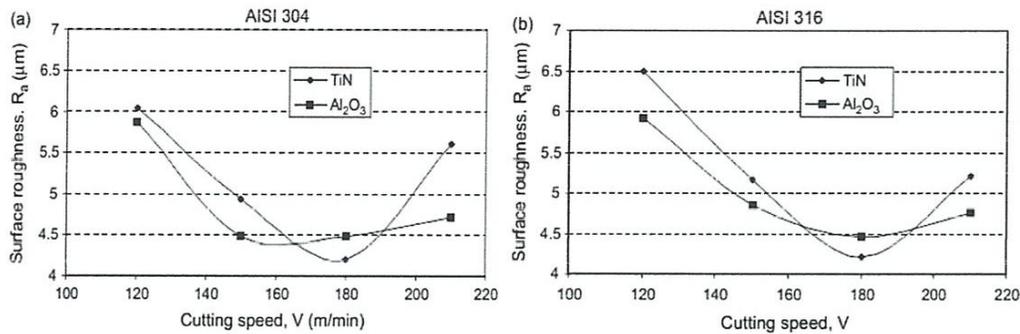
Ciftci I. [15] a présenté dans son étude les résultats d'un travail expérimental en tournage sec des aciers inoxydables austénitiques (AISI 304 et AISI 316) à l'aide des outils en carbure cémenté avec un revêtement multicouche (CVD). Les essais ont été conduits en tournage pour quatre vitesses de coupe différentes (120, 150, 180 et 210 m/min), tandis que l'avance et de la profondeur de passe ont été maintenues constantes à 0,16 mm/tr et 1 mm, respectivement. Les outils de coupe utilisés étaient carbures cémentés avec les revêtements de TiC/TiCN/TiN et TiCN/ TiC/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Les influences de la vitesse de coupe, de la couche supérieure du revêtement d'outil de coupe et du matériau de la pièce ont été étudiées sur la rugosité de la surface usinée et les efforts de coupe. Les parties usées des outils de coupe ont été également examinées sous le microscope électronique de balayage (SEM).

Les résultats trouvés par les auteurs dans cette étude sont comme suit :

- La vitesse de coupe a une influence significative sur les valeurs de la rugosité de la surface usinée. Avec l'augmentation de la vitesse de coupe, la rugosité de surface diminue jusqu'à atteindre une valeur minimale, au-delà duquel la rugosité augmente.
- Des valeurs plus élevées de la rugosité de surface aux faibles vitesses de coupe ont été attribués à la tendance de formation de l'arête rapportée (BUE). L'écaillage des arêtes tranchantes de l'outil de coupe, comme en témoigne les examens SEM, a également s'est avéré être responsable des valeurs élevée de la rugosité de surface.
- Les outils de coupe revêtus de TiC/TiCN/TiN, ont donné des efforts de coupe inférieurs que les outils revêtus TiCN/ TiC/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, bien que la différence n'ait pas été

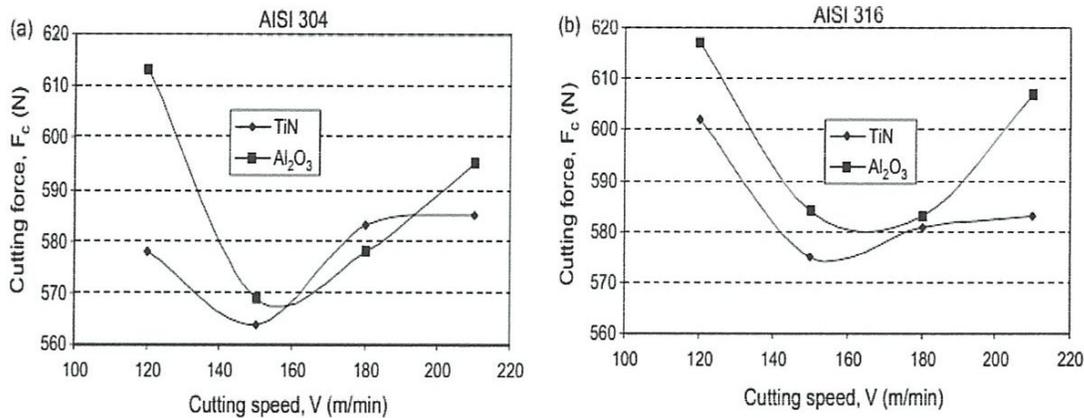
significative. Ceci a été attribué à un coefficient de frottement inférieur de la couche supérieure de revêtement du TiN.

- L'étude montre aussi que l'acier AISI 316 donne des efforts de coupe très élevés à toutes les vitesses de coupe utilisées par rapport à l'acier AISI 304. Les 2.0% de molybdène présents dans l'acier AISI 316 ont été considérés la cause principale de l'élévation des efforts de coupe.



**Figure I-18:** Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe

a) AISI 304, b) AISI 316 [15].

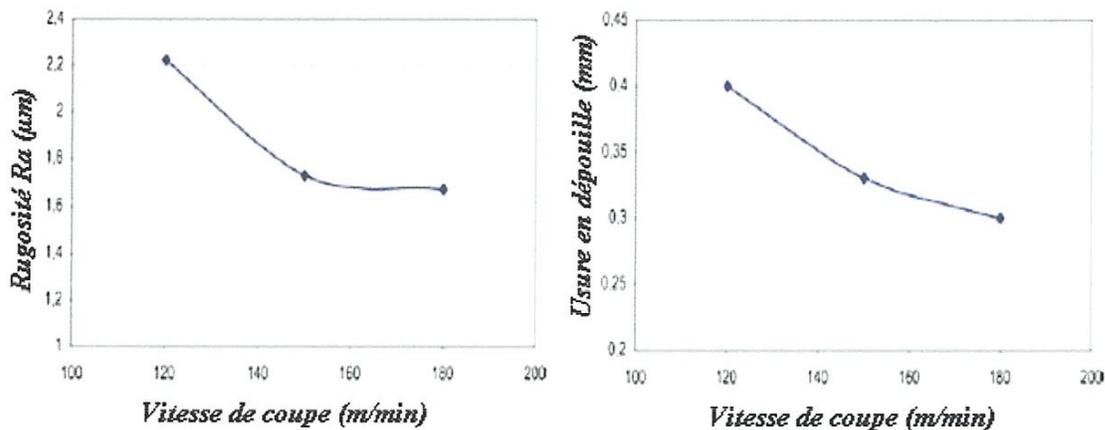


**Figure I-19 :** Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe

a) AISI 304, b) AISI 316 [15].

KORKUT I. et al. [16], ont démontré l'effet de certains facteurs sur l'usinabilité de l'acier inoxydable dans le but de la détermination des paramètres de coupe optimaux pendant l'usinage de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9. Les propriétés physico-mécaniques (la haute résistance à la rupture, la basse conductivité thermique, la ductilité élevée et la tendance élevée de l'écaillage) des aciers inoxydables austénitiques qui rendent l'usinage de cet acier vraiment difficile. Premièrement, il a

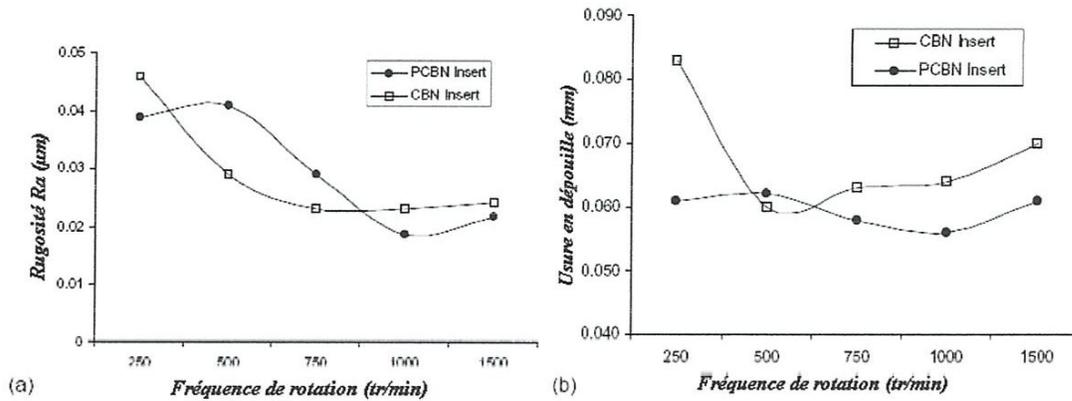
étudié la signification de l'effet de la vitesse de coupe sur l'usure et la rugosité de la surface usinée. Il a observé une diminution de l'usure de l'outil quand la vitesse de coupe augmente jusqu'à une valeur de 180 m/min. L'augmentation de la vitesse de coupe conduit à la diminution de la rugosité (Ra) (**Figure I-20**). Ils ont indiqué que la chaleur a une influence négative sur les performances de l'outil. Aux vitesses de coupe élevées le processus de la coupe génère une grande quantité de chaleur et il est essentiel que la chaleur produite soit dissipée rapidement. A cause de la basse conductivité thermique de l'acier inoxydable X2CrNi18-9, la chaleur ne se dissipe pas rapidement et l'outil se ramollit et devient moins dur et par conséquent il s'use rapidement.



*Figure I-20 Evolution de la rugosité et l'usure en dépouille en fonction de la vitesse de coupe [16].*

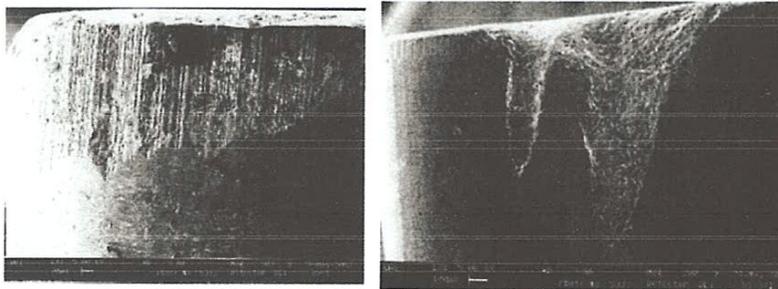
Neo K.S. et al. [17] ont étudié la performance d'un outil en CBN pour l'usinage de l'acier inoxydable (X38Cr13), cet acier est de la famille martensitique, il est largement utilisé pour la fabrication des matrices et des moules de précision. Les performances en termes de rugosité de surface et d'usure de l'outil en PCBN et en CBN conventionnel dans différentes conditions d'usinage étaient étudiées et leurs résultats étaient comparés. Sur la base des résultats expérimentaux, le PCBN s'est avéré plus performant en termes de résistance à l'usure comparé à l'outil en CBN conventionnel. Il peut également réaliser un état de surface miroir dont la rugosité Ra est inférieure à 30nm, et par conséquent il semble être un outil prometteur pour la coupe des matériaux réservés pour la fabrication des matrices et des moules. Les auteurs ont conclu que, pour atteindre une bonne qualité de surface sur STAVAX

(X38Cr13), la vitesse de coupe élevée est exigée pour les outils en CBN et en PCBN, ce dernier peut réaliser un meilleur état de surface. Ils ont constaté aussi qu'à la gamme élevée de la vitesse de coupe, l'outil en PCBN peut mieux résister à l'usure.



*Figure I-21 : Evolution de la rugosité et de l'usure en dépouille en fonction de la fréquence de rotation [17].*

KUMAR A. et al. [18] ont étudié l'évolution de l'usure et la durée de vie d'un outil en céramique mixte à base d'alumine lors de l'usinage d'un acier inoxydable martensitique durci à 60HRC. Les auteurs ont élaboré des modèles de durée de vie de l'outil en fonction de l'usure. Ils ont conclu que l'usure en dépouille affecte la durée de vie de l'outil à des faibles vitesses de coupe, cependant, l'usure en cratère ou l'usure d'entaille affecte la durée de vie aux vitesses élevées, au-dessus de 200 m/min.



*Figure I-22 : L'usure en dépouille d'une céramique mixte à base d'alumine lors de l'usinage d'un acier inoxydable martensitique durci à 60HRC [18].*

### I-11 Conclusion

Ce chapitre a été réservé à l'étude bibliographique sur la coupe des métaux en générale et le tournage en particulier. La définition de l'usinabilité, les matériaux de

coupe, la rugosité de surface, les efforts de coupe et aussi présente les différentes familles des aciers inoxydables.

La dernière partie de cette étude bibliographique est réservée aux différents travaux de recherche sur l'usinage des aciers inoxydables.

### **I-12 Position du problème**

En se basant sur l'étude bibliographique, nous pouvons conclure que les aciers inoxydables sont classés parmi les aciers difficiles à usiner et spécialement les aciers inoxydables austénitiques. Ces aciers se caractérisent par une ductilité élevée ce qui favorise l'apparition de l'arête rapportée sur l'outil et aussi les micro-copeaux sur la pièce. Ainsi, un coefficient de frottement élevé qui accélère l'usure de l'outil. Ces caractéristiques nous ont obligé de choisir un matériau de coupe composée de carbures revêtus pour étudier le comportement des matériaux de coupe ainsi que le comportement de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 lors de tournage.

# **Chapitre II**

## **Procédure expérimental**

## II-1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter le matériel utilisé pour l'élaboration des expériences. Un banc d'essais comportant un tour, une plate forme pour l'acquisition des efforts de coupe, un rugosimètre pour déterminer la rugosité de la pièce usinée et un microscope pour la mesure de l'usure sur les plaquettes de coupe.

Les expériences sont effectuées au laboratoire de coupe des métaux du département de Génie Mécanique à l'Université de 08 Mai 1945.

## II-2 Matériels utilisés

### II-2-1 Machine-outil

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de la société tchèque «TOS TRENCIN», modèle SN 40 C de puissance sur la broche égale à 6.6KW (*figure II-1*). Les fréquences de rotation disponibles sur la machine sont comme suit (45; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1400; 2000) tr/min. les avances disponibles sont: (0.08; 0.10; 0.11; 0.12; 0.14; 0.16; 0.18; 0.20; 0.22; 0.24...0.8) mm/tr.



*Figure II-1* Tour parallèle modèle SN 40 C.

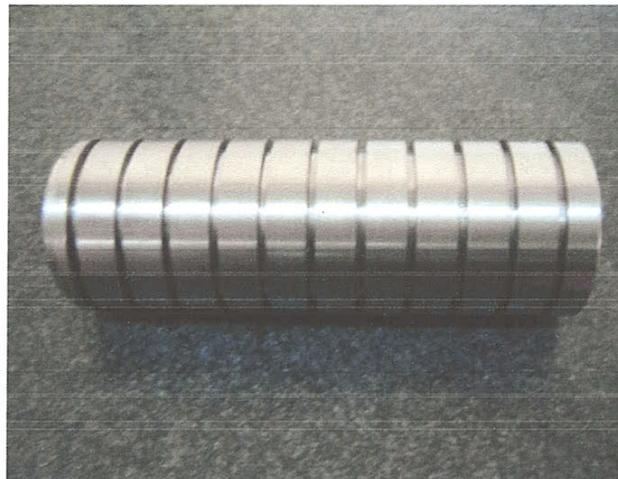
### II-2-2 Le matériau utilisé pour les essais d'usinage

C'est un acier inoxydable austénitique fortement allié, sa nuance est X2CrNi18-9. Cet acier offre une bonne combinaison de résistance à la corrosion et d'aptitude au formage et à la fabrication, ainsi qu'une résistance à l'usure avec une très bonne résistance à la fissuration par corrosion sous contraintes.

Les aciers inoxydables austénitiques sont utilisés dans d'innombrables domaines: vie quotidienne (coutellerie, outils de couture et ustensiles de cuisine), industrie mécanique (instruments de mesure), agroalimentaire (malaxeurs), chimie, transports, médecine et chirurgie, etc.



a) Eprouvette utilisée pour les essais de longue durée



b) Eprouvette utilisée pour les essais de courte durée

**Figure II-2** Eprouvettes pour différents essais.

Pour les essais de longue durée (évolution de l'usure de l'outil et la rugosité en fonction du temps), on a utilisé des éprouvettes de diamètre  $\Phi=100\text{mm}$  et de longueur  $L=400\text{mm}$  (**figure II-2-a**), et pour les essais de courte durée (efforts de coupe et rugosité de la surface en fonction des paramètres du régime de coupe :  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) on a utilisé des éprouvettes qui ont les mêmes dimensions avec des paliers de 20mm de longueur (**figure II-2-b**). La composition chimique de l'acier X2 Cr Ni 18-9 est représentée dans le **tableau II-1**.

Elément	Pourcentage (%)
Carbone	0.02
Manganèse	1.44
Silicium	0.33
Phosphore	0.02
Soufre	0.016
Cuivre	0.727
Aluminium	0.012
Titane	0.005
Niobium	0.013
Nickel	7.69
Chrome	16.91
Molybdène	0.402
Vanadium	0.112
Etain	0.014
Tungstène	0.066
Fer	72.10

*Tableau II-1 Composition chimique de l'acier X2 Cr Ni 18-9.*

### II-2-3 Plaquette de coupe

La plaquette est amovible de forme carrée (*figure II-3*), à fixation par trou central. Toutes les informations qui concernent la plaquette de coupe sont regroupées dans le tableau II-2, la plaquette à un brise-copeau comme le montre la *figure II-4*.

Matériaux de coupe	Désignation	Type de revêtement	Couches	Géométrie
Carbure revêtu	GC 2015	CVD	Ti(C,N)/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiN	SNMG 12-04-08-MI'

*Tableau II-2 Informations relatives à la plaquette de coupe.*

#### ❖ Plaquette en carbure revêtu GC2015

La plaquette GC2015 (*figure II-3*) est une nuance de carbure à triple revêtement sur un substrat tenace enrichi en cobalt. Excellente adhérence du revêtement au substrat, une bonne résistance à l'usure surtout l'usure par diffusion et à la déformation plastique aux températures élevées, un coefficient du frottement réduit, donc elle empêche la formation de l'arête rapportée.



*Figure II-3 Plaquette GC2015.*



*Figure II-4 Brise copeau pour Plaquette GC2015.*

#### II-2-4 Porte outil

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte outil dont la désignation est indiquée au tableau II-3. la **Figure II-4** illustre Porte outil utilisé

Désignation	Marque	$\chi$	A	$\gamma$	$\lambda$	$\alpha$
PSBNR25x25M12	SANDVIK coramant	75°	6°	-6°	-6°	15°

*Tableau II-3 Caractéristiques de porte plaquette utilisé.*

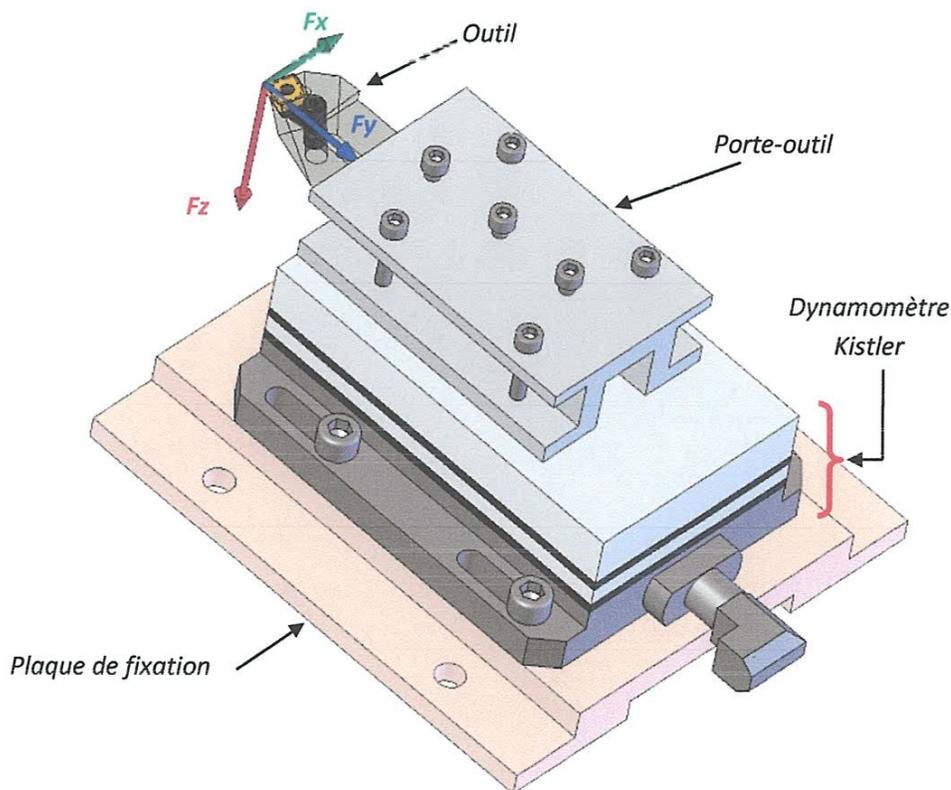


*Figure II-4 Porte outil utilisé.*

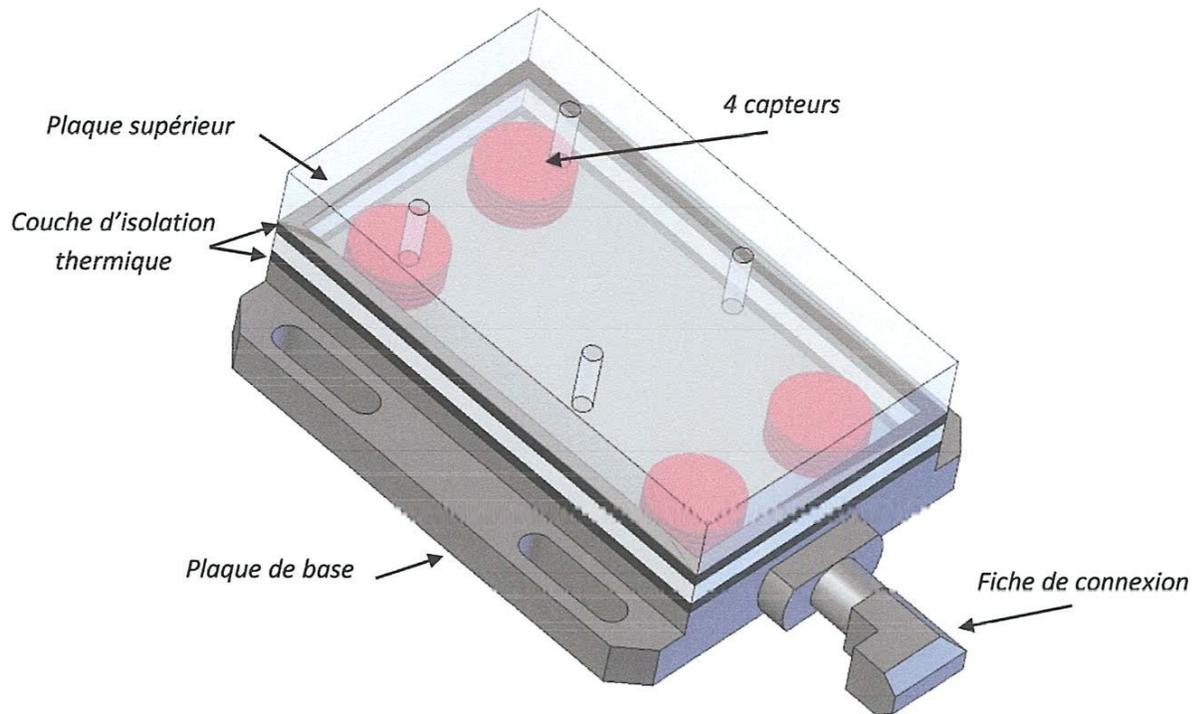
### II-2-5 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

Pour mesurer l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dynamomètre (*KISTLER* 9257 B), qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe. Ce dispositif comporte plusieurs éléments dont on en cite: la plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel et enfin un traceur ou une imprimante pour tracer les courbes.

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors de l'opération du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil est fixe. Ce dernier est monté sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil à l'aide de la plaque de fixation (**figure.II-5**). La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz (**figure.II-6**).



**Figure II-5** Montage du dynamomètre sur la table de la machine.



**Figure II-6** Capteur d'effort de coupe **KISTLER**.

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (DYNOWARE) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes. La *figure II-7* présente un exemple d'acquisition du logiciel qui montre les profils des trois composantes des efforts de coupe (Force axiale:  $F_x$ , Force radiale:  $F_y$  et Force tangentielle:  $F_z$ ).

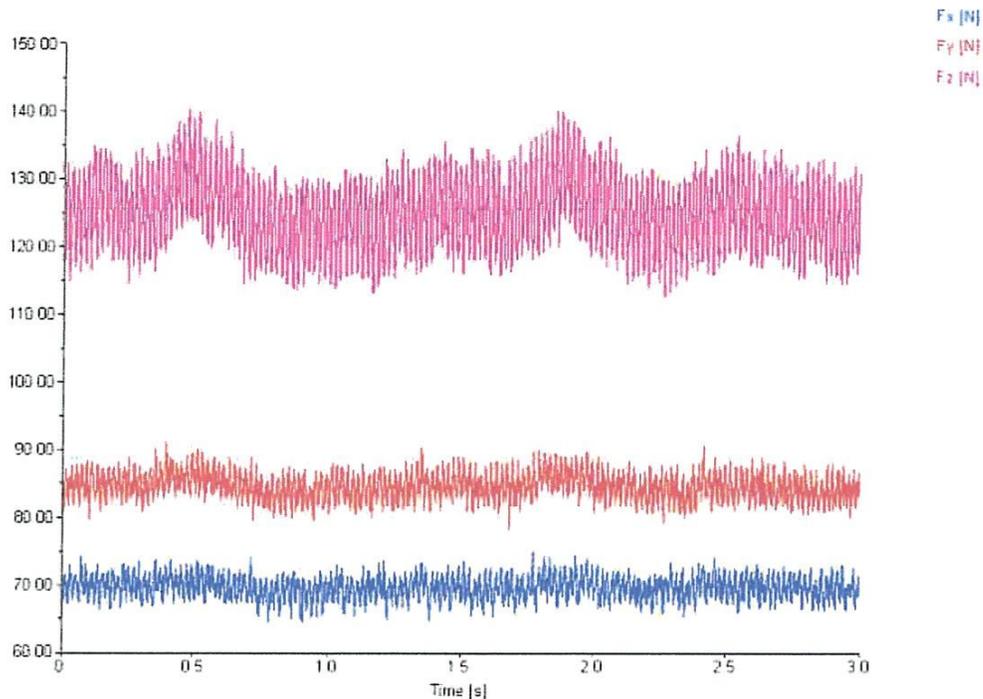


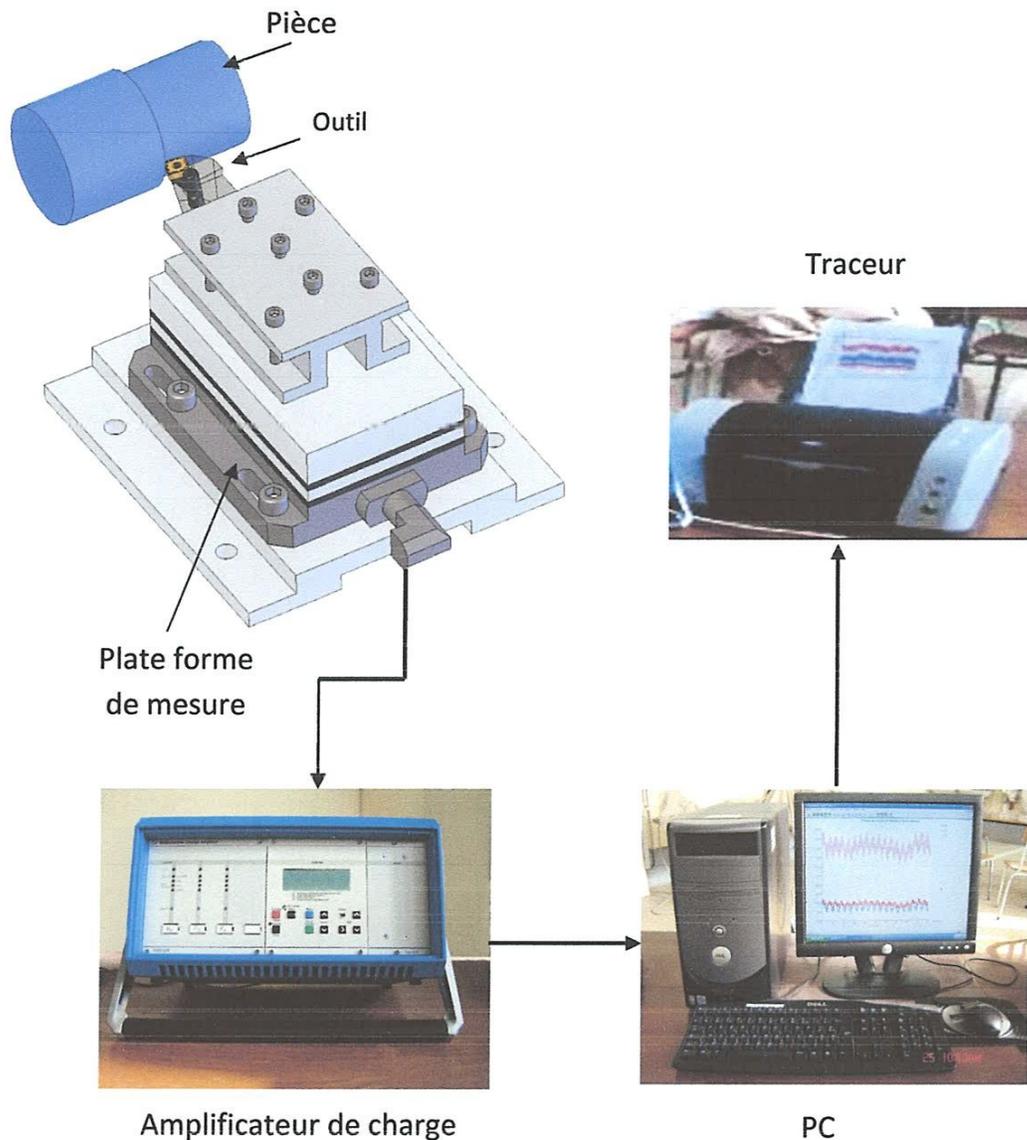
Figure II-7 Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE ».

### Chaîne de mesure et caractéristiques

Dynamomètre à 3 composantes (9257 B): le porte outil type 9403 vissable est employé pour des outils de tournage avec une section maximum de  $26 \times 26$  (figure II-8).

- Grande rigidité, fréquence propre très élevée ;
- Large gamme de mesure ;
- Bonne linéarité, sans hystérésis ;
- Faible interaction (<1%) ;
- Utilisation simple (prêt à l'emploi) ;
- Construction compacte ;
- Résistant au lubrifiant selon mode de protection IP 67 ;
- Câble spécial à haute isolation de la connexion entre le dynamomètre et l'amplificateur (5m de longueur, 8mm de diamètre) ;
- Amplificateur multi canaux, destiné à la mesure des efforts de coupe ;
- Ordinateur personnel (PC) ;

- Traceur.



*Figure II-8* Chaîne de mesure des efforts de coupe.

### II.2.6. Microscope pour la mesure de l'usure en dépouille *VB*

Le microscope utilisé pour la mesure de l'usure en dépouille (*VB*) est du type HUND (W-AD). La mesure s'effectue en plaçant la plaquette de coupe sous l'objectif du microscope sur une table micrométrique à mouvements croisés et à affichage digital, avec une précision de 0,001 mm. La ligne de référence de mesure est l'arête tranchante principale de la plaquette que l'on coïncide avec une référence située sur l'oculaire du microscope puis, on déplace la plaquette de coupe à l'aide des jauges micrométriques jusqu'à la valeur limite supérieure de la bande d'usure *VB*. Après chaque séquence de travail, la plaquette de coupe

est démontée du porte-outil, puis nettoyée et enfin placée sur la table du microscope pour mesurer les différentes grandeurs de l'usure (figure II-14).

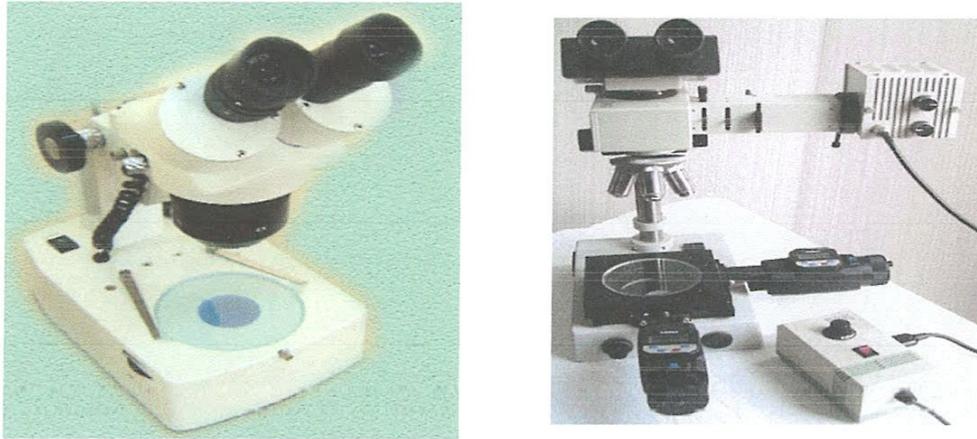


Figure II-9 Microscope pour la mesure de l'usure

### II.2.7. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

Pour la mesure des différents critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_t$  et  $R_z$ ) nous avons utilisé un rugosimètre (2D) SurfTest 201 (Mitutoyo). Il est constitué d'une pointe en diamant (palpeur), avec un rayon de pointe de  $5\ \mu\text{m}$  se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. Afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce (figure II-10).

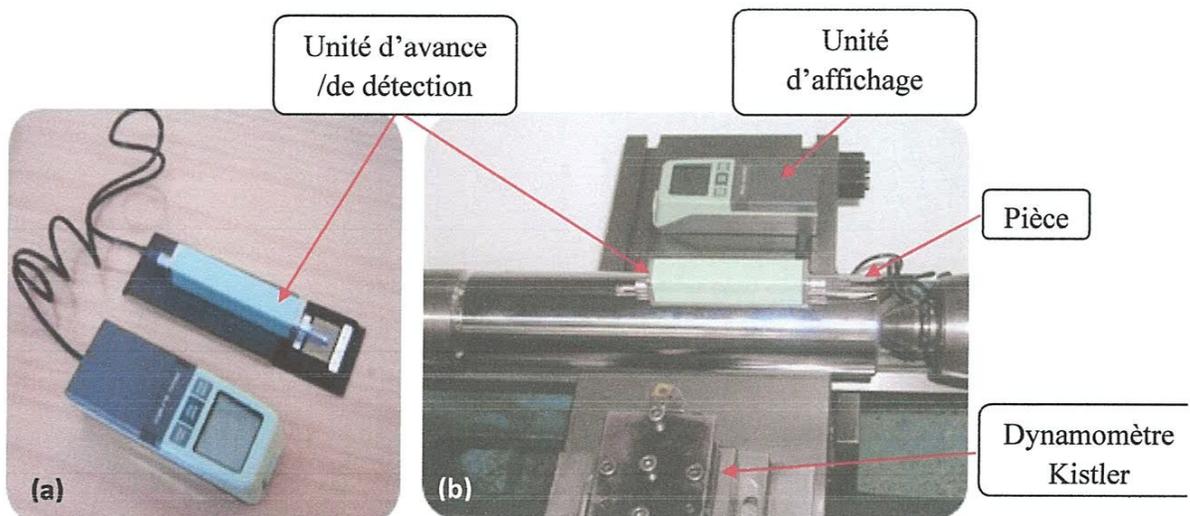


Figure II-10 Mesure de rugosité

a) Calibrage du rugosimètre

b) Mesure de rugosité sans démontage de la pièce

### II-2-8 Autres équipements

- un chronomètre pour enregistrer le temps d'usinage ;
- un pied à coulisse pour mesurer le diamètre de la pièce ;
- un appareil photo numérique pour prendre les photos des différents équipements utilisés et les photos de l'usure.

### II-3 Conditions de coupe

Parmi le grand nombre de facteurs qui influent sur le système d'usinage, on peut citer les éléments du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ), le temps d'usinage, la géométrie de la partie active de l'outil ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\lambda$ ,  $\chi$ ), ainsi que les conditions de travail (rigidité de la machine...). Les conditions de coupe utilisées pour les différents essais sont indiquées dans les *tableaux II-4, II-5 et II-6*. Tous les essais ont été réalisés sans lubrification.

Les paramètres constants	Valeurs	Les paramètres variables	Valeurs
$V_c$ (m/min)	113.88	$f$ (mm/tr)	0.08 ; 0.12 ; 0.16 ; 0.20.
$a_p$ (mm)	0.5		
$V_c$ (m/min)	112.31	$a_p$ (mm)	0.25 ; 0.5 ; 0.75 ; 1.0.
$f$ (mm/tr)	0.12		
$a_p$ (mm)	0.5	$V_c$ (m/min)	81.97 ; 115.45 ; 163.94 ; 230.90 .
$f$ (mm/tr)	0.12		

*Tableau II-4 Conditions de coupe pour les essais des efforts de coupe et de la rugosité (essais courte durée).*

Les paramètres	Unit	Symbol	Niveau		
			Niveau1	Niveau2	Niveau3
Vitesse de coupe	m/min	$V_c$	280	330	400
L'avance	mm/rev	$f$	0.08	0.11	0.14
le temps de coupe	min	$t$	4	10	16

*Tableau II-5 Conditions de coupe pour les essais d'usure et de la rugosité en fonction du temps.*

Les paramètres	Unit	Symbol	Niveau		
			Niveau1	Niveau2	Niveau3
Vitesse de coupe	m/min	$V_c$	280	330	400
le temps de coupe	mm/rev	$f$	0.08	0.11	0.14

*Tableau II-6 Conditions de coupe pour les essais de la tenue (T)*

## II.4. PROCEDURE EXPERIMENTALE

### II.4.1. Essais par plans d'expériences

Nous nous servons des plans d'expérience pour quantifier les influences des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage. Toutes les planifications des expériences et l'analyse statistique des résultats sont faites avec le logiciel Design-Expert (version 8). C'est un logiciel spécialisé pour la planification et l'analyse des expériences. Pour chaque type d'étude, nous adopterons la démarche suivante :

- établissement du but et des objectifs des essais ;
- sélection des variables d'entrées (facteurs) et de sortie (réponses) ;
- choix du type de plan d'expérience ;
- conduite des essais ;
- détermination des facteurs influents ;
- modélisation rapide des réponses ;
- recherche des paramètres optimaux ;

- validation des résultats.

L'application des plans d'expérience pour l'étude des procédés de coupe remonte très loin. Wu a utilisé cette technique pour mener une étude d'optimisation de la durée de vie des outils de coupe. Dureja et autres s'en sont aussi servis pour étudier l'influence de la variation de l'usure en dépouille vie des outils sur le développement des modèles de l'usure. Cette méthode offre de nombreux avantages parmi lesquels :

- diminution du nombre des essais, donc du coût des essais ;
- détection des interactions entre les facteurs ;
- détection des conditions optimales ;
- meilleure précision des résultats ;
- modélisation et optimisation des résultats.

La différence capitale entre la méthode d'un facteur à la fois et la méthode des plans d'expérience tient au fait qu'on fait varier les niveaux de tous les facteurs à la fois à chaque expérience. Des exemples d'utilisation, de modélisation et d'optimisation par plans d'expérience se trouvent au chapitre IV de cette mémoire.

## II.4.2. Plans d'expériences

### a) Terminologie (Réponses, facteurs, niveaux)

Avant d'aborder l'étude des plans d'expériences, il convient de préciser le vocabulaire que nous allons utiliser. Nous nous inspirerons pour cela de la norme AFNOR X 06-080 et des usages des différentes disciplines auxquelles nous ferons appel.

Un phénomène peut toujours être mis sous la forme mathématique suivante :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

(II-1)

avec  $Y_i$  grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur : cette grandeur est appelée la réponse ou la grandeur d'intérêt ;

$X_i$  variables sur lesquelles l'expérimentateur peut agir ; ces variables peuvent être continues ou discontinues ; on les appelle les facteurs ; les plans d'expériences permettent d'étudier l'influence d'un grand nombre de facteurs sans multiplier exagérément le nombre des essais ;

$f$  fonction mathématique qui explique le mieux les variations de la réponse selon les différentes valeurs données aux  $X_i$ . Dans le cas des plans d'expériences, cette fonction mathématique est souvent un polynôme dont

nous préciserons la forme dans les paragraphes suivants.

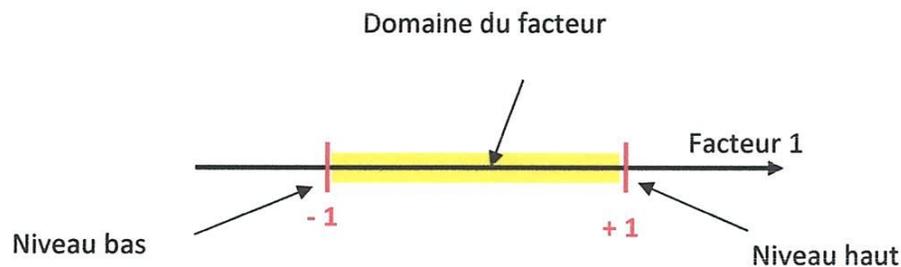
Lorsque l'on étudie un facteur  $X_i$ , par exemple l'usure en dépouille ( $VB$ ), on ne le fait pas varier dans de larges proportions. On définit toujours, en fonction des besoins de l'étude, une valeur inférieure et une valeur supérieure. Les variations du facteur sont donc limitées par deux bornes. La borne inférieure retenue par l'expérimentateur est appelée niveau bas et la borne supérieure, niveau haut. On a l'habitude de désigner par le signe moins (-) le niveau bas d'un facteur et par le signe plus (+) son niveau haut.

### b) Notion d'espace expérimental

Supposons qu'un expérimentateur lance une étude. Il 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 » nous emploierons le mot facteur. On dit que la réponse dépend de plusieurs facteurs.

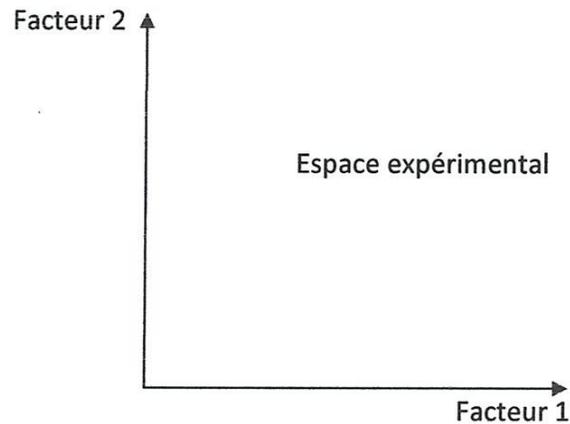
Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (figure II-11). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée niveau. Lorsque l'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes :

- la borne inférieure est le niveau bas ;
- la borne supérieure est le niveau haut.
- 



**Figure II-11** *Domaine de variation du « facteur », constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut*

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  $+1$ .

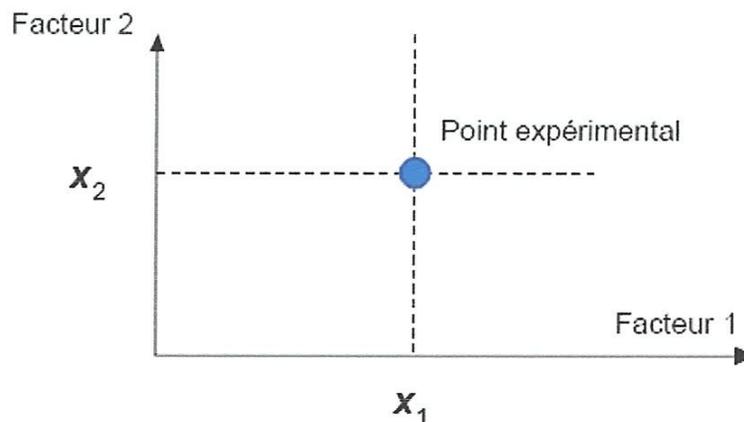


*Figure II-12 Définition de l'espace expérimental*

S'il y a un second facteur, il 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.

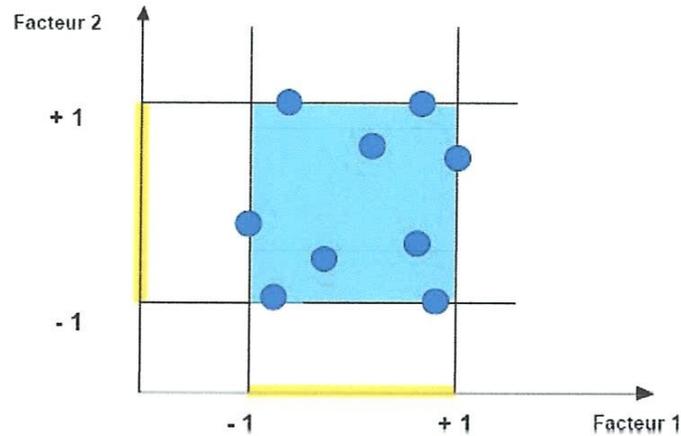
On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé l'espace expérimental (figure II-13).

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 II-13). 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 II-13 Niveaux des facteurs définissant des points expérimentaux dans l'espace expérimental*

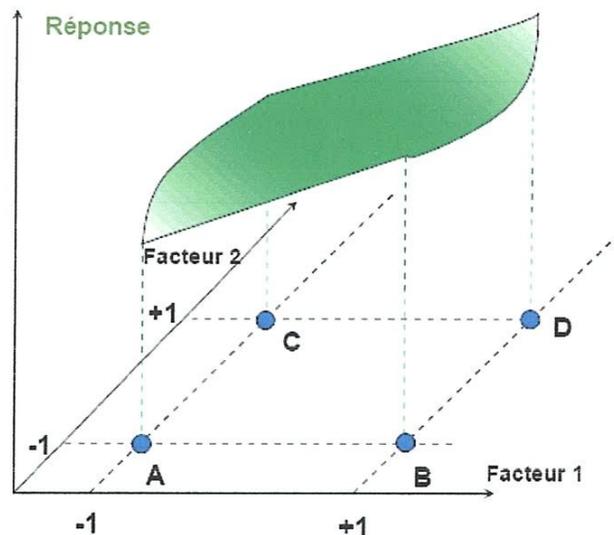
La réunion des domaines de chaque facteur définit le « domaine d'étude ». Ce domaine d'étude est la partie de l'espace expérimental retenu par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire un ensemble d'expériences bien définies, est représentée par une série de points disposés dans le domaine d'étude (figure II-14).



*Figure II-14* Définition du domaine d'étude par l'expérimentateur

Cette manière de représenter une expérimentation par un ensemble de points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude.

La définition que nous venons de donner s'applique bien aux variables continues. Mais il existe d'autres types de variables qui ne sont pas continues.



*Figure II-15* Définition de la 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 attribue à la réponse un axe orthogonal à l'espace

expérimental. La représentation géométrique d'un plan d'expériences et des réponses associées nécessite donc un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. La représentation géométrique des résultats d'un plan à deux facteurs nécessite un espace à trois dimensions : une pour la réponse, deux pour les facteurs.

À chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. À 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 II-15).

## II-5 Planification des expériences

Les paramètres de coupe ( $V_c, f, a_p, t$ ), ainsi que la géométrie de la partie active de l'outil ( $\alpha, \gamma, \lambda, \chi, \epsilon_r$ ), sont considérés comme paramètres d'entrée. Les efforts de coupe, la durée de vie de l'outil, la rugosité, ... représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant la méthode de planification des expériences.

### II-5-1 Méthode de planification des expériences

Cette méthode permet d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation du procédé de coupe.

La stratégie de recherche expérimentale consiste à déterminer tout d'abord le nombre d'essais nécessaires. Le nombre d'essais est en fonction des facteurs de base (fonction entrée) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs.

Dans notre étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base ( $V_c, f, a_p$ ) sur les diverses fonctions d'optimisation (Rugosité, Efforts de coupe, durée de vue). Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule suivante:

$$N = q^k \dots\dots\dots (II-1)$$

Où:

- N: nombre d'essais ;
- q: nombre de niveaux de variations des facteurs de base ;
- k: nombre de facteurs de base.

Dans notre cas, nous avons trois facteurs de base ( $k=3$ ) et chaque facteur a trois niveaux de variation (un niveau supérieur (+1), niveau moyenne (0) et un niveau inférieur (-1)).

Nous avons alors:  $N=3^3=27$ .

Les essais ont été numérotés de 1 à 27. La matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe.

La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le tableau II-6.

N° d'essai	Facteurs		
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)
	Valeurs codifiées des facteurs		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0
3	-1	-1	+1
4	-1	0	-1
5	-1	0	0
6	-1	0	+1
7	-1	+1	-1
8	-1	+1	0
9	-1	+1	+1
10	0	-1	-1
11	0	-1	0
12	0	-1	+1
13	0	0	-1
14	0	0	0
15	0	0	+1
16	0	+1	-1
17	0	+1	0
18	0	+1	+1
19	+1	-1	-1
20	+1	-1	0
21	+1	-1	+1
22	+1	0	-1
23	+1	0	0
24	+1	0	+1
25	+1	+1	-1
26	+1	+1	0
27	+1	+1	+1

Tableau II-7 Matrice de planification pour un plan 3<sup>3</sup>

## **II-6 Réponses et variables**

Quelque soit la méthode utilisée, lors de chaque d'essai, nous analyserons la performance d'usinage en nous basant sur :

- l'usure et la vie d'outil ;
- les forces de coupe ;
- les pressions de coupe ;
- les états de surface des pièces ;
- la puissance de coup

Selon l'objectif de chaque série d'essai, les variables seront:

- les paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur et le temps d'usinage) ;

## **II-7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements indispensables aux essais. La composition chimique des éprouvettes et les caractéristiques des matériaux de coupe ont été définies. Les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences ont été désignées.

## **Chapitre III**

### **Étude de l'Usinabilité de l'acier**

**X2CrNi18-9**

### III.1 Introduction

Ce chapitre porte sur l'évolution des différents paramètres technologiques étudiées tels que les efforts et les pressions de coupe, la rugosité de surface. Les résultats expérimentaux obtenus à partir des mesures effectuées par les équipements exposés au chapitre II seront présentés et nous proposons une analyse complète pour comprendre le comportement de l'outil de coupe lors de l'usinage de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9.

### III-2 Essais réalisés

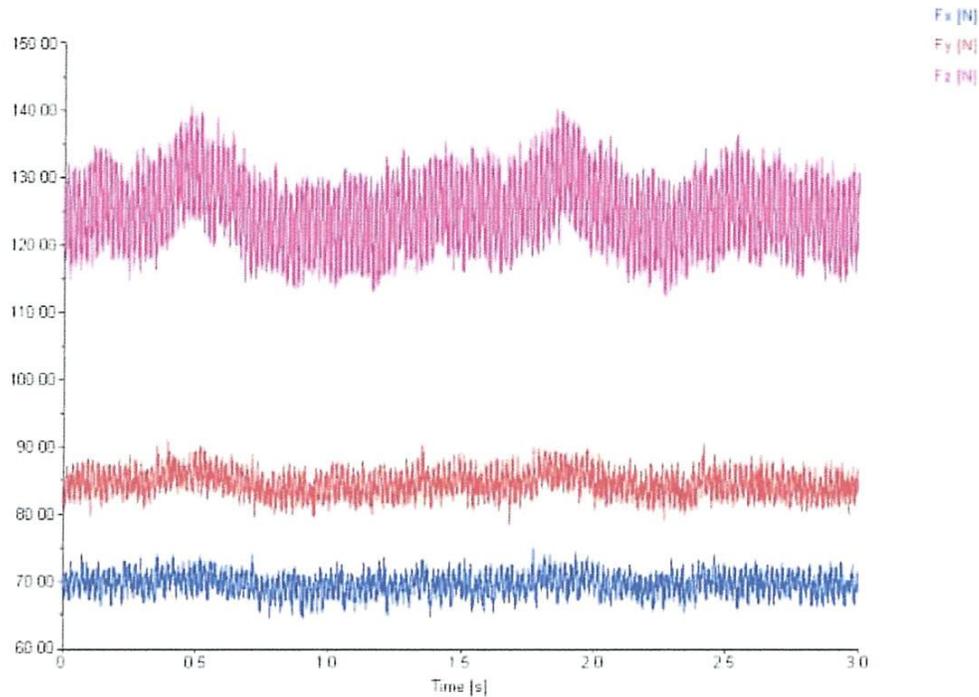
Les essais ont été réalisés pour caractériser l'usinabilité de l'acier inoxydable X2CrNi18-9.

L'ensemble des résultats indiqués dans ce chapitre sont comme suit :

- Résultats de l'influence des éléments du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ) sur les efforts de coupe.
- Résultats de l'influence des éléments du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ) sur les efforts spécifiques.
- Résultats de l'influence des éléments du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ) sur les pressions de coupe.
- Résultats de l'influence des éléments du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ) sur la rugosité des surfaces.
- Résultats de l'influence des éléments du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ) sur la puissance de coupe.

### III-3 Evolution des efforts de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe

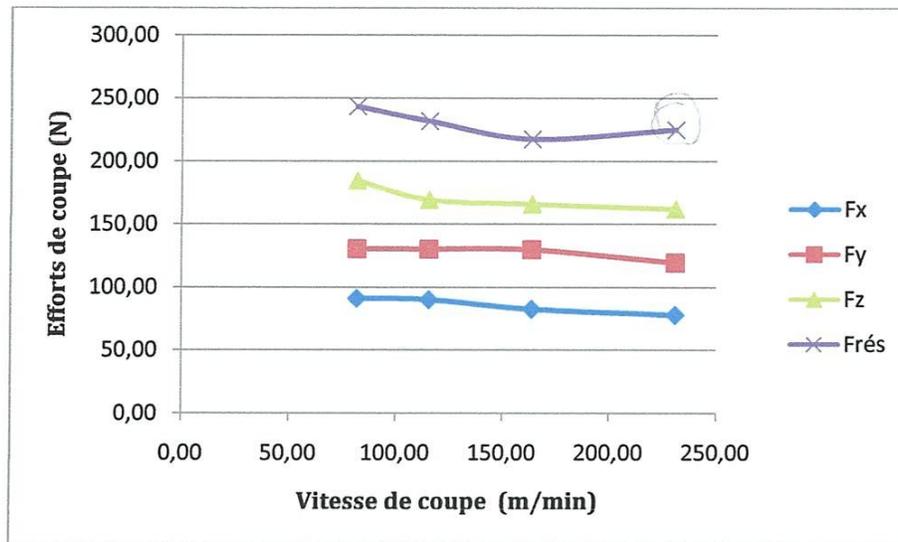
La *figure III-1* présente un exemple d'acquisition des efforts de coupe par la plateforme Kistler. Ces résultats correspondent aux profils des trois composantes des efforts enregistrés (effort axial, effort radial et effort tangentiel).



*Figure III-1 Exemple d'acquisition des efforts de coupe.*

### III-3-1 Influence de la vitesse de coupe

La *figure III-2* montre l'évolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9. On remarque que les efforts ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) diminuent avec l'augmentation de la vitesse de coupe de (16.73%, 9.2%, 13.93%) successivement, cela est dû à l'augmentation de la température dans la zone de coupe qui rend le matériau plus malléable et s'écoule facilement sur la surface d'attaque. On remarque que Pour l'effort résultant ( $F_{rés}$ ) diminuent avec l'augmentation de la vitesse de coupe de (11.87%). Au-dessus de la vitesse (163m/min), on a remarqué un changement brusque de l'allure vers l'augmentation.



**Figure III-2** Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse pour  $f=0.12\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.5\text{mm}$

### III-3-2 Influence de l'avance

La figure III-3 illustre l'influence de l'avance sur les trois composantes de l'effort de coupe et l'effort résultant. Avec l'augmentation de l'avance la section du copeau cisailé accroît et par conséquent la force demandée pour l'enlèvement de la matière s'accroît. L'analyse des résultats montre que l'effort résultant est le plus affecté par l'avance suivi par l'effort tangentiel, suivi par l'effort radial et en dernier lieu par l'effort axial. sur le plan pratique une augmentation de l'avance de  $0.08\text{mm/tr}$  à  $0.2\text{mm/tr}$  conduit à une augmentation des efforts (Fx, Fy, Fz et Fres) successivement de (21.27%, 32.63%, 44.16%, 37.97%)

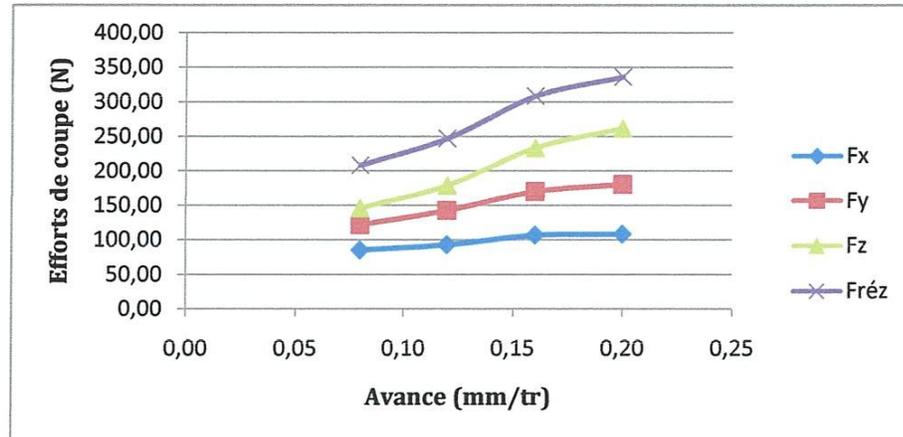


Figure III-3 Evolution des efforts de coupe en fonction de l'avance;

$V_c = 113.88 \text{ m/min}$ ,  $a_p = 0.5 \text{ mm}$

### III-3-3 Influence de la profondeur de passe

On a remarqué que pour des petites valeurs de la profondeur de passe, l'effort radial est prépondérant par rapport à l'effort axial et ( $F_z$ ). Au-delà de la valeur de  $a_p = 0.8 \text{ mm}$ , l'effort axial dépasse l'effort radial. Cela peut être expliqué par le travail de l'outil en tournage par son rayon du bec aux petites profondeurs de passe. Avec l'augmentation de  $a_p$ , la coupe se fait en dehors de la limite du rayon du bec de l'outil et la pièce présente une résistance à la pénétration de l'outil dans le sens de l'effort tangentiel et en particulier axial. Car la longueur de l'arête tranchante en contact avec la pièce augmente, autrement dit l'outil ne travaille plus avec son rayon seulement. Sur le plan pratique une augmentation de la profondeur de passe de 0.25 à 1 mm conduit à une augmentation des quatre composantes de l'effort de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  et  $F_{rés}$ ) de (71.14%, 28.69%, 70.81%, 59.93%) successivement.

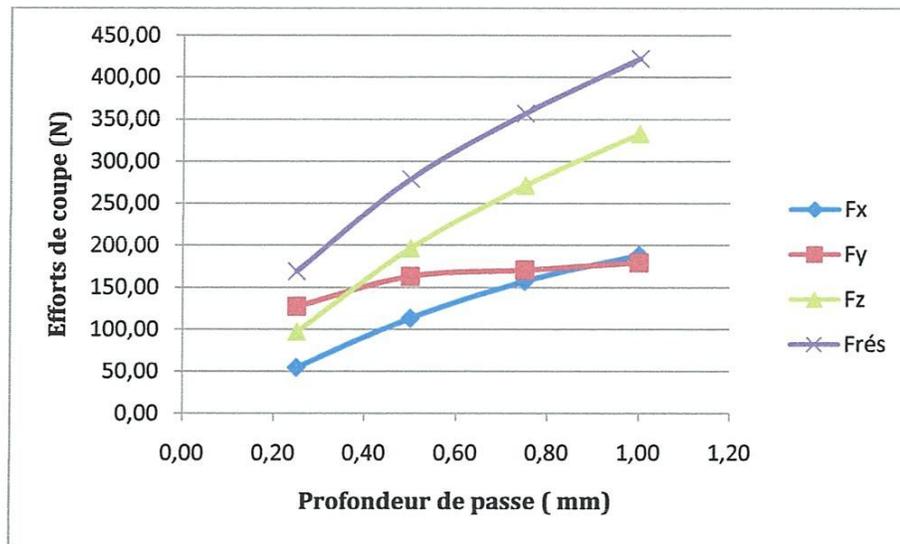


Figure III-4 Evolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe;  $V_c=112.31\text{m/min}$ ,  $f=0.12\text{mm/tr}$

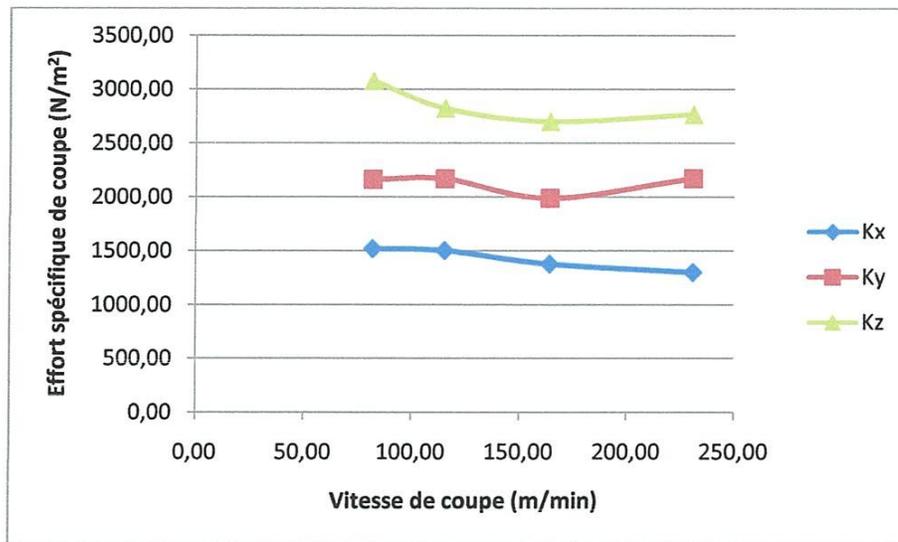
### III-4 Evolution des pressions de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe

La pression de coupe, aussi appelée effort spécifique, est une grandeur définie comme étant l'effort de coupe par unité de surface,

$$K_z = F_z / (f \times a_p) \dots\dots\dots (III-1)$$

#### III-4-1 Influence de la vitesse de coupe

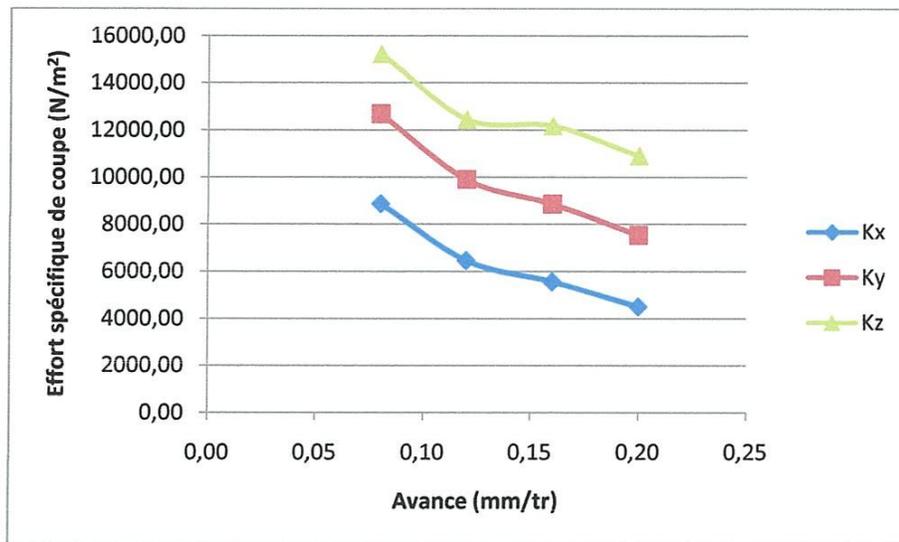
La *figure III-5* présente l'influence de la vitesse de coupe sur les efforts spécifiques. On peut remarquer sur cette figure que la pression de coupe diminue légèrement avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Cette réduction peut s'expliquer par les hautes températures générées pendant la coupe et qui entraînent un ramollissement de la matière à l'interface pièce-outil-copeau et par conséquent une diminution des efforts et des pressions de coupe. Sur le plan pratique une augmentation de la vitesse de coupe de 80 à 240 *m/min* conduit à une diminution des pressions de coupe ( $K_x$ ,  $K_y$  et  $K_z$ ) successivement de (16.73%, 0.43%, 11.31%).



**Figure III-5** Evolution des pressions de coupe en fonction de la vitesse  
pour  $f=0.12\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.5\text{mm}$

#### III-4-2 Influence de l'avance

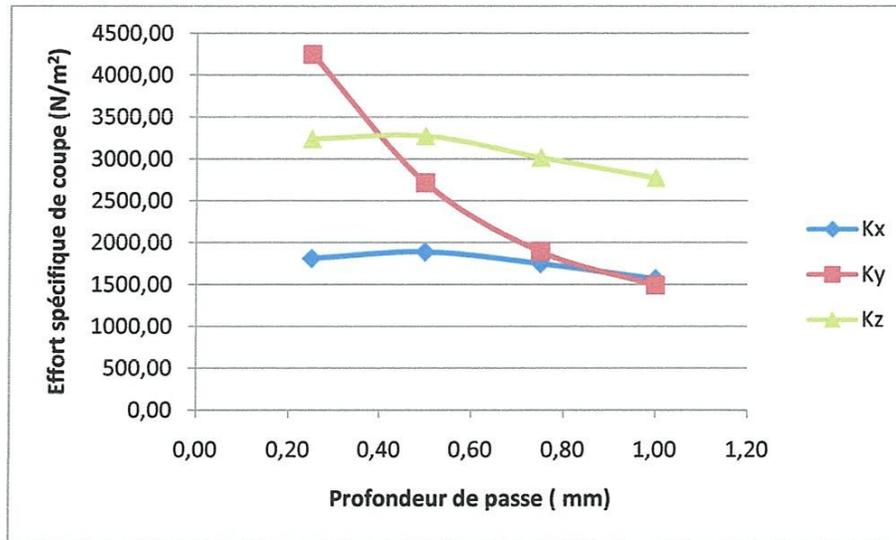
La **figure III-6** présente l'évolution des pressions de coupe en fonction de l'avance. On remarque qu'avec l'augmentation de l'avance, les pressions de coupe diminuent. Pour une faible avance, on enregistre des pressions extrêmement élevées. Pour une avance de  $0.08\text{mm/tr}$ , on a enregistré des valeurs maximales des pressions de coupe de (8868.75; 12671.88 et 15221.88) MPa respectivement pour (Kx, Ky et Kz). Pour une avance de  $0.20\text{ mm/tr}$ , les pressions chutent successivement de (96.81 ; 68.42 ; 39.59) %. Ici, un compromis reste à faire entre la diminution des pressions de coupe et la dégradation de l'état de surface due à l'élévation de l'avance.



**Figure III-6** Evolution des pressions de coupe en fonction de l'avance pour  $V_c=113.88\text{m/min}$ ,  $a_p=0.5\text{mm}$

#### III-4-3 Influence de la profondeur de passe :

La *figure III-7* présente l'évolution des pressions de coupe en fonction de la profondeur de passe, on remarque que l'augmentation de la profondeur de passe conduit à une chute des pressions de coupe sauf dans le cas de la pression axiale. Pour les valeurs prises de profondeur de passe de (0.25 à 1 mm), on enregistre une diminution des pressions de coupe ( $K_y$  et  $K_z$ ) successivement de (184.43 et 16.74) %. Concernant la pression axiale, on a enregistré une élévation avec l'augmentation de la profondeur de passe jusqu'à une valeur supérieure au rayon du bec de l'outil ( $a_p=0.5\text{mm}$ ). Au delà de cette valeur on enregistre une stabilisation avec une légère diminution. Lorsque la profondeur de passe s'accroît de 0.5 à 1 mm on enregistre une diminution de l'effort axial de (15.41 %).

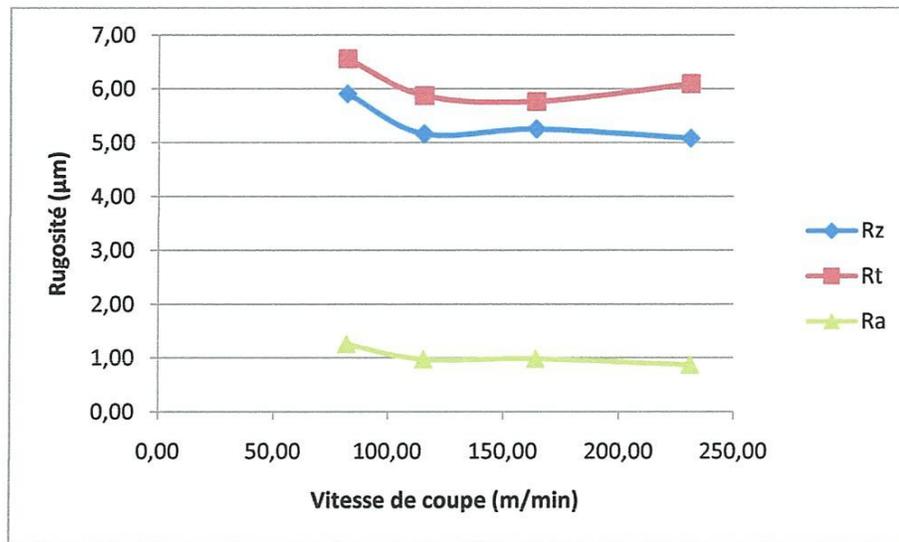


*Figure III-7 Evolution des pressions de coupe en fonction de la profondeur de passe pour  $V_c=150\text{m/min}$ ,  $f=0.08\text{mm/tr}$*

### III-5 Evolution de la rugosité en fonction des paramètres du régime de coupe

#### III-5-1 Influence de la vitesse de coupe

La *figure III- 8* illustre l'influence de la vitesse de coupe sur les différents critères de la rugosité lors de l'usinage de l'acier X2CrNi18-9. On a remarqué que la qualité de surface usinée reste presque stable le long de la plage des vitesses de coupe utilisées avec une légère diminution des valeurs de la rugosité. Nous signalons premièrement que l'arête rapportée était presque toujours présente lors de l'usinage. on a remarqué que l'état de surface s'améliore avec l'augmentation de la vitesse de coupe jusqu'à une valeur limite de 163m/min Pour le  $R_t$ , au delà de cette valeur on a enregistré une augmentation de la rugosité. Dans la zone entre 163 et 230m/min l'arête rapportée est plus résistante.



**Figure III-8** Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe pour  $a_p=0.5\text{m/min}$ ,  $f=0.08\text{mm/tr}$

### III-5-2 Influence de l'avance

La *figure III-9* montre que l'avance a une influence très significative, car son augmentation engendre des sillons hélicoïdaux résultant de la forme de l'outil et du mouvement hélicoïdal outil-pièce. Ces sillons sont d'autant plus profonds et plus larges que l'avance est élevée. En pratique, les conséquences de l'influence de l'avance sur la rugosité sont comme suit: l'augmentation de l'avance de 0.08 à 0.20mm/tr, conduit à une augmentation des critères de rugosité (Ra, Rz et Rt) successivement de (62.33; 39.56 et 27.58) %. On remarque que le critère Ra est le plus affecté par l'avance.

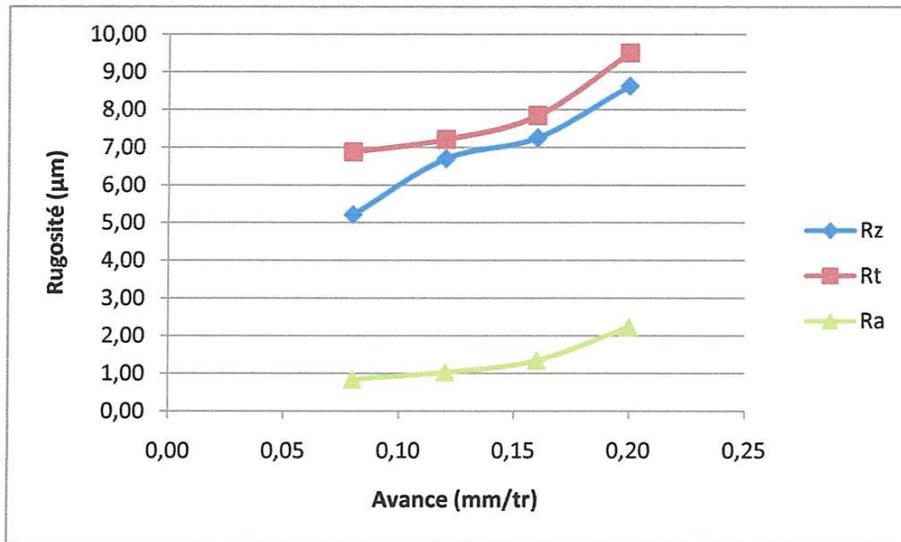


Figure III-9 Evolution de la rugosité en fonction de l'avance par tour pour

$$V_c=113.88\text{m/min}, a_p=0.5\text{mm}$$

### III-5-3 Influence de la profondeur de passe

L'évolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe (*figure III-10*), montre que l'influence de ce paramètre est moins importante que l'avance. Ceci est dû à l'augmentation de la longueur de contact entre l'outil et la pièce. Ce qui améliore les conditions d'évacuation de la chaleur dans la zone de coupe. Pour les valeurs de profondeur de passe prises de (0.25 à 1mm), on enregistre une augmentation des critères de rugosité de (3.61) % pour Ra, de (5.56) % pour Rz et enfin de (9.42) % pour Rt respectivement.

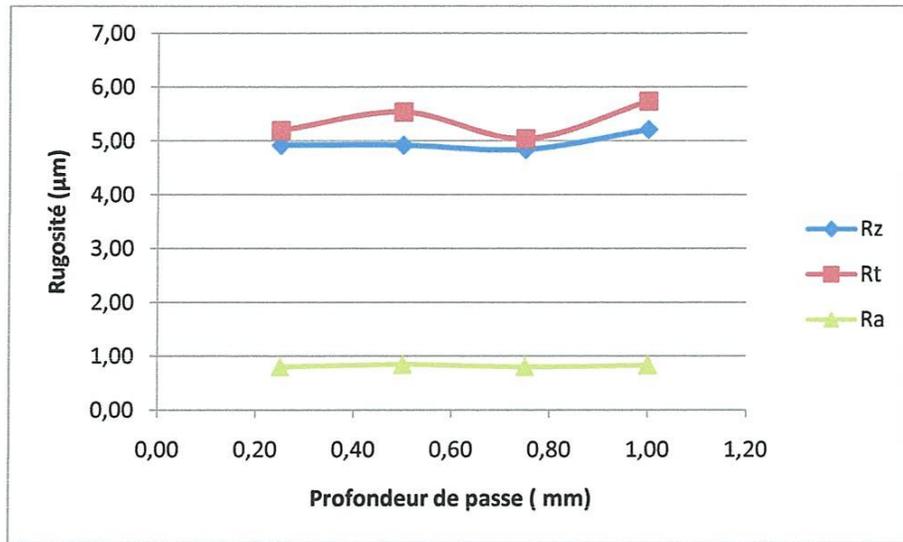


Figure III-10 Evolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe pour  $V_c=112.31\text{m/min}$ ,  $f=0.12\text{mm/tr}$

**III-6 - Effet des conditions de coupe sur la puissance de coupe**

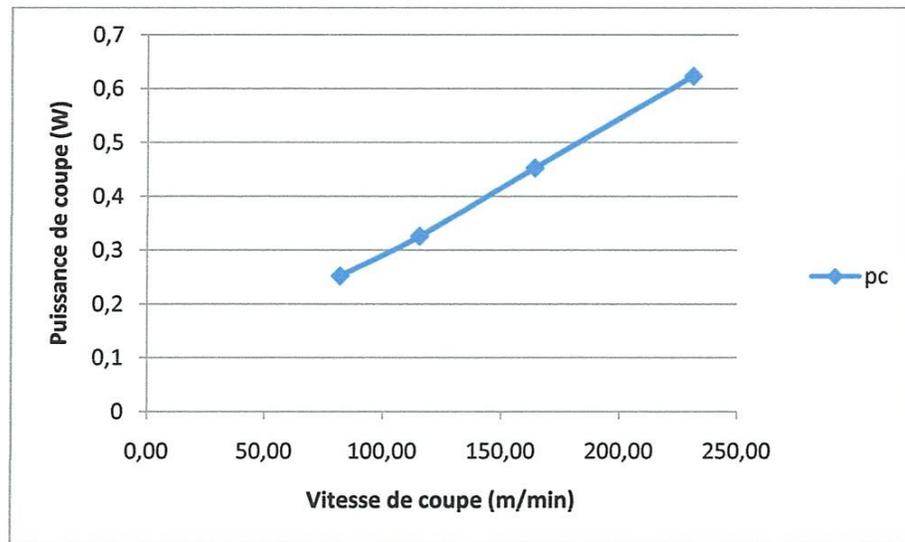
La puissance de coupe est définie comme suite :

$P_c = F_z \times V_c / 60 \times 1000$  (kw)..... **III-2**

$P_c = F_z \times V_c \Rightarrow P_c = \frac{K_z \times a_p \times f \times V_c}{60}$  (W) ..... **III-3**

**III-6-1- Effet de la vitesse de coupe sur la puissance de coupe**

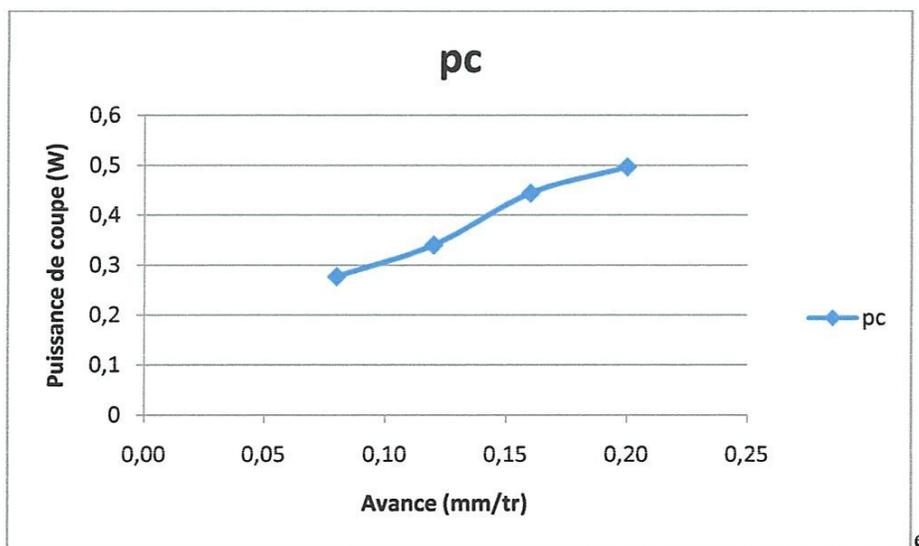
La puissance de coupe augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe ce qui est présenté dans la figure III-11, et c'est logique car de la vitesse de coupe Et étroitement liée à la puissance de coupe suivant l'équation (III.2) l'équation de la vitesse de coupe de 90 à 230 m/min conduit a augmentation de la puissance de coupe de (9.42) %



**Figure III-11** : influence de la vitesse de coupe sur la puissance de coupe,  $a_p=0.5\text{mm}$ ,  $f=0.12\text{mm/tr}$ .

### III-6-2- Effet de l'avance sur la puissance de coupe

La figure III-12 illustre l'effet de l'avance sur la puissance de coupe, on remarque clairement que cette dernière augmente avec l'augmentation de l'avance, car si l'avance augmente la section de coupe accroît ce qui implique une résistance à la rupture et des efforts plus élevés pour l'opération de l'enlèvement du copeau, ce qui augmente la puissance de coupe. Sur le plan pratique, une augmentation de l'avance de 0.08 à 0.20 mm/tr, conduit à une augmentation de la puissance de coupe de 44.16%.



**Figure III-12** : L'effet de l'avance sur la puissance de coupe,  $[V_c=113.88\text{m/min}, a_p=0.5\text{mm}]$ .

### III-6-3- Effet de la profondeur de passe sur la puissance de coupe

La figure III-13 expose l'effet de la profondeur de passe sur la puissance de coupe. L'analyse des résultats montre que l'augmentation de la profondeur de passe fait augmenter considérablement la puissance de coupe. Une augmentation de la profondeur de passe de 0.25 à 1mm conduit à une augmentation de la puissance de 70.81%.

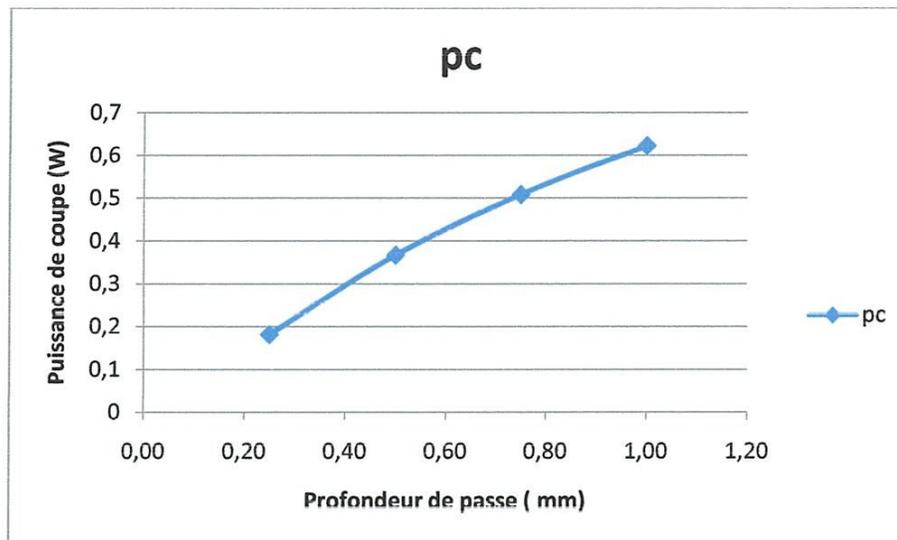


Figure III-13 : Effet de la profondeur de passe sur la puissance de coupe,  
[Vc=112.31 m/min, f=0.12 mm/tr].

### III-7 Conclusion

ce chapitre nous a permis d'étudier l'usinabilité de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 en terme de rugosité de surface, d'effort de coupe, pressions de coupe et puissance de coupe

En ce basant sur les résultats obtenus dans ce chapitre nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- L'influence de la profondeur de passe sur les efforts de coupe est plus significative sur les efforts radial et axial car les valeurs de ces composantes se croisent à une profondeur de passe limite  $ap_{(limite)} = r_{\epsilon} (1 - \cos(\chi)) \approx 0.6mm$ .
- les efforts (Fx, Fy et Fz) diminuent avec l'augmentation de la vitesse de coupe de (16.73%, 9.2%, 13.93%) successivement.

- Pour l'effort résultant ( $F_{rés}$ ) Au-dessus de la vitesse (163m/min) ,on a remarqué un changement brusque de l'allure vers l'augmentation, les vibrations dues aux vitesses de coupe élevées conduisent à une légère élévation des efforts de coupe.
- l'effort résultant est le plus affecté par l'avance suivi par l'effort tangentiel, suivi par l'effort radial et en dernier lieu par l'effort axial.
- Sur le plan pratique une augmentation de la profondeur de passe de 0.25 à 1 mm conduit à une augmentation des quatre composantes de l'effort de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  et  $F_{rés}$ ) de (71.14%, 28.69%, 70.81%, 59.93%) successivement.
- la pression de coupe diminue légèrement avec l'augmentation de la vitesse de coupe.
- l'augmentation de la profondeur de passe conduit à une chute des pressions de coupe sauf dans le cas de la pression axial.
- la qualité de surface usinée reste presque stable le long de la plage des vitesses de coupe utilisées avec une légère diminution des valeurs de la rugosité .
- l'avance est le paramètre le plus influent sur la qualité de surface usinée et l'effet de la profondeur de passe est moins important que l'avance.
- La puissance de coupe augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe et l'augmentation de la profondeur de passe et de l'avance

Le chapitre qui suit permet de faire une modélisation de de la rugosité, et de l'usure en dépouille cela en fonction des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $T_c$ ) en se basant sur basée sur l'analyser de la ANOVA

## **Chapitre IV**

# **Modélisation mathématique de l'usure VB et la rugosité de la surface par MSR**

#### IV-1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons déterminer les modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe (vitesse de coupe, avance par tour, et temps d'usinage) et les paramètres étudiés (rugosité et usure de l'outil). Pour faire une analyse de variance et pour déterminer les constantes des modèles mathématiques et le coefficient de corrélation de chaque modèle ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse, nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé « MINITAB » et aussi le logiciel «*Design Expert 8*». L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur la rugosité et sur l'usure de l'outil.

La méthodologie de surface de réponse (MSR) est une procédure qui comprend six étapes [57] :

- 1) définir les variables d'entrée indépendantes et les réponses de sortie désirées ;
- 2) adopter un plan de conception expérimentale ;
- 3) effectuer une analyse de régression avec le modèle mathématique (quadratique) de MSR ;
- 4) analyser par ANOVA les variables d'entrée indépendantes, afin de trouver les paramètres qui affectent considérablement la réponse ;
- 5) déterminer la situation du modèle quadratique de MSR et de décider si le modèle de MSR à besoin des variables de dépistage ou non et enfin ;
- 6) optimiser, la conduite d'expérimentation et la confirmation et de vérifier les caractéristiques de performance prédite.

L'utilisation de la méthodologie de la surface de réponse permet d'une part de modéliser une variable dépendante  $Y$ , dite variable de réponse (rugosité et usure en dépouille ( $VB$ )), en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs),  $X_1, X_2, \dots, X_k$ , d'autre part, d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse. On peut ainsi écrire le modèle pour une réponse donnée ( $Y$ ) sous la forme suivante :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i X_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^k a_{ij} X_i X_j \quad (\text{IV-1})$$

- $Y$  est la grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur. C'est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée ;
- $X_i$  représente le niveau attribué au facteur  $i$ . C'est la valeur de la coordonnée du facteur  $i$  retenue par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On supposera même, par la suite, que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression) ;
- $a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii}$  représentent respectivement le terme constant, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variables et des termes quadratiques. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

Le coefficient de détermination de la régression multilinéaire  $R^2$  est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation (IV-2).

$$R^2 = \frac{\sum (Y_i - \bar{y})^2}{\sum (\bar{Y}_i - \bar{y})^2} \quad (\text{IV-2})$$

Avec  $Y_i$  : valeur de la réponse calculée à la  $i^{\text{e}}$  expérience ;

$\bar{Y}_i$  : valeur mesurée à la  $i^{\text{e}}$  expérience ;

$\bar{Y}$  : valeur moyenne des réponses mesurées.

Afin de tester la validité du modèle, l'analyse des variances (ANOVA) est utilisée pour examiner la signification et l'adéquation du modèle. ANOVA permet de tracer les surfaces de réponse, d'estimer l'influence et l'interaction simultanées des paramètres de coupe sur les phénomènes étudiés (la rugosité et l'usure en dépouille et la tenue).

#### IV.2. TESTE DE VALIDITÉ DES MODÈLES

Afin de tester la validité du modèle, on utilise :

- L'analyse de la variance (ANOVA) : est utilisée pour estimer l'influence des effets et des interactions simultanées des paramètres de coupe sur la rugosité de surface et les efforts de

$$A^2 = -N - S \quad (\text{IV. 5})$$

Où : N est la taille de l'échantillon.

$$S = \sum_{i=1}^N \frac{(2i-1)}{N} [\log F(Y_i) + \log(1 - F(Y_{N+1-i}))] \quad (\text{IV. 6})$$

Où : F est la fonction de répartition de la distribution spécifiée.

Les valeurs critiques dépendent des distributions (normale, log-normale, exponentielle...). Les valeurs de P sont souvent utilisées dans les tests d'hypothèses dans lesquels on peut ou non rejeter une hypothèse nulle. La valeur de P représente la probabilité de faire une erreur de type 1, ou de rejeter l'hypothèse nulle si elle est vraie. Plus la valeur de P est petite, plus la probabilité de faire une erreur en rejetant l'hypothèse nulle est faible. Une valeur limite de 0.05 est utilisée. Autrement dit, rejetez l'hypothèse nulle si la valeur de P est inférieure à 0.05.

Pour prendre une décision, on choisit le niveau de signification,  $\alpha$  (alpha), avant le test:

- Si P est inférieur ou égal à  $\alpha$ , on rejette  $H_0$ .
- Si P est supérieur à  $\alpha$ , on ne rejette pas  $H_0$ .

### IV.3. OPTIMISATION

L'optimisation d'une réponse ou la recherche d'un compromis entre plusieurs réponses consiste à définir, au sein du domaine expérimental, un réglage des facteurs permettant de satisfaire au mieux les exigences énoncées en termes de réponse. Dans le but d'optimiser les paramètres de coupe, chaque paramètre dans la conception (MSR) a été étudié à trois niveaux différents. Le choix de trois niveaux pour chaque variable est exigé par cette conception afin d'explorer la région de la surface de réponse à proximité de l'optimum. L'optimisation des réponses par la méthodologie de surface de réponse (MSR) aide à identifier la combinaison des paramètres des variables d'entrées qui optimisent une réponse unique ou un ensemble de réponses. Une optimisation commune doit satisfaire aux conditions requises pour toutes les réponses de l'ensemble. L'optimisation de réponses multiples est une

méthode permettant un compromis entre diverses réponses grâce à La fonction de désirabilité qui permet de rassembler des critères ayant des unités différentes par le biais de fonction de désirabilité élémentaire et variant entre 0 et 1. Une désirabilité de 0, c'est-à-dire une désirabilité élémentaire prenant la valeur nulle, représente une configuration inacceptable pour la réponse sélectionnée, alors qu'une désirabilité prenant la valeur 1 représente le cas idéal.

L'objectif le plus important de cette étude est de parvenir à la rugosité de surface (Ra) et l'usure en dépouille (VB) souhaitées avec les paramètres de coupe optimale. Pour atteindre ce but, l'exploitation de la méthodologie de surface de réponse (MSR) pour l'optimisation semble être une technique utile. Ici, le but est de minimiser la rugosité de surface (Ra) et l'usure en dépouille (VB) pour le carbure revêtu.

Pour résoudre ce type de problème de conception des paramètres, une fonction objective,  $F(x)$ , est définie comme suit.

$$DF = \left( \prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j}} \quad (IV.7)$$

$$F(x) = -DF$$

Où  $d_i$  est la désirabilité définie pour la sortie ciblée et  $w_i$  est la fonction de pondération de  $d_i$ . Pour différents objectifs de chaque sortie ciblée, la désirabilité  $d_i$  est définie dans différentes formes. Si l'objectif est d'atteindre une valeur spécifique de  $T_i$ , la désirabilité  $d_i$  est :

$$d_i = 0 \quad \text{Si } Y_i \leq \text{Inf}_i$$

$$d_i = \left[ \frac{Y_i - \text{Inf}_i}{T_i - \text{Inf}_i} \right] \quad \text{Si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq T_i \quad (IV.8)$$

$$d_i = \left[ \frac{Y_i - \text{Sup}_i}{T_i - \text{Sup}_i} \right] \quad \text{Si } T_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i$$

$$d_i = 0 \quad \text{Si } Y_i \geq \text{Sup}_i$$

Pour un objectif de trouver un maximum, la désirabilité est montrée comme suite :

$$d_i = 0 \text{ Si } Y_i \leq \text{Inf}_i$$

$$d_i = \left[ \frac{Y_i - \text{Inf}_i}{\text{Sup}_i - \text{Inf}_i} \right] \text{ Si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i \quad (\text{IV.9})$$

$$d_i = 1 \text{ Si } Y_i \geq \text{Sup}_i$$

Pour un objectif de rechercher un minimum la désirabilité peut être définies par les formules suivantes :

$$d_i = 1 \text{ Si } Y_i \leq \text{Inf}_i$$

$$d_i = \left[ \frac{\text{Sup}_i - Y_i}{\text{Sup}_i - \text{Inf}_i} \right] \text{ Si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i \quad (\text{IV.10})$$

$$d_i = 0 \text{ Si } Y_i \geq \text{Sup}_i$$

Donc, l'objectif de notre étude est de choisir un réglage optimal qui maximise la fonction combinée de désirabilité DF, C'est-à-dire minimisé Ra et VB.

#### IV.4. Modélisation de l'usure en dépouille et de la rugosité de la surface en fonction des paramètres d'usinage

Le tableau IV-1 présente les conditions de coupe (la vitesse de coupe, l'avance par tour et le temps d'usinage), et les résultats expérimentaux correspondants à l'usure en dépouille (*VB*) et à la rugosité de surface (*Ra*). Ces résultats sont obtenus suite aux différentes combinaisons des conditions de coupe (matrice de planification des expériences pour un plan  $N = 3^3$ ), lors de tournage de l'acier X2CrNi18-9 par un outil en Carbure revêtu [Ti(C,N)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN]. L'analyse des résultats de ce tableau montre que la valeur minimale de l'usure en dépouille *VB* a été trouvée suivant les conditions de l'essai N° 1 c.-à-d. pour les conditions de coupe suivantes (280 m/min ; 0,08 mm/tr et 4 minutes). Mais la valeur minimale de la rugosité de surface (*Ra*) a été observée dans l'essai N° 10 c.-à-d. (330 m/min ; 0,08 mm/tr et 4 minutes). Les valeurs maximales de l'usure en dépouille (*VB*) et de la rugosité de surface (*Ra*) ont été

observées aux essais N° 27 pour les conditions de coupe suivantes (400 m/min ; 0.14 mm/tr et 16 minutes) .

N°	Facteurs			Réponses	
	Vc, m/min	f, mm/tr	t, min	Ra, $\mu\text{m}$	VB, mm
1	280	0.08	4	0.56	0.025
2	280	0.08	10	0.61	0.050
3	280	0.08	16	0.74	0.100
4	280	0.11	4	0.81	0.030
5	280	0.11	10	1.17	0.074
6	280	0.11	16	1.25	0.110
7	280	0.14	4	1.32	0.045
8	280	0.14	10	1.34	0.069
9	280	0.14	16	1.35	0.110
10	330	0.08	4	0.55	0.040
11	330	0.08	10	0.62	0.115
12	330	0.08	16	0.80	0.190
13	330	0.11	4	0.79	0.060
14	330	0.11	10	1.21	0.135
15	330	0.11	16	1.60	0.170
16	330	0.14	4	1.31	0.06
17	330	0.14	10	1.47	0.185
18	330	0.14	16	1.92	0.350
19	400	0.08	4	0.80	0.050
20	400	0.08	10	1.24	0.200
21	400	0.08	16	1.99	0.410
22	400	0.11	4	0.87	0.065
23	400	0.11	10	1.55	0.290
24	400	0.11	16	2.95	0.460
25	400	0.14	4	1.16	0.070
26	400	0.14	10	1.70	0.300
27	400	0.14	16	3.20	0.510

*Tableau IV-1 Résultats de l'usure en dépouille et des critères de la rugosité en fonction des paramètres du régime de coupe et du temps (plan complet  $N=3^3$ ).*

#### IV.4.1. Modélisation de la rugosité de surface $Ra$ en fonction des paramètres d'usinage

##### a) Analyse de la variance pour la rugosité $Ra$

Les résultats de l'analyse de variance présentés dans le *tableau IV-2* montre que le temps d'usinage ( $t$ ) a un impact important sur l'évolution de la rugosité  $Ra$  car son pourcentage de contribution est de 31,96% suivie par l'avance avec une contribution de 23,25% et en dernier lieu par la vitesse de coupe avec une contribution de 19,84%. L'interaction ( $Vc \times t$ ) et le produit ( $Vc^2$ ) ont aussi un effet significatif sur  $Ra$ . Les autres termes de modèles peuvent être considérés comme non significatifs.

Source	df	SS	Ms	F Value	P value	Cont. %	Remarque
Model	9	10,51	1,17	31,75	< 0,0001		Significatif
$Vc$	1	2,21	2,21	60,14	< 0,0001	19,84	Significatif
$f$	1	2,59	2,59	70,52	< 0,0001	23,25	Significatif
$t$	1	3,56	3,56	96,88	< 0,0001	31,96	Significatif
$Vc \times f$	1	1,71E-03	1,71E-03	0,046	0,8319	0,02	Non significatif
$Vc \times t$	1	1,91	1,91	51,85	< 0,0001	17,15	Significatif
$f \times t$	1	0,094	0,094	2,55	0,129	0,84	Non significatif
$Vc^2$	1	0,17	0,17	4,55	0,0479	1,53	Significatif
$f^2$	1	0,055	0,055	1,49	0,2389	0,49	Non significatif
$t^2$	1	0,086	0,086	2,33	0,1455	0,77	Non significatif
Residual	17	0,63	0,037			5.65	
Total	26	11,14				100	

*Tableau IV-2 Résultats de l'analyse de variance pour  $Ra$*

##### b) Facteurs influents

Pour mieux visionner les résultats de l'analyse des variances, un graphe de Pareto est construit (figure IV-1). Cette figure classe les paramètres de coupe et leurs interactions suivant leur influence décroissante sur la rugosité  $Ra$ . Les effets sont standardisés pour une meilleure comparaison. Les valeurs standardisées de cette figure sont obtenues en divisant l'effet de chaque facteur par l'erreur sur la valeur estimée du facteur correspondant. Plus l'effet standardisé est élevé, plus le facteur considéré influence la rugosité  $Ra$ .

Une ligne limite les effets significatifs de ceux qui ne le sont pas. L'intervalle de confiance choisi est 95%.

Le graphe de Pareto (figure IV-1) montre les points suivants :

- le temps d'usinage présente un effet énorme sur la rugosité  $Ra$ , les autres facteurs ; l'avance par tour et la vitesse de coupe présentent un effet secondaire sur  $Ra$  ;
- les interactions ( $Vc \times t$  et  $Vc^2$ ) ont un effet secondaire sur  $Ra$ . Mais les autres ( $f \times t$ ),  $Vc \times f$  et  $(t \times t)$ ,  $f^2$  n'influencent pas la rugosité  $Ra$ .

A partir de ces deux points, nous pouvons conclure que le modèle de régression qui prédit la rugosité  $Ra$  en fonction des paramètres de coupe, est déterminé seulement avec les facteurs qui ont un effet significatif.

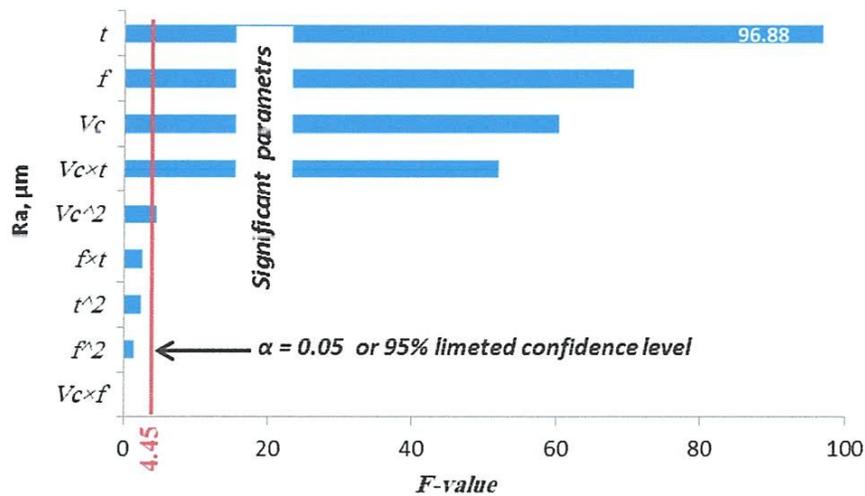


Figure IV-1 Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur la rugosité  $Ra$

La figure IV-2 présente les effets principaux des facteurs considérés : la vitesse de coupe, l'avance par tour et le temps d'usinage sur la rugosité de surface  $Ra$ .

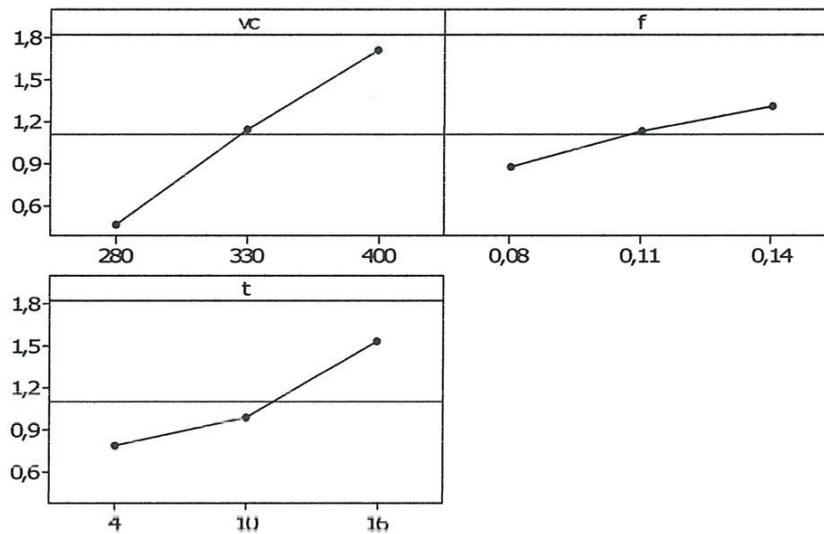
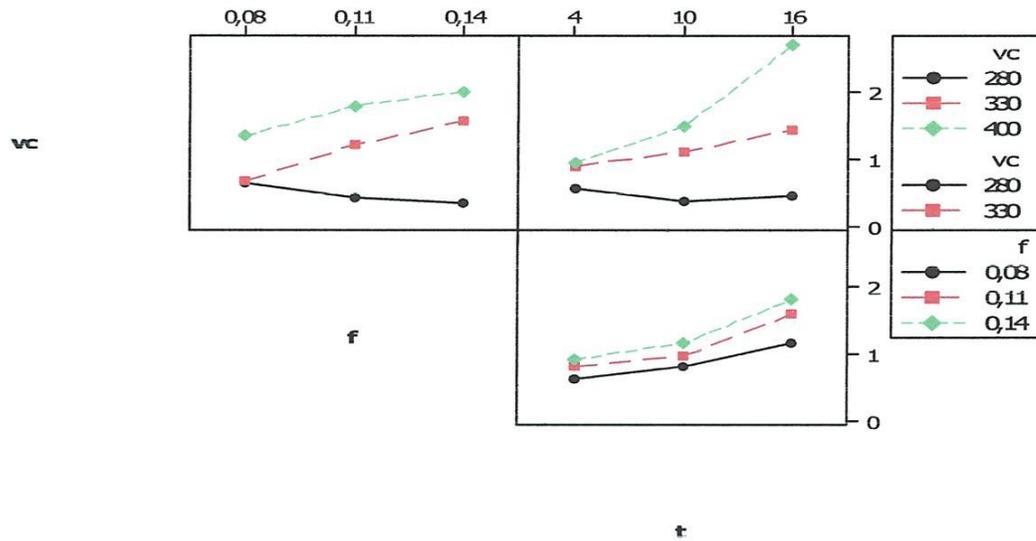


Figure IV-2 Graphes des effets de  $V_c$ ,  $f$  et  $t$  sur  $R_a$  en fonction de  $V_c$ ,  $f$  et  $t$ .

Un diagramme des interactions (figure IV.3) est un diagramme des moyennes pour chaque niveau d'un facteur. Ces diagrammes sont utiles pour juger la présence d'interactions. Une interaction est présente si la réponse pour un niveau d'un facteur dépend du ou des niveaux d'autres facteurs. Dans un diagramme des interactions, les droites parallèles indiquent l'absence d'interaction. Plus les droites s'écartent de la parallèle, plus le degré d'interaction est élevé. Pour qu'il soit possible d'utiliser un diagramme des interactions, il faut que les données pour toutes les combinaisons de niveaux existent.

Les diagrammes des interactions à trois facteurs affichent des diagrammes d'interactions aux trois facteurs.



**Figure IV.3:**Graphique des interactions des facteurs pour le critère de la rugosité ( $Ra$ ) en fonction de  $V_c, f$  et  $t$ .

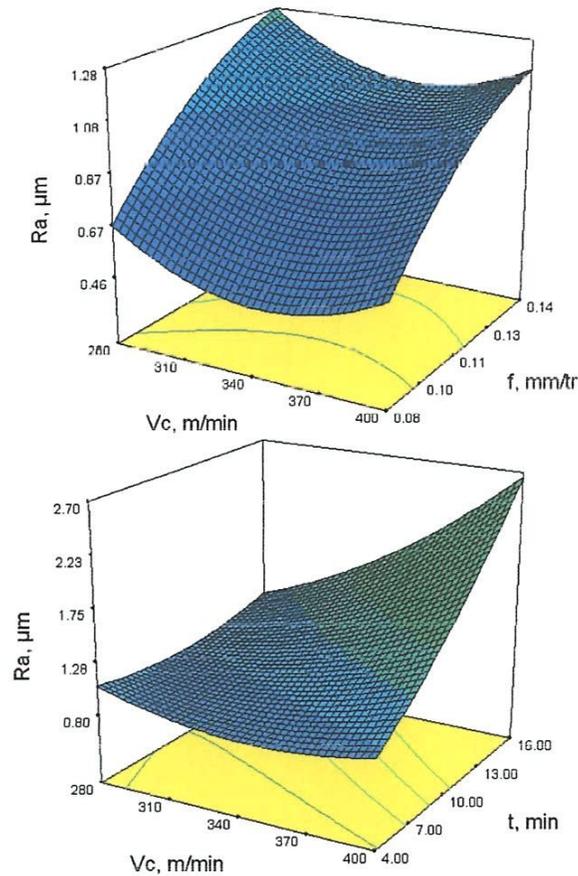
*c) Analyse de régression :  $Ra$  en fonction de  $V_c, f$  et  $t$*

L'analyse de régression de  $Ra$  en fonction de  $V_c, f$  et  $t$  donne l'équation du modèle complet (IV-11) avec un coefficient de corrélation ( $R^2 = 94.39\%$ ).

$$Ra = 5.68 - 0.03V_c + 33f - 0.4t - 0.06V_c \times f + 0.001V_c \times t + 0.49f \times t + 4E-5V_c^2 - 106f^2 + 0.003t^2 \quad (IV.11)$$

La surface de réponse estimée pour la rugosité de surface par rapport aux paramètres de coupe ( $V_c, f$  et  $t$ ) présentées dans (fig. 4- b) montre que la vitesse de coupe a une influence significative sur la rugosité de la surface usinée. On a enregistré des mauvais états de surface à des faibles vitesses de coupe qui peut être expliqué par la présence de l'arête rapportée (Figure IV-5) dû à la ductilité élevée de l'acier inoxydable austénitique. Avec l'augmentation de la vitesse de coupe les valeurs de rugosité diminuent jusqu'à une valeur minimale au-delà elles augmentent. L'augmentation de la rugosité de surface à des vitesses de coupe supérieures à 340 m/min peut être expliqué par la présence des micro-soudures sur la surface usinée en raison de la forte chaleur à la zone de coupe qui conduit au détachement de l'arête rapportée et adhère sur la surface usinée comme vu dans la (Figure IV-5) En plus, l'augmentation de la vitesse de coupe mène à une augmentation de l'usure en dépouille de l'outil provoquant un

mauvais état de surface [15]. En revanche, la rugosité ( $R_a$ ) tend à augmenter considérablement avec l'augmentation de l'avance ( $f$ ) et le temps de coupe ( $t$ ). La surface en 3D qui illustre l'évolution de  $R_a$  en fonction de l'interaction ( $V_c \times t$ ) montre que pour un court temps de coupe égal à (4min) la variation de  $R_a$  est presque stable, et pour temps de coupe égal à (16min) on a remarqué une progression sévère de la qualité de surface. Nous concluons aussi que le temps de coupe est le paramètre le plus prépondérant suivi du l'avance et en dernier de la vitesse de coupe.



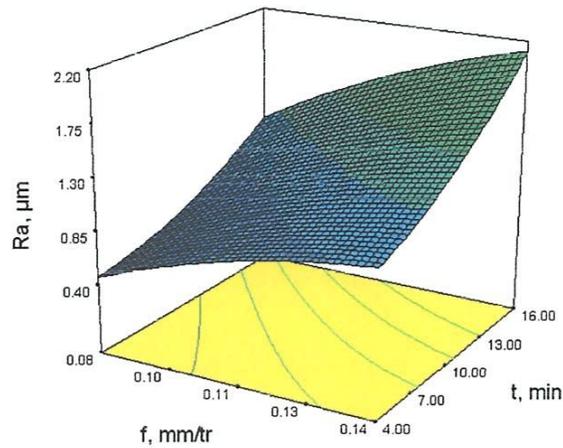


Figure IV-4 Ra en fonction de  $V_c$ ,  $f$  et  $t$

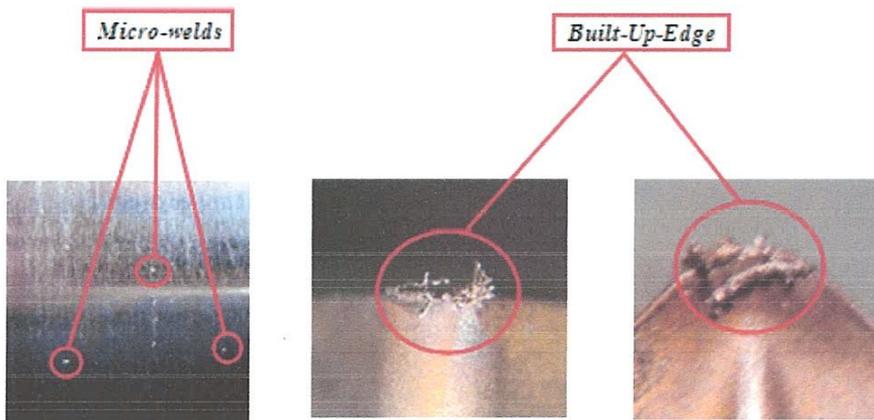


Figure IV-5. Micro-soudures adhérentes sur la surface usinée et arête rapportée collée sur la plaquette de coupe

#### d. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) de la rugosité Ra et celles estimées par les modèles mathématiques obtenus par la méthodologie de surface de réponse (MSR), est présentée graphiquement sur la figure (IV-6). D'après cette figure, les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches.

Tableau IV-3 Pourcentage d'erreur entre les valeurs expérimentales et prédites pour Ra

<i>Essai</i>	<i>Ra exp</i>	<i>Ra préd</i>	<i>Erreur %</i>
1	0,56	0,66978848	19,6050859
2	0,61	0,72639399	19,0809813
3	0,74	0,73299949	-0,94601482
4	0,81	0,72617227	-10,3491021
5	0,17	0,17111111	0,65359477
6	0,25	0,26604995	6,41997961
7	0,32	0,40255607	25,7987704
8	0,34	0,33582824	-1,22698927
9	0,35	0,51910041	48,3144022
10	0,55	0,76909276	39,8350477
11	0,62	0,82134047	32,4742692
12	0,8	1,02358818	27,9485219
13	0,79	0,91053007	15,2569711
14	1,21	1,05111111	-13,1313131
15	1,6	1,54169215	-3,64424057
16	1,31	0,97196738	-25,8040168
17	1,47	1,20088175	-18,3073637
18	1,92	1,77979613	-7,30228508
19	0,8	0,53278542	-33,4018221
20	1,24	1,13893221	-8,15062806
21	1,99	2,095079	5,28035181
22	0,87	0,93329766	7,27559258
23	1,55	1,62777778	5,01792115
24	2,95	2,6722579	-9,41498644
25	1,16	1,25380989	8,0870593
26	1,7	2,03662334	19,8013731
27	3,2	3,1694368	-0,95510003

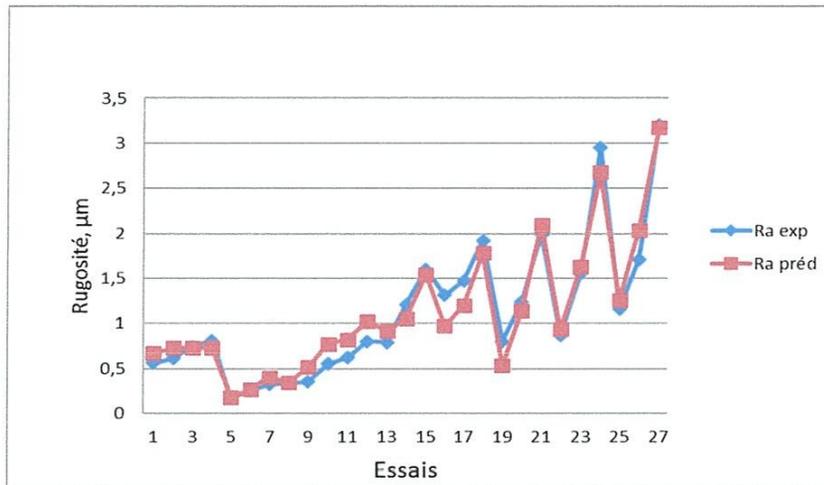


Figure IV-6 Courbes des valeurs expérimentales et estimées de la rugosité Ra

#### IV.4.2. Modélisation de l'usure en dépouille VB en fonction des paramètres de coupe

##### a) Analyse de la variance (ANOVA) pour l'usure en dépouille VB

En analysant les résultats de la variance de l'usure en dépouille présentés dans le tableau IV-4 on conclut que le temps d'usinage est le facteur le plus influant sur VB par une contribution de (46,18%) suivi par la vitesse de coupe qui présente une contribution de 33,60% et en dernier lieu l'avance avec un taux de contribution de 3.12%.

Source	DL	SS	Ms	F-value	P-value	Cont. %	Remarque
Model	9	0,487673	0,054186	65,45893	< 0.0001		Significatif
Vc	1	0,168587	0,168587	203,6604	< 0.0001	33,60	Significatif
f	1	0,015655	0,015655	18,91225	0.0004	3,12	Significatif
t	1	0,231715	0,231715	279,9219	< 0.0001	46,18	Significatif
Vc×f	1	0,002066	0,002066	2,495334	0.1326	0,41	Non significatif
Vc×t	1	0,081335	0,081335	98,25617	< 0.0001	16,21	Significatif
f×t	1	0,003675	0,003675	4,439562	0.0503	0,73	Significatif
Vc <sup>2</sup>	1	8,4E-05	8,4E-05	0,101493	0.7539	0,02	Non significatif
f <sup>2</sup>	1	0,000153	0,000153	0,185256	0.6723	0,03	Non significatif
t <sup>2</sup>	1	6,69E-06	6,69E-06	0,008076	0.9294	0,00	Non significatif
Residual	17	0,014072	0,000828				
Total	26	0,501745					

Tableau IV-4 Résultats de l'analyse de variance pour l'usure VB

## b) Facteurs influents

Pour mieux visionner les résultats de l'analyse de la variance, un graphe de Pareto est construit (figure IV-7). Cette figure classe les paramètres de coupe et leurs interactions suivant leur influence décroissante sur l'usure en dépouille VB. Les effets sont standardisés pour une meilleure comparaison. Les valeurs standardisées de cette figure sont obtenues en divisant l'effet de chaque facteur par l'erreur sur la valeur estimée du facteur correspondant. Plus l'effet standardisé est élevé, plus le facteur considéré influence l'usure en dépouille (VB).

Une ligne limite les effets significatifs de ceux qui ne le sont pas. L'intervalle de confiance choisi est 95%. Comme lors de l'usinage des métaux, l'usure en dépouille dépend en majeure partie du temps d'usinage, de la vitesse de coupe et de l'interaction entre la vitesse de coupe et le temps d'usinage (figures IV-7).

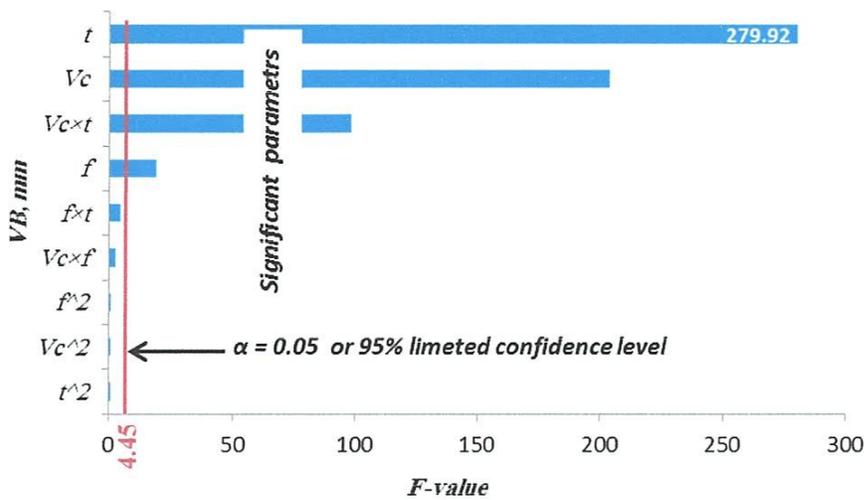


Figure IV-7 Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur l'usure en dépouille VB

La figure IV- 8 présente les effets de Vc, f et t sur l'usure en dépouille. On a remarqué que le temps d'usinage ainsi que la vitesse de coupe ont un impact important sur l'évolution de VB. Avec l'augmentation de ces deux paramètres l'usure de l'outil s'accélère par contre l'influence de l'avance est limitée.

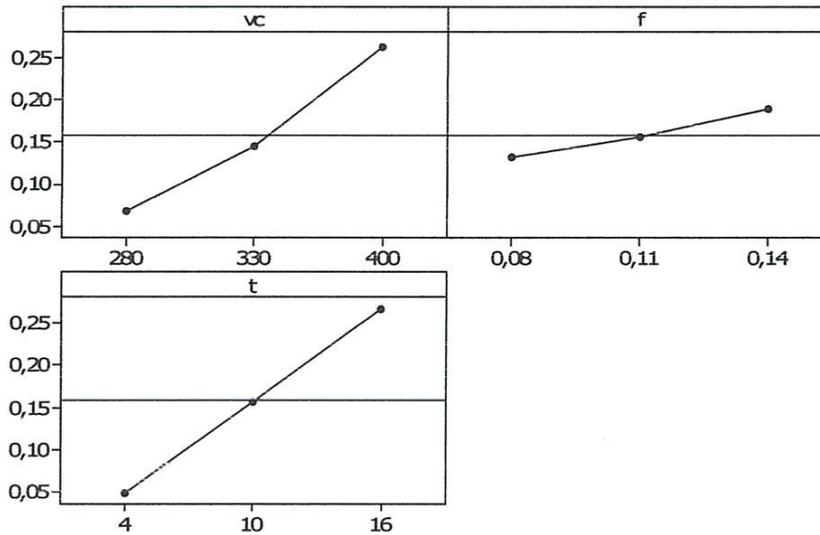


Figure IV- 8 Graphes des effets de Vc, f et t sur VB

La figure IV.9 présente un diagramme des interactions des facteurs pour le critère de la rugosité ( $Rz$ ) en fonction de  $Vc$ ,  $f$  et  $ap$ . Les diagrammes des interactions affichent des interactions aux trois facteurs.

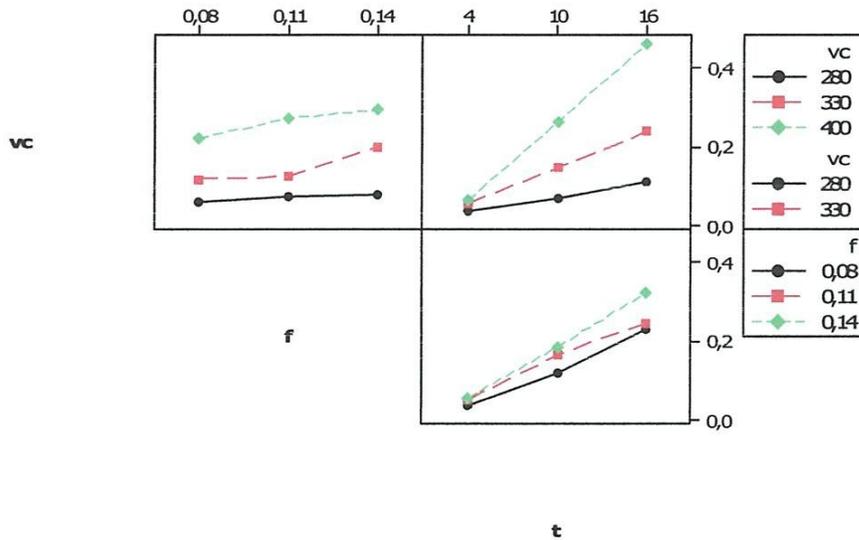


Figure IV.9: Graphique des interactions des facteurs pour le critère de la l'usure en dépouille VB en fonction de Vc, f et t.

c) *Analyse de régression : VB en fonction de Vc, f et t*

L'analyse de régression de VB en fonction de Vc, f et t donne l'équation du modèle complet avec un coefficient de corrélation ( $R^2= 97.20\%$ ).

$$VB = 0.65 - 0.002Vc - 3.6f - 0.06t + 1.07 \cdot 10^{-6} Vc^2 + 0.007 Vc \times f + 0.0002 Vc \times t + 5.61f \times f + 0.09f \times t + 2 \times 10^{-5} t^2 \quad (IV-12)$$

Dans l'ordre, pour étudier l'influence des paramètres de coupe (la vitesse de coupe, l'avance par tour et le temps d'usinage) sur l'usure en dépouille (VB), les graphiques d'interaction des facteurs sont tracés dans la figure IV-10. La figure IV-10a illustre l'influence de la vitesse de coupe et l'avance par tour sur l'usure en dépouille (VB). Les résultats de ANOVA montrent que l'avance par tour n'affect pas considérablement l'usure en dépouille et cette remarque est illustrée bien sur la figure IV-10. L'augmentation de la vitesse de coupe conduit généralement à une augmentation de l'usure en dépouille ceci est dû à l'élévation de la température dans la zone de coupe.

Dans la figure IV-10, il est clair que l'augmentation de l'usure en dépouille (VB) est liée directement à l'augmentation du temps d'usinage (t) et ce dernier résulte une augmentation de la durée de contact de l'outil avec la pièce et le copeau et à cause de coefficient de frottement très élevé de l'acier X2CrNi18-9, ce dernier mène à une élévation sévère de la chaleur dans la zone de coupe qui conduit à la défaillance rapide du bec de l'outil.

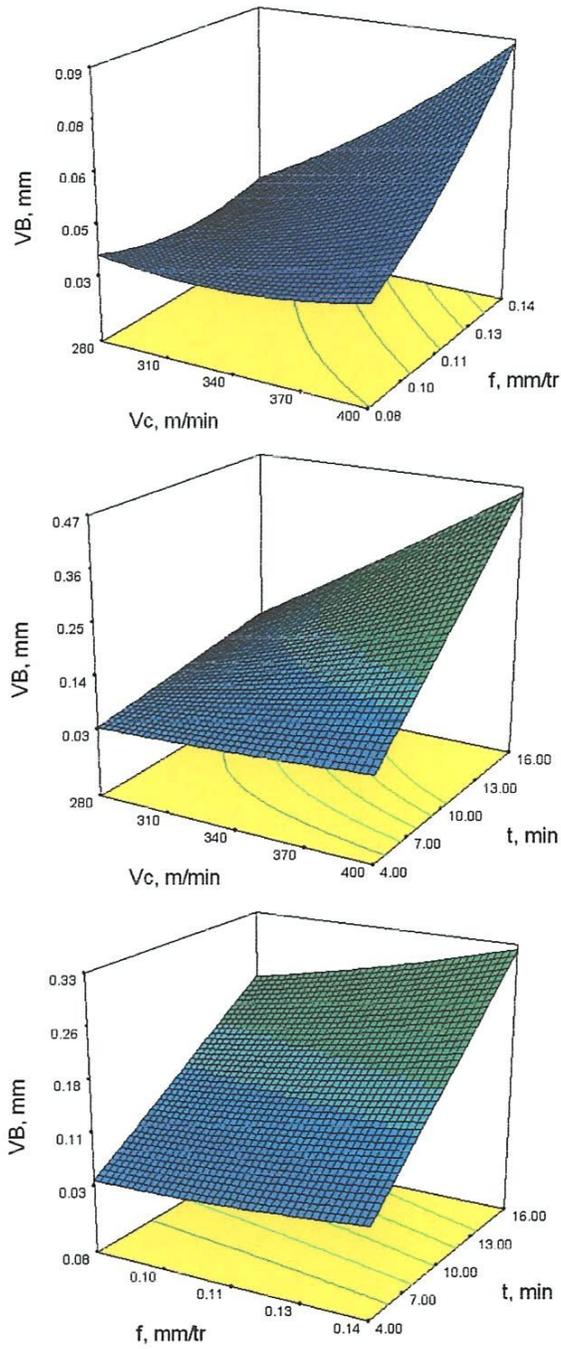
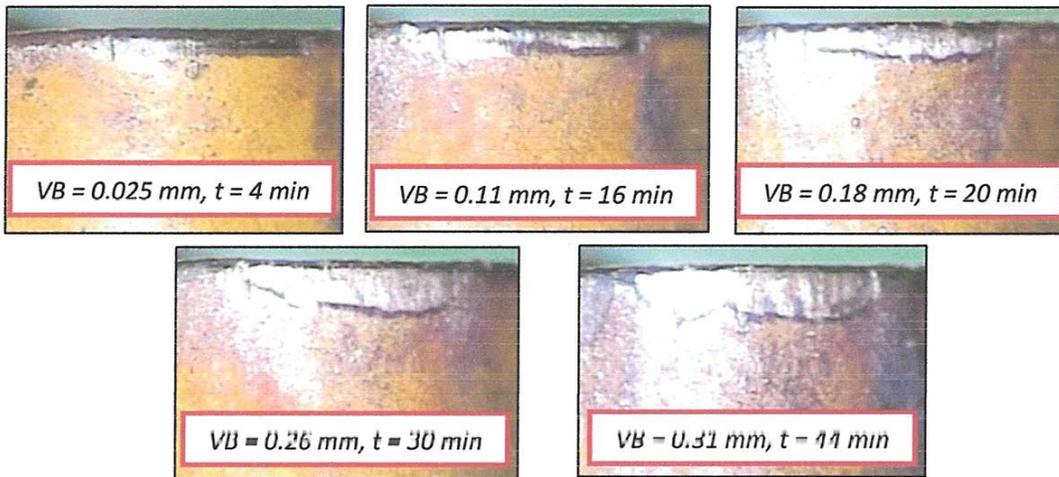


Figure IV-10: VB en fonction de Vc, f et t



**Figure IV-11:** Micrographe de VB pour GC2015 ( $a_p = 0.15$  mm;  $f = 0.08$  mm/rev and  $V_c = 280$  m/min)

#### d. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) de l'usure en dépouille (VB) et celles estimées par les modèles mathématiques obtenus par la méthodologie de surface de réponse (MSR), est présentée graphiquement sur la figure (IV-11). D'après cette figure, les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont assez très proches.

**Tableau IV-5** Pourcentage d'erreur entre les valeurs expérimentales et prédites pour VB

<i>Essai</i>	<i>Ra exp</i>	<i>Ra préd</i>	<i>Erreur %</i>
1	0,025	0,03937903	57,51614
2	0,05	0,05259336	5,18671424
3	0,1	0,06791879	-32,0812097
4	0,03	0,03332271	11,0757164
5	0,074	0,06403704	-13,4634635
6	0,11	0,09686247	-11,9432088
7	0,045	0,03737751	-16,9388757
8	0,069	0,08559183	24,0461276
9	0,11	0,13591726	23,5611466
10	0,04	0,03709361	-7,2659701
11	0,115	0,11859922	3,1297552
12	0,19	0,20221594	6,42944006
13	0,06	0,04192032	-30,132801
14	0,135	0,14092593	4,38957476
15	0,17	0,05685814	42,3780256
16	0,06	0,17336374	-5,23643674
17	0,185	0,29198046	-6,28986785
18	0,35	0,04291624	-16,5770108
19	0,05	0,22002965	-14,1675161
20	0,2	0,39925416	10,0148233
21	0,41	0,06297919	-2,620936
22	0,065	0,25759259	-3,10894169
23	0,29	0,45431711	-11,1749681
24	0,46	0,09315324	-1,23541122
25	0,07	0,30526665	33,0760643
26	0,3	0,51949117	1,75554989
27	0,51	0,05685814	-0,95510003

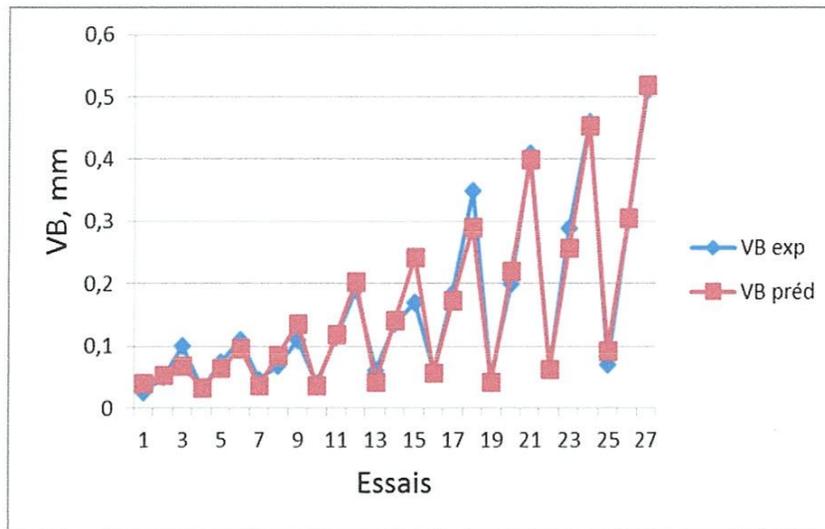


Figure IV-12. Courbes des valeurs expérimentales et estimées de l'usure en dépouille VB

#### IV.5. Optimisation des conditions de coupe pour VB et Ra

L'optimisation d'une réponse ou la recherche d'un compromis entre plusieurs réponses consiste à définir, au sein du domaine expérimental, un réglage des facteurs permettant de satisfaire au mieux les exigences énoncées en termes de réponse. Dans le but d'optimiser les paramètres de coupe, chaque paramètre dans la conception (MSR) a été étudié à trois niveaux différents. Le choix de trois niveaux pour chaque variable est exigé par cette conception afin d'explorer la région de la surface de réponse à proximité de l'optimum. L'optimisation des réponses par (MSR) aide à identifier la combinaison des paramètres des variables d'entrées qui optimisent une réponse unique ou un ensemble de réponses. Une optimisation commune doit satisfaire aux conditions requises pour toutes les réponses de l'ensemble.

Dans notre étude nous proposons de rechercher le régime de coupe optimal, qui satisfait les objectifs suivants :

- minimiser la rugosité de la surface Ra.
- minimiser l'usure en dépouille VB.

Le tableau IV-6 présente les conditions d'optimisation des paramètres de coupe lors de tournage de l'acier X2CrNi18-9 avec un carbure revêtu, pour l'usure en dépouille ( $VB$ ) et pour la rugosité ( $Ra$ )

Conditions	Objectifs	Limite inférieure	Limite supérieure
Vitesse de coupe, (m/min)	Gamme	280	400
Avance, (mm/tr)	Gamme	0,08	0,14
Temps d'usinage, (min)	Gamme	4.00	16.00
Usure VB (mm)	Mini	0.025	0.30
Rugosité Ra ( $\mu\text{m}$ )	Mini	0.55	3.20

**Tableau IV-6** Conditions d'optimisation

Le tableau IV-7 présente les résultats de l'optimisation par la méthodologie de surface (MSR) de la rugosité ( $Ra$ ) et de l'usure en dépouille ( $VB$ ). Les paramètres de coupe optimaux obtenus s'avèrent : la vitesse de coupe de (317-325) m/min, l'avance  $\approx$  0,08 mm/tr et le temps d'usinage  $\approx$  4minutes.

Solution N°	$V_c$ , m/min	$f$ , mm/tr	$t$ , min	$Ra$ , $\mu\text{m}$	$VB$ , mm	Désirabilité individuelle	Remarks
1	319.28	0.08	4.00	0.549918	0.0369099	0.978	<u>Selected</u>
2	317.80	0.08	4.00	0.549864	0.0369145	0.978	
3	318.61	0.08	4.00	0.549912	0.036917	0.978	
4	320.43	0.08	4.00	0.540874	0.0369382	0.978	
5	321.18	0.08	4.00	0.533516	0.0369609	0.978	
6	324.46	0.08	4.00	0.535949	0.0369873	0.978	
7	318.94	0.08	4.00	0.526607	0.0369981	0.978	
8	325.51	0.08	4.00	0.548811	0.0370093	0.978	

**Tableau IV-7** Optimisation par MSR de la rugosité et de l'usure

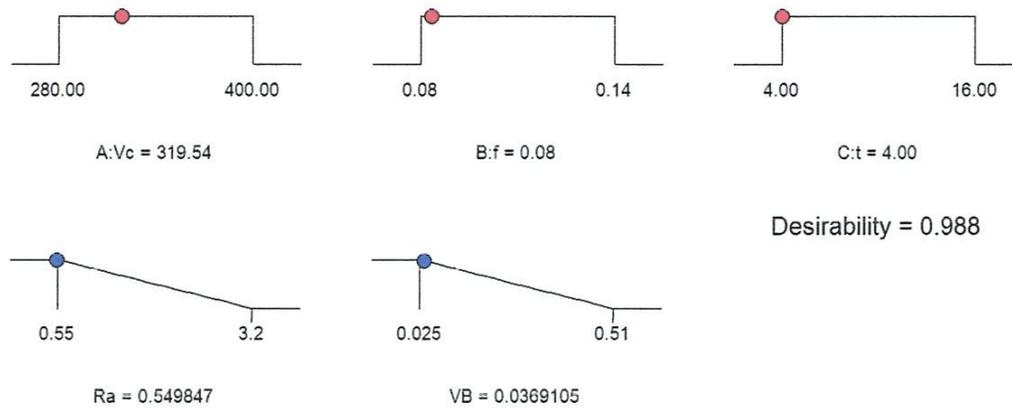


Figure IV.13 : Résultat optimales des paramètres étudiés de la rugosité et de l'usure

Ce régime a été choisi comme optimal parce qu'il correspond à la fonction de désirabilité globale maximale (0,987). Il est à noter que la désirabilité globale correspond à la moyenne des désirabilités de chacun des paramètres des critères d'optimisation ( $Ra$  min,  $VB$  min).

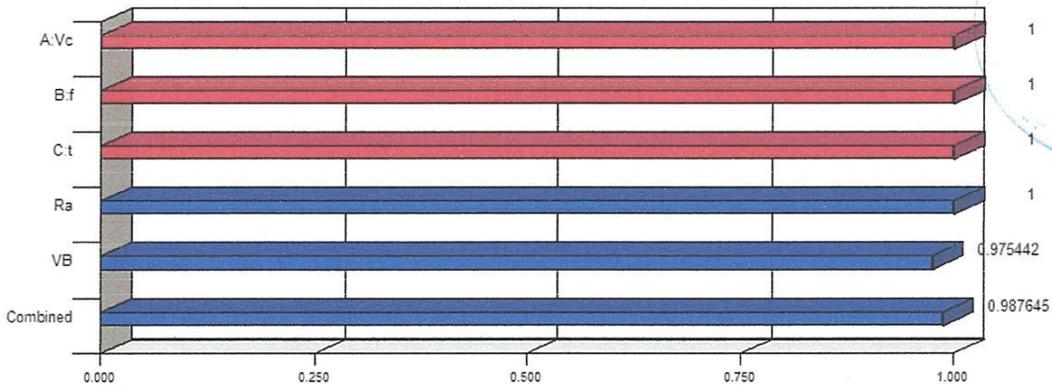


Figure IV.14 : Les valeurs des désirabilités des paramètres technologiques de la rugosité et de l'usure

## IV.6. Modélisation de la tenue (T) en fonction des paramètres d'usinage

Le tableau IV-8 présente les conditions de coupe (la vitesse de coupe et l'avance par tour), et les résultats expérimentaux correspondants à la tenue (T)

Essai N°	Facteurs		Réponse
	Vc, m/min	f, mm/tr	T, min
1	280	0.08	44
2	280	0.11	42
3	280	0.14	39
4	330	0.08	27
5	330	0.11	20
6	330	0.14	15
7	400	0.08	15
8	400	0.11	11
9	400	0.14	10

Tableau IV-8 Résultats de la tenue (T) en fonction des paramètres du régime de coupe (plan complet  $N=3^2$ ).

## a) Analyse de la variance pour la tenue (T)

Le tableau IV-9 présente l'analyse de variance pour le critère (T). On remarque que la vitesse de coupe ( $V_c$ ) a un impact important sur l'évolution de la tenue (T) car son pourcentage de contribution est de 88,27%, suivi par l'avance par une contribution de 5,34% et le terme  $V_c^2$  présente une contribution de 9,89%. Par contre les termes ( $V_c \times f$  et  $f^2$ ) n'ont pas un effet significatif. Il est à noter aussi que la vitesse de coupe est le facteur le plus prépondérant car sa contribution est 88,27%.

Source	ddl	SCE	CM	F-value	P-value	Cont. %	Remarque
Model	5	1477,928	295,5855	50,30407	0.0043		Significatif
Vc	1	1320,167	1320,167	224,6719	0.0006	<b>88,27</b>	Significatif
f	1	79,83021	79,83021	13,58586	0.0346	<b>5,34</b>	Significatif
Vcxf	1	0,149847	0,149847	0,025502	0.8833	0,01	Non Significatif
Vc^2	1	147,8914	147,8914	25,16883	0.0153	<b>9,89</b>	Significatif
f^2	1	0,888889	0,888889	0,151275	0.7233	0,06	Not Significatif
Residual	3	17,62793	5,875977			1.17	
Total	8	1495,556				100.00	

Tableau IV-9 Analyse de la variance (ANOVA) pour la tenue (T)

### b) Facteurs influents

Pour mieux visionner les résultats de l'analyse des variances, un graphe de Pareto est construit (figure IV-15). Cette figure classe les paramètres de coupe et leurs interactions suivant leur influence décroissante sur tenue (T). Les effets sont standardisés pour une meilleure comparaison. Les valeurs standardisées de cette figure sont obtenues en divisant l'effet de chaque facteur par l'erreur sur la valeur estimée du facteur correspondant. Plus l'effet standardisé est élevé, plus le facteur considéré influence de la tenue (T).

Une ligne limite les effets significatifs de ceux qui ne le sont pas. L'intervalle de confiance choisi est 95%.

Le graphe de Pareto (figure IV-14) montre les points suivants :

- la vitesse de coupe présente un effet énorme sur la tenue (T), les autres facteurs ; l'avance par tour et l'interaction ( $Vc^2$ ) présentent un effet secondaire sur (T) ;
- Mais les autres interactions ( $f \times t$ ),  $Vc \times f$  et ( $t \times t$ ),  $f^2$ ,  $Vc \times t$  n'influencent pas la tenue (T).

A partir de ces deux points, nous pouvons conclure que le modèle de régression qui prédit la tenue (T) en fonction des paramètres de coupe, est déterminé seulement avec les facteurs qui ont un effet significatif ( $Vc$ ).

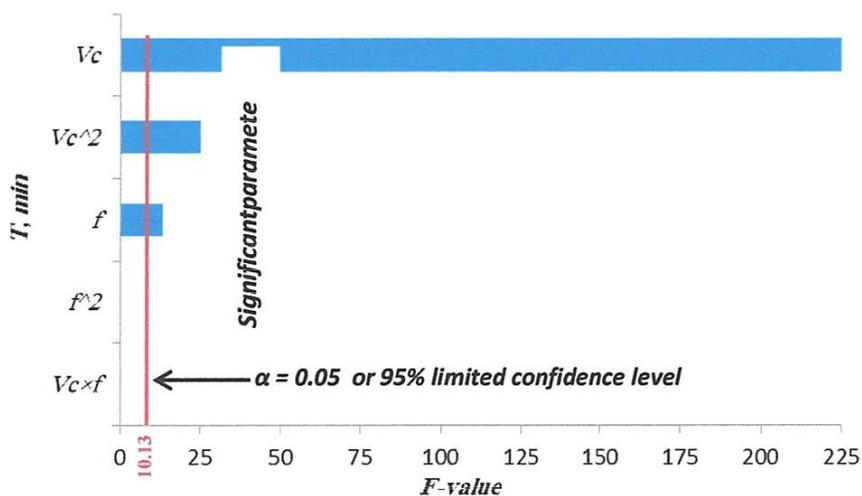


Figure IV-15. Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur la tenue (T)

La figure IV-16 présente les effets principaux des facteurs considérés : la vitesse de coupe, l'avance par tour et le temps d'usinage sur la tenue (T).

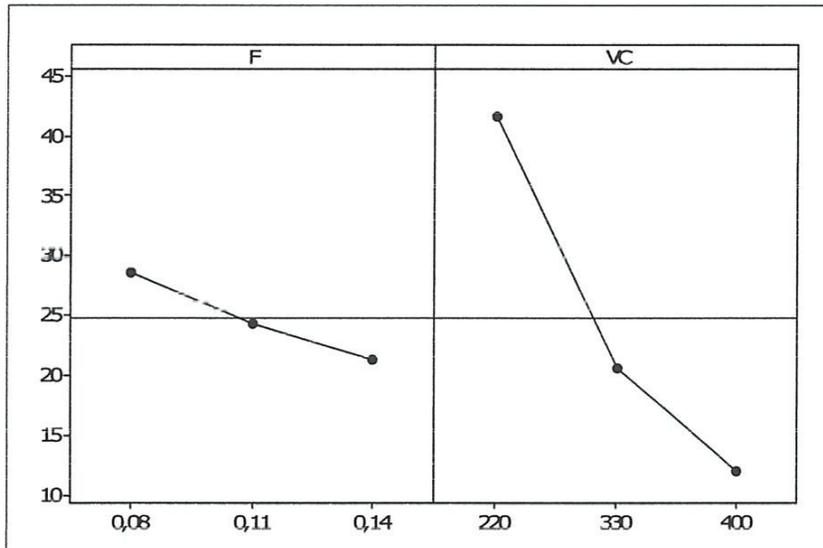


Figure IV-16 Graphes des effets de  $V_c$ ,  $f$  et  $t$  sur la tenue (T) en fonction de  $V_c$ ,  $f$ .

Un diagramme des interactions (figure IV. 17) est un diagramme des moyennes pour chaque niveau d'un facteur. Ces diagrammes sont utiles pour juger la présence d'interactions. Une interaction est présente si la réponse pour un niveau d'un facteur dépend du ou des niveaux d'autres facteurs. Dans un diagramme des interactions, les droites parallèles indiquent l'absence d'interaction. Plus les droites s'écartent de la parallèle, plus le degré d'interaction est élevé. Pour qu'il soit possible d'utiliser un diagramme des interactions, il faut que les données pour toutes les combinaisons de niveaux existent.

Les diagrammes des interactions à trois facteurs affichent des diagrammes d'interactions aux trois facteurs.

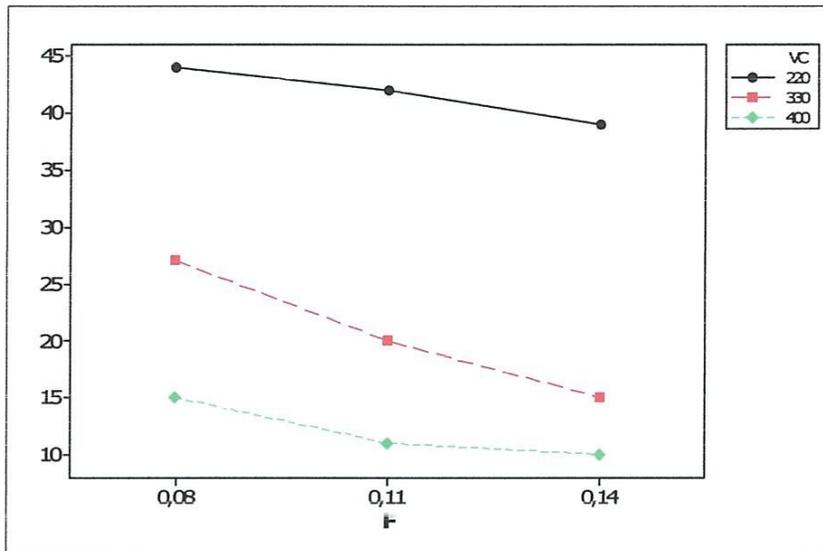


Figure IV-17: Graphique des interactions des facteurs pour le critère de la tenue (T) en fonction de  $V_c$  et  $f$ .

*c) -Analyse de régression : (T) en fonction de  $V_c$  et  $f$*

L'analyse de régression de (T) en fonction de  $V_c$  et  $f$  donne l'équation du modèle complet (IV-12) avec un coefficient de corrélation ( $R^2 = 98.82\%$ ).

$$T = 413,26 - 1,94V_c - 321,22 f + 0,0024V_c^2 + 0,11V_c \times f + 740,741f^2 \quad (8) \quad (IV-12)$$

La figure IV-18 présente la surface de réponse en (3D) qui montre l'évolution de la tenue (T) en fonction de la vitesse de coupe et l'avance par tour. Les résultats présentés sur cette figure montrent que la tenue (T) tend à diminuer considérablement avec l'augmentation de la vitesse de coupe. En plus, l'augmentation de l'avance conduit à une légère diminution de la tenue.

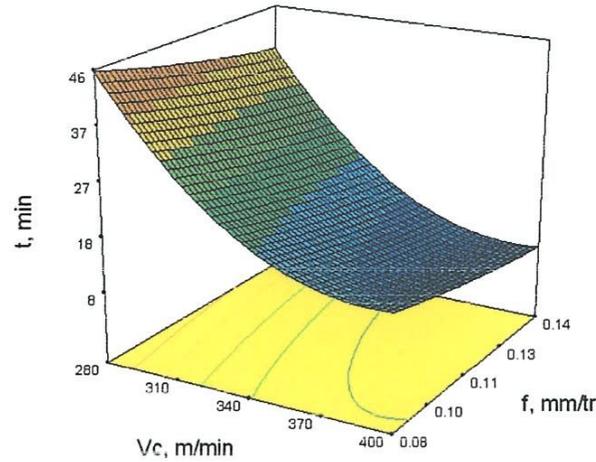


Figure IV-18 (T) en fonction de  $V_c$ ,  $f$

**d) Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées**

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) de la tenue (T) et celles estimées par les modèles mathématiques réduits (quadratique) obtenus par la méthodologie de surface de réponse (MSR), est présentée graphiquement sur la figure (IV-19). D'après cette figure, les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches.

**Tableau IV-10** Pourcentage d'erreur entre les valeurs expérimentales et prédites pour (T) en fonction ( $V_c$ ,  $f$ )

<i>Essai</i>	<i>Ra exp</i>	<i>Ra préd</i>	<i>Erreur %</i>
1	44	45,2816	2,91273054
2	42	41,2222	-1,85185185
3	39	38,4962	-1,29185554
4	27	24,5933	-8,91354693
5	20	20,2222	1,11111111
6	15	17,1844	14,562903
7	15	16,1251	7,50037487
8	11	11,5556	5,05050505
9	10	8,3194	-16,8061179

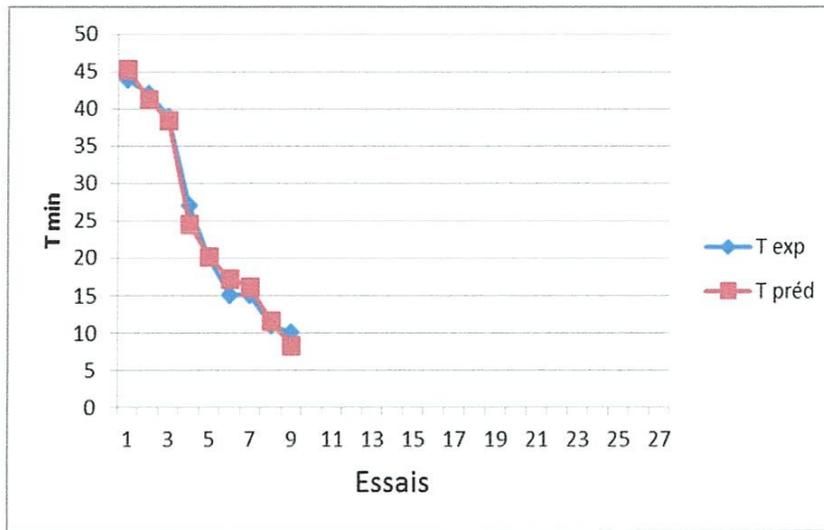


Figure IV-19. Courbes des valeurs expérimentales et estimées de la tenue ( $T$ )

#### IV.7. Optimisation des conditions de coupe pour la tenue ( $T$ )

L'optimisation des réponses par (MSR) aide à identifier la combinaison des paramètres des variables d'entrées qui optimisent une réponse unique ou un ensemble de réponses. Une optimisation commune doit satisfaire aux conditions requises pour toutes les réponses de l'ensemble.

Dans notre étude nous proposons de rechercher le régime de coupe optimal, qui satisfait le objectif de maximiser la tenue de l'outil.

Le tableau IV-11 présente les conditions d'optimisation des paramètres de coupe lors de tournage de l'acier AISI 340 avec Carbure revêtu  $Ti(C,N)/Al_2O_3/TiN$ , sur la tenue de l'outil

Conditions	Objectifs	Limite inférieure	Limite supérieure
Vitesse de coupe, (m/min)	Gamme	280	400
Avance, $f$ (mm/tr)	Gamme	0,08	0,14
Temps d'usinage, $t$ (min)	Gamme	4	16
la tenue $T$ (min)	Max	10	44

Tableau IV-11: conditions d'optimisation

Les paramètres de coupe optimaux obtenus en utilisant le logiciel «*Design Expert 8*» sont présentés dans le tableau (IV.12) et la (fig. IV.20).

Le tableau IV-12 présente les résultats de l'optimisation de la tenue ( $T$ ) par la méthodologie de surface de réponse. Les paramètres de coupe optimaux obtenus s'avèrent : la vitesse de coupe de (280 -280.66) m/min, l'avance de (0.08-0.09) mm/tr

<i>Solution</i>	$V_c$	$f$	$T$	Désirabilité individuelle	Remarks
$N^{\circ}$	(m/min)	(mm/tr)	(min)		
1	280.66	0.09	44.5209	1.000	<u>Selected</u>
2	280.52	0.09	44.2427	1.000	
3	280.33	0.09	44.204	1.000	
4	280.00	0.08	45.7375	1.000	
5	280.15	0.08	45.2762	1.000	
6	281.28	0.08	44.8579	1.000	
7	280.22	0.08	45.3091	1.000	
8	280.11	0.09	44.0664	1.000	

Tableau IV-12 Optimisation par MSR de la tenue (T)

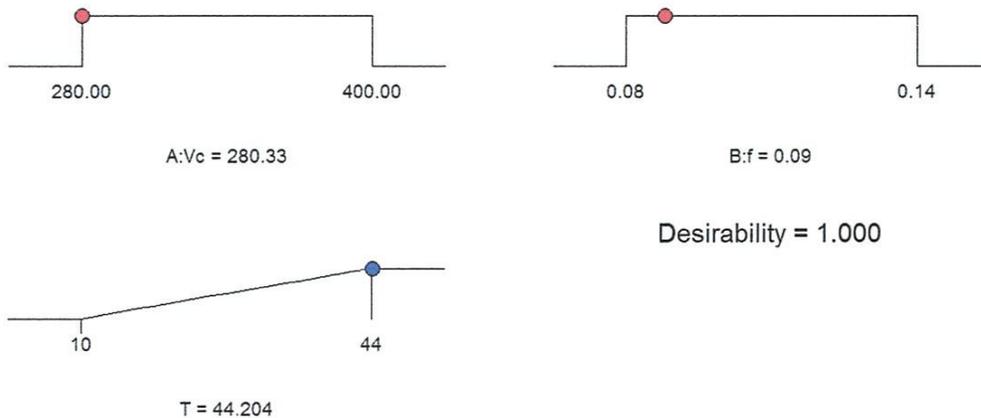
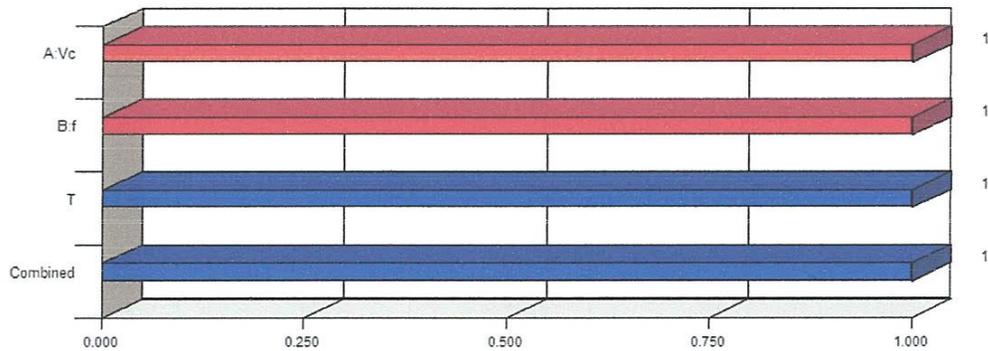


Figure IV.20 : Résultat optimales des paramètres étudiés

Ce régime a été choisi comme optimal parce qu'il correspond à la fonction de désirabilité globale maximale (1). Il est à noter que la désirabilité globale correspond aux désirabilités de paramètres de critères d'optimisation ( $T$ ).



**Figure IV.21** : Les valeurs des désirabilités des paramètres technologiques

#### IV-8. Conclusions

Ce chapitre nous a permis de comprendre et d'exprimer la relation entre les phénomènes de la coupe tels que (rugosité, usure en dépouille et la tenue) et les paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et temps d'usinage) lors de l'usinage de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9. Les résultats de ce chapitre nous ont conduit aux conclusions suivantes :

- L'usure en dépouille de l'outil en carbure revêtu CVD a augmenté avec le temps de coupe et la vitesse de coupe. Les essais montrent qu'un taux plus élevé d'usure d'outil est obtenu à la vitesse de coupe 400min et à l'avance de 16min
- On a noté que la rugosité est influencée considérablement par le temps de coupe son pourcentage de contribution est de 31,96%. Suivie par l'avance avec une contribution de 23,25%.
- L'usure en dépouille de l'outil en carbure revêtu CVD a augmenté avec le temps de coupe et la vitesse de coupe. Les essais montrent qu'un taux plus élevé d'usure d'outil est obtenu à la vitesse de coupe 400min et à l'avance de 16min
- L'augmentation de la vitesse de coupe conduit à l'endommagement du bec de l'outil à cause de l'usure en dépouille. Ce qui mène à l'élévation des critères de la rugosité ;

- Le temps d'usinage est le plus important paramètre intervenant dans le processus de la coupe. Il favorise l'augmentation de l'usure en dépouille de l'outil ce qui induit la dégradation de la surface usinée
- Les modèles de la rugosité en fonction du temps indiquent que le temps de coupe avec une contribution de 31,96%. suivi par l'avance avec une contribution de 23,25%.
- la vitesse de coupe a une influence plus significative que l'avance, sur la tenue de l'outil T de GC2015.
- la vitesse de coupe présente un effet énorme sur la tenue (T)
- Les modèles statistiques déduits définissent le degré d'influence de chaque élément de régime de taille sur l'usure en dépouille et de la rugosité de surface. Ils peuvent également être utilisés pour l'optimisation du processus de coupe.
- Les meilleures gammes de conditions de coupe adoptées, sont:  $V_c = (317-325)$  m / min,  $f = (0,08)$  mm / tr et  $t = (4)$  minutes pour la rugosité de la surface et l'usure en dépouille, et  $V_c = 280,66$  m / min,  $f = (de 0,8 \text{ à } 0,9)$  mm / tr pour la tenue (T).

## **Conclusion générale**

### Conclusion

L'étude expérimentale réalisée lors du tournage de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi 18-9 avec un outil on carbures revêtus (Ti(C,N)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN) nous a permis d'étudier l'usinabilité de cet acier en se basant sur les critères suivants : efforts et pressions de coupe, rugosité de la surface usinée et usure de l'outil de coupe.

En se basant sur les résultats trouvés, on peut dégager les principales conclusions suivantes :

- ❖ Pour toutes les conditions de coupe testées, l'effort principal est l'effort tangentiel suivi par l'effort radial et en dernier lieu l'effort axial.
- ❖ les efforts (Fx, Fy et Fz) diminuent avec l'augmentation de la vitesse de coupe de (21.27%, 32.63%, 44.16%) successivement, cela est dû à l'augmentation de la température dans la zone de coupe qui rend le matériau plus malléable et s'écoule facilement sur la surface d'attaque.
- ❖ l'effort résultant est le plus affecté par l'avance suivi par l'effort tangentiel, suivi par l'effort radial et en dernier lieu par l'effort axial.
- ❖ la pression de coupe diminue légèrement avec l'augmentation de la vitesse de coupe et avec l'augmentation de la profondeur de passe conduit à une chute des pressions de coupe sauf dans le cas de la pression axial.
- ❖ Le traitement statistique des résultats des essais ont abouti à la détermination des modèles mathématiques des efforts de coupe, de la rugosité et de l'usure. L'analyse de la variance (ANOVA) nous a permis de déterminer les facteurs qui ont un impact significatif sur les différents phénomènes étudiés.
- ❖ les efforts (Fx, Fy et Fz) diminuent avec l'augmentation de la vitesse de coupe de (21.27%, 32.63%, 44.16%) successivement.
- ❖ la vitesse de coupe présente un effet énorme sur la tenue de l'outil T de GC2015.

## Conclusion générale

---

❖ Les modèles statistiques déduits définissent le degré d'influence de chaque élément de régime de taille sur l'usure en dépouille et de la rugosité de surface. Ils peuvent également être utilisés pour l'optimisation du processus de coupe.

❖ L'usure en dépouille de l'outil en carbure revêtu CVD a augmenté avec le temps de coupe et la vitesse de coupe. Les essais montrent qu'un taux plus élevé d'usure d'outil est obtenu à la vitesse de coupe 400min et à l'avance de 16min

❖ Les modèles mathématiques de la tenue de l'outil T de GC2015 montrent que la vitesse de coupe est le paramètre le plus influent suivi de l'avance.

❖ Les meilleures gammes de conditions de coupe adoptées, sont:  $V_c = (317-325)$  m / min,  $f = (0,08)$  mm / tr et  $t = (4)$  minutes pour la rugosité de la surface et l'usure en dépouille, et  $V_c = 280,66$  m / min,  $f = (\text{de } 0,8 \text{ à } 0,9)$  mm / tr pour la tenue (T).

❖ Les modèles de la rugosité en fonction du temps indiquent que le temps de coupe avec une contribution de 31,96%. suivi par l'avance avec une contribution de 23,25%.

## Références bibliographiques

---

### Références bibliographiques

- [1] Tarek BRAHAM BOUCHNAK : étude de comportement en sollicitations extrêmes et de l'usinabilité d'un nouvel alliage de titane aéronautique, thèse de doctorat, École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur, (2010) pp : 11
- [2] TROMBERT C; Usinabilité des aciers inoxydables, Techniques de l'ingénieur M726.
- [3] CUNAT P.; Aciers inoxydables "Mise en œuvre", Techniques de l'ingénieur M4542.
- [4] ALA PASSERON.; Usinage "Tournage", Techniques de l'ingénieur BM.....7086
- [5] Christian PAGÈS ; "COMPORTEMENT DE REVÊTEMENTS CÉRAMIQUES SUR OUTIL EN TOURNAGE A SEC DE FINITION. thèse de doctorat, ÉCOLE CENTRALE DE LYON" Novembre 2003, pp : 14-15
- [6] Farhat ZEMZEMI "Caractérisation de modèles de frottement aux interfaces pièce-outil-copeau en usinage : Application au cas de l'usinage des aciers et de l'inconel 718 " thèse de doctorat, l'École Centrale de Lyon Année 2007 pp : 19
- [7] Joël RECH ; "CONTRIBUTION A LA COMPREHENSION DES MODES D'ACTIONS TRIBOLOGIQUES ET THERMIQUES DES REVETEMENTS EN USINAGE", thèse de doctorat, école nationale supérieure d'arts et métiers, (2002) pp : 65
- [8] François LEROY ; "endommagement des outils de coupe" Techniques de l'ingénieur, B7042 – 1
- [9] Sandvik Coromant  
[http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/tech\\_guide/spa/MTG\\_H.PDF](http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/tech_guide/spa/MTG_H.PDF)
- [10] <http://www.ac-creteil.fr/lycees/94/ebanlycreteil/cours/techno/html/rugosite00.htm>
- [11] TROMBERT C.; Usinabilité des aciers inoxydables, Techniques de l'ingénieur M726.
- [12] CUNAT P.; Aciers inoxydables "Mise en œuvre", Techniques de l'ingénieur M4542.
- [13] Etude des efforts de coupe et de la rugosité lors de l'usinage du PE80  
<http://www.memoireonline.com>
- [14] D. Philip Selvaraj , P. Chandramohan , M. Mohanraj . Optimization of surface roughness, cutting force and tool wear of nitrogen alloyed duplex stainless steel in a dry turning process using Taguchi method . All rights reserved. 49 (2014) 205–215
- [15] Ciftci I.; Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools, Journal of Tribology International (2005), pp.1–5.
- [16] KORKUT I., KASAP M., CIFTICI I., SEKER U.; Determination of cutting parameters during machining of AISI 304 stainless steel, Material and Design, 25(2004) pp. 303-305.

## Références bibliographiques

---

[17] Neo K.S., Rahman M., Li X.P., Khoo H.H., Sawa M., Maeda Y., Performance evaluation of pure CBN tools for machining of steel, *Journal of Material Processing Technology*, 140 (2003) pp. 326–331.

[18] KUMAR A., DURAI A., SORNAKUMAR T., The effect of tool wear on tool life of alumina-based ceramic cutting tools while machining hardened martensitic stainless steel, *Journal of Material Processing Technology*, 173(2006) pp. 151-156.

[19] Berkani S1, Bouzid L1,\*, Yallese M A1, Girardin F2, Mabrouki T3., Flank wear and lifespan optimization in finish turning of AISI304 stainless steel using RSM technique  
1Mechanical Engineering Department, Mechanics and Structures Research Laboratory (LMS), May 8th 1945 University, P.O. Box 401, Guelma 24000, Algeria

# *Résumé*

Les aciers inoxydables jouent un rôle extrêmement important dans l'industrie d'aujourd'hui. Ils sont divisés en trois catégories, martensitiques, ferritiques et austénitiques. Les austénitiques présentent des propriétés physico-mécaniques très sévères, tels que une ductilité élevée, une haute résistance à chaud et un taux d'écaillage élevé ainsi un coefficient de frottement très important. Ces caractéristiques rendent l'usinage de ces aciers très difficile ce qui conduit généralement à des durées de vie des outils très limitées. Les effets de l'usure ne sont pas seulement antagonistes à la durée de vie, mais aussi nuisible à la qualité de surface. De là, il est très intéressant de trouver des plaquettes de coupe qui ont des meilleurs performances et de sélectionner une plage des paramètres du régime de coupe où ces plaquettes peuvent productivement et efficacement usiner ces aciers.

Notre travail de master rentre dans ce cadre, il a comme objectif d'une part d'examiner les différents phénomènes intervenants lors de l'usinage à sec de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 tels que, les efforts de coupe, la rugosité, l'usure de l'outil et la tenue avec la variation de différents paramètres du régime de coupe (vitesse de coupe, avance par tour, profondeur de passe et temps d'usinage). D'autre part, nous avons fait une analyse statistique des résultats basée sur l'analyse de variance (ANOVA) et la méthodologie de surface de réponse (RSM) et cela dans le but de proposer des modèles mathématiques de la rugosité, des l'usure et de la tenue pour faire des prédictions.