

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie Mécanique
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة الميكانيكية
المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat en sciences en : Génie Mécanique
Spécialité (Option) : Matériaux et Structures

L'effet d'usinage par tournage sur un acier XC18

Présentée par :
REMLI Fethi
Soutenue publiquement le
16 octobre 2016
Devant le jury composé de :

Dr. HECINI Mabrouk	Professeur	Président	Université de Biskra
Dr. BOUMERZOUG Zakaria	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Dr. BENCHABANE Adel	Professeur	Examineur	Université de Biskra
Dr. DJERDJARE Boubekour	Professeur	Examineur	Université USTHB
Dr. DAHMOUN Djaffer	Professeur	Examineur	Université USTHB
Dr. ZIDANI Mesbah	M.C.A	Examineur	Université de Biskra

Sommaire

Introduction générale.....10

Chapitre I : Généralités sur l'usinage des métaux

I.1. Introduction.....17

I.2. Type d'usinage.....17

I.2.1. Fraisage.....17

I.2.1.2. Différents types des fraiseuses.....18

I.2.1.2. 1. Fraiseuses universelles.....18

I.2.1.2. 2. Fraiseuses de production.....19

I.2.1.2. 3. Fraiseuses spéciales.....19

I.2.1.3. Procédés de fraisage.....20

I.2.1.3. 1. Fraisage en bout.....20

I.2.1.3. 2. Fraisage en roulant.....21

I.2.1.3. 3. Fraisage combiné.....21

I.2.2. Le tournage.....22

I.2.2.1. Principe de tournage.....22

I.2.2. 2. Les tours.....23

I.2.2.3. Classification des machines de tour.....24

I.2.2.3.1. Les tours parallèles à charioter et à fileter.....24

I.2.2. 3. 2. Les tours à copier.....24

I.2.2. 3. 3. Les tours semi-automatique.....25

I.2.2. 3. 4. Les tours automatiques.....25

I.2.2. 3. 5. Les tours automatiques multibroches.....25

I.2.2. 3. 6. Les tours à commande numérique.....25

I.2.2.4. Différentes opérations de tournage.....26

I.2.2.4.1. Chariotage.....26

I.2.2.4.2. Dressage.....	27
I.2.2.4.3. Alésage.....	27
I.2.2.4.4. Perçage.....	27
I.2.2.4.5. Rainurage.....	28
I.2.2.4.6. Chanfreinage.....	28
I.2.2.4.7. Tronçonnage.....	28
I.2.2.4.8. Filetage.....	29
I.2.2.5. Conditions de coupe en tournage.....	29
I.2.2.5.1. Vitesse de coupe.....	29
I.2.2.5.2. Vitesse d'avance v_f , Avance par tour f	31
I.2.2.6. Les types d'avances.....	31
I.2.2.6.1. Avance longitudinale.....	31
I.2.2.6.2. Avance transversale.....	31
I.2.2.6.3. Avance oblique.....	32
I.2.2.7. Evolutions des machines d'usinage.....	32
I.2.2.8. Intégrité de la surface.....	33
I.2.2.8. 1. Définition générale.....	34
I.2.2.8. 2. Paramètres caractérisant l'intégrité de surface.....	35
I.2.2.9. Mesure de l'état de surface.....	35
I.2.2.9.1. Bases d'évaluation.....	36
I.2.2.9.2. Mesure de la rugosité.....	36
I.2.2.10. L'écart moyen arithmétique du profil (R_a).....	37
I.2.2.11. L'évaluation de l'écart arithmétique moyen du profil évalué.....	38
I.2.2.11.1. R_a Rugosité moyenne du profil.....	38
I.2.2.11.2. R_z Hauteur de profil maximum (moyenne).....	39
I.2.2.11.3. R_t Hauteur de profil totale.....	40
I.2.2.11.4. R_p Taux de longueur portante (courbe d'Abbot).....	40

I.2.2.11.5. R_{mr} Taux de longueur portante (courbe d'Abbot-Firestone).....	41
I.2.2.12. Défauts de la surface usinée.....	41
I.2.2.12.1. Ecailles.....	41
I.2.2.12.2. cavités.....	41
I.2.2.11.3. microstries.....	41
I.2.2.11.2. Microfissures.....	42
I.3. conclusion.....	43
I.4. Références.....	44

Chapitre II : L'aspect métallurgique de l'usinage des métaux

II.1.Introduction.....	47
II.2.Généralités sur l'acier.....	47
II.2.1.Définition de l'acier.....	47
II.2.2. Classification des aciers.....	48
II.2.2.1.Les aciers ordinaires ou aciers au carbone.....	49
II.2.2.2. Les aciers de traitements thermiques.....	49
II.2.2.3.Les aciers à outils.....	49
II.2.2.4. Les aciers inoxydables.....	50
d) Aciers martensitiques.....	50
e) Aciers ferritiques.....	50
f) Aciers austénitiques.....	50
g) Acier doux XC18.....	51
II.3. Aspect métallurgique de l'interaction outil/pièce.....	51
II.4. Choix des conditions d'usinage.....	52
II.5. Travaux scientifiques sur l'usinage des métaux.....	52
II.6. Conclusion.....	68

II.7.Références.....	69
----------------------	----

Chapitre III : Matériaux et techniques de caractérisation

III.1. Matériau étudié	72
III.1.1. Présentation de l'acier XC18.....	72
III.1.2. Propriétés de l'acier XC18.....	72
III.1.3. Domaines d'application.....	72
III.1.4. Caractéristiques mécaniques moyennes (état normalisé).....	73
III.2. Technique d'usinage utilisée.....	73
III.2.1. Tournage.....	73
III.3. Techniques de caractérisations.....	77
III.3.1. Microscope optique.....	77
III.3.2. Préparation métallographique.....	78
III.3.3. MEB (microscope électronique à balayage).....	78
III.3.4. Le rugosimètre.....	79
III.3.5. La dureté.....	80
III.3.6. Les mesures par DRX.....	81

Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV.1. Introduction.....	85
IV.2.Caractérisation par microscope optique.....	85
IV.2.1. Etat brut.....	85
IV.2.2. Effet de la vitesse d'usinage sur l'évolution microstructurale de l'acier XC18.....	85
IV.2.3. Effet de recuit à 300 °C sur la microstructure de l'acier XC18 usiné à différentes vitesses.....	93
IV.3. Observation microscopique de la surface usinée.....	101
IV.4. Caractérisation par microscope électronique à balayage MEB.....	103

IV.5. Caractérisation par micro dureté	110
IV.6. Caractérisation par rugosimètre	113
IV.7. Analyse des contraintes résiduelles.....	114
IV.8. Morphologie de la surface usinée analysée par MEB.....	118
IV.9. Comportement de l'état de surface lors d'une corrosion agressive.....	123
Conclusion générale.....	125

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Aciers ordinaires ou aciers au carbone non alliés

Tableau 3.1 : Désignation de l'acier XC18.

Tableau 3.2 : Composition chimique en % massique de l'acier XC18.

Tableau 3.3 : Caractéristiques mécaniques moyennes de XC18.

Tableau 3.4 : Les vitesses de coupe V_c : m/min.

TABLES DES FIGURES

Figure I. 1: a- Méthodes et démarches d'étude de l'usinage, b- Taux d'utilisation des différents types de procédés dans l'industrie.....	18
Figure I.2 : Fraiseuse universelle.....	19
Figure I.3 : Fraiseuse à C.N. à banc fixe.....	20
Figure I. 4 : Fraiseuse à reproduire à pantographe.....	21
Figure I.5 : Fraisage en bout.....	21
Figure I.6 : Fraisage en roulant.....	22
Figure I.7 : Fraisage combiné.....	22
Figure I .8 : Procédure de tournage.....	23
Figure I. 9-a : Composantes de tour.....	24
Figure I .9-b : Schéma descriptif de tournage.....	25
Figure I.10 : Chariotage.....	27
Figure I.11 : Opération de chariotage en tournage.....	27
Figure I.12 : Dressage.....	28
Figure I.13 : Alésage.....	28
Figure I .14 : Perçage.....	28
Figure I.15 : Rainurage.....	29
Figure I.16 : Chanfreinage.....	29
Figure I. 17.Tronçonnage.....	29
Figure I. 18 : Filetage.....	30
Figure I. 19 : Conditions de coupe.....	30
Figure I.20 : Vitesse de coupe.....	31
Figure I. 21 : Vitesse d'avance v_f , Avance par tour f	32
Figure I. 22 : Différentes types d'avance.....	33
Figure I. 23 : positionnement du mât rotor.....	34
Figure I. 24 : les différentes couches affectées d'une surface.....	35
Figure I. 25 : Mesure des états de surface.....	36
Figure I. 26 : Mesure des états de surface.....	37

Figure I. 27 : l'écart arithmétique moyen du profil.....	38
Figure I. 28 : Défauts de la surface usinée.....	39
Figure I. 29 : Schéma de la rugosité de la surface.....	39
Figure I. 30 : L'écart moyen arithmétique du profil (R_a).....	40
Figure I. 31 : indication de R_a	40
Figure I. 32 : R_z Hauteur de profil maximum (moyenne).....	41
Figure I. 33 : R_t Hauteur de profil totale.....	41
Figure I.34 : R_p Taux de longueur portante (courbe d'Abbot).....	41
Figure I.35 : R_{mr} Taux de longueur portante (courbe d'Abbot).....	42
Figure I. 36 : Microgéométrie de surface pour diverses vitesses de coupe.....	43
Figure II.1 : Diagramme d'équilibre fer-carbone (équilibre Fe-Fe ₃ C).....	49
Figure II.2 : Les trois principales zones de génération de la chaleur dans le cas de la coupe orthogonale.....	53
Figure II.3 : Configuration de chariotage.....	55
Figure II.4 : Repère utilisé et surface étudiées.....	55
Figure II.5 : Dispositif expérimental (a), géométrie de la plaquette de coupe.....	56
Figure II.6 : Exemple d'acquisition d'effort de coupe F_c (a) et de profil de surface usinée (b) ($V_c = 100$ m/min ; $f = 0.2$ mm/tr, $a_p = 1$ mm).....	57
Figure II.7 : Efforts spécifiques de coupe K_c , d'avance K_f , et de pénétration K_p et rugosité R_a en fonction de la vitesse de coupe V_c ($f = 0.2$ mm/tr ; $a_p = 1$ mm).....	58
Figure II.8 : profil de rugosité de la surface profil EN8 à 339 tours par minute et 0,05 mm / tr.....	59
Figure II.9 : courbes de rugosité de la surface.....	59
Figure II.10 : Géométrie de l'éprouvette usinée pour les tests de fatigue.....	60
Figure II.11 : Variation de la rugosité avec la vitesse de coupe.....	61
Figure II.12 : Variation de la rugosité avec l'avance.....	61
Figure II.13 : Micrographie des couches superficielles des pièces usinées ave $f = 0.085$ mm/tr, $a = 0.5$ mm et $V_c = 28$ m/min (a)et $V_c = 50$ m/min (b).....	62

Figure II.14 : Micrographie des couches superficielles des pièces usinées avec les vitesses : $V_c = 3,5 \text{ m/min}$ (a), $V_c = 7 \text{ m/min}$ (b), $V_c = 28 \text{ m/min}$ (c), $V_c = 50 \text{ m/min}$ (d) $f = 0,085 \text{ mm/tr}$ $a = 0,5 \text{ mm}$ et $r = 0,8 \text{ mm}$	63
Figure II.15 : Rugosité de la surface usinée en fonction de la vitesse de coupe.....	64
Figure II.16 : Microdureté de la sous-couche avec un outil non revêtu.....	66
Figure II.17 : Microstructure de la surface usinée après 10s d'usinage.....	17
Figure II.18 : Exemple de couches de surface modifiées par l'usinage.....	68
Figure III.1 : Procédé de tournage.....	75
Figure III.2 : Chariotage.....	76
Figure III.3 : Tour type KNUTH model: sh 150/915 super.....	77
Figure III.4 : Les pièces usinées dans le tour.....	77
Figure III.5 : Coupeaux obtenus après différentes vitesses de coupe par tournage.....	78
Figure III.6 : Microscope : LEICA DMLM 50x; 100x; 200x; 500x; 1000x.....	79
Figure III.7 : MEB: JEOL 5900 avec EDX et WDX OXFORD instruments.....	81
Figure III.8 : Rugosimètre : ZEISS SURFCOM 1400D-3DF.....	82
Figure III.9 : Empreinte de pénétrateur.....	83
Figure III.10 : Microduromètre : LECO M-400-A ; Charges de travail de 5g à 1kg.....	84
Figure III.11 : Influence des contraintes résiduelles sur les performances des matériaux.....	86
Figure III.12 : Diffractomètre de rayons X / SIEMENS D-5000 θ -2 θ	86
Figure IV.1 : Microstructures de l'acier à l'état brut, a) cœur de l'échantillon, b) proche de la surface ; c) bord de l'échantillon.....	90
Figure IV.2.1 : Microstructures de l'acier doux après usinage par la vitesse $V_1 = 20 \text{ tour/min}$	93
Figure IV.2.2 : Microstructures de l'acier doux après usinage par la vitesse $V_2 = 30 \text{ tour/min}$	94
Figure IV.2.3 : Microstructures de l'acier doux après usinage par la vitesse $V_3 = 40 \text{ tour/min}$	95

Figure IV.2.4 : Microstructures de l'acier doux après usinage par la vitesse	
$V_4 = 60$ tour/min.....	96
Figure IV.3 : Microstructure de l'acier XC18 à l'état brut.....	98
Figure IV.4 .1 : Microstructures de l'acier XC18 usinée avec la vitesse	
$V_1 = 20$ tour/min.....	98
Figure IV.4.2 : Microstructures de l'acier XC18 usinée avec la vitesse	
$V_2 = 30$ tour/min.....	99
Figure IV.4.3 : Microstructures de l'acier XC18 usinée avec la vitesse	
$V_3 = 40$ tour/min.....	100
Figure IV.4.4 : Microstructures de l'acier XC18 usinée avec la vitesse	
$V_4 = 60$ tour/min.....	101
Figure IV.5.1. : Microstructure de l'acier XC18 usinée avec la vitesse V_1 puis recuit	
à $T : 300^\circ\text{C}$ pendant 1 heure. Figure IV.6 : Le profil de la microdureté	
d'échantillon usinée par v_2	102
Figure IV.5.2. : Microstructure de l'acier XC18 usinée avec la vitesse V_2 puis recuit	
à $T : 300^\circ\text{C}$ pendant 1 heure.....	103
Figure IV.5.3. : Microstructure de l'acier XC18 usinée avec la vitesse V_3 puis recuit	
à $T : 300^\circ\text{C}$ pendant 1 heure.....	104
Figure IV.5.4. : Microstructure de l'acier XC18 usinée avec la vitesse V_4 puis recuit	
à $T : 300^\circ\text{C}$ pendant 1 heure.....	105
Figure IV.6 : Microstructure de la surface usinée après différentes vitesses de tournage :	
a) V_1 , b) V_2 , c) V_3 , et d) V_4 . (\times est l'agrandissement d'une zone	
dans la surface de usinée à V_1).....	106
Figure IV.7 : Microstructures(MEB) de l'acier à l'état brut, a) cœur de l'échantillon,	
b) intermédiaire, c) bord de l'échantillon.....	109
Figure IV.8 .1 : Microstructures (MEB) de l'acier doux après usinage par la vitesse	
$V_1 = 20\text{m /min}$. a : cœur, b : bord.....	111
Figure IV.8.2 : Microstructures (MEB) de l'acier doux après usinage par la vitesse	
$V_2 = 30\text{ m/min}$. a : cœur, b : bord.....	112

Figure IV.8.3 : Microstructures (MEB) de l'acier doux après usinage par la vitesse $V_3 = 40$ m/min. a : cœur, b : bord.....	113
Figure IV.8.4 : Microstructures (MEB) de l'acier doux après usinage par la vitesse $V_4 = 60$ m/min.....	114
Figure IV.9.1 : Le profil de la microdureté du bord vers le cœur d'échantillon usinée par v_1	115
Figure IV.9.2 : Le profil de la microdureté du bord vers le cœur d'échantillon usinée par v_2	115
Figure IV.9.3 : Le profil de la microdureté du bord vers le cœur d'échantillon usinée par v_3	116
Figure IV.9.4 : Le profil de microdureté du bord vers le cœur d'échantillon usinée avec la vitesse v_4	116
Figure IV.10 : Les différentes courbes de microdureté du bord vers le cœur des échantillons usinées avec différentes vitesses de coupes v_1, v_2, v_3, v_4	117
Figure IV.11 : Courbe de variation de la rugosité R_a : en μm en fonction de la vitesse d'usinage V_c	118
Figures IV.12 : Schéma descriptif des zones étudiées par DRX.....	119
Figure IV.13.1 : Courbe de variation de contrainte résiduelle σ_1 La contrainte au bord dans la direction x ou (σ_x du bord), σ_1 : La contrainte du bord de l'échantillon dans la direction X ou (σ_x du bord).....	120
Figure IV.13.2 : Courbe de variation de contrainte résiduelle σ_1 La contrainte au bord dans la direction Y ou (σ_Y du bord), σ_1 : La contrainte du bord de l'échantillon dans la direction Y ou (σ_y du bord).....	120
Figure IV.13.3 : Courbe de variation de contrainte résiduelle σ_2 La contrainte au centre dans la direction X ou (σ_x du centre), σ_2 : La contrainte dans le centre de l'échantillon dans la direction X ou (σ_x du centre).....	121
Figure IV.13.4 : Courbe de variation de contrainte résiduelle σ_2 La contrainte au centre dans la direction Y ou (σ_y du centre). σ_2 : La contrainte dans le centre de l'échantillon dans la direction Y ou (σ_y du centre).....	121

Figure IV. 14 : Evolution de l'état de surface observée par le MEB pour les différentes vitesses de coupes.....	124
Figure IV. 15 : Evolution de l'état de surface observée par le MEB pour les différentes vitesses de coupes.....	126
Figure IV. 16 : Microstructure de la surface usinée après le test de corrosion agressive de l'acier XC18 usiné avec une vitesse V1 (20 m/min) puis immergé dans l'eau de mer pendant 48 heures.....	127
Figure IV. 17 : Microstructure de la surface usinée après le test de corrosion agressive de l'acier XC18 usiné avec une vitesse V4 (60 m/min) puis immergé dans l'eau de mer pendant 48 heures.....	128

Introduction générale

Introduction générale

Historiquement, la recherche sur l'usinage s'est concentrée sur deux aspects : le premier aspect concerne le développement technologique qui permet d'améliorer la productivité ainsi que la qualité des pièces finies, le deuxième aspect est la modélisation qui permet la prédiction des efforts de coupe, des champs de température et des propriétés des surfaces finies [1]. Cependant, le processus de fabrication, en particulier l'usinage, joue un rôle important sur la qualité et l'intégrité des surfaces réalisées. La complexification constante

des systèmes de fabrication et la concurrence amènent les technologies d'usinage à se développer rapidement. Les machines deviennent de plus en plus rapides et puissantes dans le but d'obtenir des gains de productivité [2].

Aujourd'hui, au-delà de la maîtrise des dimensions, de la géométrie ou de la rugosité, la production de pièces critiques (dans l'industrie aéronautique ou nucléaire par exemple) doit être capable d'assurer l'intégrité de la surface usinée. En d'autres termes, il faut pouvoir garantir que la surface produite possède l'ensemble des caractéristiques (notamment l'état de contrainte ou l'état métallurgique) qui lui permettront de remplir sa fonction sur une durée prédéfinie [3].

Par ailleurs, les évolutions du marché et de la productivité, mais aussi des techniques et des moyens de production, entraînent des variations permanentes des gammes de fabrication. Il est alors extrêmement difficile de garantir la fiabilité des pièces produites tout en prenant en compte ces changements dans le processus de fabrication [3].

La connaissance de l'impact que peut avoir l'usinage de la surface d'un produit fini à forte valeur ajoutée est d'un intérêt primordial pour les ingénieurs et les scientifiques. Les défis principaux sont alors la prédiction du copeau formé, des évolutions de la microstructure, du comportement mécanique et du comportement en corrosion des matériaux usinés. De nombreuses études adoptant des approches numériques et expérimentales ont été réalisées dans l'objectif d'analyser la formation du copeau [4-6]. Par contre, beaucoup moins d'attention a été portée sur le lien entre les conditions d'usinage appliquées et les propriétés physico-chimiques des surfaces usinées qui en dépendant (rugosité de la surface, contraintes résiduelles induites, transformation de phase, recristallisation, dureté, structures de dislocation,...) [7].

La qualité des états de surface est l'un des aspects les plus pertinents des opérations d'usinage, puisqu'elle représente la phase finale dans le cycle de production pour l'amélioration du degré de finition des surfaces et les propriétés dimensionnelles et géométriques des pièces mécaniques. Donc, il est important de se rendre compte de l'influence des différents facteurs impliqués dans le processus de la coupe afin de choisir les paramètres appropriés qui permettent d'atteindre la qualité des surfaces désirée et qui dépend de la géométrie de l'outil, des conditions de coupe et des phénomènes mise en jeu lors de la coupe [8].

Le choix qui a été fait pour cette étude est de s'intéresser à une opération de tournage. La raison principale vient motiver ce choix est que le tournage est une opération d'usinage à la fois simple et très courante dans l'industrie mécanique [9].

Notre travail de thèse est une contribution scientifique dans ce domaine de la technologie et qui a pour but d'étudier l'effet de la vitesse d'usinage par tournage sur un acier XC18. Notant que c'est un acier doux, faiblement allié au carbone il est destiné à la fabrication des pièces dans plusieurs domaines.

Pour mieux présenter l'aspect théorique et aussi l'aspect pratique de la thèse, nous avons partagé le manuscrit en quatre chapitres :

- Chapitre I : Généralités sur l'usinage des métaux.

Ce chapitre, présente des généralités concernant les différents procédés d'usinage des métaux et surtout l'usinage par tournage et ses différentes opérations. Un grand intérêt a été donné à l'état de surface des pièces usinées.

- Chapitre 2 : L'aspect métallurgique de l'usinage des métaux.

Ce chapitre est divisé en deux parties. La première partie est consacré aux types d'acier par contre la deuxième partie est réservée à l'effet des paramètres d'usinage sur le comportement des surfaces des métaux usinés. Des exemples d'études ont été aussi présentés.

- Chapitre 3 : Matériau et techniques de caractérisation.

Le troisième chapitre présente le matériau étudié qui est un acier doux ainsi la procédure d'usinage et enfin la présentation des différents techniques de caractérisation comme la microscopie optique, la rugosité, la microdureté et la diffraction des rayons X.

- Chapitre 4 : Résultats et interprétations.

Ce chapitre présente les résultats de notre travail de recherche et leurs interprétations avec une comparaison par rapport aux travaux déjà publiés par les autres chercheurs.

A la fin une conclusion qui permettra de mieux synthétiser les objectifs atteints et de présenter les éventuelles perspectives de ce travail.

Référence :

[1] J. D. Puerta Velasquez, Étude des copeaux et de l'intégrité de surface en usinage à grande vitesse de l'alliage de titane TA6V. Thèse de doctorat, de l'Université de Metz.

[2] Alexandre Mondelin, Modélisation de l'intégrité des surfaces usinées Application au cas du tournage finition de l'acier inoxydable 15-5PH. Thèse de l'université de Lyon.

- [3] : G. Poulachon, A. Moisan, I.S. Jawahir, On modeling the influence of thermo-mechanical behavior in chip formation during hard turning of 100Cr6 bearing steel, CIRP Annals - Manuf. Tech. 50 (2001) 1 31-36.
- [4] G.S. Sekhon, J.L. Chenot, Numerical simulation of continuous chip formation during non-steady orthogonal cutting, Eng. Comput. 10 (1993).
- [5] K. Maekawa, T. Shirakashi, T. Obikawa, Recent progress of computer aided simulation of chip flow and tool damage in metal machining, Proc. Inst. Mech. Engrs 210 (1996) 233-242.
- [6] G. Poulachon, A. Moisan, I.S. Jawahir, On modeling the influence of thermo-mechanical behavior in chip formation during hard turning of 100Cr6 bearing steel, CIRP Annals - Manuf. Tech. 50 (2001) 1 31-36.
- [7] W.S. Lin, B.Y. Lee, C.L. Wu, Modeling the surface roughness and cutting force for turning, J. Mater. Proc. Tech. 108 (2001) 286-293.
- [8] P. Franco, M. Estrems, F. Faura, « Influence of radial and axial runouts on surface roughness in face milling with round insert cutting tools », International Journal of Machine Tools & Manufacture 2004 (44) : 1555 – 1565.].
- [9] F. Valiorgue, 2008. Simulation des processus de génération de contraintes résiduelles en tournage du 316L. Nouvelle approche numérique et expérimentale, Thèse de doctorat, Ecole Supérieure des Mines de saint-Etienne 2008.

CHAPITRE I

Généralités sur l'usinage des métaux

I.1. Introduction

Les procédés d'usinage par enlèvement de matière sont des techniques de mise en forme largement utilisées dans l'industrie. Il existe de nombreux procédés d'usinage, le fraisage, le perçage, le tournage, le découpage, etc. La figure I -1 montre que la méthode expérimentale représente plus de 45% de l'ensemble des méthodes d'études des procédés d'usinage. En outre, le tournage représente presque un tiers des opérations d'usinage dans l'industrie devant le fraisage (Fig. I -2) [1].

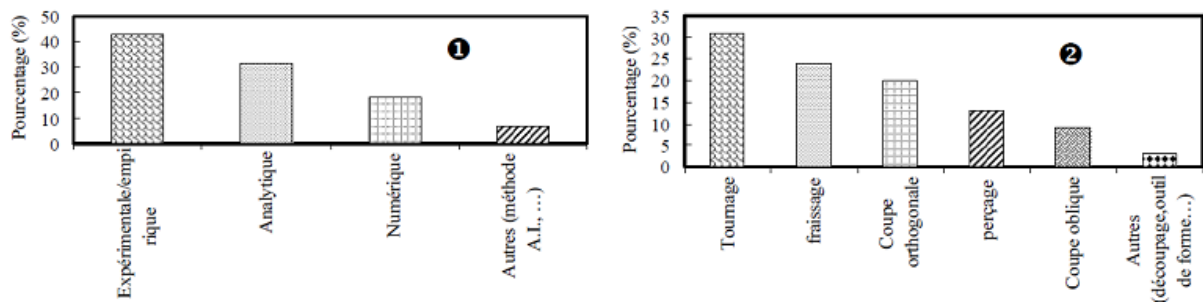


Figure I. : 1- Méthodes et démarches d'étude de l'usinage, 2- Taux d'utilisation des différents types de procédés dans l'industrie [1].

Bien que cette synthèse date de 1998, elle montre l'importance des études expérimentales qui permettent de mieux comprendre le procédé d'usinage. Elle montre également que le tournage reste toujours le procédé le plus utilisé dans l'industrie et le plus étudié [1].

I.2. Type d'usinage

Les opérations d'enlèvement de matière par outils coupants représentent, encore aujourd'hui, une part très importante des procédés de mise en forme des matériaux. Dans l'usinage des matériaux on a plusieurs types d'usinage, mais dans ce chapitre on présentera que deux types d'usinage qui sont très importants dans la réalisation des pièces (fraisage, tournage) et qui sont basés sur l'enlèvement de la matière [1].

I.2.1. Fraisage

L'opération de fraisage est sans aucun doute l'une des plus polyvalentes, permettant l'obtention de surfaces planes précises et aussi dans le cas des fraiseuses à commande numérique, de profils complexes et de surfaces 3D. Dans ce type de mise en forme, l'outil est

entraîné en rotation par la broche de la machine, et un déplacement relatif est effectué entre la pièce et l'outil de coupe afin de produire sur la pièce la forme désirée. Les fraiseuses ont supplanté certaines machines (raboteuses, étaux limeurs) pour l'usinage de surfaces planes. Ces machines peuvent également servir pour des opérations de tournage. L'outil, une fraise, est fixé dans la broche et est animé d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe). Il peut se déplacer en translation par rapport à la pièce suivant trois directions. On note qu'il existe plusieurs types de fraiseuses [2].

I.2.1.2. Différents types des fraiseuses

Le fraisage s'effectue sur différents types de machines

I.2.1.2. 1. Fraiseuses universelles

Cette machine (Figure I.2) sert principalement à usiner des pièces prismatiques. La pièce est fixée dans l'étau. L'outil est mis en rotation par le moteur de broche, il suit une trajectoire qui interfère avec la pièce. L'outil est muni d'une arête coupante, il en résulte un enlèvement de matière : les copeaux (Figure1-2 b) [3].

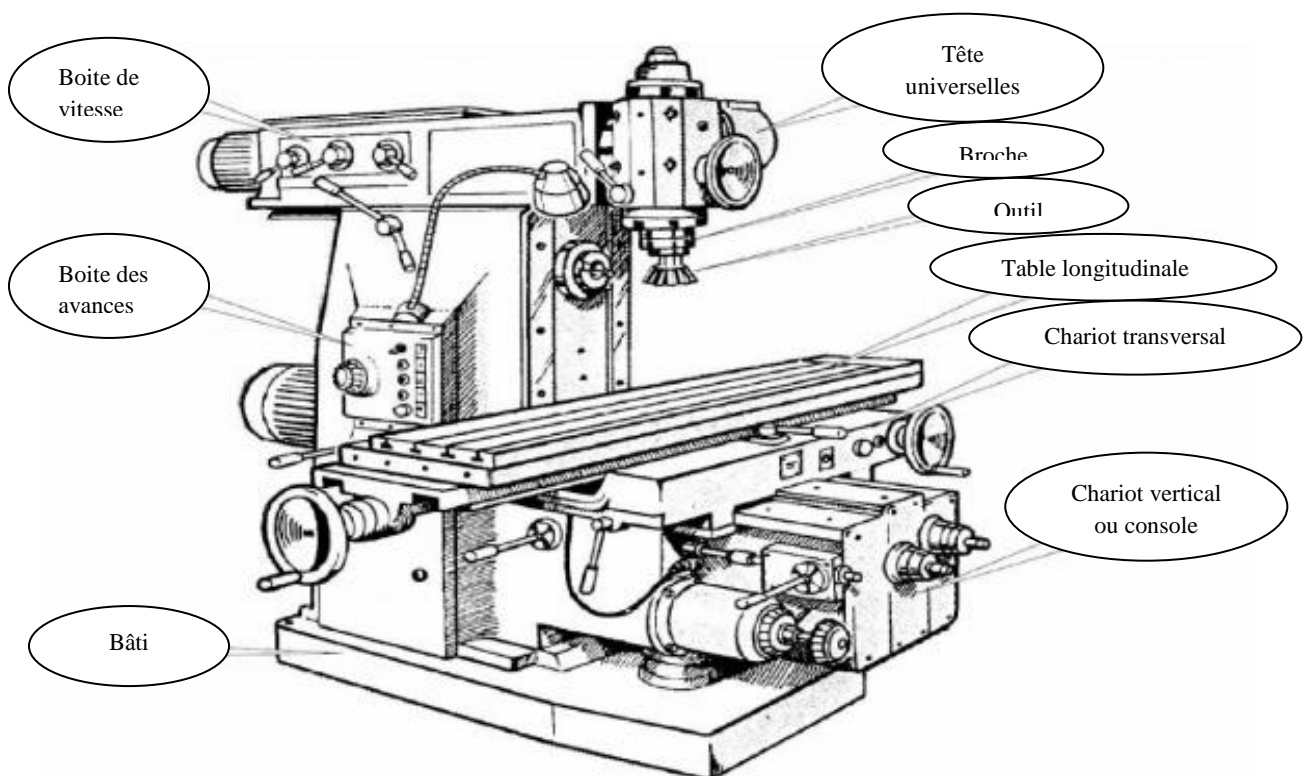


Figure I.2 : Fraiseuse universelle [3].

I.2.1.2. 2. Fraiseuses de production (à programme, commande numérique)

La commande numérique (CN) est une technique utilisant des données composées de codes alphanumériques pour représenter les instructions géométriques et technologique nécessaires à la conduite d'une machine ou d'un procédé (Fig I.3). La fraiseuse à commande numérique est une fraiseuse connectée à un système de commande numérique [4].

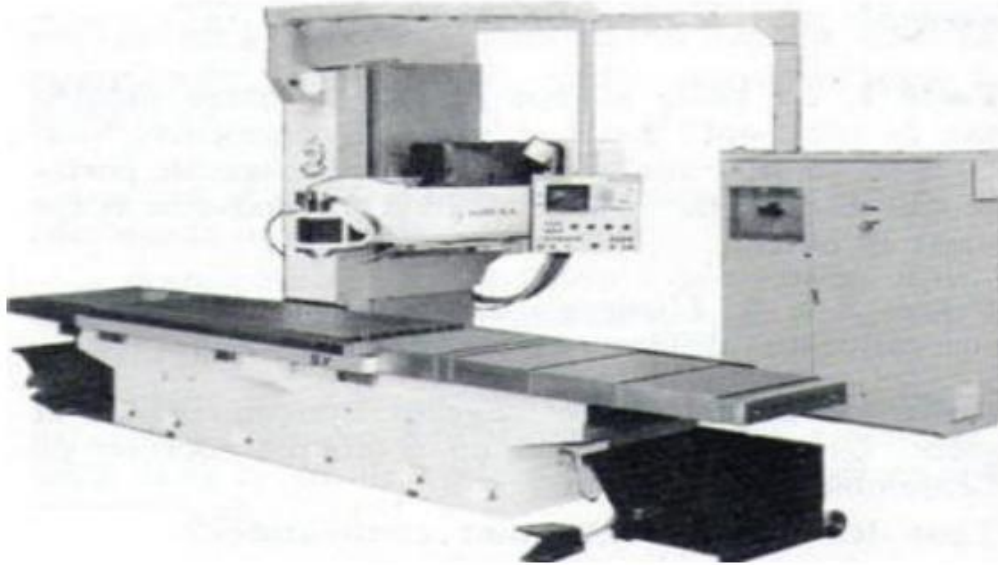


Figure I.3 : Fraiseuse à C.N. à banc fixe [4].

I.2.1.2. 3. Fraiseuses spéciales (à reproduire, multibroches, etc.).

Les fraiseuses à reproduire permettent de reproduire suivant deux ou trois axes la forme représentée par un modèle (ou gabarit). Un pantographe permet une reproduction en réduction ou avec symétrie. (Fig I.4). Un palpeur est assujéti, par un dispositif hydraulique ou électrique, à suivre le profil d'un gabarit et à transmettre ses déplacements à une table porte-pièce. Ces machines sont utilisées essentiellement pour les travaux à l'unité (outillages de presse, coquilles métalliques, etc.) [4].

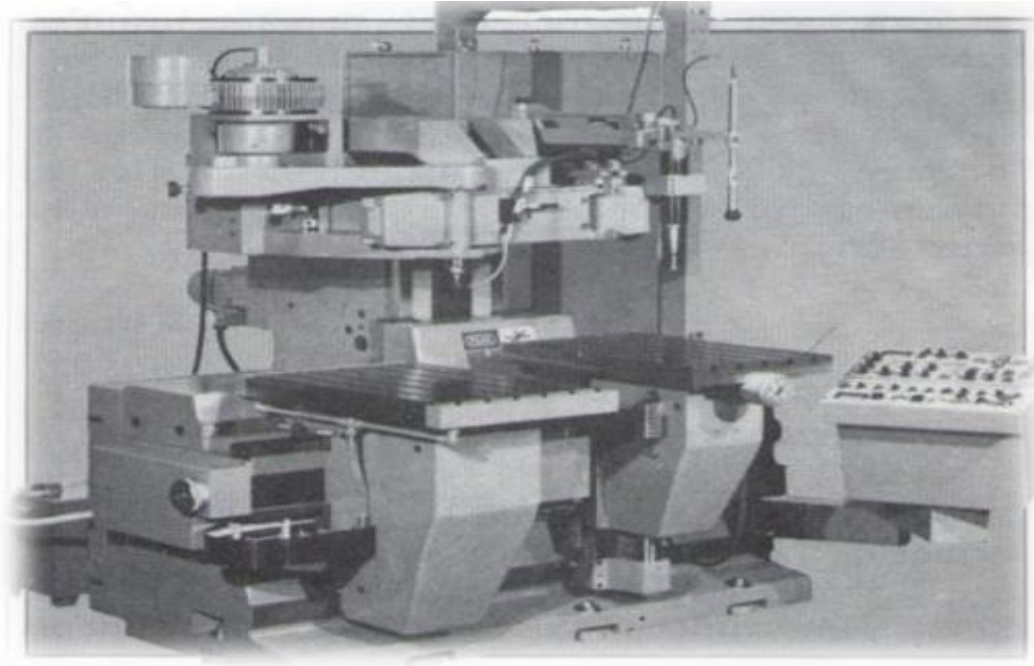


Figure I. 4 : Fraiseuse à reproduire à pantographe [4].

I .2.1.3. Procédés de fraisage

I .2.1.3. 1. Fraisage en bout

L'axe de la fraise est placé perpendiculairement à la surface à usiner (Fig I.5). La fraise coupe avec son diamètre, mais aussi avec sa partie frontale. Les copeaux sont de même épaisseur, ainsi la charge de la machine est plus régulière. La capacité de coupe est supérieure à celle réalisée par le fraisage en roulant. La qualité de l'état de surface est meilleure [5].



Figure I.5 : Fraisage en bout [5].

I .2.1.3. 2. Fraisage en roulant

Pour ce type de fraisage en roulant, l'axe de la fraise est placé parallèlement à la surface à usiner. La fraise coupe avec son diamètre (Fig I.6). La charge de la machine en est irrégulière, surtout lors de l'emploi de fraises à denture droite. Les à-coups provoqués par cette façon de faire donnent une surface ondulée et striée. Pour pallier ces défauts, on utilisera une fraise à denture hélicoïdale. L'amélioration enregistrée s'explique ainsi : la denture est chargée/déchargée progressivement [5].

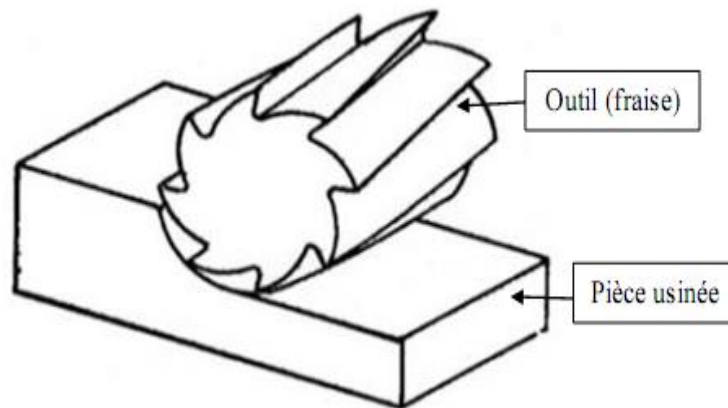


Figure I.6 : Fraisage en roulant [5].

I .2.1.3. 3. Fraisage combiné

Pour le fraisage combiné, la fraise coupe avec son diamètre et sa partie frontale (Fig I.7) [6].

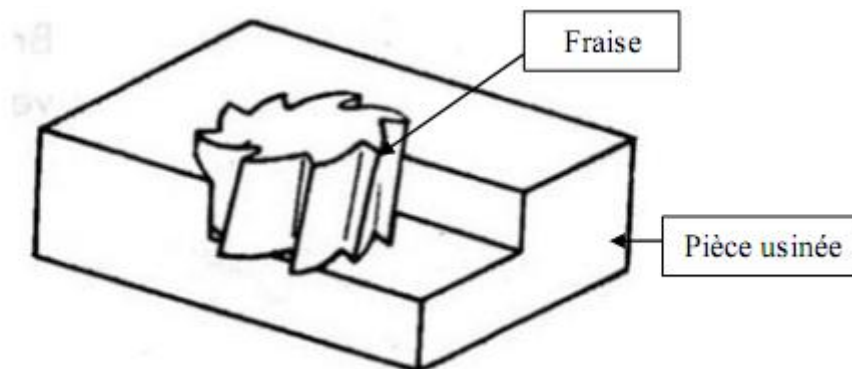


Figure I.7 : Fraisage combiné [6].

I.2.2. Le tournage

I.2.2.1. Principe de tournage

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils à arête unique. La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principal du procédé, l'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce (Fig I.8). La combinaison de ces deux mouvements, ainsi que la forme de la partie active de l'outil, permettent d'obtenir des usinages de formes de révolution (cylindres, plans, cônes ou formes de révolution complexes) [7].

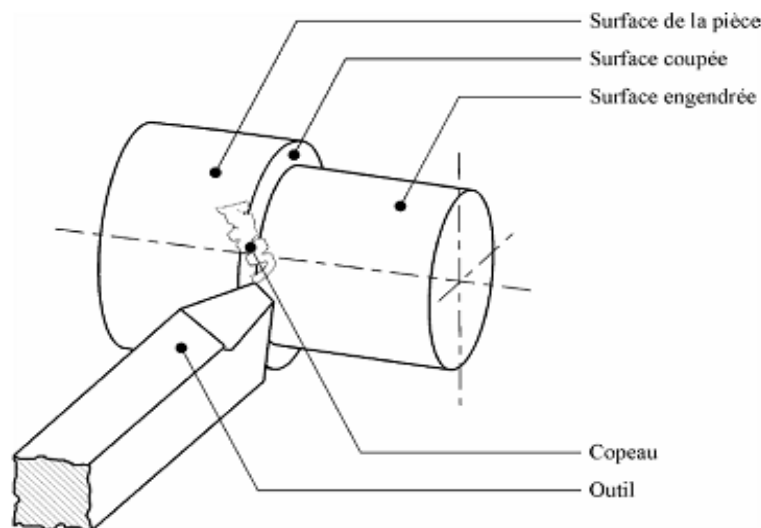


Figure I .8 : Procédure de tournage [8].

Lors de l'usinage d'une pièce, l'enlèvement de matière est réalisé par la conjonction de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil : le mouvement de coupe (vitesse de coupe V_c) et le mouvement d'avance (vitesse d'avance V_f). La fréquence de rotation de la broche est donnée par l'équation suivante [9].

$$N = \frac{V_c}{\pi \cdot \phi} \quad \text{I.1}$$

$$V_f = N \times f \quad \text{I.2}$$

ϕ : l'angle de direction d'avance.

I.2.2. 2. Les tours

Le tour (Fig I.9.a) permet de réaliser des surfaces de révolution et hélicoïdales (filetage) cylindres, cônes et plans (génératrice perpendiculaire à l'axe de révolution). L'utilisation principale des ces machines est l'usinage des arbres. La pièce (Fig I.9.b), généralement tenue par le mandrin, a un mouvement de rotation (mouvement de coupe) transmis par la broche. L'outil peut se déplacer en translation suivant deux directions. Ces deux directions, perpendiculaires entre elles, appartiennent à un plan auquel l'axe de la broche est parallèle. Le premier mouvement de translation est parallèle à l'axe de la broche. Le deuxième mouvement de translation est perpendiculaire à l'axe de la broche [9].

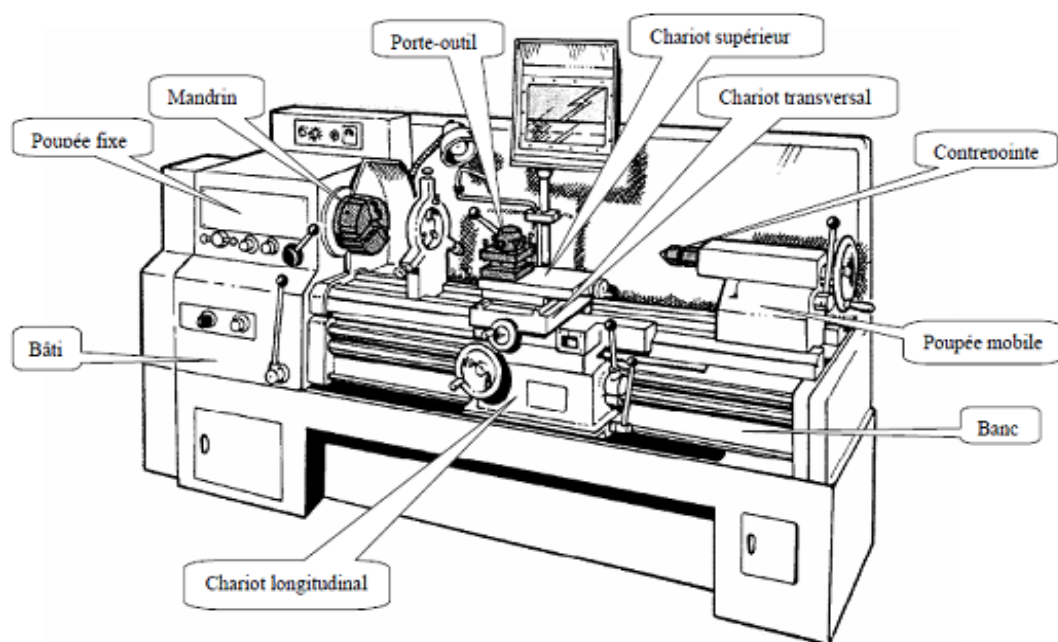


Figure I.9.a : Composantes de tour [9].

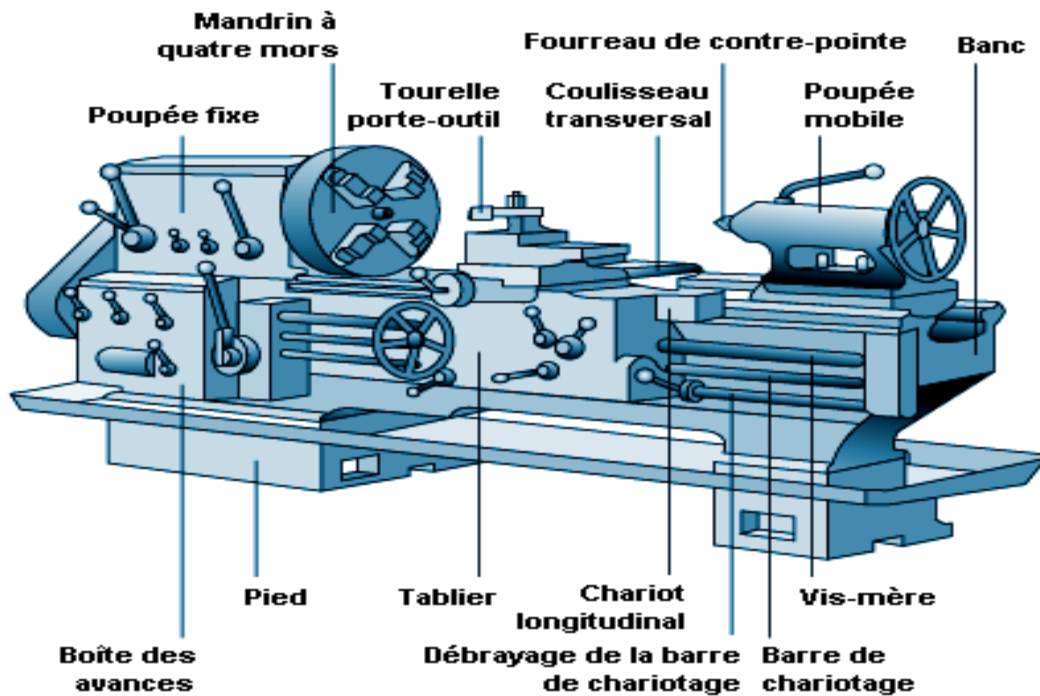


Figure I.9. b : Schéma descriptif du dispositif de tournage [29].

I.2.2. 3. Classification des machines de tour

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

I.2.2. 3.1. Les tours parallèles à charioter et à fileter

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

I.2.2. 3. 2. Les tours à copier

Ils permettent l'usinage de pièces par reproduction, à partir d'un gabarit, grâce à un système de copiage hydraulique qui pilote le déplacement du chariot transversal. C'est une machine assez flexible qui peut convenir pour des travaux de petites à grandes séries. La génératrice des surfaces de révolution peut être quelconque [10].

I.2.2. 3. 3. Les tours semi-automatiques

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

I.2.2. 3. 4. Les tours automatiques

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

I.2.2. 3. 5. Les tours automatiques multibroches

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

I.2.2. 3. 6. Les tours à commande numérique

Les machines à commandes numériques typiques sont en fait des tours et des fraiseuses conventionnels qui sont actionnés par des moteurs électriques et comme le nom le dit, commandés numériquement et dont la trajectoire est contrôlée par un ordinateur. On peut retrouver comme machine-outil CNC : un tour, centre d'usinage, une fraiseuse, une rectifieuse, machines à identifier les pièces, en fait n'importe quelle machine que l'on peut programmer.

Comme en copiage la génératrice de la pièce peut être quelconque mais ici la trajectoire de l'outil est obtenue par le déplacement simultané de deux axes dont les positions successives sont données par un calculateur travaillant à partir d'un programme propre à la

pièce. Ces tours sont équipés d'un magasin d'outils et éventuellement d'un système de chargement des pièces. La flexibilité de ces machines est très grande et particulièrement bien adapté pour le travail unitaire ou les petites séries répétitives [10].

I.2.2.4. Différentes opérations de tournage

I.2.2.4.1. Chariotage

C'est une opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique extérieure

(Fig I.10) [10].

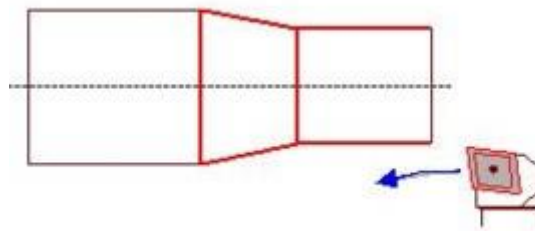


Figure I.10 : Chariotage [10].

En tournage, le chariotage (Figure I.11) est une opération consistant à usiner sur un tour un cylindre d'un certain diamètre par déplacement de l'outil de coupe suivant un axe parallèle à l'axe de rotation de la pièce Z. Les paramètres de coupe sont l'avance (f), la profondeur de passe (a_p) et la fréquence de rotation (N) [11].

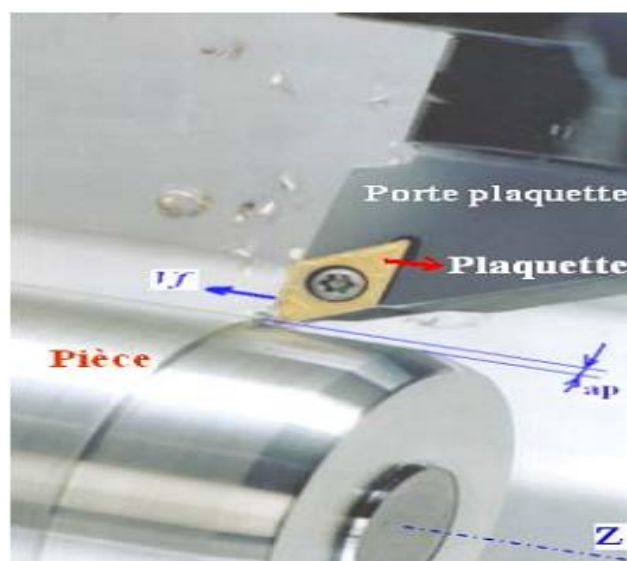


Figure I.11 : Opération de chariotage en tournage [11].

I.2.2.4.2. Dressage

C'est une opération qui consiste à usiner une surface plane perpendiculaire à l'axe de la broche extérieure ou intérieure (Fig I.12) [10].

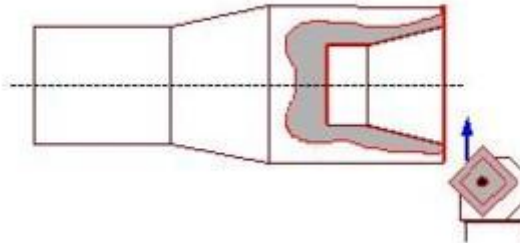


Figure I.12 : Dressage [10].

I.2.2.4.3. Alésage

C'est une opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique intérieure (Fig I.13) [10].

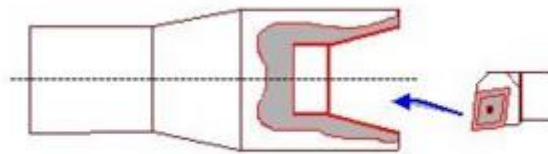


Figure I.13 : Alésage [10].

I.2.2.4.4. Perçage

C'est une opération qui consiste à usiner un trou à l'aide d'une forêt (Fig I.14).

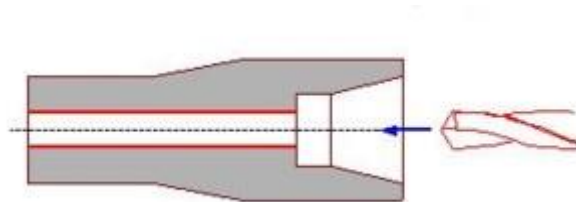


Figure I.14 : Perçage [10].

I.2.2.4.5. Rainurage

C'est une opération qui consiste à usiner une rainure intérieure ou extérieure pour le logement d'un Circlips ou d'un joint torique par exemple (Fig I.15).

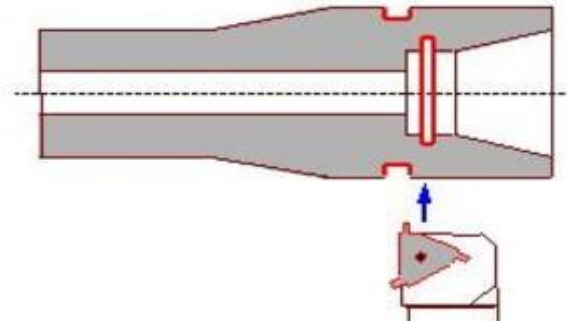


Figure I.15 : Rainurage [10].

I.2.2.4.6. Chanfreinage

C'est une opération qui consiste à usiner un cône de petite dimension de façon à supprimer un angle. Vif (Figure I.16).

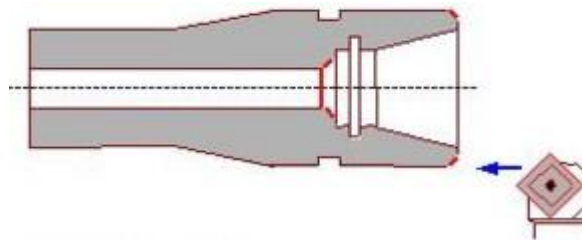


Figure I.16 : chanfreinage [10].

I.2.2.4.7. Tronçonnage

C'est une opération qui consiste à usiner une rainure jusqu'à l'axe de la pièce afin d'en détacher un tronçon (Fig I.17).

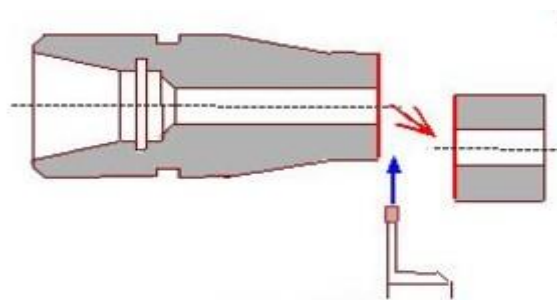


Figure I. 17. Tronçonnage [10].

I.2.2.4.8. Filetage

C'est une opération qui consiste à réaliser un filetage extérieur ou intérieur (Fig I.18) [10].

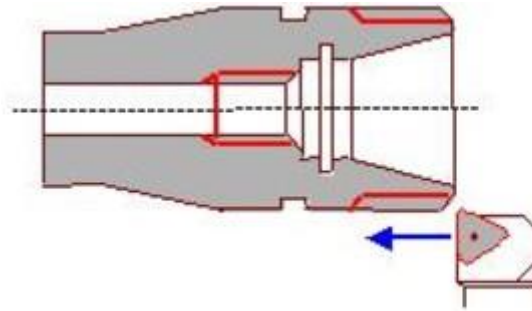


Figure I. 18 : Filetage [10].

I.2.2.5. Conditions de coupe en tournage

Les paramètres de coupe sont choisis mécaniques selon la matière à usiner et de l'outil (Fig I.19). Ils sont indépendants de la machine utilisée et des caractéristiques géométriques de la pièce et de l'outil [12].

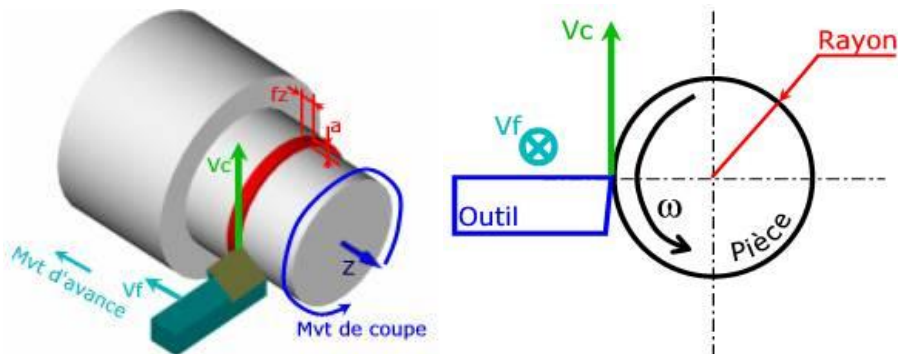


Figure I. 19 : Conditions de coupe [12].

I.2.2.5.1. Vitesse de coupe

La pièce est entraînée sur le tour à une certaine vitesse ω rad s / (soit N tr / min), cette vitesse angulaire étant communiquée par la broche de la machine via le porte-pièce (Fig I.20). Compte tenu du diamètre de la pièce au point d'usinage situé sur un diamètre D, la vitesse relative de la pièce en ce point par rapport à l'outil (supposé fixe par rapport à la machine) vaut [13].

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

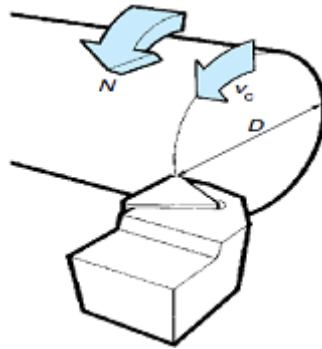


Figure I.20 : Vitesse de coupe [13].

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

V_c : vitesse de coupe (m / min).

D : Diamètre de la pièce (mm).

N : Fréquence de rotation (tr / min).

Il convient d'observer que la vitesse de coupe n'est constante que si la vitesse de broche et le diamètre de la pièce demeurent inchangés. En dressage, par exemple où l'outil se déplace en direction du centre, la vitesse de coupe varie continuellement si la rotation de la pièce s'effectue à une vitesse de broche constante. Or, pour une productivité maximale et une meilleure qualité des surfaces obtenues, il est souhaitable de maintenir la vitesse de coupe constante. Sur un grand nombre de tours modernes, la vitesse de broche augmente au fur et à mesure que l'outil approche de l'axe, afin de compenser ainsi la diminution de diamètre. Mais dans le cas de très petits diamètres, cette compensation se révèle impossible du fait de la plage de vitesse limitée qu'autorisent les machines. De même, lorsqu'une pièce, comme cela est souvent le cas, présente des diamètres différents ou est de forme conique ou courbe, la fréquence de rotation doit être corrigée en fonction du diamètre, pour maintenir la vitesse de coupe constante. Le préparateur choisit cette vitesse de coupe en fonction, notamment [13] :

- des matériaux de la pièce et de l'outil.
- de la lubrification.

- de la durée de vie souhaitée pour l'outil.

I.2.2.5.2. Vitesse d'avance V_f , Avance par tour f

La vitesse d'avance V_f (mm / min) est la vitesse à laquelle la machine déplace l'outil par rapport au bâti. L'avance par tour f (mm/ tr) est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce a effectué une révolution. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée. L'avance influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent (Fig I.21).

$$V_f = f \times N \quad (\text{mm / min}). \quad \text{I.4}$$

V_f : vitesse d'avance (mm / min).

f : L'avance (mm).

N : Fréquence de rotation (tr / min).

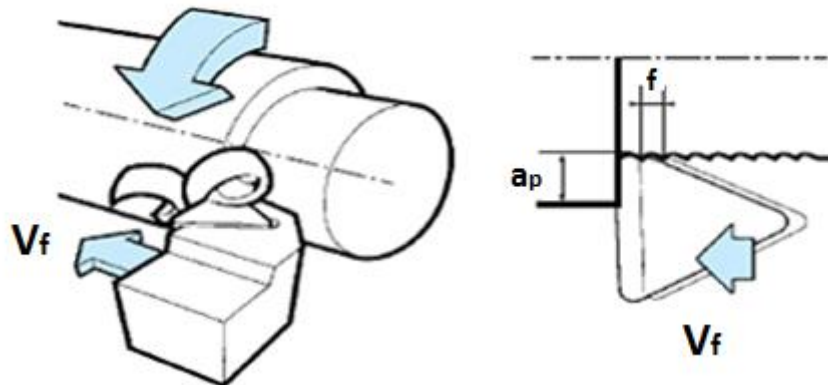


Figure I. 21 : Vitesse d'avance V_f , Avance par tour f [13].

I.2.2.6. Les types d'avances

On distingue trois sortes d'avance (Fig I. 22)

I.2.2.6.1. Avance longitudinale : On appelle avance longitudinale si l'outil se déplace parallèlement à l'axe de l'ébauche.

I.2.2.6.2. Avance transversale : On appelle avance transversale si l'outil se déplace perpendiculairement à l'axe de l'ébauche.

I.2.2.6.3. Avance oblique : On appelle avance oblique si l'outil se déplace sous un angle par rapport à l'axe de l'ébauche.

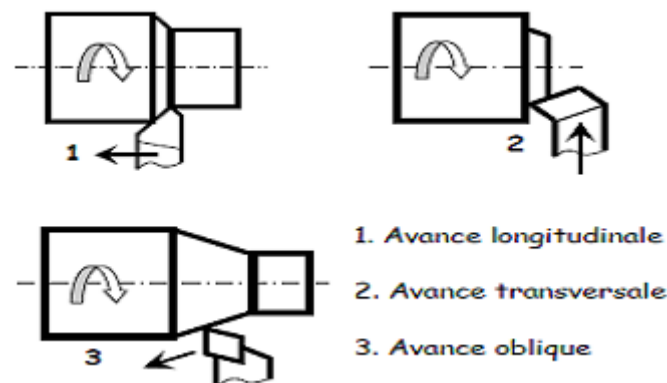


Figure I. 22 : Différentes types d'avance [14].

I.2.2.7. Evolutions des machines d'usinage

L'évolution technique a été pour une grande part dans l'augmentation des vitesses de coupe et de la productivité de l'usinage ; tout en permettant aussi une amélioration de la qualité des usinages. Dans les années 1980, les premières machines outils UGV (usinage grande vitesse) font leur apparition sur le marché industriel et plusieurs propriétés de ces machines influent directement sur la qualité des pièces usinées :

- la rigidité des bâtis assure une plus grande régularité de l'usinage et des forces exercées sur l'outil de coupe,
- la vitesse de rotation des éléments tournants permet d'accroître la vitesse de coupe,
- la qualité des géométries de la machine (parties fixe ou tournante) se répercute sur la qualité des pièces obtenues,
- les systèmes de commande de la machine dont l'automatisation et l'informatisation, par leur rapidité et leur précision, permettent de réaliser de plus en plus rapidement des surfaces de géométries de plus en plus complexes,
- Les dispositifs de serrage des outils, à la fois plus précis et plus puissants, autorisent des vitesses de rotation plus grandes [15,16].

I.2.2.8. Intégrité de la surface

En général, les pièces mécaniques sont soumises à des conditions d'utilisation de plus en plus sévères. Les besoins accrus en terme de performance, de durée de vie et de fiabilité, obligent à garantir la qualité des pièces produites, quelque soit le procédé de fabrication utilisé. Ces pièces sont souvent utilisées sous des chargements dynamiques et selon leur conception, leur durée de vie est limitée par la réponse en fatigue du matériau utilisé.

L'expérience montre que la plupart des défaillances de pièces soumises à des chargements dynamiques sont engendrés en surface [18]. De plus, le rôle fondamental de la surface de la pièce, concernant la tenue à la corrosion a aussi été prouvé.

Tous ces aspects montrent l'importance d'assurer une haute qualité des surfaces obtenues par usinage.

Par exemple l'objectif d'Eurocopter est de disposer d'une méthode permettant d'évaluer la sensibilité de leurs opérations d'usinage sur la tenue en fatigue de leurs pièces critiques (par exemple le mat rotor et les manchons de pâles, figure I.23). Ces pièces sont usinées en phase finale dans les parties critiques par le procédé de tournage finition, qui est le premier responsable de l'intégrité de surface de la pièce. Il est évident que ces pièces sont spécifiées avec un haut niveau de sécurité. En effet, il existe une relation directe entre l'état de la matière en surface et la tenue en service de la pièce [17].

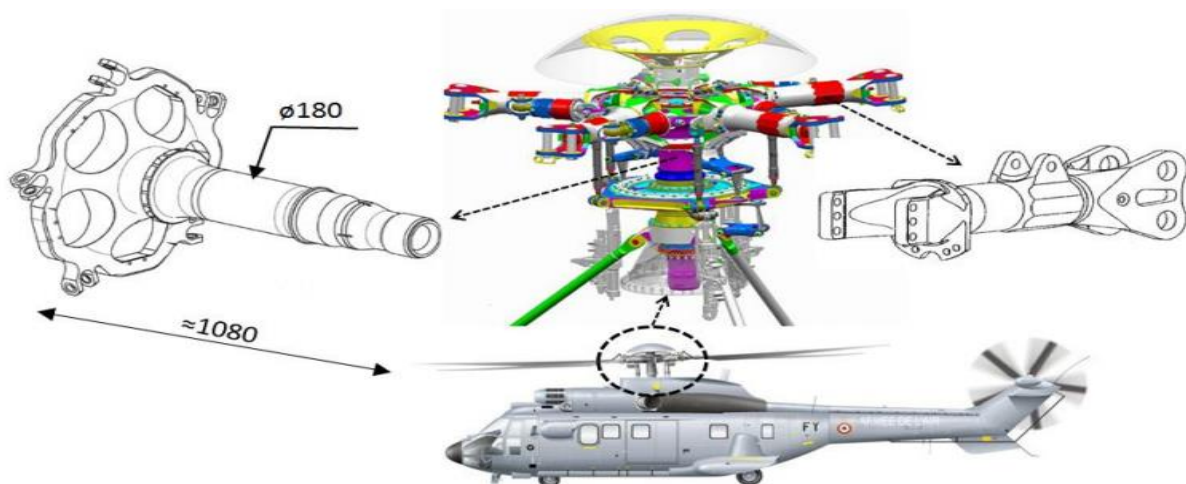


Figure I.23 : Positionnement du mât rotor et du manchon de fixation de pale : pièces critiques en 15-5PH usinées en tournage finition [17].

Dans ce contexte, deux définitions de la surface doivent être faites :

- **Surface réelle de la pièce** : c'est la surface qui sépare la pièce de l'environnement.
- **Couche de surface** : c'est la partie de la surface de la pièce qui présente des propriétés physiques et chimiques différentes de celles du cœur de la pièce. Par la suite, on retiendra cette dernière définition [18].

Il a été considéré que la **surface** se compose de plusieurs couches, on peut globalement différencier plusieurs zones affectées par le procédé de fabrication et les phénomènes qui leur sont associés (Fig I. 24) [19].

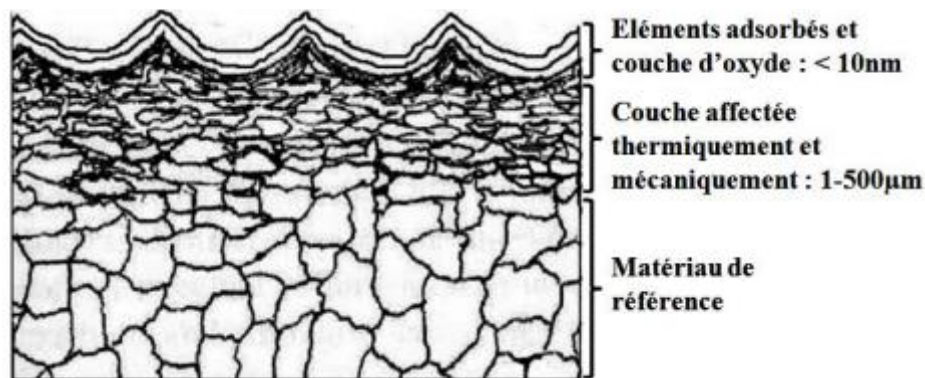


Figure I. 24 : Différentes couches affectées d'une surface [20].

I.2.2.8. 1. Définition générale

Le terme intégrité de surface englobe l'ensemble des paramètres permettant de caractériser la qualité d'une surface produite par usinage. Elle se compose de deux principaux aspects : la caractérisation géométrique et la caractérisation métallurgique de la couche de surface après usinage. Parmi les altérations possibles associées à l'usinage, affectant l'intégrité de surface, on trouve [18]:

- la déformation plastique,
- l'obtention d'un mauvais état de surface,
- des phénomènes de recristallisation,
- la modification de la dureté en surface,
- des transformations de phase,
- l'apparition de microfissures,
- un état des contraintes résiduelles en surface non adapté au fonctionnement de la pièce.
- la fragilisation par absorption chimique d'éléments tels l'hydrogène.

Ces altérations, générées lors de l'usinage, sont provoquées principalement par les hautes températures et les forts gradients de température engendrés dans la couche de surface, ainsi que par l'intense déformation plastique et les éventuelles réactions chimiques ayant lieu sur la surface en cours de formation [18].

I.2.2.8. 2. Paramètres caractérisant l'intégrité de surface

Les paramètres les plus fréquemment étudiés, permettant de caractériser l'intégrité de surface peuvent être regroupés en deux catégories : ceux permettant de caractériser géométriquement la surface usinée, et ceux permettant de caractériser micro structurellement la couche de surface obtenue. Parmi les paramètres importants au niveau géométrique, il est possible de citer l'état de surface, ainsi que le respect des tolérances dimensionnelles et géométriques. En ce qui concerne les paramètres utilisés pour la caractérisation microstructurale de la surface produite, on retient notamment la texture cristallographique, l'état de contraintes résiduelles, les modifications morphologiques des grains constituant la surface, l'analyse de phases (permettant de retrouver des phénomènes comme les transformations de phase et des réactions chimiques en surface), ainsi que la dureté et la micro dureté [18].

Du fait du caractère surfacique des sollicitations thermomécaniques imposées aux matériaux lors de l'usinage, de forts gradients microstructuraux sont engendrés dans la couche de surface produite. Cet aspect doit être pris en compte lors de la caractérisation des surfaces produites afin d'assurer une meilleure compréhension et une bonne maîtrise de l'intégrité de surface des pièces usinées [18].

I.2.2.9. Mesure de l'état de surface

On va voir dans cette partie comment on mesure les états de surface (Figure I. 25) [21]



Figure I. 25 : Mesure des états de surface [21].

La texture de la surface usinée sur la pièce se caractérise au moyen de trois paramètres de base.

Profil P : Il s'agit du profil primaire, qui est un profil général.

Profil W : Il s'agit du profil ondulatoire.

Profil R : Il s'agit de la rugosité de surface. Le profil R se calcule en appliquant un filtre qui retire les éléments de longueur d'onde du profil P. Le profil R est donc une modification intentionnelle du profil P.

I.2.2.9.1. Bases d'évaluation

La mesure des états de surface se fait généralement sur une longueur de référence spécifiée (Fig I.26). Si elle n'est pas précisée sur le dessin de la pièce, c'est à la personne qui effectue la mesure pour la déterminer.

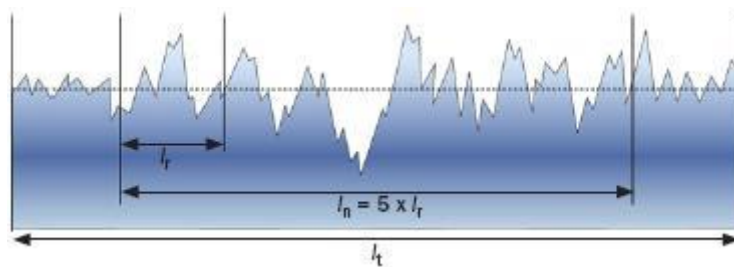


Figure I. 26 : Mesure des états de surface [21].

Longueurs mesurées :

l_t = longueur totale (incluant la longueur de démarrage, la longueur d'évaluation et la longueur d'arrêt).

l_n = longueur d'évaluation (elle correspond, en principe, à cinq longueurs de référence).

l_r = longueur de référence.

I.2.2.9.2. Mesure de la rugosité :

Pendant l'usinage, les caractéristiques de la surface de la pièce usinée peuvent être affectées par différentes variables qui sont : vitesse de coupe, avance de coupe, profondeur de coupe, mode de lubrification, géométrie de l'outil, matériau de l'outil, matériau usiné, etc. En général, ces changements et variations sont plus visibles dans la rugosité que dans les autres

caractéristiques de la surface usinée. En plus, Le changement de rugosité de la surface usinée peut fortement affecter la performance de coupe. C'est pourquoi la majorité des recherches reliées à l'état de la surface usinée et à la performance de coupe ont choisi la rugosité de la surface comme critère principal.

Cependant, compte tenu des explications ci-dessus, nous choisissons la rugosité de la surface usinée comme critère de la performance de coupe. Donc, il est nécessaire de connaître ses caractéristiques.

Dans les surfaces usinées, il y a différents défauts avec différents ordres de grandeur. Les défauts de 3^e ordre sont les stries et sillons dus à l'avance de l'arête coupante de l'outil, ou à l'avance par tour de la pièce, ou à des vibrations hautes fréquences. Ces défauts s'appellent rugosité de la surface. En effet, comme nous voyons dans la (figure I.28), la variation de ces défauts est indéterminée. Nous ne pouvons pas les utiliser directement dans notre analyse. Il y a plusieurs paramètres qui ont été définis afin d'encadrer et de présenter une valeur applicable pour la rugosité de la surface.

I.2.2.10. L'écart moyen arithmétique du profil (R_a) :

La figure I.27 présente comment on peut déterminer (R_a).

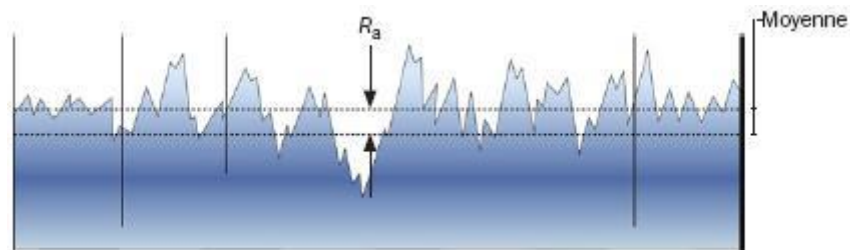


Figure I. 27 : l'écart moyen arithmétique du profil (R_a) [21].

L'écart moyen arithmétique du profil (R_a) est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts du profil dans les limites de la longueur déterminée pour mesure. Ceci est la valeur la plus connue et la plus applicable dans le domaine de recherche et dans l'industrie. La (figure I.29) présente un schéma de la rugosité de surface et la formule (3.3) présente la valeur d'écart moyenne arithmétique du profil (R_a) [21] :

$$R_a = (a + b + c + d + \dots) / n \text{ (}\mu\text{m)} \quad (3.3)$$

Où :

- n : est le nombre des points mesurés.

Le domaine d'intérêt de la rugosité de la surface déterminé par les recommandations du concepteur.

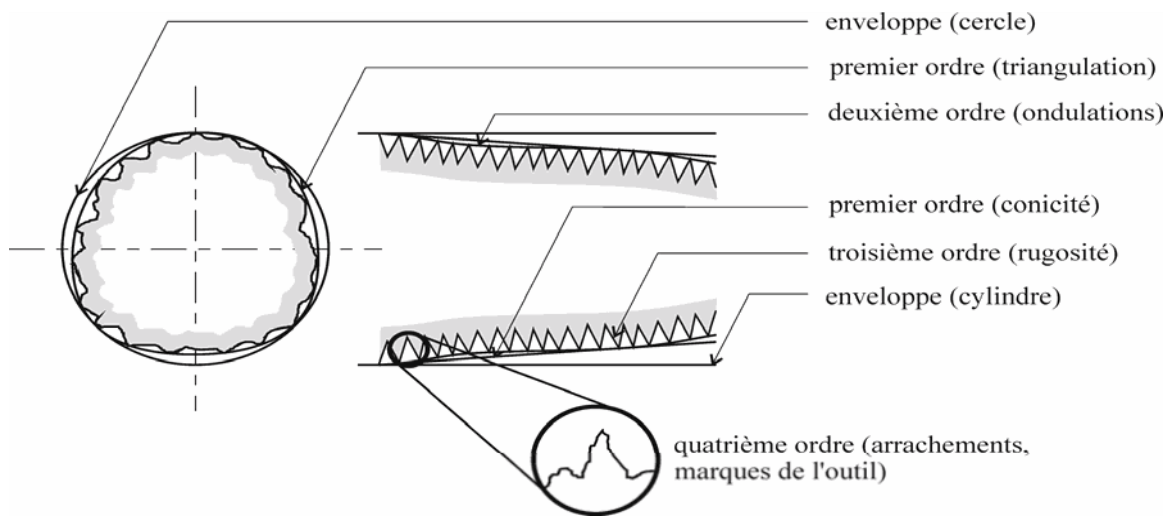


Figure I. 28 : Défauts de la surface usinée [22].

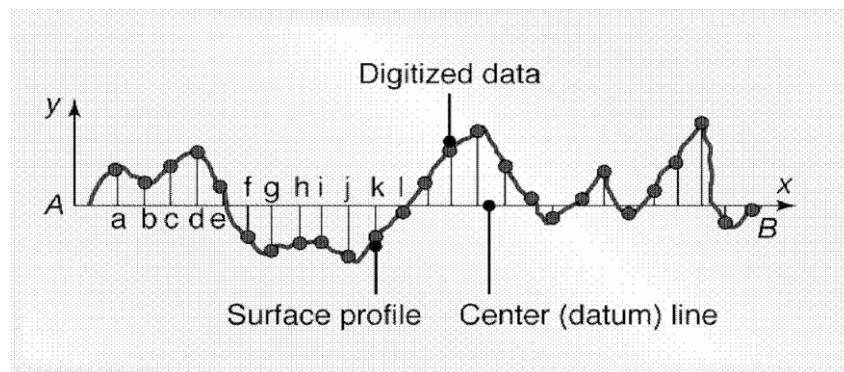


Figure I. 29 : Schéma de la rugosité de la surface [23].

I.2.2.11. L'évaluation de l'écart arithmétique moyen du profil évalué

I.2.2.11.1. R_a Rugosité moyenne du profil

C'est une valeur moyenne de tous les écarts par rapport à une ligne droite, dans la longueur d'évaluation, indifféremment de la direction verticale (Fig I.30). Cela signifie qu'il est impossible de déterminer avec une valeur R_a si les écarts sont des crêtes ou des creux. $-R_a$ n'est pas altérée significativement par les écarts isolés, ce qui signifie qu'il existe un risque de manquer un sommet important ou une rayure. Les valeurs de R_a typiques pour les états de

surface des métaux son comprises entre $0.02 \mu\text{m}$ et $3.5 \mu\text{m}$. **Plus ce chiffre est petit, meilleur est l'état de surface ($0.02 \mu\text{m}$ = aspect « miroir »)** [21].

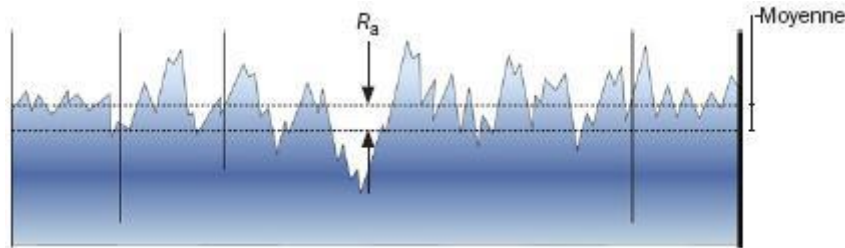


Figure I. 30 : l'écart moyen arithmétique du profil (R_a) [21].

Les états de surface peuvent présenter des aspects très différents tout en ayant une valeur de R_a identique figure I. 31.

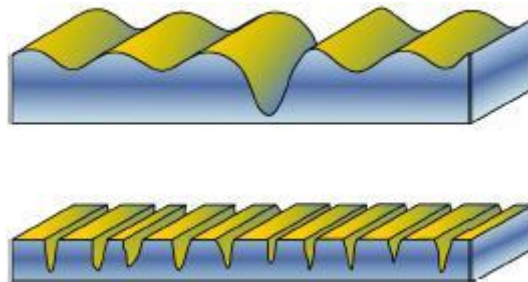


Figure I. 31 : indication de R_a [21].

I.2.2.11.2. R_z Hauteur de profil maximum (moyenne)

La hauteur de profil maximum est la valeur moyenne des différentes hauteurs de profil R_z obtenues entre la hauteur de crête la plus élevée et la profondeur de creux la plus importante sur les longueurs de référence comprises dans la longueur d'évaluation (Fig I.32). Normalement, il y a cinq longueurs de référence, mais ce nombre peut varier avec les appareils de mesure modernes. La valeur de R_z affichant la déviation la plus importante dans la longueur de référence est appelée $-R_{z\text{max}}$ ou $R_{\text{max v}}$.

$$R_z = \frac{R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}}{5}$$

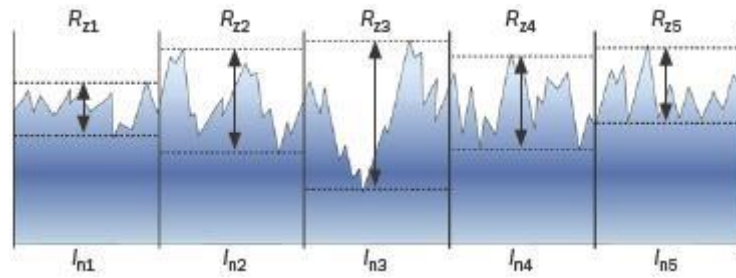


Figure I. 32 : R_z Hauteur de profil maximum (moyenne) [21].

I.2.2.11.3. R_t Hauteur de profil totale

La hauteur de profil totale est la somme de la hauteur de la crête la plus élevée du profil et de la profondeur de creux la plus importante dans la longueur d'évaluation (qui correspond normalement à cinq longueurs de référence) (Fig I.33). Une seule valeur de R_t (non combinée à $-R_z$ ni R_a) est l'une des exigences les plus strictes du profil R.

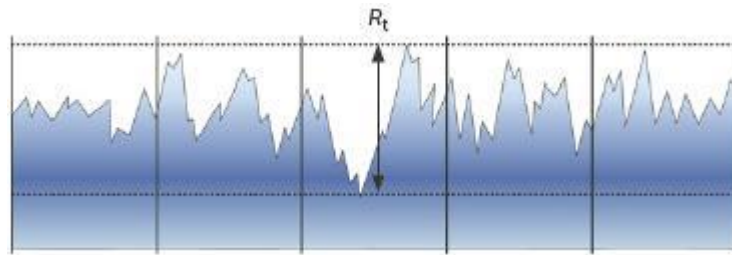


Figure I. 33 : R_t Hauteur de profil totale [21].

I.2.2.11.4. R_p Taux de longueur portante (courbe d'Abbot)

La hauteur de crête maximum du profil est la valeur moyenne des différentes hauteurs de crête, R_p , du profil obtenues sur la longueur de référence (Fig I.34). Le paramètre rugosité de surface, R_p , associé à R_z peut fournir des informations sur les caractéristiques de surface [21].

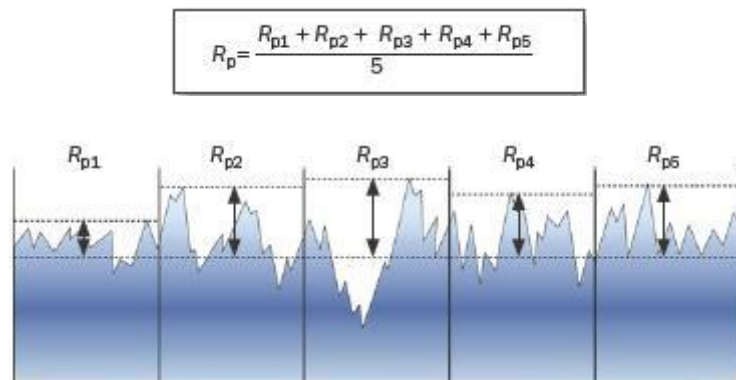


Figure I.34 : R_p Taux de longueur portante (courbe d'Abbot) [21].

I.2.2.11.5. R_{mr} Taux de longueur portante (courbe d'Abbot-Firestone)

La méthode la plus indiquée pour obtenir une mesure de « l'usinabilité » d'un objet est d'évaluer le taux de longueur portante de la surface. R_{mr} est un pourcentage de la longueur d'évaluation. L'évaluation du taux de longueur portante est une méthode simple pour indiquer le niveau d'un défaut de surface [21].

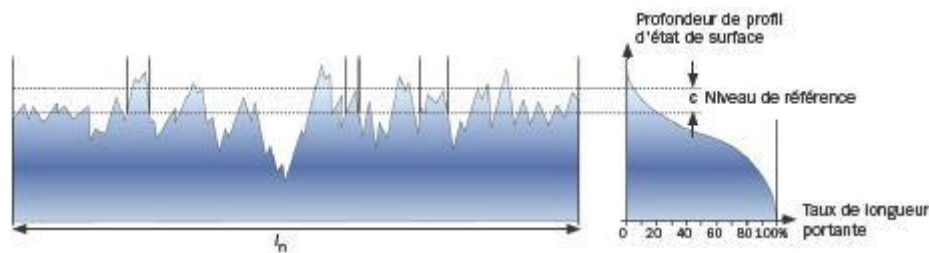


Figure I.35 : R_{mr} Taux de longueur portante (courbe d'Abbot) [21].

I.2.2.12. Défauts de la surface usinée

On note que plusieurs défauts peuvent être observés dans une surface usinée :

I.2.2.12.1. Écailles

La formation des écailles est généralement attribuée à la présence d'une arête rapportée instable [24]. Lors de la croissance d'une arête rapportée instable une fissure se forme dans la zone secondaire et une autre sous le bec de l'outil. Cette dernière se propage sous la surface dans la surface dans la zone primaire de déformations. Lors de la disparition de l'arête de coupe rapportée, un débris contenant cette fissure est laissée à la surface de la pièce et forme les écailles [25].

I.2.2.12.2. Cavités

La formation des cavités est liée à un arrachement de matière consécutif à la propagation de fissures en dessous du niveau de la surface dans la région du bec de l'outil, en présence d'une arête rapportée. Les cavités sont moins bien définies et souvent plus grandes lors de la formation de l'arête rapportée [26].

I.2.2.12.3. Microstries

Les défauts de petites tailles sont principalement dus aux interactions entre l'arête de coupe et la surface. Le labourage de la surface par des aspérités sur l'arête de coupe forme

des stries bien définies. Les stries moins définies sont provoquées par des micros arêtes de coupe rapportées [27].

I.2.2.12.4. Microfissures

La présence de microfissures dans les surfaces usinées on été mis en évidence par un certain nombre de chercheurs [25]. Les microfissures sont produites lorsque le matériau subit des déformations sévères et causent des concentrations de microcontraintes qui conduisent à des fractures locales. La microfissuration est le processus qui passe par deux étapes. La naissance et coalescence des microfissures voisines.

Tous les rapports d'expériences montrent que l'état de la surface usiné s'améliore avec la vitesse de coupe. La figure I.36 illustre ces observations pour différentes vitesses de coupe. Les états pratiques mesurés sont très voisins de la rugosité théorique calculée avec la géométrie de l'outil et de l'avance [27].

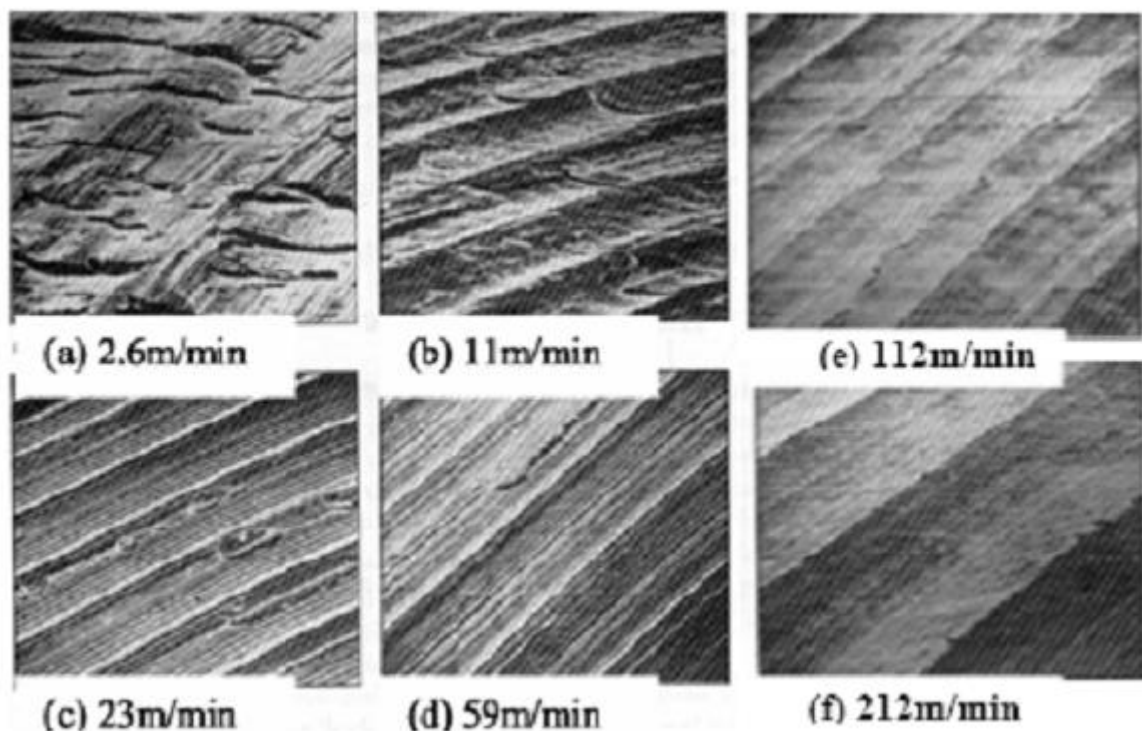


Figure I.36 : Microgéométrie de surface pour diverses vitesses de coupe [28].

I.3. Conclusion

A partir des données de ce chapitre, on peut dire que l'usinage par tournage est le plus utilisé. Ce procédé est basé sur certains paramètres comme la vitesse de coupe qui influe sur l'état de surface de la pièce usinée. L'état de surface est évalué par le calcul de la rugosité.

I.4. Références :

- [1] M. Tchadja Kagnaya, contribution a l'identification des mécanismes usure d'un WC-6%Co en usinage et par une approche tribologique et Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure des mines de paris.
- [2] René Kamguem, inspection automatique et sans contact de la rugosité des pièces usinées. Thèse par articles présentée à l'école de technologie supérieure université de québec.
- [3] Gaëtan Albert, identification et modélisation du torseur des actions en fraisage, Thèse de doctorat, école doctorale des sciences physique et l'ingénieur.
- [4] R. Butin, M. Pinot, «Fabrication Mécanique Technologie, Tome 3», Foucher, Paris
- [5] Gilles Prod'Homme, « Commande Numérique des Machines-Outils», Technique de l'Ingénieur, Traité Génie Mécanique, B 7130, pp.3, 1997.
- [6] D. Veeramani, Y. Gau, « Technologie de la Machine-outil », éd. CIP Tram élan, 1997.
- [7] A. Passeron, «Tournage», Techniques de L'Ingénieur, BM7086, 1997.
- [8] A. Belloufi, « Cours Procédés de Fabrication », Master Maintenance Industrielle, Université Kasdi Merbah Ouargla.2010.
- [9] A. Touine, « Usinage », INSA de LYON, Groupe conception - productique, 2007.
- [10] Rocardier, « Cours sur le Tournage - Usinage Cours Technologie », 2011.
- [11] R. Mohammad, Etude de l'évolution des caractéristiques des plaquettes de coupe en tournage à sec. Mise en place de critères d'aide à la décision du changement de plaquette. Application au cas de l'ébauche de turbines de pompage. Thèse de doctorat de l'université de toulouse.
- [12] Alexandre Toumine, «Cours D'Usinage », Groupe Conception Production, INSA de Lyon, France.
- [13] Alain Passeron, «Tournage», Techniques de L'Ingénieur, BM7086, 1997.
- [14] J. Vergnas, « Usinage : Technologie et Pratique », Génie Mécanique DUNOD, ISBN 2-04-011186-7, Bordas, Paris 1982.
- [15] R.I. King: "High-speed machining revs up". American machinist, jan 1981, pages 130-133.
- [16] R. Brooks: "High-speed machining takes back seat report from IMTS 82 American metal / metaworking news, page 11, september 13 1982.
- [17] A. Mondelin, Modélisation de l'intégrité des surfaces usinées application au cas du tournage finition de l'acier inoxydable 15-5PH, Thèse de l'Université de Lyon.

- [18] M. Field. Surface integrity - a new requirement for improving reliability of aerospace hardware. 18th Annual National SAMPE Symposium. Los Angeles, California, avril 3-5, 1973.
- [19] E.P. Degarmo, J.T. Black, R.A. Kohser, 2003. Materials and Processes in Manufacturing (9th ed.). Wiley.
- [20] J.P. Davim, Department of Mechanical Engineering University of Aveiro Campus Universitário de Santiago 3810-193 Aveiro Portugal.
- [21] http://www.sandvik.coromant.com/fr/fr/knowledge/materials/measuring_surfaces/pages/default.aspx.
- [22] M. Balazinski, "note de cours MEC4530", Montréal, 2009, pp. 1-100.
- [23] G. Boothroyd, et W. A. Knight., Fundamentals of Machining and Machine Tools, 3^e éd : CRC Taylor & Français, 2006.
- [24] St. Enache. "La qualité des surfaces usinées" édition Dunod 1972, 340 p.
- [25] M. Gaceb "An investigation of micro crack formation on machined surfaces" A PH-D Thesis, Department of Mechanical and Production engineering, Sheffield City polytechnic, July 1985.
- [26] F. Dupont "Aspects microstructural et mécanique des surfaces usinées en alliages d'Aluminium 2024 et 7075", Thèse de doctorat, Dept. des Matériaux, Ecole Polytechnique Federale De Lausanne, 1988.
- [27] G. Bellows, D. N. Tishler "Introduction to surface integrity" Material & Process Technology Laboratories Oct. 1970
- [28] M Remadna. Le comportement du système usinant en tournage dur. Application au cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN (nitrure de bore cubique). Thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Lyon.
- [29] La transformation et le travail des métaux, <http://www.ilocis.org/fr/contilo13.html>.

Chapitre II

L'aspect métallurgique de l'usinage des métaux

II. 1. Introduction

La connaissance de l'impact que peut avoir l'usinage sur l'intégrité de la surface d'un produit fini à forte valeur ajoutée est d'un intérêt primordial pour les ingénieurs et les scientifiques. Les défis principaux sont alors la prédiction du copeau formé, des évolutions de la microstructure, du comportement mécanique et du comportement en corrosion des matériaux usinés. De nombreuses études adoptant des approches numériques et expérimentales ont été réalisées dans l'objectif d'analyser la formation du copeau [1-3]. Par contre, moins d'attention a été portée sur le lien entre les conditions d'usinage appliquées et les propriétés physico-chimiques des surfaces usinées qui en dépendent (rugosité de la surface [4], contraintes résiduelles induites, transformation de phase, recristallisation, dureté, structures de dislocation, ...). Une revue bibliographique des effets du tournage d'aciers sur la microstructure (transformation de phase induite, effets de la recristallisation...), sur les propriétés mécaniques (champs de contraintes résiduelles) et sur la réactivité de la surface usinée est présentée dans ce chapitre.

II.2. Généralités sur l'acier

II.2.1. Définition de l'acier

L'acier est un alliage de fer contenant moins de 2.14 % de carbone. La figure II.1 montre le diagramme d'équilibre Fe-C, Il peut être répertorié selon cette teneur en carbone qui fixe son niveau de dureté maximale à l'état trempé. Un acier de haute teneur en carbone sera employé pour sa grande dureté alors qu'un acier de teneur plus faible est moins dur et plus malléable. Il contient généralement de petites quantités d'autres éléments que le fer et le carbone, incorporés, volontairement ou non, au cours de son élaboration. On peut également y ajouter des quantités plus importantes d'éléments d'alliage; il est considéré alors comme un acier allié [5] [6].

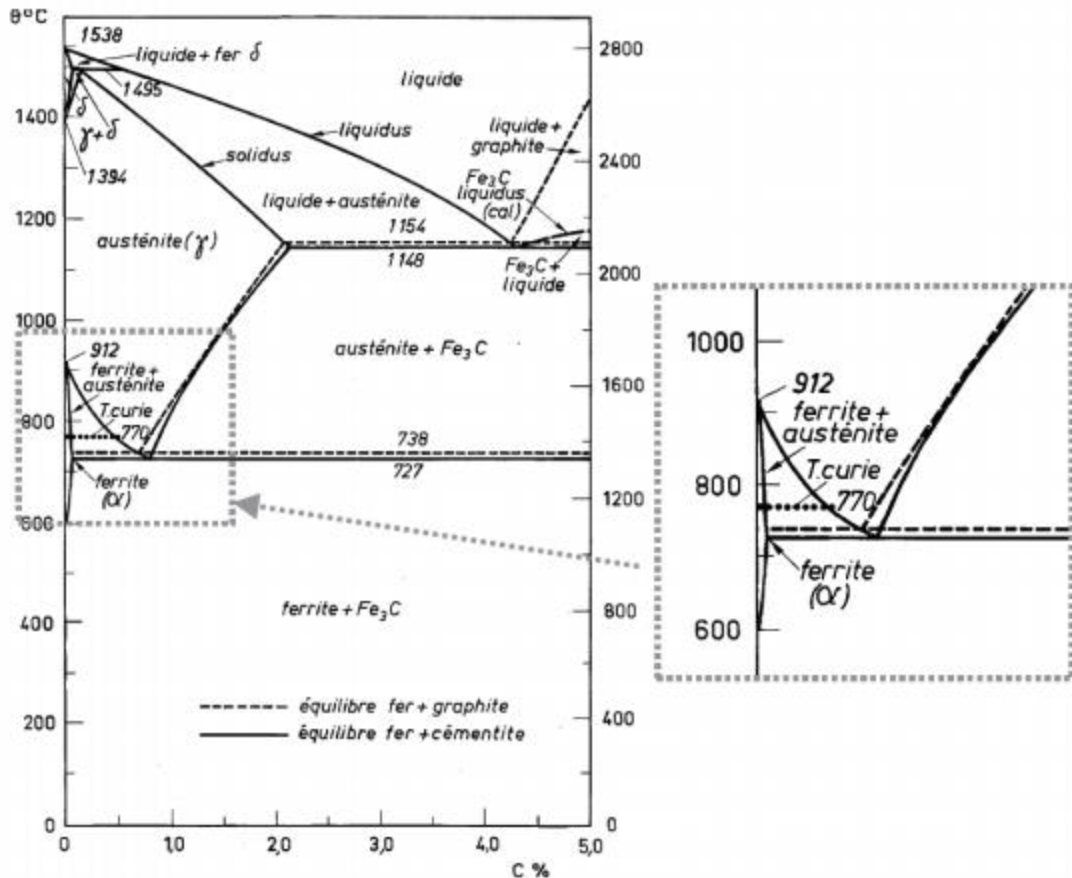


Figure II.1 : Diagramme d'équilibre fer-carbone (équilibre Fe-Fe₃C) [25].

II.2.2. Classification des aciers

Du fait du nombre élevé d'éléments ajoutés au fer et de la gamme étendue de leur teneur, les aciers présentent un très grand nombre de nuances différentes. On peut classer les divers types d'alliages à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation.

L'adoption de cette dernière nous permet de recenser quatre familles d'aciers :

- Les aciers au carbone d'usage général,
- Les aciers de traitements thermiques, alliés ou non,
- Les aciers à outils
- Les aciers inoxydables

II.2.2.1. Les aciers ordinaires ou aciers au carbone

Les aciers ordinaires sont des aciers standards d'usage général qui sont parfois improprement appelés aciers au carbone. Ils sont utilisés tels quels, sans traitement ultérieur, constituent environ 80 % de la production des aciers (tableau 1.01). Outre le carbone, ces aciers contiennent des éléments d'addition et des impuretés dont la présence découle de leur mode d'élaboration : manganèse (1.2 %), silicium (0.6 %), soufre (0.06 %), phosphore (0.06 %). Ces pourcentages présentent les teneurs limites de ces éléments dans ces aciers. Le tableau 1.01 rassemble les caractéristiques mécaniques et le domaine d'utilisation des aciers ordinaires [5] [6].

Tableau 1.01 : Aciers ordinaires ou aciers au carbone non alliés [5] [6].

Nuance	Pourcentage de carbone (C)	Résistance R_m (MPa) état recuit	Emplois
extra-doux	$C < 0,15$	330-420	tôles pour carrosserie, feuillards, quincaillerie, pièces de forge
doux	$0,15 < C < 0,20$	370-460	charpente métallique, profilés, construction mécanique courante, boulons, fils ordinaires
demi-doux	$0,20 < C < 0,30$	480-550	pièces de machines pour applications mécaniques, pièces ou bâtis moulés, pièces forgées
demi-dur	$0,30 < C < 0,40$	550-650	petit outillage, éléments de machines agricoles, organes de transmission
dur	$0,40 < C < 0,60$	650-750	pièces d'outillage, d'armement, glissières, rails et bandages, ressorts, coutellerie, pièces moulées et traitées
extra-dur	$0,60 < C$	>750	outils d'usinage et découpe, câbles, ressorts

II.2.2.2. Les aciers de traitements thermiques

On définit les aciers de traitements thermiques par rapport à leur composition chimique, car elle permet de déterminer les traitements qu'on peut leur appliquer en fonction des propriétés désirées. Les aciers de traitements thermiques sont soit des aciers au carbone sans autres éléments d'aditions que des éléments standard Mn et Si, soit des aciers alliés contenant en proportions variables d'un ou plusieurs éléments d'addition (Cr, Ni, V, etc.).

II.2.2.3. Les aciers à outils

Les aciers à outils ont une importance technologique primordiale, aucune étape de la fabrication et quel que soit le procédé employé ne peut se passer d'outil. La production mondiale de ce genre d'acier ne représente qu'un faible pourcentage 0.1 %, mais compte par

exemple en Amérique plus de 75 nuances. Chacune de ces nuances est destinée à une fonction bien spécifique [7].

II.2.2.4. Les aciers inoxydables

Aujourd'hui, nous vivons un extraordinaire développement des aciers inoxydables, cela est dû en grande partie à la disponibilité des éléments métalliques entrant dans leur composition, c'est-à-dire le chrome, le nickel, le molybdène et le manganèse, ce dernier pouvant être utilisé comme substitut au nickel. Un métal est dit inoxydable s'il résiste bien à l'action de l'atmosphère à divers degrés d'humidité et de salinité, à des attaques chimiques (acides, bases, sels, tout autre agent de corrosion). Dans de nombreuses applications devenues de plus en plus sévères en termes de corrosion, on a dû substituer des aciers spéciaux et alliés à l'acier ordinaire. Les aciers inoxydables comprennent un ensemble de familles d'alliages métalliques qui contiennent tous du fer et du chrome : c'est essentiellement le chrome qui confère aux aciers une bonne résistance à la corrosion par formation en extrême surface d'une très fine couche d'oxyde de chrome non poreuse. Suivant leur teneur en chrome dont le seuil minimal est de 13% et les traitements métallurgiques qu'ils ont subis, ils présentent un large éventail de propriétés. Entre autres, on distingue [7] :

a) Aciers martensitiques

Leur teneur en chrome ne dépasse pas 17% et leur teneur en carbone, qui est fonction de la teneur en chrome peut atteindre 1.1% [7].

b) Aciers ferritiques

Leur teneur en carbone est faible (inférieure à 0.08 %). Un acier qui contient plus de 12 % de chrome demeure ferritique à toutes les températures ; il ne peut plus prendre la trempe martensitique. Ils peuvent contenir entre 12 et 30 % de chrome. Ils sont aux chauffages sensibles au grossissement des grains, ce qui entraîne une dégradation de leur ductilité et de leur ténacité [7].

c) Aciers austénitiques

Malgré les progrès incontestables réalisés, en matière de ductilité et de ténacité, par les aciers inoxydables ferritiques, les aciers inoxydables austénitiques du type Fe-Cr-Ni représentent encore 80 % du marché mondial. Comme le nickel est un élément gamma gène,

il a tendance à stabiliser l'austénite. Selon leurs teneurs en chrome, en nickel et en carbone, certains aciers peuvent conserver une structure austénitique (C.F.C). L'addition de nickel élément gamma gêne, en quantité suffisante permet à l'acier de conserver sa structure austénitique à la température ambiante. Dans de nombreux milieux, leur résistance à la corrosion est remarquable, ainsi d'ailleurs que les propriétés mécaniques et leur formabilité. De par leur structure (C.F.C), ils ne présentent aucune transition ductile-fragile; on peut donc les utiliser à très basse température (Transport et stockage de gaz liquéfiés, par exemple). Finalement, leur résistance à la corrosion et à l'oxydation permet leur emploi à haute température (jusqu'à 900 ou 1000°C, selon les nuances). A ces propriétés, il faut ajouter une excellente soudabilité opératoire et métallurgique, ce qui facilite la mise en œuvre [7].

d) Acier doux XC18 :

C'est un acier doux de cémentation ou pièce faiblement sollicité. Egalement utilisé pour traitement dans la masse (trempe directe à l'eau). Excellente soudabilité.

II.3. Aspect métallurgique de l'interaction outil/pièce :

L'usinage est un procédé de fabrication mécanique par enlèvement de copeaux faisant intervenir deux mécanismes physiques de base : la déformation plastique au sein du copeau et le frottement à l'interface outil-pièce-copeaux. Une partie de l'énergie consommée pour la fabrication de la pièce est dispersée dans la zone de coupe à cause des frottements. Ce phénomène ainsi que la déformation plastique des matériaux pendant la coupe entraînent une génération de chaleur qui augmente la température de l'outil et de la pièce, ce qui engendre trois problèmes [8, 9] :

1. Le raccourcissement de la durée de vie de l'outil.
2. Le changement des caractéristiques mécaniques de la pièce dans la zone de coupe;

Le comportement thermique dans la zone de coupe est affecté considérablement par les facteurs suivants :

1. Résistance du matériau usiné [13].
2. Dureté du matériau usiné [14].
3. Capacité thermique massique du matériau usiné [11, 13].
4. Conductivité thermique du matériau usiné [13, 15].

5. Débit de copeau (vitesse de coupe, largeur de coupe, profondeur de coupe) [11, 12, 14,15].

Lors de l'usinage des métaux, la plupart de l'énergie dépensée au cours de la déformation plastique est transformée en chaleur [16]. Cette chaleur est dissipée par tous les éléments participants à la coupe : l'outil, la pièce usinée, le copeau et le fluide de coupe (si utilisé) [17]. Si l'on s'intéresse à l'outil, il est possible de voir qu'il doit supporter des hautes températures tout en conservant une résistance aux efforts ainsi qu'un état d'usure raisonnable. Il semble alors évident que la température atteinte dans l'outil déterminera sa durée de vie et sera un facteur décisif dans le choix des conditions de coupe. Si on analyse de près l'interface outil-copeau, la quasi-totalité de la chaleur générée est due à la déformation plastique lors de la formation du copeau et au frottement avec l'outil de coupe lors de son évacuation. Dans le cas de l'usinage à grande vitesse, cette chaleur est majoritairement évacuée dans le copeau, tandis qu'une faible proportion est dissipée par conduction dans le matériau devant l'outil. La proportion de chaleur dissipée par l'outil (Fig II.2) et le copeau est modifiée par le débit matière (volume de matière enlevé par unité de temps) qui dépend des paramètres de coupe. Cette proportion augmente pour des faibles débits matière pour les petits angles de coupe, mais reste faible pour des débits de matière importants [17].

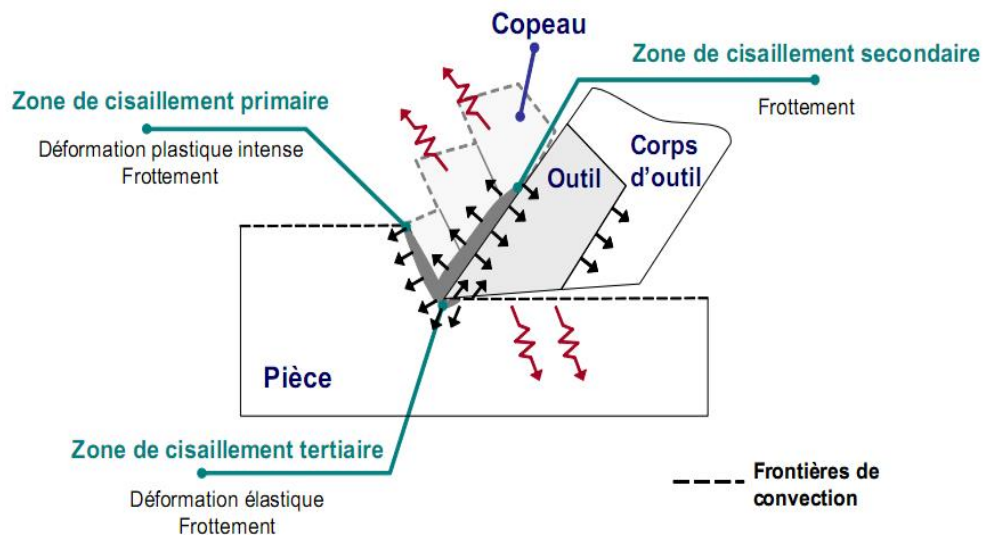


Figure II.2 : Les trois principales zones de génération de la chaleur dans le cas de la coupe orthogonale [17].

II.4. Choix des conditions d'usinage

Le choix des conditions d'usinage est aussi influencé par le matériau à usiner. Certaines propriétés mécaniques, telles que la ductilité, la dureté, l'écrouissage, ainsi que les propriétés thermiques, ont des effets sur les efforts de coupe aussi bien que sur la chaleur générée. Le choix optimal des conditions de coupe, spécialement de la vitesse de coupe, aura une influence directe sur la déformation, les modifications métallurgiques et les contraintes résiduelles dans la surface usinée. Cela dépendra de la température atteinte lors de l'usinage, des gradients de température sous la surface usinée et de la vitesse de refroidissement [16].

L'usinage (fraisage, tournage, rectification...) et les conditions de coupe influencent également le champ de contraintes résiduelles de la surface usinée. Une première étude de [18] montre qu'une opération d'ébauche en fraisage (conditions de coupe sévères) produit des contraintes résiduelles de traction dans la couche usinée, alors qu'une opération de finition en fraisage (conditions de coupe peu contraignantes) entraîne la formation de contraintes résiduelles de compression. L'usinage dur par tournage, fraisage, perçage ou brochage permet de développer un champ de contraintes résiduelles de compression. Ce champ de contraintes résiduelles dépend, en particulier, de l'avance [19]. En revanche, des contraintes résiduelles peuvent venir de traction quand l'outil use, conduisant à une réduction de la durée de vie en fatigue de la pièce [20].

II.5. Travaux scientifiques sur l'usinage des métaux

On doit noter que l'aspect métallurgique des travaux scientifiques publiés jusqu'à nos jours et concernant l'effet d'usinage sur les matériaux métalliques sont très limités, pour cela on va présenter quelques travaux publiés sur ce thème de recherche :

Par exemple, Breton et al [21] ont étudié l'impact des conditions d'usinage sur la surface du cuivre affectée par le de tournage par chariotage. Divers procédés de chariotage ont été menés sur du cuivre pur. La représentation schématique de la géométrie du processus de coupe de la figure II.3 montre l'outil en position d'usinage de type chariotage. Le repère utilisé pour les analyses est présenté dans la figure II.4. Les mesures et les analyses ont été menées sur trois différentes surfaces, notamment la surface usinée qui est perpendiculaire à l'axe radial, et les deux surfaces des sections coupées, respectivement perpendiculaires à l'axe radial et à l'axe orthoradial. Les deux sections en coupe ont été polies à la pâte diamantée de 1 μm avant de réaliser des mesures ou des observations. Les surfaces ont tout d'abord été

analysées grâce à des moyens de profilométrie optique afin de mesurer les états de surface et de microscopie électronique à balayage afin d'évaluer les modifications microstructurales.

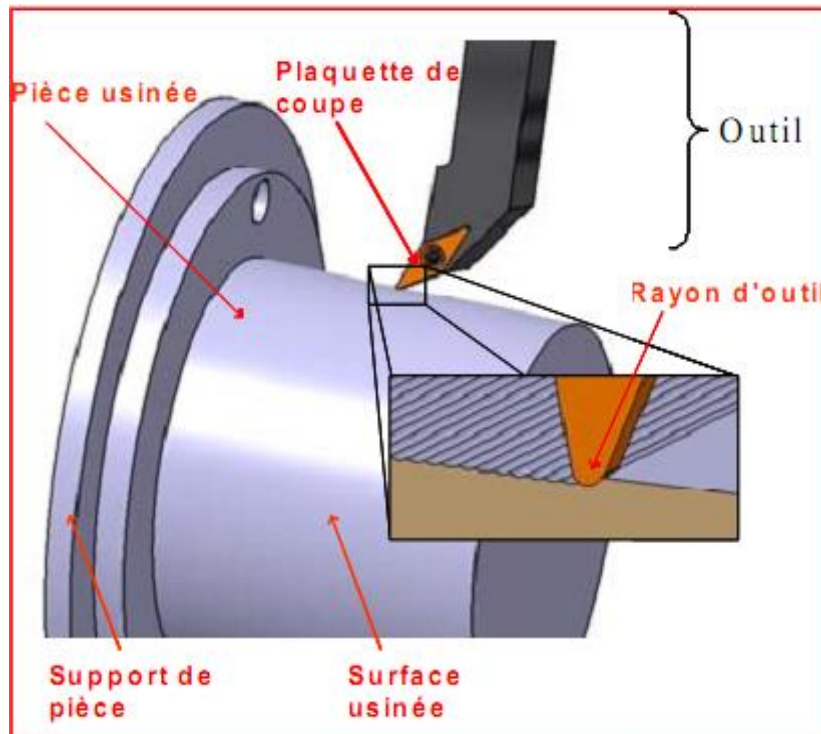


Figure II.3 : Configuration de chariotage [21].

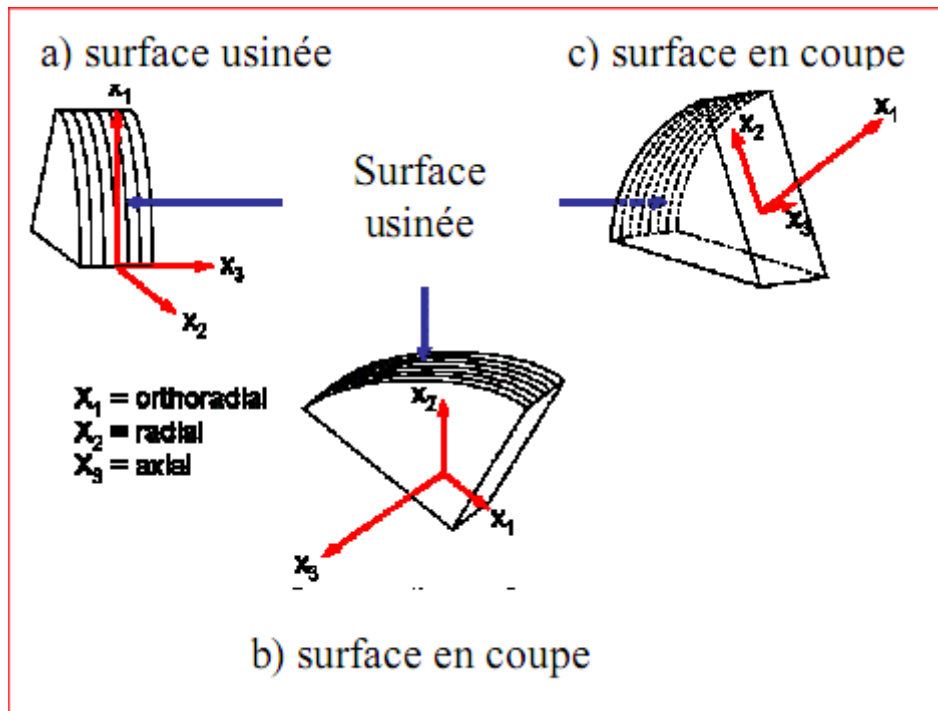


Figure II.4 : Repère utilisé et surface étudiées [21].

L'existence d'un volume affecté en proximité de la surface usinée a été révélée. Les auteurs ont trouvé que l'épaisseur de cette zone dépend des conditions de coupe. De même sur les surfaces usinées, ils ont remarqué que l'indice de texture croît lorsque l'épaisseur de la zone affectée augmente.

Dans une autre étude, Koné et al [22] ont étudié l'usinage d'un acier à haute résistance avec une plaquette de coupe revêtue. Cette étude est faite expérimentalement et numériquement. Le matériau usiné est l'acier inoxydable AISI 304L et l'outil de coupe est une plaquette en carbure revêtue d'un dépôt multicouche TiN-TiCN-Al₂O₃-TiN. Les résultats discutés dans leurs travaux portent sur les efforts de coupe et la rugosité de surface. L'étude expérimentale consistait sur plusieurs essais de tournage. La figure II.5 présente le dispositif expérimental et la géométrie de la plaquette de coupe.

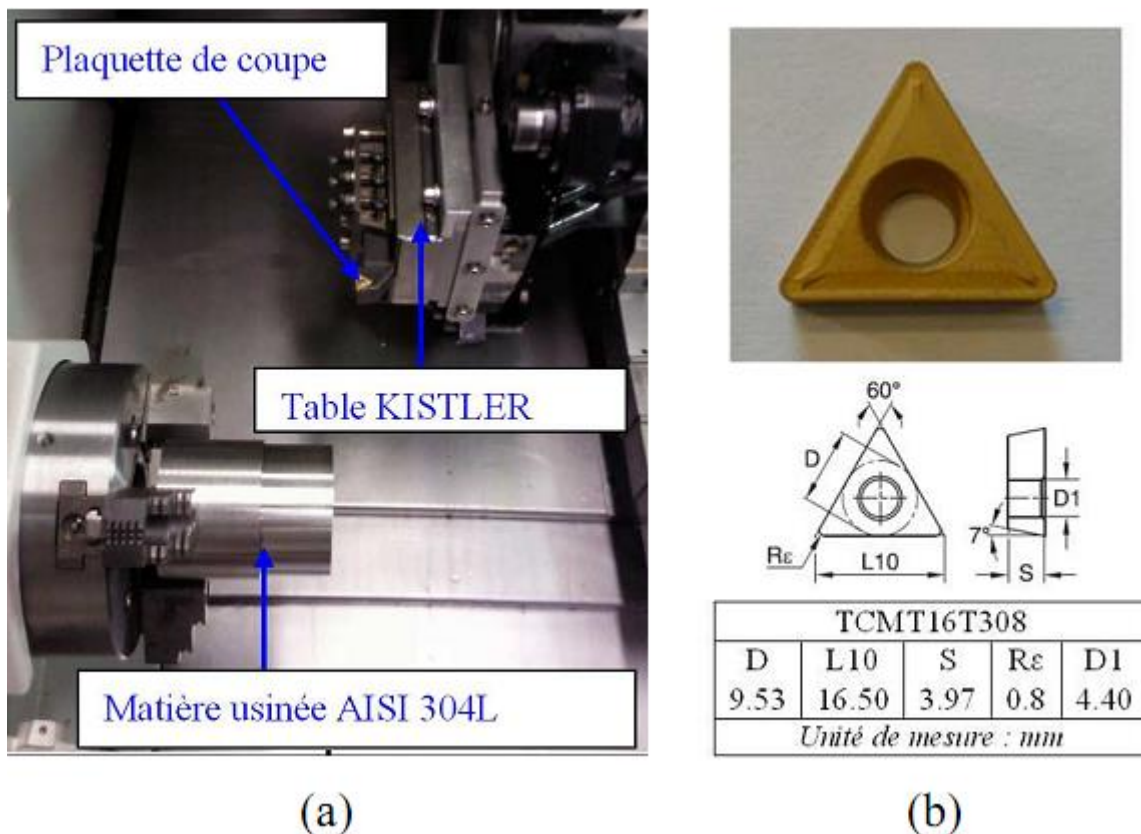


Figure II.5 : Dispositif expérimental (a), géométrie de la plaquette de coupe (b) [22].

Les auteurs ont varié les conditions suivantes : La Vitesse de coupe V_c (m/min) puis l'avance f (mm/tr). Les conditions de coupe qui ont été considérées afin de déterminer dans un premier temps la vitesse de coupe minimale (V_{cmin}) et l'avance minimale (f_{min}) ont permis d'identifier une plage de coupe adaptée à l'usinage du 304L avec l'outil en carbure revêtu TiN-TiCN-Al₂O₃-TiN.

On note que la profondeur de passe a_p (mm) a été maintenue fixe pour tous les essais. Les conditions de coupe considérées dans ce travail sont : $V_c = 100\text{m/min}$ et $f = 0.2\text{ mm/tr}$. La loi de comportement du matériau usiné tient compte des sensibilités à la vitesse de déformation et à l'érouissage, ainsi que de l'adoucissement thermique. Les auteurs ont remarqué que le comportement de l'outil de coupe est thermo-rigide. Pour la caractérisation, ils ont fait une simulation numérique du tournage. Les simulations numériques du procédé de tournage en chariotage sont réalisées à l'aide du logiciel de calcul basé sur les éléments finis en adoptant une approche de coupe orthogonale (déformations planes) [22].

Ces auteurs ont pu présenter des résultats expérimentaux montrant la variation des efforts spécifiques et la rugosité de la surface usinée (Fig.II.6).

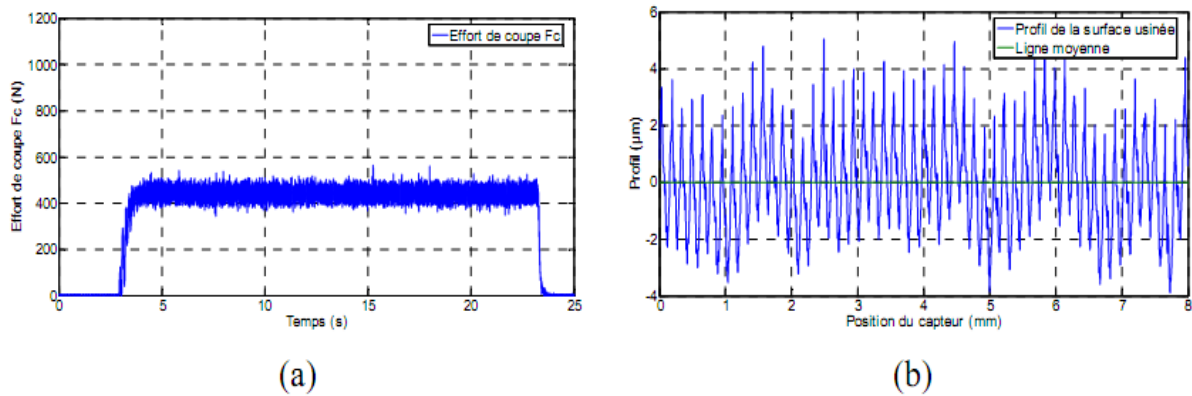


Figure II.6 : Exemple d'acquisition d'effort de coupe F_c (a) et de profil de surface usinée (b) ($V_c = 100\text{ m/min}$; $f = 0.2\text{ mm/tr}$, $a_p = 1\text{ mm}$) [22].

De même, plusieurs courbes de variation des différents paramètres d'usinage sont aussi présentées. La vitesse de coupe minimale V_{cmin} est identifiée à partir de l'évolution de K_c en fonction de V_c , comme il est indiqué dans la figure II.7.

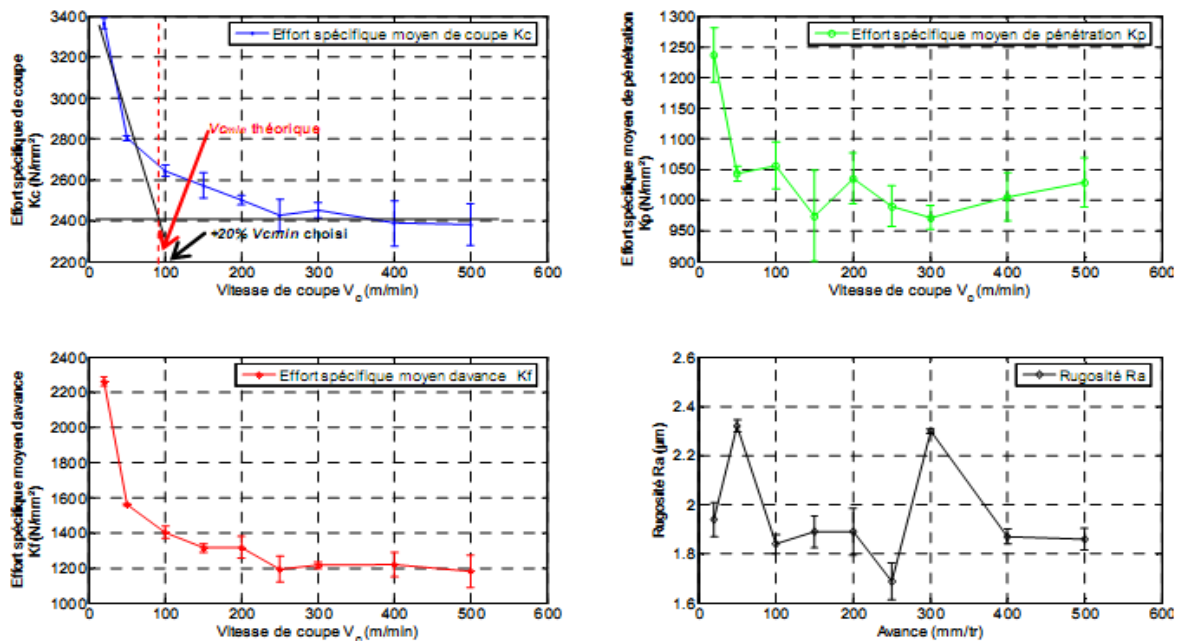


Figure II.7 : Efforts spécifiques de coupe K_c , d'avance K_f , et de pénétration K_p et rugosité R_a en fonction de la vitesse de coupe V_c ($f = 0.2$ mm/tr ; $a_p = 1$ mm) [22].

Ces auteurs ont montré que f_{\min} est obtenue selon la même procédure que celle adoptée pour l'identification de $V_{c\min}$. Ils ont trouvé que $f_{\min} = 0.15$ mm/tr.

Cette étude a permis aussi de définir des plages d'avance et les vitesses de coupe acceptables pour des conditions de coupe optimales. Concernant l'approche numérique, un calcul a été réalisé pour valider des expérimentales.

Kumar et al [23] ont étudié l'effet de la vitesse de rotation de broche et la vitesse d'alimentation sur la rugosité de la surface d'un acier au carbone.

Dans cette étude l'effet des paramètres du procédé de tournage par tour CNC sur un ensemble d'acier. Les paramètres à savoir la vitesse de la broche et la vitesse d'alimentation sont variées pour étudier leur effet sur la rugosité de surface. Les cinq aciers en alliage de carbone utilisés pour le tournage sont SAE8620, EN8, EN19, EN24 et FR47.

On note que ces aciers en alliage de carbone avec divers composé de carbone et d'autres éléments d'alliage sont usinés dans un tour CNC. Les matériaux ont été tournés à l'aide d'un outil de pointe de carbure à l'état humide, avec une profondeur de coupe constante de 0,5 mm. Chaque catégorie de matériau a été tournée à 5 vitesses de rotation différentes et 5 vitesses d'alimentation différentes. Les vitesses de rotation étaient de 339, 430, 576, 730 et 980 rpm et les taux d'alimentation sont de 0,05, 0,075, 0,1, 0,125 et 0,15 mm par tour. Les

vitesse de broche et d'avance ont été sélectionnées à partir de tables standards proposées pour l'exploitation sécuritaire des matériaux afin d'éviter une usure excessive de l'outil et par conséquent la perte de l'outil. La rugosité de surface de toutes les pièces d'échantillon a été mesurée avec un testeur de rugosité de surface.

La figure II.8 montre un profil de rugosité de surface générée par le testeur de rugosité.

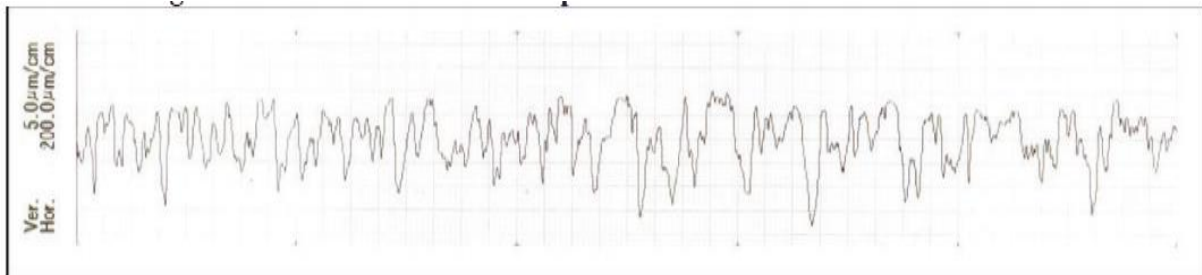


Figure II.8 : Profil de rugosité de la surface profil EN8 à 339 tours par minute et 0,05 mm / tr [23].

De même, ils ont aussi présenté les différents graphiques de la rugosité de surface en fonction des différents paramètres (v , f , ...). (Fig II.9).

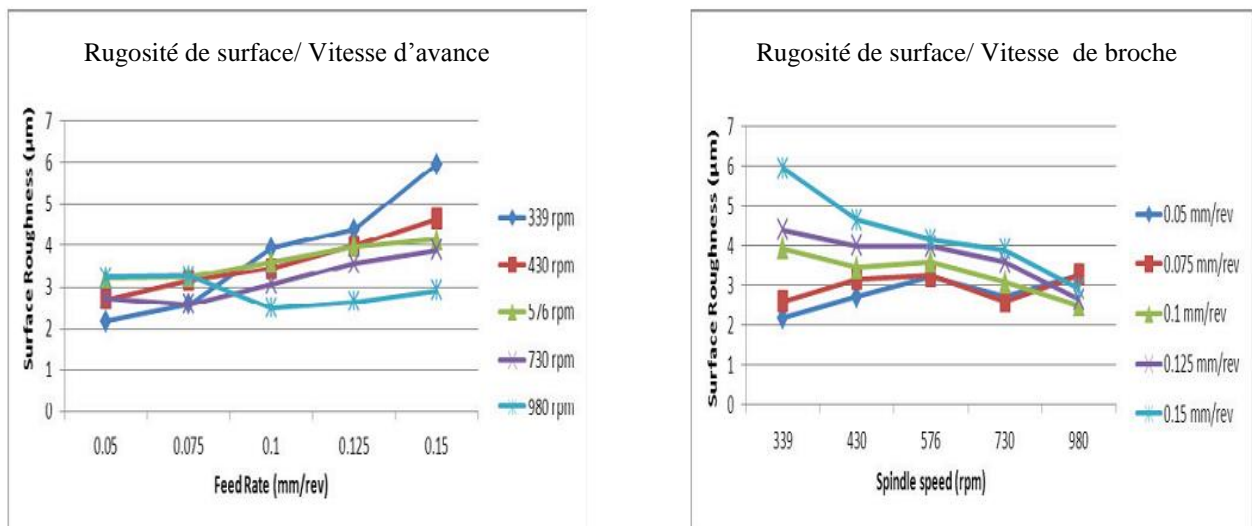


Figure II.9 : Courbes de rugosité de la surface [23].

Après leurs étude de l'effet de la vitesse de la broche et de la vitesse d'avance sur la rugosité de surface des alliages d'acier de carbone, ils ont conclu que la meilleure finition de surface peut être obtenu en tournant les aciers alliés de carbone par une vitesse d'alimentation basse et avec une haute vitesse de broche.

Gaceb et Brahmi [24] ont étudié l'influence des paramètres de surfaces réalisées par tournage sur la résistance à la fatigue d'un acier XC 48. Leur étude est basée plus particulièrement à identifier l'effet de la rugosité qui peut être produite sous différentes conditions d'usinage des surfaces. Pour ce faire, diverses éprouvettes, présentant des combinaisons variées d'état de surfaces ont été étudiées. Ils ont appliqué plusieurs essais de fatigue sur des éprouvettes cylindriques bien déterminées (Fig II.10). Les essais de fatigue sur éprouvettes cylindriques sont réalisés en flexion rotative sous air, à la température ambiante en utilisant une machine d'essai en fatigue avec une vitesse de rotation d'approximativement 2800 tr/min.

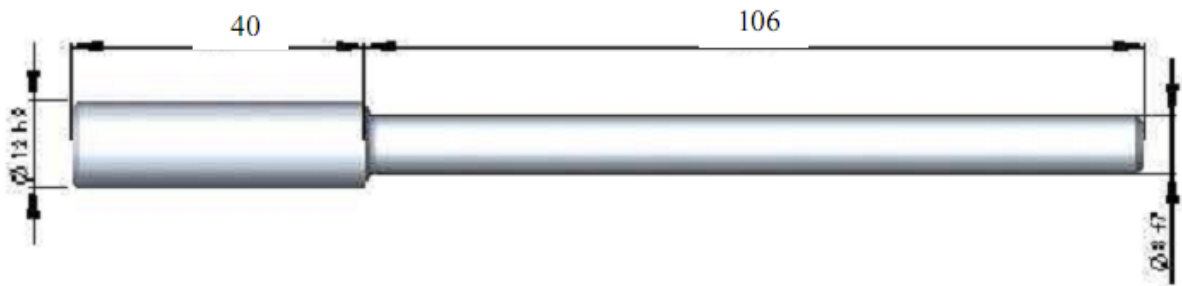


Figure II.10 : Géométrie de l'éprouvette usinée pour les tests de fatigue [24].

Leurs observations ont été basées sur la rugosité et la micrographie de la surface usinée. On note que pour déterminer les limites du domaine d'usage du couple outil/matière, il s'agit de déterminer un domaine de validité de production d'une surface dans de bonnes conditions technologiques en fonction de deux paramètres : la vitesse de coupe (V_c) et de l'avance (f).

Après, ils ont pris des mesures de la rugosité sur des surfaces obtenues après usinage avec des conditions bien définies, et mesurée sur les surfaces des éprouvettes au moyen d'un mesureur d'état de surface électronique à palpeur en diamant à capteur inductif du type SURFTEST SJ301.

Ils ont déduit que la rugosité moyenne est fonction de deux paramètres de coupe; la vitesse de coupe et l'avance par tour respectivement, comme il est montré dans la figure II.11 et II.12.

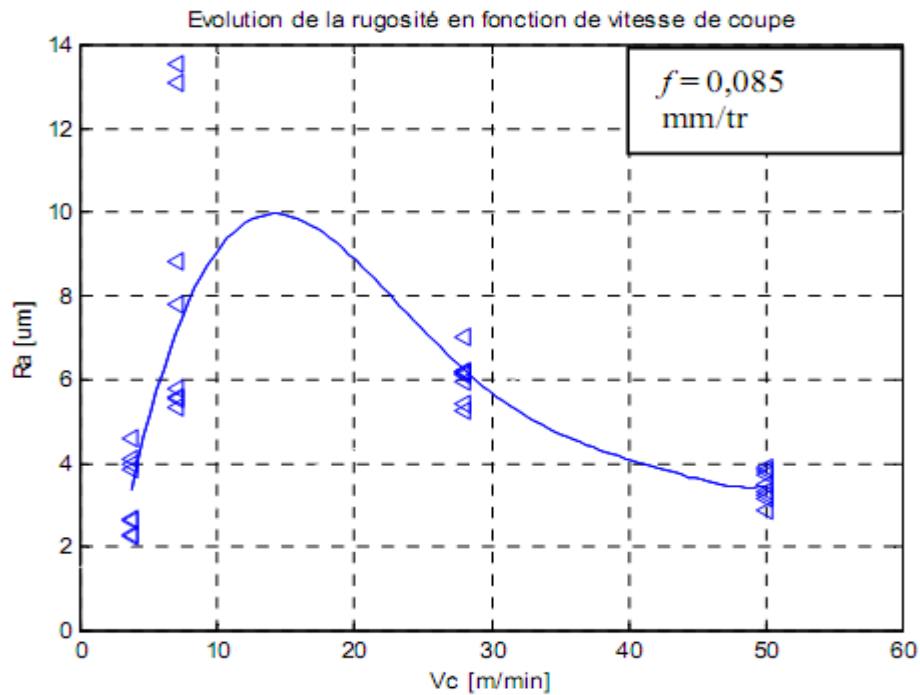


Figure II.11 : Variation de la rugosité avec la vitesse de coupe [24].

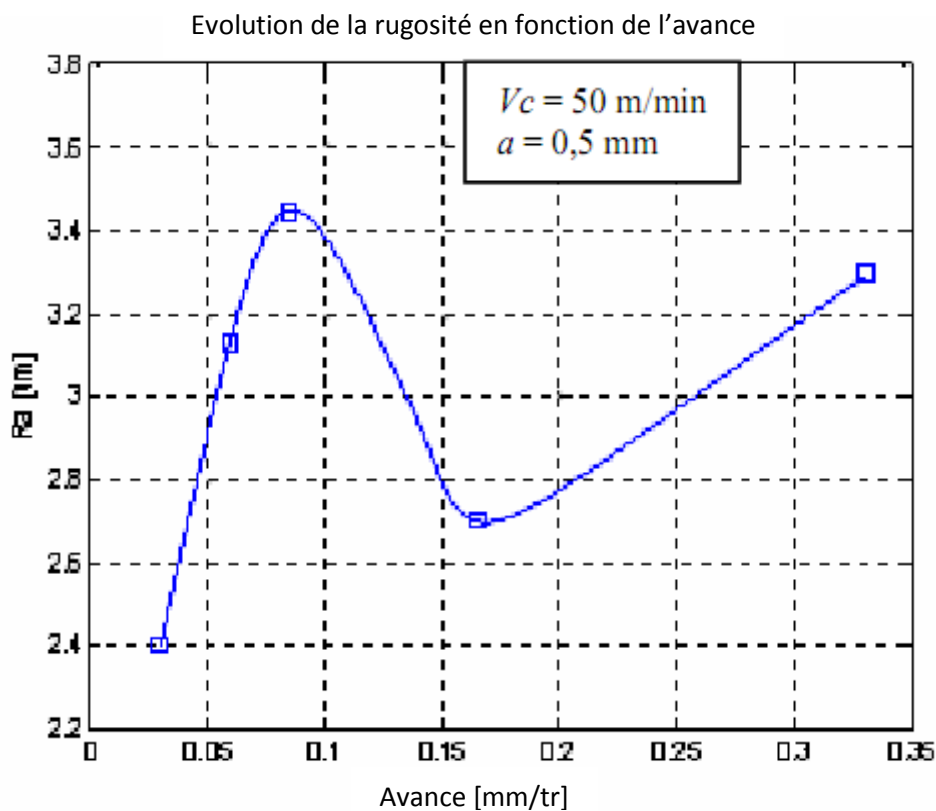


Figure II.12 : Variation de la rugosité avec l'avance [24].

De plus, ces auteurs ont effectué des observations micrographiques des couches superficielles des pièces usinées et ceci pour mettre en évidence l'existence de l'arête

rapportée. Cette évidence est supportée par la présence de débris de cette arête sur la surface usinée comme il est illustré dans la figure II.13.

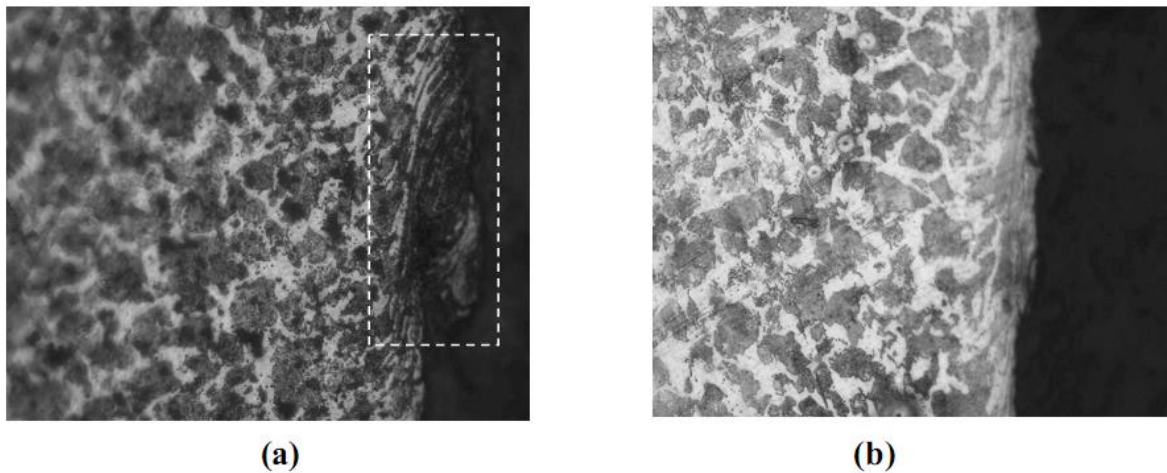
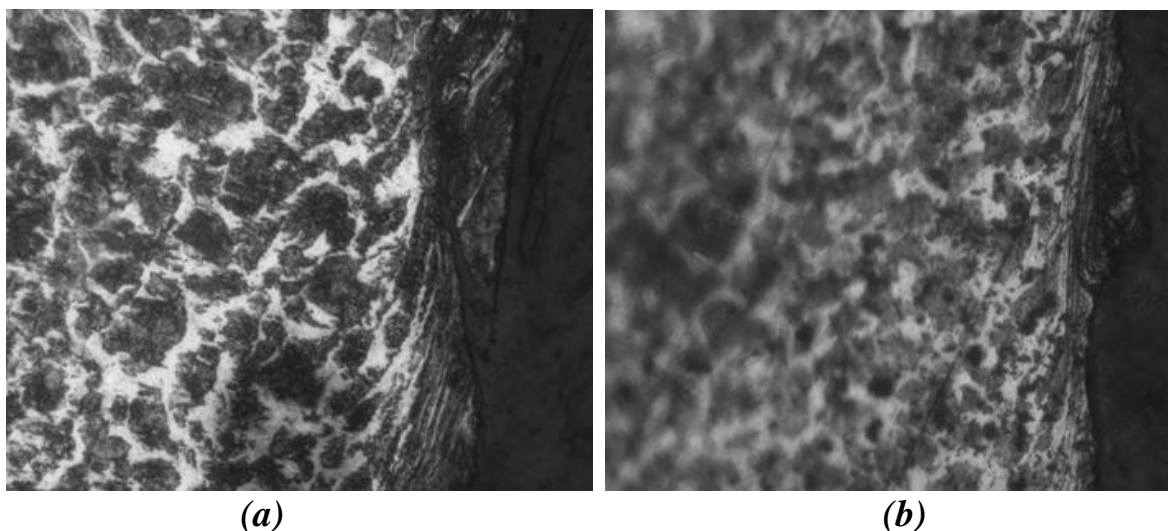


Figure II.13 : Micrographie des couches superficielles des pièces usinées avec $f = 0.085\text{mm/tr}$, $a = 0.5\text{ mm}$ et $V_c = 28\text{ m/min}$ (a) et $V_c = 50\text{ m/min}$ (b) [24]. X500

D'après les résultats obtenus, la valeur maximale de la rugosité correspond à $V_c=15\text{m/min}$, qui est une valeur autour de laquelle se situe l'arête rapportée maximale. Ils ont montré en outre que l'arête rapportée, malgré de taille réduite, était encore présente à une vitesse de coupe de 28m/min (figure II.13 (a)). Au delà d'une vitesse de 50 m/min , l'absence d'arête rapportée (figure II.13(b)) maintient R_a à des valeurs plus réduites. La rugosité est désormais constituée seulement de traces laissées par le profil géométrique de l'outil, ou par son profil déformé durant l'usinage, et d'ondulations d'origine vibratoire. La figure II.14 montre les différentes micrographies des couches superficielles des pièces usinées avec les différentes vitesses.



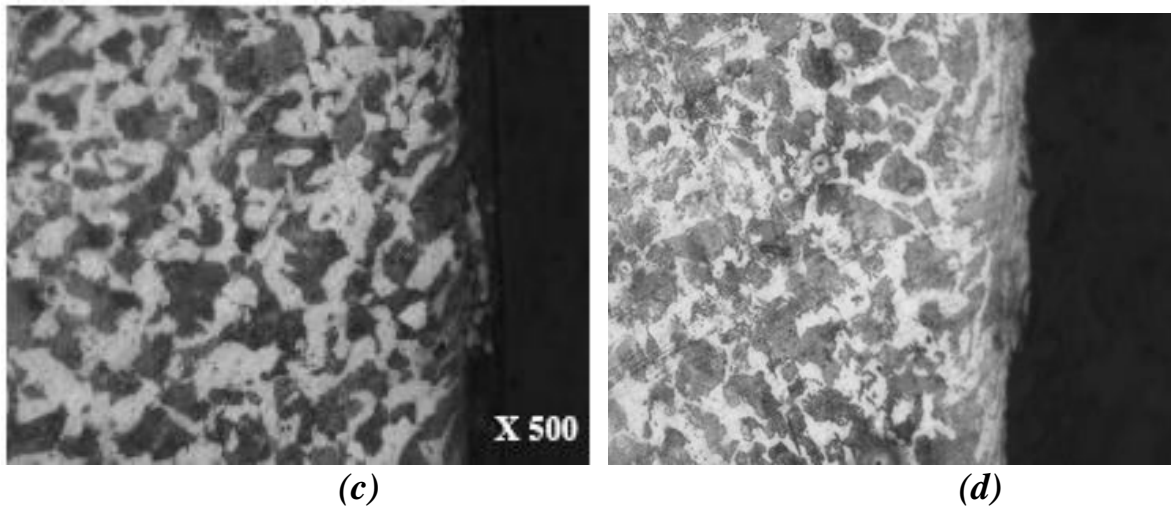


Figure II.14 : Micrographie des couches superficielles des pièces usinées avec les vitesses : $V_c = 3,5$ m/min (a), $V_c = 7$ m/min (b), $V_c = 28$ m/min (c), $V_c = 50$ m/min (d). $f = 0,085$ mm/tr $a = 0,5$ mm et $r = 0,8$ mm [24].

Les résultats obtenus mettent aussi en évidence un rôle important de l'état de surface sur la résistance et la limite de fatigue de l'acier XC48. Cette influence est néanmoins sans tendance bien définie et à caractère variable. Cette variabilité a été expliquée par la présence de l'arête rapportée et à son caractère instable et qui a une forte influence sur la rugosité de surface. En outre, les résultats ne sont pas en accord avec l'hypothèse prédisant une meilleure résistance à la fatigue des pièces ayant des surfaces moins rugueuses.

Ceci a mené à suggérer que le paramètre de rugosité seul ne peut expliquer le comportement en fatigue des pièces usinées et il demeure plus correct de considérer simultanément d'autres paramètres de l'intégrité de surface.

Coudert et al [25] ont étudié l'impact de l'usinage sur un matériau multiphasé. L'objectif était d'observer expérimentalement et de prédire par simulation numérique l'impact de différentes conditions d'usinage sur les propriétés de la surface usinée au niveau microstructural (proportion des phases, composition des phases, orientation cristalline, ...), mécanique (dureté, contraintes résiduelles, densité de dislocations) et de résistance à la corrosion.

Ils ont appliqué la technique de la diffraction des rayons X, qui permet de mesurer les contraintes résiduelles dans chaque phase. Aussi ils ont utilisé la technique EBSD pour acquérir des informations complémentaires et indispensables pour mettre en évidence la

recristallisation et le changement de phase éventuels. Avec des coupes à différentes profondeurs, l'EBSID permettra, après une préparation spécifique de la surface, d'acquérir des informations concernant l'état mécanique et microstructural des échantillons usinés.

Après les différents essais, une méthodologie expérimentale d'étude du matériau a été suivie par ces auteurs visant à mettre en évidence les phénomènes pouvant avoir lieu pendant l'usinage. Des variations de proportions de phases liées à la transformation martensitique ainsi que de nouveaux grains de taille plus petite sont à priori attendus pour cet acier inoxydable martensitique une fois usiné. Les techniques EBSID et DRX permettront d'atteindre ces informations à l'échelle micrométrique. Le MET était un complément pour atteindre l'échelle nanométrique. Une revue des méthodes de modélisation par éléments finis de l'usinage a été présentée et les essais venant nourrir le modèle qui a été proposés. La démarche de simulation des propriétés mécaniques et microstructurales de la surface usinée de ce matériau multiphasé est donc réalisable et pourra être confrontée aux résultats expérimentaux [25].

Ribeiro et al [26] s'intéressèrent à l'optimisation du tournage du TA6V. Ils utilisèrent un outil en carbure non revêtu. Ils observent notamment que la rugosité de la surface est influencée par la vitesse de coupe, et elle diminue lorsque la vitesse de coupe augmente. Par exemple, la rugosité la moins critique est obtenue pour une vitesse de coupe de 90 m/min (figure II.19). Cette figure présente la rugosité de la surface usinée en fonction de la longueur de coupe L_c (en m), qui témoigne de l'usure de l'outil. En revanche pour une vitesse de coupe de 110 m/min la rugosité augmente de manière importante ce qui est due à une usure prématurée et rapide de l'outil [26].

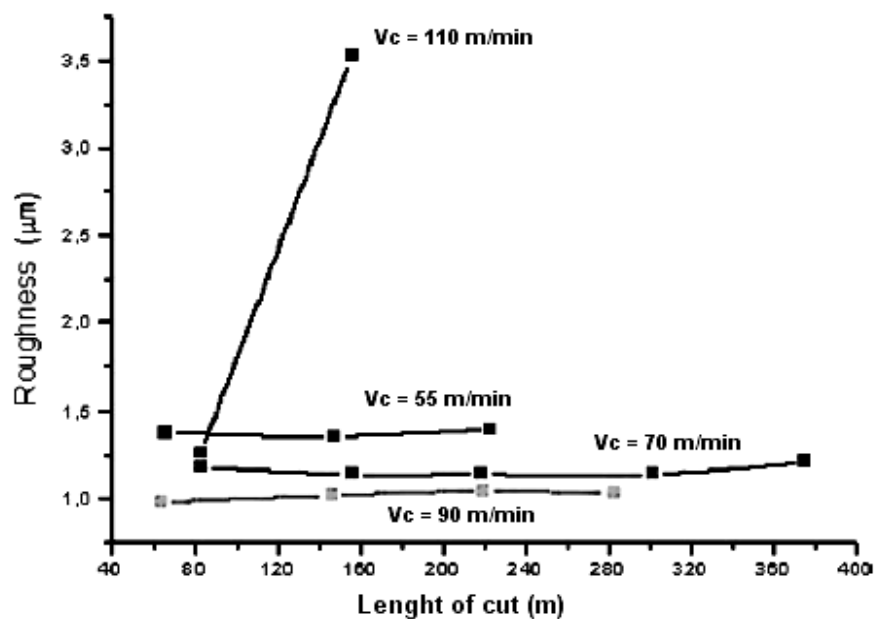


Figure II.15 : Rugosité de la surface usinée en fonction de la vitesse de coupe [26].

Gunnberg et al [27] ont étudié la relation entre les paramètres de coupe (vitesse de coupe, profondeur de passe, avance, géométrie de l'outil) et état de surface (en termes de contraintes résiduelles et rugosité) dans le cas du tournage dur de l'acier 18MnCr5. Plusieurs sous-modèles ont été créés pour représenter trois zones de profondeur différentes : à la surface (de 0 à 10 μm) ; en sous-couche (de 10 à 50 μm) ; à coeur (de 50 à 130 μm), afin d'analyser l'impact de ces paramètres aux différentes profondeurs. Dans ces conditions, il est possible de prédire le champ de contraintes résiduelles jusqu'à une profondeur de 50 μm . Selon eux le tournage dur ne semble pas affecter le champ de contraintes résiduelles au-delà de 70 μm de profondeur.

- Des vitesses de coupe élevées augmentent la température de coupe (due à la plus grande chaleur générée), causant des contraintes résiduelles de traction à la surface. Etant donné que le copeau évacue une grande partie de cette chaleur, les hautes températures ne pénètrent pas la pièce en profondeur et n'affecte donc pas le champ de contraintes résiduelles en-dessous de la surface.
- Le niveau des contraintes résiduelles de compression sous la surface augmente avec l'avance. En effet, les avances élevées génèrent des efforts de coupe et une déformation plastique plus importants. La profondeur de passe ne semble pas affecter le champ des contraintes résiduelles.

Ezugwu et Tang [28] étudièrent l'effet de l'usure de l'outil sur la microdureté lors du tournage de IN-718. Ils observent que lorsque l'usure de l'outil augmente, la dureté augmente. Ils l'expliquent par un processus de durcissement du matériau au niveau de la surface due à une déformation plastique importante (allongement des grains) et à l'augmentation des contraintes de compression. Ezugwu et Okeke montrèrent aussi que l'augmentation de l'avance et de la profondeur de passe entraîne une augmentation de la microdureté du matériau en surface et en sous-surface, ainsi que la profondeur de la zone écrouie [29].

Ginting et Nouari s'intéressèrent à l'état de surface engendré par le fraisage sans lubrification de l'alliage de titane Ti-6242S en utilisant un outil non revêtu et revêtu par CVD multicouches [30]. Les conditions de coupe qu'ils ont varié sont la vitesse de coupe (de 100 à 125 m/min), l'avance f (de 0,15 à 0,20 mm/tr), et la profondeur de passe axiale a_p (de 1,5 à 2,5 mm). La profondeur de passe radiale a_r est fixée à 8.8 mm. La microstructure observée (Fig. II.16) se trouve être altérée jusqu'à une profondeur de 350 μm au-dessous de la surface usinée. La zone affectée peut être divisée en trois régions. La première allant jusqu'à 50 μm

peut être appelée la sous-couche tendre avec des valeurs de microdureté de 8% inférieures à celles du brut. La seconde allant jusqu'à $200\ \mu\text{m}$ peut être appelée la sous-couche dure avec des valeurs de microdureté de 8% supérieures à celles du brut. Enfin dans la dernière région, allant jusqu'à $350\ \mu\text{m}$, la microdureté décroît jusqu'à atteindre celle du brut. La microstructure immédiatement sous la surface usinée et jusqu'à plusieurs microns en sous-couche connaît une déformation plastique. Cela est dû à une haute pression de coupe et à des températures de coupe élevées. Deux phénomènes s'opposent : l'écroutissage dû aux efforts de coupe importants et l'adoucissement thermique dû à des températures très élevées. Les efforts de coupe appliqués par l'outil sur la première région dite tendre incite la microstructure et les grains à suivre la direction de la vitesse d'avance et qui a été aussi observé par Velasquez [31]. Dans cette zone, le phénomène d'adoucissement thermique semble domine le phénomène d'écroutissage (et inversement pour la zone dite dure).

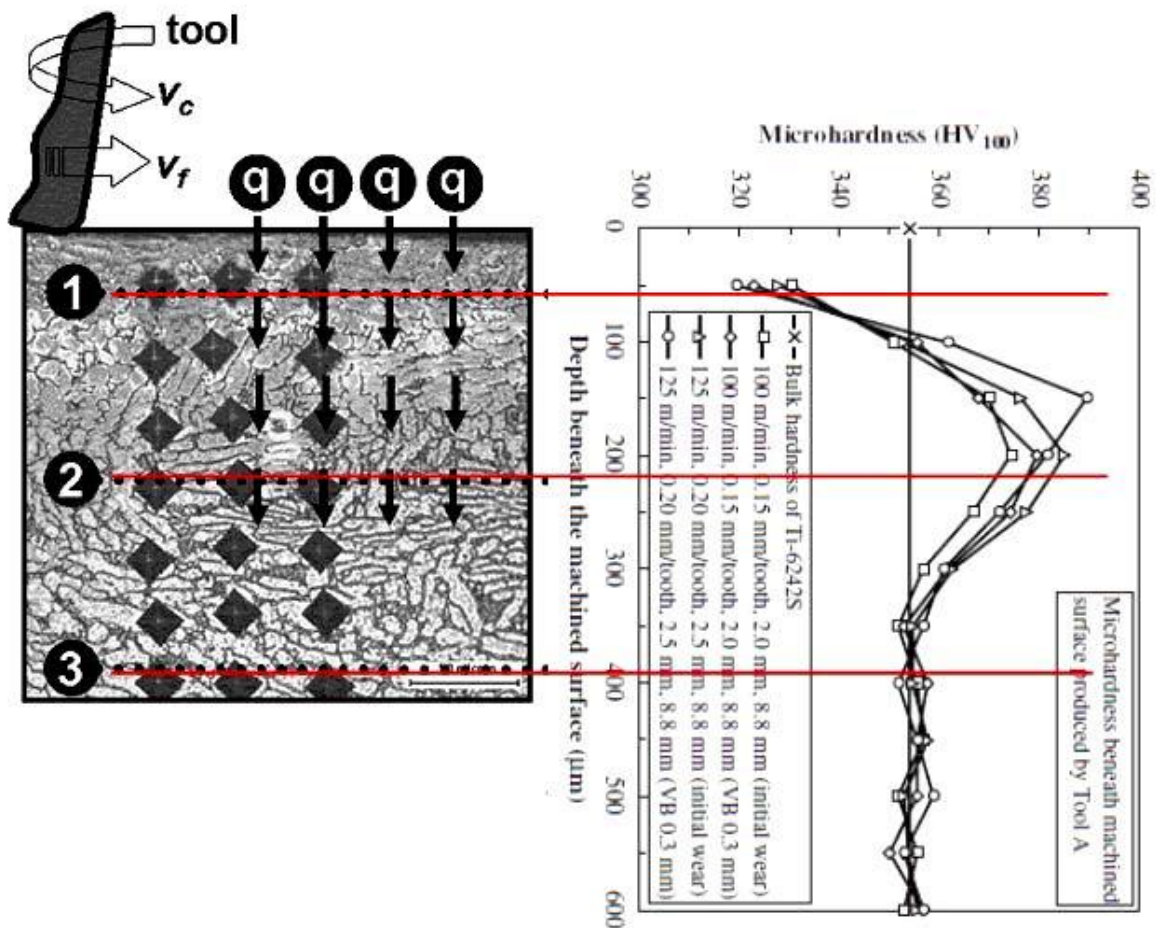


Figure II.16 : Microdureté de la sous-couche avec un outil non revêtu, 1) région tendre, 2) région dure, 3) région brute, [30].

Che-Haron et Jawaid [32] présentent une étude sur l'état de surface d'un alliage de titane Ti6Al4V après une opération d'ébauche en tournage avec deux types d'outil en carbure non revêtu. Les expériences ont été réalisées sans lubrification et en faisant varier la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe. Globalement, ils observent que la rugosité diminue lorsque la vitesse de coupe augmente. L'outil en fin de vie augmente aussi la rugosité de manière significative. L'usinage a entraîné la formation d'une couche blanche située juste sous la surface usinée dont l'épaisseur est inférieure à $10\ \mu\text{m}$ (Fi II.17). Selon eux, la couche blanche est due à l'usinage à sec. Ibrahim et al [33] observent aussi une couche blanche lors du tournage à sec du Ti6Al4V ELI. A l'inverse, Velasquez lors du tournage grande vitesse du Ti6Al4V à sec, n'observe pas de formation de couche blanche [31]. Selon lui, la préparation des échantillons pour des observations microscopiques peut entraîner l'apparition d'artefacts susceptibles de créer une confusion avec les couches blanches.

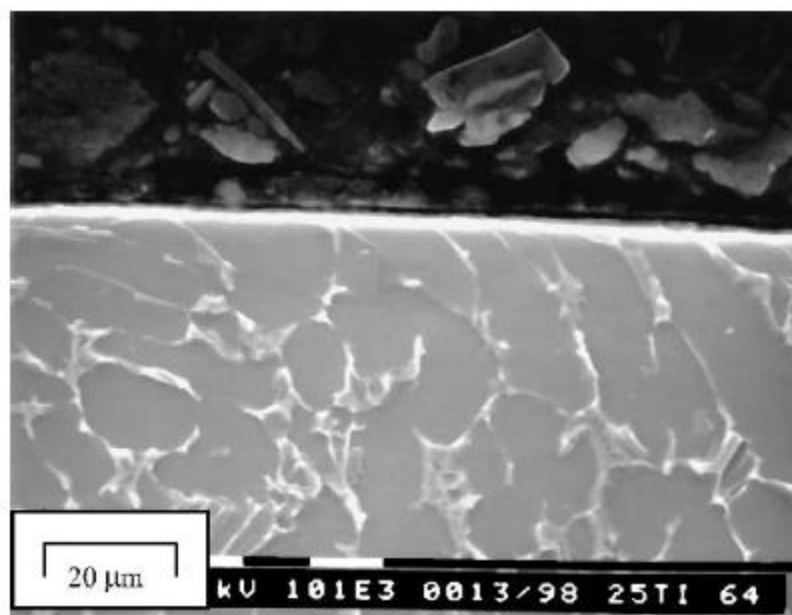


Figure II.17 : Microstructure de la surface usinée après 10s d'usinage, $V_c = 100\ \text{m/min}$, outil 883 [32].

Concernant la couche affectée, Li [34] interprète cette formation par la transformation de phase dynamique et justifie l'apparition des microstructures fines par la déformation et la vitesse de déformation très élevée en usinage. De même, Duan [35] Observèrent des phénomènes de recristallisation dynamique après une analyse fine des microstructures obtenues en surface et dans le copeau lors du tournage de l'acier AISI1045.

A l'inverse, Han [36] et sur le même acier considère que la couche modifiée de surface est due à une austénitisation. Néanmoins, Han explique que la température de début de transformation n'est pas atteinte lors de l'usinage de cet acier aux propriétés mécaniques faibles et explique que la déformation plastique sévère doit alors jouer un rôle important. Chou [40] considèrent pour sa part une transformation purement thermique (chauffage rapide, formation d'austénite et trempe) pour expliquer la microstructure de surface. Dans ce cas, la couche blanche décrite comme une martensite non-revenue est accompagnée par une couche sombre (zone de recuit). De même lors d'une opération de rectification haute productivité, Brosse [37] distinguèrent une couche blanche d'épaisseur supérieure à 100 μm . Cette couche est accompagnée d'une couche sombre en profondeur. Par conséquent la transformation austénitique justifie ces changements.

Ramesh [38] mélangèrent les deux aspects (mécanique et thermique). Ramesh présente les couches de surface formées lors du tournage dur de l'acier AISI 52100 (62 HRC). A partir des images au microscope électronique à transmission (figure II.18), Ramesh conclua que les couches produites à faible vitesse de coupe sont dues au raffinement de grain lié à la déformation plastique, tandis qu'à vitesse de coupe élevée les aspects thermiques (austénitisation) sont dominants.

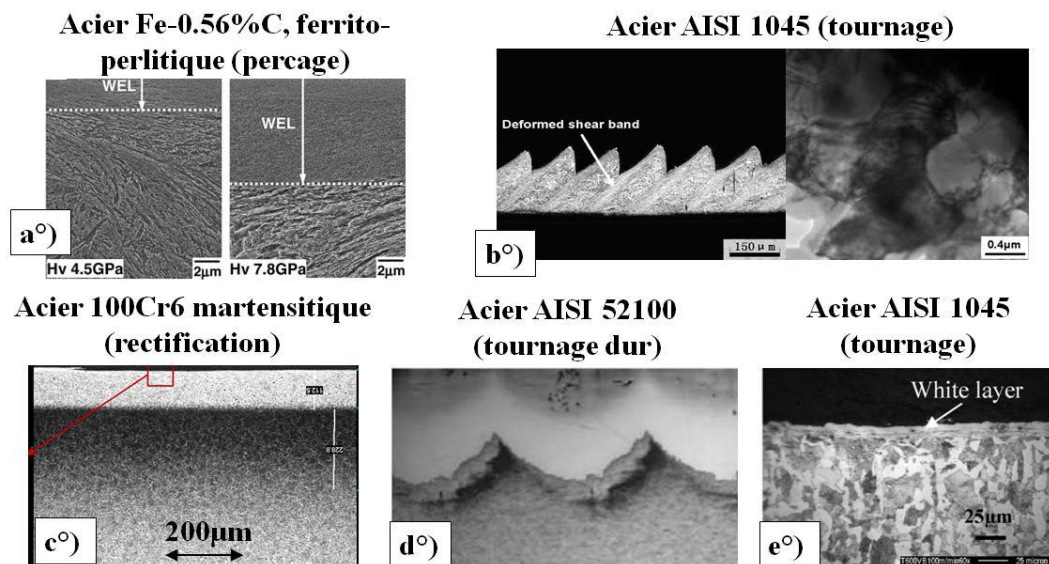


Figure II.18 : Exemple de couches de surface modifiées par l'usinage : a. [37], b. [38], c. [41], d. [40], e. [39].

II.6. Conclusion

A partir de cette revue bibliographique, nous pouvons conclure que les principales techniques de caractérisation des surfaces usinées sont les mesures de la rugosité et les observations microscopiques. Les résultats dépendent des paramètres d'usinage et du matériau usiné. Enfin, il n'y a pas eu une étude sur l'usinage de l'acier XC18.

II.7. Référence :

- [1] G.S. Sekhon, J.L. Chenot, Numerical simulation of continuous chip formation during non-steady orthogonal cutting, *Eng. Comput.* 10 (1993).
- [2] K. Maekawa, T. Shirakashi, T. Obikawa, Recent progress of computer aided simulation of chip flow and tool damage in metal machining, *Proc. Inst. Mech. Engrs* 210 (1996) 233-242
- [3] G. Poulachon, A. Moisan, I.S. Jawahir, On modeling the influence of thermo-mechanical behavior in chip formation during hard turning of 100Cr6 bearing steel, *CIRP Annals - Manuf. Tech.* 50 (2001) 1 31-36.
- [4] W.S. Lin, B.Y. Lee, C.L. Wu, Modeling the surface roughness and cutting force for turning, *J. Mater. Proc. Tech.* 108 (2001) 286-293.
- [5] G. Beranger, G. Henry, G. Sanz, " *Livre de l'acier*", Ed Sollac, 1996.
- [6] A. Roos, B. Milet, " *Précis de métallurgie Appliquée*", Edition Technique et Documentation- Lavoisier (1982).
- [7] J.Paul bailon, J. Marie Dorlot. « *Des Matériaux* », 3^{eme} edition 2000-2001.
- [8] P. S. Sreejith, " Machining of 6061 aluminium alloy with MQL, dry and flooded lubricant conditions" *Materials Letters*, vol. 62, no. 2, pp. 276-278, 2008.
- [9] K. Weinert, I. Inasaki, J. W. Sutherland, et T. Wakabayashi, " Dry machining and minimum quantity lubrication", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, vol. 53, no. 2, pp. 511-537,2004.
- [11] E. M. Trent, " Metal cutting and tribology of seizure: III. Temperatures in metal cutting, " *Wear*, vol. 128, no. 1, pp. 65-81, 1988.
- [12] N. A. Abukhshim, P. T. Mativenga, et M. A. Sheikh, " Heat generation and temperature prediction in metal cutting : A review and implications for high speed machining" *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 7-8, pp. 782-800, 2006.
- [13] I. Lazoglu et Y. Altintas, "Prediction of tool and chip temperature in continuous and interrupted machining". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol.42, no.9, pp. 1011-1022, 2002.
- [14] X. L. Liu, D. H. Wen, Z. J. Li, Xiao, et F. G. Yan, " Cutting temperature and tool wear of hard tuning hardened bearing steel, " *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 129, no. 1-3, pp. 200-206, 2002.

- [15] I Korkut, M. Boy, I. Karacan, et U. Seker, " Investigation of chip-back temperature during machining depending on cutting parameters, " *Materials and Design*, vol. 28, no. 8, pp. 2329-2335, 2007.
- [16] R. Komanduri. Machining and grinding — a historical review of classical papers. *Applied Mechanics Reviews* 46. 1993, 80-132.
- [17] M. Bacci da Silva, J. Wallbank. Cutting temperature: prediction and measurement methods - a review. *Journal of Materials Processing Technology* 88. 1999. 195-202.
- [18] M. Field, and Zlatin (1972). Procedures and precautions in machining titanium alloys, pages 489–504.
- [19] Y. Matsumoto, F. Hashimoto, and G. Lahoti, (1999). Surface integrity generated by precision hard turning. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 48(1) : 59–62.
- [20] H. P. Lieurade, and J. F. Flavenot. (2003). Role de l'usinage sur la tenue en fatigue des composants mécaniques. 22 ème journées de printemps - fatigue et procédés de fabrication. S. F. D. M. E. Matériaux. Cetim.
- [21] S. Bissey-Breton, J. Gravier, V. Vignal, 2011. Impact of superfinish turning on surface integrity of pure. *Procedia Engineering*, Volume 19, pp. 28 - 33.
- [22] F. Koné, C. Czarnota, B. Haddag, M. Nouari. Etude expérimentale et numérique de l'usinage d'un acier à haute résistance avec une plaquette de coupe revêtue, Laboratoire d'énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée, LEMTA CNRS-UMR 7563, Ecole des Mines de Nancy (ENSMN), Ecoles des Mines d'Albi-Carmaux (EMAC), GIP-InSIC, 27 rue d'Hellieule, 88100 Saint-die-des-Vosges (France).
- [23] Kumar K. V. B. S. K., Choudhury S. K., Investigation of tool wear and cutting force in cryogenic machining using design of experiments, 203, 95 – 101, 2008.
- [24] M. Gaceb, S. Brahimi, Etude de l'influence de l'état de surface sur la tenue à la fatigue d'un acier XC48. Laboratoire de Fiabilité des Equipements Pétroliers et matériaux, université M'Hamed Bougara de Boumerdes, algeria.
- [25] J-B . Coudert, V. Vignal, b, S. Bissey-Breton, R. Besnard, l'impact de l'usinage sur un matériau multiphasé. a. CEA, DAM, Valduc, 21120 Is-sur-Tille, France, b. ICB, UMR 5209 CNRS-Université Bourgogne, BP 47870, 21078 Dijon Cedex, France.
- [26] Ribeiro, M.V. , Moreira, M.R .V ., and Ferreira, J .R.(2003). Optimization of titanium alloy(6Al-4V) machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 143-144:458– 463.
- [27] F. Gunnberg, M. Escursell, and M. Jacobso. (2006). The influence of cutting parameters on residual stresses and surface topography during hard turning of 18MnCr5 case carburised steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 174(1-3) :82–90.

- [28] E. O Ezugwu, and S. H Tang, (1995). Surface abuse when machining cast iron (g-17) and nickel-base superalloy (inconel 718) with ceramic tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 55(2) :63–69.
- [29] E.O. Ezugwu, and C.I. Okeke, (2001). Tool life and wear mechanisms of TiN coated tools in anintermit tent cutting operation. *Journal of Materials Processing Technology*, 116 (1):10–15.
- [30] A. Ginting, and M. Nouari, (2009). Surface integrity of dry machined titanium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(3-4) :325–332.
- [31] J. D. P.Velasquez, (2007). Etude des copeaux et de l'intégrité de surface en usinage à grande vitesse de l'alliage de titane Ti6Al4V. PhD thesis, Université Paul Verlaine, Metz.
- [32] C. Che-Haron, and A. Jawaid, (2005). The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 166(2):188–192.
- [33] G. Ibrahim, C.C. Haron, and J. Ghani. The effect of dry machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6Al-4V. *Journal of Applied Sciences*, 9:121–127 (2009).
- [41] Brosse, A., Hamdi, H., and Bergheau, J.M. (2009). A numerical study of Phase transformation during grinding. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 4(2-3):148–157.

Chapitre III

Matériaux et techniques de caractérisation

III.1. Matériau étudié

III.1.1. Présentation de l'acier XC18

Le matériau utilisé dans ce travail de recherche est un acier doux, faiblement allié au carbone et il est destiné à la fabrication des pièces dans plusieurs domaines. La référence de ce matériau est C22 (XC18). Le tableau 3.1 présente les désignations de l'acier XC18 dans les différentes normes [1].

AFNOR	DIN	AISI	NF EN 10027-1
XC 18	Ck 22		C22 (1.1151)

Tableau 3.1 : Désignation de l'acier XC18.

Le tableau 3.2 rassemble la composition chimique de l'acier XC18.

C	S	Mn	P	Si
0,16-0,22	≤ 0,035	0,40-0,70	≤ 0,035	0,15-0,35

Tableau 3.2 : Composition chimique en % massique de l'acier XC18 [1].

III.1.2. Propriétés de l'acier XC18

C'est un acier de construction non allié pour trempe et revenu. Il est aussi considéré comme un acier doux de cémentation pour pièces non soumises aux chocs, mais nécessitant une bonne résistance superficielle. Il est utilisé également pour le traitement dans la masse. C'est un acier facile à usiner par tournage.

III.1.3. Domaines d'application

Pièces travaillant sans chocs : axes de pistons, arbres de pompes, pieds de bielles, arbres à cames. Après trempe directe et revenu il est utilisé comme dans les : boulonnerie, visserie, tringles de commandes, leviers, manettes, douilles et autres.

Le type d'opération utilisé dans notre étude est le chariotage. Ce type d'usinage consiste à usiner une surface cylindrique extérieure (Fig III.2) [10].



Figure III.2 : Chariotage.

L'usinage a été réalisé à l'aide d'un tour de type KNUTH model : sh 150/915 super. (Fig. III.3) qui se trouve dans le hall de technologie de l'université de Biskra.



Figure III. 3: Tour type KNUTH model: sh 150/915 super.

Les pièces usinées sont de forme cylindrique de diamètre 20 mm et de longueur 50 mm (Fig. III.4).

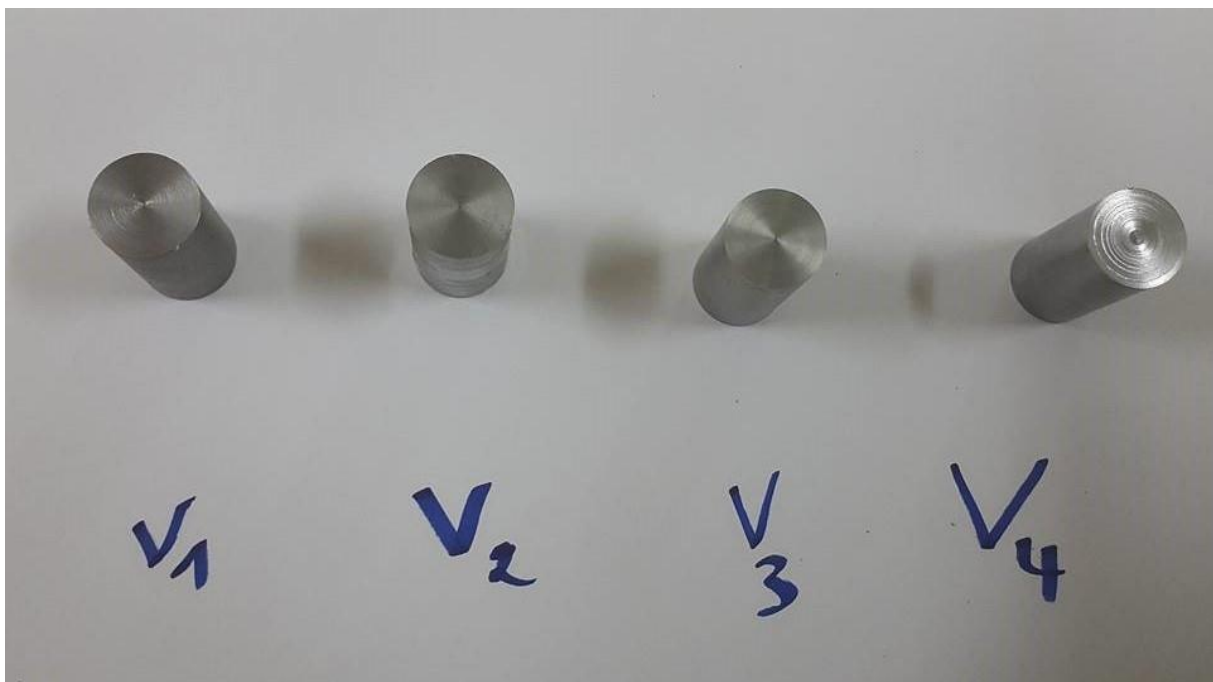


Figure III. 4: Les pièces usinées dans le tour.

Plusieurs conditions de coupe ont été considérées afin de déterminer dans un premier temps les vitesses de coupe ($V_{c \min}$) et l'avance (f_{\min}) permettant de voir l'effet d'usinage sur l'acier usiné à plusieurs vitesses de coupe. Les différentes vitesses sont représentées dans le tableau 3.4 qui rassemble les vitesses de coupes appliquées.

V_1	V_2	V_3	V_4
20 m/min	30 m/min	40 m/min	60 m/min

Tableau 3.4 : Les vitesses de coupe V_c : m/min.

On a choisi la même valeur d'avance pour toutes les opérations ($f = 0.16$ mm/tr).

D'après l'analyse macroscopique de nos copeaux obtenus après différentes vitesses de coupe figure III. 5.

On remarque bien que l'usinage appliqué a été effectué selon la norme industrielle, car la forme et la longueur des copeaux obtenus pour les grandes vitesses (V_3 et V_4) correspondent exactement aux normes connues.

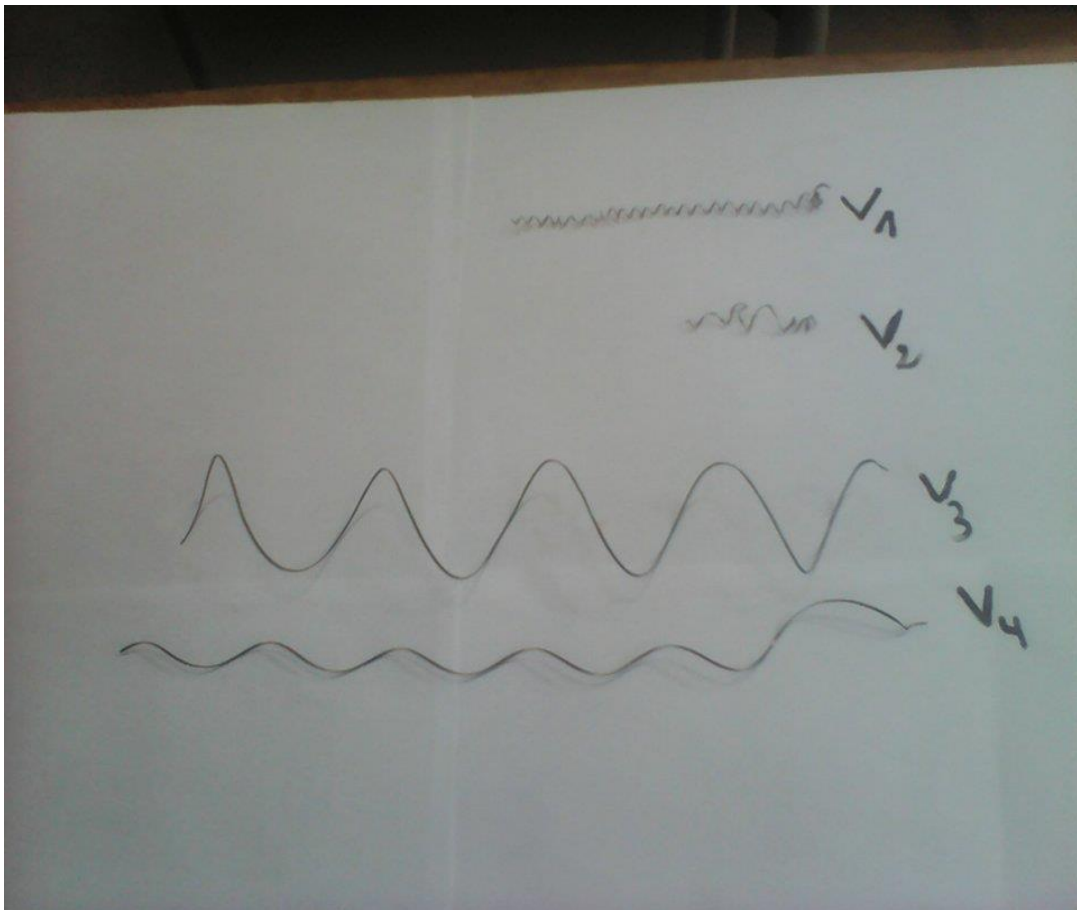


Figure III. 5 : Copeaux obtenus après différentes vitesses de coupe par tournage.

III.3. Techniques de caractérisations

Dans notre étude, plusieurs techniques de caractérisation ont été utilisées.

III.3.1. Microscope optique

Les observations métallographiques permettent principalement de renseigner sur l'état de la structure et la grosseur des grains au cœur de la pièce usinée et surtout dans la zone proche de la surface usinée. Pour notre étude, ces observations sont réalisées à l'aide d'un microscope optique en réflexion de type Zeiss Axiophotmuni d'objectifs x10, x20, x100, x200, x 500 et x1000, (Fig III.6). Les micrographies sont acquises et ensuite traitées par le logiciel Perfect Image version 7.3 de la société Clara Vision du la boratoire de métallurgie de l'université de Mons, Belgique.

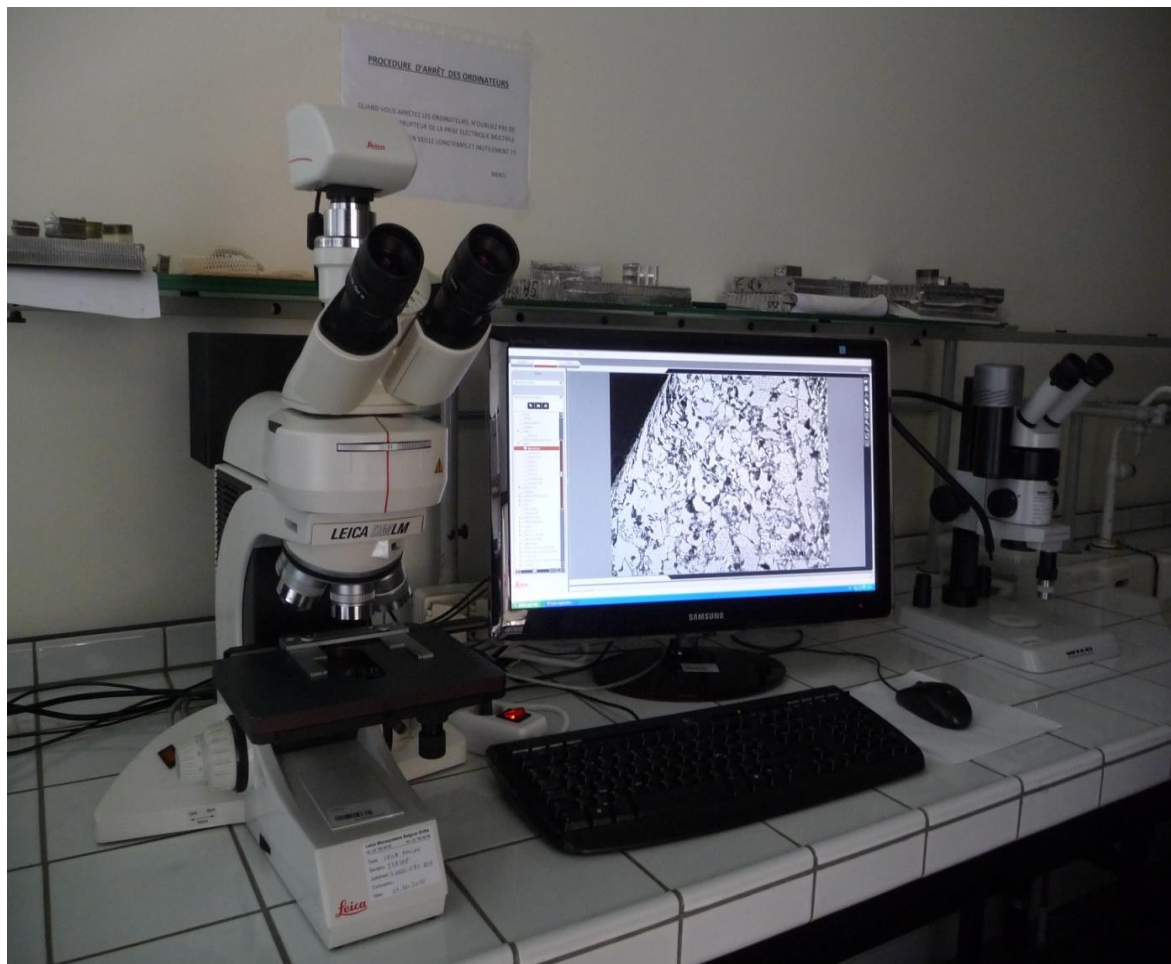


Figure III.6 : Microscope : LEICA DMLM 50x; 100x; 200x; 500x; 1000x.

III.3.2. Préparation métallographique

Dans l'intérêt de faire des observations microscopiques, nous avons utilisé les techniques habituelles de préparation métallographique des échantillons. Pour le rendre dans des états idéaux pour de meilleures observations, les échantillons subissent un polissage mécanique avec papiers abrasifs de différentes granulométries de 120 jusqu'à 1200, ensuite un polissage de finition sur tissu feutré avec l'addition de l'ubrifiant et la pâte diamantée de granulométrie 1 μm . Après chaque polissage, les échantillons sont nettoyés à l'eau distillée et séchés soigneusement.

Afin de révéler la microstructure, l'échantillon est attaqué chimiquement par un réactif approprié, Nous avons utilisé principalement le Nital à 4% comme réactif chimique (4 ml d'acide nitrique et 100 ml d'éthanol). Avec un temps d'attaque entre 4 et 15 secondes.

III.3.3. MEB (microscope électronique à balayage)

La microscopie électronique à balayage (MEB), permet d'obtenir des images de surfaces de pratiquement tous les matériaux solides, à des échelles allant de celle de la loupe (x10) à celle du microscope électronique en transmission. Elle permet d'analyser la morphologie de la surface et la composition chimique de la plupart des matériaux solides. Les images obtenues montrent relief de la surface, ainsi, une très grande profondeur de champ (plusieurs centaines de microns), et donnant des vues qualitatives des surfaces d'une grande utilité. En se limitant à l'aspect formation des images, on peut citer quelques exemples d'applications : la texture microscopique de matériaux, l'étude de l'état de surface de matériaux, l'étude de la corrosion et des réactions de surface de matériaux, l'étude et le contrôle de microcircuits électroniques, etc. La microscopie électronique à balayage (Fig III.7) est un outil particulièrement pertinent pour l'observation de l'état d'endommagement du faciès des éprouvettes affectées après usinage de part sa profondeur de champ et sa forte résolution. Dans la pratique, les MEB actuels les plus conventionnels, c'est-à-dire équipés de détecteurs d'électrons secondaires permettant d'atteindre une résolution de l'ordre de 20 nm et un grossissement qui peut aller jusqu'à 300000 fois. L'appareil que nous avons utilisé est de type JEOL 5900 avec EDX et WDX OXFORD instruments.



Figure III.7 : MEB: JEOL 5900 avec EDX et WDX OXFORD instruments.

III.3. 4. Le rugosimetre

La caractérisation de l'état de surface est évaluée par la connaissance de la rugosité de la surface des pièces usinées avec différentes vitesses. Pour cela, on a utilisé un rugosimètre de type ZEISS SURFCOM 1400D-3DF (Fig III.8).

Les éléments constitutifs d'un rugosimètre sont les suivants [4] :

- Unité de calcul.
- Unité d'avance.
- Palpeur.

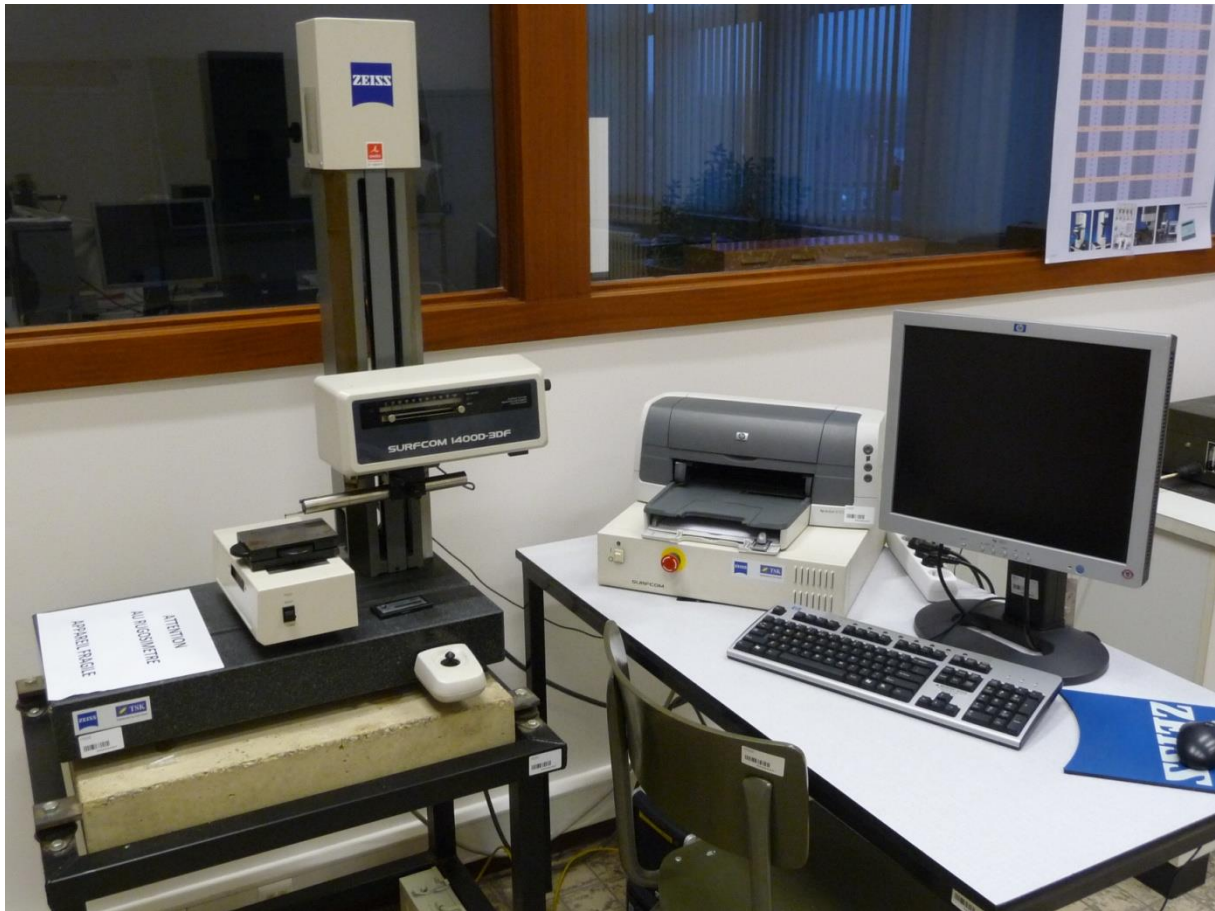


Figure III.8 : Rugosimètre : ZEISS SURFCOM 1400D-3DF.

III.3.5. La dureté

Une série des mesures de dureté ont été effectuées sur les échantillons usinés. La dureté est définie comme la résistance qui oppose un matériau à sa pénétration par un autre corps plus dur que lui. Elle est mesurée grâce à l'empreinte que laisse un pénétrateur dans un matériau sous une forme donnée. On not qu'il existe différent essais selon la forme du pénétrateur et la nature de mesure de l'empreinte (surface profondeur). La figure III.9 montre l'appareil de microdureté utilisé dans notre étude qui est de type LECO M400-A. Des mesures de dureté knoop (HKp) ont été réalisées sous une charge de 500g. La dureté à été réalisé tout au long du profil de l'échantillon. Ce profil de dureté a été mesuré dans les trois zones étudiées de ce matériau, c'est-à-dire le cœur de l'échantillon, la zone intermédiaire et la zone affecté par l'usinage comme le montre la figure III.10. Cette technique a pour but de connaître la dureté dans différentes zones de chaque échantillon usiné par une vitesse choisie.

Définition Knoop :

Frederick Knoop : Scientifique américain, initiateur de la méthode de mesure de la dureté Knoop. L'essai a été conçu en 1939 par F. Knoop et ses collègues au Bureau National des Standards des États-Unis (aujourd'hui NIST).

Dureté Knoop :

Indicateur de dureté effectué par la mesure de l'empreinte laissée par la pénétration d'une pointe en diamant appliquée avec une force déterminée. Ce test de dureté est semblable à celui de la dureté Rockwell. L'essai de Knoop permet la mesure de dureté des matériaux fragiles comme le verre et la céramique.

Le pénétrateur en diamant est de forme pyramidale dissymétrique à base rectangulaire avec un angle de $172^{\circ}30'$ entre deux faces opposées et 130° pour les deux autres faces figure III.9. Les charges appliquées sont inférieures à 1 kgf. La taille de l'empreinte est comprise entre 0,01 et 0,1mm ($L = 7l$ et $H = L/30$).

Si on mesure la longueur de l'empreinte à l'aide d'un microscope, la dureté de Knoop (HK) est donnée par la formule suivante [7]:

$$HK = 14229 \frac{F}{D^2}$$

F : charge appliquée en kilogramme-force

en unités

D: diagonale de l'empreinte en millimètres

$$SI \text{ HK}_{GPA} = 139,54 (F_N / D_m^2)$$

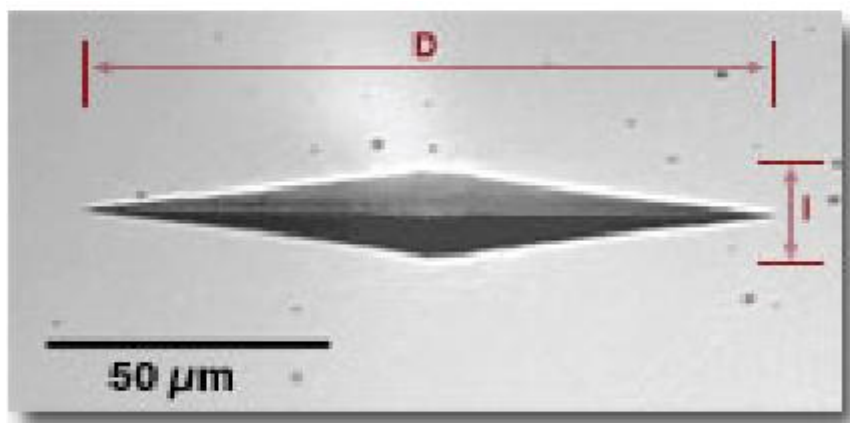


Figure III.9 : Empreinte de pénétrateur [7].

Le test de dureté Knoop a été adopté en 1969 et référencé comme test de micro-dureté par indentation des matériaux au sein de la méthode ASTM E384.

Les méthodes ASTM C1326 et D1474 décrivent respectivement l'application de la dureté Knoop aux céramiques et aux revêtements organiques.

Les normes d'essai Knoop sont actuellement référencées ISO 4545-1(2, 3, et 4) :2005 dans le cas de matériaux métalliques.

La mesure de dureté peut se faire également en ne mesurant que la longueur (ISO 6441-1 :1999) ou la profondeur de l'indentation (ISO 6441-2 :1999). Ces normes ont été supprimées en 2005 [8].

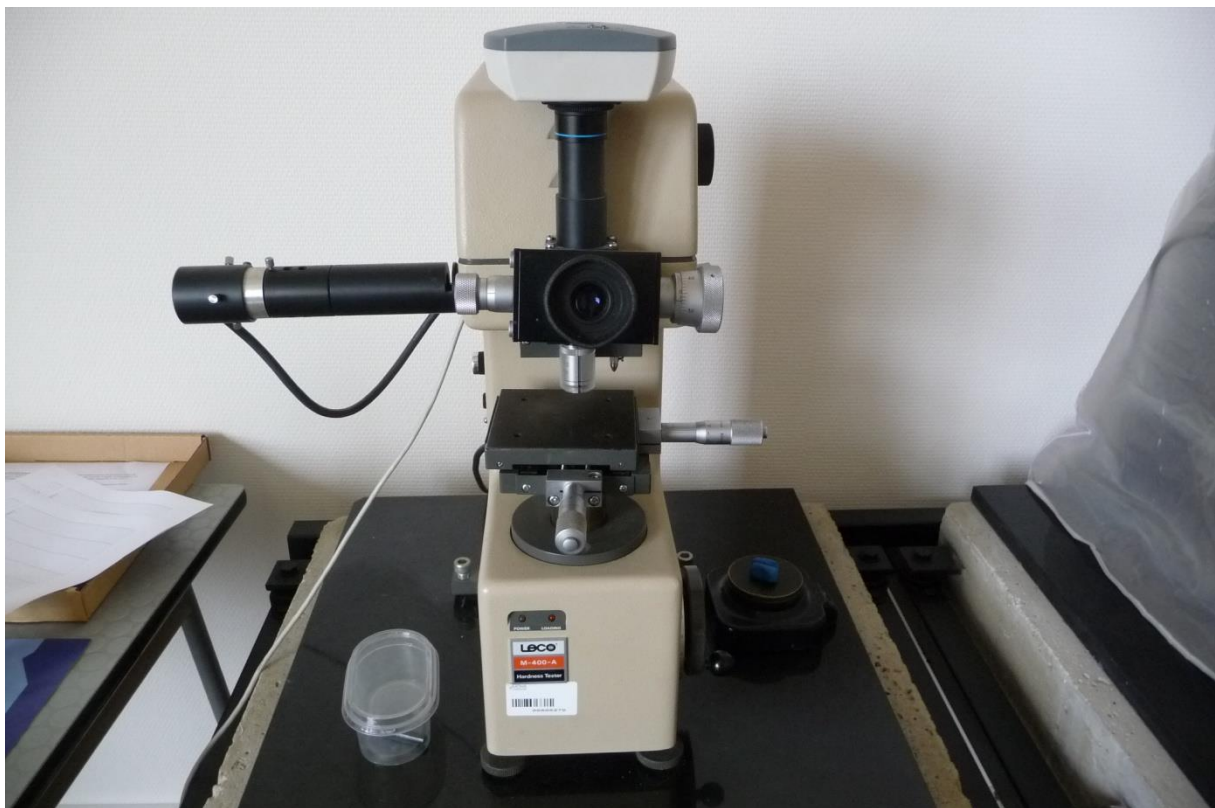


Figure III.10 : Microduromètre : LECO M-400-A ; Charges de travail de 5g à 1kg.

III.3.6. Les mesures par diffraction des rayons X

La diffraction des rayons X permet l'étude cristallographique des matériaux et aussi la mesure des contraintes résiduelles formées dans un matériau métallique. La caractérisation par DRX a été réalisée au sein du Laboratoire (FPMS) en Belgique, en utilisant un diffractomètre SIEMENS D500 (Fig III.12).

Le diffractogramme X est la représentation graphique de l'intensité du rayonnement mesurée par le détecteur en fonction de l'angle de déviation 2θ lors d'un balayage angulaire θ - θ . Dans la configuration présentée (Bragg – Brentano), l'égalité imposée des angles d'incidence (θ) et de mesure (θ) fait que seule les plans (hkl) parallèles à la surface irradiée peuvent diffracter. On a voulu voir par cette technique, les contraintes résiduelles qui sont formées par l'effet d'usinage de l'acier XC18 après différentes vitesses de tournage.

La définition des contraintes résiduelles est donnée par [5] comme étant les contraintes qui subsistent dans les pièces mécaniques et qui ne sont soumises à aucun effort extérieur. Ces contraintes sont en équilibre sur l'ensemble du volume que constitue un composant ou une structure mécanique. Les origines des contraintes résiduelles peuvent être de trois types : mécanique, métallurgique et thermique.

La figure III.11 montre les propriétés des matériaux qui sont influencées par les contraintes résiduelles. Généralement es traitements thermiques (trempe), mécaniques (usinage, granailage...) et thermo chimiques (cémentation, nitruration) sont réalisés afin de modifier les contraintes résiduelles initialement existantes dans un matériau ou dans une structure, et par conséquent, ils modifient donc l'ensemble des propriétés.

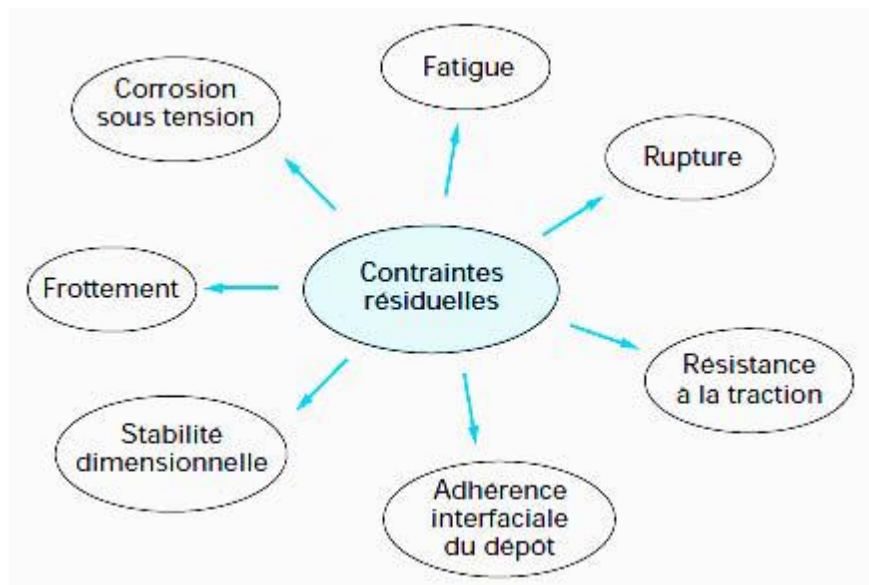


Figure III.11 : Influence des contraintes résiduelles sur les performances des matériaux [6].



Figure III.12 : Diffractomètre de rayons X / SIEMENS D-5000 0-20.

III.4. Références :

- [1] MDS : Métaux Détail Service, www.metaux-detail.com.
- [2] A. Passeron, «Tournage», Techniques de L'Ingénieur, BM7086, 1997.
- [4] F. Mothe. Essais d'utilisation d'un rugosimètre à palpeur pour qualifier des surfaces de bois. annales des sciences forestières, 1987,44(4), pp. 473-488. <hal-00882429>.
- [5] J. Lu, (2006a). Traitements de surface mécaniques-principes. Techniques de l'ingénieur, M1190.
- [6] J Lu, (2006b). Traitements de surface mécaniques : Effets sur les matériaux. Techniques de l'ingénieur M1191.
- [7] F. Knoop, C. G. Peters and W. B. Emerson, "Sensitive Pyramidal Diamond Tool for Indentation Measurements." J. Res. Nat. Bur. Stand., 23 [7] 39-61 (1939) - C. G. Peters and F. Knoop, "Metals in thin layers - Their microhardness" Metals and Alloys, 13, 292. (1940).
- [8] <http://www.utc.fr/~tthomass/Themes/Unites/index.html>

Chapitre IV

Résultats et Interprétations

IV.1. Introduction

L'intégrité d'une surface est un ensemble de caractéristiques permettant de qualifier une surface vis-à-vis d'une application donnée. L'intégrité d'une surface regroupe ainsi un grand nombre de spécifications en fonction des domaines:

- métallurgiques (résistance à la corrosion),
- mécaniques (supporter les chargements mécaniques, état de surface),
- thermiques (conductivité ou résistance thermique),
- tribologiques (frottement, adhésion...),
- optiques (apparence, réflexion...),
- écoulement fluides (couches limites...) [17].

Dans ce chapitre, on présente les résultats de l'étude de l'effet d'usinage par tournage sur la surface de l'acier doux XC18, où les résultats de chaque technique de caractérisation ont été présentés et interprétés.

IV.2. Caractérisation par microscope optique

Dans cette partie d'étude, l'évolution microstructurale de la surface affectée de l'acier XC18 est présentée après différentes vitesses par tournage.

IV.2.1. Etat brut

La figure IV.1 présente l'état microstructural de l'acier à l'état brut, c'est-à-dire, avant usinage. On remarque que la microstructure est composée de grains presque de même taille dans les différentes zones (cœur, proche de la surface, et le bord de l'échantillon). Les grains sont constitués par une phase ferritique avec des colonies de perlite (noir). Ces observations confirment bien la composition chimique de l'acier étudié, car la ferrite est la phase dominante et qui correspond à un acier hypoeutectoïde.

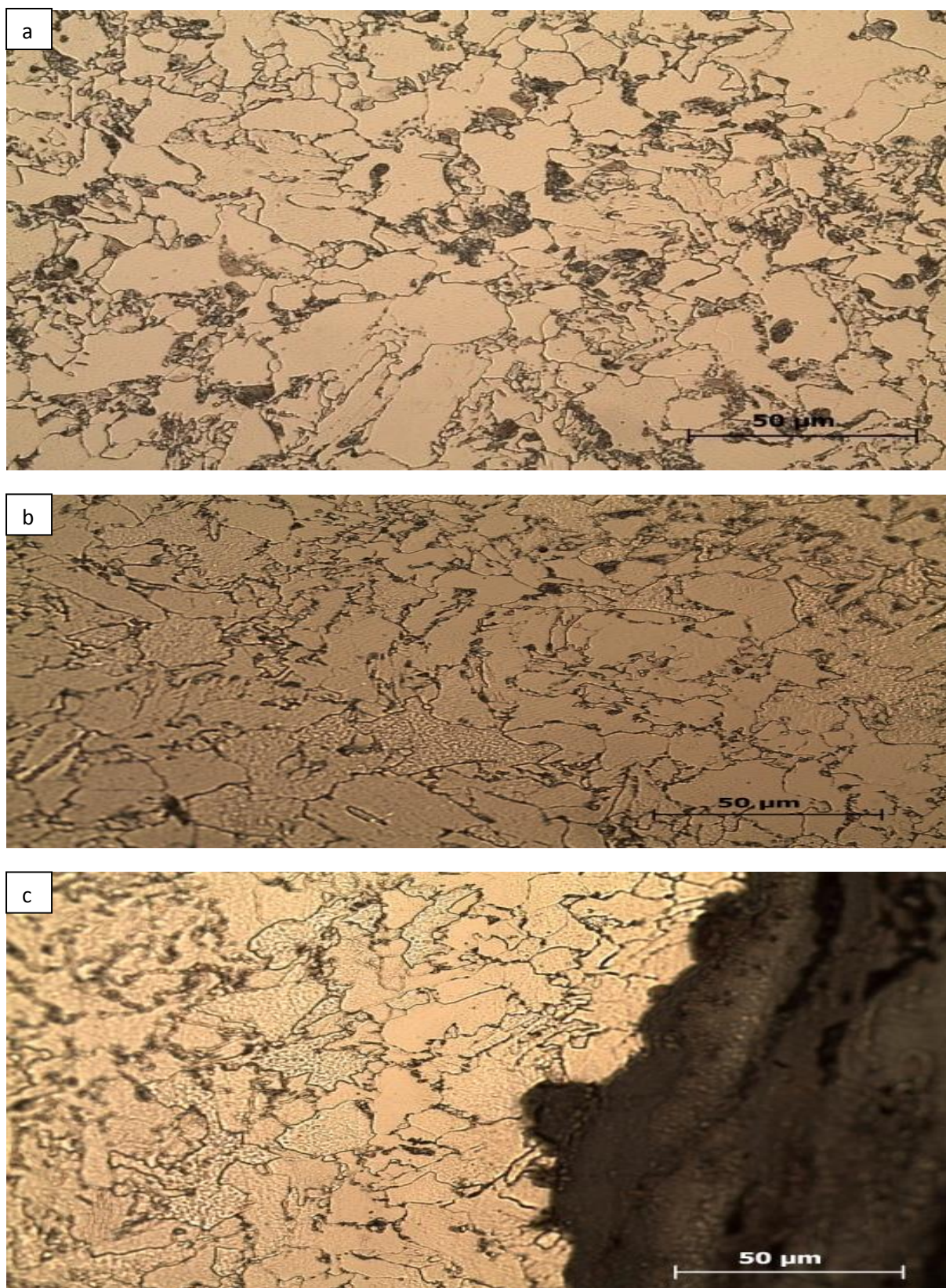


Figure IV.1 : Microstructures de l'acier à l'état brut, a) cœur de l'échantillon, b) proche de la surface ; c) bord de l'échantillon.

IV.2.2. Effet de la vitesse d'usinage sur l'évolution microstructurale de l'acier XC18 :

Les importantes quantités d'énergie mises en jeu lors de la coupe génèrent des déformations et des températures très élevées, pouvant atteindre dans certains cas les régimes thermomécaniques imposés à un matériau lors d'une trempe ou d'un essai d'impact. Ces sollicitations laissent des « traces » dans les matériaux, qui, analysées par une approche de métallurgiste, fournissent des renseignements importants sur l'histoire thermomécanique subie par le matériau lors de la coupe [4]. Il a été montré que les opérations d'usinage induisent des cycles thermiques extrêmement rapides. La durée d'un cycle de déformation, chauffe et refroidissement lors du passage de la matière usinée dans la zone de l'arête de coupe est de l'ordre 0.1 ms (pour une vitesse de coupe de 150 m/min). Durant ce laps de temps, la matière se déforme de plusieurs centaines de pourcent et subit une chauffe supérieure à 500 °C. Plusieurs études ont quantifié ces vitesses de chauffe et de refroidissement qui dépendent bien sûr de l'opération et du matériau en présence [17]. La figure IV.2 montre l'évolution microstructurale de l'acier XC18 après différentes vitesses d'usinage par tournage et dans les différentes zones de l'échantillon usinée. Ces zones sont :

- a) cœur : zone à l'intérieur de l'échantillon et qui n'est pas affectée par l'usinage.
- b) intermédiaire : zone entre le cœur et la surface (bord) de l'échantillon.
- c) bord : juste la zone au dessous de la surface usinée.

On remarque que le cœur et la zone intermédiaire de l'acier ne sont pas affectés par ce procédé d'usinage, car la microstructure n'a pas subi un changement remarquable. Par contre, le bord de l'acier est affecté par ce procédé d'usinage ou on remarque la déformation des grains, c'est-à-dire une ré-orientation des grains dans un sens préférentiel. Cette réorientation s'intensifie avec l'augmentation de la vitesse d'usinage. Comme il est présenté dans la figure IV.2.4.c.

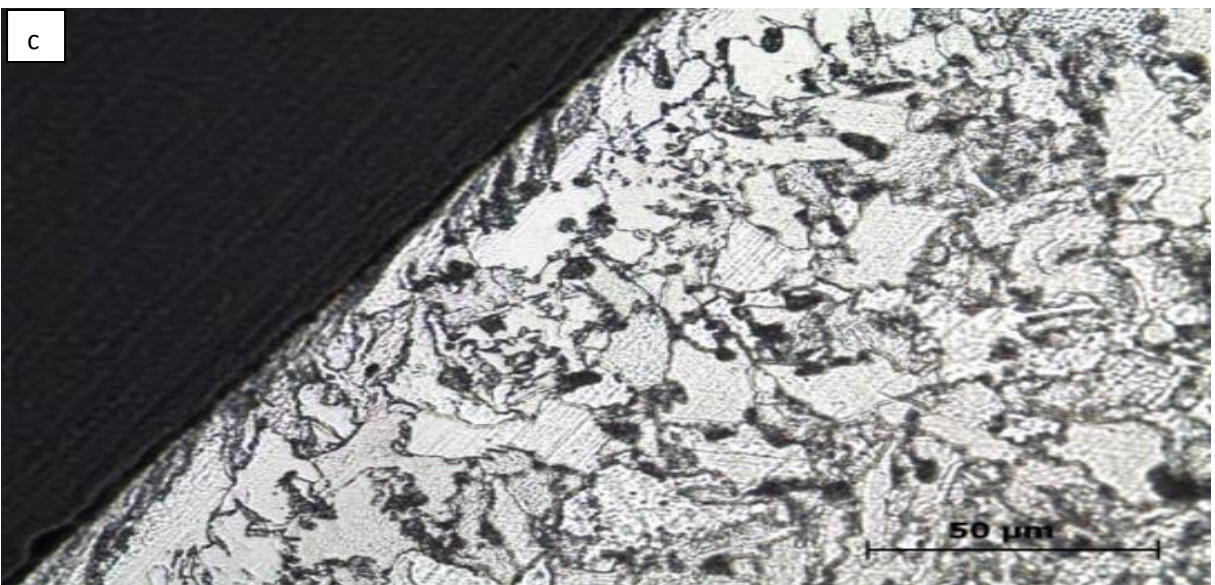
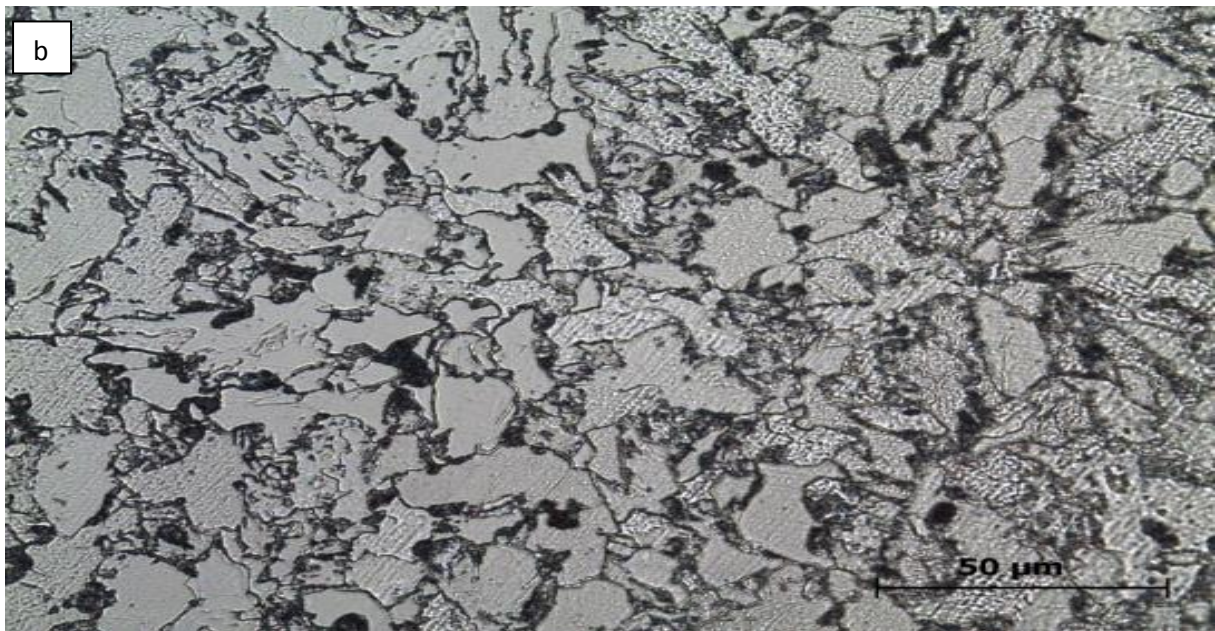
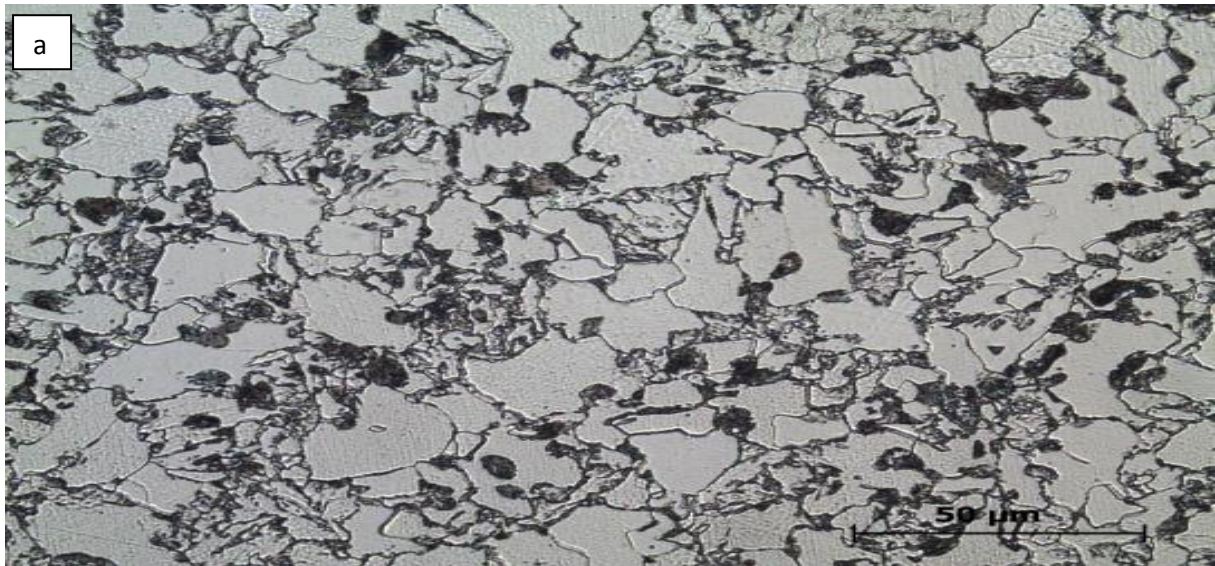
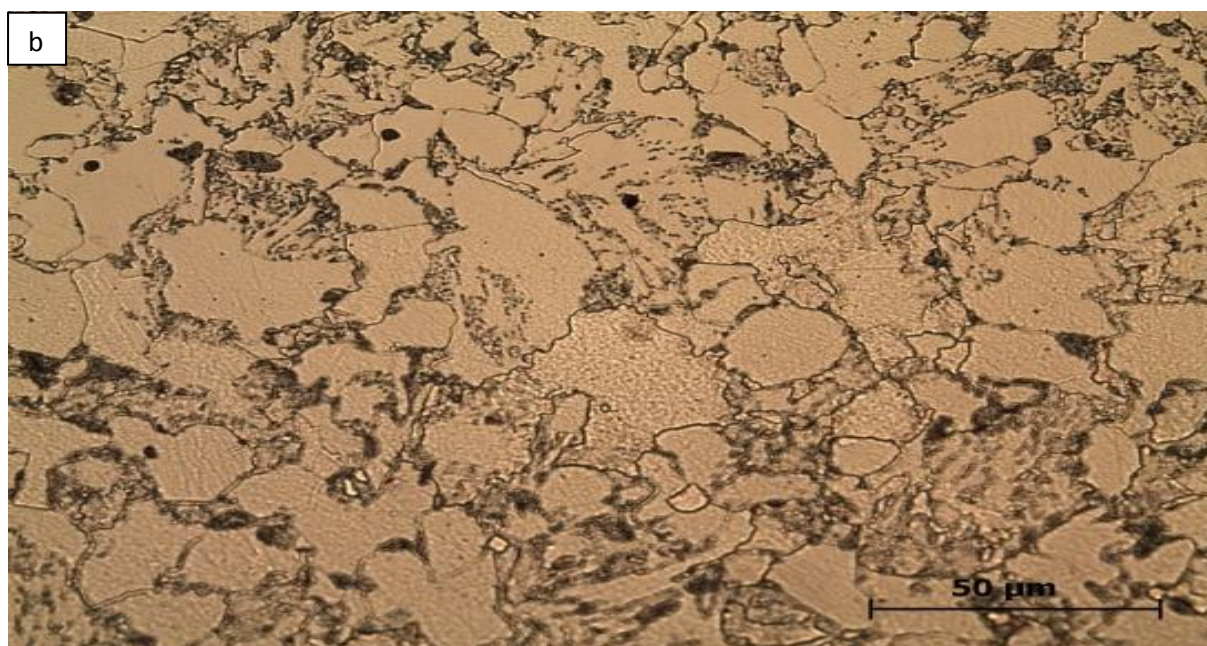
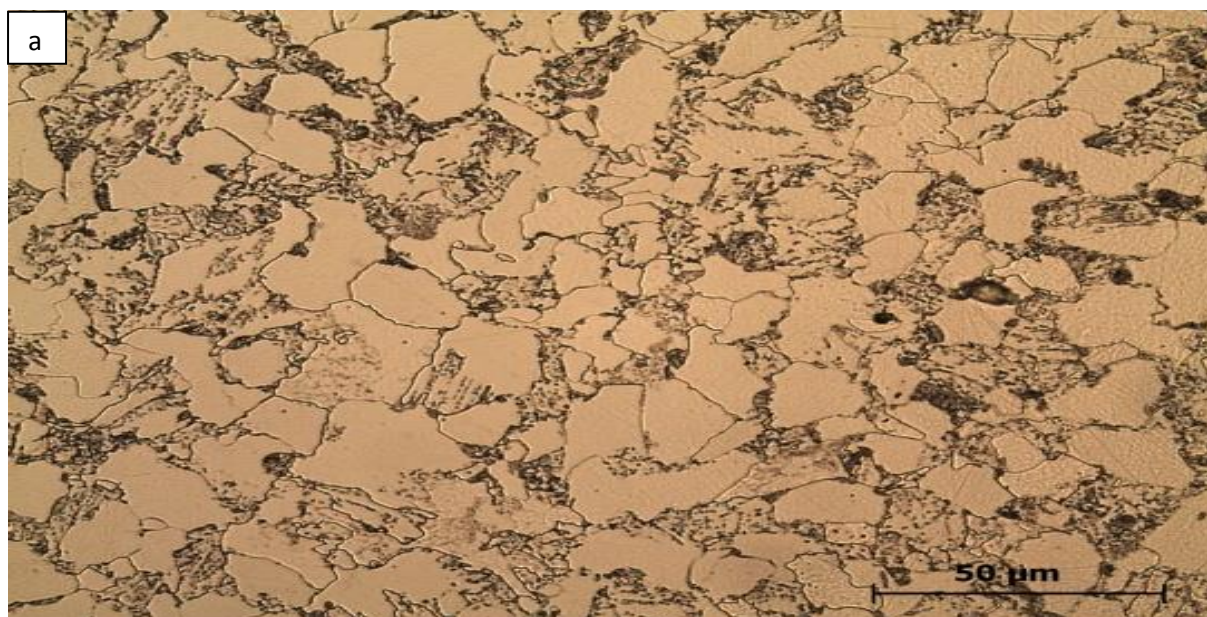


Figure IV.2.1 : Microstructures de l'acier doux après usinage par la vitesse $v_1=20$ m/min.
a : cœur, b : zone intermédiaire, c : bord.



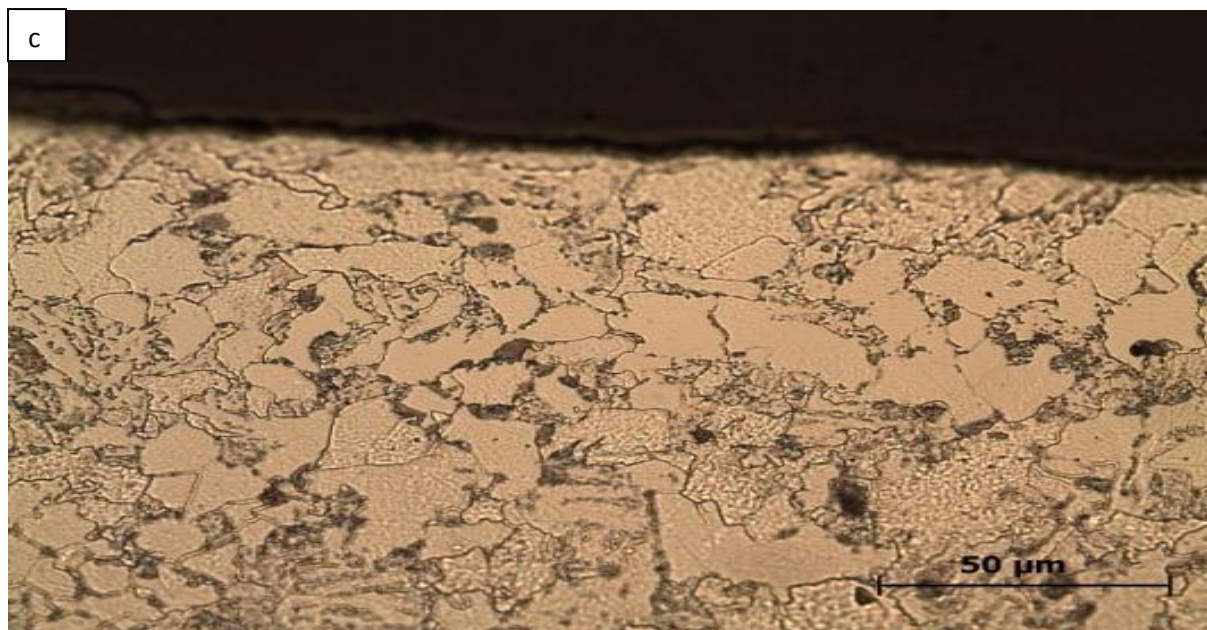
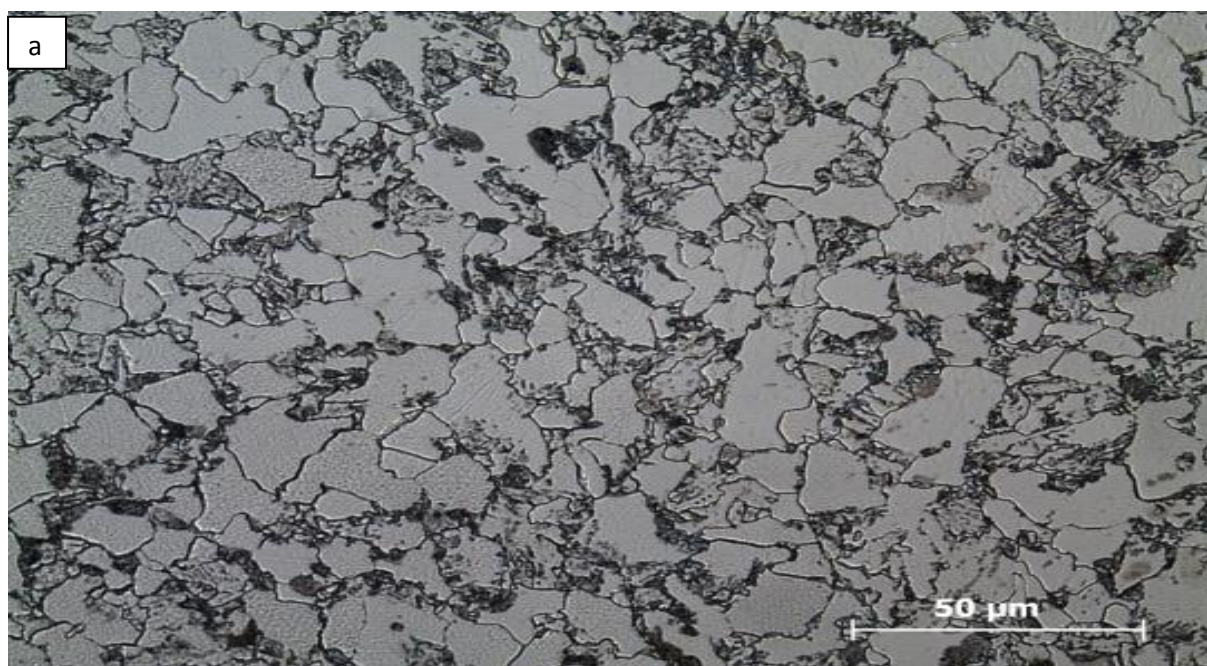


Figure IV.2.2 : Microstructures de l'acier doux après usinage par la vitesse $V_2 = 30$ m/min.
a : cœur, b : zone intermédiaire, c : bord.



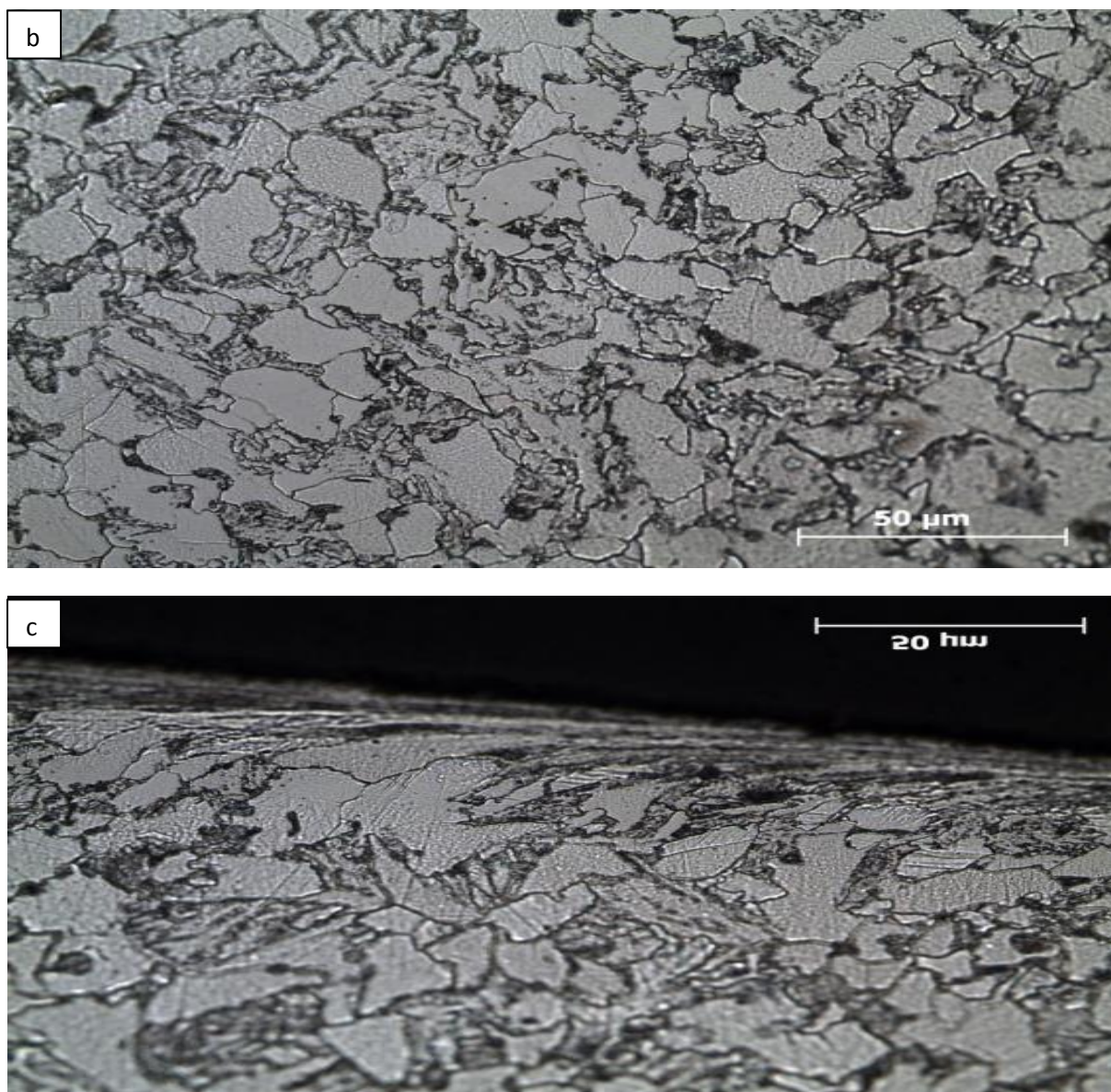


Figure IV.2.3 : Microstructures de l'acier doux après usinage par la vitesse $V_3 = 40$ m/min.

a : cœur, b : zone intermédiaire, c : bord.

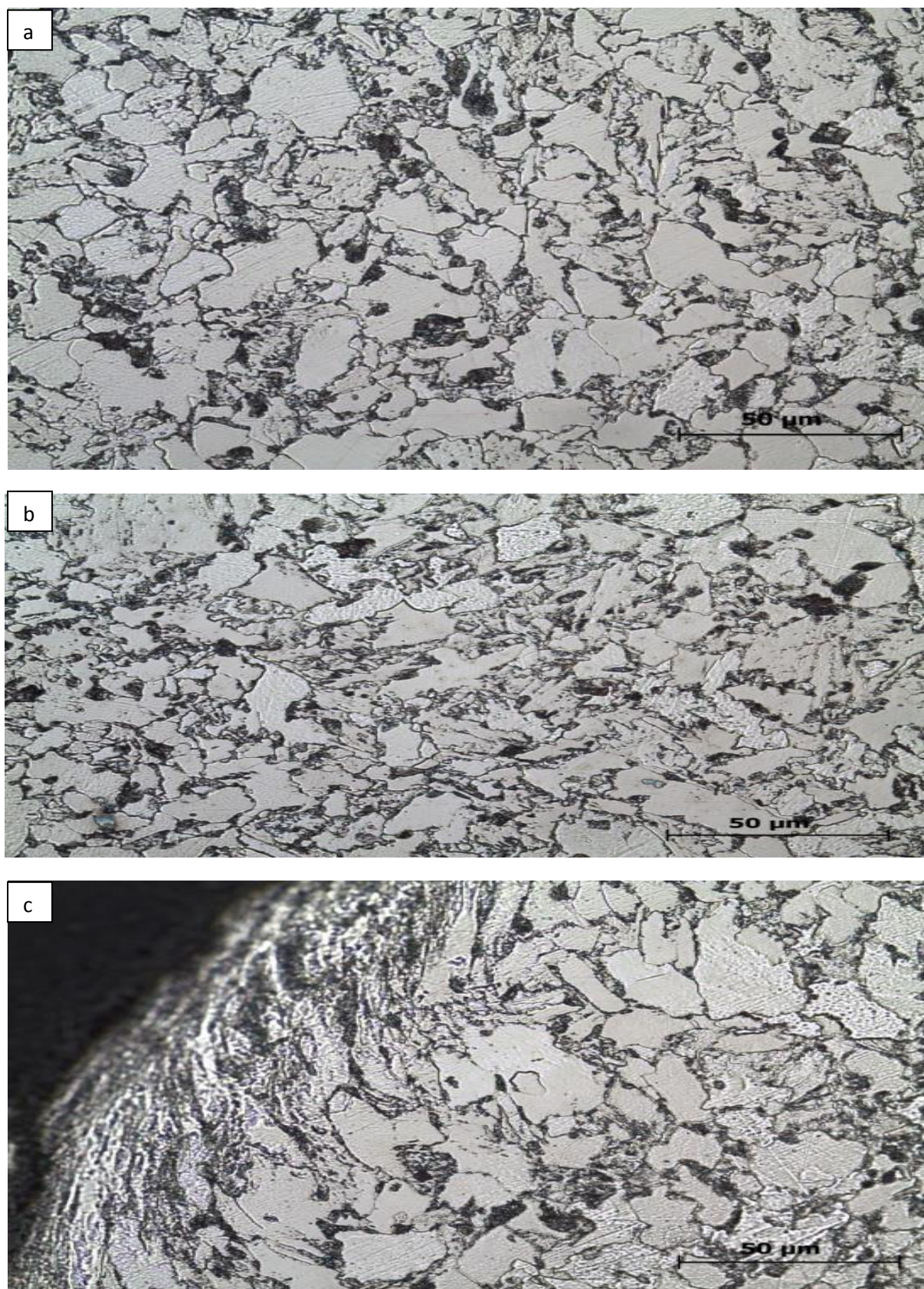
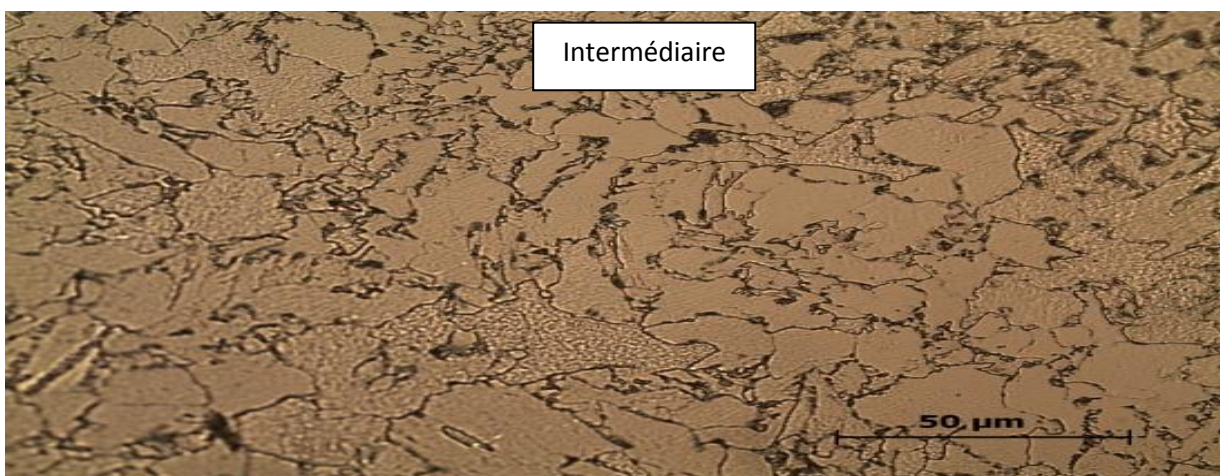
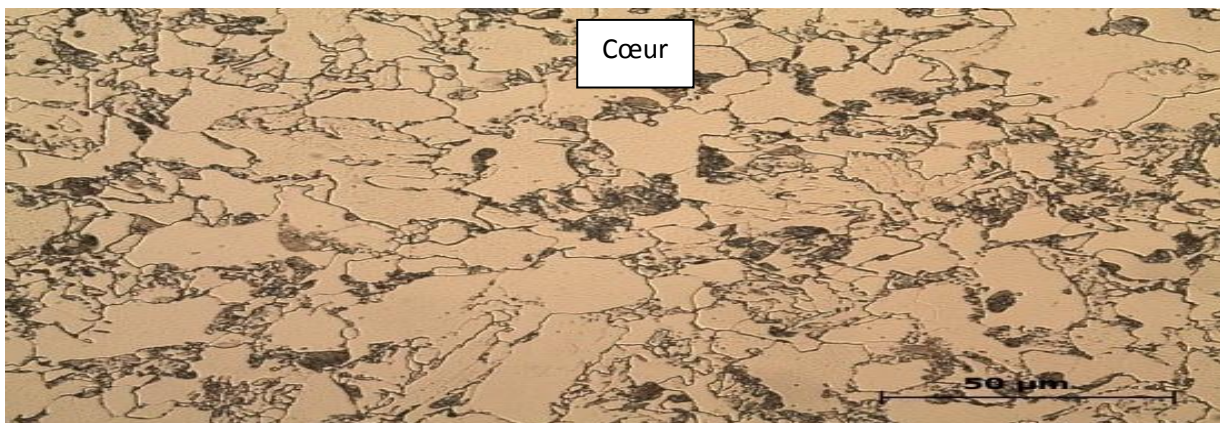


Figure IV.2.4 : Microstructures de l'acier doux XC18 après usinage par la vitesse $V_4 = 60$ m/min. a : cœur, b : zone intermédiaire, c : bord.

On doit noter que Bissey-Breton et al [1] ont étudié l'impact des conditions d'usinage sur la zone du matériau affectée par le procédé. Divers essais de chariotage ont été menés sur du cuivre pur, après l'étude microstructurale ils ont trouvé l'existence d'un volume affecté en proximité de la surface usinée où l'épaisseur de cette zone dépend des conditions de coupe. Ils ont trouvé également que l'indice de texture croît lorsque l'épaisseur de la zone affectée augmente. Ils ont remarqué aussi que la profondeur de passe est très importante et elle est associée à l'absence de lubrifiant ce qui augmente l'épaisseur affectée.

IV.2.3. Effet de recuit isotherme à 300 °C sur la microstructure de l'acier XC18 usiné à différentes vitesses.

L'effet d'un traitement thermique sur les échantillons usinés a été aussi étudié. D'après les observations microscopiques des différentes zones (cœur, intermédiaire et bord) des échantillons de l'acier XC 18 usiné avant (figures IV.3, IV.4.1- 4.4) et après traitement thermique à 300 °C (figures IV.5.1.- IV.5.4.) n'ont pas révélé un changement remarquable de l'état microstructural.



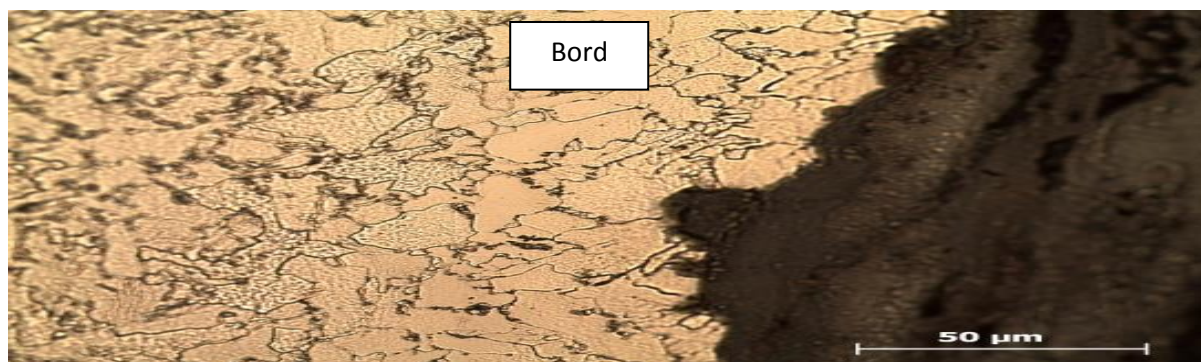


Figure IV.3 : Microstructure de l'acier XC18 dans à l'état brut.

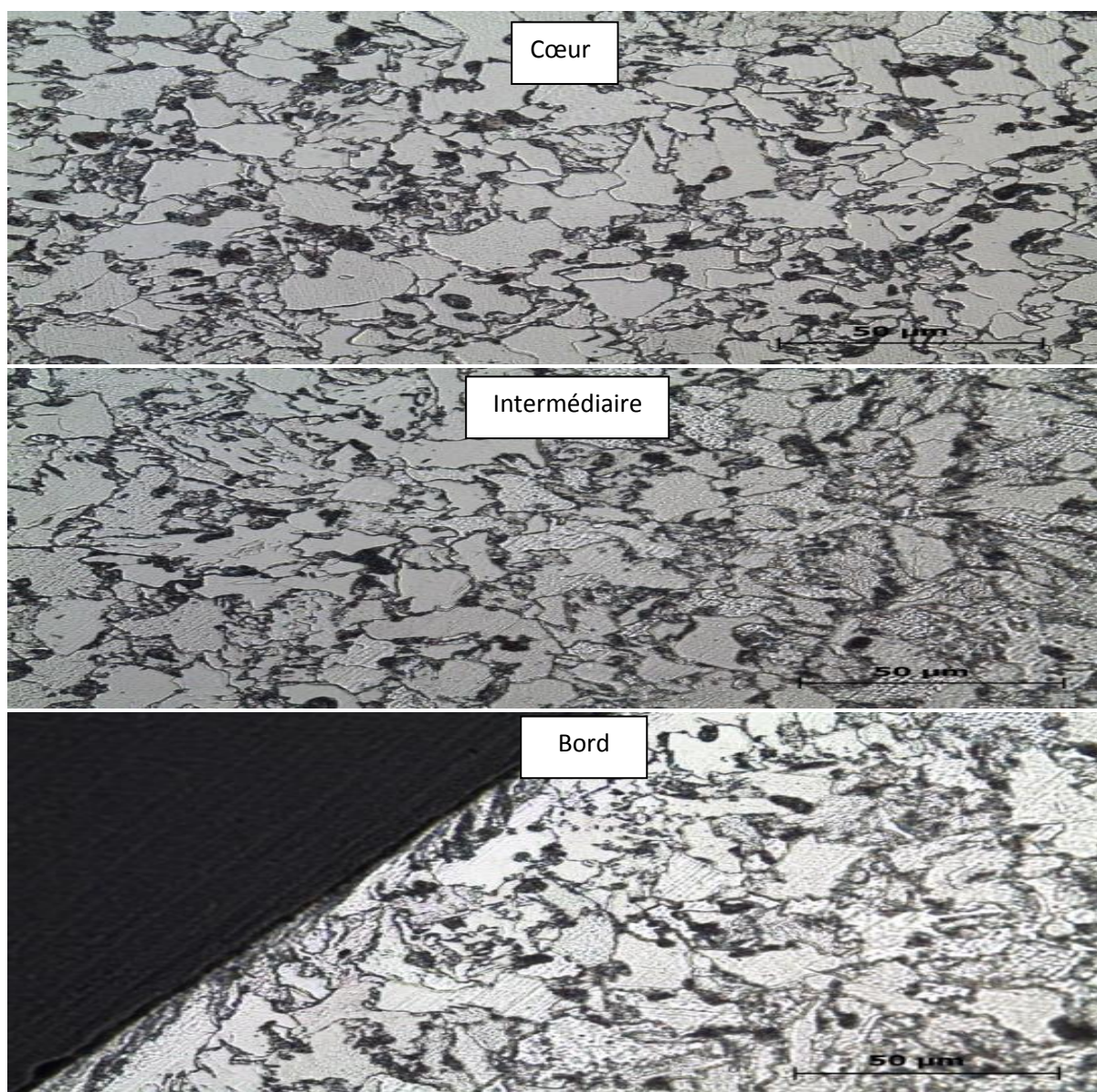


Figure IV.4.1: Microstructure de l'acier XC18 usinée avec la vitesse V1.

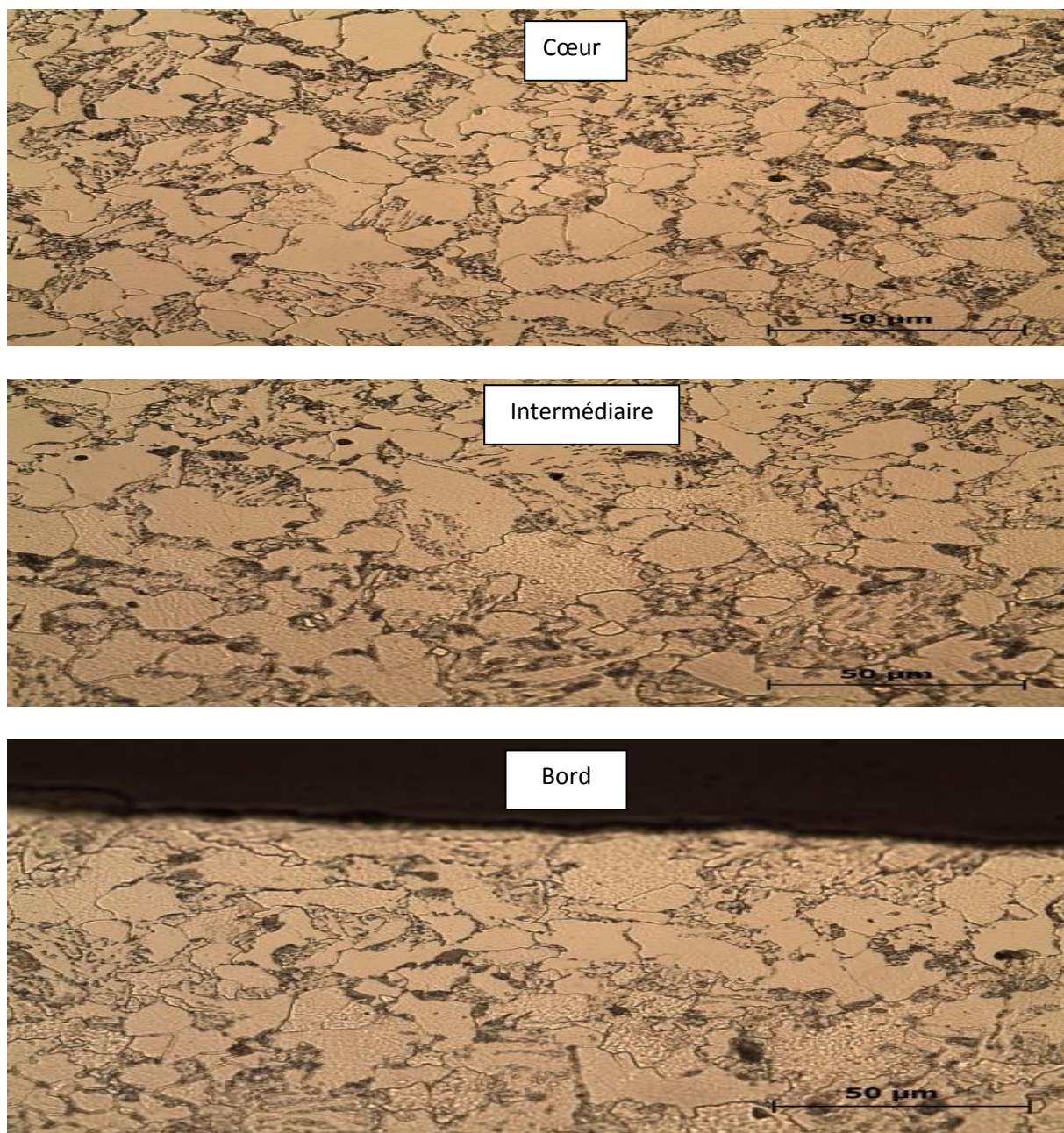
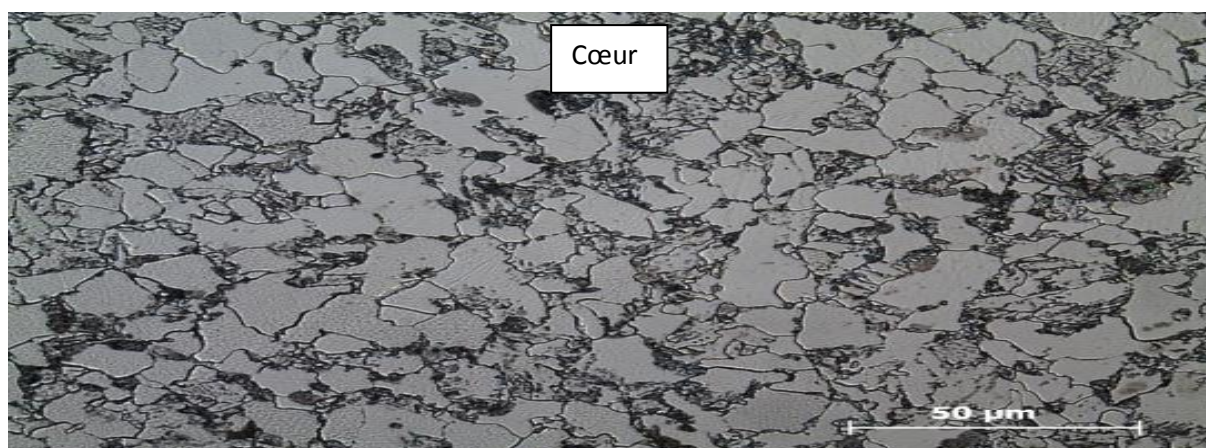


Figure IV.4.2. : Microstructure de l'acier XC18 usinée avec la vitesse V2.



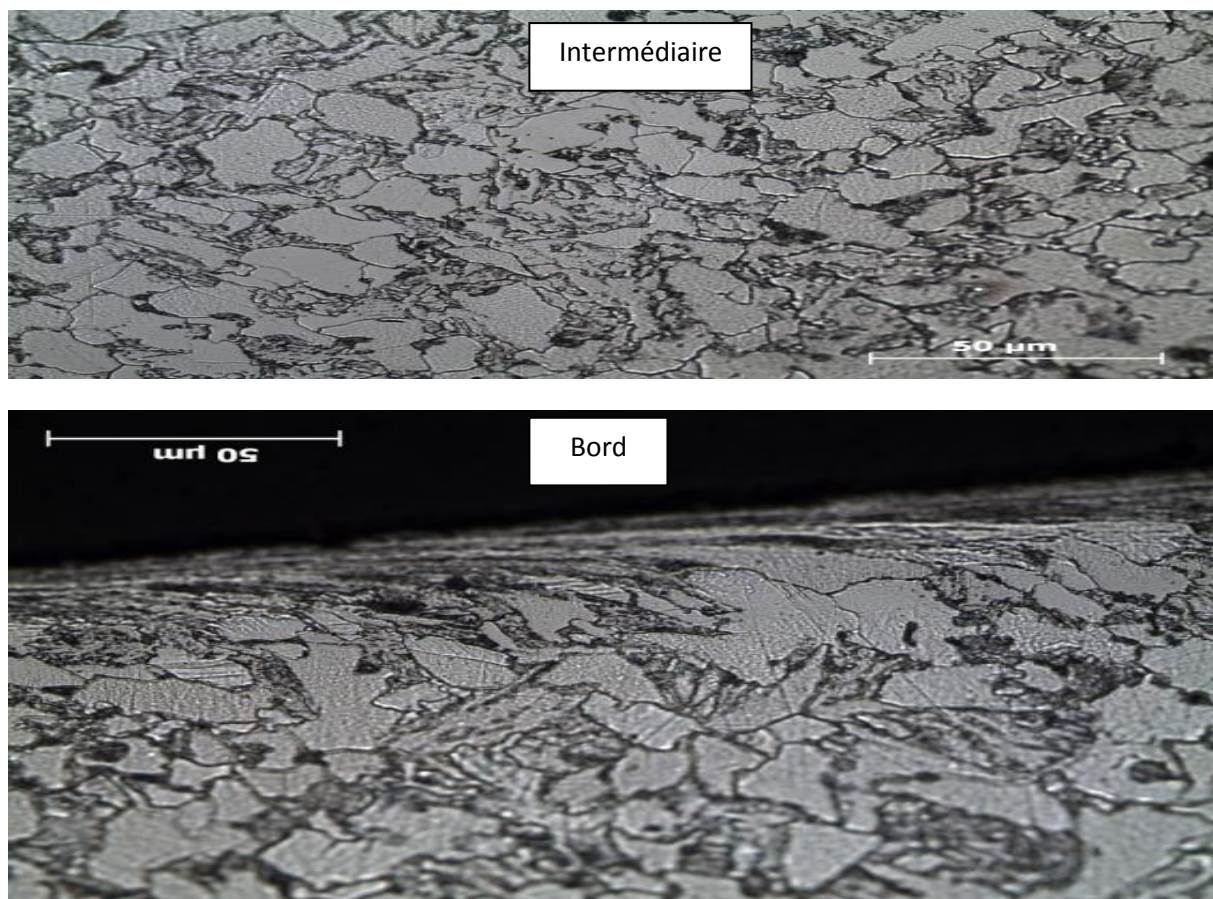
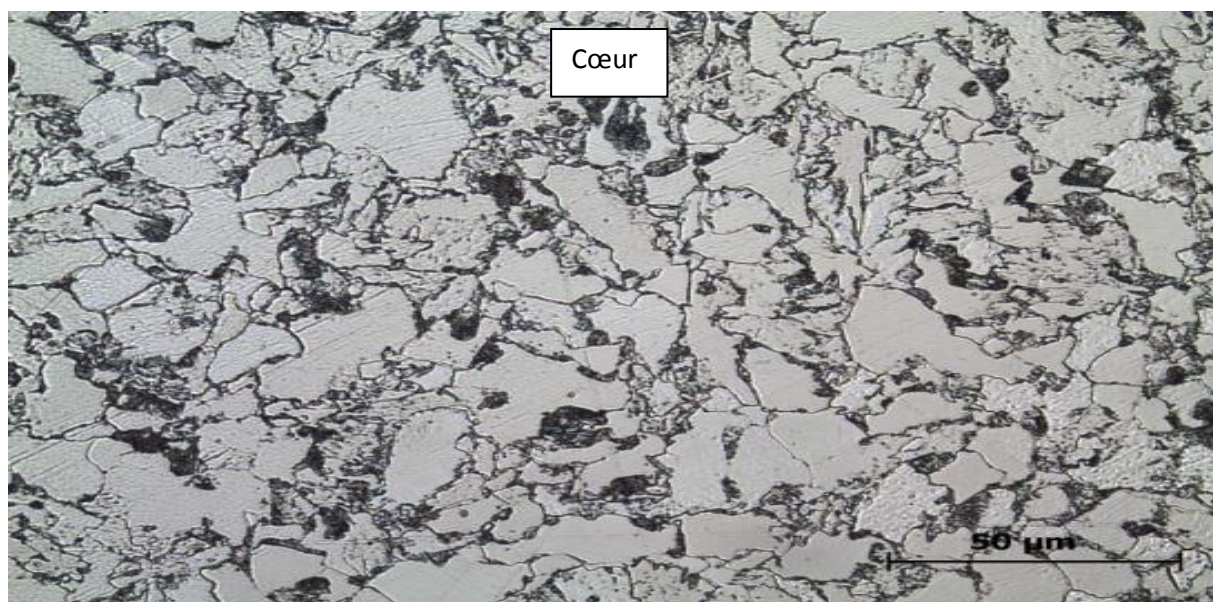


Figure IV.4.3. : Microstructure de l'acier XC18 usinée avec la vitesse V3.



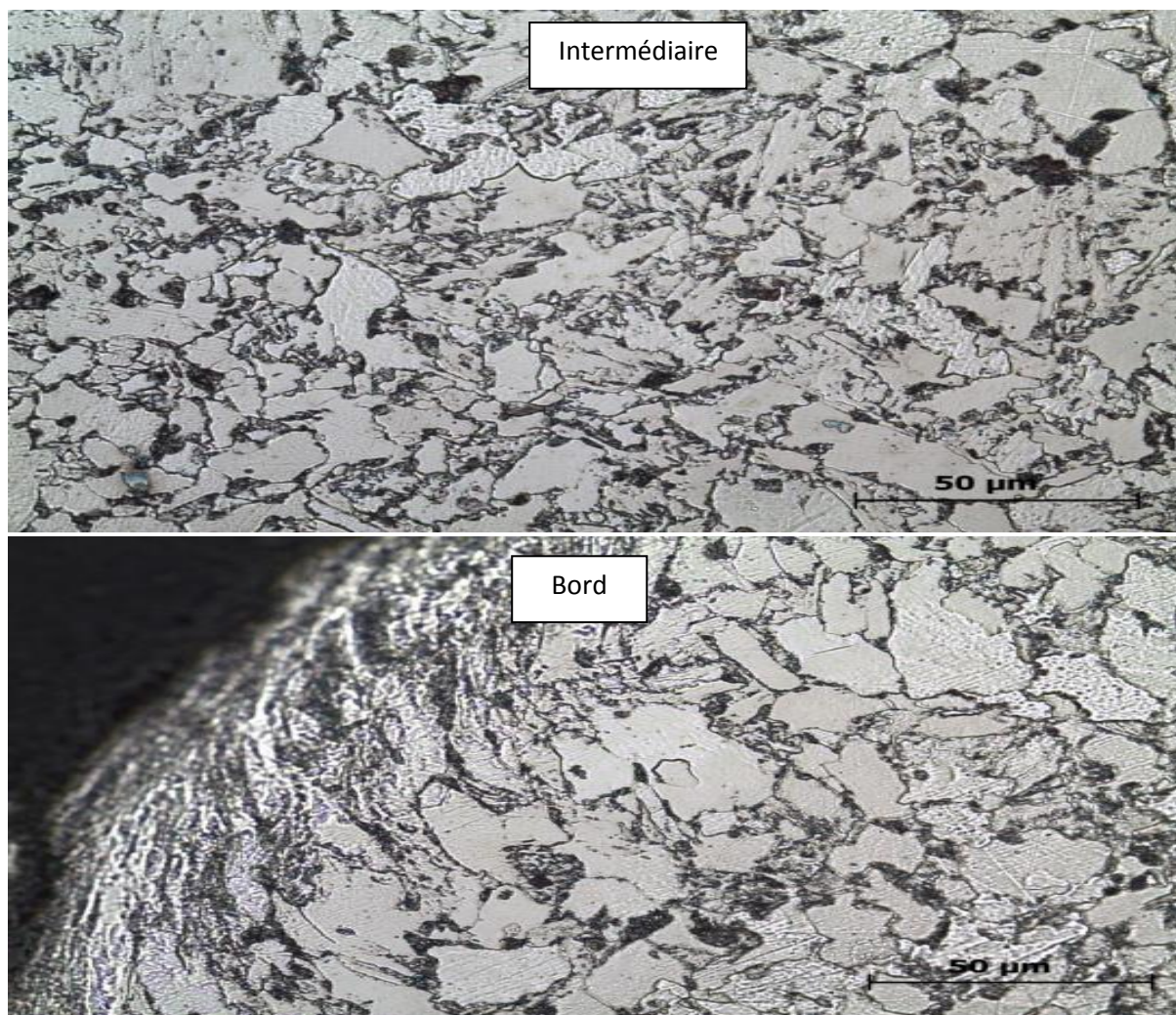
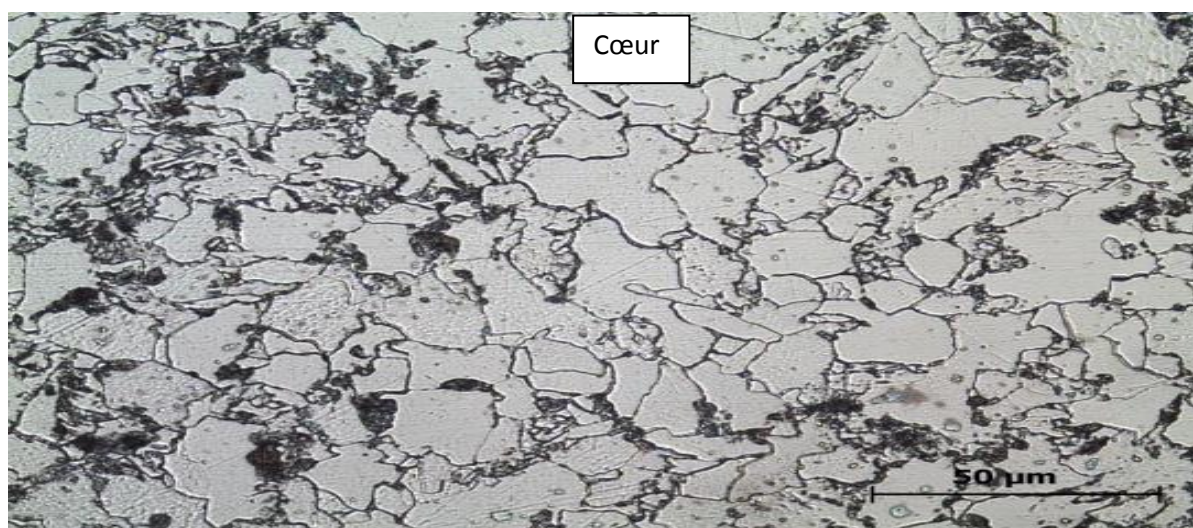


Figure IV.4.4. : Microstructure de l'acier XC18 usinée avec la vitesse V4.



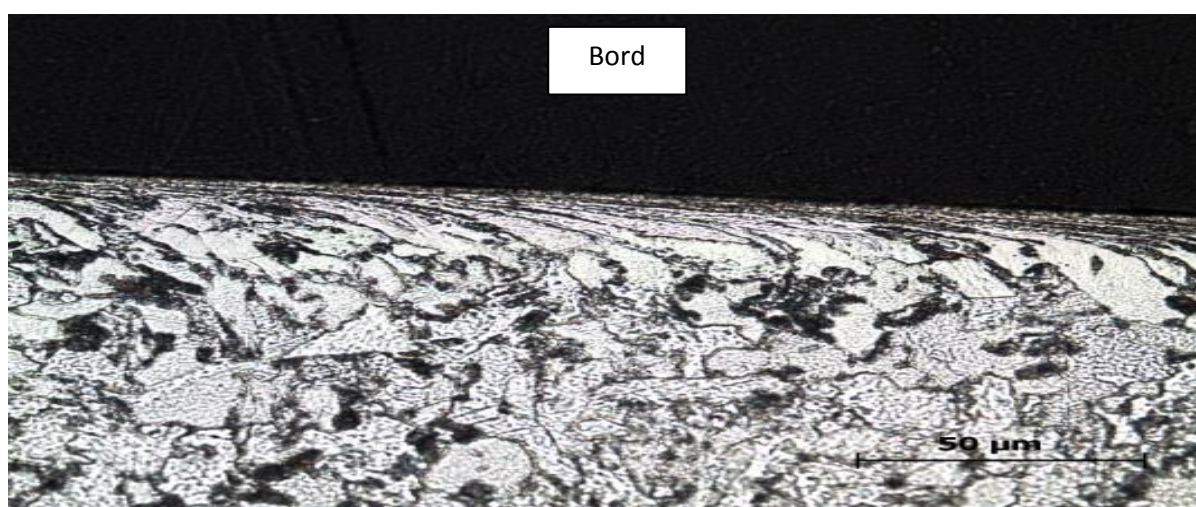
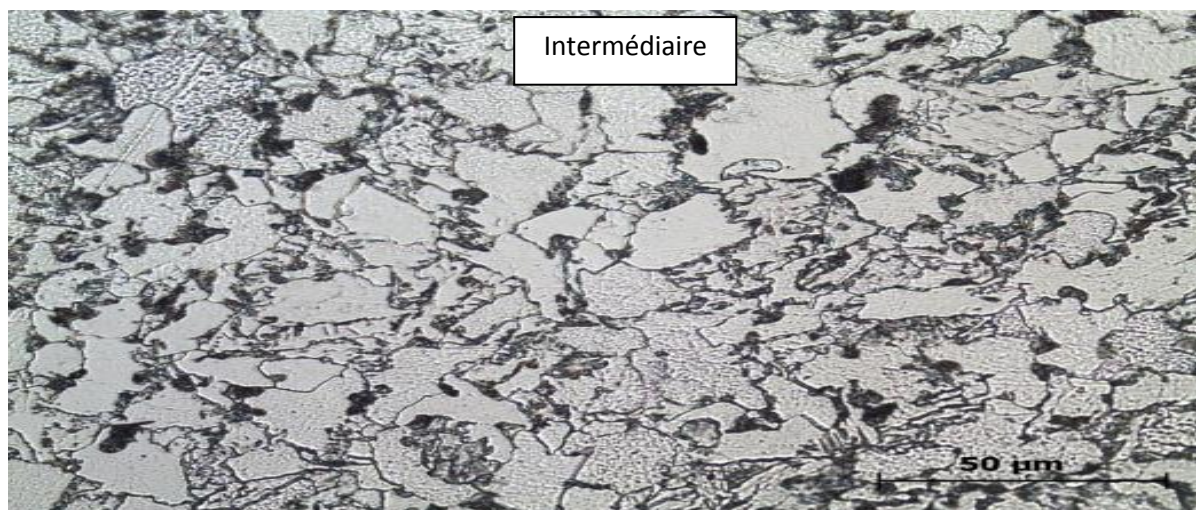
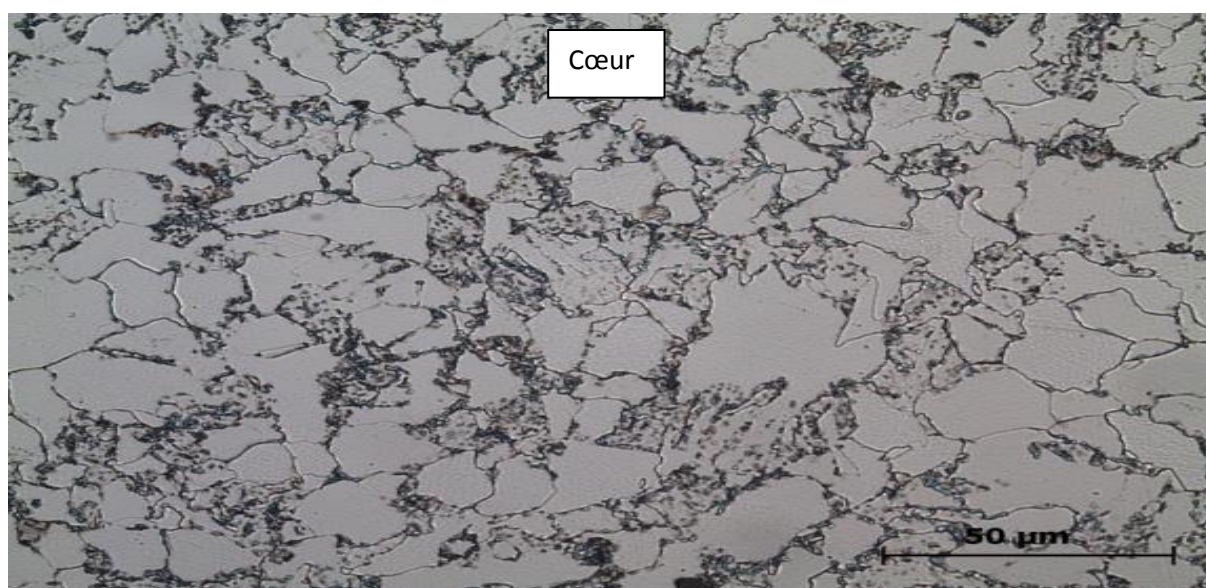


Figure IV.5.1. : Microstructure de l'acier XC18 usinée avec la vitesse V1 puis recuit à T : 300°C pendant 1 heure.



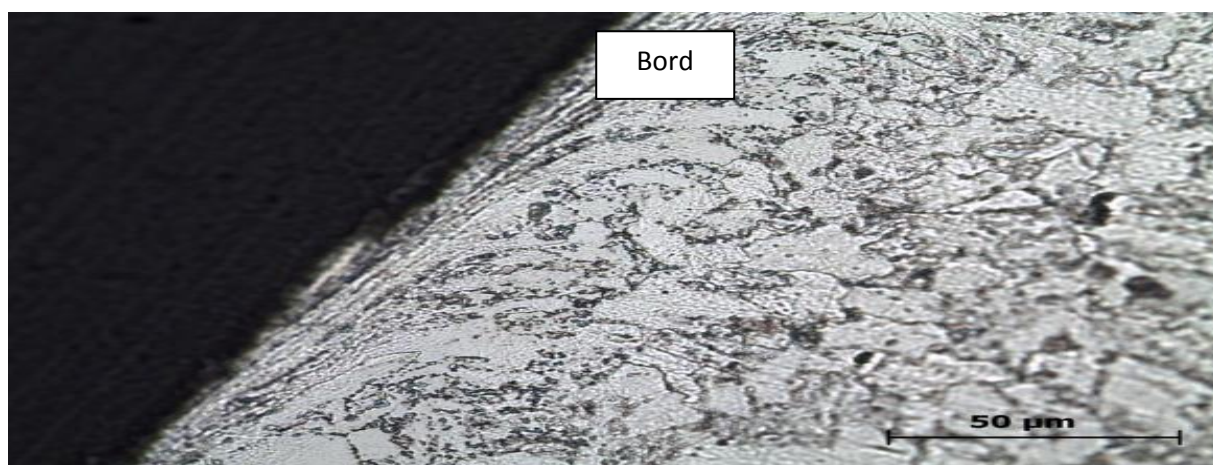
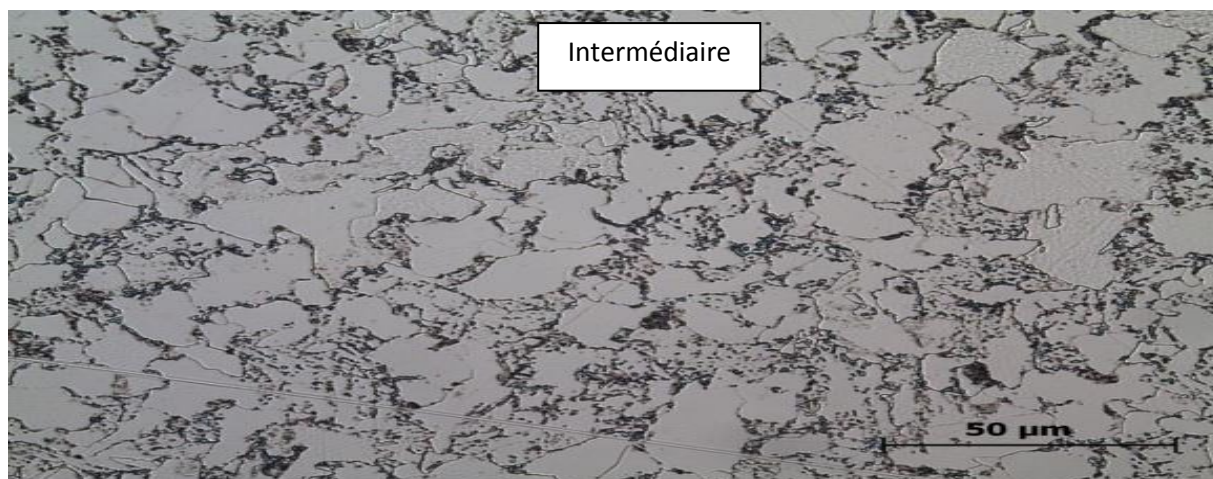
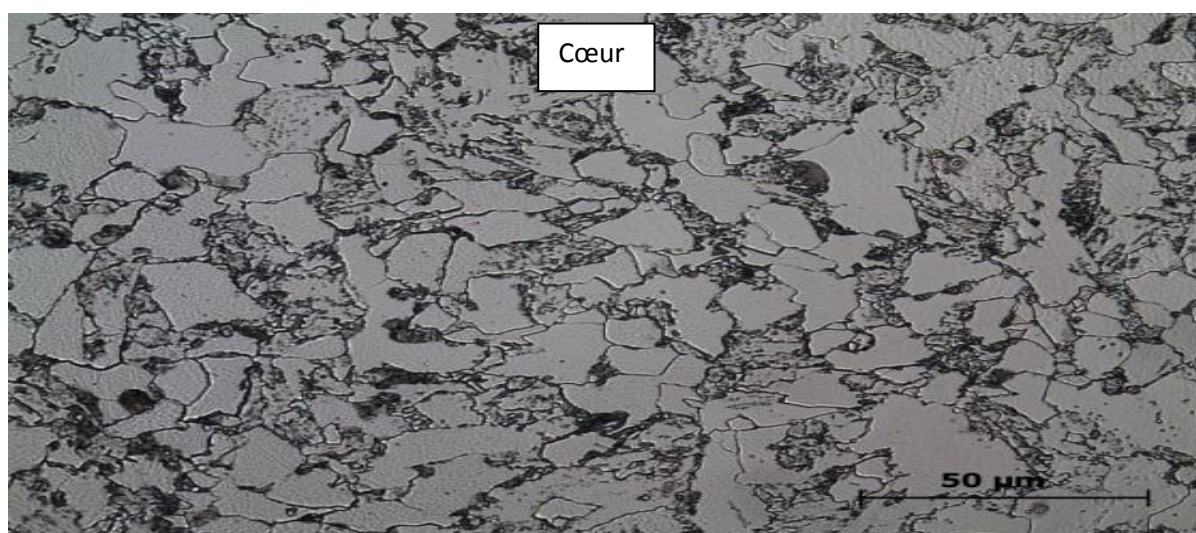


Figure IV.5.2. : Microstructure de l'acier XC18 usinée avec la vitesse V2 puis recuit à T : 300°C pendant 1 heure.



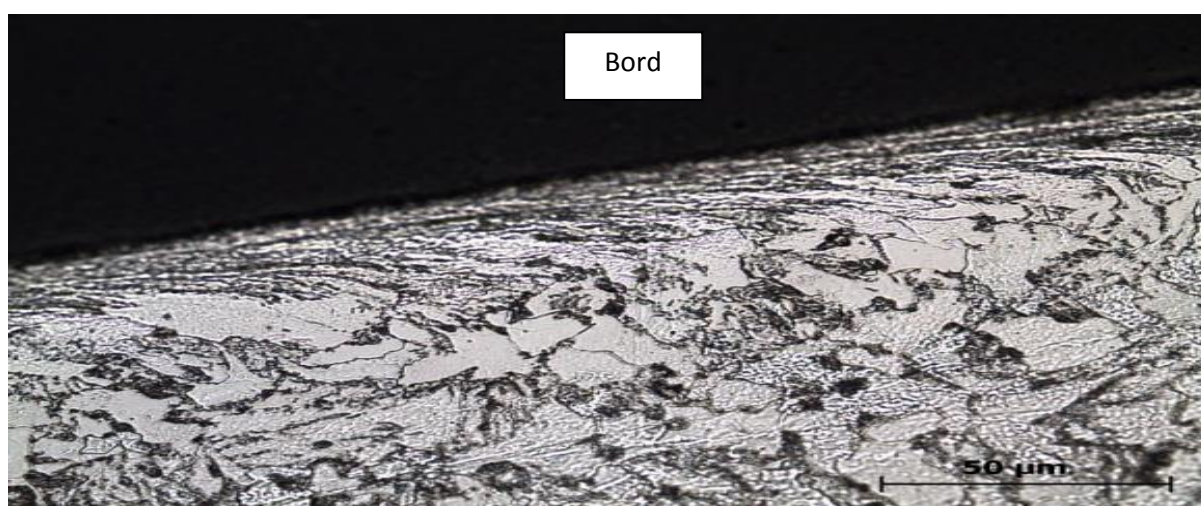
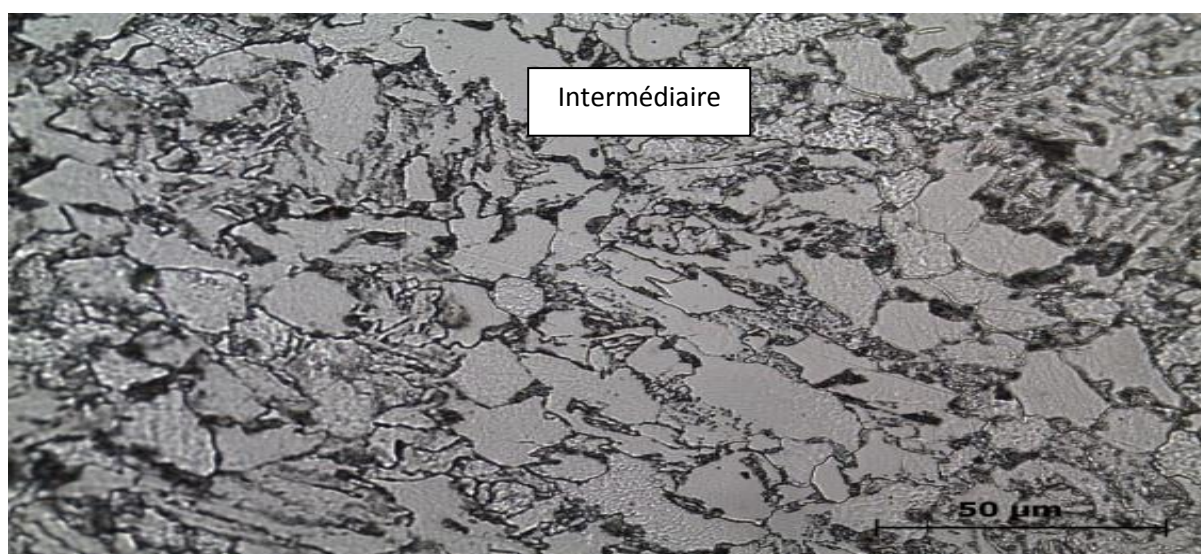
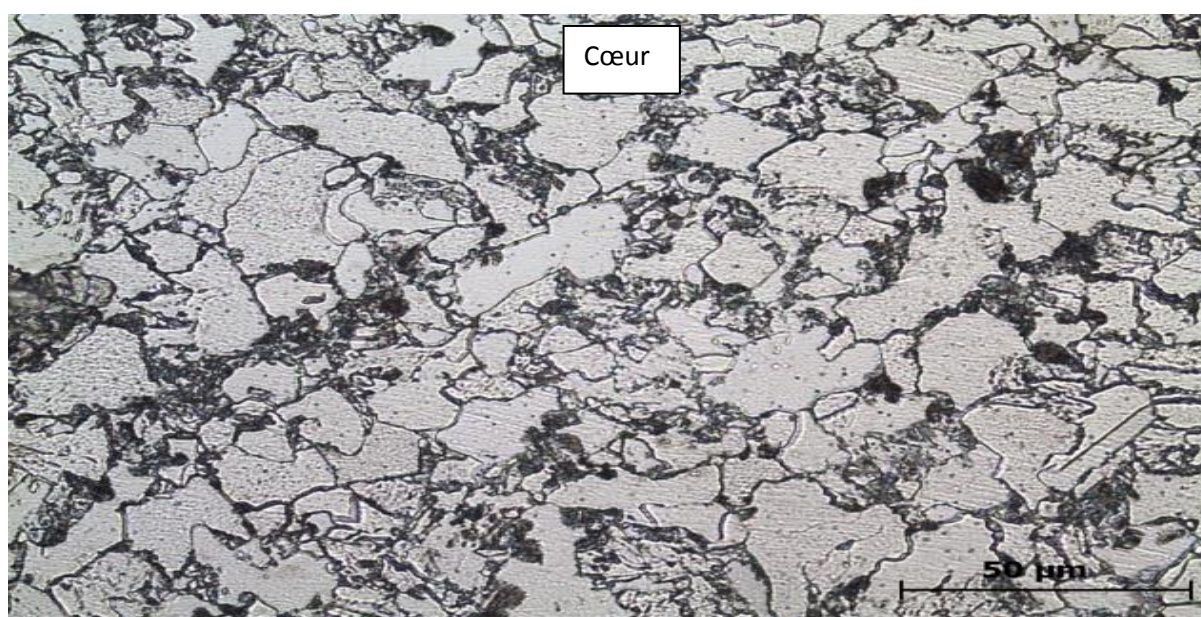


Figure IV.5.3. : Microstructure de l'acier XC18 usinée avec la vitesse V_3 puis recuit à T : 300°C pendant 1 heure.



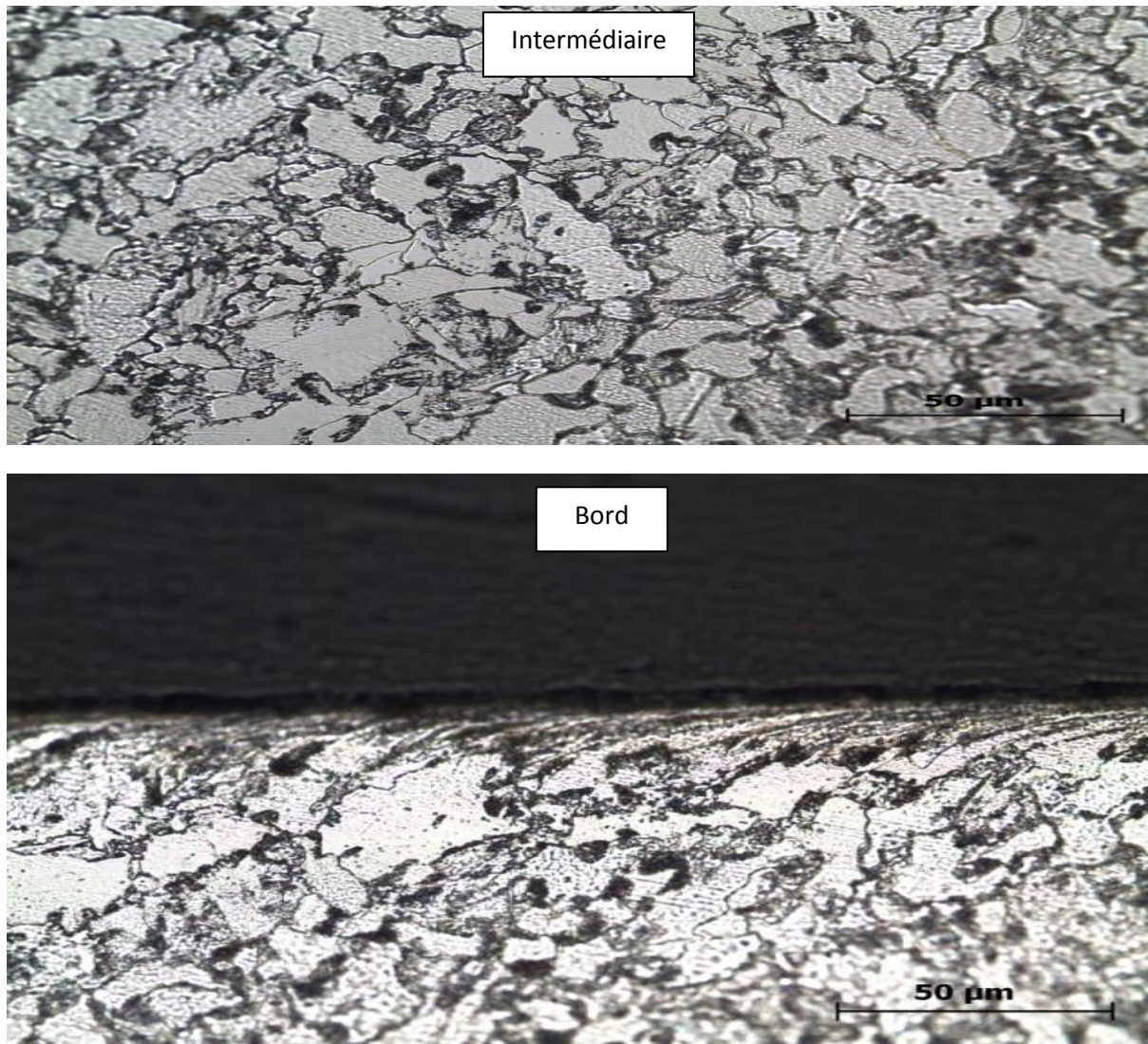


Figure IV.5.4. : Microstructure de l'acier XC18 usinée avec la vitesse V_4 puis recuit à T : 300°C pendant 1 heure.

IV.3. Observation microscopique de la surface usinée :

La figure IV.6 montre l'état de la surface de l'acier XC18 après différentes vitesses de coupe par tournage.

On remarque que pour la faible vitesse de coupe V_1 (Fig IV.6 a-à), la formation des microfissures. Ces microfissures disparaissent lorsqu'on augmente la vitesse de coupe (Fig IV.7.c) .

D'autre part, on a constaté que la vitesse de coupe influe sur la taille et la forme des microstries. Ces microstries s'élargissent durant la deuxième et la troisième vitesse la figure IV.7. b, c), puis elles disparaissent pour la grande vitesse de coupe la figure IV.6. d).

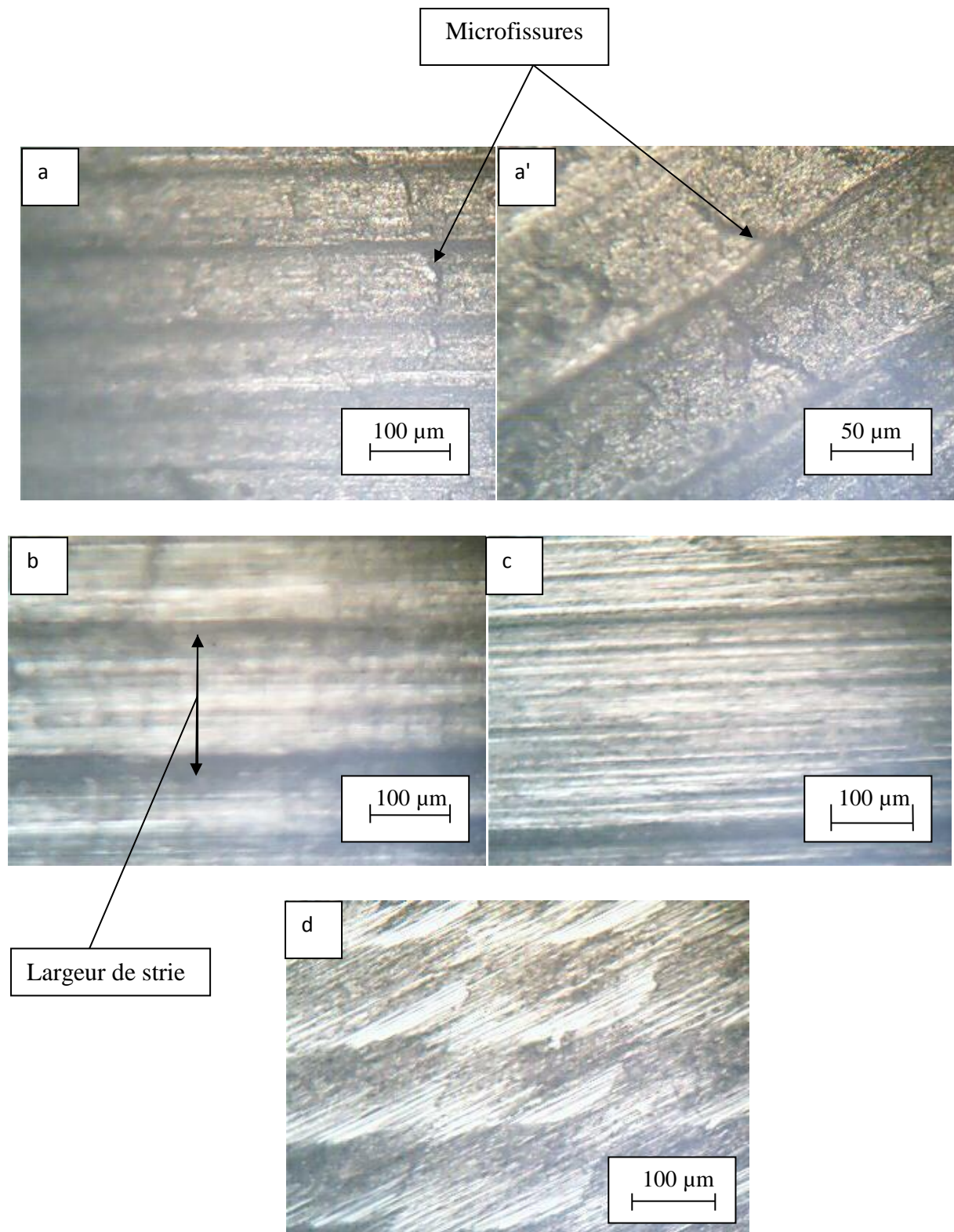


Figure IV.6 : Microstructure de la surface usinée après différentes vitesses de tournage : a) V1, b) V2, c) V3, et d) V4. (a' est l'agrandissement d'une zone dans la surface de usinée à V1).

Nos observations sont en accord avec les observations obtenues par Remadna et al [28].

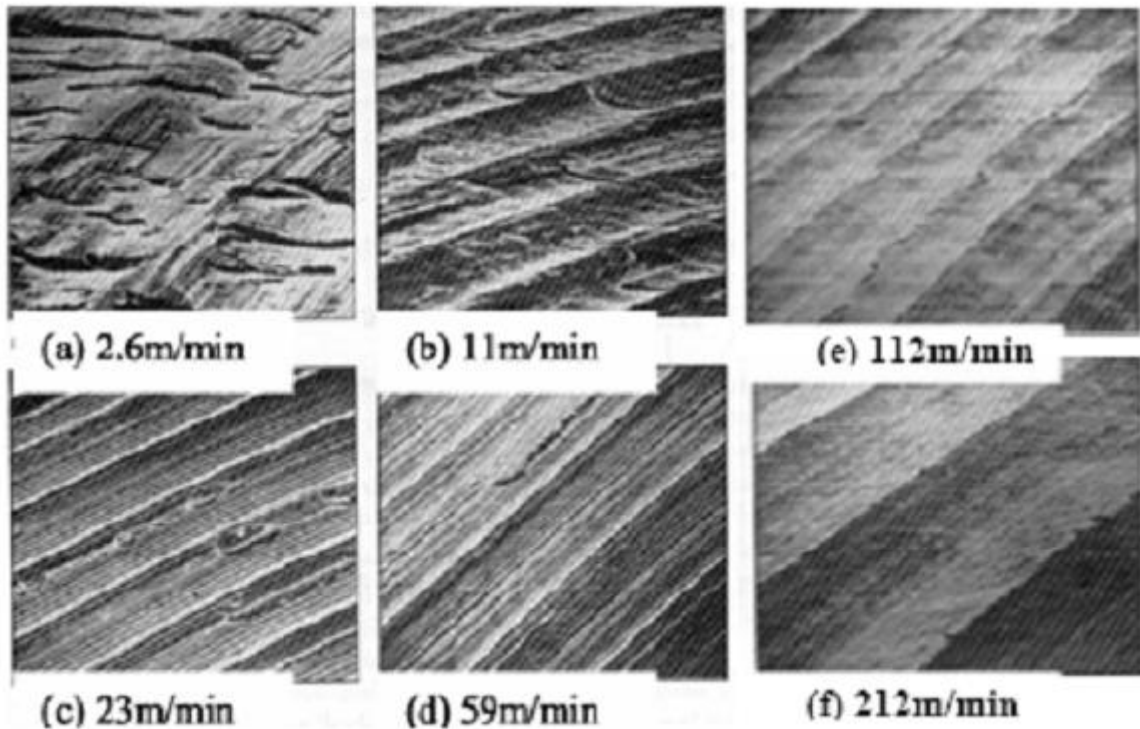


Figure I.36 : Microgéométrie de surface pour diverses vitesses de coupe [28].

IV.4. Caractérisation par microscope électronique à balayage MEB

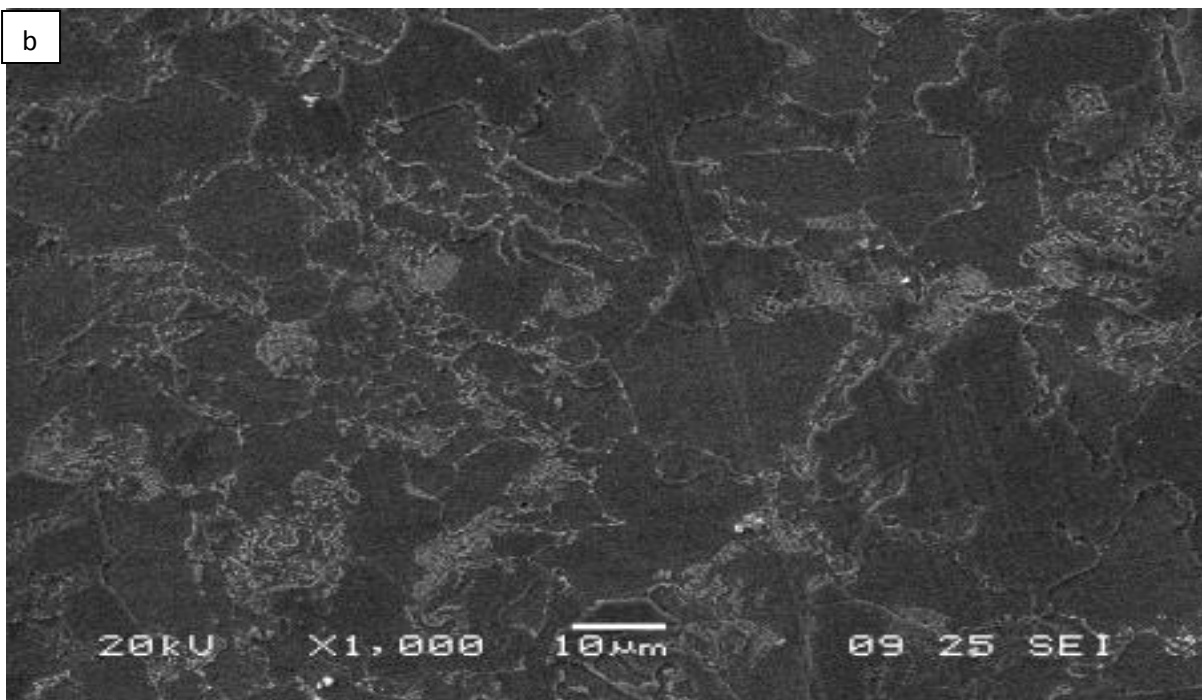
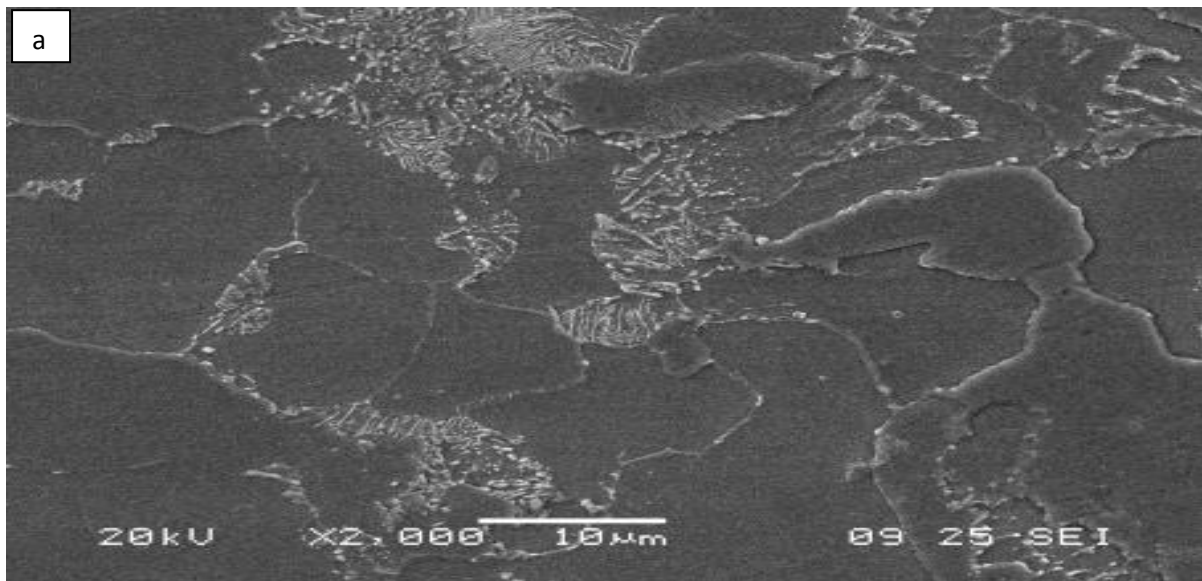
D'après Griffiths [3], il existe trois causes principales qui peuvent provoquer des modifications des microstructures de surface lors d'une opération d'usinage : les effets thermiques (chauffe rapide puis trempe de la matière), les effets mécaniques (déformation plastique sévère), les réactions avec l'environnement.

Certaines d'études ont mentionné l'apparition d'une couche blanche apparaissant lors de l'usinage de différents aciers. Certains auteurs attribuent l'apparition de cette couche à l'impact thermique de l'usinage sur la matière, d'autres l'attribuent à l'impact de la déformation plastique [3].

Les résultats présentés ici montrent l'évolution de la microstructure par MEB après l'usinage des échantillons par différentes vitesses par tournage. L'utilisation du MEB avait pour un but de mieux observer l'évolution microstructurale.

a - Etat brut :

La figure IV.7, présente l'état microstructural de l'acier XC18 à l'état brut, c'est-à-dire, avant le procédé usinage. On remarque que la microstructure est composée de grains presque de même taille dans les différentes zones (cœur, proche de la surface, et le bord de l'échantillon). Les grains sont composés de la phase ferritique avec des colonies de perlite. Ces observations ont été constatées par microscope optique seulement, on peut observer clairement plus de détails sur les colonies de perlite. Ces colonies de perlites sont formées par des lamelles de deux phases (ferrite et cémentite). La cémentite apparait en couleur blanche.



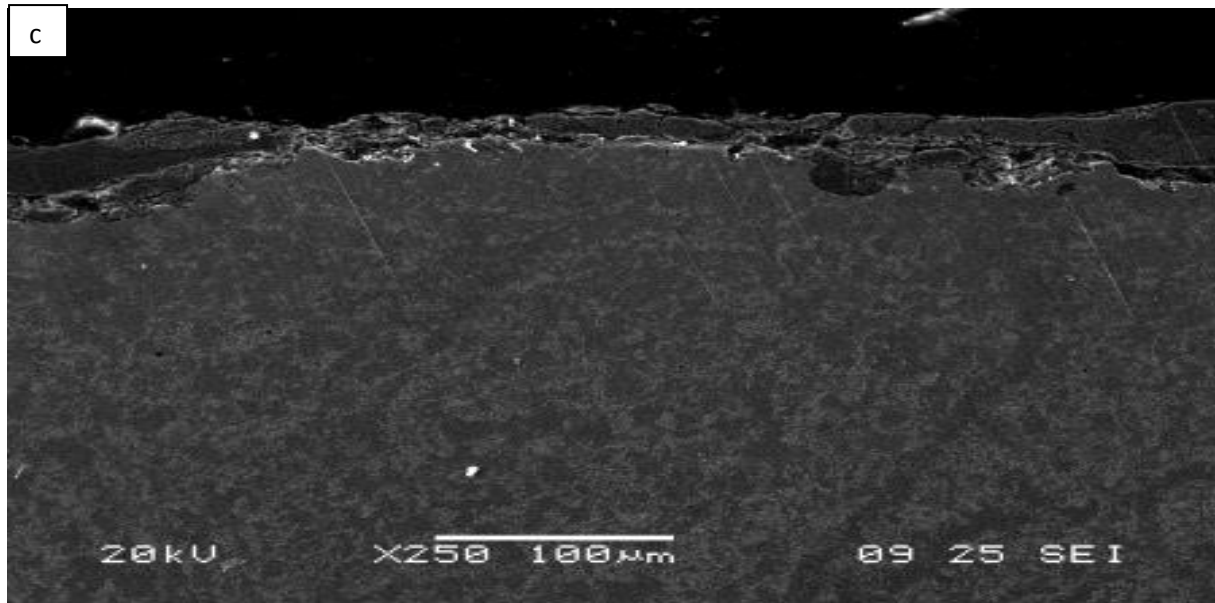


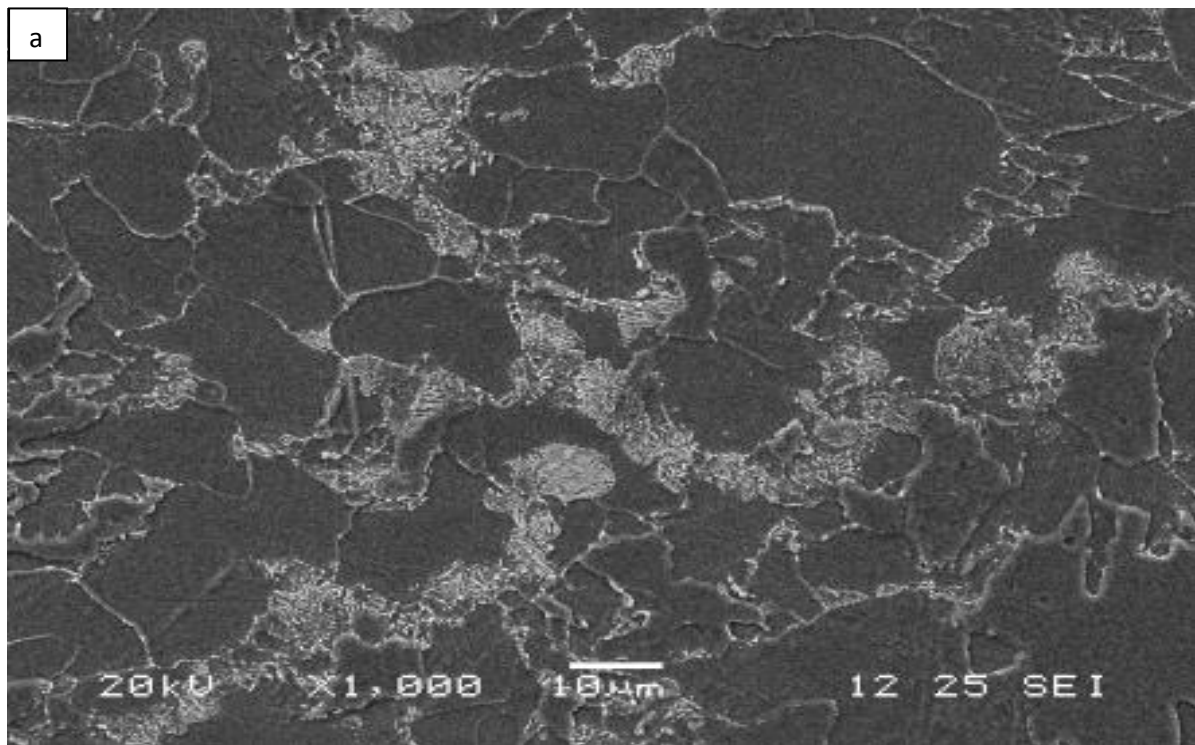
Figure IV.7 : Microstructures(MEB) de l'acier à l'état brut, a) cœur de l'échantillon, b) intermédiaire, c) bord de l'échantillon.

b- Effet de la vitesse de tournage sur la microstructure de l'acier XC18 :

D'autre part, les figures IV.8.1, 8.2, 8.3, 8.4 montrent l'évolution microstructurale (MEB) de l'acier XC18 après différentes vitesses d'usinage par tournage. On remarque que le cœur et la zone intermédiaire de l'acier ne sont pas affectés par ce procédé d'usinage, car la microstructure ne change pas. Par contre, le bord de l'acier est affecté par ce procédé d'usinage où on remarque la déformation des grains, c'est-à-dire une réorientation des grains dans un sens préférentiel. Cette réorientation s'intensifie avec l'augmentation de la vitesse d'usinage. De plus, les colonies de perlite qui sont proches de la surface sont affectées par l'augmentation de la vitesse de tournage, (fig. IV.4.c). De plus, la figure IV.4.1.c montre juste au bord, une petite couche très fine ($\leq 1 \mu\text{m}$), appelée couche blanche.

D'après [37, 38, 39, 40, 41, 42] les couches modifiées par des sollicitations mécaniques sévères sont largement étudiées dans la littérature et décrites par de nombreux termes (couche blanche, M2S2, TTS, MML, MAS,...). Quelque soit le terme par lequel est désigné cette couche, elle présente la particularité d'avoir une microstructure beaucoup plus fine que la taille de grain initiale. Il sera nécessaire de s'intéresser aux mécanismes conduisant au raffinement du grain dans le matériau, à leur caractérisation, à leur modélisation et à leur incidence sur le comportement plastique du matériau. Pour les aciers, la diminution de la taille des grains lors de la déformation peut être interprétée en termes de restauration (DRV) et de

recristallisation dynamique (DRX). Cette couche blanche a été observée par certains chercheurs. Ramesh, et al [42], montrèrent des images au microscope électronique à transmission. Ramesh conclue que les couches produites à faible vitesse de coupe sont dues au raffinement de grain lié à la déformation plastique, tandis qu'à vitesse de coupe élevée les aspects thermiques (austénitisation) sont dominants.



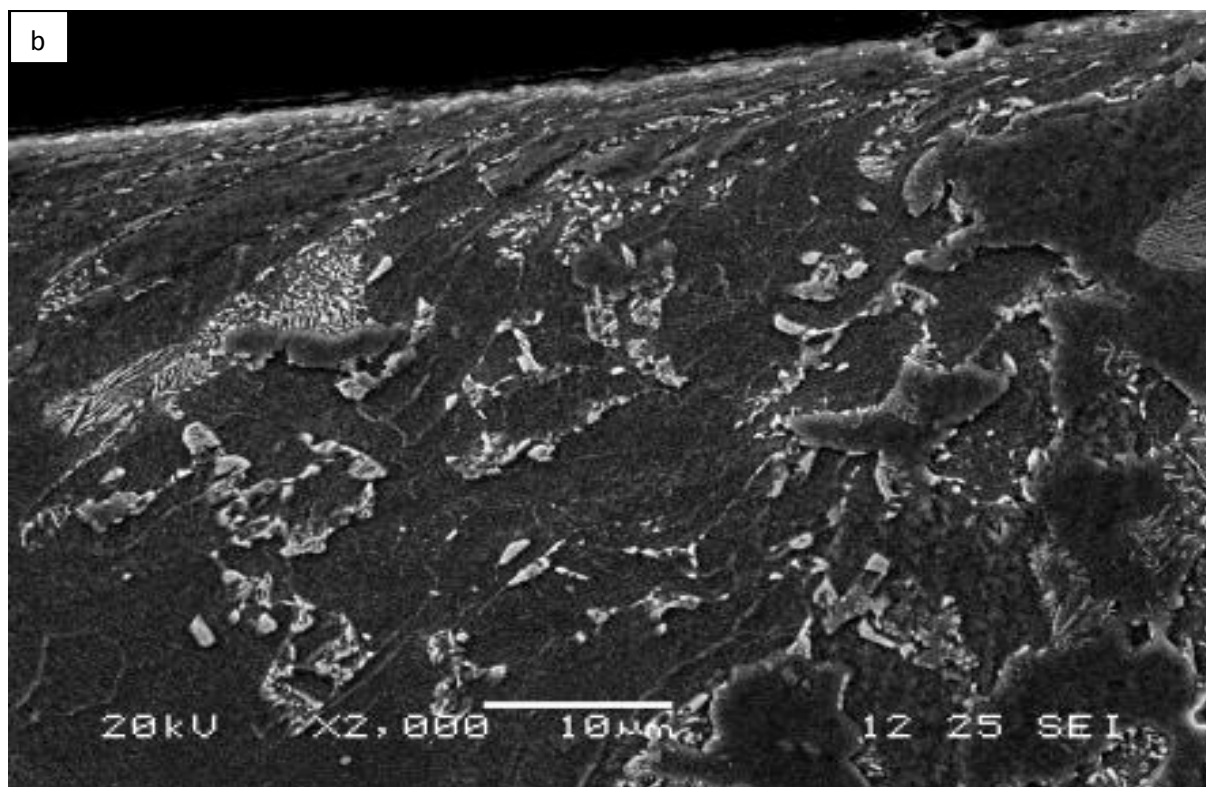
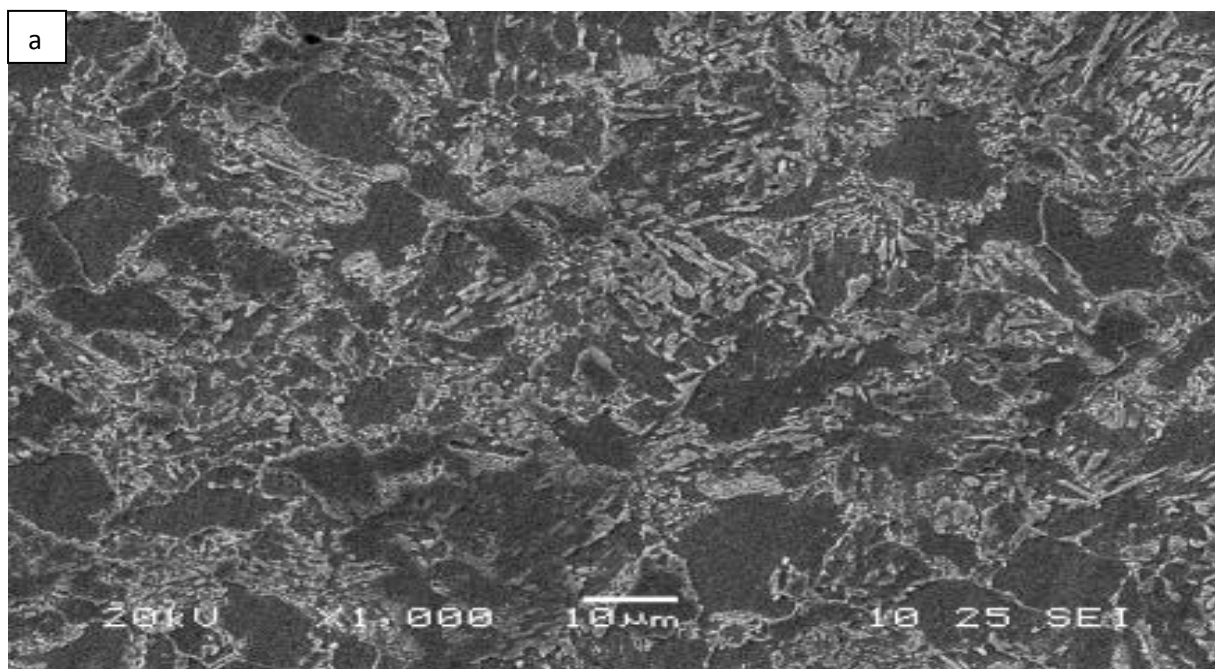


Figure IV.8 .1 : Microstructures (MEB) de l'acier doux après usinage par la vitesse $V_1 = 20 \text{ m/min}$. a : cœur, b : bord.



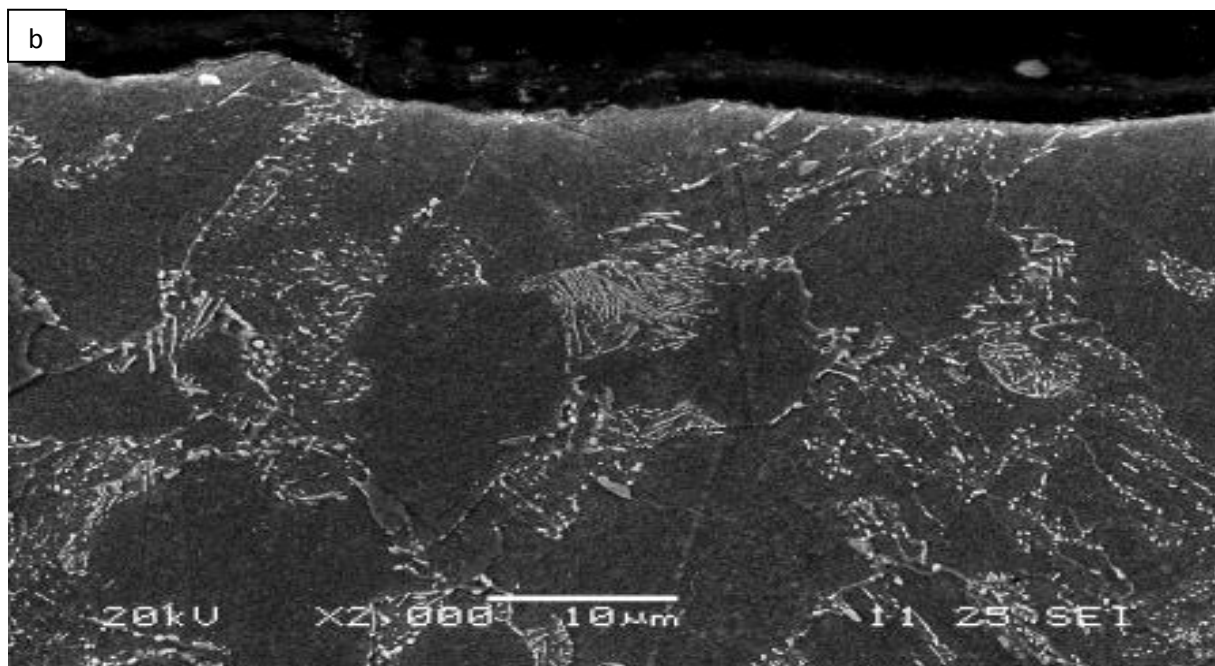
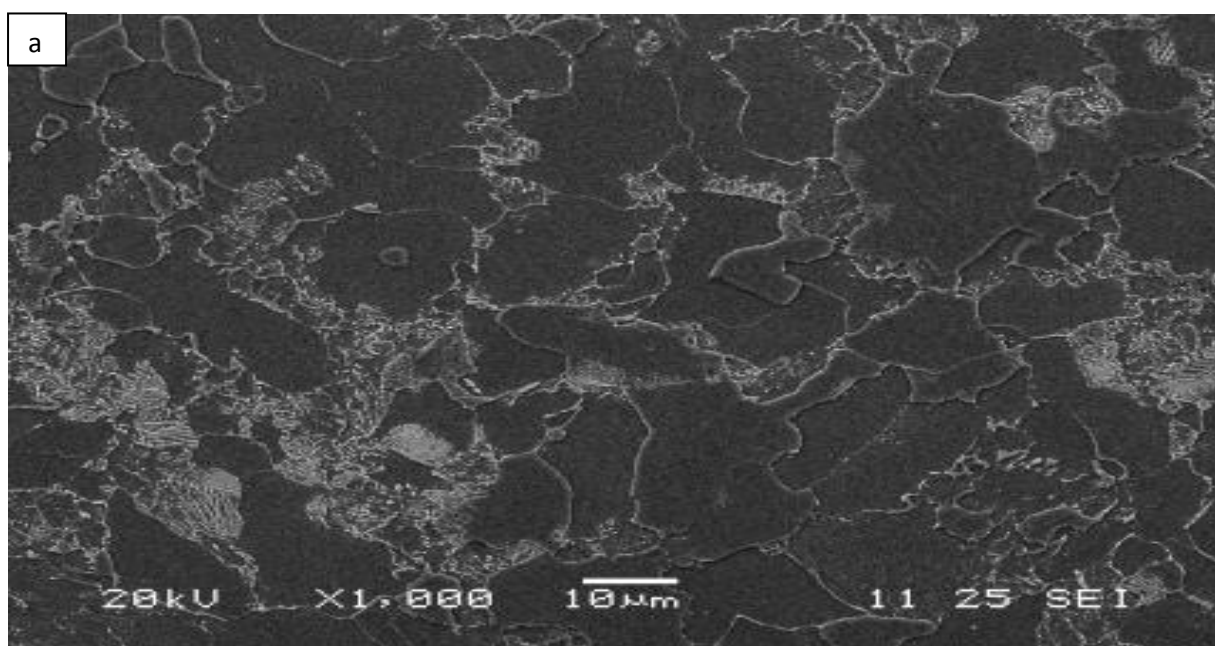


Figure IV.8.2 : Microstructures (MEB) de l'acier doux après usinage par la vitesse $V_2 = 30$ m/min. a : cœur, b : bord.



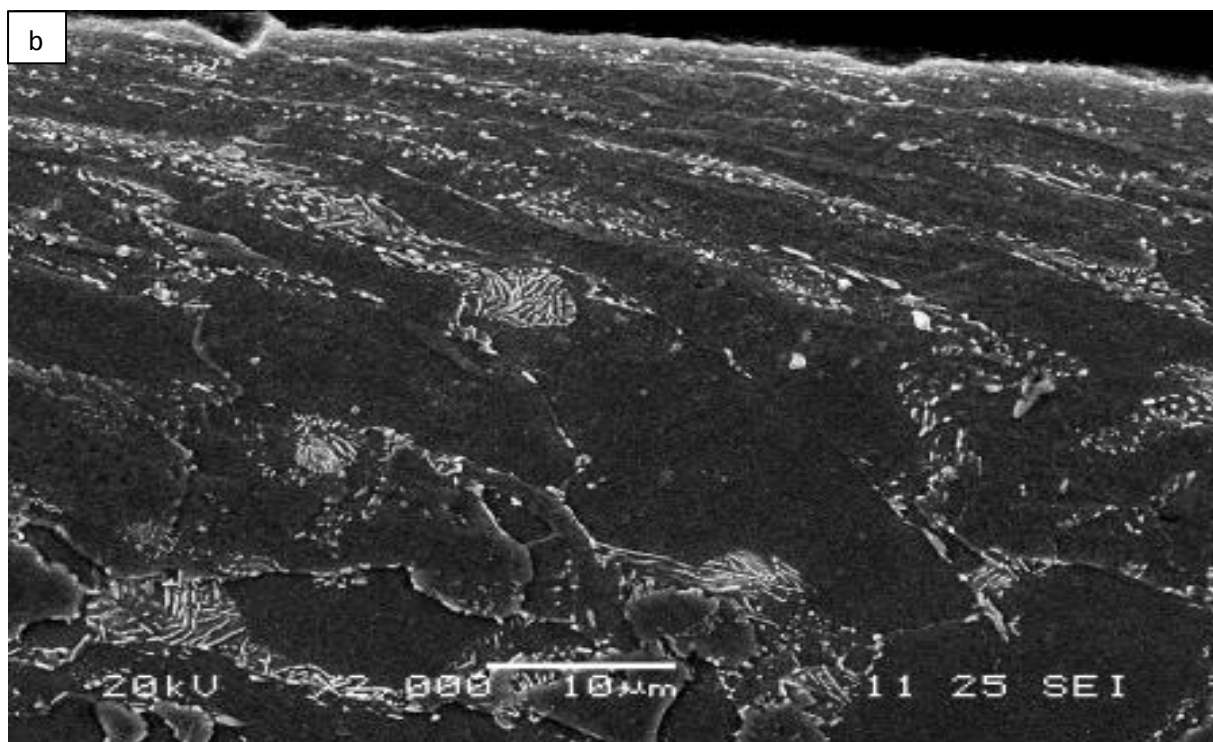
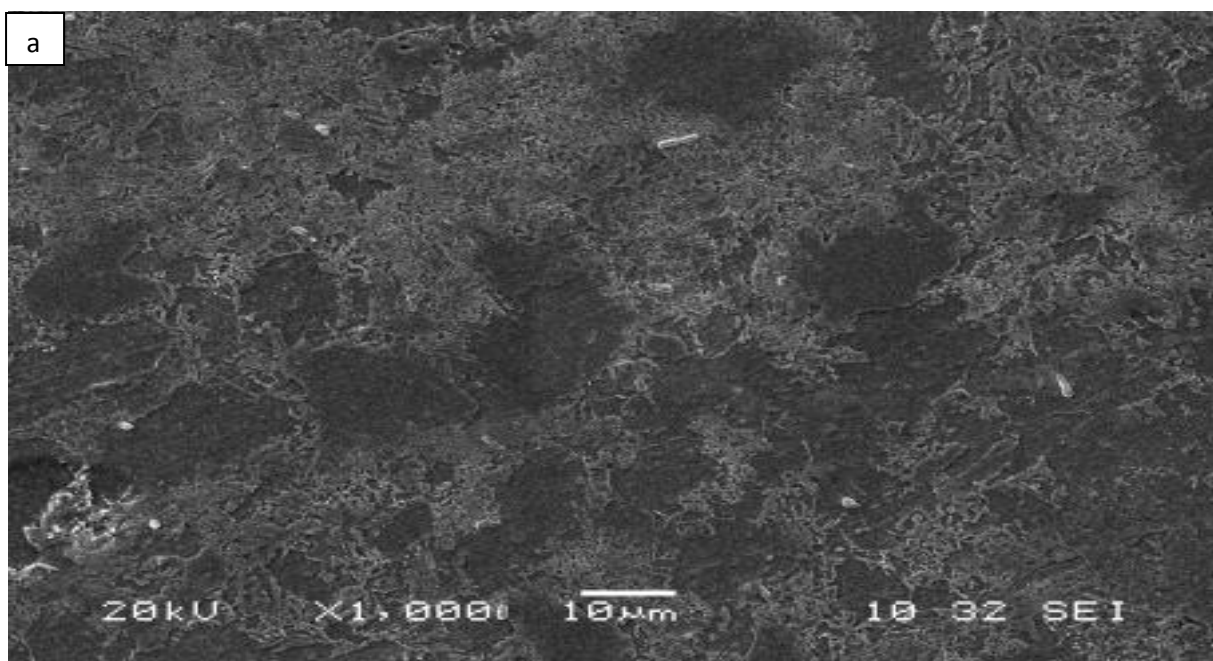


Figure IV.8.3 : Microstructures (MEB) de l'acier doux après usinage par la vitesse $V_3 = 40$ m/min. a : cœur, b : bord.



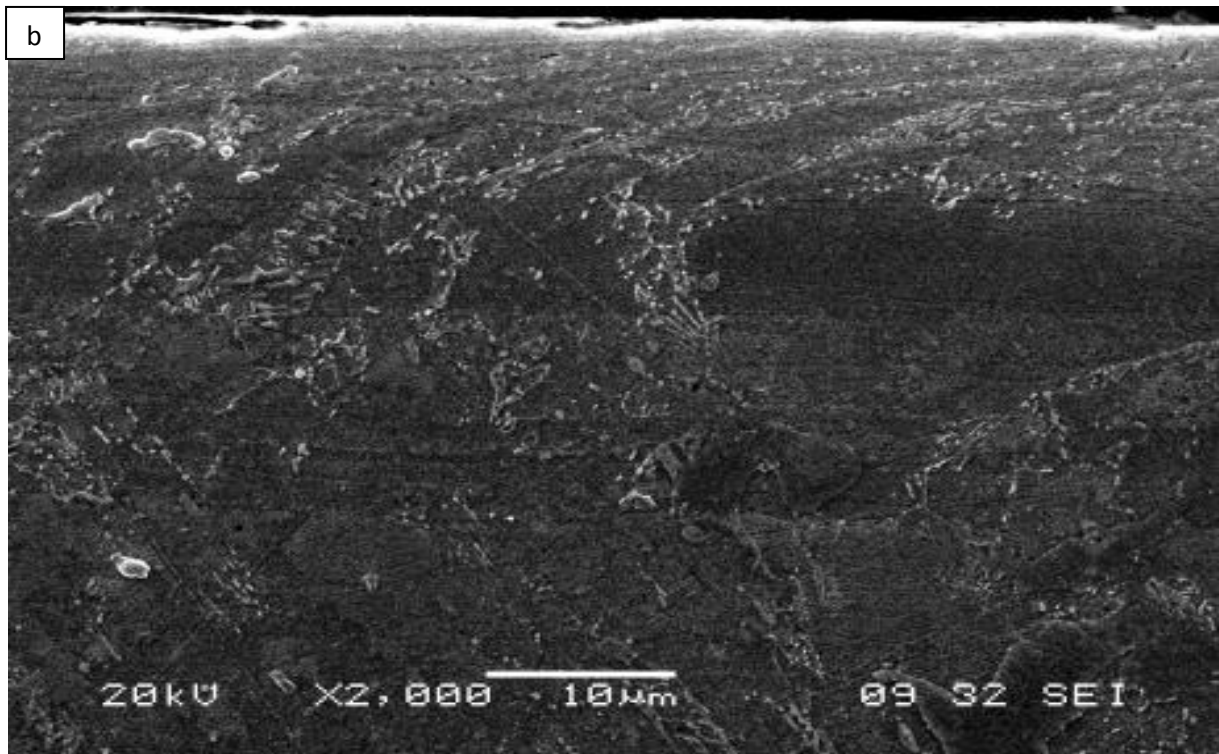


Figure IV.8.4 : Microstructures (MEB) de l'acier doux après usinage par la vitesse $V_4 = 60$ m/min.

IV.5. Caractérisation par micro dureté Knoop

L'essai de dureté est l'approche habituelle pour déterminer les propriétés des différentes zones dans un matériau. Notre but est de voir la profondeur de la zone affectée de chaque échantillon usiné (fig. IV.9. 1- 4). Après les différents tests de microdureté on a remarqué que les valeurs de la dureté ne sont pas les mêmes du bord au centre de l'échantillon usinée. Ces valeurs reflètent l'état microstructural de la zone affectée par usinage. Globalement, la valeur maximale de la dureté est enregistrée dans la zone la plus proche de la surface usinée.

Plusieurs travaux ont étudié l'influence de l'usinage sur le phénomène d'écrouissage, ces travaux ont montré. Que la dureté maximale se trouve à la surface et diminue rapidement avec la profondeur au dessous de la surface. Il a été trouvé que l'écrouissage de la surface durant l'usinage augmente avec [7] :

- L'augmentation de l'épaisseur de copeau non déformé,
- La diminution de l'angle de coupe,
- La diminution de l'angle de dépouille,
- La diminution de l'usure de la surface de dépouille,

Mais pour notre matériau, ce durcissement est du à l'écrouissage de la zone juste au dessous de la surface usinée. On a noté aussi que l'échantillon usiné à forte vitesse de coupe présente la plus grande valeur de dureté à la surface (2000 HKN) comme il est montré dans la figure IV.9.4.

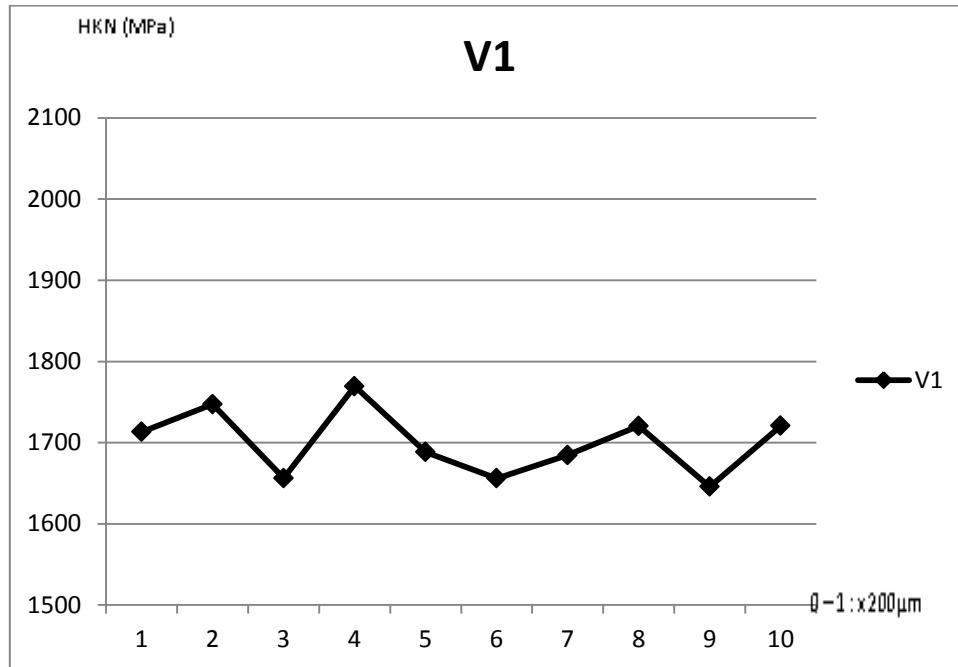


Figure IV.9.1 : Le profil de la microdureté du bord vers le cœur d'échantillon usinée par **V₁**.

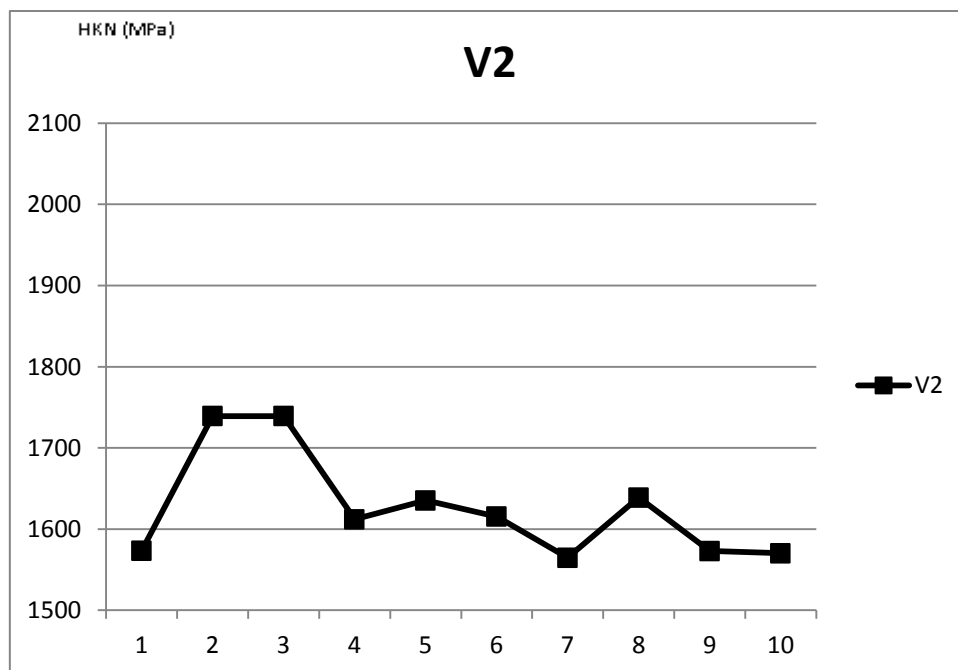


Figure IV.9.2 : Le profil de la microdureté du bord vers le cœur d'échantillon usinée par **V₂**.

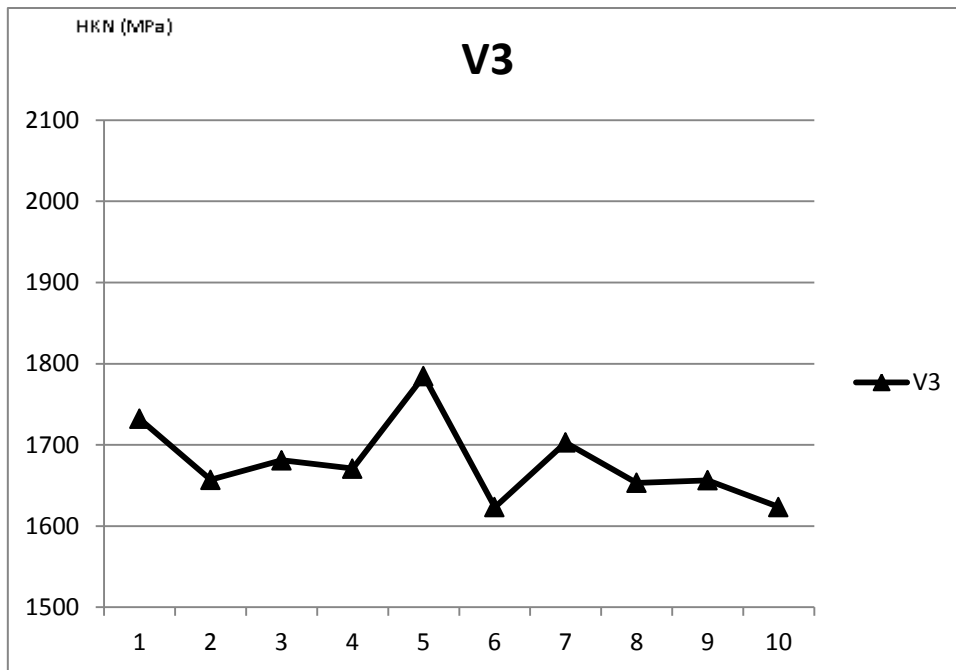


Figure IV.9.3 : Le profil de la microdureté du bord vers le cœur d'échantillon usinée par V_3 .

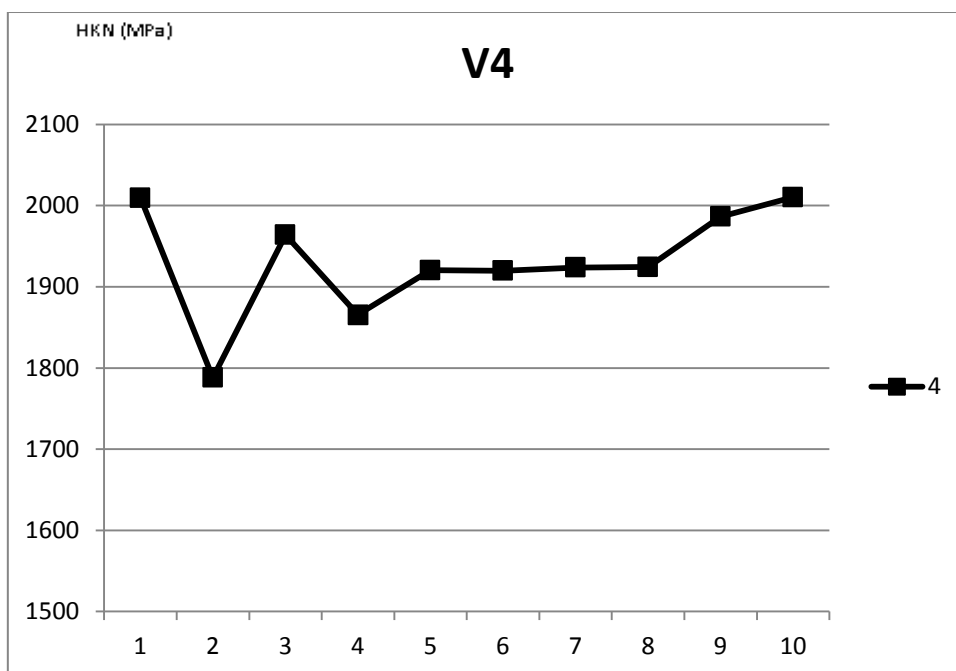


Figure IV.9.4 : Le profil de microdureté du bord vers le cœur d'échantillon usinée avec la vitesse V_4 .

La figure 10, rassemble les différentes courbes de microdureté obtenues et qui montre clairement l'effet de la vitesse d'usinage sur le profil de dureté.

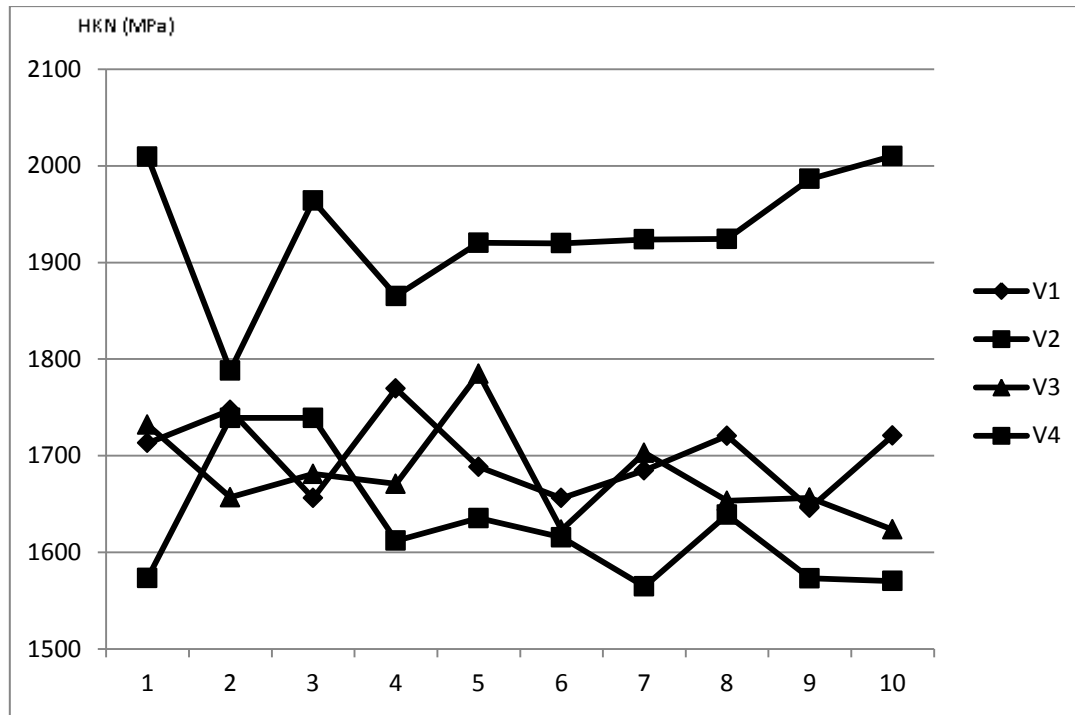


Figure IV.10 : Les différentes courbes de microdureté du bord vers le cœur des échantillons usinés avec différentes vitesses de coupes V_1 , V_2 , V_3 , V_4 .

IV.6. Caractérisation par rugosimètre

Beaucoup d'études ont constaté que pour différents matériaux, les conditions de coupe et particulièrement la vitesse de coupe et l'avance affectent la rugosité. L'utilisation d'une vitesse de coupe élevée permet d'améliorer la rugosité. Un autre facteur des conditions de coupe intervenant sur la rugosité est l'avance. On observe qu'une augmentation de cette dernière entraîne une augmentation de la rugosité. L'usure d'outil peut aussi jouer un rôle sur la rugosité.

Pour cette partie d'étude, la rugosité a été mesurée seulement sur les échantillons usinés à différentes vitesses de coupe pour voir comment l'état de surface a été affectée par l'effet d'usinage. D'après la figure IV.11, on constate que la rugosité augmente avec la vitesse d'usinage puis elle diminue. On peut dire que l'état de surface s'améliore avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Il a été trouvé que pour des vitesses de coupe importantes, le profil de la pièce est très voisin de l'enveloppe théorique de l'outil. Une vitesse optimale est observée pour divers couples outils matériau travaillé [14]. Pour des vitesses inférieures, il se produit

des adhérences de copeaux, le détachement se produit de façon irrégulière et diminue la qualité de la surface obtenue [13]. Nos présents résultats sont en accord avec nos observations microscopiques des surfaces usinées.

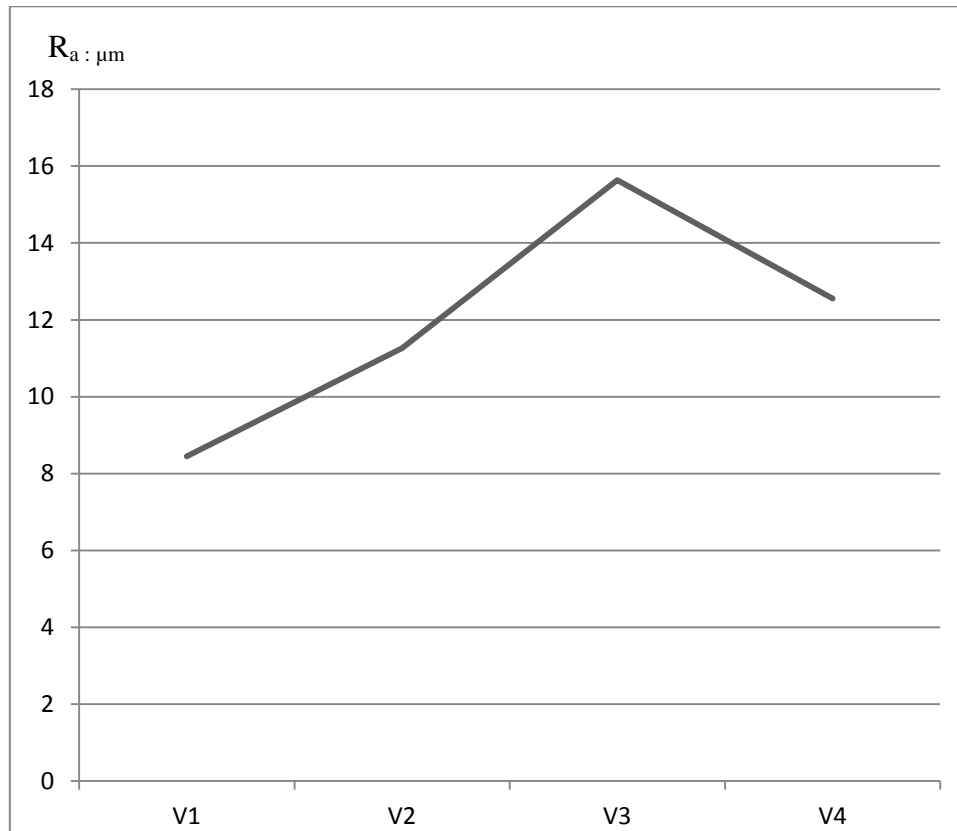


Figure IV.11 : Courbe de variation de la rugosité R_a : en μm en fonction de la vitesse d'usinage V_c .

IV.7. Analyse des contraintes résiduelles

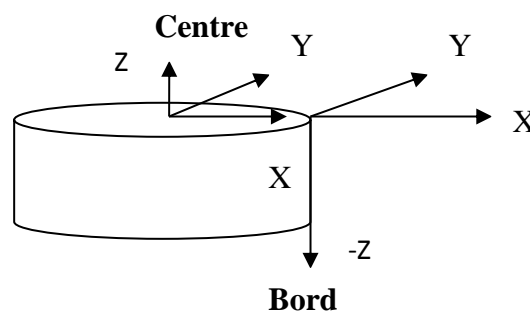
Lorsqu'un matériau est soumis à un chargement continu et sans défauts, n'est jamais parfaitement continu et présente des hétérogénéités de déformation à différentes échelles. Certaines de ces déformations ne vérifient pas les équations de compatibilité et sont compensées par des déformations élastiques qui subsistent même en l'absence de sollicitations extérieures. Ces déformations élastiques sont reliées à des contraintes appelées contraintes résiduelles. Les contraintes résiduelles sont des contraintes multiaxiales statiques qui existent dans un système non soumis à des forces et moments extérieurs et qui se trouve en équilibre mécanique. Ces contraintes peuvent être d'origine thermique, mécanique, métallurgique ou une combinaison de ces aspects [8].

L'état de contraintes résiduelles résulte de la superposition de ces trois ordres de contraintes. Cette décomposition a pour intérêt de montrer que toute hétérogénéité de déformation introduite à toute échelle de la structure entraîne l'existence de contraintes internes résiduelles. On divise habituellement les échelles des contraintes suivant deux niveaux :

- Les macro-contraintes : contraintes d'ordre 1.
- Les micro-contraintes : contraintes d'ordre 2 et 3.

Les macro-contraintes s'obtiennent en mesurant le déplacement de la raie diffraction correspondant à une distance interréticulaire différente de celle du matériau détentionné libre de toute contrainte. La détermination des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X utilise alors la distance interréticulaire d_{hkl} entre deux plans cristallins comme jauge de déformation.

Pour notre cas, on a mesuré les contraintes résiduelles au bord et au centre de l'échantillon et selon deux directions perpendiculaires X et Y (Fig IV.12).



Figures IV.12 : Schéma descriptif des zones étudiées par DRX.

Les résultats de mesure des contraintes résiduelles formées dans l'acier XC18 après les différentes vitesses de coupe par tournage sont présentés dans les figures IV.13.1 et IV.13.4. Globalement, on remarque que les contraintes résiduelles augmentent avec la vitesse de coupe. L'effet de traitement sur l'état de contrainte est très visible, car il y'a une diminution de ces contraintes. On peut dire qu'on a adoucissement de la surface usinée.

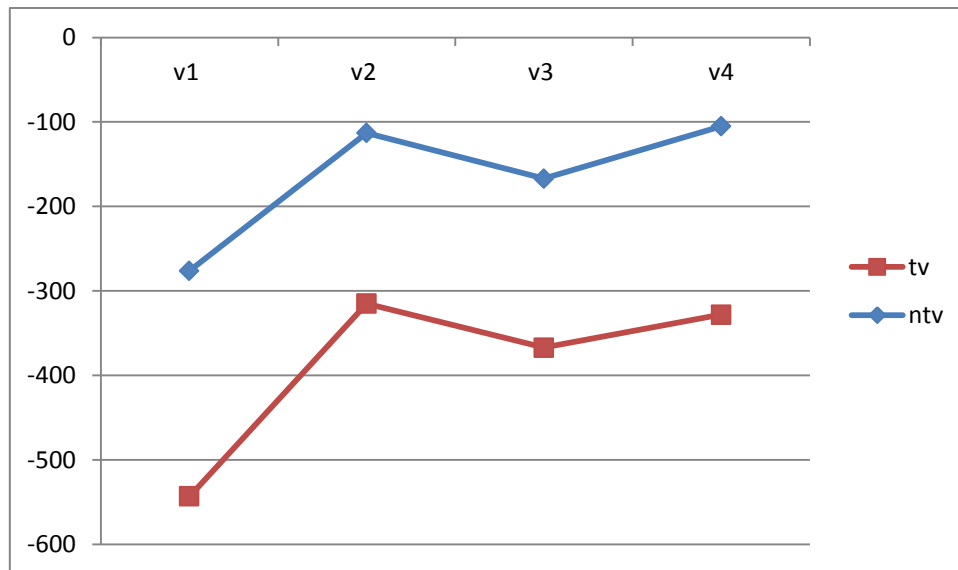


Figure IV.13.1 : Courbe de variation de contrainte résiduelle σ_1 La contrainte au bord dans la direction x ou (σ_x du bord), σ_1 : La contrainte du bord de l'échantillon dans la direction X ou (σ_x du bord).

Pour le cœur de l'échantillon, les contraintes résiduelles augmentent jusqu'à la vitesse V_3 puis diminuent figure IV.13.1. De même, l'effet de recuit à 300°C pendant 1 heure est a été observé ou une différence de valeur entre les échantillons usinés sans recuits et les échantillons usinés suivis par un recuit à 300°C. On a une atténuation remarquable des contraintes résiduelles après ce traitement thermique.

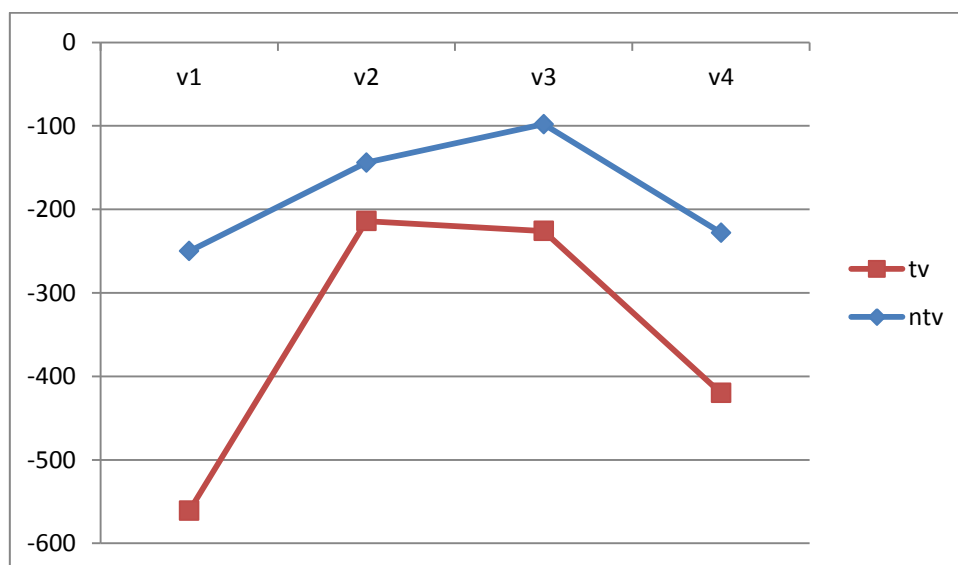


Figure IV.13.2 : Courbe de variation de contrainte résiduelle σ_1 La contrainte au bord dans la direction Y ou (σ_Y du bord), σ_1 : La contrainte du bord de l'échantillon dans la direction Y ou (σ_y du bord).

Même phénomène se reproduit pour le centre de l'échantillon de l'échantillon figure IV.12.

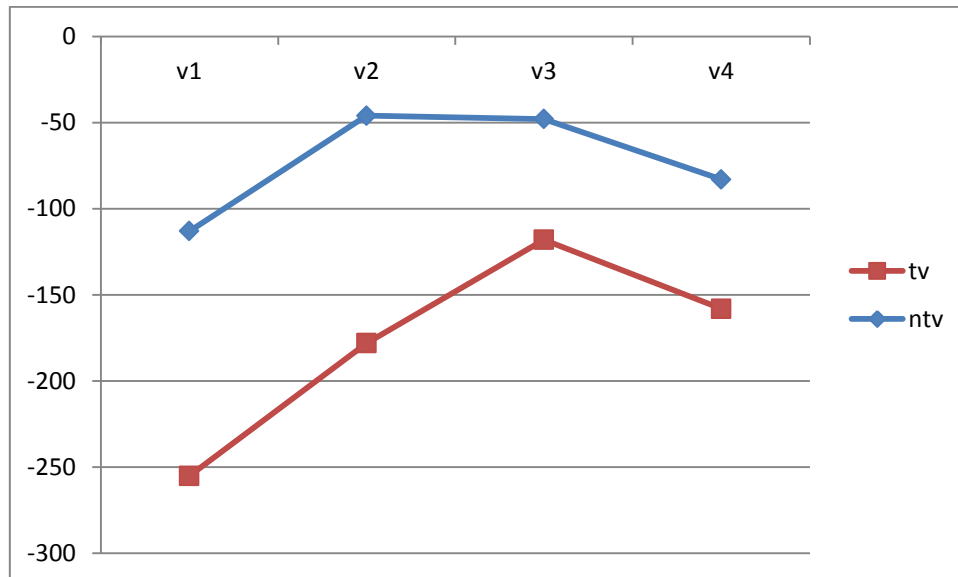


Figure IV.13.3 : Courbe de variation de contrainte résiduelle σ_2 La contrainte au centre dans la direction X ou (σ_x du centre), σ_2 : La contrainte dans le centre de l'échantillon dans la direction X ou (σ_x du centre).

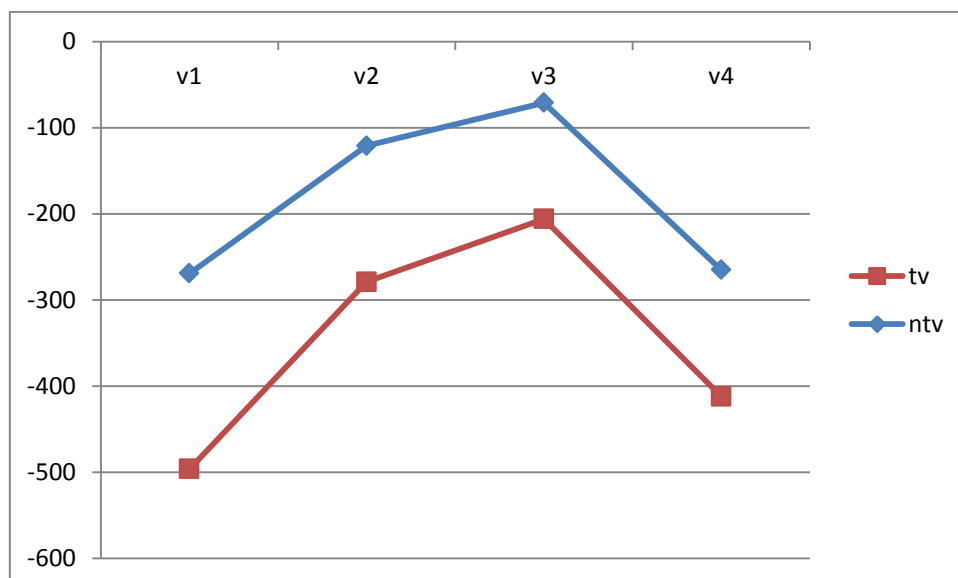
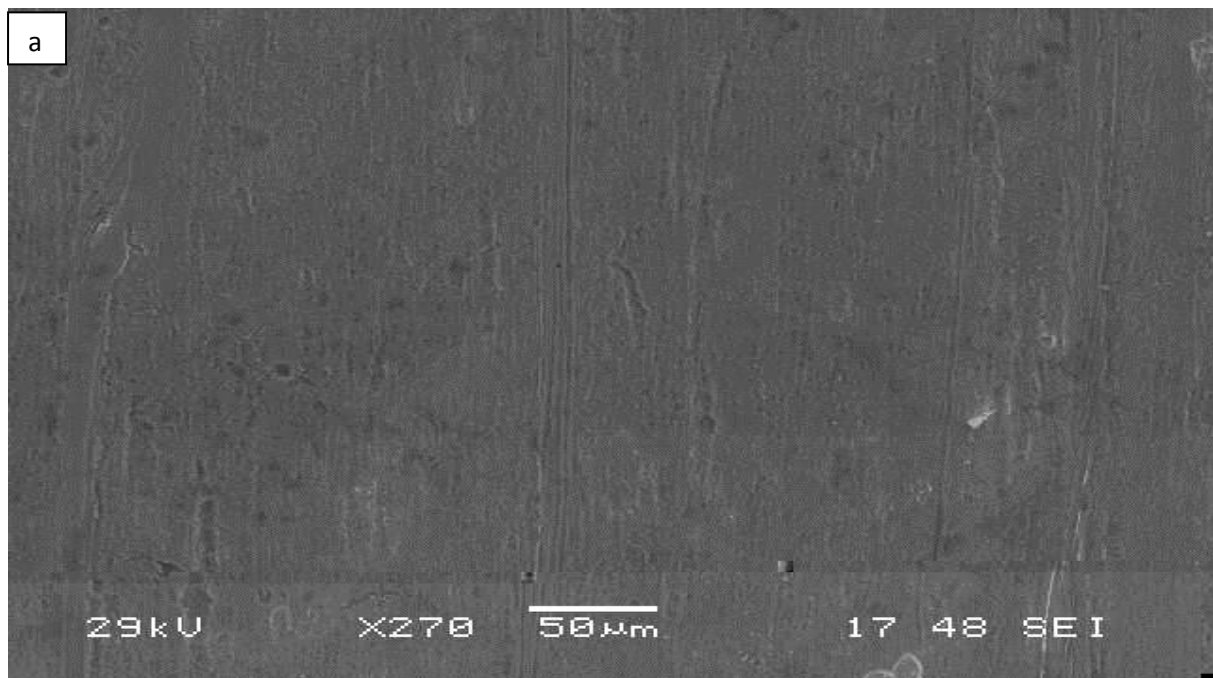
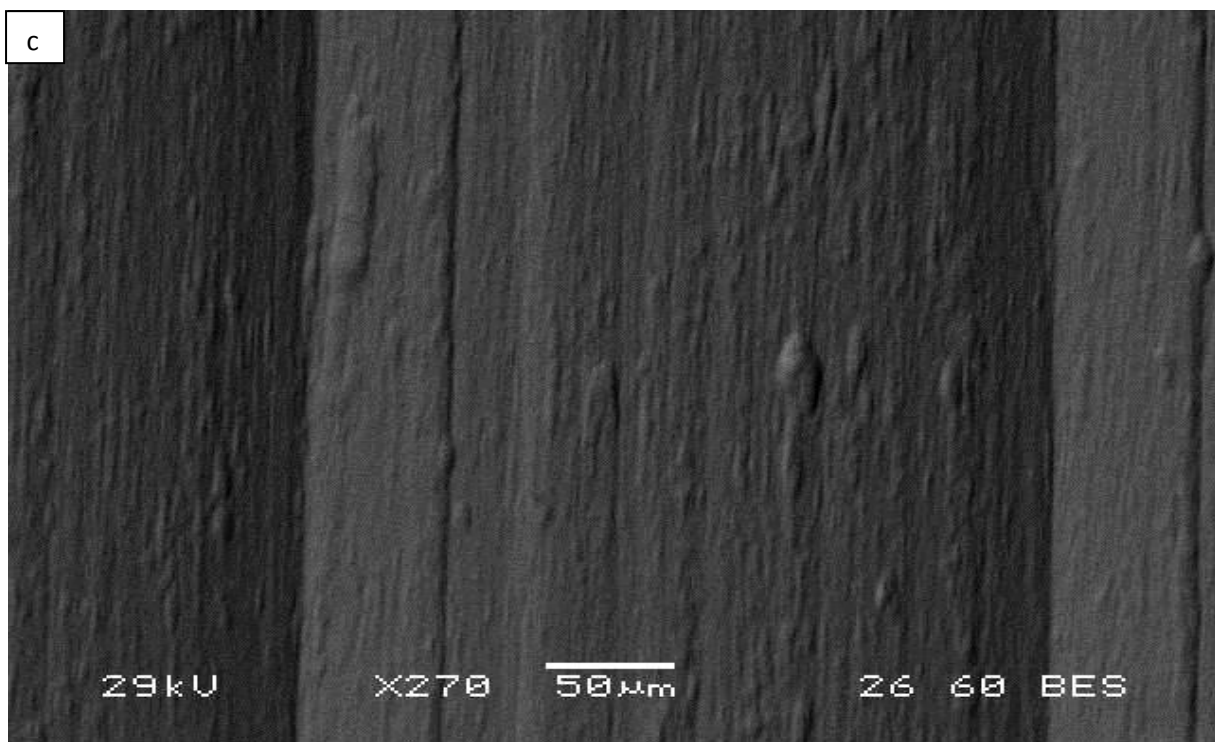
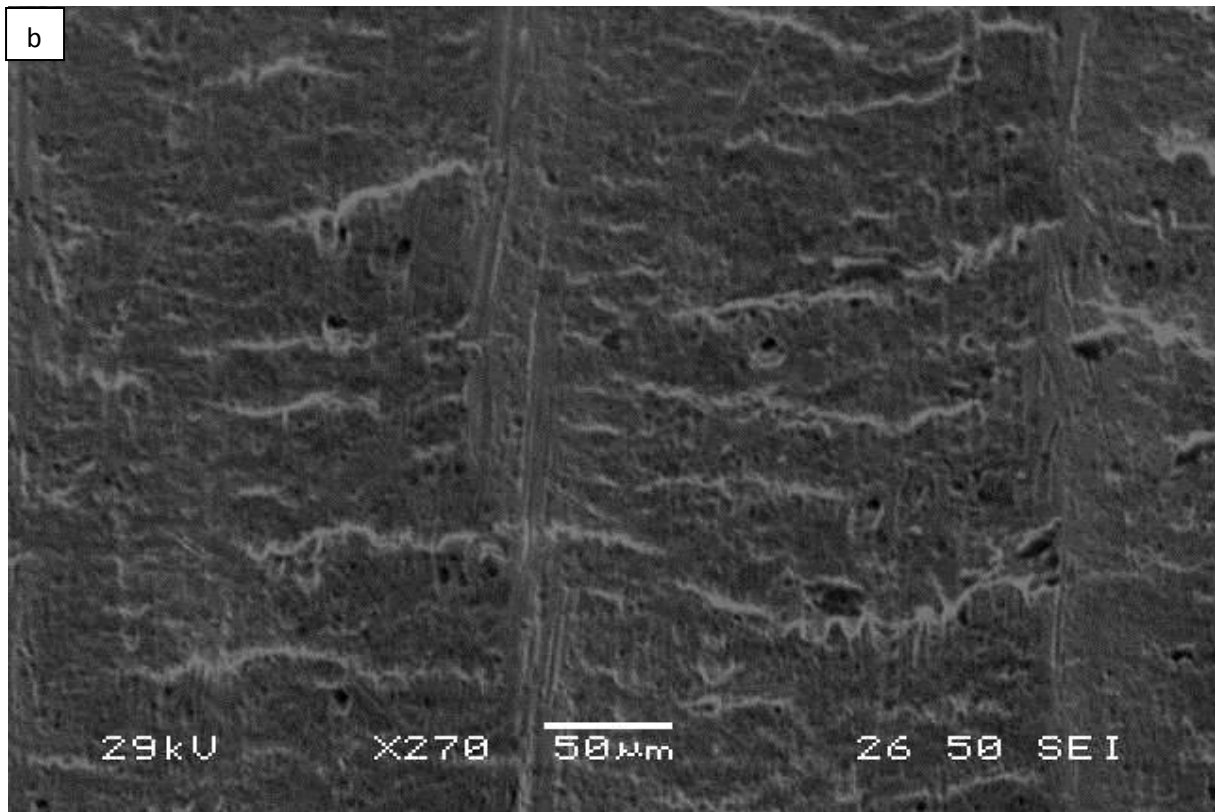


Figure IV.13.4 : Courbe de variation de contrainte résiduelle σ_2 La contrainte au centre dans la direction Y ou (σ_y du centre), σ_2 : La contrainte dans le centre de l'échantillon dans la direction Y ou (σ_y du centre).

IV.8. Morphologie de la surface usinée et analysée par le MEB :

Dans cette partie d'étude, on présente la morphologie de la surface usinée et ceci en fonction de la vitesse de coupe comme il est illustré dans la (figure IV. 14 et figure IV. 15). La figure IV. 14, montre l'évolution de la morphologie de la surface en fonction de la vitesse de coupe V_1 , V_2 , V_3 , V_4 pour un faible agrandissement (270 X). Globalement, on remarque une différence de l'état de surface, où la surface est affectée ce procédé d'usinage (Fig. IV.15 d), car on remarque la formation des cavités de différentes tailles. La (figure IV. 14) montre aussi l'évolution de l'état de surface en fonction de la vitesse de coupe mais pour un fort agrandissement au MEB (110 X). Les photos prises montrent plus de détails sur la dégradation de l'état de surface de notre acier usinée à différentes vitesses, car on peut observer la formation de plusieurs cavités et même la trace de l'outil surtout pour la grande vitesse de coupe (Fig. IV. 15). On note qu'avec l'augmentation de la vitesse de coupe et de l'avance, la température augmente dans la zone de coupe ce qui accélère le processus de l'usure et par conséquent la tenue diminue [15] [16].





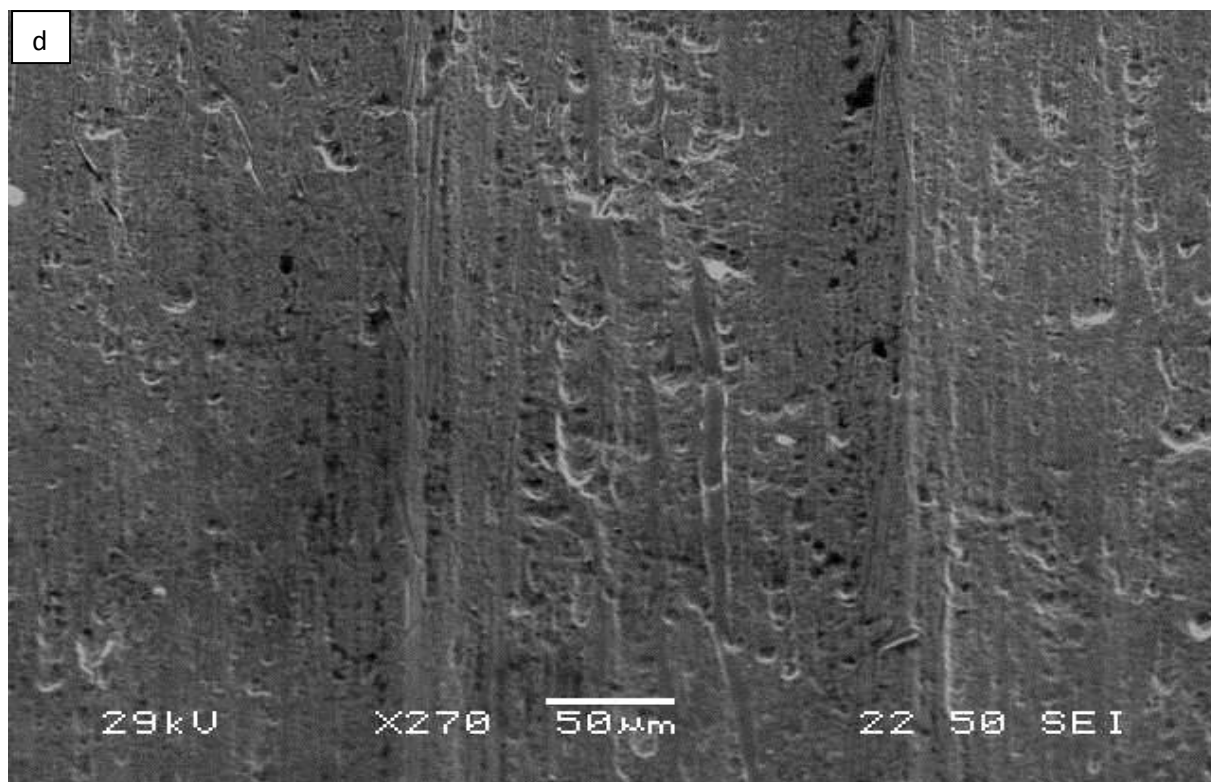
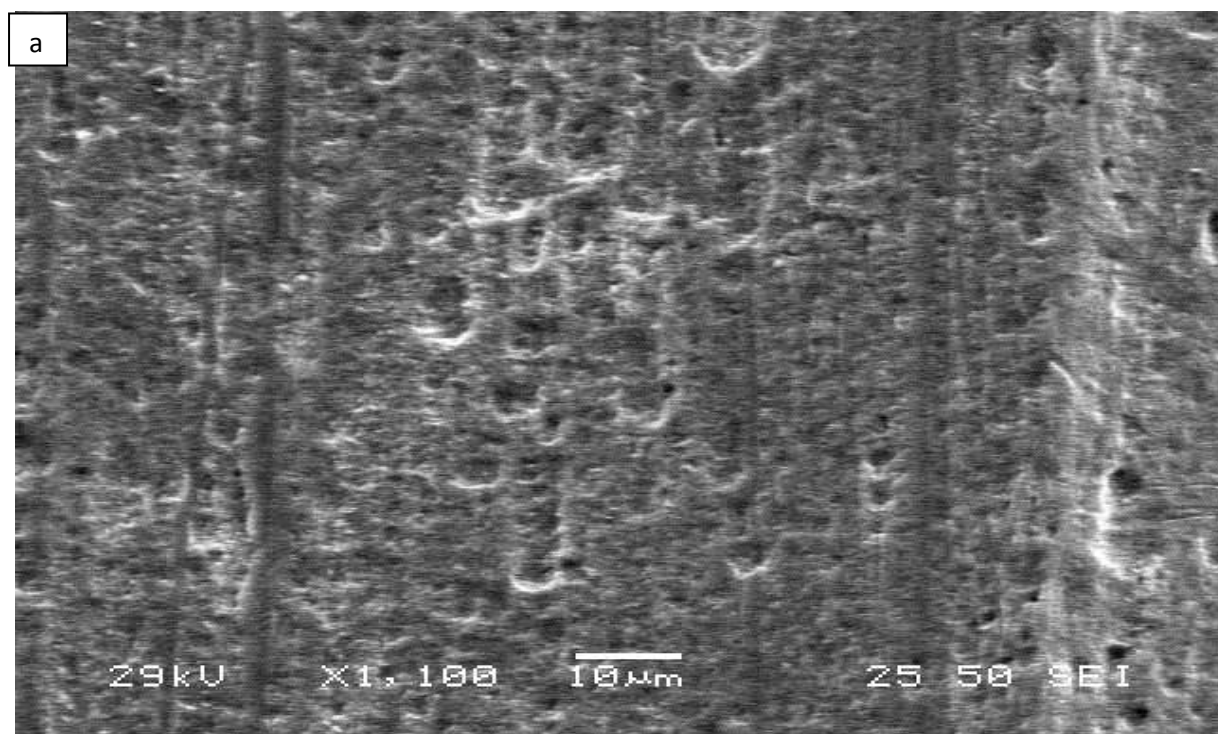
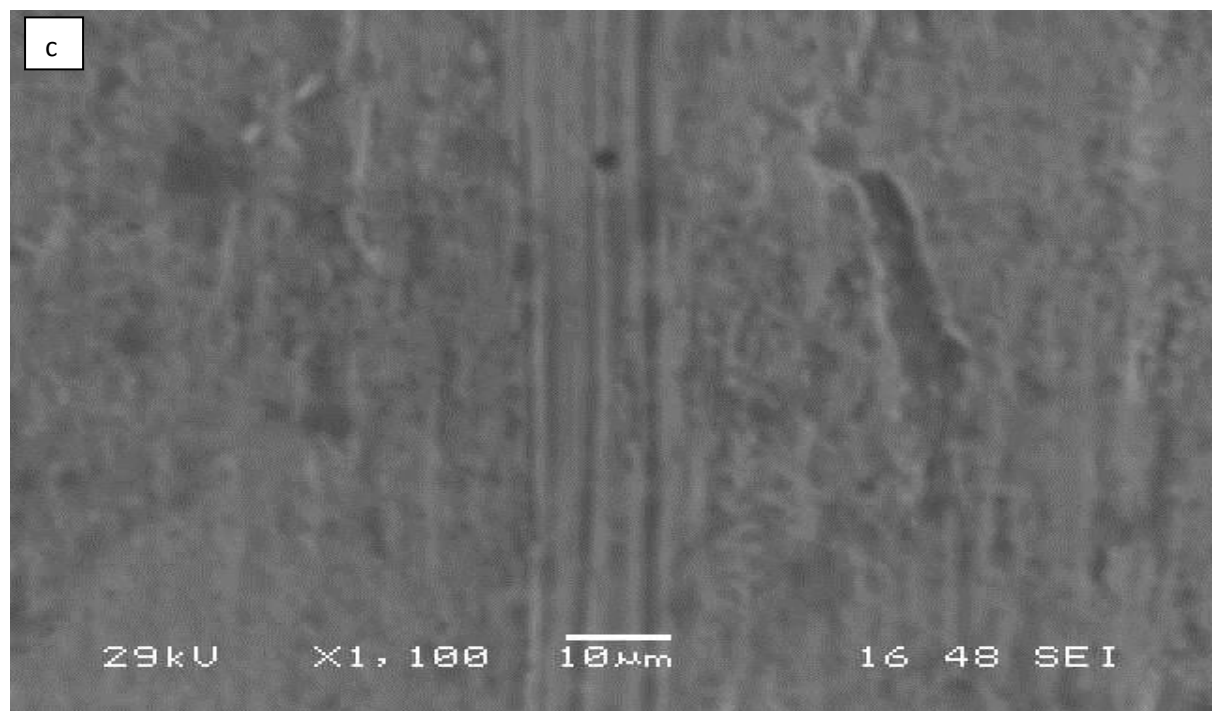
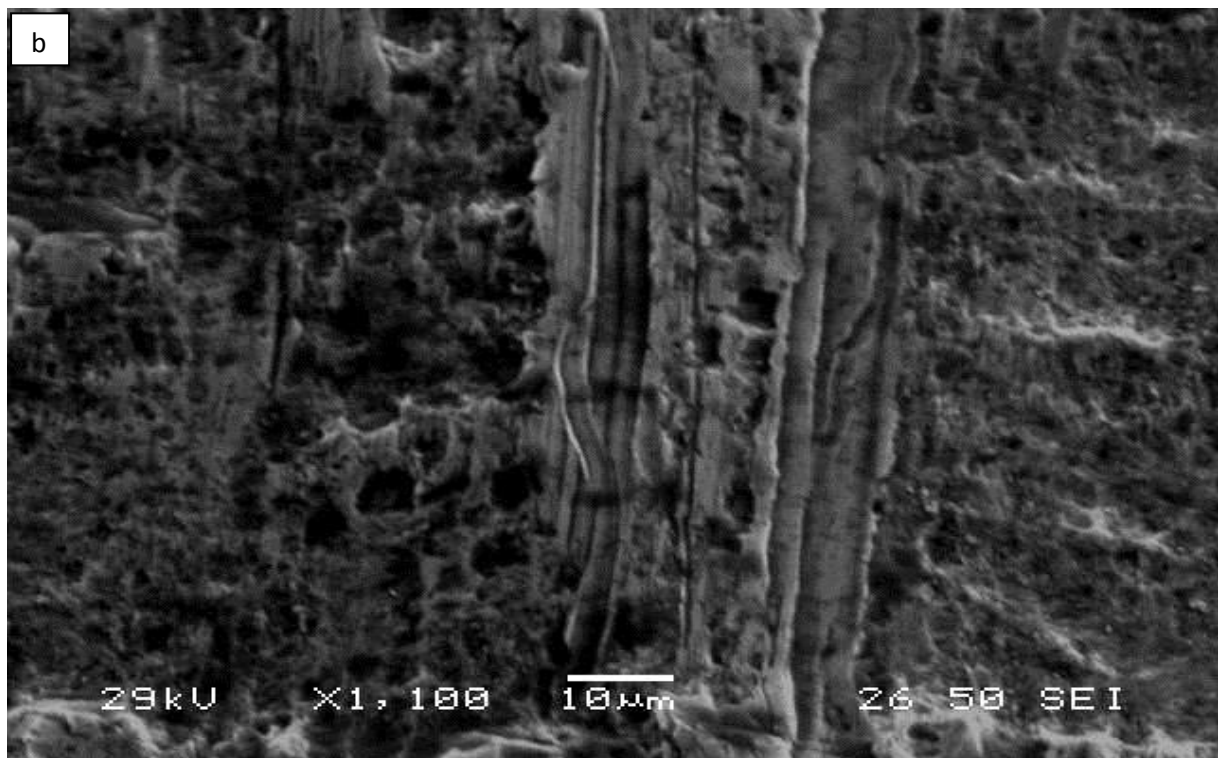


Figure IV. 14 : Evolution de l'état de surface observée par le MEB pour les différentes vitesses de coupes.

- a) $V_1 = 20$ m/min. b) $V_2 = 30$ /min.
b) $V_3 = 40$ tours/min. d) $V_4 = 60$ tours/min.
(Grandissement $G = 270x$).





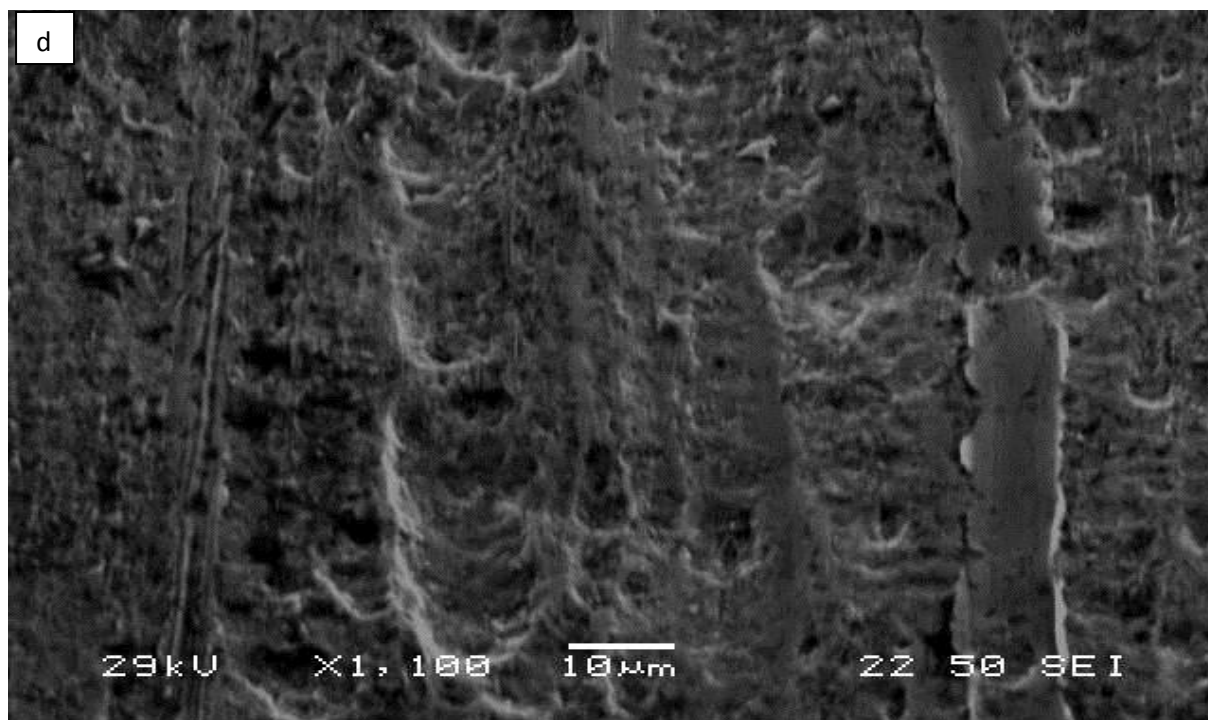


Figure IV. 15 : Evolution de l'état de surface observée par le MEB pour les différentes vitesses de coupes.

- a) $V_1 = 20$ m/min. b) $V_2 = 30$ m/min.
b) $V_2 = 40$ m/min. d) $V_3 = 60$ m/min.
(Grandissement $G = 1100x$).

IV.9. Comportement de l'état de surface lors d'une corrosion agressive :

Les figures IV. 16 et IV. 17 montrent l'état de surface des deux échantillons usinés à deux vitesses de coupe (V_1 et V_4) et qui ont subi un test de corrosion après avoir été plongés dans un bain d'eau de mer pendant juste 48 heures. On remarque que le déclenchement de la corrosion est favorisé par les microfissures qui se sont formées lors de l'usinage à faible vitesse de coupe (Fig. IV. 16). Par contre la corrosion est lente pour l'échantillon qui a été usinée avec une grande vitesse (Fig. IV.17).

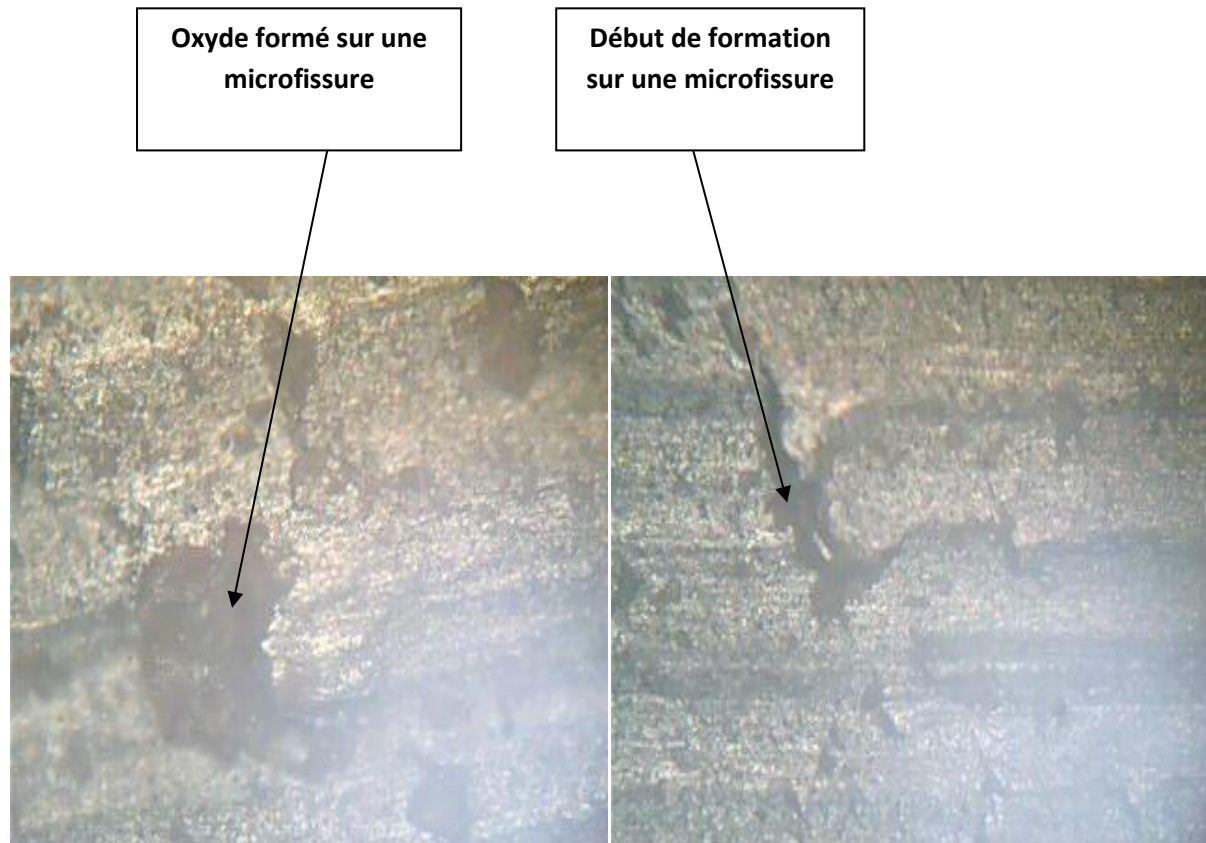


Figure IV. 16 : Microstructure de la surface usinée après le test de corrosion agressive de l'acier XC18 usiné avec une vitesse V_1 (20 m/min) puis immergé dans l'eau de mer pendant 48 heures.



Figure IV. 17 : Microstructure de la surface usinée après le test de corrosion agressive de l'acier XC18 usiné avec une vitesse V4 (60 m/min) puis immergé dans l'eau de mer pendant 48 heures.

IV.10. Références :

- [17] A. Mondelin, Modélisation de l'intégrité des surfaces usinées application au cas du tournage finition de l'acier inoxydable 15-5PH, Thèse de l'Université de Lyon.
- [3] B.J, Griffiths, 1987. Mechanisms of white layer generation with reference to machining and deformation processes. Volume 109, pp. 525-530, 1987.
- [37] J.G Li, Umemoto, M., Todaka, Y., Tsuchiya, K., 2007. A microstructural investigation of the surface of a drilled hole in carbon steels. *Acta Materialia*, Volume 55, pp. 1397-1406.
- [38] C.Z Duan, L.C, Zhang, 2012. Adiabatic shear banding in AISI 1045 steel during high speed machining: Mechanisms of microstructural evolution. *Materials Science and Engineering A*, Volume 532, pp. 111- 119.
- [39] S. Han, Melkote, M. Haluska, T. Watkins, 2008. White layer formation due to phase transformation in orthogonal machining of AISI 1045 annealed steel. *Materials Science and Engineering A*, Volume 488, pp. 195-200.
- [40] Y. K. Chou, C. J. Evans, 1999. White layers and thermal modeling of hardturned surfaces. *International journal of machining tools and manufacture*, Volume 39, pp. 1863-1881.
- [41] A. Brosse, H. Hamdi, J.M. Bergheau, 2008. A numerical study of phase transformation during grinding. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, Volume 4, pp. 148-157.
- [42] A. Ramesh, S.N. Melkote, L.F. Allard, L. Riester, , T.R. Watkins, 2005. Analysis of white layers formed in hard turning of AISI 52100 steel. *Materials Science and Engineering A*, Volume 390, pp. 88-97.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail de recherche consistait à étudier l'effet d'usinage par tournage sur un acier XC18.

Plusieurs vitesses d'usinage ont été adoptées afin de voir leurs effets sur l'état de surface de l'acier XC18 et aussi le comportement mécanique de la zone proche de la surface usinée.

Pour aboutir à notre objectif, plusieurs techniques ont été utilisées, comme la microscopie optique et électronique, la diffraction des rayons X, la microdureté et la mesure de la rugosité.

Nos principaux résultats sont :

- L'augmentation de la vitesse d'usinage affecte considérablement la microstructure de la zone proche de la surface usinée, où une ré-orientation des grains a été observée, avec la formation d'une zone blanche pour les fortes vitesses d'usinage. Cette couche blanche a été aussi par trouver par certains chercheurs mais dans d'autres types d'acier.
- Enregistrement d'un profil de microdureté non homogène de la surface de la pièce usinée jusqu'au son cœur ce qui reflète l'hétérogénéité mécanique de la zone affectée par l'usinage.
- La rugosité de la surface usinée est influencée par la vitesse d'usinage, où on a remarqué que la meilleure rugosité est obtenue par une vitesse d'usinage égale à 1100 tr/min.
- L'usinage provoque la formation des contraintes résiduelles. Ces contraintes résiduelles augmentent avec la vitesse de coupe.
- L'état de surface affectée par la vitesse d'usinage a un effet sur le comportement à la corrosion de la surface de l'acier usinée. On n'a constaté que les microfissures formées après usinage à faible vitesse de coupe sont le siège de début de la corrosion de l'acier XC18.
- Le traitement thermique appliqué sur les échantillons usinés :
 - Ne provoque pas un changement microstructural.
 - Diminue la valeur des contraintes résiduelles.

Perspectives :

- Usinage avec d'autres vitesses de coupe plus élevées.
- Caractérisation approfondie de la couche blanche.
- Application d'autres traitements thermiques à des températures supérieures à 300 °C