

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université BADJI Mokhtar - Annaba
BADJI Mokhtar – Annaba UNIVERSITY



جامعة باجي مختار
عنابة

Faculté : De Technologie
Département : Génie Mécanique
Domaine : Science et Technologie
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Génie Mécanique

Année Universitaire
2022/2023

Mémoire
Présenté en vue de l'obtention du diplôme
Doctorat en LMD

**Etude comparative de l'effet des conditions de coupe sur la
durée de vie des forets en ARS lors de l'usinage de l'acier
C35 trempé et non trempé**

Présenté par : *Mr. AFIF Fouad*

Directeur de la thèse : *Dr. MOKAS Nacer MCA U.B.M Annaba*

Co-Directeur de la thèse : *Pr. BOULANOUAR Lakhdar U.B.M Annaba*

DEVANT LE JURY

<i>LAGRED Ahmed</i>	<i>Pr</i>	<i>U.B.M Annaba</i>	<i>Président</i>
<i>MOKAS Nacer</i>	<i>MCA</i>	<i>U.B.M Annaba</i>	<i>Encadrant</i>
<i>BOULANOUAR Lakhdar</i>	<i>Pr</i>	<i>U.B.M Annaba</i>	<i>Co-encadrant</i>
<i>BENCHIHEUB Slimane</i>	<i>MCA</i>	<i>U.B.M Annaba</i>	<i>Examineur</i>
<i>GUEDRI Abdel Moumen</i>	<i>Pr</i>	<i>U. M.C.M Souk Ahras</i>	<i>Examineur Membre invité</i>
<i>TOURAB Mohamed</i>	<i>MCA</i>	<i>U.M.B BOUMERDES</i>	<i>Examineur Membre invité</i>

REMERCIEMENTS

En premier je remercie mon DIEU tout puissant qui m'a octroyé la force et le temps pour venir à terme de ce travail.

À mes parents que je ne pourrais jamais remercier pour tout ce qu'ils ont fait pour moi. À ma petite famille, ma femme Lylia et mes deux enfants Maya et Mohamed Cherif.

Ce travail a été réalisé aux Ateliers Maghrébin Mécanique AMM-Sider El Hadjar, Annaba et au Laboratoire de Recherche des Technologies Avancées en Production Mécanique (LRTAPM) de l'université d'Annaba sous la direction du Dr. MOKAS Nacer et le professeur BOULANOUAR Lakhdar, que je les remercie chaleureusement pour m'avoir orienté à mener à terme ce travail.

Je tiens aussi à remercier les membres du jury

- Pr. LAGRED Ahmed
- Dr. MOKAS Nacer
- Pr. BOULANOUAR Lakhdar
- Dr. BENCHIHEUB Slimane
- Pr. GUEDRI Abdel Moumen
- Dr. TOURAB Mohamed

Je remercie le professeur AMIRAT Abdelaziz et le docteur Slimane BENCHIHEUB, pour leurs soutient et encouragements.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux responsables des Ateliers Maghrébins Mécanique AMM-SIDER EL HADJAR pour leurs coopérations.

Mes vifs remerciements vont aussi aux membres de ma grande famille qu'ils trouvent ici mes profondes reconnaissances.

Je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'élaboration de cette thèse.

ملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير عناصر نظام القطع على تآكل حواف قطع المثقاب المصنوع من الفولاذ العالي السرعة (HSS) عند ثقب الفولاذ C35 قبل وبعد السقاية.

تم إجراء دراسة تجريبية باستخدام منهجية تجربة التخطيط (L8) على الفولاذ C35 في الحالات اللدنة والصلبة. العناصر المؤثرة هي عناصر نظام القطع، والمتمثلة في سرعة القطع (Vc)، ومعدل التغذية (f)، وقطر المثقب (D)، وفقاً لمستويين حد أدنى وحد أقصى، في حين أن معلمات الخروج هي تآكل الأداة المرتبط بعمرها. الظاهرة الأكثر إثارة للاهتمام هي التأثير المثير للجدل لسرعة القطع عند ثقب الفولاذ C35 في حالته الصلبة حيث يزداد عمر المثقاب مع زيادة هذه الأخيرة مع مختلف أنظمة القطع (من 1 إلى 8). بالإضافة إلى ذلك، فإن المثقاب بقطر 20 مم والمتعلق بالقيمة العالية لعمق القطع (ap) قد أعطى حياة أفضل قبل وبعد التصليب، على عكس الأدبيات المتعلقة بالقطع ويعمر أدوات القطع. أظهر تحليل التباين (ANOVA) أن معدل التغذية (f) هو العامل الأكثر أهمية في الحالة اللدنة بينما في الحالة الصلبة فهو عمق القطع (ap). معاملات الارتباط R² التي حددتها ANOVA قبل وبعد السقاية مرضية للغاية وتشهد على الملاءمة الجيدة للنموذج المقترح.

الكلمة المفتاح: الفولاذ C35، الثقب، مثقاب من الفولاذ العالي السرعة، نظام القطع، التصليب، التآكل، عمر الأداة.

RÉSUMÉ

Le présent travail a pour objet d'étudier l'influence des paramètres de coupe sur la durée de vie des forets hélicoïdaux en acier rapide supérieur (HSS) lors du perçage de l'acier C35. Une investigation expérimentale a été menée sur l'acier C35 à l'état recuit et trempé selon la méthode de planification des expériences (L8). Les paramètres d'entrées sont les éléments du régime de coupe selon deux niveaux minimal et maximal, le critère de réponse est la tenue du foret liée à sa durée de vie.

Le phénomène le plus intéressant est l'effet controversé de la vitesse de coupe lors du perçage de l'acier C35 à l'état trempé, la durée de vie de l'outil augmente lorsque la vitesse de coupe augmente pour les différents régimes de coupes (1 à 8). De plus, le foret de diamètre (20mm) lié à la valeur élevée de la profondeur de coupe, a donné une meilleure durée de vie avant et après trempe. Par ailleurs l'analyse de la variance ANOVA a montré que le facteur le plus significatif à l'état recuit est l'avance (f) alors qu'à l'état durci c'est la profondeur de passe (diamètre du foret). Les coefficients de détermination R^2 déterminés avant et après trempe sont très satisfaisants et témoignent de la bonne adéquation des modèles proposés.

MOTS CLES : acier C35, perçage, foret acier rapide, régime de coupe, dureté, usure, durée de vie.

Abstract

This work aims to study the influence of cutting parameters on the twist high-speed steel (HSS) drill bits wear when drilling C35 steel before and after quenching. An experimental investigation has been conducted using the planning experience methodology (L8) on C35 steel in the annealed and hardened states. The input parameters are cutting regime elements, cutting speed (V_c), feed rate (f), and drill diameter (D), while the output parameters are the tool wear related to its tool life. The most interesting phenomenon is the controversial effect of cutting speed when drilling C35 steel in hardened conditions. The drilling life increases with increasing cutting speed for different cutting regimes (1 to 8). In addition, the 20 mm diameter drill related to the high value of the depth of cut (f) has given better life before and after hardening, contrary to the literature on cutting tool life. The analysis of variance (ANOVA) has showed that the feed rate (f) is the most significant factor in the annealed state while it is the depth of cut (a_p) in the hardened state. The correlation coefficients R^2 determined by the ANOVA before, and after quenching, are very satisfactory, and testify the good adequacy of the proposed model.

Key words : C35 steel, drilling, twist (hss) drill bit, cutting parameters, hardening, wear, tool life,

Symboles et abréviations

a_p : profondeur de passe ou largeur de coupe, (mm)

f : avance, (mm/tr)

V_f : vitesse d'avance (m/min)

N : nombre de tour/ min

V_c : vitesse de coupe, (m/min ou m/s)

F_c : effort de coupe, (N)

T : tenue ou durée de vie de l'outil de coupe, (min)

α : angle de dépouille, ($^\circ$)

β : angle de frottement, ($^\circ$)

φ : angle de cisaillement, ($^\circ$)

λ : angle d'obliquité de l'arête tranchante principale [$^\circ$]

χ_r : angle de direction principale [$^\circ$]

γ : angle de coupe ou angle d'attaque ($^\circ$)

ϵ : angle de pointe ($^\circ$)

t : profondeur de passe (mm).

b : largeur du copeau (mm).

h_1 : épaisseur du copeau (mm).

r : rayon du bec de l'outil (mm).

s : le pas d'avance (mm).

S : section du copeau (mm).

KT : Usure en cratère (mm)

VB_{max} : Usure en dépouille maximale (mm)

ρ : masse volumique (kg/m^3)

σ : contrainte normale à l'interface de contact, (MPa)

τ : contrainte de cisaillement, (MPa)

E : module de Young

C_0 : célérité (vitesse d'ondes) (m/s^{-1}).

$\dot{\epsilon}_n$: la vitesse de déformation

$\sigma_{(t)}$: contrainte axiale moyenne nominale.

Q : quantité de mouvement

W : le bilan énergétique.

C35 : acier non allié à 0,37% de carbone

Fz : effort tangentiel ou effort principal de coupe (daN)

Fx : composante axiale de l'effort de coupe ou effort d'avance (daN)

Fy : composante normale de l'effort de coupe (daN).

Kc : coefficient ou pression spécifique de coupe en (daN/mm²).

E : l'énergie de coupe nécessaire à l'enlèvement du copeau (J/mm³).

Pc : puissance nécessaire à la coupe (kw).

Rp : rugosité (moyenne arithmétique) (μm).

Rmax : hauteur maximal du profil (μm).

Ra : rugosité (écart moyen arithmétique) de la surface usinée [μm]

MODOP : machine-outil – dispositif – outil – pièce

Mc : mouvement de coupe

Ma : mouvement d'avance.

HB : dureté du matériau (dan/mm²)

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1. Système d'usinage	10
Figure I.2. Représentation de la coupe longitudinale.....	16
Figure I.3. Grandeurs géométriques de la coupe en tournage.....	16
Figure I.4. Configuration de la coupe orthogonale.....	17
Figure I.5. Évolution de l'usure de l'outil en fonction du temps.....	20
Figure I.6. Stratégie de simulation de l'usure.....	24
Figure I.7. Mise à jour de la géométrie de l'outil par déplacement nodal.....	24
Figure I.8. L'usure en fonction de la température.....	26
Figure I.9. Usure par abrasion.....	26
Figure I.10. Usure par déformation plastique.....	28
Figure I.11. Formes d'usure observées sur une plaquette de coupe.....	30
Figure I.12. Formation de copeau en coupe orthogonale.....	32
Figure I.13. Copeau continu.....	33
Figure I.14. Copeau avec arête rapportée.....	33
Figure I.15. Copeau discontinu.....	34
Figure I.16. Composantes de l'effort de coupe en tournage.....	38
Figure I.17. Géométrie de l'engagement d'un outil à charioter.....	39
Figure I.18. Représentation de l'angle de coupe.....	40
Figure I.19. Représentation de l'angle d'obliquité de l'arête tranchante d'un outil à charioter.....	40
Figure I.20. Représentation de l'angle de direction χ_r	41
Figure I.21. Effet de la vitesse de coupe sur l'effort de coupe.....	42
Figure I.22. Évolution des efforts de coupe en fonction de l'avance et de la profondeur de passe.....	43
Figure I.23. Illustration de l'effort de coupe spécifique k_c	44
Figure I.24. Efforts de coupe en perçage.....	45
Figure I.25. Paramètres caractéristiques de la rugosité.....	47
Figure I.26. Variation des hauteurs d'aspérités en fonction de la dureté du matériau usiné.....	49

Figure I.27. Évolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe.....	50
Figure I.28. Évolution de la rugosité en fonction de l'avance (cas du perçage).....	51
Figure I.29. Illustration d'un foret à brise-copeaux.....	52
Figure I.30. Foret en action.....	52
Figure I.31. Amincissement de la partie centrale d'un foret hélicoïdal.....	53
Figure I.32. Détalonnage d'un foret hélicoïdal.....	53
Figure I.33. Évolution de la rugosité en fonction de l'usure de l'outil.....	54
Figure I.34. Principales phases d'un traitement thermique.....	58
Figure I.35. Diagramme TRC.....	59
Figure I.36. Diagramme fer-carbone	63
Figure I.37. Coût d'usinage.....	65
Figure I.38. Exemples de trous réalisés dans des pièces issues de plusieurs secteurs de l'industrie mécanique.....	68
Figure I.39. Illustration du mouvement de coupe.....	69
Figure I.40. Cycle de déburrage en perçage.....	71
Figure I.41. Foret à queue cylindrique.....	72
Figure I.42. Foret à queue conique.....	72
Figure I.43. Principaux éléments d'un foret hélicoïdal.....	73
Figure I.44. Amincissement de la partie centrale d'un foret hélicoïdal.....	74

Chapitre II :

Figure II.1. Schéma structural du système d'usinage.....	76
Figure II.2. Interprétation géométrique de la méthode des moindres carrés	79
Figure II.3a. Perceuse Radiale Modèle 2A554	85
Figure II.3b. Sélecteur des avances.....	85
Figure II.4. Illustration de la préparation des éprouvettes	88
Figure II.5. Illustration du traitement thermique (trempe).....	90
Figure II.6. Thermomètres infrarouges	90
Figure II.7. Illustration de l'opération de revenu au four électrique	91
Figure II.8. Duromètre universel de marque Zwick/ Roell ZHU.....	91
Figure II.9. Microscope model NIKON ECLIPS	92
Figure II.10. Texture du C35, a)avant trempe, b) après trempe	93
Figure II.11. Modèles de forets utilisés pour les essais	94
Figure II.12. Illustration d'opérations de perçage pour les diamètres 20 et 10mm.....	95

Figure II.13. Échantillons de copeaux et de pièces suite à la réalisation des essais.....	95
Figure II.14. Illustration des zones de mesure de l'usure sur la partie active du foret hélicoïdal.....	97
Figure II.15. Microscope d'atelier (aperçu initial).....	98
Figure II.16. Éléments éclatés du dispositif de positionnement des forets.....	98
Figure II.17. Orientation et positionnement des forets sur le dispositif	99

Chapitre III :

Figure III.1. Usure de l'arête tranchante principale.....	103
Figure III.2. Évolution de l'usure en dépouille en fonction du temps d'usinage.....	104
Figure III.3. Technique de lecture et mesure de l'usure sur l'arête centrale (VATT).....	106
Figure III.4. Évolution de l'usure de l'arête transversale en fonction du temps .d'usinage.....	106
Figure III.5. Technique d'observation de l'usure sur la surface d'attaque.....	108
Figure III.6. Technique d'observation de l'usure sur le listel.....	109
Figure III.7. L'effet de la dureté sur l'usure.....	111
Figure III.8. Phénomène de la perte de la matière.....	113
Figure III.9. Phénomène de l'arête rapportée.....	114
Figure III.10. Microstructure de l'acier C35. a) État Recuit, b) État trempé.....	115
Figure III.11. Morphologie du copeau lors du perçage au régime N°6 après trempe.....	116
Figure III.12. Diagramme de Pareto avant trempe.....	120
Figure III.13. Diagramme de Pareto après trempe	121

Liste des tableaux

Chapitre II :

Tableau II.1. Illustration la méthode multifactorielle	77
Tableau II.2. La matrice de planification des expériences.....	78
Tableau II.3. Plan d'expériences correspondant à nos essais.....	78
Tableau II.4. Caractéristiques mécaniques et chimiques de l'acier C35 avant traitement thermique.....	86
Tableau II.5. Valeur des éléments du régime de coupe	88
Tableau II.6. Illustration de la dureté de l'acier C35 avant et après traitement thermique	92
Tableau II.7. Régime de coupe lors du perçage de l'acier C35.....	94
Tableau II.8. Nomenclature du dispositif de positionnement.....	98

Chapitre III :

Tableau III.1. Matrice de planification des expériences type 2^3	101
Tableau III.2. Résultats de la tenue des forets testés pour les cas du perçage du C35.....	105
Tableau III.3. Usure sur l'arête centrale (V_{ATT}) pour les cas du perçage du C35.....	107
Tableau III.4. Usure en cratère (KT) et sur le listel (L) pour les cas du perçage du C35.....	109
Tableau III.5. Comparatif des rapports de la tenue du foret.....	116
Tableau III.6. Analyse de la variance pour (T) avant la Trempe de l'acier C35.....	119
Tableau III.7. Analyse de la variance pour (T) après la Trempe de l'acier C35.....	120

Table des matières

Remerciements	I
ملخص	II
Résumé	III
Abstract.....	IV
Symboles et abréviations.....	V
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	X
Table des matières.....	XI
Introduction générale	1
 Chapitre I : ETUDE ET ANAYSE BIBLIOGRAPHIQUE	
I.1. Introduction	6
I.2. Définitions du concept d’usinabilité	6
I.2.1. L’usinabilité selon différents chercheurs.....	7
I.2.2. Synthèse des définitions et adoption	9
I.3. Recherche de l’optimum en usinage.....	10
I.4. Notions de base sur l’enlèvement de matière par outil coupant.....	13
I.4.1. Vitesse de coupe.....	14
I.4.2. Vitesse d’avance.....	14
I.4.3. Profondeur de passe.....	15
I.4.4. Action mécanique en usinage	15
I.5. Méthodes de déterminations de l’usinabilité	18
I.5.1. Modèles empiriques	18
I.5.1.a. Essais accélérés	19
I.5.1.b. Essais de longue durée.....	19
I.5.1.c. Méthode graphique.....	20
I.5.2. Modèles analytiques.....	21
I.5.2.1. Modèle de Takeyama et Murata.....	21
I.5.2.2. Modèle d’Usui et Shirakashi.....	21
I.5.2.3. Modèle d’Archard.....	22
I.5.3. Analyse et comparaison entre les deux méthodes	22
I.5.4. Modèles numériques	23

I.6. Endommagement des outils de coupe	24
I.6.1. Usure des outils coupants.....	25
I.6.1.1. Usure par abrasion.....	26
I.6.1.2. Usure par adhésion.....	27
I.6.1.3. Usure par diffusion.....	27
I.6.1.4. Déformation plastique et fatigue.....	28
I.6.2. Critères d'usure et durée de vie des outils.....	28
I.6.2.1. Critères de surveillance de l'usure.....	28
I.6.2.1.1. Critères directs.....	28
I.6.2.1.2. Critères indirects.....	29
I.6.3. Modèles de durée de vie et modèles d'usure.....	30
I.7. Formation du copeau	31
I.7.1. Forme du copeau à l'échelle microscopique.....	33
I.7.1.1. Copeau continu.....	33
I.7.1.2. Copeau avec arête rapportée.....	33
I.7.1.3. Copeau discontinu.....	34
I.8. Revêtement des outils de coupe	34
I.8.1. Types de revêtements.....	36
I.9. Efforts de coupes et puissance absorbée	37
I.9.1. Généralités.....	37
I.9.2. définition de l'effort de coupe et intérêt de leur mesure	37
I.9.3. Paramètres influents sur les efforts	38
I.9.3.1. Influence du matériau usiné.....	39
I.9.3.2. Influence de L'angle de coupe (γ).....	40
I.9.3.3. Influence de l'angle d'obliquité de l'arête tranchante (λ).....	40
I.9.3.4. Influence de l'angle de direction (χ_r).....	41
I.9.3.5. Influence de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe.....	41
I.9.3.6. Influence de l'avance et de la profondeur de passe sur l'effort de coupe.....	42
I.9.4. Effort de coupe et puissance absorbée en perçage.....	44
I.9.4.1. Effort de coupe	44
I.9.4.2. Puissance absorbée par la coupe en perçage.....	45
I.10. Qualité de surface usinée	46
I.10.1. Principaux paramètres de la rugosité.....	46
I.10.2. Rugosité des surfaces usinées en perçage	47

I.10.3.	Facteurs de rugosité pour le perçage, le lamage et le chambrage.....	48
I.10.4.	Influence du matériau usiné sur la rugosité.....	48
I.10.5.	Influence du régime de coupe sur la rugosité	49
I.10.5.1.	Influence de la vitesse de coupe	50
I.10.5.2.	Influence de l'avance.....	51
I.10.6.	Influence de la géométrie de l'outil	51
I.10.7.	Influence de l'usure de l'outil	53
I.10.8.	Influence de la rigidité de la machine-outil	54
I.10.9.	Influence des fluides réfrigérants et lubrifiants	55
I.11.	Lubrification méthodes et produits	55
I.11.1.	Rôle du lubrifiant	56
I.11.2.	Caractéristiques des fluides coûts et utilisation	56
I.11.3.	Pratique de l'arrosage	57
I.12.	Influence du traitement thermique sur l'usinabilité des aciers.....	57
I.12.1.	Principales phases du traitement thermique.....	58
I.12.2.	Vitesse critique de trempe	59
I.12.3.	Les principales techniques de trempe.....	60
I.12.3.1.	Trempe cryogénique.....	61
I.12.3.2.	Trempe des aciers alliés.....	62
I.12.4.	Effet de la trempe sur la structure cristalline de l'acier	62
I.13.	L'intérêt économique de la durée de vie de l'outil.....	64
I.13.1.	Recherches relatives à l'optimisation de l'usinage.....	64
I.14.	Conclusion et position du problème.....	66
I.15.	Importance du perçage dans la fabrication mécanique.....	67
I.15.1.	Généralités.....	67
I.15.2.	Conditions optimales du perçage en fonction du matériau.....	69
I.15.3.	Sélection et utilisation des forets.....	70
I.15.4.	Choix du cycle de déburrage.....	70
I.15.5.	Principaux types de foret hélicoïdal	72
I.15.6.	Géométrie d'un foret hélicoïdale.....	72

CHAPITRE II : PREPARATION DES ECHANTILLONS ET REALISATION DES ESSAIS EXPERIMENTAUX

II.1.	Introduction	76
--------------	---------------------------	-----------

II.2. Planification des expériences et équipements utilisés	77
II.2.1. Méthode multifactorielle	77
II.2.1.1. Coefficients et exposants pour un modèle simple (sans interactions)	82
II.2.1.2. Coefficients et exposants pour un modèle combiné (avec interactions)	83
II.3. Préparation des expériences	85
II.3.1. Machine-outil	85
II.3.2. Matière à usiner	86
II.3.3. Choix du régime de coupe	86
II.3.4. Préparation des éprouvettes	88
II.3.4.1. Traitement thermique des éprouvettes	89
II.3.4.2. Revenu des éprouvettes après trempe	90
II.3.5. Contrôle des éprouvettes après traitement thermique	91
II.3.5.1. Contrôle de la dureté	91
II.3.5.2. Observation de la texture	92
II.3.6. Choix des outils de coupe	93
II.3.7. Réalisation des expériences	94
II.4. Critères de l'usure et méthode de mesure	96
II.4.1. Introduction	96
II.4.2. Critères de l'usure	96
II.4.3. Méthode de mesure de l'usure	97

CHAPITRE III : TRAITEMENT ET ANALYSE DES RESULTATS

III.1. Introduction	101
III.2. Plan des expériences	101
III.3. résultats de l'usure sur la partie active des forets testés	102
III.3.1. Introduction	102
III.3.2. Usure sur l'arête tranchante principale (VB)	102
III.3.2.1. Traitement graphique des résultats de l'usure de l'arête tranchante principale ..	103
III.3.3. Usure sur l'arête tranchante transversale (V_{ATT})	105
III.3.3.1 Traitement graphique des résultats de l'usure de l'arête tranchante transversale .106	
III.3.4. Usure en cratère sur la surface d'attaque (KT)	108
III.3.5. Usure sur le listel ou arête tranchante latérale (L)	108
III.4. Analyse comparative des résultats de l'usure sur les parties actives du foret ...110	
III.4.1. Analyse comparative des résultats de l'usure avant trempe	110

III.4.2. Analyse comparative des résultats de l'usure sur les parties actives après trempe	.111
III.4.3. Discussions des résultats de l'usure en dépouille	.....112
III.4.3.1. Discussions selon le plan horizontal	.....113
III.4.3.2. Discussions selon le plan vertical	.....114
III.4.4. Conclusion	.....117
III.5. Traitement statistique et analyse des résultats de la tenue (T) par la méthode de l'ANOVA	.....118
III.5.1. Traitement des résultats de la tenue des forets avant trempe	.....118
III.5.2. Traitement des résultats de la tenue des forets après trempe	.....120
III.6. Conclusion générale et perspectives	.....121
III.6.1. Conclusion	.....121
III.6.2. Perspectives	..... 124

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La coupe de métaux, procédé d'usinage dont l'origine est très ancienne, a connu une grande expansion avec la mécanisation de plus poussée des ateliers de fabrication. Malgré l'apparition de nouvelles techniques au cours des dernières années, elle reste à l'heure actuelle l'un des procédés les plus largement utilisés. Pour se convaincre de son importance économique, il suffit de considérer le volume des dépenses faites aux U.S.A. pour l'usinage des métaux. Il représente 5% du produit national brut, ce qui est énorme pour une seule technique [1].

La recherche d'une productivité toujours meilleure de la coupe des métaux est donc une préoccupation majeure. Cette amélioration permanente repose plus ou moins directement sur l'étude approfondie des mécanismes physiques et des lois régissant ce procédé. Celle-ci reste donc un objectif essentiel. Son intérêt ne peut être éclipsé par le développement de nouveaux moyens d'usinage ou de nouvelles techniques de commande et de programmation même si ces derniers points participent aussi au développement de la fabrication à grande vitesse. La mise en œuvre rationnelle de ces techniques passe en effet par une connaissance approfondie du processus de coupe et une maîtrise des paramètres qui le contrôle.

Depuis, les machines-outils ont donc considérablement évoluées afin de répondre à des exigences telles qu'un meilleur rendement, une plus grande sécurité, une meilleure rigidité, de plus grandes vitesses de déplacement, une puissance accrue, une amélioration de la productivité, une diminution de l'usure des outils, etc... En contrepartie, l'amélioration de toutes ces performances fait ressortir un ensemble de phénomènes dont l'ignorance ne remettait pas en cause la fabrication traditionnelle des pièces mais dont l'importance ne peut être ignorée pour des conditions d'usinage à grandes vitesses [2].

Aujourd'hui, plus que jamais, les industriels cherchent à gagner du temps et à diminuer les coûts de fabrication tout en respectant l'environnement. En dépit de ces considérations, les concepts liés à l'usinage ont surtout évolué grâce à de nombreux essais expérimentaux sans bénéficier de vraies approches scientifiques. Ce n'est que récemment que des modèles numériques ont vu le jour. Cependant, la capacité de ces modèles à reproduire la coupe reste limitée, ce qui ne répond pas toujours aux attentes des industriels. Améliorer la fiabilité de ces modèles nécessite de pallier le manque de données expérimentales nécessaires afin de confronter les simulations numériques.

Ces données expérimentales et numériques vont par la suite permettre de mieux appréhender les différents mécanismes régissant l'interaction copeau-outil-pièce.

L'interface outil-pièce qui est générée lors d'un processus d'usinage par enlèvement de matière est un lieu d'interactions complexes entre phénomènes mécaniques, thermiques et physico-chimiques [3]

La surface de l'outil en contact avec le copeau subit diverses formes d'usure qui sont le résultat de mécanismes telles que l'adhésion, l'abrasion et la diffusion.

La qualité de la surface usinée ainsi que la durée de vie des outils dépendent largement des conditions dans lesquelles s'effectue la coupe. En particulier, l'emploi de fluides de coupe est un paramètre important puisqu'il permet de limiter l'élévation de la température dans les zones de coupe et d'établir la présence d'un film fluide entre les différentes surfaces, atténuant ainsi les effets du frottement.

L'usinage des aciers trempés préoccupe de plus en plus les industriels et les scientifiques au niveau mondial. On fait recours à la mise en forme des matériaux par usinage dans de nombreux domaines d'activités tels que l'automobile, l'aéronautique, ou l'électronique. L'usinage s'impose naturellement comme un axe majeur de recherche puisque chacun des composants de l'usinage (machine, outil, matière à usiner) est en constante évolution.

Dans le domaine de l'usinage les chercheurs développent ce que l'on appelle des modèles prédictifs, ces modèles permettent, entre autre de déterminer les conditions de coupe optimales pour un couple outil-matériau, de prédire l'énergie nécessaire à la coupe, ou encore l'usure des outils en fonction des paramètres matériaux et procédés. Trois différentes approches ont été développées depuis une soixantaine d'années afin de modéliser les procédés de coupe. L'approche mécanistique, numériques et analytiques.

L'approche mécanistique est utilisée pour définir des modèles simples basés sur des observations expérimentales. Les lois physiques sont dans ce cas remplacées par des considérations phénoménologiques, calibrées à partir d'essais expérimentaux. Il s'avère en outre que ce type d'approche (dans le cas de l'usinage) est intrinsèquement lié au couple outil-matière étudié et nécessite de nombreux essais expérimentaux.

Les approches numériques modélisant les procédés de coupe sont de plus en plus utilisées ces dernières années.

L'évolution permanente des machines de calcul, développent des méthodes numériques permettant de réduire considérablement les temps de calcul pour des opérations de coupe simples. Néanmoins, des phénomènes subsistent toujours, telles que la prise en compte du frottement à l'interface "outil-copeau" ou la modélisation de procédés industriels complexes.

L'approche analytique est celle utilisée dans notre travail de thèse, permet à l'aide de considérations mécaniques simple, d'étudier les phénomènes thermomécaniques des procédés de coupe les plus complexes tel que le fraisage, le tournage ou le perçage. Les premiers modèles analytiques de la coupe ont été développés sur des opérations de coupes simples telles que la coupe orthogonale avec une arête droite. Ces modèles développés par Merchant (1945) ou Lee et Shaffer (1951) sont des approches purement mécaniques.

Molinari et Dudzinski (1992), Dudzinski et Molinari (1997), puis Moufki (1998) ont développé un modèle analytique de la coupe orthogonale capable de prédire les efforts, la longueur du contact outil-copeau, la pression à la pointe de l'outil ou encore la distribution de la température sur la face de coupe de l'outil. Ce modèle est appelé " modèle de la bande".

Dans ce travail notre contribution a été basée sur une étude comparative de l'usinabilité de l'acier C35 dans deux états avant et après trempe en perçage, dans le but d'évaluer l'impact des éléments du régime de coupe sur la tenue des forets en acier rapide (HSS).

Le premier chapitre "*étude et analyse bibliographique*", nous a permis de connaître l'état de l'art concernant l'usinabilité des aciers par un rappel des bases scientifiques du phénomène de la coupe des métaux et en particulier en perçage. L'analyse nous a permis de choisir la mort de l'outil comme critère de réponse essentiel caractérisant l'usinabilité.

Le deuxième chapitre est consacré à la préparation et réalisation des expériences. En premier lieu, nous avons préparé les équipements nécessaires ainsi que la matière et l'outillage et définir les paramètres du régime de coupe. Nous avons adopté la planification des expériences multifactorielles comme méthode de traitement des résultats. Les caractéristiques de la matière mise en œuvre avant et après traitement thermique sont également présentées. Après avoir mis au point les conditions de coupe nous avons réalisé en second lieu les essais multifactoriels basés sur la méthode de planification des expériences, dont les paramètres variables

sont : La vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap) qui est représenté dans le cas du perçage par le diamètre du foret (D), comme nous avons montré les techniques de mesures et l'appareillages utilisés ainsi que les mécanismes et dispositifs créés par Mokas et al [4].

Dans le troisième chapitre sont exposés les résultats expérimentaux qui traitent principalement le suivi de l'usure en dépouille VB des forets hélicoïdaux HSS lors de l'usinage de l'acier C35 avant et après trempe. L'analyse de ces résultats a montré le degré d'influence des paramètres de coupe et de la dureté sur la tenue des outils. Nous avons présenté les résultats d'une étude comparative ainsi que la modélisation statistique de l'usinabilité de l'acier C35 avant et après traitement thermique. Après traitement et analyse des résultats des expériences, un traitement graphique et une analyse statistique de la variance ANOVA nous a permis de mettre l'accent sur le degré d'influence des paramètres de coupe sur la tenue des outils, et sur l'état de surface usinée.

En dernier lieu nous avons conclu notre recherche par une synthèse des résultats mettant en exergue les effets controversés des paramètres de coupe et la dureté sur la tenue des forets HSS.

CHAPITRE I

ÉTUDE

ET

ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction

Ce chapitre introductif constitue une synthèse bibliographique sur les thèmes liés à l'étude de l'usure des outils en coupe orthogonale.

L'étude bibliographique est une étape très importante dans le domaine de la recherche scientifique car elle nous permet d'enrichir nos connaissances, pour bien nous situer dans notre domaine de recherche soit en enrichissant la technologie d'une nouvelle étude, ou de contribuer à l'amélioration d'études ayant été entamées. Elle permet aussi de recueillir le maximum d'information concernant le thème en question.

L'état de l'art, nous insiste à passer plus de temps devant du papier, à lire ce que les autres ont pu écrire sur le sujet, ou à rédiger nos propres articles. Les recherches bibliographiques ont une importance capitale.

Le perçage est une opération d'usinage complexe à cause de la coupe qui s'effectue dans un milieu confiné à l'intérieur de la pièce, ce qui rend impossible l'observation du processus et de l'écoulement des copeaux. Il est l'un des procédés d'usinage les plus couramment utilisés dans l'industrie manufacturière. L'opération de perçage présente environ 33% de la totalité des opérations des différents processus d'usinage [5]. Le processus du perçage a été continuellement développé dans la quête d'une amélioration des performances des forets et d'une production de qualité et économique de trous.

De plus, la géométrie du foret et la cinématique du procédé conduisent à une variation des angles de coupe et de la vitesse de coupe le long des arêtes tranchantes. Les études concernant ce procédé ont été portés d'abord sur la géométrie du foret puis sur la prévision du couple et de l'effort axial avec des approches mécanistiques et expérimentales. Plus récemment, la méthode des éléments finis a été employée pour simuler ce processus.

L'usure du foret s'avère être le facteur prédominant qui affecte directement la qualité du produit et la durée de vie de l'outil. Il convient également de noter que parmi plusieurs difficultés et paramètres affectant le processus du perçage, on peut citer à titre indicatif les mauvaises conditions d'évacuation des copeaux (bourrage), la géométrie du foret, la difficulté de lubrification de la partie active du foret...etc.

I.2. Définitions du concept d'usinabilité

L'usinabilité n'a pas de définition formelle basée sur les nuances ou sur des chiffres. Dans son sens le plus large, l'usinabilité désigne la possibilité d'usiner une

matière, l'usure qu'elle occasionne sur les arêtes de coupe, la formation des copeaux qui la caractérise et l'état de surface usinée. Dans ce sens selon un acier bas carbone est plus facile à usiner qu'un acier inoxydable austénitique. Les aciers faiblement alliés sont généralement considérés comme ayant une meilleure usinabilité que les aciers inoxydables. Le concept de « bonne usinabilité » renvoie généralement à une action de coupe sans problèmes avec une durée de vie d'outil optimale. Le plus souvent l'évaluation de l'usinabilité d'une matière donnée est faite à partir d'essais et les résultats sont exprimés par rapport à d'autres tests effectués sur d'autres matières dans des conditions comparables. D'autres facteurs sont aussi pris en compte tels que la microstructure, la tendance au collage, la machine-outil utilisée, la stabilité, le bruit, la durée de vie d'outil, etc. . . .

I.2.1. L'usinabilité selon différents chercheurs

L'usinabilité est une propriété complexe désignant la facilité plus au moins grande d'un matériau à être amené par enlèvement de copeau, à une forme et à des côtes fixées. Cette faculté étant caractérisée par la vie de l'outil, définie par les critères d'usure dans les conditions d'un type d'usinage. L'aptitude à l'usinage dépend des caractéristiques mécaniques du matériau mis en œuvre, de sa structure micrographique et des phases dispersées dans la matrice dont l'action peut être bénéfique ou néfaste. Ces caractéristiques sont déterminées dès l'état liquide au cours de l'élaboration du métal de composition donnée, des conditions de sa solidification, de sa forme sous des efforts mécaniques et des cycles thermiques subis.

On distingue aujourd'hui les aciers de décolletage pour lesquels l'usinabilité maximale est recherchée même au détriment des caractéristiques mécaniques (pièce peut sollicitées) et les aciers à usinabilité améliorée qui doivent avoir de hautes caractéristiques après traitement (pièces fortement sollicitées).

Les inclusions qui jouent un très grand rôle dans l'usinabilité peuvent être présentes involontairement ou provoquées. Leur morphologie et localisation ont une grande importance. Il semble que l'on puisse dire que toutes choses étant égales par ailleurs, la meilleure usinabilité est obtenue par la combinaison des éléments présents conduisant à la fois à des niveaux de dureté et fragilité convenable. Dans le domaine des aciers spéciaux il y a lieu de distinguer les éléments formant des carbures (vanadium, tungstène. . .), ceux entrant en solution solide dans la matière (nickel, silicium. . .) et ceux présentant des caractéristiques mécaniques (manganèse, chrome. . .) [6].

L'usinabilité ou l'aptitude à la coupe par outil coupant avec enlèvement de copeau, est un ensemble de propriétés complexes, dont l'effet peut se ramener à l'obtention de deux valeurs principales : précision des côtes macro et micro géométriques et prix de revient [7].

L'usinabilité d'un matériau c'est son aptitude à être amené à des dimensions et des formes déterminées, avec un état de surface défini, par une ou plusieurs opérations d'usinage. Il ne s'agit pas d'une propriété simple de la matière, elle n'est pas une grandeur mesurable. L'usinabilité est une propriété complexe désignant la facilité, plus ou moins grandes d'un matériau à être amené par enlèvement de copeau à une forme et à des côtes fixes [8].

L'usinabilité est 'un phénomène lié à une opération de mise en forme par outil coupant avec formation de copeaux, pour fabriquer des pièces avec une précision macro géométrique et micro géométrique imposées. Toute précision n'est accrue qu'avec une augmentation du prix de revient. En dehors des progrès techniques, l'adoption d'une solution est un compromis. Deux premiers critères caractérisant l'aptitude à l'usinage sont retenus, la précision de cotes macro et micro géométrique et le prix de revient.

D'autres facteurs peuvent être introduits pour la définition de l'aptitude à l'usinage, telle que la durée de coupe de l'outil, l'état de surface, les efforts de coupe et la morphologie du copeau [9].

Les différents paramètres de la coupe, à savoir le matériau, la forme, la géométrie et le revêtement de l'outil et les conditions de coupe influent sur l'usinabilité. De plus, les méthodes d'usinage avancées ont amélioré significativement la productivité de l'opération d'usinage. La difficulté expérimentale, en termes de coût et délais, sera de trouver une combinaison entre les différents paramètres assurant une bonne productivité, oblige les experts à s'orienter vers des modèles de simulation numérique de la coupe. Ces derniers nécessitent des données d'entrée précises : les lois de comportement, les lois de frottement [10].

L'usinage est un procédé d'enlèvement de matière qui consiste à générer des surfaces à l'aide d'un outil de coupe dans une configuration déterminée.

Les paramètres influençant la coupe sont relativement nombreux. Ils peuvent se regrouper en 3 grandes familles suivant ce sur quoi ils agissent.

➤ Les paramètres liés au procédé : vitesse de coupe, vitesse d'avance, profondeur de passe, type d'opération...

➤ Les paramètres liés à l'outil : géométrie, forme, angles de coupe, nuance du substrat, revêtement, fixation de l'outil...

➤ Les paramètres liés à la pièce usinée, qui se composent en deux sous parties :

- Paramètres géométriques : forme, élancement, diamètre de l'ébauche.
- Paramètres liés au matériau (dureté, composition chimique, état microstructural.) regroupés sous la dénomination d'usinabilité [11].

L'acier d'usinabilité optimale est celui qui permet l'enlèvement le plus rapide de la plus grande quantité de copeau avec un bon fini de surface de la pièce et sans réaffûtage [12].

L'étude de l'usinabilité des aciers inoxydables connaît depuis ces dix dernières années (1985-1995) un développement très important, elle englobe un vaste domaine métallurgique allant de l'influence des éléments aditifs que l'on peut ajouter intentionnellement aux aciers au rôle bénéfique et nocif des inclusions qui résulte des modes d'élaboration. L'usinabilité qui caractérise l'aptitude d'un matériau à s'usiner plus ou moins facilement n'est pas une propriété unique mais plutôt un ensemble de paramètres dont l'intérêt pour l'utilisation varie avec sa technique ses machines-outils et le type de pièces fabriquées [13].

Le choix des meilleures conditions d'usinage vis-à-vis de l'usure, que ce soit avec des vitesses conventionnelles ou à grandes vitesses, consiste à trouver les conditions de coupe à l'aide du meilleur compromis entre la vitesse de coupe et la durée de vie des outils. La durée d'utilisation de l'outil étant limitée par son degré d'usure, il en résulte que les temps d'usinage sont en rapport direct avec l'usure. Le coût d'usinage, qui intéresse en définitive l'entreprise, est une conséquence de la tenue des outils à l'usure.

La qualité du travail d'un outil dans le processus d'usinage dépend de son degré d'usure. L'importance de celle-ci a une influence directe sur la qualité et la précision dimensionnelle de la surface obtenue, La tenue de l'outil dans le temps, et la puissance nécessaire à la coupe [14].

I.2.2. Synthèse des définitions et adoption

D'après toutes les définitions données par les chercheurs dont on a reporté quelques-unes, Nous pouvons retenir celles qui ont le plus d'approche à notre domaine de recherche ; c'est que l'usinabilité qui caractérise l'aptitude d'un matériau à s'usiner plus ou moins facilement, n'est pas une propriété unique mais

plutôt un ensemble de paramètres dont l'intérêt pour l'utilisateur varie avec la technique, les machines-outils et le type de pièces à fabriquer. Ce qui nous ramène à conclure que l'usinabilité n'est pas une notion scientifiquement définie, c'est un concept opérationnel, une caractéristique qui perd toute signification si on ne précise pas les conditions dans lesquelles elle a été appréciée.

Par ailleurs nous avons adopté comme critère principale pour caractériser l'usinabilité d'un matériau, la durée de vie de l'outil car la qualité de pièces produites en usinage dépend principalement de l'état de l'outil de coupe utilisé. Ce dernier est exposé à l'endommagement au cours de l'opération d'usinage à cause des frottements avec la pièce et les copeaux générés. D'où l'intérêt de prédire sa durée de vie au cours de l'usinage avant dégradation du processus d'usinage et pour modéliser l'usinabilité de façon rationnelle nous devons prendre en considération les lois de comportement du matériaux dans la zone primaire et secondaire de cisaillement et la relation contrainte d'écoulement–déformation, taux de déformation–température et lois de frottement outil-copeau. De façon générale les paramètres influents sur l'usinabilité et les conséquences requises sont résumés dans la figure (I.1) [4].

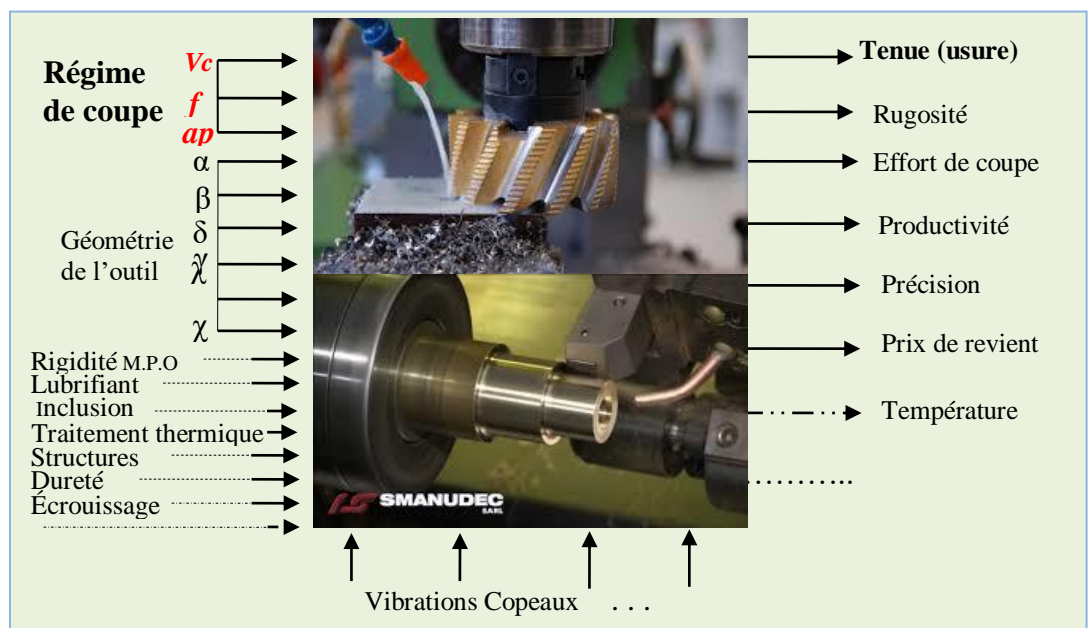


Figure I.1. Système d'usinage [4]

I.3. Recherche de l'optimum en usinage

Le choix des meilleures conditions d'usinage consiste à trouver pour un produit de qualité donnée les conditions de travail qui conduisent à un optimum. Le choix du critère optimalité peut correspondre à de différentes éventualités, en

général le prix de revient est considéré comme critère quand on se penche à de stricts considérations économiques par une démarche très voisine. On prend quelques fois le temps de fabrication comme critère ou autrement dit, on recherche les conditions d'une production maximum mais il y a des situations où d'autres critères peuvent prévaloir.

Il faut d'abord souligner que le nombre de facteurs à faire entrer en ligne de compte est très élevé en usinage. Pour plus de clarté, on les a groupé par domaines techniques, et on se contente de ne prendre en considération que certains, sur lesquels on peut agir pour optimiser le travail [4]. Ces facteurs sont essentiellement liés aux éléments suivants :

A. La machine-outil

- automatisation des opérations d'usinage ou auxiliaires (CN).
- augmentation de la puissance des moteurs.
- commande automatique des vitesses.
- palier antifriction pour éviter les pertes de puissances à hautes vitesses.
- machine à outils multiples.

B. La manutention des pièces

- mandrins pneumatiques.
- chaînes de transferts.

C. Outils

- diminution des temps de changement des outils.
- préréglage des outils dans les blocs spéciaux.
- plaquettes à jeter en barreaux diminuant le nombre de réaffûtages.
- amélioration des tenues des outils (céramiques...)

D. L'usinabilité des métaux

L'amélioration de l'usinabilité des métaux est atteinte en agissant sur l'état structural du matériau usiné, le corroyage, les inclusions favorables, etc...

Les facteurs précédents étant fixés à leurs valeurs optimales, on cherchera à déterminer les conditions d'usinage proprement dites qui conduisent à l'optimum du critère retenu et qui sont essentiellement :

- la vitesse de coupe (en tenant compte de la relation de Taylor entre vitesse et durée d'outil notamment).
- profondeur de passe et avance.
- angle d'outil.
- lubrifiant.

Il faut toutefois vérifier que le travail d'usinage peut effectivement être exécuté avec les équipements existants et compte tenu d'un certains nombres de limitation parmi les plus importantes on peut citer :

- la puissance utile de la machine-outil, compte tenu de son rendement mécanique (puissance à l'outil).
- l'importance des efforts de coupe qui peuvent mettre en danger les organes de la machine.
- l'apparition de vibration (broutage) rendant le travail impossible et mettant les pièces de la machine en danger.
- la qualité de la pièce (précision, finie de surface, erreur de forme) qui en dernier ressort est le facteur déterminant pour le choix des conditions de travail.
- les valeurs limites des paramètres machine-outil comme vitesse, avance, etc...

Il faut remarquer que l'optimisation de l'usinage basée sur les conditions d'usinage proprement dites ne concerne qu'une opération d'usinage ou une gamme réalisée sur un poste de travail unique, elle ne s'étend pas sur un groupe de machine, un atelier, ou à une usine. C'est des optimisations plus générales, et d'ailleurs suffisamment complexe pour nécessiter l'emploi de calculatrice. Parmi les variables de l'usinage, on peut fixer la grandeur de l'angle de l'outil quand on connaît la nature du matériau à usiner. Le lubrifiant est choisi suivant des considérations économiques où techniques, comme la nécessité de refroidir la pièce par exemple. Il reste donc en fait trois variables principales à optimiser entre les mains de l'usineur, la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe.

Cependant la majorité des opérateurs de finition font que le travail se fait en un certain nombre de passe. Cet élément peut donc s'ajouter au régime de coupe.

En synthétisant on peut dire que parmi les facteurs de l'optimisation déjà cités, on remarque que la machine-outil, la manutention, les outils sont les facteurs les plus ou moins stables, par contre le facteur usinabilité des métaux est très délicat et variable du fait que plusieurs autres éléments y interviennent tel que le régime de coupe et ses facteurs, la matière et ses caractéristiques physico-chimiques. Pour cela l'usinabilité a été le domaine d'investigation pour plusieurs chercheurs sous différentes formes et différents domaines d'usinage et d'ailleurs elle est définie de différentes façon selon les chercheurs, on reprendra quelques-unes de ces définitions dans ce qui suit. Pour cette raison, nous avons opté pour l'effet des conditions de

coupe sur la durée de vie des forets au cours de perçage de l'acier C35 trempé et non trempé comme sujet de recherche.

I.4. Notions de base sur l'enlèvement de matière par outil coupant

La technologie de fabrication de l'acier a beaucoup changé durant ces dernières années sous la pression d'une demande accrue d'acier de spécifications plus exigeantes, mais aussi de la nécessité de réduire les consommations d'énergie et de matière.

Par « technique d'usinage » on désigne les procédés de travail des métaux qui permettent la mise en forme des pièces industrielles grâce à une action d'enlèvement de matière. Que cet enlèvement se fasse par la formation d'un copeau ou par la production de micro copeaux comme en rectification, ou encore par fusion ou par évaporation, comme en électroérosion. On dira dans tous les cas qu'il s'agit d'une opération d'usinage.

Finalement l'usinage c'est un procédé qui consiste à façonner une pièce avec enlèvement de matière. Les méthodes d'usinage appartiennent à la famille des procédés de façonnage, définis comme procédés de mise en forme des pièces à partir de l'état solide. Il existe des procédés de mise en forme à partir de l'état liquide (moulage) ou à partir de pulvérulent (frittage).

Le principe de base de l'usinage est l'enlèvement de matière. Il est obtenu par la coupe du matériau constitutif de la pièce. La coupe s'opère par le déplacement d'un outil de coupe en interférence avec la pièce. La dimension de cette interférence est définie par l'avance en millimètre. Lors de la coupe la matière en interférence avec la trajectoire de l'outil est détachée par déformation plastique du reste de la pièce et se transforme en copeaux. L'usinage requiert l'usage d'une machine-outil qui génère de façon autonome les mouvements relatifs pièce-outil en garantissant leur précision ainsi que la puissance mécanique nécessaire à la coupe. 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) et le mouvement d'avance (vitesse d'avance). L'usinage peut être fait soit avec une machine conventionnelle ou à la machine à commande numérique (CN). Il peut être fait soit en usinage classique ou en grande vitesse (UGV).

Avant d'aborder l'étude de la coupe des métaux en détail il est utile de définir quelques notions de base concernant la géométrie et la cinématique de la coupe dans le cas des opérations d'usinages les plus courantes. La figure (I.2) représente

l'exemple du tournage dans le cas d'une opération simple de chariotage longitudinal. Elle permet de définir les principales grandeurs géométriques et cinématiques que l'on retrouvera dans toute opération d'usinage. Les deux mouvements fondamentaux qui contribuent à l'enlèvement de la matière pour former le copeau sont le mouvement de coupe (MC) et le mouvement d'avance (MA). Le MC est donné par la rotation de la pièce usinée autour de son axe, le mouvement d'avance est donné par le déplacement de l'outil parallèlement à l'axe de la pièce. La combinaison de ces deux mouvements produit une hélice à la pointe de l'outil. Si cette pointe possède un rayon suffisamment grand par rapport au pas de l'hélice, elle engendre un cylindre. Pour enlever le copeau il faut ajouter aux deux mouvements précédents un troisième mouvement qui consiste à faire entrer l'outil à chaque passe d'usinage d'une certaine profondeur dans la matière. C'est la profondeur de passe (ap). Les grandeurs géométriques et cinématiques utilisées pour caractériser le MC et le mouvement d'avance, sont la vitesse de coupe (V_c), la vitesse d'avance (V_f) et la profondeur de passe (ap).

I.4.1. Vitesse de coupe (V_c) (m/min)

C'est le chemin parcouru en mètres par minute, par un point placé sur le diamètre extérieur de la pièce. Elle correspond en cinématique à la vitesse circumférentielle uniforme. En usinage elle désigne la vitesse à laquelle la matière se donne à la coupe. La vitesse de coupe est fonction à la fois de la matière à usiner et de la matière de l'outil. Il existe une méthode nommée « Couple Outil-Matière » qui permet de déterminer la vitesse de coupe correcte pour usiner le matériau. La vitesse de coupe est supérieure quand il y a lubrification par rapport à la coupe « à sec », et elle est régie par la formule suivante :

$$V_c = \frac{\pi d N}{1000} \quad (I.1)$$

La fréquence de rotation (N) (tr/min) désigne le nombre de tours par minute accomplis par la pièce dans le MC. En permutant les termes de la formule précédente, on obtient :

$$N = \frac{1000 V_c}{\pi d} \quad (I.2)$$

I.4.2. Vitesse d'avance (V_f) (mm/tr)

Le mécanisme d'avance automatique, sur toutes les machines classiques est établi de telle sorte qu'à un tour de la pièce corresponde à un déplacement donné (f) de l'outil.

Cette longueur est appelée *avance par tour* et bien souvent, tout simplement *avance*. La lettre f correspond au fait qu'en anglais, avance se dit « feed ».

La *vitesse d'avance* est la vitesse avec laquelle progresse l'outil suivant l'axe de rotation pendant une révolution de la pièce. On la note assez logiquement (V_f) pour la distinguer de la vitesse de coupe. Cette vitesse est déterminée expérimentalement en fonction des critères précédemment cités. Cela correspond en première approximation à l'épaisseur du copeau. On règle l'avance directement sur la machine et se calcule par la formule suivante :

$$V_f = fN \quad (I.3)$$

I.4.3. Profondeur de passe (ap) (mm)

Appelée aussi pénétration et désigne l'épaisseur de la couche enlevée en une seule passe sur la pièce. La profondeur de passe est la quantité de matière que va prendre l'outil lors d'un usinage sur un tour ou bien sur un centre d'usinage. Celle-ci varie selon la vitesse de coupe ainsi que la vitesse d'avance de l'outil.

Le choix de la profondeur de passe se fait en fonction de la surépaisseur de métal à enlever, les limites sont déterminées par.

➤ Limite maximum : puissance de la machine, rigidité de la pièce et de l'outil, nature du matériau à usiner.

➤ Taille de copeau minimum : impose l'épaisseur de matière à enlever pour réaliser un usinage correct des surfaces. Si la surépaisseur prévue pour l'usinage est trop faible, l'outil ne coupe pas et le métal est écroui. Il est donc nécessaire de prévoir une surépaisseur égale ou supérieure au copeau minimum (C_{pm}). Le copeau minimum (C_{pm}) est fonction de la nature du matériau constituant l'outil, de la finesse de l'arête tranchante, de l'arrosage, etc. Le copeau minimum intervient comme cote condition dans le calcul des côtes.

I.4.4. Action mécanique en usinage

Le chariotage (tournage de cylindres), est d'une part l'opération la plus simple, d'autre part parce, toutes les opérations d'usinage se ramènent instantanément au même schéma. La surface coupée c'est la zone intermédiaire entre la surface initiale et la surface engendrée. Le plan initial et le plan de l'arête tranchante, sont deux plans de référence servant à définir les faces et les angles de l'outil. Le plan de base est perpendiculaire au mouvement de coupe.

Le plan d'arête c'est le plan perpendiculaire au plan de base passant par l'arête tranchante principale (figure I.2).

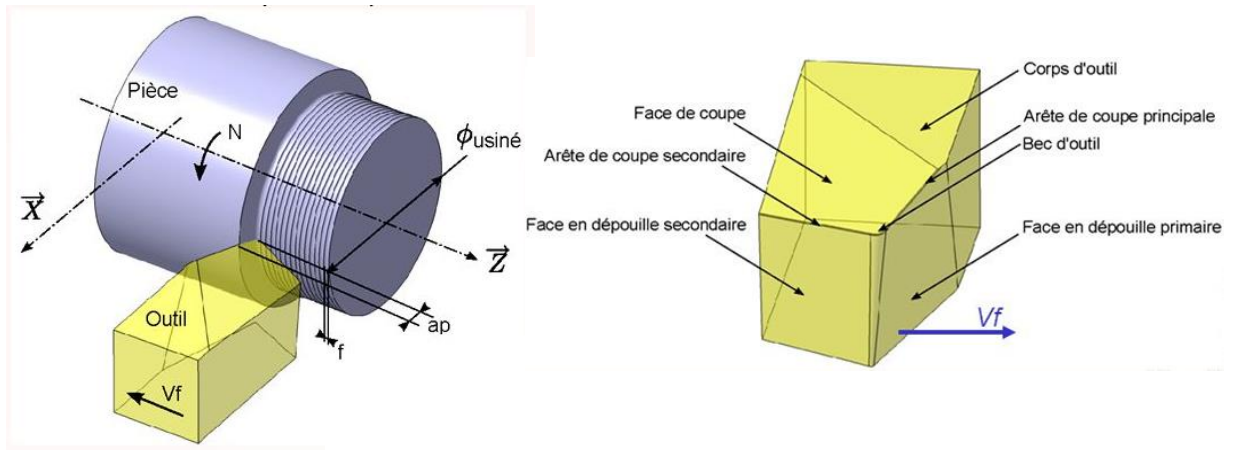


Figure I.2. Représentation de la coupe longitudinale [15]

L'arrête tranchante principale de l'outil fait un angle avec la direction de l'avance qu'on appelle l'angle de direction principale (χ). En plus la profondeur de passe (ap) et l'avance par tour (f) définissent la quantité de copeau à enlever. Elle est caractérisée par son épaisseur (h_1) et sa largeur (b), ce qui déduit évidemment la relation suivante (figure I.3) :

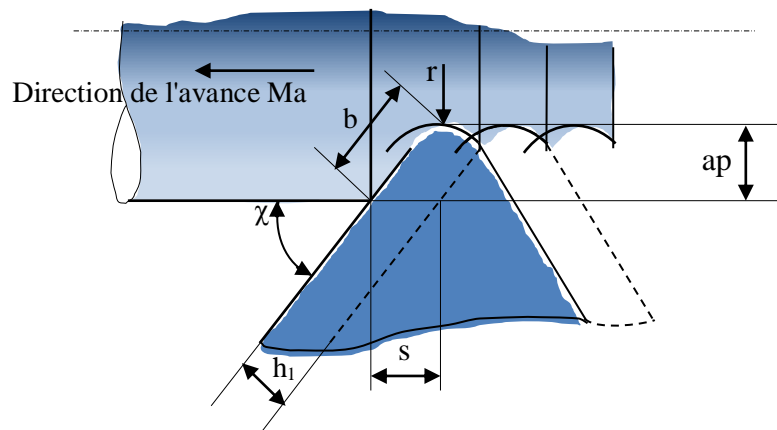
$$ap \cdot s = h_1 \cdot b \quad (I.4)$$


Figure I.3. Grandeurs géométriques de la coupe en tournage [4]

Le rayon du bec désigne la projection de l'arrondi de la pointe de l'outil sur le plan de base. On définit l'épaisseur du copeau h_2 qui est différente de h_1 et qui est toujours supérieur ou à la limite égale à h_1 , c'est le cas le plus simple d'un enlèvement de copeau qui permet une définition claire des grandeurs géométriques de base (coupe orthogonale pure).

La coupe orthogonale est particulièrement adaptée aux études de la modélisation puisqu'elle permet de ramener le problème tridimensionnel de la coupe (coupe réelle 3D) à un problème bidimensionnel (coupe 2D). En effet, les

simplifications géométriques et cinématiques facilitent l'étude des phénomènes apparaissant lors de la coupe. Il faut noter qu'en dehors du cas de la coupe orthogonale, le cas de la coupe tridimensionnelle peut être considéré comme un cas de coupe orthogonale lorsque le rayon de bec de l'outil est très faible et négligeable selon les hypothèses de Merchant [16].

La figure (I.4) correspond à l'enlèvement d'une couche de métal d'épaisseur $h_1 = t$ par un outil dont la direction de coupe est perpendiculaire à l'avance. L'opération est un cas simplifié de rabotage. On peut définir sur cette Figure les faces et les angles principaux de l'outil :

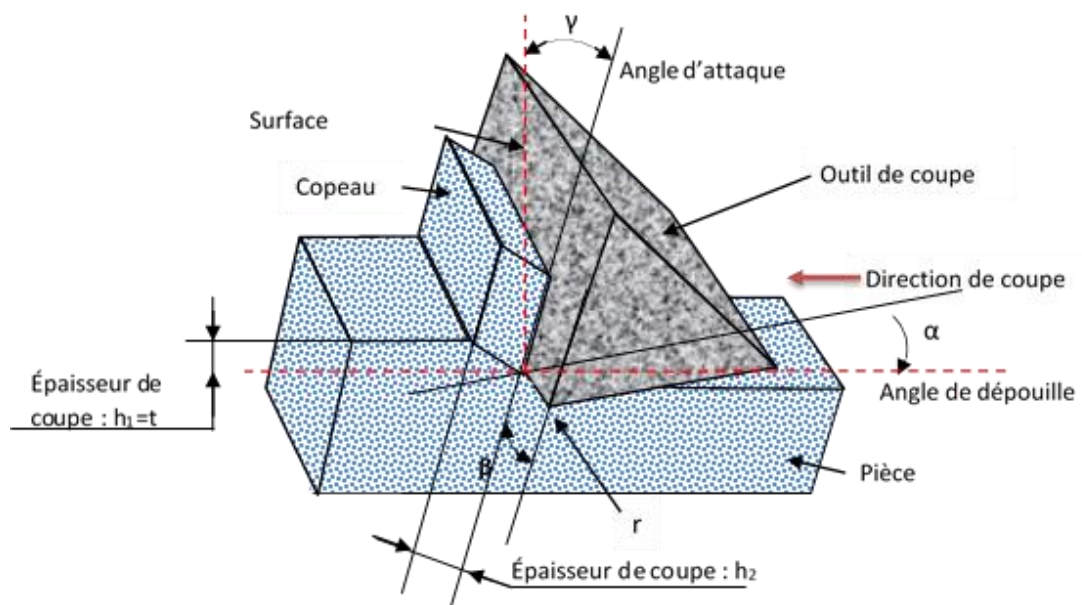


Figure I.4. Configuration de la coupe orthogonale [4]

➤ La face de dépouille de l'outil

Évite le talonnage entre l'outil et la pièce en faisant un angle α avec la direction de coupe (angle de dépouille).

➤ La face de coupe

Sur laquelle s'écoule le copeau, elle forme l'angle (γ) avec le plan de base ou la direction perpendiculaire à la vitesse de coupe (angle de coupe).

➤ Le taillant

Qui est le coin d'outil entre ces deux faces définies par l'angle de taillant (β) du dièdre formé par les deux faces.

➤ L'arrondi de l'arête de coupe

Ou finesse d'arête, définie par le rayon (r), ce schéma de base se trouve dans tous les types d'usinage quel que soit leur complexité. Il est donc utile de s'en servir d'un

modèle simplifié qui permet d'interpréter les lois dans tous les cas d'usinage même les plus compliquées. Nous reviendrons plus tard sur la géométrie du foret en détail pour nous rapprocher plus à notre thème.

I.5. Méthodes de déterminations de l'usinabilité

Les essais d'usures de l'outil sont jugés de bonne efficacité en raison de l'exploitation des conditions d'usinage concrètement utilisées. Ils permettent en outre, de mesurer avec fiabilité les indices d'usinabilités bien définis.

Bien que la prédiction de l'usure soit une étape cruciale pour les industriels dans le secteur de l'usinage, elle reste une tâche délicate à accomplir vu les limitations des moyens de modélisation de l'usure.

En effet, à travers la modélisation de l'usure, la contribution de chaque forme d'usure et son évolution au cours du temps vont être mises en évidence. Il est également possible de voir l'influence des divers paramètres de coupe sur le processus de l'usure [17].

I.5.1. Modèles empiriques

Les premières tentatives ayant pour objectif de prédire l'usure des outils de coupe consistait en l'élaboration de modèles empiriques reliant la durée de vie à un ou plusieurs paramètres de coupe. Certes, leur inconvénient majeur est la restriction de leur application pour un intervalle de conditions de coupe très limité. Avec le développement des technologies d'usinage, comme l'Usinage à Grande Vitesse (UGV), les équations de durée de vie de l'outil doivent être mises à jour avec l'introduction de nouvelles constantes et une focalisation sur l'expérimentation.

De plus, seule la durée de vie peut être prédite par ces équations mais elles ne fournissent aucun renseignement sur la progression de l'usure de l'outil, son profil ou les mécanismes qui la régissent qui sont parfois importants pour les fabricants d'outils de coupe

Le modèle de Taylor est le modèle le plus utilisé dans l'industrie pour estimer la durée de vie d'un outil de coupe [18]. Sa forme la plus simplifiée est la suivante :

$$T_L = C \cdot Vc^n \quad (I.5)$$

T_L est la durée de vie de l'outil exprimée en min, C une constante qui dépend du couple outil-matière et n un paramètre qui dépend essentiellement de la nuance

de la plaquette de coupe. La détermination des paramètres **C** et **n** sont déterminés expérimentalement.

Dans le but d'améliorer l'estimation de la durée de vie des outils coupants, d'autres formes dérivées du modèle de Taylor ont été élaborées. Le modèle de Gilbert (appelé également modèle de Taylor généralisé), en est une. Dans cette formulation, la durée de vie de l'outil ne dépend plus uniquement de la vitesse de coupe mais prend en compte d'autres paramètres d'usinage (avance, profondeur de passe). Elle est donnée par l'équation suivante :

$$T = C \cdot Vc^n \cdot f^x \cdot ap^y \quad (I.6)$$

n, **C**, **x**, **y** sont des constantes dépendant du matériau utilisé.

Ce modèle a été également amélioré par M. Remadna. Ses recherches ont abouti à une représentation qui s'approche le mieux de l'évolution de l'usure donnée par les essais expérimentaux.

Les méthodes expérimentales se divisent en deux types selon la durée de l'essai :

- Essais accélérés (rapide).
- Essais de longue durée.

I.5.1.a. Essais accélérés

Il existe différentes classes de modèles de vie accéléré : les modèles expérimentaux déterminés par des plans d'expériences décrits par Phadke, M. S. (1989) ; Les modèles physiques définis à l'aide de ceux de dégradation (chimique, mécanique, ...) et les modèles statistiques caractérisés par des approches paramétrique, semi paramétrique et non paramétrique [19].

En mécanique, ces essais visent à jouer des informations sur l'usure des outils, au moindre coût, en un temps réduit et avec un prélèvement de matière minimal. Pour atteindre cet objectif, l'expérimentateur doit choisir les conditions de coupe utilisées en pratique [20], à travers leur travail sur la contribution de développement d'une stratégie d'évaluation de l'usinabilité des aciers durcis, montrent l'importance d'utiliser les essais accélérés.

I.5.1.b. Essais de longue durée

Ces essais sont adoptés pour apprécier la durée de vie de l'outil en se servant du critère de la mort de l'outil en acier rapide, c'est-à-dire la défaillance totale de ce dernier. Pour établir les lois d'usure, il faudra maintenir les conditions de travail

constantes, et le contrôle de l'usure de l'outil doit se poursuivre jusqu'à sa destruction.

En prenant comme critère d'usure la mort de l'outil, on peut déterminer les valeurs optimales de la tenue (T) et la vitesse de coupe (V_c), en traçant la droite en échelle bi logarithmique de la loi de Taylor et en se référant au graphique, on peut déduire les coefficients nets [18].

I.5.1.c. Méthode graphique

La tenue de l'outil est le temps de coupe correspondant à la valeur admissible du travail d'enlèvement de matière en ébauche ou en finition. Ayant établi le critère d'usure de l'outil (largeur maximale de l'usure en dépouille), les résultats d'une série d'essais seront traités graphiquement en dressant les courbes d'usure en fonction du temps de coupe (figure I.5).

La durée de vie de l'outil de coupe est directement liée à son usure ou, à sa détérioration pour un temps donné. L'allure tracée sur la figure (I.5), se divise en trois zones A, B et C. Elle représente la relation entre l'usure et le temps de coupe.

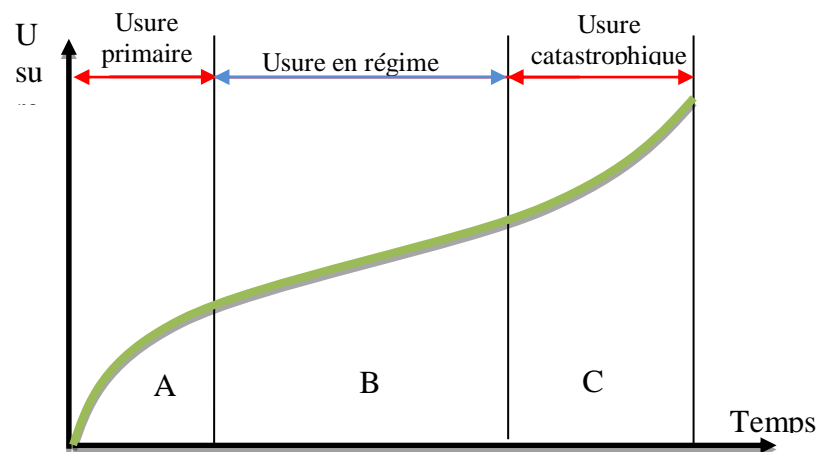


Figure I.5. Évolution de l'usure de l'outil en fonction du temps [21]

- Zone A : est celle du rodage ou usure initiale. Elle donne lieu à une usure intense qui se caractérise par l'arrachement d'une quantité importante de petites particules de la surface de l'outil, plus les surfaces de la partie active de l'outil sont nettes (lisses), plus l'évolution de l'usure est faible.
- Zone B : correspond à l'usure normale. Elle est plus stable, c'est à dire linéaire. Elle est caractérisée par une pente très faible comparativement aux autres zones.
- Zone C : c'est la zone d'usure accélérée (catastrophique), là où les deux types d'usure (celle en dépouille et en cratère) se réunissent.

- Il est à noter que la Figure (1.5) ne représente qu'un modèle typique de l'évolution de l'usure des outils de coupe en fonction du temps. Pour prédire l'usure d'un outil en service par la méthode graphique, il faut se référer à un graphe élaboré d'après des expériences réelles.

I.5.2. Modèles analytiques

Ce modelé repose sur la détermination du modèle empirique liant l'usure de l'outil aux différents facteurs d'usinage aussi qu'au temps de coupe. On adopte le modèle de Gilbert qui est la forme généralisée du modèle de Taylor représenté par l'équation (I.6).

Vu les limites des modèles empiriques quant à la prédiction de l'usure de l'outil de coupe et des différents phénomènes qui le régissent, les chercheurs ont essayé d'élaborer des modèles qui mettent l'accent sur un ou plusieurs mécanisme d'usure notamment l'abrasion, la diffusion...

Contrairement aux modèles établis précédemment et qui donnent directement la durée de vie de l'outil et non l'évolution de l'usure de l'outil au cours du temps, ces modèles permettent de prédire l'évolution de la forme de l'outil au cours du temps.

Les principaux modèles analytiques d'usure trouvés dans la littérature sont :

I.5.2.1. Modèle de Takeyama et Murata

Ce modèle a été développé en 1963 [22]. Il prend en compte l'usure par abrasion et par diffusion. Il est donné par l'expression (I.7) :

$$\frac{dw}{dt} = G(V, f) + D \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (I.7)$$

dw/dt étant le taux d'usure, E_a l'énergie d'activation du processus de diffusion, R la constant des gaz parfaits, T la Température de l'outil, G et D des constantes du matériau à déterminer expérimentalement. D_{exp}

I.5.2.2 Modèle d'Usui et Shirakashi

Ce modèle a été développé en 1984 [23], Il prend en compte l'usure par adhésion. Il est donné par l'expression suivante (I.8) :

$$\frac{dw}{dt} = A \sigma_n V_g \exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad (I.8)$$

σ_n est la contrainte normale à la surface de contact, V_g la vitesse de glissement, A et B des constantes. V_g , T et σ_n peuvent être déterminés grâce à la méthode des Eléments Finis ou en combinant une méthode analytique avec la méthode des

Différences Finies. Ainsi, cette méthode est pratique pour l'implémentation de l'estimation de l'usure.

I.5.2.3. Modèle d'Archard

Pour estimer le volume de matière usé par abrasion dans le cas d'un frottement pion disque, Archard [24], établit la relation ci-après; celle-ci reste valable pour le cas d'un contact glissant à vitesse constante (I.9) :

$$V = K \frac{F_n}{P_m} d \quad (I.9)$$

k étant le coefficient d'usure sans unités, F_n étant l'effort normal appliqué, P_m étant la contrainte d'écoulement du matériau le plus mou et d la distance parcourue.

Si on pose $K = k/p_m$, K étant le coefficient d'usure, l'expression de la loi d'Archard devient :

$$V = K \cdot F_n \cdot D \quad (I.10)$$

La loi d'Archard peut également s'écrire sous la forme suivante :

$$\left[\frac{h}{t} \right] = K \cdot V g \cdot P \quad (I.11)$$

h est la profondeur d'usure et P la pression de contact à la surface.

I.5.3. Analyse et comparaison entre les deux méthodes

Par conséquent, Les deux méthodes d'évaluation de l'usure des outils de coupe, expérimentale et par modèle **analytique** exigent la présence d'une certaine corrélation entre elles. À cet effet, nous pourrions dire que les essais de longue durée réalisés dans des conditions proches de celles utilisés dans l'industrie, offrent des résultats moins dispersés, bien qu'ils imposent un grand volume de matière et nécessitent beaucoup de temps pour apprécier les résultats. Par contre, accélérer le mécanisme d'endommagement pour réduire le temps et la matière, suffit pour estimer certaines caractéristiques comportementales d'un produit dans les conditions normales d'emploi, quoi qu'elles ne soient pas précises vis-à-vis de celles recueillies par les essais de longue durée. Le choix d'une méthode est lié principalement à la disponibilité de la matière, du temps et des appareillages.

Compte tenu de cet état de fait, nous avons adopté l'essai de longue durée pour apprécier l'évolution de l'usure des forets hélicoïdaux lors de nos expériences. En prenant en considération les critères d'usure qu'on a jugé les plus recevables, les plus utilisés et ceux recommandés par la norme ISO D'autre part nous avons retenu

comme critère admissible de la mort de l'outil en acier rapide, l'usure sur la surface en dépouille (VB_{\max}).

I.5.4. Modèles numériques

Le développement d'outils de calcul de plus en plus sophistiqués et de méthodes numériques pour la résolution de problématiques complexes a engendré un progrès considérable dans la simulation des opérations d'usinage. Parmi ces méthodes on cite principalement la méthode des Eléments Finis (FEM) qui a permis de simuler les efforts de coupe, les températures de coupe, les contraintes résiduelles...

Ainsi, vu l'impact considérable de l'usure sur l'intégrité de surface et notamment le déroulement de l'opération d'usinage, les chercheurs ont essayé d'élaborer des modèles numériques pour la prédiction du phénomène d'usure des plaquettes de tournage.

Les principaux modèles d'usure par éléments finis établis ont été développés sous le code de calcul DEFORM-2D. En effet, Yen et al [25], ont été les premiers à développer un modèle éléments finis pour la prédiction de l'usure sous le code de calcul DEFORM-2D. Le modèle élaboré traite l'usinage de l'acier C45 par un outil en carbure non revêtu en coupe orthogonale. Il permet de calculer l'usure en cratère KT et en dépouille VB en se basant sur le modèle d'usure [23].

Comme l'illustre la figure (I.6), la stratégie de calcul de l'usure débute par un calcul thermomécanique lagrangien suivi d'un calcul purement thermique dans le but d'avoir la distribution de température en régime permanent.

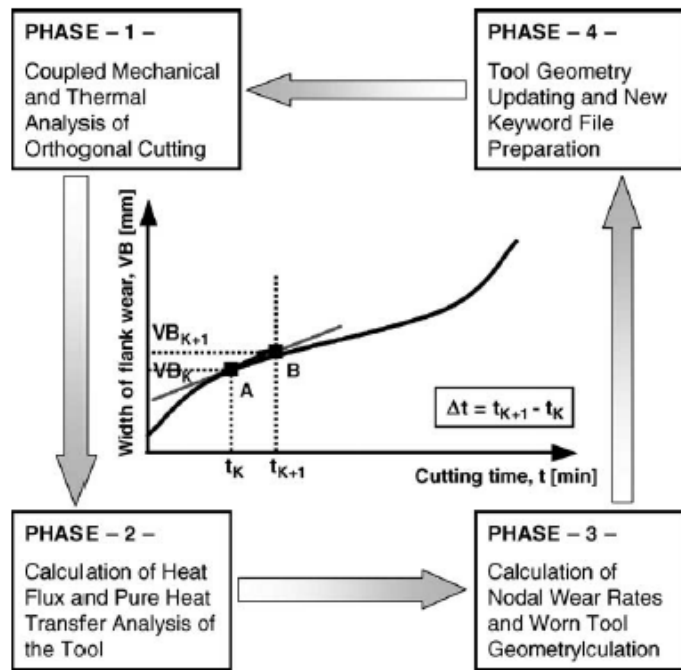


Figure I.6 : Stratégie de simulation de l'usure Via DEFORM-2D, [25].

Après un nombre d'incrément choisi arbitrairement, le taux d'usure est calculé en chaque nœud de la surface de l'outil via la loi d'Usui et Shirakashi [23] et la géométrie de l'outil est mise à jour par déplacement des nœuds dans une direction normale à l'arête de coupe (figure I.7).

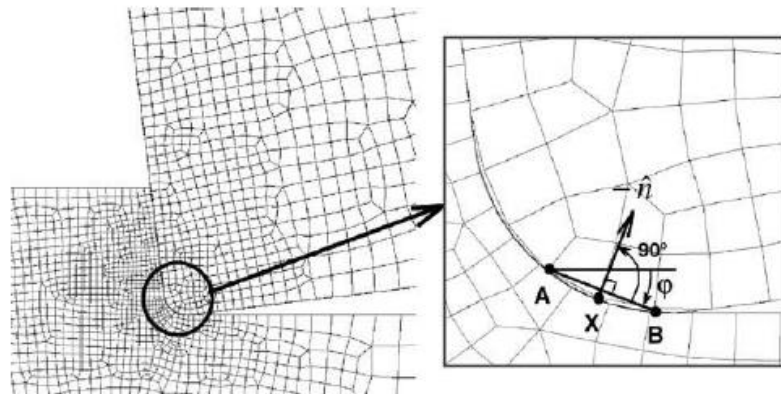


Figure I.7. Mise à jour de la géométrie de l'outil par déplacement nodal : cas de l'usinage de l'acier C45 par un outil en carbure non revêtu, $V=300$ m/min ; $f=0.145$ mm/tr, [25]

I.6. Endommagement des outils de coupe

Le choix des meilleures conditions d'usinage vis-à-vis de l'usure, que ce soit avec des vitesses conventionnelles ou à grande vitesse, consiste à trouver les conditions de coupe, en établissant un compromis entre la vitesse de coupe et la durée de vie des outils.

La durée d'utilisation de l'outil étant limitée par son degré d'usure, il en résulte que les temps d'usinage sont en rapport direct avec l'usure. Le coût de l'usinage, qui intéresse en définitive l'entreprise, est une conséquence de la tenue des outils à l'usure. Les méthodes pour la recherche des conditions opératoires d'un couple outil-matière mettent en évidence la nécessité d'établir la capacité d'usinabilité avant toute autre mesure de ces caractéristiques.

La qualité du travail d'un outil dans le processus d'usinage dépend de son degré d'usure. L'importance de cette usure a une influence directe sur :

- la précision dimensionnelle et la qualité de la surface obtenue;
- la tenue de l'outil dans le temps;
- la puissance nécessaire à la coupe;

La définition de la durée de vie T d'un outil selon la norme ISO 3685 : « c'est le temps de coupe total d'un outil nécessaire pour atteindre un critère de durée de vie spécifique ».

Il faudra donc maîtriser cette durée de vie ainsi que son évolution par rapport aux paramètres d'usinage. Dans la pratique, on pourra ramener cette durée de vie à des éléments plus concrets sur le poste de travail comme un volume de copeau produit entre deux changements d'arête, un nombre de pièces usinées entre deux changements d'arêtes ou une longueur d'usinage entre deux changements d'arêtes.

I.6.1. Usure des outils coupants

D'une manière générale, on peut définir l'usure comme une perte de masse à l'interface de deux solides en contact, engendrée par des phénomènes liés au frottement. Dans le domaine de la fabrication mécanique, l'usure des outils de coupe résulte de l'action de plusieurs mécanismes chimiques, mécaniques ou physiques et peut se manifester sous diverses formes sur l'outil.

Dans le domaine de la fabrication mécanique, le phénomène de l'usure est perçu comme une problématique majeure à résoudre car l'usure des outils participe pour une grande part dans le coût des opérations d'usinage et le changement de la géométrie des outils.

Le corollaire de l'usure, modifie les conditions de coupe et par conséquent détériore la qualité de l'usinage. Il est donc indispensable de comprendre les mécanismes qui régissent cette usure. Selon Shaw [26], trois modes d'usure peuvent être répertoriés : usure par abrasion, usure par adhésion et usure par diffusion et chaque mécanisme d'endommagement agit sur l'outil à des niveaux différents selon les conditions spécifiques de l'usinage.

La prédominance d'un des mécanismes ou l'effet combiné de plusieurs d'entre eux dépend à la fois du type d'opération d'usinage, des conditions de coupe et des propriétés physico-chimiques des matériaux mis en jeu. Les phénomènes tribologiques aux interfaces contrôlent alors la nature et la sévérité des usures (Figure I.8).

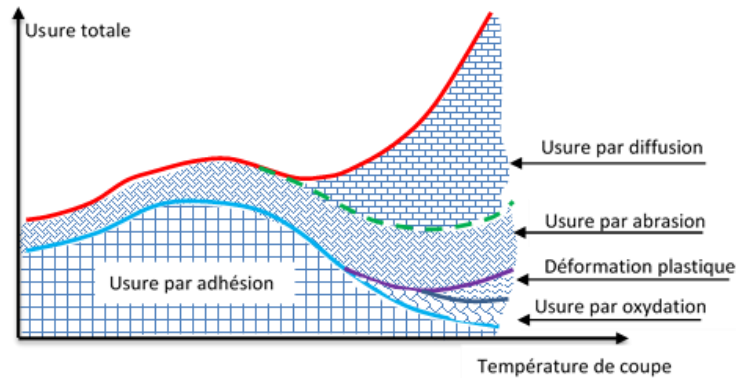


Figure I.8. L'usure en fonction de la température [27]

I.6.1.1. Usure par abrasion

L'usure par abrasion se caractérise par la formation de bandes striées dans la direction de contact avec la surface usinée de la pièce ou dans la direction du copeau qui glisse le long de la face de coupe. L'usure par abrasion apparaît donc à la fois sur la face de coupe (figure I.9 a) et sur la face de dépouille des outils (figure I.9 b). Ce sont les particules dures qui sont à l'origine de cette usure. Elles peuvent être présentes dans la pièce sous la forme d'inclusions et de précipités ou provenir de l'outil lui-même par d'autres mécanismes d'usure telle que l'adhésion. De micro copeaux sont ainsi arrachés à l'outil par ces éléments durs qui sont sans cesse renouvelés au cours de l'usinage. L'usure par abrasion est l'usure dominante quand le contact à l'interface outil-copeau est essentiellement du glissement [28].

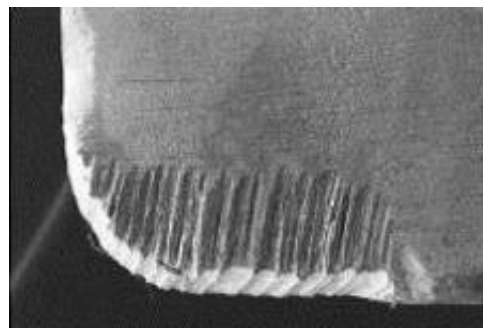


Figure I.9. Usure par abrasion sur la face de coupe après usinage d'alliage de titane [29]

I.6.1.2. Usure par adhésion : arête rapportée et attrition

Sous l'effet de la pression, de véritables soudures se créent entre l'outil et le copeau par écrasement/entrelacement des aspérités ou par des phénomènes d'adsorption et de solubilité s'il existe une affinité chimique entre les atomes qui constituent les deux surfaces. Lorsque les jonctions formées se rompent, des fragments de matière provenant du copeau restent accrochés sur la face de coupe de l'outil. Dans certaines conditions, notamment à faible vitesse de coupe, les éléments du copeau qui ont tendance à coller s'accumulent de manière importante pour former un dépôt macroscopique que l'on appelle arête rapportée («Built-Up Edge»).

Comme l'arête rapportée (BUE) a tendance à grossir, elle devient instable et finit par se briser. Une partie de la matière est emportée par le copeau, le reste peut passer sous l'arête de coupe et coller à la surface de la pièce. Le processus de formation et de destruction de l'arête rapportée peut se répéter plusieurs fois au cours d'un usinage causant une variation périodique de l'avance et de l'angle de coupe. Il en résulte une modification importante des dimensions souhaitées du produit fini et une détérioration de son état de surface. L'évacuation des fragments de copeaux adhérents ou de l'arête rapportée peut s'accompagner d'arrachement d'une partie de la couche superficielle de l'outil sur laquelle s'est constitué le dépôt, ce phénomène d'usure est appelé attrition. Il est encore plus néfaste vers la fin de l'usinage au moment où l'outil se désengage de la pièce et l'arête rapportée expulsée.

Le mécanisme de formation d'arête rapportée est encore mal connu, mais il est généralement associé au phénomène d'écrouissage de la matière qui semble être prédominant dans la formation du copeau aux faibles vitesses de coupe, [30]. L'utilisation de vitesses de coupe suffisamment élevées permet souvent de limiter l'apparition de l'arête rapportée.

I.6.1.3. Usure par diffusion

Aux grandes vitesses de coupe, le gradient de températures à la surface copeau/outil est particulièrement important. Une couche de glissement facile, se constitue avec fluage du matériau du copeau.

La vitesse de diffusion éventuelle d'un élément d'alliage de l'outil dans le copeau est très grande en raison des températures atteintes, d'autant plus que cet élément est absent du matériau usiné. Comme il y'a renouvellement continu du copeau, la « demande » en élément diffusant reste constante au cours de l'opération [31].

Outre ces trois principaux modes d'usure : abrasion, adhésion et diffusion, d'autres mécanismes dont l'effet est moins important peuvent être cités tel que l'usure par oxydation qui se manifeste par une attaque chimique sur la surface et est accentuée par les contraintes mécaniques de frottement. Il peut aussi s'agir de l'usure par érosion due à l'action d'enlèvement de matière des particules dans un fluide ou l'usure par fatigue soit thermique provoqué par l'usinage à grande vitesse avec des outils à faible conductivité thermique ou mécanique qui se manifeste par des vibrations.

I.6.1.4. Déformation plastique et fatigue

Les déformations plastiques se produisent sous l'effet combiné des grandes pressions et des grandes températures générées pendant l'usinage. Elles apparaissent au niveau de la pointe de l'outil et sur la face de coupe de celui-ci (figure I.10). Les conditions d'usinage sévères (grandes vitesses de coupe et grandes avances) ainsi que la dureté élevée de certaines pièces sont donc favorables à l'apparition de tels phénomènes. Les dimensions et la géométrie des outils (acuité de l'arête) sont les principaux paramètres pour prévenir l'usure par déformation plastique. La fatigue des outils est due aux combinaisons des phénomènes thermiques et mécaniques. Les fluctuations de la température, le chargement et le déchargement des efforts peuvent en effet conduire à la fissuration des outils et/ou à l'effondrement des arêtes de coupe.

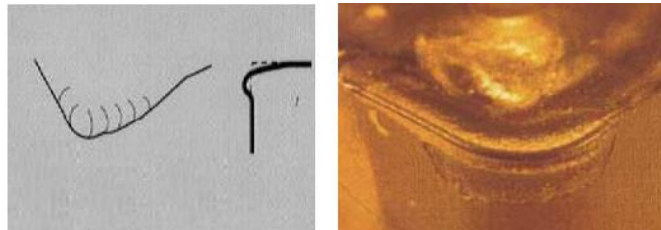


Figure I.10. Usure par déformation plastique [32]

I.6.2. Critères d'usure et durée de vie des outils

I.6.2.1. Critères de surveillance de l'usure

Les critères usuellement utilisés pour des outils en carbures et notamment ceux recommandés par la norme en vigueur concernant l'usure des outils de coupe la norme ISO 3685, se rangent en deux catégories décrites ci-dessous.

I.6.2.1.1. Critères directs

Ils sont basés sur l'évolution de l'usure (figure I.11) tel que [33] :

- critère d'usure frontale, caractérisé par une largeur limite VB limites de la bande d'usure sur la face en dépouille de l'outil.

- critère de cratérisation, défini par la valeur limite de la profondeur du cratère KT limites ou par la valeur limite du rapport de cratérisation KT/KM ou par une valeur limite de l'angle de cratérisation γ_c .
- critère de « mort d'outil », utilisé principalement pour les outils en acier rapide.
- critère d'usure volumétrique ou massique caractérisé par la perte en poids de l'outil, mesurée par pesée ou à l'aide de traceurs radioactifs.
- critère basé sur les variations de cotes des surfaces usinées, actuellement utilisé pour la détermination de l'usinabilité des aciers.

I.6.2.1.2. Critères indirects

Ils sont basés sur la variation de certaines grandeurs physiques de la coupe en fonction de l'usure de l'outil, par exemple :

- les efforts et le travail spécifique de coupe.
- la rugosité de la surface usinée.
- la température à la pointe de l'outil.

D'un point de vue pratique, l'usure frontale est la plus importante à considérer puisqu'elle détermine l'état de surface de la pièce usinée et la précision dimensionnelle. Dans le cas des outils en acier rapide, les mesures de l'usure frontale présentent une dispersion importante due principalement à l'hétérogénéité des aciers à outils et de la matière usinée et la présence d'une zone morte au voisinage du bec, qui se traduit par l'apparition d'une arête qui protège la face en dépouille dans certains cas. Les critères directs les plus utilisés sont ceux de l'usure en dépouille limite VB_{max} et l'usure en cratère limite KT_{max} (figure I.11).

On peut aussi rencontrer des critères indirects qui seront considérés dans cette étude et qui sont basés sur la variation de certaines grandeurs physiques de la coupe en fonction de l'usure de l'outil. Pour des usinages courants en mécanique générale ou en outillage, les limites acceptables pour l'usure en dépouille et l'usure en cratère selon la norme ISO 3685 sont les suivants :

Une largeur moyenne de la bande d'usure frontale de $VB = 0,3$ mm si elle est uniforme, ou une largeur maximale $VB_{max} = 0,5$ mm, si elle est irrégulière. Une profondeur maximale du cratère égale à : $KT = (0,1+0,3.f)$ mm ou $KT = 0,15$ mm.

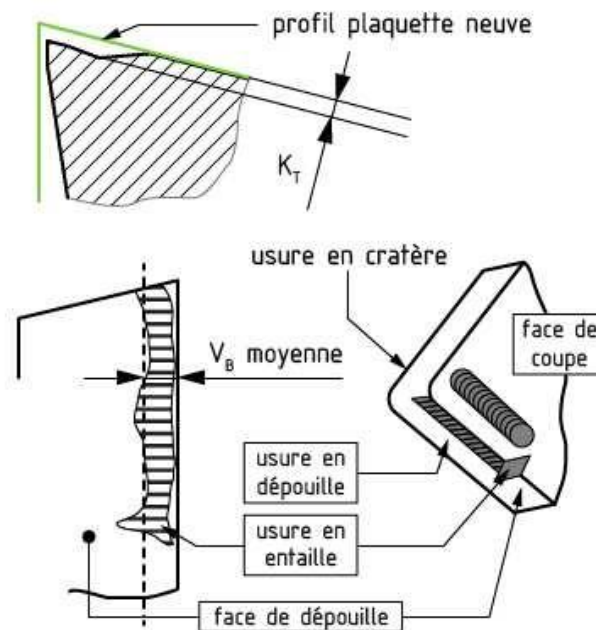


Figure I.11. Formes d'usure observées sur une plaquette de coupe [33]

I.6.3. Modèles de durée de vie et modèles d'usure

La durée de vie d'un outil est le temps de coupe total nécessaire pour atteindre un critère de durée de vie spécifique. Pour évaluer la durée de vie, on se réfère à une valeur limite d'un critère direct (VB , KT ...).

L'analyse de l'endommagement se fait très souvent en considérant l'usure sur la face de dépouille car cette dernière influence directement la qualité de la surface de la pièce. Pour un outil en carbure, les critères suivants sont recommandés par la norme ISO :

L'usure en dépouille VB se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante, parallèle à l'arête de coupe, révélatrice de l'abrasion de la face en dépouille, due au frottement de la pièce. Sa largeur moyenne est notée VB , elle détermine l'état de surface et la précision dimensionnelle de la pièce. La norme fixe comme critère de durée de vie $VB = 0,3$ mm si l'usure est uniforme et $VB = 0,5$ mm si l'usure est localisée).

L'usure en cratère KT est due au frottement du copeau sur la face de coupe et se présente sous la forme d'une cuvette de profondeur notée KT .

Les valeurs admissibles fixées par normes pour ce type d'usure sont comprises dans l'intervalle : $KT = 0.10$ à 0.20 mm

Outre ces deux usures principales d'autres usures (aléatoires) peuvent être observées :

- l'effondrement de l'arête, lié aux outils en ARS.
- l'usure par entaille de l'arête de coupe qui se produit lorsque la couche superficielle de la pièce est beaucoup plus dure que l'intérieur.

I.7. Formation du copeau

La compréhension des différents phénomènes qui interviennent lors du tournage est complexe et pas encore maîtrisée. L'enlèvement de matière se fait par action mécanique d'un outil coupant (figure I.12). Dans le cas de la coupe orthogonale en régime stationnaire, la force exercée par l'outil lors de son engagement dans la matière provoque, à l'échelle mésoscopique, une forte compression de la matière (une déformation plastique et un échauffement considérable) et engendre une zone de cisaillement intense entre la pointe de l'outil et la surface externe du copeau.

Cette zone est appelée zone de cisaillement primaire (ZI) et c'est aussi la zone de formation de copeau. En outre, le copeau formé s'écoule et frotte sur la face de coupe de l'outil. Ce frottement intense génère la zone de cisaillement secondaire (ZII) [34].

Cette dernière est constituée d'une fine bande de frottement intense entre le copeau et l'outil et d'une autre bande d'influence du frottement du copeau sur l'outil (cisaillement secondaire). De plus, pendant l'avance de l'outil, la face en dépouille de ce dernier frotte sur la nouvelle surface et produit une troisième zone de cisaillement nommée zone de cisaillement tertiaire ZIII.

Lors du perçage, la connaissance du mécanisme de formation des copeaux est très importante afin de fournir des copeaux avec la taille et la forme attendues. Les copeaux longs ne peuvent pas se déplacer facilement sur les goujures du foret et doivent être évités, tandis que les petits copeaux peuvent être facilement retirés du trou usiné [35]. En plus L'élimination des copeaux est un problème important dans le perçage à lubrification minimale (MQL) à haut débit. Un résumé des études de base sur le débit d'air et l'évacuation des copeaux pour le perçage en MQL a montré que le débit d'air dépend principalement de la pression d'air d'entrée et du diamètre du trou de refroidissement et que la vitesse moyenne de l'air augmente avec

l'augmentation du diamètre du trou de refroidissement mais pas avec l'augmentation de la pression atmosphérique [36]. Une méthode de simulation multi-physique 3D sur la distribution des fluides de coupe et l'évacuation des copeaux lors du perçage de trous profonds à micro-torsion est réalisée afin d'analyser le transport des copeaux en combinant l'hydrodynamique des particules lissées et la méthode des éléments discrets, montrant un gradient de pression plus élevé dans l'évacuation flûte et, par conséquent, des vitesses d'écoulement plus élevées seraient souhaitables pour une meilleure évacuation des copeaux [37].

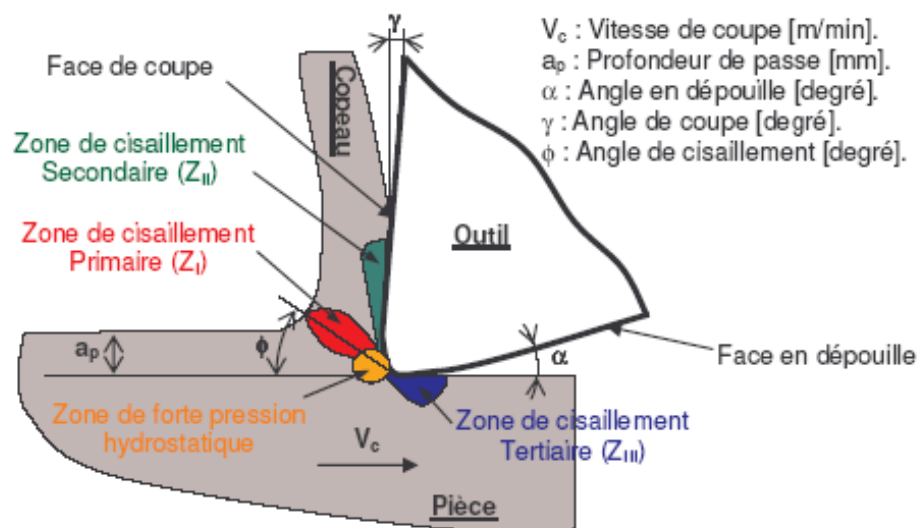


Figure I.12. Formation de copeau en coupe orthogonale [34]

Ainsi et comme le montre la figure (I.15). La formation du copeau peut être décrite en définissant différentes zones d'absorption de l'énergie mécanique apportée lors de la coupe, une zone de forte pression hydrostatique au niveau de la pointe de l'outil et les trois zones de cisaillement citées précédemment.

Le phénomène complexe de formation de copeau dépend également fortement de :

- la rhéologie du matériau usiné (matériau dur, matériau à usinabilité Amélioré, etc...).
- les propriétés thermo-physiques du matériau usiné et usinant.
- la nature et la géométrie de l'outil.
- la nature du contact outil-copeau.
- la nature de l'opération effectuée (coupe orthogonale, chariotage, etc..).
- procédé d'usinage utilisé (usinage dur, usinage avec assistance, etc..).

I.7.1. Forme du copeau à l'échelle microscopique

I.7.1.1. Copeau continu

La figure (I.13) donne un exemple de copeau continu obtenu par Le Calvez pendant l'usinage d'un acier 32CrMoV13 d'une dureté de 270 Hv avec une nuance d'outil en Cermet. Lors de la génération d'un copeau continu, la valeur de la contrainte de cisaillement que subit la matière à la traversée de la zone primaire n'atteint pas la limite de rupture du métal et ce dernier s'écoule de manière continue le long de l'outil. Généralement, ce type de copeau est obtenu pour de faibles vitesses de coupe et/ou d'avance.

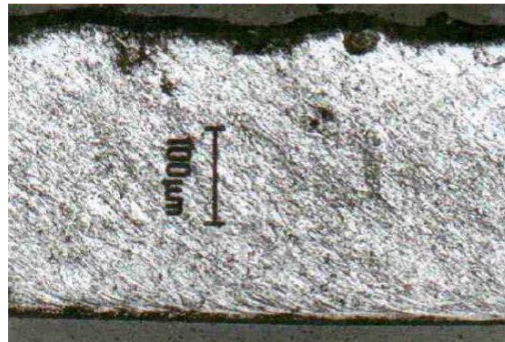


Figure I.13. Copeau continu ($V_c = 100\text{m/min}$, $f = 0,2\text{ mm/tr}$) [38]

I.7.1.2. Copeau avec arête rapportée

Pendant la coupe et pour de faibles vitesses de coupe, une arête rapportée peut se former par accumulation de la matière à la pointe de l'outil de coupe générant ainsi une nouvelle arête, qui déplacera le contact outil-copeau (figure I.14). Les dimensions de l'arête rapportée (l'épaisseur et la longueur), conditionnent la rugosité totale de la surface usinée et sont d'autant plus grandes que les dimensions sont élevées [39].

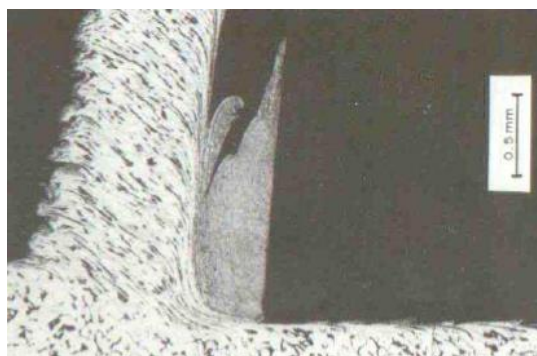


Figure I.14. Copeau avec arête rapportée [39]

I.7.1.3. Copeau discontinu

Dans ce cas, la valeur de la contrainte de cisaillement dans la zone primaire atteint la limite de rupture du métal usiné et le copeau se casse sous l'effet de cette rupture finale du matériau. Cette morphologie est souvent observée dans l'usinage des aciers inoxydables austénitiques (figure I.15).

Il est très important de comprendre la genèse des copeaux en dents de scie car d'une part, ils sont faciles à fragmenter vu la faible épaisseur qui joint chaque feston, qui à son tour va permettre de dissiper plus de chaleur en comparaison avec un copeau continu. Ainsi, cette petite épaisseur va permettre de diminuer la température de coupe à l'interface Pièce-outil-copeau [40]. D'autre part, la segmentation peut conduire à de fortes variations de la fréquence périodique sur les efforts de coupe [41].



Figure I.15 : Copeau discontinu cas d'un acier austénitique inoxydable usiné avec un outil carbure ($V_c = 130\text{m/min}$, $f = 0,1\text{mm/tr}$) [42].

I.8. Revêtement des outils de coupe

Le revêtement des outils coupants est un procédé fréquent en usinage, Les fonctions que l'on peut exiger d'un revêtement sont avant tout de protéger l'outil contre les agressions extérieures qu'il subit lors d'une opération d'usinage notamment l'usure et les températures élevées. Ces Sollicitations sont d'ailleurs fortement variables d'une technique d'usinage à une autre, et d'une application à une autre. Plusieurs chercheurs ont développé différents types de revêtements dans plusieurs conditions d'usinage. Une étude de finition extrême a été menée pour connaître les résultats et a révélé que le revêtement TiN en multicouche avec la technique de revêtement PVD a été trouvé comme étant le meilleur avec un faible taux d'usure, une durée de vie et une dureté élevées. Il a également été constaté que la combinaison de revêtements TiN-TiAlN résiste à des températures plus élevées lors de l'usinage de matériaux laborieux [43]. Ceci est confirmé par une autre étude qui a montré que le dépôt de fines couches de revêtements de titane (TiN) sur la surface des forets HSS augmente considérablement la durée de vie du foret [44].

Une analyse statistique ANOVA consiste à déterminer efficacement les performances des forets et de la surface d'usinage lors de l'usinage de l'acier HSLA à l'aide de forets en acier rapide et de forets revêtus de TiALN- nitrure d'aluminium et de titane. Dans cette étude expérimentale, la valeur de rugosité de surface et l'erreur de circularité ont été atteintes comme plage minimale lors de l'utilisation d'un foret revêtu (TiALN), le foret HSS produit augmente légèrement la rugosité de surface et l'erreur de circularité [45]. Une autre étude a montré que les forets HSS revêtus d'un film mince dur à haute inertie chimique, comme le Diamond-Like Carbon (DLC), pouvaient garantir les mêmes performances de qualité de trou que les outils avec du Diamant polycristallin brasé (BPD) pendant le processus du perçage Al-Si [46].

Le choix d'un revêtement spécifique se base sur 4 points :

- la résistance aux températures : En usinage, le frottement outil/pièce ou outil/copeau produit de la chaleur sur la partie supérieure de la pièce. Le revêtement doit constituer un barrage thermique afin de réduire la propagation de la chaleur dans le substrat (matière de l'outil sous le revêtement), sous peine de voir se déformer l'outil et son revêtement. Notons que la température qui a le plus grand intérêt n'est pas la température de fusion du revêtement mais d'oxydation. Il s'agit d'une réaction chimique à l'oxygène qui détériore les propriétés du revêtement. Ainsi, le revêtement TiCN qui ne fond qu'à partir de 3000 °C, mais s'oxyde à partir de 400°C.
- la dureté : capacité de résistance d'un revêtement à la déformation, c'est à dire à l'usure. Elle est mesurable grâce à la dureté Rockwell C : HRC. Cela permet la comparaison entre les divers revêtements. Ainsi le TiN possède généralement une dureté de 80 HRC. La dureté indiquée est celle de l'outil à température ambiante. Elle diminue en cas d'augmentation de la température lors de l'usinage.
- le coefficient de friction : il résulte notamment du frottement de l'outil avec la matière. Quand ce coefficient est modéré, la chaleur est basse et l'évacuation des copeaux est aisée, ce qui évite le problème d'adhérence. Utile lors d'un travail sur de l'aluminium ou du cuivre, pour éviter que leurs copeaux ne collent à l'outil. La qualité de finition (aspérités...) de la surface du revêtement et à fortiori de son substrat, joue un rôle dans la baisse de ce coefficient.

- la réactivité chimique : la pression et la température peuvent entraîner un phénomène de diffusion. C'est une réaction chimique provoquant un transfert de matière qui tend à égaliser le potentiel chimique. En résumé, les atomes d'un matériau seront absorbés par un autre matériau.

Ex : il ne faut pas usiner de l'acier carbone avec un outil revêtu de diamant. Ce dernier est chargé à 100% d'atome de carbone, contrairement à l'acier qui en contient moins. Le phénomène de diffusion provoquera une détérioration du revêtement à cause du transfert des atomes de carbone de l'outil sur les copeaux.

I.8.1. Types de revêtements

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

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

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

Les procédés CVD produisent couramment les revêtements suivants :

- revêtements à base de titane : (TiCN) en carbonitride de titane caractérisé par une grande dureté, recommandé pour l'usinage des matériaux difficiles. L'usure due au frottement de l'outil contre la matière lors de l'usinage (l'abrasion) est limitée,

(TiN) en nitrure de titane caractérisé par une bonne résistance à l'usure à un coût réduit, (TiB₂), (TiAlN) en nitrure de titane aluminium résistant aux fortes températures, il est destiné à un usinage grande vitesse. Haute performance de coupe et productivité accrue. Il assure une plus grande durée de vie de l'outil.

- revêtements céramiques : Al₂O₃, ZrO₂, Si₃N₄.
- revêtements 'ultra-dur' : diamant, diamant like carbon.

Les procédés PVD réalisent plutôt des revêtements du type :

- revêtements à base de titane : TiC, Ti(C,N), TiN, TiB₂.
- revêtements 'ultra-dur' le Diamant : Diamant Like Carbon (DLC), cubic Boron Nitride (CBN). le Diamant est 'un revêtement possédant une dureté très importante. Il assure un état de surface excellent dans les pièces usinées. Revêtement recommandé pour l'usinage des graphites, plastiques renforcés et alliages d'aluminium à fort taux de silicium.
- revêtements lubrifiants : MoS₂, WC/C, CrC/C.

I.9. Efforts de coupes et puissance absorbée

I.9.1. Généralités

Les efforts déterminent la puissance nécessaire à la coupe. Ils interviennent d'autre part dans la stabilité du phénomène de coupe, la précision d'usinage et l'état de surface généré. Après avoir fait la décomposition habituelle de l'effort de coupe en 3 composante ; (effort tangentiel, effort d'avance, effort radial), M.LOMBORD indique les différentes expressions mathématiques de l'effort proposées par divers auteurs, en particulier celle de KRONENBERG. Il traite ensuite l'influence des différents facteurs de coupe telle que la pente d'affûtage, l'avance, la profondeur de passe et la vitesse de coupe. Les deux principaux types de dynamomètres actuellement utilisés pour la mesure des efforts de coupe sont le dynamomètre à jauges et le dynamomètre quartz [47].

I.9.2. définition de l'effort de coupe et intérêt de leur mesure

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toute opération d'usinage (figure I.16).

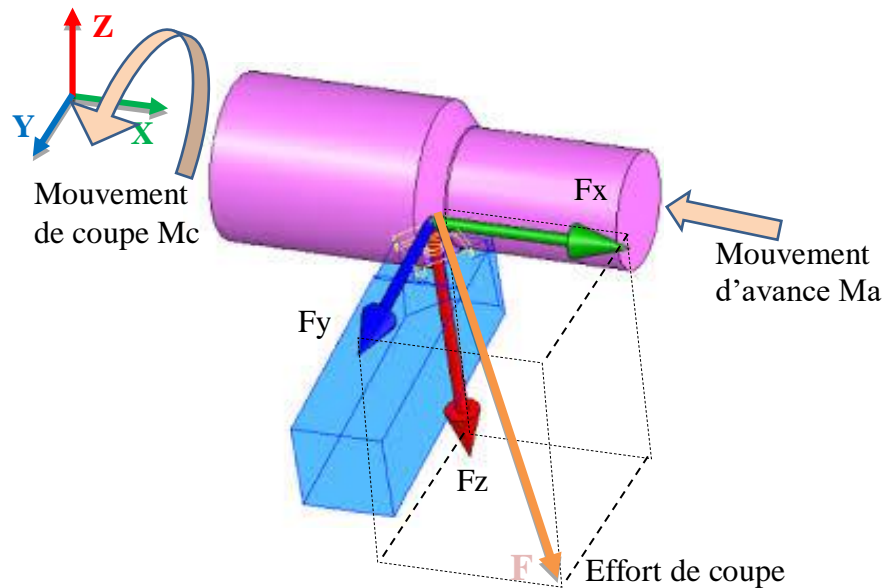


Figure I.16. Composantes de l'effort de coupe en tournage [48]

- F_z ou (F_c) : composante dans le sens de la vitesse de coupe appelé **effort tangentiel ou effort principal de coupe**. C'est la composante ayant la plus grande valeur absolue.
- F_x ou (F_f) : composante dans le sens de l'avance appelée **effort d'avance ou effort axial en tournage**. Il joue un rôle fondamental dans le processus de coupe.
- F_y ou (F_p) : composante dans le sens de la profondeur de passe, perpendiculaire au plan formé par les deux autres, **appelée effort de refoulement ou effort radial**.

I.9.3. Paramètres influents sur les efforts

Les recherches expérimentales ont montré que la force de coupe varie proportionnellement à la largeur de coupe b ; quelle dépend aussi de l'épaisseur du copeau sous forme d'une puissance de h , sans lui être proportionnelle (figure I.17).

- 1 : Face de coupe.
- 2 : Face de dépouille.
- 3 : Arête tranchante principale.
- 4 : Arête tranchante secondaire.

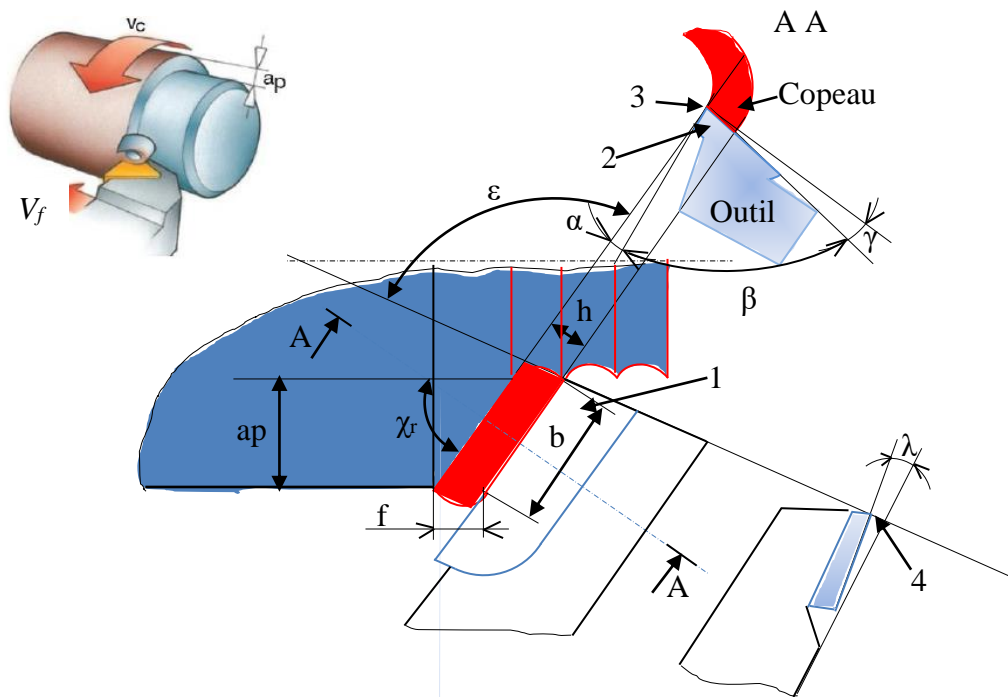


Figure I.17. Géométrie de l'engagement d'un outil à chariotier [4].

Les composantes de l'effort globale de coupe F sont influencées essentiellement par :

- le matériau usiné, la matière de coupe (outil) et l'usure de l'outil.
- l'avance f et les vitesses de coupe V_c .
- la profondeur de passe ap , la largeur du copeau b , ou l'épaisseur du copeau h .
- l'angle de coupe γ , l'élanement σ .
- l'angle d'inclinaison de l'arête tranchante de l'outil λ .
- l'angle de direction de l'arête tranchante de l'outil λ_r .
- le refroidissement et la lubrification.

I.9.3.1. Influence du matériau usiné

Les différentes propriétés physiques et chimiques des matériaux utilisés en industrie entraînent des variations non négligeables de l'effort de coupe. Il est indispensable de déterminer expérimentalement les valeurs des pressions de coupe. Des chercheurs ont proposé un modèle qui offre un outil utilitaire pour décrire quantitativement l'effet de l'usure du foret sur les forces de perçage et qui peut être utilisé comme base pour la détection de l'usure du foret [49].

I.9.3.2. Influence l'angle de coupe (γ)

Il est important qu'un angle de coupe positif a une influence bénéfique sur la diminution des efforts nécessaires à la coupe. Par contre la résistance de l'outil à l'usure et aux chocs est diminuée.

L'influence de l'angle de coupe γ est très importante. En effet, chacune des composantes de l'effort de coupe globale augmente lorsque l'angle de coupe γ diminue.

On adopte en générale, pour une variation de 1° de l'angle γ , une modification de 1,5% pour F_c , de 5% pour F_f et de 4% pour F_p dans le cas des aciers et des fontes. Ces indications sont valables lorsque l'angle de coupe appartient à l'intervalle :

$$-20^\circ \leq \gamma \leq 30^\circ$$

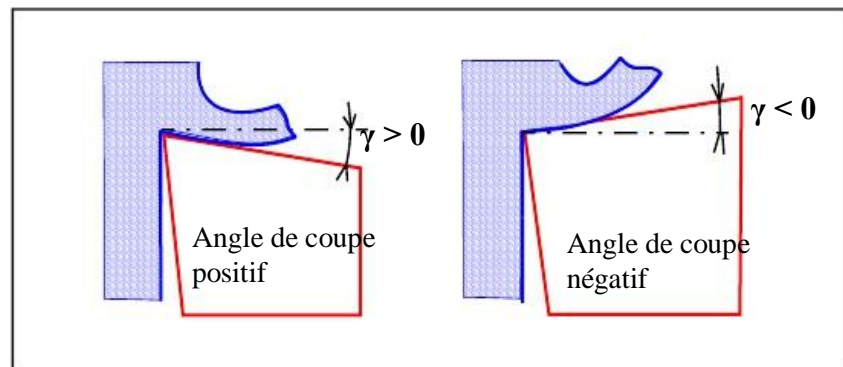


Figure I.18. Représentation de l'angle de coupe [4].

I.9.3.3. Influence de l'angle d'obliquité de l'arête tranchante (λ)

La variation de l'angle d'obliquité de l'arête tranchante a pour but de donner plus de rigidité à la partie active des outils en augmentant sa valeur qui dépend du type d'usinage adopté soit :

$\lambda < 0$: En ébauche robustesse arête de coupe fragmentation des copeaux ;

$\lambda > 0$: En finition copeau minimum plus faible.



Figure I.19. Représentation de l'angle d'obliquité de l'arête tranchante d'un outil à charioter [4].

L'influence de l'angle λ est également à prendre en considération lors du calcul des pressions de coupe. Une augmentation de λ de 1° entraîne une diminution

de 1,5% des efforts de coupe F_c et d'avance F_f , et de 10% de la composante passive F_p de l'effort globale [50].

I.9.3.4. Influence de l'angle de direction (χ_r)

L'angle de direction χ_r Représente l'orientation de l'arête de coupe par rapport à la direction d'avance de l'outil. Il influe sur la géométrie usinable, l'épaisseur du copeau (facteur principale de la force de coupe) et la fragilité de la pointe de l'outil...

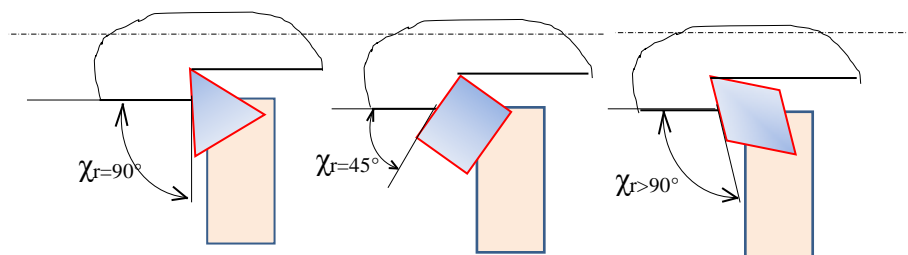


Figure I. 20. Représentation de l'angle de direction χ_r [4].

- $\chi_r < 90^\circ$: entrée en contact progressive de l'arête de coupe avec la matière à usiner.
- χ_r trop petit : augmentation de la longueur de contact arête de coupe-matière entraîne une augmentation des efforts de coupe. χ_r influe aussi sur la direction d'évacuation des copeaux.

On peut travailler avec des angles de coupe négatifs (coupe dite négatif) quand la vitesse de coupe est suffisamment élevée et que le frottement copeau outil est devenu faible. L'avantage de la coupe négative est de donner au taillant de l'outil une rigidité plus élevée qui autorise des coupes plus sévères. La coupe négative permet aussi l'emploi de plaquettes rectangulaires de forme simple dont on peut utiliser les 8 arrêts successivement sans réaffûtage. Ce type d'outil ne se réaffûte pas, d'où une économie sur le prix de l'outil qui est jeté après usage.

I.9.3.5. Influence de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe

Lorsque la vitesse de coupe augmente, les pressions de coupe diminuent, mais de manière relativement faible. La variation de l'effort de coupe avec la vitesse de coupe affecte généralement l'allure de la Figure (I.21).

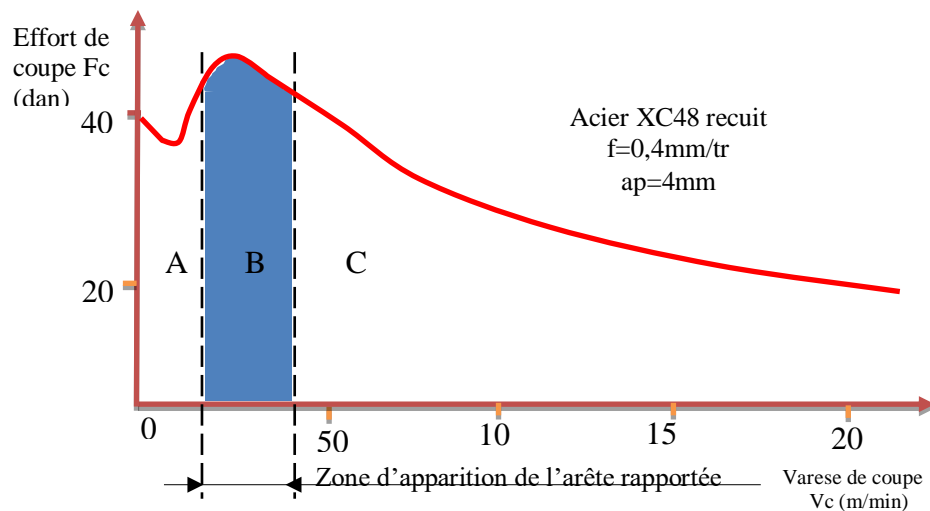


Figure I.21. Effet de la vitesse de coupe sur l'effort de coupe [51]

On observe dans la zone **A** une diminution de l'effort de coupe pendant l'usinage à des vitesses de coupe basses, due à une diminution du frottement copeau outil.

La zone **B** illustre l'apparition de l'arête rapportée qui provoque une augmentation au maximum de l'effort de coupe et enfin l'effort de coupe décroît dans la zone **C** à cause de la disparition de l'arête rapportée en sa valeur qui tend vers une limite avec l'augmentation de la vitesse. La décroissance aux grandes vitesses est due à la diminution du frottement copeau outil, limitée par la stabilisation de la température aux grandes vitesses.

I.9.3.6. Influence de l'avance et de la profondeur de passe sur l'effort de coupe

Avec l'augmentation des ces deux facteur, la section droite du copeau s'accroît, de même que le volume du métal déformé, il en résulte que le métal résiste plus à la rupture (formation du copeau) et la valeur des composantes F_z , F_x et F_y nécessaire pour assurer la coupe est plus importante (figure I.22).

En chariotage, la profondeur de passe intervient d'une manière plus accentuée sur les efforts de coupe que l'avance. Par contre en perçage c'est l'avance qui a le plus d'influence sur les efforts de coupes. Dans le cas du perçage la profondeur de passe est dictée directement par la forme de l'outil et égal à la moitié de son diamètre.

Pendant le calcul de la force de coupe se base sur l'enregistrement de l'effort de poussée (avance) produit par la pénétration du cône de l'outil sur une surface parfaitement plane pour évoluer de 0 à la valeur du rayon de l'outil R.

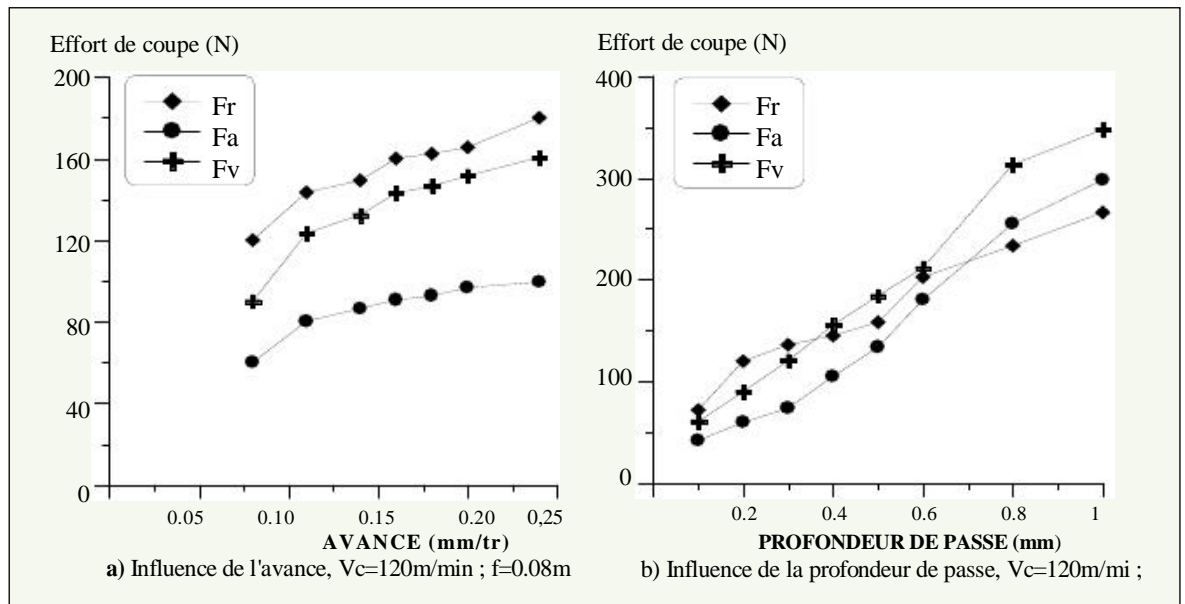


Figure I.22. Évolution des efforts de coupe en fonction de l'avance et de la profondeur de passe [52]

L'effort de coupe dépend d'une façon linéaire de la profondeur de passe en coupe orthogonale et de façon approximativement linéaire en coupe non orthogonale si le rayon de pointe est faible par rapport à la profondeur de passe et s'exprime par une fonction de puissance :

$$F = K_C \cdot S \cdot m \tag{I.12}$$

F : Effort de coupe en Newton (N).

K_C : Effort spécifique de coupe en (N/mm²) (proportionnelle à l'épaisseur du copeau h).

$$m = \frac{14}{15} \text{ Pour l'acier, } m = \frac{3}{4} \text{ Pour la fonte}$$

$$S : \text{Section du copeau en (mm}^2\text{)} : S = a \cdot f \tag{I.13}$$

$$\text{On aura donc : } F = K_C \cdot a \cdot f \tag{I.14}$$

Notons que l'effort de coupe par unité de surface (normalisé NF X 66 507) peut être désigné comme "coefficient spécifique de coupe", ou "effort spécifique de coupe" (Figure I.23) [52].

L'effort de coupe spécifique K_C est l'un des facteurs importants qui caractérisent l'usinabilité du matériau usiné. La connaissance de k_c permet d'évaluer la valeur de la force de coupe nécessaire en fonction de la section du copeau choisi, il dépend essentiellement :

- du matériau usiné.
- de l'avance.
- de la géométrie de coupe.
- de l'usure de l'outil (augmentation de 30 à 40%).

K_c représente la force, F_c , exercée dans la direction de la coupe nécessaire pour couper un copeau de 1 mm^2 de section avec une épaisseur de 1 mm . La valeur de K_c est différente pour chaque type de matières.

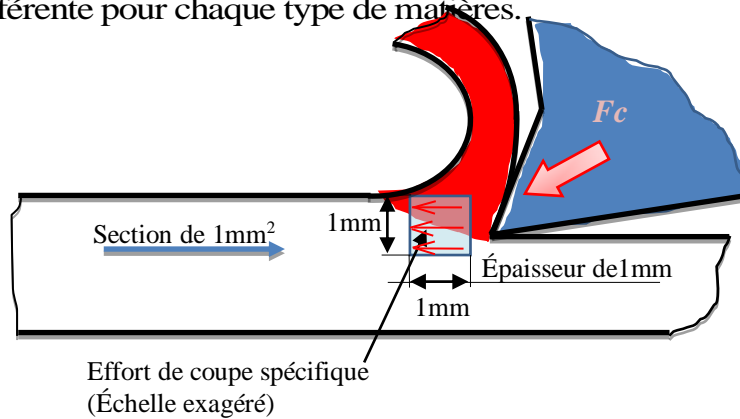


Figure I.23 : Illustration de l'effort de coupe spécifique k_c [52]

I.9.4 Effort de coupe et puissance absorbée en perçage :

I.9.4.1 Effort de coupe

L'étude et l'approximation des efforts de coupe sont nécessaires pour choisir les outils et dimensionner la porte pièce. Leurs directions permettent de déterminer le sens de déplacement des outils afin que les appuis du montage s'opposent à ces efforts. La figure (I.24) donne une représentation schématique de la situation des efforts s'exerçant sur chacune des arêtes. On observe que la résultante des efforts de coup s'exerçant sur une arête de coupe admet trois composantes :

- f_c : l'effort tangentiel de coupe.
- f_p : l'effort de pénétration.
- f_a : l'effort d'avance.

Si le foret est parfaitement affûté et si le matériau de la pièce est homogène

$$\text{on a : } f_c = f'_c, \quad f_p = f'_p, \quad f_a = f'_a$$

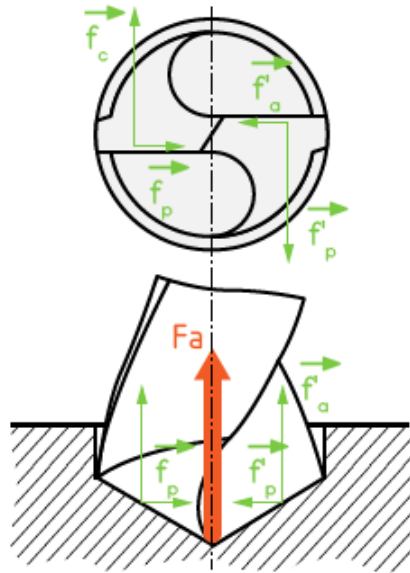


Figure I.24. Efforts de coupe en perçage [53]

Les composantes de l'effort de pénétration égales et pratiquement opposées s'annulent, la résultante de l'effort d'avance $Fa = 2fa$ est portée par l'axe du foret et les forces f_c, f'_c constituent le couple résistant au perçage.

On peut donc s'apercevoir de l'importance d'un bon affûtage : en effet une dissymétrie des arêtes provoquerait un écart entre les efforts fa sur chacune d'elles et par là même occasion une déviation de la trajectoire. Pour le calcul de l'effort d'avance on utilise la relation :

$$Fa \approx k.f.D \quad (\text{I.15})$$

k : appelé coefficient spécifique de coupe (N/mm^2) déterminé expérimentalement (figure I.24), f l'avance et D le diamètre du foret.

I.9.4.2. Puissance absorbée par la coupe en perçage

L'expression de la puissance nécessaire à la coupe en perçage est exprimée par la relation :

$$P_C = \frac{k.f.d.V_c}{240000} \quad (\text{I.16})$$

À titre d'exemple pour les alliages d'aluminium, comparativement aux aciers, l'effort spécifique de coupe est faible (divisé par 3) mais les vitesses de coupe utilisées sont élevées (3 à 5 fois les vitesses acier). Ceci conduit à des efforts de poussée faibles, des puissances comparables mais par contre à de grandes vitesses de rotation parfois impossibles à obtenir quand l'outil est de petit diamètre (Limitation due à la machine) [54].

I.10. Qualité de surface usinée

La vie utile d'un matériau en service dépend toujours non seulement de la combinaison des facteurs de charge et d'environnement auxquels il est soumis mais aussi des facteurs d'intégrité dont l'état de surface constitue un facteur très important. C'est ainsi qu'il faut toujours tenir compte des paramètres d'état des surfaces dès la mise en service lorsque l'on considère la durabilité, ou vie du matériau en service. Cette dépendance est encore plus ressentie dans le cas des matériaux utilisés dans la confection de composants sollicités à la fatigue. Les gradients de propriété au voisinage de la surface (microstructure, écrouissage, contraintes résiduelles) et les imperfections superficielles apportées par les procédés de fabrication jouent un rôle primordial sur la tenue à la fatigue en service du composant.

La rugosité est influencée fondamentalement par les paramètres de coupe et la géométrie de l'outil. Les paramètres strictement géométriques de l'usinage déterminent des valeurs « théoriques » de rugosité transversale ou longitudinale (selon la direction des sillons d'usinage). D'autres facteurs qui peuvent influencer la rugosité sont les vibrations et la tendance au collage de la matière sur l'outil (arrête rapportée).

Dans le cas du perçage, la qualité de la surface usinée est influencée surtout par les vibrations et par les traces laissées par l'évacuation des copeaux.

L'établissement d'essais basés sur des plans d'expériences spécifiques pour la réduction de la rugosité et la création de modèles mathématiques-empiriques nécessitent l'identification des conditions optimales du point de vue de la rugosité. Selon le degré de précision et de rugosité prescrite, les travaux de perçage à l'aide d'outils métalliques peuvent être exécutés grâce au procédé de perçage, de lamage, de chambrage, d'alésage, et de brochage. Pour les cinq premières opérations, l'enlèvement de copeau s'effectue par des arêtes tranchantes disposées sur le cône d'attaque de l'outil. Les irrégularités de la surface usinée engendrée par les points communs au cône d'attaque (pointe de l'outil) et la partie cylindrique qui entre en contact avec la surface, sont causées par les conditions de coupe suivant lesquelles se déroule l'usinage avec les outils de perçage, (foret et foret aléseur).

I.10.1. Principaux paramètres de la rugosité

Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'obtentions, aux outils, à la matière, etc...

La mesure des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique se fait généralement sur une longueur de référence spécifiée (L) :

- rugosité R_p (μm) : profondeur moyenne de rugosité. Moyenne arithmétique des valeurs de l'ordonnée y de tous les points du profil sur la longueur de base L .
- rugosité R_a (μm) : écart moyen arithmétique du profil. Correspond à la moyenne des valeurs absolues des écarts entre le profil et une ligne moyenne de ce profil.
- rugosité R_z (μm) : hauteur maximal du profil. Distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux.

Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication.

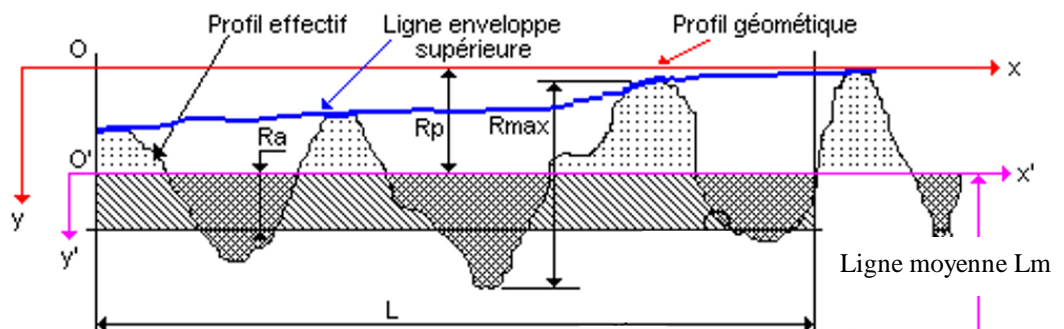


Figure I.25. Paramètres caractéristiques de la rugosité [55]

L'indicateur de rugosité usuellement utilisé pour caractériser la qualité d'un perçage dans l'industrie est la rugosité arithmétique (**Ra**). Celle-ci est mesurée à l'aide d'un rugosimètre en effectuant l'écart moyen arithmétique du profil de rugosité.

I.10.2. Rugosité des surfaces usinées en perçage

Lorsque les opérations de perçage sont appliquées à des travaux préliminaires voire de semi-finition la rugosité de la surface obtenue alors peut influencer sur celle réalisée dans la phase ultérieure. Si cependant les perçages sont prévus comme opérations finales la rugosité créée grâce à elles, interviendront directement en service. Compte tenu qu'elles sont très courantes en construction mécanique, et plus particulièrement en grande série, il importe d'en réglementer l'exécution et avec elle la qualité que l'on peut en atteindre

Le perçage et chambrage se déroulent dans des conditions plus complexes que celles du tournage ou du rabotage tant par les caractéristiques géométrique et

constructive des outils que par la façon dont s'évacue le copeau. Il est clair que le micro profil des surfaces percées, lamées ou chambrées sera caractérisé par une grande irrégularité, ainsi les crêtes successives rémanentes, après passage de l'outil coupant sont entremêlées de dépôt auquel succèdent des arrachements profonds, des refoulements de métal et des rayures provenant du copeau. La fonte ne donne pas lieu à des rayures car le copeau fragmenté ne se prête pas à ce rôle destructeur [56].

Avec la fonte grise on observe une grande irrégularité du micro profil, caractérisée par de nombreux cratères ponctuels évoluant par fois en arrachement local du métal.

Le perçage de l'acier donne lieu en plus des crêtes, rayures et couches de métal rapporté (dépôts) à des grippages et sillons cannulaires profondes (jusqu'à 0.7mm) dont les dimensions et la disposition sont très diverses. Il apparaît donc que l'étude théorique de la rugosité reposant sur la géométrie et sur l'avance de l'outil ne saurait pas un intérêt pratique.

I.10.3. Facteurs de rugosité pour le perçage, le lamage et le chambrage

La qualité des surfaces usinées est fortement influencée par les paramètres suivants :

- propriétés du matériau usiné.
- paramètre définissant le régime de coupe.
- phénomène du copeau adhérent.
- géométrie de l'outil.
- usure de l'outil.
- rigidité de la machine- outil.
- fluides réfrigérants et lubrifiants.

I.10.4. Influence du matériau usiné sur la rugosité

En principe l'influence du matériau usiné pour le perçage ou le chambrage est analogue à celui du tournage. En présence de matériaux dits ductile ou (plastiques) la formation du micro profil suppose l'action simultanée des paramètres suivants :

- sillons laissés sur la surface usinée par le passage de l'outil pendant son MC.
- déformation élasto-plastique hétérogène du métal à la naissance du copeau et surtout au sein de la couche superficielle usinée liée à

l'augmentation du volume spécifique du métal déformé et à l'apparition de contraintes rémanentes de compression.

- arête rapportée (copeau adhérent).
- phénomènes dynamique et frottement entre les faces de l'outil et le copeau.
- échauffement local des couches superficielles de la pièce accompagnée de contrainte rémanente d'extension.
- changement de phases des diverses couches métalliques amenant une structure différenciée de volumes spécifiques variés.

Les essais pratiques ont permis de conclure qu'une amélioration nette de la rugosité lorsqu'on augmente la dureté (HB) du matériau usiné (figure I.26) :

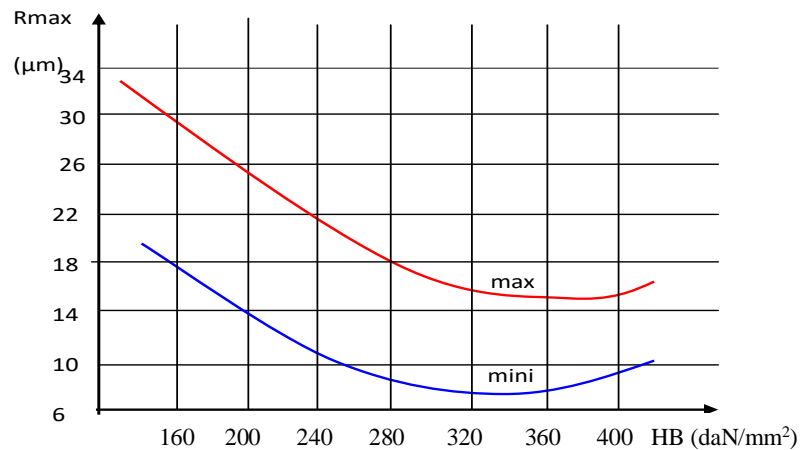


Figure I.26. Variation des hauteurs d'aspérités en fonction de la dureté du matériau usiné [57]

En augmentant la dureté et la résistance à la rupture, les déformations plastiques diminuent ainsi que le coefficient de frottement entre la face de dégagement du copeau et le copeau d'où régression du phénomène d'arête rapportée dont on connaît l'influence néfaste pour la finition. En ce qui concerne la relation entre les compositions, les structures et la rugosité, plusieurs théories ont été émises dont certaines ce contre disent. La structure et la rugosité pourront être liées en comparant les courbes du type : $R_{\max} = f(\text{HB})$.

I.10.5. Influence du régime de coupe sur la rugosité

Beaucoup de paramètres influent sur la rugosité d'une façon directe ou indirecte, à savoir les paramètres du régime de coupe tels que l'avance par tour, la vitesse de rotation, la profondeur de passe et les efforts de coupe générés aux contacts outil-pièce, sans oublier les vibrations de l'outil dues aux phénomènes de coupe.

I.10.5.1. Influence de la vitesse de coupe

La rugosité est théoriquement indépendante de la vitesse de coupe, mais cette indépendance est conditionnée par la présence de l'arête rapportée pour les basses vitesses de coupe. Si pour des raisons quelconques on ne peut pas usiner à la vitesse provocante le phénomène d'arête rapportée, on devra tenir compte de l'effet de vitesse de coupe sur la rugosité, cette dernière diminue quand la vitesse de coupe augmente.

L'augmentation de la vitesse de coupe engendre un accroissement de la température dans la zone de coupe ayant pour effet une diminution du coefficient de frottement entre l'outil et la pièce. La chaleur engendrée lors de l'usinage est évacuée principalement par les copeaux. Cela signifie un faible échauffement de pièce et par conséquent une meilleure précision.

Sur le plan technologique, l'usinage à grande vitesse est caractérisé par des fréquences de rotations très élevées entraînant la diminution des efforts de coupe. Ces paramètres conditionnent les performances de la vitesse d'avance et le débit de copeau qui en général permettent d'augmenter la productivité, d'améliorer la qualité des pièces usinées et de réduire les coûts et délais de production, ensuite l'usinage peut être réalisé dans une gamme non soumise à des vibrations critiques.

Aux faibles vitesses de coupe, il se forme une arête rapportée (BUE) qui, en se détachant périodiquement, provoque une forte augmentation de la rugosité.

On obtient expérimentalement le diagramme de la figure (I.27). Cela signifie que pour obtenir un bon état de surface, il faut travailler à grande vitesse. L'asymptote de la courbe de rugosité en fonction de la vitesse est la rugosité théorique.

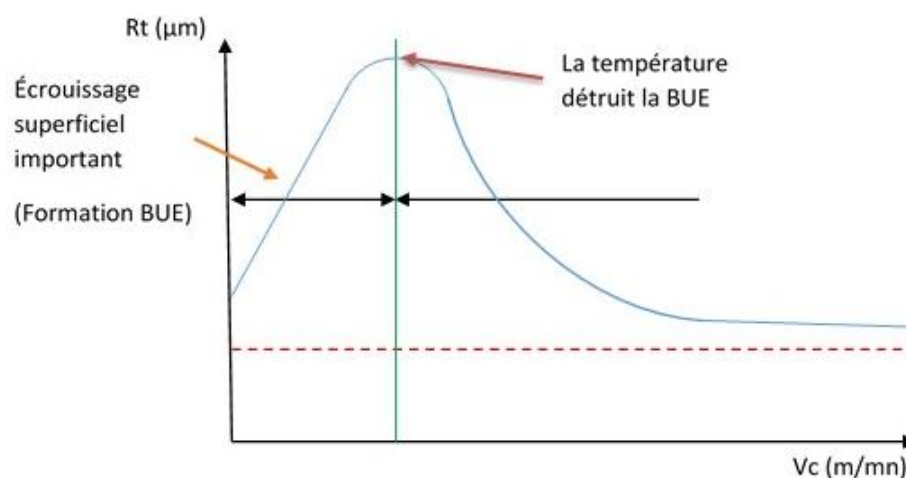


Figure I.27. Évolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe [58]

I.10.5.2. Influence de l'avance

L'avance est le paramètre fondamental pour la rugosité des surfaces usinée. Cette dernière est proportionnelle à l'avance. Une analyse expérimentale a confirmé cette évidence géométrique (figure I.28).

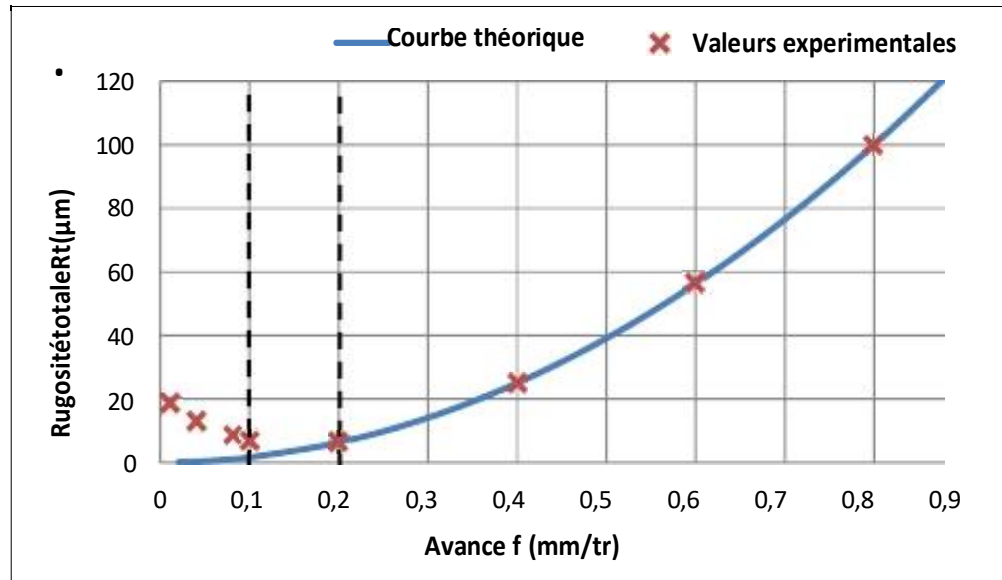


Figure I.28. Évolution de la rugosité en fonction de l'avance (cas du perçage) [59]

I.10.6. Influence de la géométrie de l'outil

La géométrie de l'outil influe directement sur les formes usinables de la pièce et parmi les affûtages supplémentaires susceptibles d'améliorer le travail des forets et avoir un effet positif sur la rugosité et encore plus sur la tenue, l'affûtage double ou (deux-tailles) qu'on appelle aussi *forets à brise-copeaux* (figure I.29), L'amincissement de l'âme du foret (figure I.31), et l'affûtage dit de détalonnage (figure I.32).

a- *forets à brise-copeaux*

Le foret à brise-copeaux est le fruit d'un développement remarquable car ils augmentent la capacité de coupe par le biais d'une meilleure capacité d'enlèvement de copeaux. Une nervure court sur toute la longueur des goujures, permettant ainsi de recourber et casser de longs copeaux en des morceaux plus petits et gérables, plus faciles à éliminer, les copeaux ne peuvent plus s'entasser dans les goujures (figure 1.33).

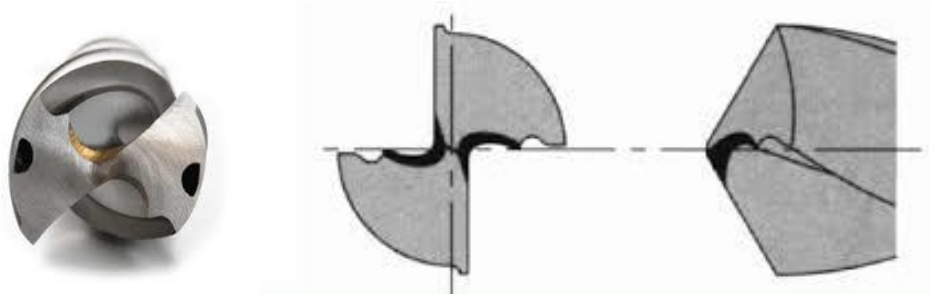


Figure I.29. Illustration d'un foret à brise-copeaux [60]

Les petits copeaux permettent également une meilleure circulation du fluide de refroidissement jusqu'à la pointe du foret, ce qui améliore la dissipation de la chaleur et la performance de perçage. La nervure brise-copeaux s'étendant sur toute la longueur des dents, la forme et l'effet du brise-copeaux sont conservés même après un affûtage conventionnel. La nervure brise-copeaux confère une rigidité supplémentaire et augmente ainsi le nombre de trous avant le réaffûtage, même lorsque la maîtrise des copeaux n'est pas un facteur important.

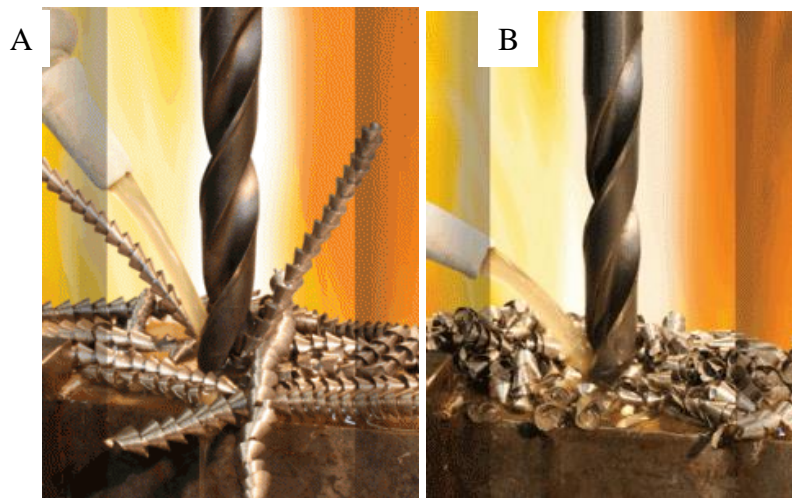


Figure I.30. Foret en action : (A) standard, (B) à brise-copeaux [60]

b- L'amincissement de l'âme du foret

L'amincissement de la partie centrale du foret (l'âme) présente des avantages importants car elle réduit l'effort de pénétration permettant une avance plus grande avec une possibilité de suppression de l'avant trou. Cette affûtage spéciale est appelé « affûtage 3 ponts ». Une machine conçue spécialement pour permettre de l'obtenir automatiquement (figure I.31).

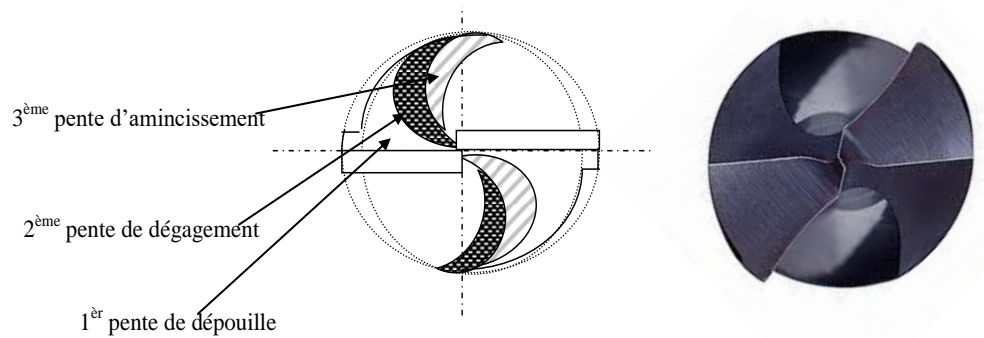


Figure I.31 : Amincissement de la partie centrale d'un foret hélicoïdal [60]

c- Affûtage de détalonnage

L'affûtage des arêtes tranchantes principales, permet de diminuer l'angle d'attaque jusqu'à 45° , en conséquence les lèvres s'allongent et évacuent mieux la chaleur développée par la coupe, d'où l'amélioration de l'état de surface. En parallèle, il est recommandé de compléter l'affûtage double par un détalonnage de la surface en dépouille d'un angle de 15° pour diminuer le frottement de cette dernière contre la surface usinée après le passage de l'arête tranchante (Figure I.32).

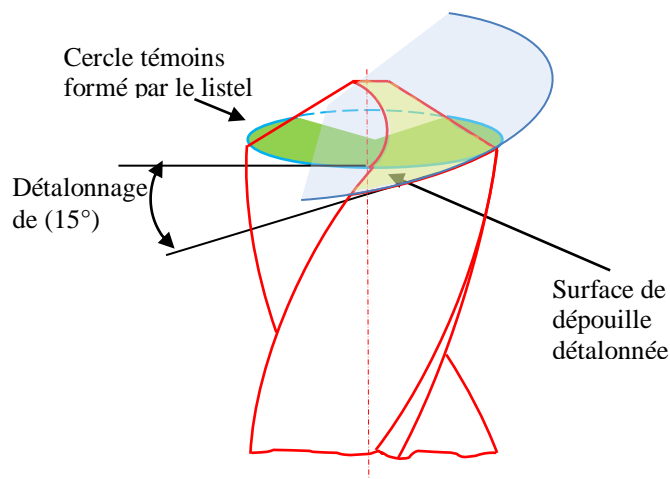


Figure I.32. Détalonnage d'un foret hélicoïdal [4]

I.10.7. Influence de l'usure de l'outil

Les différents mécanismes d'usure des outils augmentent le coefficient de frottement à l'interface outil-surface usinée. En dehors de l'usure localisée traditionnellement sur les faces en dépouille et les faces de dégagement, les forets s'usent principalement aux points d'attaques, ce qui détruit la micro géométrie des arêtes actives. Un outil usé donne toujours un mauvais état de surface. L'évolution de la rugosité avec l'usure de l'outil est illustrée par la figure (I.33).

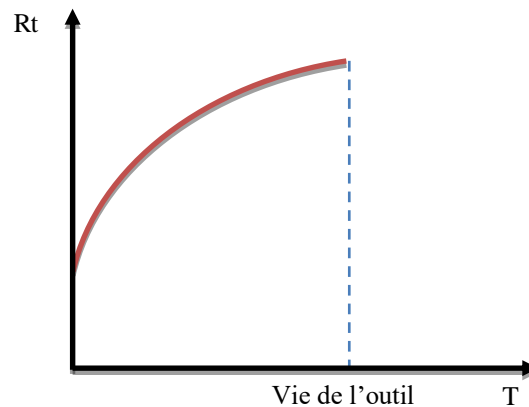


Figure I.33. *Évolution de la rugosité en fonction de l'usure de l'outil [58]*

I.10.8. Influence de la rigidité de la machine-outil

Une bonne rigidité de la machine-outil est évidemment une condition indispensable pour l'obtention d'une qualité de surface des pièces satisfaisantes. Les vibrations éventuelles et le broutage vont se traduire essentiellement par des défauts du second ordre (ondulation). Si la machine-outil n'est pas suffisamment rigide l'apparition de vibrations sur ces différents organes (console table, colonne), pourrons augmenter la rugosité des surfaces usinées et aussi diminuer la qualité de précision. Cette dernière est l'une des caractéristiques de classification des machines-outils.

En outre les déplacements relatifs ou les déformations sous-ensembles les uns par rapport aux autres modifient la position initiale du foret par rapport à la pièce. En particulier si l'axe du foret n'est pas perpendiculaire à la face frontale de la pièce, à l'initiale, après les transformations évoquées, foret et pièce ne formeront plus entre eux un angle 90° et l'axe du trou percé sera incliné par rapport à la face frontale de la pièce. Les conséquences sont prévisibles. La rugosité des parois ne peut qu'augmenter.

Dès qu'on arrête le mouvement d'avance l'effort axial s'annule et les organes de la machine sollicités auparavant reprennent leurs places respectives décalées par rapport à celles de travail. Le foret par exemple en retrouvant sa position initiale aplanit les certes et quelques aspérités pendant sa sortie en créant d'autres et la rugosité résultante ne peut qu'augmenter. L'usinage sur une machine-outil qui n'est pas suffisamment rigide influe considérablement sur la qualité de surface usinée.

I.10.9. Influence des fluides réfrigérants et lubrifiants

L'influence des fluides réfrigérants se traduit par une diminution de la rugosité de la surface usinée accompagnée d'un écrouissage supplémentaire des couches superficielles du matériau travaillé. Les résultats expérimentaux montrent que l'apport de fluide et lubrifiant améliore l'état de surface, non seulement pour l'abaissement des aspérités, mais par un nivellement générale du micro profil.

Une diminution nette de la rugosité par rapport à l'usinage à sec, tout particulièrement avec des fluides activés maintenant les déformations plastique à des niveaux relativement bas, réduisant les efforts de coupe et de frottement, la température, et prévenant la formation du copeau adhérent. Si l'on crée une atmosphère neutre autour de la coupe (azote liquide, hydrogène gazeux), la rugosité augmente. Ce mode de travail favorise considérablement la formation du copeau adhérent [61]

I.11. Lubrification méthodes et produits

Le travail absorbé par la coupe des métaux provoque un échauffement. La chaleur ainsi dégagée agit sur l'outil en le rendant plus doux, dégrade sa résistance à l'usure et modifie ses dimensions. La chaleur compromet également les dimensions de la surface usinée. Ces déformations thermiques de l'outil et de l'ébauche compromettent la précision d'usinage. Pour évacuer la chaleur de l'outil et de l'ébauche on fait recours aux liquides d'arrosage et de lubrification, ces derniers diminuent le frottement entre l'outil et le copeau d'une part, entre l'outil et l'ébauche d'autre part, et rendent plus aisé l'arrachement de la matière ainsi la formation du copeau.

Les principes de leur action physique et chimique ont été énoncés par les chercheurs de l'école soviétique de l'académicien P. Rébinder. Ce chercheur a prouvé qu'une faible addition de substance tensioactives (0.1 à 1%) est susceptible de modifier les propriétés des liquides d'arrosage : On appelle substance tensioactive celle qui ajoutée à un liquide quelconque diminue sa tension, en énergie superficielle et augmente sa mouillabilité (onctuosité). Parmi ces substances on range les acides organiques (stérique, oléique, palmitique, etc...) leurs sels aussi que les substances organiques avec des groupes polaires homogènes ou contenant du soufre.

I.11.1. Rôle du lubrifiant

La lubrification permet d'éviter les échauffements dans la zone de contact et réduit les frottements au niveau des interfaces "outil- copeau-pièce" qui réduisent à leur tour le couple, la force axiale, et la température de coupe. On évite ainsi la détérioration des surfaces usinées de la pièce et celles de l'outil (surface d'attaque, de dépouille, listel). Ceci se traduit par une durée de vie de l'outil plus longue et une qualité de surface usinée meilleure [62]. L'efficacité et l'importance du fluide de coupe sont dues aux conditions tribologiques sévères impliquant des fortes contraintes de contact à l'interface outil/pièce [63]. Les lois physiques qui régissent ce domaine (la tribologie) sont très complexes et sont basées à la fois à la résistance des matériaux et la mécanique des fluides.

Dans une approche pragmatique, il est intéressant de comprendre des phénomènes connus (bien que complexes) tel que la formation d'un coin d'huile entre deux pièces, la notion du film mono-moléculaire ayant la capacité de diminuer la tension superficielle d'un matériau sur lequel il est appliqué et le changement de propriétés physiques des huiles en fonction de la pression et de la température.

Les prescriptions essentielles auquel doivent répondre les liquides d'arrosages sont la bonne aptitude au refroidissement, la lubrification, la stabilité des propriétés anticorrosives et l'absence de nocivité pour l'opérateur. Tous les liquides d'arrosage forment deux groupes essentiels, dont le premier est celui des agents réfrigérant et le deuxième celui des agents lubrifiant. Les liquides du 1er groupe ont une viscosité faible mais leurs capacités et conductibilité thermique sont élevées. Ils sont constitués de solutions aqueuses, des électrolytes minéraux (soude à l'ammoniaque, nitrite de sodium, verre soluble etc...), ajoutés à l'eau en tant qu'addition anticorrosive pour améliorer la mouillabilité des surfaces. En outre on peut ajouter à l'eau du savon ou des agents mouillants spéciaux qui diminuent brusquement la tension superficielle de l'eau, leur capacité calorifique est très élevée, aussi ils sont employés pour accroître la tenue de l'outil lorsque l'effet refroidissant est déterminant. Différentes stratégies de fluide de coupe ont été explorées en termes d'inondation, de refroidissements haute pression (HPC), de refroidisseur cryogénique (CC) et de lubrification en quantité minimale (MQL) [64].

I.11.2. Caractéristique des fluides coûts et utilisation

Ces solutions aqueuses très usitées sont composées à partir d'huile soluble, solutions colloïdales de savon et d'acide organique dans des huiles minérales stabilisées par l'eau ou l'eau et alcool. Leur mélange avec l'eau donne des

émulsions dont la gamme des couleurs varie de laiteuse au brun (2 à 20% d'huile et 0,3 à 2% de savon).

Le meilleur liquide d'arrosage est celui qui tout en assurant un refroidissement, est suffisamment onctueux. Pour lui donner ces propriétés, on y ajoute des substances tensioactives. Dans l'industrie il est d'usage de recourir à cet effet aux huiles solubles activées et notamment à l'huile soluble soufrée de 25% d'huile de résine sulfonée, 13,5% d'huile de soja soufrée, 17% d'huile minérale, 32% d'eau et le reste est une solution de 20% de soude caustique jusqu'à l'obtention d'une huile transparente. Des huiles solubles activées (à base d'acide gras synthétiques) composées de 20% de pétrolatum acide 70%, d'huile minérale et 3%, d'huile pour broches et 10% d'eau sont très utilisées.

Dans le 2ème groupe on range les liquides à onctuosité élevées comme l'huile minérale, végétale, et huile compound (mélange des huiles minérales avec une huile végétale ou animale). Ainsi que le kérosène et les solutions de substances tensioactives dans l'huile ou le kérosène.

Les liquides de ce groupe s'emploient pour la finition et l'achèvement, qui imposent des conditions rigoureuses d'état de surface et de précision dimensionnelle il est d'usage dans l'industrie d'employer les huiles soufrées (activées par du soufre) [65].

I.11.3. Pratique de l'arrosage

Le débit doit être abondant et fonction de la puissance absorbée ainsi que la pression d'arrosage doit être suffisante afin de pouvoir évacuer la limaille et le copeau et arriver jusqu'à la zone de coupe pour réduire la température.

I.12. Influence du traitement thermique sur l'usinabilité des aciers

L'aptitude à l'usinage dépend des caractéristiques mécaniques du matériau mis en œuvre, de sa structure micrographique et des phases dispersées dans la matrice dont l'action peut être bénéfique ou néfaste. Ces caractéristiques sont déterminées dès l'état liquide au cours de l'élaboration du métal de compositions données, des conditions de sa solidification, de sa forme sous des efforts mécaniques et des cycles thermiques subis.

En effet les caractéristiques mécaniques des aciers peuvent être améliorées grâce aux différents modes de traitements thermiques, et aux traitements de surface. On recherche surtout l'augmentation de la limite élastique, de la dureté et à obtenir une structure stable à grains fins. La réponse à ces traitements dépend surtout de la

composition des aciers comme le pourcentage de carbone et des éléments d'additions. Ainsi, différents mélanges ont permis d'atteindre les résistances voulues telle que la résistance à l'usure par abrasion, résistance au choc, aux frottements, aux températures, résistances aux charges, à la fatigue, résistance à la corrosion, aux déformations, et à la rupture...

I.12.1. Principales phases du traitement thermique

L'acier se trouvant dans l'état non trempé c'est une variété allotropique qui a une structure cubique centré (CC), appelé ferrite ou Fer (α) dans laquelle la dissolution de carbone est très limitée, un atome de fer sur chaque sommet du cube plus un atome au centre du cube. Cet atome central est primordial car il interdit toute inclusion d'éléments étrangers dans cette structure : (Les atomes de carbone ne peuvent pas entrer à l'intérieur de ce réseau cubique). Après le réchauffement de l'acier à une température supérieure à AC_3 plus $50^\circ C$, le réseau ferrite se transforme en austénite Fer(γ), cristallisant dans une structure cubique à faces centrées (CFC).

Un atome de fer sur chaque sommet du cube plus un atome au centre de chaque face du cube, soit un total de 14 atomes par cube. Les cristaux de Fer(γ) sont creux et peuvent donc absorber les atomes de carbone (figure I.34)

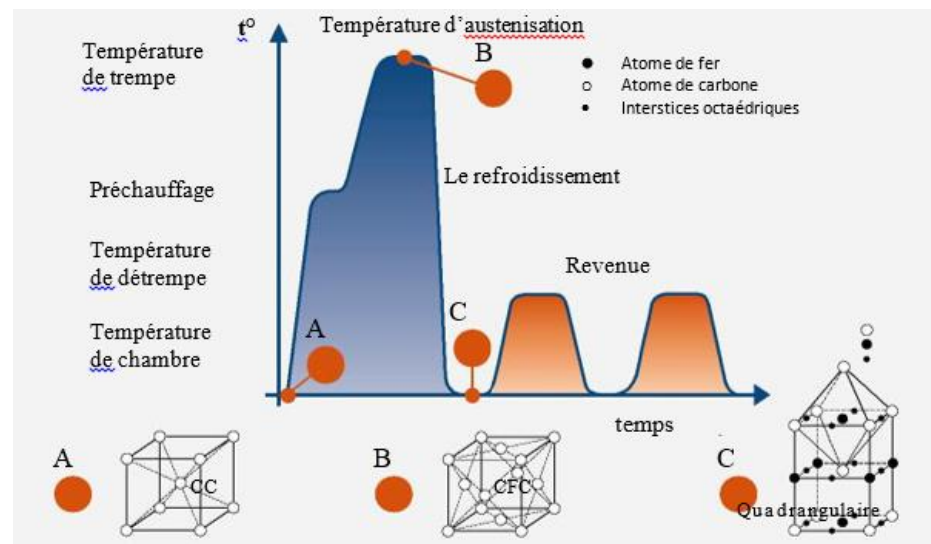


Figure I.34. Principales phase d'un traitement thermique [66]

La dissolution de carbone s'y fait beaucoup plus facilement et se produit à la température de trempé. En refroidissant la matière assez rapidement par la suite, elle continue à se transformer de CFC à CCC avec une quantité non saturée de carbone et la martensite se forme. La grille CCC s'élargit à une grille quadrangulaire par la présence non saturée de carbone. C'est pourquoi la martensite dispose de tensions

de compression internes élevées et d'un plus grand volume que l'acier à température de chambre.

I.12.2. Vitesse critique de trempe

Elle peut être définie pour une nuance d'acier donnée, la vitesse à partir de laquelle la trempe est martensitique. C'est une vitesse limite qu'on appelle la vitesse critique de trempe. Il faut que cette vitesse soit suffisante pour obtenir une transformation complète de l'austénite en martensite mais le traitement de trempe ne doit pas être trop agressif pour ne pas casser la structure cristalline.

La trempe consiste à refroidir à vitesse contrôlée des pièces en acier généralement dans un liquide pour leur conférer certaines propriétés métallurgiques. On trempe l'acier pour en augmenter la dureté. Le procédé consiste à porter l'acier à une température largement supérieure à sa température d'austénitisation ou le carbone et les autres éléments d'alliage diffusent dans la masse de fer.

Au bout d'un temps de maintien, l'acier présente une structure austénitique qui est une solution solide de carbone dans l'allotrope du fer γ . Si on le laisse refroidir lentement il se transforme en perlite, mélange ductile et mou de cémentite et de ferrite c'est le recuit. Si le refroidissement est rapide on obtient une structure martensitique qui est une solution solide de carbure de fer dans du fer.

Pour donner aux aciers une dureté maximale, on les refroidit rapidement de leur température d'austénitisation à une température inférieure à 150°C . Le degré de dureté obtenu est proportionnel à leur teneur en carbone et à la vitesse de trempe. La vitesse de refroidissement à laquelle l'acier se transforme intégralement en martensite est dite de "Refroidissement critique" courbe (A). À une vitesse moindre, la trempe donne un mélange de martensite et d'autres produits intermédiaires qui diminuent la qualité de l'acier trempé : courbe (C).

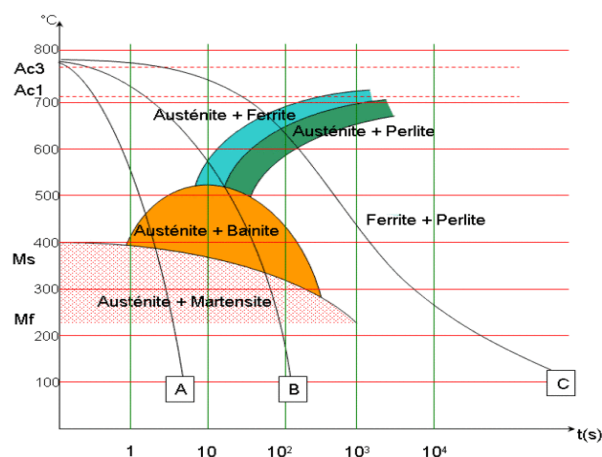


Figure I.35 : *diagramme TRC* [67]

Dans la pratique, la vitesse à laquelle se refroidit une pièce trempée dépend de sa masse, de sa forme et de l'état de sa surface tout autant de la technique de trempe. Quand les pièces d'acier ne durcissent pas comme il faut, c'est que la vitesse de refroidissement est inférieure à la vitesse critique. Il faut alors trouver une technologie de trempe plus appropriée.

Un diagramme de transformations en refroidissement continu, ou diagramme **TRC**, est un diagramme utilisé pour prévoir la structure cristallographique d'un solide soumis à des transformations thermomécaniques sous contrôle de la vitesse de refroidissement.

Il présente donc les différents domaines par lesquels peut passer une certaine nuance d'acier au cours d'un refroidissement. Ces domaines sont l'austénite, la ferrite, la bénite, la martensite ou la perlite. Différentes courbes sont tracées également, représentant les trajets de refroidissements les plus courants.

Les vitesses de refroidissement pouvant grandement varier, l'échelle de temps est logarithmique. A frontière de chaque domaine, on donne généralement la proportion en % de la phase traversée en fonction de la vitesse de refroidissement. On indique aussi en général la dureté (Rockwell ou Vickers) de l'acier obtenu pour chaque vitesse de refroidissement caractéristique. Il existe diverses techniques de trempe suivant le type et la masse de l'acier à tremper.

I.12.3. Les principales techniques de trempe

On attend d'un milieu de trempe qu'il refroidisse dans des conditions optimum par rapport aux caractéristiques métallurgiques du matériau à refroidir afin de le mettre à l'abri des risques de tapures et minimiser les déformations. Le milieu de trempe inclut les effets des propriétés du fluide et de l'installation de trempe. Les milieux de trempe les plus employés par ordre de pouvoir refroidissant décroissant sont : l'eau froide (tiède, chaude, bouillante), les solutions aqueuses (eau salée), l'huile, l'air soufflé, l'air calme, les bains de sels ou de métaux fondus, les bains de sables (refroidissement plus progressif).

Les trempes à l'air sont simples mais peu efficaces sur des aciers très carburés. Les trempes à l'huile sont les plus généralisées mais de sérieuses études doivent être réalisées en fonction des pièces à tremper, en effet projeter une lame d'acier à 1050°C dans de l'huile peut provoquer l'inflammation de cette dernière. Il y a des huiles industrielles variées pour chaque cas spécifique.

L'eau à l'avantage de n'être pas inflammable par contre la trempe à l'eau pose deux problèmes, le premier c'est que l'eau possède un pouvoir calorifique élevé ce qui produit une trempe agressive pouvant faire apparaître dans la structure cristalline des failles appelées "Tapures". Autre problème critique qui est le phénomène de la caléfaction qui est la vaporisation de l'eau au contact de la pièce à la sortie du four formant une gaine de vapeur isolante ralentissant considérablement le refroidissement. L'ajout de sel, de silicates, de glycérine ou de polyglycols permet de moduler la sévérité de la trempe à l'eau. Les différents points d'une même pièce ne se refroidissent pas de façon identique, Ainsi au voisinage de la surface nous aurons une vitesse de refroidissement supérieure à la vitesse martensitique alors qu'au centre de la pièce nous aurons une vitesse inférieure à la vitesse critique de trempe, ce phénomène conduit à une trempe martensitique de surface non homogène.

I.12.3.1. Trempe cryogénique

Nous avons vu que la trempe transforme l'austénite en martensite qui est la structure très dure recherchée tel est le but à atteindre, néanmoins cette transformation est rarement atteinte à 100%. L'austénite restant dans l'acier est appelée austénite résiduelle.

La transformation de l'austénite en martensite s'effectue lors du refroidissement à partir de la température d'austénisation. Le début de transformation s'effectue dès que la température passe en dessous d'un seuil "Ms" (Martensite Start).

Au fur et à mesure que la température baisse, le pourcentage de martensite créé augmente pour atteindre 100% à une température appelée Mf (Martensite Finish). Si l'on passe le point Mf lors du refroidissement, la transformation en martensite est totale. Les températures Ms et Mf dépendent de la caléfaction et la composition de l'acier. Si Mf est inférieure à la température ambiante, toute l'austénite ne sera pas transformée en martensite. C'est souvent le cas des aciers alliés fortement carburés.

Dans certains cas l'austénite résiduelle se décompose lors des revenus, mais dans le cas des aciers fortement alliés ou lorsque la température de revenu (conditionnée par les duretés recherchées) est insuffisante, l'austénite ne sera pas entièrement transformée. Si l'on veut obtenir des duretés élevées et des aciers parfaitement homogènes le traitement cryogénique devient incontournable.

La pratique du traitement cryogénique est généralement pratiqué dans une enceinte régulée dont les températures négatives sont obtenues par injection d'azote liquide, les températures généralement pratiquées sont voisines de -90°C . Ce traitement, pour être efficace, doit être pratiqué immédiatement après la trempe. En effet au cours d'un traitement par le froid on bénéficie de la transformation martensitique. Dans tous les cas un revenu de détente doit au moins être réalisé après le traitement cryogénique

I.12.3.2. Trempe des aciers alliés

Comme l'acier est une solution solide de carbone dans le fer, il est compréhensible qu'introduire divers éléments dans cette solution va modifier le diagramme d'équilibre fer-carbone. Le chrome (Cr) agit d'une part sur les points de transformation AC3-AC1, et d'autre part sur la vitesse à laquelle se transforme l'austénite au cours du refroidissement. Les éléments qui limitent ou empêchent la formation de l'austénite fer(γ) sont appelés "alphagènes". Par exemple un acier peu carburé auquel on ajoute une quantité de Cr supérieure à 13% ne passe plus par l'état austénitique et par conséquent l'acier ne peut plus subir un durcissement par trempe. Pour cette raison les aciers ayant une quantité de Cr supérieur à 14% sont fortement carburés, une deuxième action du chrome se manifeste par le ralentissement de la vitesse critique de transformation de l'austénite en martensite facilitant la trempe. Les aciers au chrome pourront être trempés à l'huile ou même à l'air pulsé. À partir de 12% le Cr provoque une couche oxydée à la surface de l'acier, celle-ci le protégeant des attaques chimiques et limitant la corrosion.

Le nickel (Ni) se dissout dans la ferrite et ne forme pas de carbures. Il rabaisse le point de transformation AC3-AC1 de sorte que le domaine d'existence de l'austénite est élargi. Ainsi le Ni est le type des éléments dit "gammagène" qui favorise la formation d'austénite fer(γ), et par conséquent favorise la trempe. Le manganèse (Mn) est gammagène et désoxydant favorisant la trempabilité. Le molybdène (Mo) augmente la trempabilité des aciers alliés fortement carburés. Le tungstène (W) et le vanadium (V) sont utilisés afin d'obtenir des aciers durs et résistants [66].

I.12.4. Effet de la trempe sur la structure cristalline de l'acier

Les caractéristiques de la microstructure et les propriétés mécaniques des alliages de fonderie dépendent de plusieurs facteurs tels la composition chimique des alliages, la vitesse de solidification et les traitements thermiques.

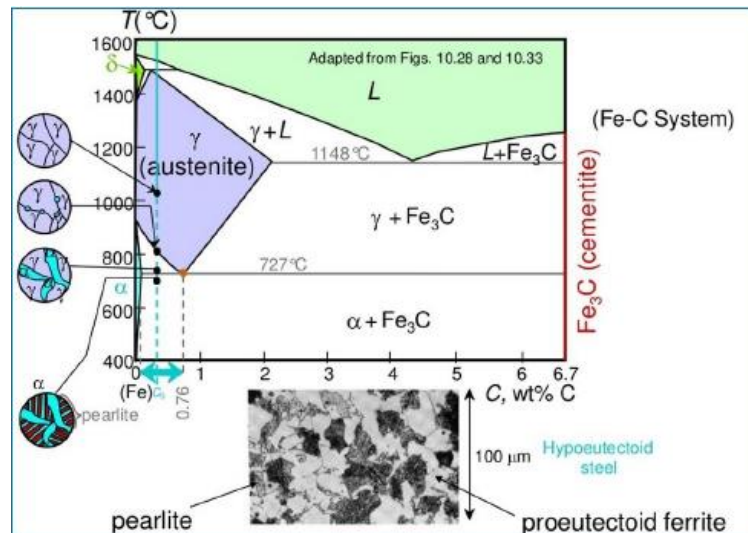


Figure I.36. Diagramme fer-carbone.
Microstructures d'équilibre (cas du C35) [68]

L'acier est en effet un alliage dont les diverses structures cristallines sont particulièrement complexes. Néanmoins pour comprendre le phénomène de trempe nous devons visualiser les diverses structures cristallines que peut prendre l'acier. Prenons par exemple le carbone "C", cet élément peut prendre trois structures cristallines différentes : Le graphite (système cristallin hexagonal), le diamant (système cristallin cubique) et le lonsdaleite (l'allotrope hexagonal du diamant qui est une formes cristallisées naturelles du carbone). Pour l'acier il en va de même surtout par la multiplication des possibilités de cristallisation avec la gamme variée des aciers alliés et pour se rapprocher au type d'acier de notre cas d'étude, nous allons considérer par la figure (I.35), l'évolution microstructurale d'un acier non-allié c'est-à-dire un alliage fer-carbone lors de la trempe.

En conclusion la trempe est destinée à donner à l'acier une microstructure très dure appelée la "martensite". Au moment de la trempe, les atomes de carbone ne seront plus en mesure de rester dans la structure cubique centrée. Par conséquent, n'ayant pas le temps de diffuser dans la structure pour reformer de la ferrite, ils vont former de la "martensite".

La martensite est en fait de la ferrite dont la maille cristalline est déformée pour laisser de la place aux atomes de carbone qui sont en solution dissoute dans la structure cubique du fer. Autres composants de l'acier c'est la cémentite qui est une molécule chimique stable (Fe_3C) composant principal des fontes. Elle est hyper dure mais très cassante. La perlite qui est un constituant biphasé de l'acier, c'est un

agrégat formé de 89% de ferrite et 11% de cémentite, sa structure est généralement formée de lamelles alternées de cémentite et de ferrite.

Dans le processus de trempe on cherche avant tout à obtenir de la martensite, une trempe appropriée limite la formation de ferrite, perlite et cémentite. Il faut se rendre bien compte que la dureté de la ferrite est de 10-15 HRC, celle de la perlite de 40-45 HRC alors que la dureté de la martensite est de 64-66 HRC [68].

I.13. L'intérêt économique de la durée de vie de l'outil

Dans une structure de marché compétitive, le prix d'un produit est un facteur très important. Un prix élevé, qui est dans la majorité des cas dû à un coût total élevé, peut mener à une forte diminution de la part du marché du produit. La minimisation du coût total de production est donc un objectif principal pour la plupart des entreprises.

Ces derniers vivent dans un monde de compétition où elles cherchent un maximum de profit et l'acquisition de marchés prometteurs. Face à cette concurrence technico-économique, la maîtrise des coûts d'un projet ou d'un produit n'est pas seulement un atout mais une obligation. Pour une pièce usinée, le coût total est fortement dépendant des frais machines (C_m) et des frais d'outils coupants (C_s).

I.13.1. Recherches relatives à l'optimisation de l'usinage

Les premières recherches remontent à Taylor, qui s'efforçait de minimiser le temps de production d'une pièce. Dans la même lignée, on a également déterminé les conditions de coût unitaire minimal, et il est bien connu que ces deux repères, coût unitaire minimale et production maximale, fixent la frontière du domaine d'usinage productif [69]. L'un des enjeux actuels est d'optimiser ce temps pour améliorer la productivité, le choix rationnel des conditions de coupe concourt largement à cet objectif.

Les principaux critères d'optimisation sont le coût global de fabrication minimale, la production horaire maximale et la durée effective de coupe de l'outil imposée. Les études portant sur les économies réalisées en usinage relèvent de l'estimation de la durée de vie de l'outil de coupe. Ils sont généralement traités de la façon à établir le critère d'usure de l'outil (en générale la largeur maximale de l'usure en dépouille), les résultats d'une série d'essais sont traités statistiquement par la méthode des moindres carrés, on obtient ainsi une ligne de régression (très

souvent représentée par la droite de Taylor) en fonction de la variable de coupe en question (par exemple : la vitesse de coupe).

Une autre approche du problème permettant de trouver une application dans un intervalle très étendu des conditions de coupe. Les différents phénomènes qui contrôlent l'usure se manifestent avec une intensité variable selon la combinaison des données de coupe, on doit donc supposer que même la dispersion de la vie d'un outil est variable selon la combinaison de ces données, il est nécessaire de faire une analyse statistique des données expérimentales qui tiennent compte de ce point de vue afin d'en tirer un tableau réaliste de la dispersion.

L'augmentation de la vitesse de coupe engendrerait une production plus rapide, mais réduirait la durée de vie de l'outil. Les coûts d'usinage seraient plus élevés en raison des changements d'outils plus fréquents et des temps d'arrêt des machines plus importants pendant les changements. L'augmentation des vitesses de coupe réduit la durée de vie de l'outil et peut rendre l'opération moins stable, alors que la modification de la profondeur de passe ou de la vitesse d'avance n'a que des conséquences minimales sur la durée de vie de l'outil.

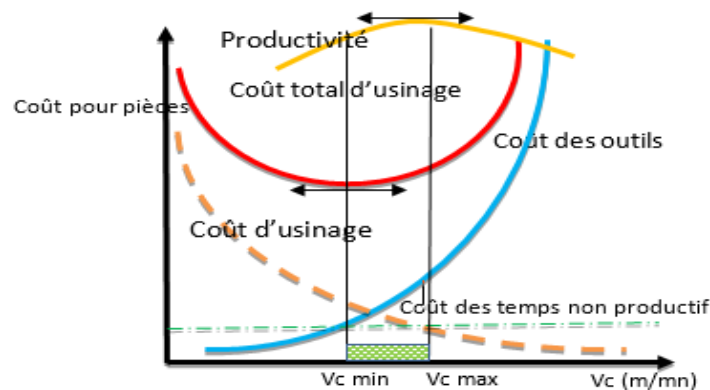


Figure I.37. Coût d'usinage [70]

Ainsi, les meilleurs résultats découlent d'une approche équilibrée impliquant des vitesses de coupe réduites associées à une augmentation proportionnelle de la vitesse d'avance et de la profondeur de passe. Utiliser la profondeur de passe maximale réduit le nombre de passes requis et réduit par conséquent la durée d'usinage. L'avance doit également être optimale, bien que les exigences en matière de qualité de la pièce et d'état de surface puissent être affectées par des vitesses d'avance excessives.

En général, on considère que l'augmentation de la vitesse de coupe de 180 m/min à 200 m/min augmente le débit copeaux seulement d'environ 10 %, mais

cela a des conséquences négatives sur la durée de vie de l'outil. Une augmentation de la vitesse d'avance de 0.2 à 0.3 mm/tr augmente le débit copeaux de 50 % avec des effets minimes, voire nuls, sur la durée de vie de l'outil. Dans la plupart des cas, augmenter l'avance et la profondeur de passe, avec une vitesse de coupe identique ou plus faible, augmente le débit copeaux d'une opération, plus que si seule la vitesse de coupe avait été augmentée. L'un des avantages de l'usinage avec des vitesses de coupe inférieures associées à une avance plus élevée et à une profondeur de passe plus faible, est la réduction de la consommation d'énergie [71].

I.14. Conclusion et position du problème

L'expression du nouveau besoin industriel pour réduire le coût et améliorer la qualité du produit a toujours poussé les chercheurs à développer les méthodes et les conditions entreprises pour la mise en forme des produits finis.

Le critère "usinabilité" du matériau prend toujours le premier rang pour ces études technico-économiques. Selon les chercheurs cette propriété complexe du matériau a été définie de plusieurs façons. À cette effet et pour synthétiser, nous retenons la définition la plus répandue et qui se rapproche à l'objectif de notre étude :

« l'usinabilité est la facilité de mise en œuvre d'un matériau à être amené par enlèvement de copeaux, à un bon fini de surface sans endommager l'outil »

On entend par le mot (facilité), importance des efforts de coupe et (*fini de surface*) ; critère de rugosité et d'usure. Ces critères sont divisés en deux catégories :

- critères principal : la vitesse technologique (tenue ou usure).
- critères complémentaires : Les efforts de coupe et la rugosité de la surface usinée.

En l'absence d'une bonne maîtrise de l'usure on ne saurait utiliser de façon rationnelle un outil de perçage et prédire sa durée de vie plus particulièrement sur les matériaux ayant subi un traitement thermique. Ainsi ce travail est dédié à l'étude de l'usinabilité lors du perçage de l'acier C35 ayant subi une trempe.

Pour plus de précision et de fiabilité des résultats proches de la réalité industrielle nous retenons la méthode de longue durée pour la réalisation des essais, bien qu'elle exige une grande quantité de matière et beaucoup de temps. Concernant les critères évaluant l'usinabilité de l'acier C35 au cours du perçage, la durée de vie du foret est celle qui s'impose le plus car nous pensons qu'il est le paramètre le plus

déterminant par rapport aux autres critères, et comme critère complémentaire nous envisageons la rugosité de la surface usinée.

I.15. Importance du perçage dans la fabrication mécanique

I.15.1. Généralités

Le perçage est une opération destinée à produire un trou cylindrique sous l'action d'un outil coupant appelé foret sur une perceuse, par une mèche manuelle à l'aide d'un vilebrequin, par la découpe entre un poinçon et une matrice, par laser, ou par électroérosion.

Le perçage doit être considéré comme une opération d'ébauche, et donc nécessite une opération d'alésage pour obtenir une cote diamétrale exacte. Néanmoins, des avancées majeures dans la conception des forets ont permis l'obtention directe de trous avec une tolérance IT9, soit une qualité suffisante dans une grande majorité des applications.

L'opération de perçage par usinage (avec un foret) est l'une des plus utilisées dans la fabrication de pièces mécaniques (figure I.37). Environ 25% des usinages sont des perçages dans la mécanique générale. On parle de micro-perçage pour des diamètres inférieurs à 5 mm, alors que les trous d'un diamètre supérieur à 20 mm sont du domaine du macro-usinage.

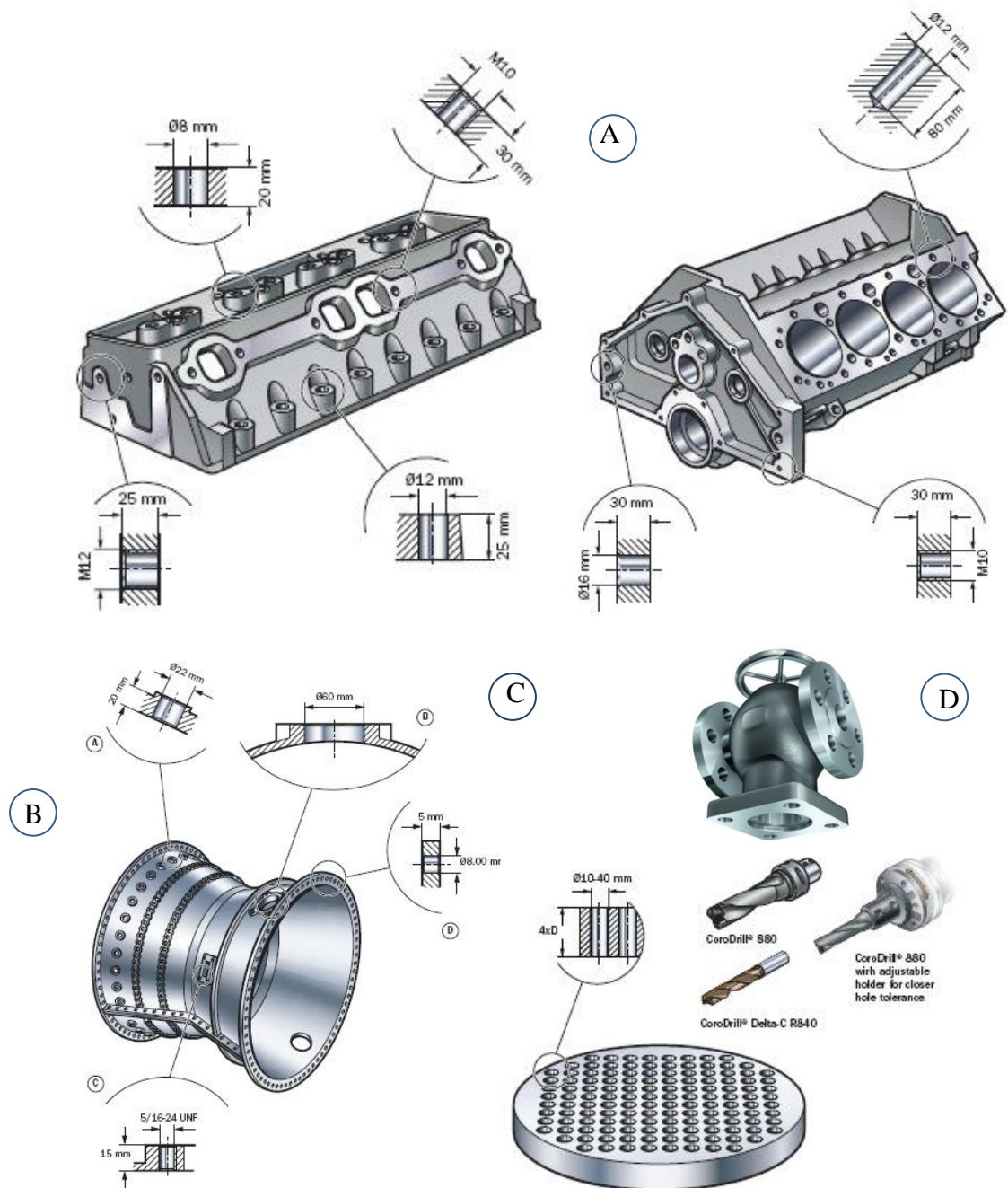


Figure I.38. Exemples de trous réalisés dans des pièces issues de plusieurs secteurs de l'industrie mécanique : (a) bloc moteur et culasse (secteur automobile), (b) moteur d'avion (secteur aéronautique), (c) plaque d'un échangeur et (d) vanne (hydraulique) [72]

La qualité d'un trou est fortement influencée par les conditions d'usinage, la nature du matériau de l'outil ainsi que sa géométrie, et par la nature du matériau à usiner. Les défauts qui se localisent sur la paroi et à la sortie du trou sont des défauts majeurs. Plusieurs travaux montrent que le défaut en sortie du trou est fortement influencé par la valeur de l'effort de poussée F résultant de l'avance de l'outil dans la matière. Cet effort dépend du choix de la géométrie de la pointe de foret ainsi que de la valeur de la vitesse d'avance de l'outil dans la matière.

Le perçage est également découpé en deux catégories en fonction de la profondeur du trou, et plus particulièrement du rapport diamètre sur longueur. On admet en général qu'au-delà de 10 fois le diamètre, on se trouve en perçage profond, et qu'au-delà de 20 fois, c'est le domaine du forage.

Le perçage de très faible diamètre est un problème technique majeur. En effet, pour obtenir des conditions de coupe correcte, il faut une vitesse de rotation du foret très importante, couramment supérieur à 24000 tr/min, et jusqu'à 63000 tr/min. De plus, à ces vitesses, la lubrification devient très délicate puisque le fluide est éjecté avant même de rejoindre la zone de coupe. Paradoxalement, le domaine d'application est large, puisqu'il va de l'horlogerie (bracelet de montre, boîtier) jusqu'à l'électronique. Très souvent le MC et d'avance en perçage sont donnés à l'outil (figure I.38).



Figure I.39. Illustration du mouvement de coupe (M_c) et celui d'avance (M_a) en perçage [60]

Le perçage est l'une des opérations d'usinage complexe, la géométrie du foret et la cinématique du procédé conduisent à une variation des angles de coupe et de la vitesse de coupe le long des arêtes. De plus la coupe s'effectue dans un milieu confiné à l'intérieur de la pièce, ce qui rend impossible l'observation du processus et l'écoulement des copeaux.

Les progrès dans le domaine de l'affûtage des forets, peuvent entraîner en production de notables améliorations de la précision et des économies appréciables.

I.15.2. Conditions optimales du perçage en fonction du matériau

Pour un matériau donné et même si on emploie un foret adéquat, le perçage ne sera pas rentable si la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et le type de lubrifiant utilisé ne soient pas soigneusement sélectionnés. Mais avant d'examiner ces différents facteurs, il convient d'insister sur le fait que des erreurs sont toujours

possibles en ce qui concerne le montage de perçage. Par exemple, une erreur habituelle consiste à placer un canon de perçage contre la pièce à travailler de sorte que la limaille doit sortir par le canon. Ce fait transforme un simple travail de perçage en une difficile opération d'un trou profond.

Pour éviter cette difficulté, il convient, en règle générale, de laisser entrer le canon et la pièce un espace supérieur d'environ 50% du diamètre du foret. Le liquide de refroidissement doit être introduit à l'entrée du trou et non pas dans le canon si le canon doit être placé sur la pièce, l'évacuation par le canon sera rendue plus facile.

Les meilleures conditions de perçage pour l'acier sont recommandées en fonction de la teneur en carbure [73] :

- jusqu'à 0,4% C. \longrightarrow vitesse de coupe de 24 à 30m/min
- entre 0,4% et 0,7% C. \longrightarrow $V_c=18$ à 24 m/min
- au-dessus de 0,7% C. \longrightarrow $V_c =12$ à 18 m/min

I.15.3. Sélection et utilisation des forets

Les forets hélicoïdaux universels sont généralement en acier rapide. Ils ont une section circulaire et deux cannelures opposées diamétralement. La conception des cannelures en effet, constitue à la fois un espace suffisant pour l'évacuation des copeaux et une conduite pour l'huile de coupe. En outre chaque cannelure doit se terminer par une lèvre de coupe droite à son intersection avec la pointe. Cette lèvre doit former un angle standard et de 118° avec la pointe. Le volume occupé par les cannelures est d'environ 50% du volume du foret.

La vitesse de dégagement du copeau est liée étroitement au pas de l'hélice du foret. De ce fait, on peut dire que plus le pas est important plus l'évacuation est rapide. La profondeur du trou à percer est un facteur important qui peut nuire à l'évacuation du copeau. Plus le trou est profond relativement au diamètre du foret plus la limaille s'entasse et l'arrivée du lubrifiant devient impossible ce qui nécessite le dégagement du foret qu'on appelle débouillage.

I.15.4. Choix du cycle de débouillage

Dès que le perçage devient long (supérieur à cinq fois le diamètre de l'outil), il faut avoir recours à des cycles de débouillage couplés à une lubrification externe de l'outil pour fragmenter et évacuer le copeau. Les perçages sont limités en terme de profondeur et les outils utilisés dépendent de la taille du perçage [74]. Lorsque le

trou à percer est profond, les goujures ne suffisent pas à assurer l'évacuation des copeaux.

Il faut de temps à autre dégager partiellement le foret du trou, de manière à laisser les copeaux s'échapper sous l'effet de la force centrifuge. C'est que l'on appelle le débouillage.

La plupart des machines à commande numériques permettent de programmer des cycles de débouillage. D'autres chercheurs ont discuté des caractéristiques du processus d'optimisation du perçage de trous profonds sous le contrôle d'un système adaptatif, qui effectue l'extraction de l'outil du trou en atteignant la valeur critique du couple sur la base de l'analyse des données expérimentales [75].

La fréquence de débouillage de l'outil est liée directement au diamètre du foret mis en œuvre et la longueur du trou à percer. Afin d'éviter l'entassement des copeaux au fond du trou qui engendre généralement le coincement du foret provoquant la rupture. Cette fréquence est déduite empiriquement selon la Figure (I.39).

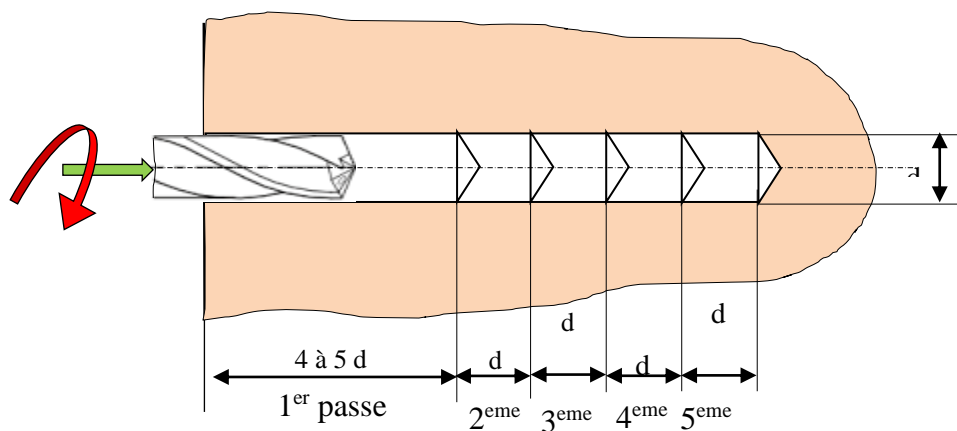


Figure I.40. Cycle de débouillage en perçage [74]

Le nombre de débouillage à prévoir (i) pendant une opération de perçage d'un trou profond est [76] :

$$i = \frac{L - 2,5D}{D} \quad (1.17)$$

Où L est la longueur du trou et D est le diamètre du foret.

I.15.5. Principaux types des forets hélicoïdaux

Il en existe différents types suivant la géométrie du perçage à réaliser et les matériaux usinés. Parmi les types de forets qui existent on distingue principalement les forets à queue coniques et à queue cylindriques.

La queue du foret représenté en figure (I.41) est un cône morse qui s'enfonce dans le cône femelle de l'extrémité du fourreau de la perceuse. Étant irréversible, le cône peut entraîner le foret en rotation. Pour garantir qu'il ne glissera pas, il y a en outre à son extrémité un méplat qui s'engage dans une mortaise rectangulaire du fourreau. Le jeu entre le méplat et la mortaise est suffisant pour assurer que le centrage se fera convenablement sur le cône. L'extraction du foret est assurée en tapant sur une clavette inclinée (chasse cône) qu'on fait passer à travers deux fenêtres opposées sur le fourreau.

Tout ceci vaut pour les forets suffisamment gros dépassant 13 mm et plus. Dans le cas des forets égaux ou moins à 13 mm la queue est cylindrique et on utilise un mandrin à trois mors pour le serrer. C'est alors ce mandrin qui est monté sur une queue en cône morse



Figure I.41. Foret à queue cylindrique.



Figure I.42. Foret à queue conique.

I.15.6. Géométrie d'un foret hélicoïdal

La géométrie générique d'un foret hélicoïdal est donnée sur la figure (I.42 et I.43). Les variations principales de géométrie concernent l'affûtage de la pointe du foret, en particulier l'angle de pointe, le type d'affûtage de la face en dépouille et le type d'amincissement de l'âme seront illustrés ultérieurement dans les figures (I.29, I.31 et I.32).

Un foret hélicoïdal est constitué essentiellement d'une queue cylindrique ou conique selon le modèle, qui sert pour la fixation sur la perceuse et d'une partie taillée en forme d'hélice, ce terminant par le bec de l'outil qui est la partie active du foret. Ce dernier forme un angle de pointe égale à 120° selon la matière à usiner,

suivant une forme géométrique bien déterminée pour faciliter la pénétration et l'arrachement de la matière lors de la coupe.

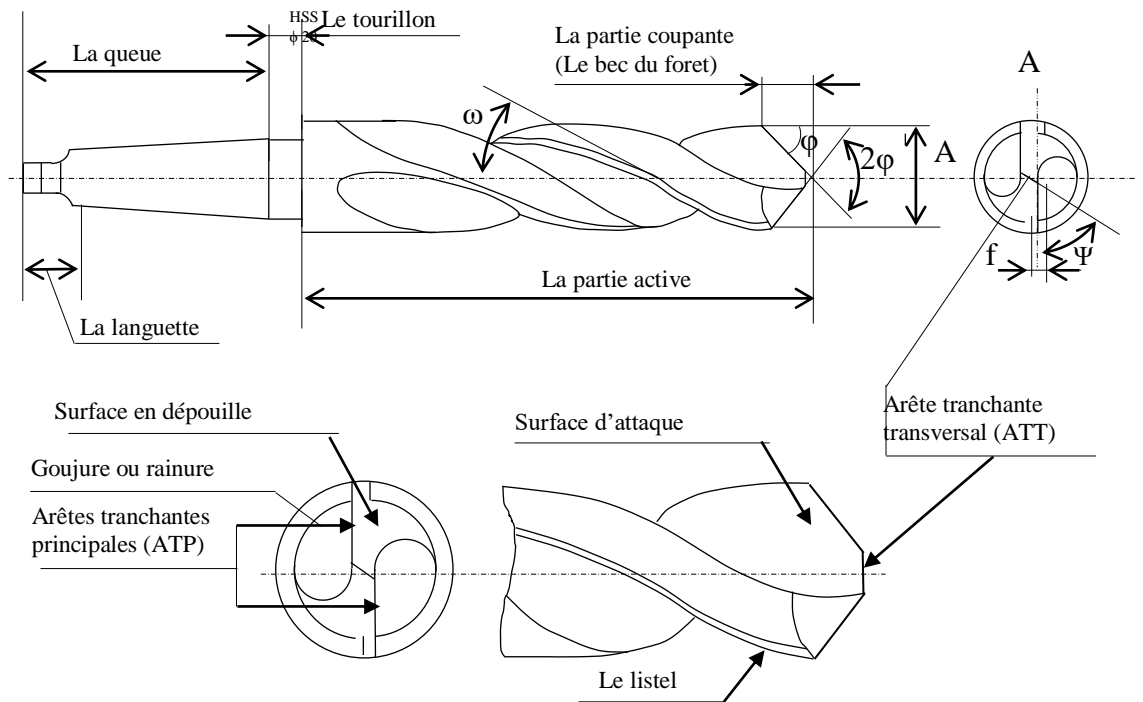


Figure I.43. Principaux éléments d'un foret hélicoïdal [77]

La forme géométrique du bec d'un foret est d'une importance capitale pour qu'il soit rentable. Il est formé par l'intersection des deux hélices suivant un angle suscité et taillé de façon à permettre une facilité de pénétration dans la matière par une arête tranchante transversale qui a le rôle de préparer l'avant trou. L'intersection de la surface en dépouille et celle d'attaque donnent naissance à l'arête tranchante principale, qui se termine au bord du bec par le listel. Le rôle de ce dernier est d'achever le travail pour donner la forme finale du trou grâce à une forme géométrique bien déterminée, détaillée dans la Figure (I.42 et I.43).

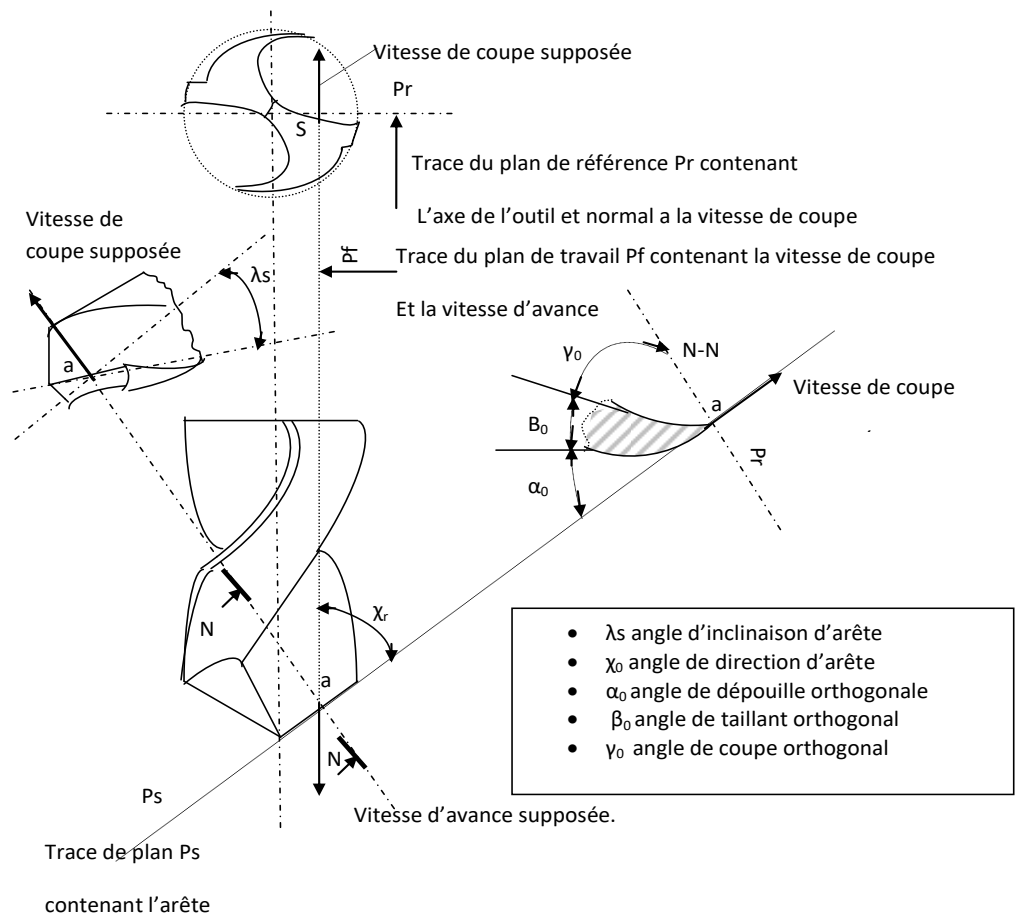


Figure I.44. Amincissement de la partie centrale d'un foret hélicoïdal [78]

Des chercheurs ont étudié l'influence de la géométrie du foret hélicoïdal en tant qu'angle de pointe sur le délaminage par une analyse FE et des études expérimentales lors du perçage d'un stratifié CFRP, où ils ont conclu que le foret hélicoïdal HSS ne convient à aucun perçage composite [79].

CHAPITRE II

PREPARATION DES ECHANTILLONS ET REALISATION DES ESSAIS EXPERIMENTAUX

II.1. Introduction

Ce chapitre est dédié à la préparation des échantillons en acier C35 du lingot aux échantillons usinés, passant par les traitements thermiques nécessaire afin de tester les forets en acier rapide de différents diamètres jusqu'à l'usure optimal selon de différents régime de coupe pour enfin dégager des modèles productiques.

En effet, plusieurs essais d'usure ont été réalisés dans le but d'étudier l'influence des conditions de coupe sur la durée de vie des forets en ARS lors de l'usinage de l'acier C35 trempé et non trempé

L'étude de l'usinabilité des matériaux suppose la connaissance des différents facteurs qui influent sur le processus de coupe. Parmi ces facteurs nous pourrions citer les éléments du régime de coupe comme la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (ap) pour notre cas c'est le diamètre du foret (D), les paramètres géométriques de l'outil (r , α , β , γ , χ_r , ε ...) et les propriétés physico-mécaniques et chimiques du matériau mis en œuvre (HB, Rr, %C, %S, ...), ainsi que les conditions de travail (rigidité du système usinant). Tous ces facteurs constituent les paramètres d'entrée du système d'usinage. Par contre la tenue, la précision, les efforts, la rugosité, la température, le cout d'usinage, la production etc... présentent les paramètres de sortie (figure II.1). Il est à noter que les paramètres d'entrée sont de différentes natures. Autrement dit on peut rencontrer les paramètres contrôlables, mesurables et gérables et d'autres qui ne sont ni contrôlables ni gérable et qui influent sur le processus d'usinage.

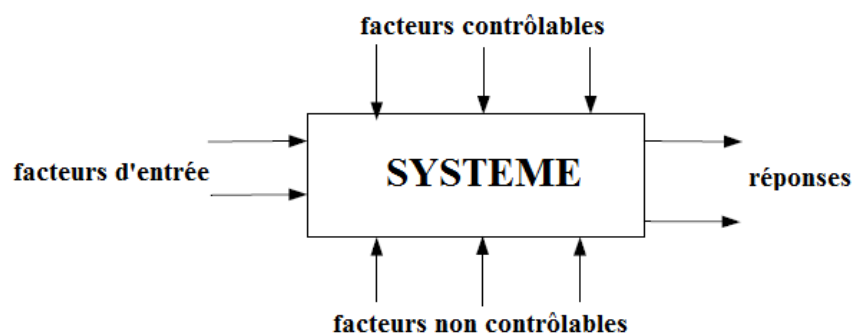


Figure II.1. Schéma structural du système d'usinage.

II.2. Planification des expériences et équipements utilisés

Les séries d'expériences examinées dans cette thèse concernent le perçage de l'acier C35 avant et après trempe, avec des outils en HSS (High-Speed Steele) poussés à leur limite de travail caractérisées par l'usure en dépouille de l'arête tranchante principale quand elle atteint 0,5mm, en prenant comme variable la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f) et le diamètre du foret (D). Afin de pouvoir prédire l'usure à travers la détermination des modèles de Taylor correspondants.

Les essais sont planifiés suivant la méthode multifactorielle.

II.2.1. Méthode multifactorielle

Cette méthode est utilisée dans le cas où nous voulons déterminer l'action simultanée de plusieurs facteurs sur le paramètre Y , ce qui permet de trouver une relation de la forme :

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

Autrement dit les X_i varient simultanément (Tableau 2.1)

Tableau II.1. Illustration de la méthode multifactorielle.

N°	Facteurs d'entrées						Paramètres de réponses			
	X_1	X_2	.	X_j	.	X_m	Y_1	Y_2	Y_1	Y_{moy}
1	X_{11}	X_{21}	.	X_{j1}	.	X_{m1}	Y_{11}	Y_{21}	Y_1	Y_{moy1}
2	X_{12}	X_{22}	.	X_{j2}	.	X_{m2}	Y_{22}	Y_{22}	Y_1	Y_{moy2}
.
I	X_{1i}	X_{2i}	.	X_{ij}	.	X_{mi}	Y_{mi}	Y_{2i}	Y_1	Y_{moy3}
.
n	X_{1n}	X_{1n}	.	X_{jn}	.	X_{mn}	Y_{1n}	Y_{2n}	Y_1	Y_{moyn}

Chaque facteur X_j varie dans un intervalle bien déterminé, soit : $[X_{min}, X_{max}]$. On se sert des valeurs X_{min} , X_{moy} et X_{max} dans une expérience à trois (03) niveaux. Pour une expérience à deux niveaux (02) on ne prend que X_{min} et X_{max} . Le nombre d'expériences N est une fonction du nombre de facteurs (m) et du nombre de niveaux P , adopté pour chaque variable :

$$N = P^m \quad (II.1)$$

La matrice des expériences planifiées illustrée dans le Tableau (II.2), prend la forme en codifiant les X_{ij} ($j = 1, m ; i = 1, P$) selon les conventions suivants :

- la valeur minimale X_{min} sera codifiée par (-1).
- la valeur moyenne X_{moy} sera codifiée par (0).

➤ la valeur maximale X_{max} sera codifiée par (+1).

Tableau II.2. La matrice de planification des expériences.

N°	Facteurs							Paramètres			
	X ₁	X ₂	X ₃	.	X _j	.	X _n	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y _{moy}
1	-1	-1	-1					Y ₁₁	Y ₂₁	Y ₃₁	Y _{moy1}
2	0	-1	-1					Y ₁₂	Y ₂₂	Y ₃₂	Y _{moy2}
3	+1	-1	-1					.	.	.	.
4	-1	0	-1					.	.	.	.
5	0	0	-1					.	.	.	.
6	+1	0	-1					.	.	.	.
7	-1	+1	-1					.	.	.	.
8	0	+1	-1					.	.	.	.
9	+1	+1	-1					.	.	.	.
10	-1	-1	0					.	.	.	.
...	...	...	...					.	.	.	Y _{moy i}
N	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	.Y _{1N}	Y _{2N}	Y _{3N}	Y _{moy N}

Dans notre cas, les facteurs sont au nombre de trois (Vc, f et D), m = 3, le nombre de niveaux (P) adopté est P=2, alors le nombre d'expériences nécessaires N=8. Dans ce cas le plan d'expériences correspondant est le suivant :

Tableau II.3. Plan d'expériences correspondant à nos essais.

N°	Facteurs			Paramètres			
	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y _{moy}
1	-1	-1	-1	Y ₁₁	Y ₂₁	Y ₃₁	Y _{moy1}
2	+1	-1	-1	Y ₁₂	Y ₂₂	Y ₃₂	Y _{moy2}
3	-1	+1	-1	Y ₁₃	Y ₂₃	Y ₃₃	Y _{moy3}
4	+1	+1	-1	.	.	.	.
5	+1	-1	+1	.	.	.	.
6	+1	-1	+1	.	.	.	.
7	-1	+1	+1	.	.	.	.
8	+1	+1	+1	Y ₁₈	Y ₂₈	Y ₃₈	Y _{moy8}

Dans la coupe des métaux, les lois liant la sortie Y d'un système d'usinage aux paramètres d'entrée X₁, X₂, ..., X_n sont en général de la forme :

$$Y = C \cdot X_1^{k1} \cdot X_2^{k2} \cdot X_n^{kn} \tag{II.2}$$

Où C : est une constante tenant compte de l'influence des facteurs ne figurant pas dans la relation (II.2) et k_1, k_2, \dots, k_n : sont des exposants reflétant, respectivement les degrés d'influence de X_1, X_2, \dots, X_n sur Y [80], [81].

Dans plusieurs cas l'effet des interactions des facteurs joue un rôle très important dans l'adéquation du modèle mathématique et élève sa précision. Ceci peut être rencontré notamment lors de l'usinage des aciers difficilement usinable [82], [83].

Dans le même article on est arrivé à la conclusion que k_1, k_2, \dots, k_n ne sont plus des constantes mais ils sont fonction des paramètres d'entrée. Dans ce cas le modèle (II.2) prend la forme suivante :

$$Y = C.(X_1, X_2, \dots, X_n). X_1^{\alpha}(X_1, X_2, \dots, X_n). X_2^{\beta}(X_1, X_2, \dots, X_n). X_3^{\gamma}(X_1, X_2, \dots, X_n). X_n^{\delta}(X_1, X_2, \dots, X_n) \tag{II.3}$$

Où : C. (X1, X2, ..., Xn) est une fonction tenant compte des conditions de travail et $\alpha (X_1, X_2, \dots, X_n), \beta (X_1, X_2, \dots, X_n), \gamma (X_1, X_2, \dots, X_n), \delta (X_1, X_2, \dots, X_n)$ ce sont des fonctions reflétant respectivement, les degrés d'influence de X_1, X_2, \dots, X_n sur Y.

Pour définir la relation (II.3) on détermine les fonctions :

$c (X_1, X_2, \dots, X_n), \alpha (X_1, X_2, \dots, X_n), \beta (X_1, X_2, \dots, X_n), \gamma (X_1, X_2, \dots, X_n), \delta (X_1, X_2, \dots, X_n)$.

Pour cela on fait recourt à la méthode des moindres carrés, qui repose sur la minimisation des écarts quadratiques δY_i illustrés dans la Figure (II.2).

Y : valeur de sortie directement de l'expérience
 \hat{Y} : Valeur de Y obtenue par le modèle.

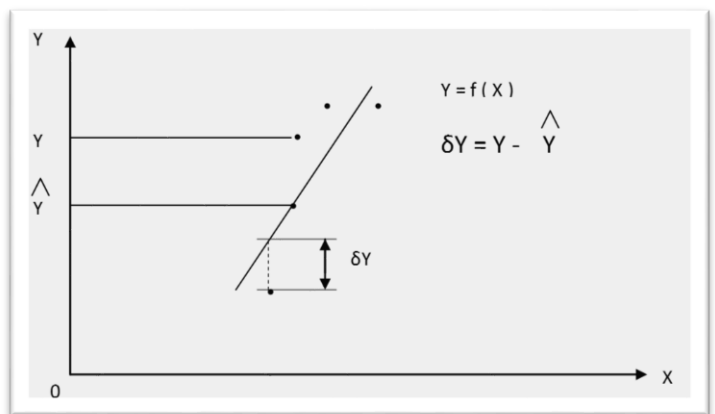


Figure II.2. Interprétation géométrique de la méthode des moindres carrés.

Si nous prenons les logarithmes des deux membres de l'équation (II.3) nous obtenons :

$$\text{Ln}Y = \text{Ln} C.(X_1, X_2, \dots, X_n) + \alpha(X_1, X_2, \dots, X_n) \text{Ln} X_1 + \beta(X_1, X_2, \dots, X_n) \text{Ln} X_2 + \gamma (X_1, X_2, \dots, X_n) \text{Ln} X_3 + \delta(X_1, X_2, \dots, X_n) \text{Ln} X_n \quad (\text{II.4})$$

Si on pose les changements de variables suivants :

$$y = \text{Ln}Y ; C (X_1, X_2, \dots, X_n) = \text{Ln} C (X_1, X_2, \dots, X_n); X_1 = \text{Ln} X_1; X_2 = \text{Ln} X_2; X_3 = \text{Ln} X_3 \dots\dots; X_n = \text{Ln} X_n$$

La relation (II.4) sera :

$$y = C (X_1, X_2, \dots, X_n) + \alpha(X_1, X_2, \dots, X_n) X_1 + \beta(X_1, X_2, \dots, X_n) X_2 + \gamma (X_1, X_2, \dots, X_n) X_3 + \dots + \delta(X_1, X_2, \dots, X_n) X_n \quad (\text{II.5})$$

Pour n essais nous aurons :

$$\left. \begin{aligned} \diamond y_1 &= C (X_1, X_2, \dots, X_n) + \alpha(X_1, X_2, \dots, X_n) X_{11} + \beta(X_1, X_2, \dots, X_n) X_{21} + \gamma (X_1, X_2, \dots, X_n) X_{31} \dots + \delta(X_1, X_2, \dots, X_n) X_{n1} \dots\dots\dots \\ \diamond y_i &= C (X_1, X_2, \dots, X_n) + \alpha(X_1, X_2, \dots, X_n) X_{1i} + \beta(X_1, X_2, \dots, X_n) X_{2i} + \gamma (X_1, X_2, \dots, X_n) X_{3i} \dots + \delta(X_1, X_2, \dots, X_n) X_{ni} \dots\dots\dots \\ \diamond y_n &= C (X_1, X_2, \dots, X_n) + \alpha(X_1, X_2, \dots, X_n) X_{1n} + \beta(X_1, X_2, \dots, X_n) X_{2n} + \gamma (X_1, X_2, \dots, X_n) X_{3n} \dots + \delta(X_1, X_2, \dots, X_n) X_{nn} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.6})$$

Pour résoudre ce système nous supposons :

$$\left. \begin{aligned} C (X_1, X_2, \dots, X_n) &= \\ C_0 + C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + \dots + C_nX_n \quad \alpha (X_1, X_2, \dots, X_n) &= \\ \alpha_0 + \alpha_1X_1 + \alpha_2X_2 + \alpha_3X_3 + \dots + \alpha_nX_n \quad \beta (X_1, X_2, \dots, X_n) &= \\ \beta_0 + \beta_1X_1 + \beta_2X_2 + \beta_3X_3 + \dots + \beta_nX_n \quad \gamma (X_1, X_2, \dots, X_n) &= \\ \gamma_0 + \gamma_1X_1 + \gamma_2X_2 + \gamma_3X_3 + \dots + \gamma_nX_n \quad \delta (X_1, X_2, \dots, X_n) &= \\ \delta_0 + \delta_1X_1 + \delta_2X_2 + \delta_3X_3 + \dots + \delta_nX_n \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.7})$$

Les fonctions α, β, γ et δ sont indépendantes de leurs bases dans (II.3), donc le système (II.7) devient :

$$\left. \begin{aligned}
C (X_1, X_2, \dots, X_n) &= C_0 + C_1X_1+ C_2X_2 + C_3X_3 + \dots + C_nX_n \\
\alpha (X_1, X_2, \dots, X_n) &= \alpha_0 + \alpha_1X_1+ \alpha_2X_2 + \alpha_3X_3 + \dots + \alpha_nX_n \\
\beta (X_1, X_2, \dots, X_n) &= \beta_0 + \beta_1X_1+ \beta_2X_2 + \beta_3X_3 + \dots + \beta_nX_n \\
\gamma (X_1, X_2, \dots, X_n) &= \gamma_0 + \gamma_1X_1+ \gamma_2X_2 + \gamma_3X_3 + \dots + \gamma_nX_n \\
\dots\dots\dots \\
\delta (X_1, X_2, \dots, X_n) &= \delta_0 + \delta_1X_1+ \delta_2X_2 + \delta_3X_3 + \dots + \delta_{n-1}X_{n-1}
\end{aligned} \right\} \quad \text{(II.8)}$$

En substituant les équations du système (II.8) dans la relation (II.5) on aura :

$$\left. \begin{aligned}
y &= (C_0 + C_1X_1+ C_2X_2 + C_3X_3 + \dots + C_nX_n) + \\
&(\alpha_0 + \alpha_1X_1+ \alpha_2X_2 + \alpha_3X_3 + \dots + \alpha_nX_n)X_1 + \\
&(\beta_0 + \beta_1X_1+ \beta_2X_2 + \beta_3X_3 + \dots + \beta_nX_n)X_2+ \\
&(\gamma_0 + \gamma_1X_1+ \gamma_2X_2 + \gamma_3X_3 + \dots + \gamma_nX_n) X_3+ \\
&\dots\dots\dots \\
&(\delta_0 + \delta_1X_1+ \delta_2X_2 + \delta_3X_3 + \dots + \delta_{n-1}X_{n-1})X_n
\end{aligned} \right\} \quad \text{(II.9)}$$

En effectuant les calculs nous aurons :

$$\left. \begin{aligned}
y &= C_0 (C_1+ \alpha_0) X_1 + (C_2 + \beta_0) X_2 + \dots + (C_3 + \delta_0) X_3+ \dots + (C_n + \gamma_0) \\
&X_n + (\alpha_2 + \beta_1) X_1 X_2 + (\alpha_3 + \gamma_1) X_1X_3 + \dots + (\alpha_n + \delta_1) X_1X_n + \\
&(\beta_3 + \gamma_2) X_2X_3 + \dots + (\mu_n + S_{n-1}) X_{n-1}X_n
\end{aligned} \right\} \quad \text{(II.10)}$$

Où : μn est le coefficient de Xn dans l’avant dernier facteur dans (II.9). Après une transformation élémentaire la relation (II.10) devient :

$$\begin{aligned}
y &= C_0 + e_1X_1 + e_2X_2 + e_3X_3 + \dots + e_nX_n + e_{12}X_1X_2 + \\
&e_{13}X_1X_3 + \dots + e_2X_2X_3 \dots\dots\dots + e_{n-1}X_{n-1}X_n
\end{aligned} \quad \text{(II.11)}$$

$$e_1 = C_1 + \alpha_0 ; e_2 = C_2 + \beta_0 ; e_3 = C_3 + \gamma_3 ; \dots ; e_n = C_n + \delta_0 ;$$

$$e_{12} = \alpha_2 + \beta_1 ; e_{13} = \alpha_3 + \gamma_1 ; e_{23} = \beta_3 + \gamma_2 ; \dots ; e_{n-1} = \mu_n + S_{n-1} ; \tag{II.12}$$

Pour définir la relation (II.12) il est nécessaire de déterminer les coefficients $C_0, e_1, e_2, e_3, \dots, e_{11}, e_{12}, e_{13}, e_{23}, \dots, e_{n-1}$.

Par expérience nous élaborons N expériences à partir desquelles nous formons le système d'équations suivant :

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= C_0 + e_1 X_{11} + e_2 X_{21} + e_3 X_{31} + \dots + e_1 X_{n1} + e_{12} X_{12} X_{21} + e_{13} X_{11} X_{31} + \\ &e_{23} X_{21} X_{31} + \dots + e_{n-1n} X_{n-1} X_n \\ y_i &= C_0 + e_1 X_{1i} + e_2 X_{2i} + e_3 X_{3i} + \dots + e_n X_{ni} + e_{12} X_{1i} X_{2i} + e_{13} X_{1i} X_{3i} + \\ &e_{23} X_{2i} X_{3i} + \dots + e_{n-in} X_{n-1i} X_{ni} \\ y_n &= C_0 + e_i X_{1n} + e_2 X_{2n} + e_3 X_{3n} + \dots + e_n X_{nn} + e_{12} X_{1n} X_{2n} + e_{13} X_{1n} X_{3n} + \\ &e_{23} X_{2n} X_{3n} + \dots + e_{n-1n} X_{n-1n} X_{nn} \end{aligned} \right\} \tag{II.13}$$

Cette méthode a été développée par [80] pour déterminer finalement les coefficients et les exposants selon les expressions suivantes :

II.2.1.1. Coefficients et exposants pour un modèle simple (sans interactions)

Les coefficients du modèle simple peuvent être déterminés d'après les expressions suivantes :

$$\left. \begin{aligned} e_0 &= 1/N \sum Y_i \\ e_1 &= 1/N \sum Y_i X_{1i} \\ e_2 &= 1/N \sum Y_i X_{2i} \\ e_3 &= 1/N \sum Y_i X_{3i} \end{aligned} \right\} \tag{II.14}$$

Ce qui entraîne qu'à ce moment on peut dire que la relation (II.11) est définie par la forme suivante :

$$Y = e_0 + e_1 X_1 + e_2 X_2 + e_3 X_3$$

En appliquant l'antilogarithme nous obtenons la forme finale du le modèle simple :

$$Y = e^{k_0} x_1^{k_1} x_2^{k_2} x_3^{k_3}$$

Maintenant cherchons à décodifier cette forme en remplaçant les X_{ij} par leur valeurs selon la relation suivante :

$$X_i = \frac{2[\ln X_i - \ln X_{i\max}]}{[\ln X_{i\max} - \ln X_{i\min}]} + 1 \quad \text{es, nous aurons : (II.15)}$$

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \frac{2[\ln X_1 - \ln X_{1\max}]}{[\ln X_{1\max} - \ln X_{1\min}]} + 1 \\ X_2 &= \frac{2[\ln X_2 - \ln X_{2\max}]}{[\ln X_{2\max} - \ln X_{2\min}]} + 1 \\ X_3 &= \frac{2[\ln X_3 - \ln X_{3\max}]}{[\ln X_{3\max} - \ln X_{3\min}]} + 1 \end{aligned} \right\} \quad \text{(II.16)}$$

II.2.1.2. Coefficients et exposants pour un modèle combiné (avec interactions)

Dans le cas où le modèle s'avère inadéquat avec les résultats expérimentaux, on fait recours à l'effet des interactions des facteurs. Dans ce cas les exposants et les constantes du modèle seront calculés d'après les formules suivantes :

$$\begin{aligned} * e_0 &= 1/N \sum Y_i & * e_1 &= 1/N \sum Y_i X_{1i} & * e_{12} &= 1/N \sum Y_i X_{1i} X_{2i} \\ & & * e_2 &= 1/N \sum Y_i X_{2i} & * e_{13} &= 1/N \sum Y_i X_{1i} X_{3i} \\ & & * e_3 &= 1/N \sum Y_i X_{3i} & * e_{23} &= 1/N \sum Y_i X_{2i} X_{3i} \end{aligned} \quad \text{(II.17)}$$

Ce qui entraîne à ce moment qu'on peut dire que la relation (II.11) est définie pour le modèle combiné comme suite :

$$Y = e_0 + e_1 X_1 + e_2 X_2 + e_3 X_3 + e_{12} X_1 X_2 + e_{13} X_1 X_3 + e_{23} X_2 X_3 \quad \text{(II.18)}$$

En appliquant l'antilogarithme nous obtenons la forme finale du le modèle combiné selon huit possibilités qui donnent respectivement huit formes du modèles, en fonction des combinaisons des interactions prise en compte.

N°1 : $Y = k_0 + (k_1 + k_{12} \ln X_2) \ln X_1 + (k_2 + k_{23} \ln X_3) \ln X_2 + (k_3 + k_{13} \ln X_3) \ln X_3$

$$Y = e^{k_0} X_1^{(k_1 + k_{12} \ln X_2)} X_2^{(k_2 + k_{23} \ln X_3)} X_3^{(k_3 + k_{13} \ln X_3)} \quad \text{(II.18.1)}$$

N°2 : $Y = k_0 + (k_1 + k_{13} \ln X_3) \ln X_1 + (k_2 + k_{12} \ln X_1) \ln X_2 + (k_3 + k_{23} \ln X_2) \ln X_3$

$$Y = e^{k_0} X_1^{(k_1 + k_{13} \ln X_3)} X_2^{(k_2 + k_{12} \ln X_1)} X_3^{(k_3 + k_{23} \ln X_2)} \quad (\text{II.18.2})$$

$$\text{N}^\circ 3 : Y = k_0 + (k_1 + k_{12} \ln X_2 + k_{13} \ln X_3) \ln X_1 + (k_2 + k_{23} \ln X_3) \ln X_2 + k_3 \ln X_3$$

$$Y = e^{k_0} X_1^{(k_1 + k_{12} \ln X_2 + k_{13} \ln X_3)} X_2^{(k_2 + k_{23} \ln X_3)} X_3^{k_3} \quad (\text{II.18.3})$$

$$\text{N}^\circ 4 : Y = k_0 + (k_1 + k_{13} \ln X_3) \ln X_1 + (k_2 + k_{12} \ln X_1 + k_{23} \ln X_3) \ln X_2 + k_3 \ln X_3$$

$$Y = e^{k_0} X_1^{(k_1 + k_{13} \ln X_3)} X_2^{(k_2 + k_{12} \ln X_1 + k_{23} \ln X_3)} X_3^{k_3} \quad (\text{II.18.4})$$

$$\text{N}^\circ 5 : Y = k_0 + (k_1 + k_{12} \ln X_2) \ln X_1 + k_2 \ln X_2 + (k_3 + k_{13} \ln X_1 + k_{23} \ln X_2) \ln X_3$$

$$Y = e^{k_0} X_1^{(k_1 + \ln X_2)} X_2^{k_2} X_3^{(k_3 + k_{13} \ln X_1 + k_{23} \ln X_2)} \quad (\text{II.18.5})$$

$$\text{N}^\circ 6 : Y = k_0 + (k_1 + k_{12} \ln X_2 + k_{13} \ln X_3) \ln X_1 + k_2 \ln X_2 + (k_3 + k_{23} \ln X_2) \ln X_3$$

$$Y = e^{k_0} X_1^{(k_1 + k_{12} \ln X_2 + k_{13} \ln X_3)} X_2^{k_2} X_3^{(k_3 + k_{23} \ln X_2)} \quad (\text{II.18.6})$$

$$\text{N}^\circ 7 : Y = k_0 + k_1 \ln X_1 + (k_2 + k_{12} \ln X_1) \ln X_2 + (k_3 + k_{13} \ln X_1 + k_{23} \ln X_2) \ln X_3$$

$$Y = e^{k_0} X_1^{k_1} X_2^{(k_2 + k_{12} \ln X_1)} X_3^{(k_3 + k_{13} \ln X_1 + k_{23} \ln X_2)} \quad (\text{II.18.7})$$

$$\text{N}^\circ 8 : Y = k_0 + k_1 \ln X_1 + (k_2 + k_{12} \ln X_1 + k_{23} \ln X_3) \ln X_2 + (k_3 + k_{13} \ln X_1) \ln X_3$$

$$Y = e^{k_0} X_1^{k_1} X_2^{(k_2 + k_{12} \ln X_1 + k_{23} \ln X_3)} X_3^{(k_3 + k_{13} \ln X_1)} \quad (\text{II.18.8})$$

Nous avons dit, au début de ce chapitre que le coefficient C du modèle (II.2) ne sera plus une constante mais une fonction de X_1, X_2, \dots, X_n (II.3), ceci n'est pas en contradiction avec les modèles trouvés car la constante e^{k_0} possède toujours les paramètres X_1, X_2, \dots, X_n . Par conséquent nous pouvons poser :

$$Y = e^{k_0} X_1^{k_1} X_2^{k_2} X_3^{k_3} X_1^{k_{12} \ln X_2} X_2^{k_{23} \ln X_3} X_3^{k_{13} \ln X_1}$$

Et la fonction sera :

$$C(X_1, X_2, X_3) = e^{k_0} \cdot X_1^{k_1} \cdot X_2^{k_2} \cdot X_3^{k_3}$$

En analysant les formes des modèles (II.18) on constate que la quantité e^{k_0} est commune, k_1 est toujours exposant de X_1 , aussi k_2 pour X_2 et k_3 pour X_3 .

Revenons à la forme simple :

$$Y = C X_1^{k_1} X_2^{k_2} X_3^{k_3}$$

Lorsque les produits combinés des facteurs ne jouent aucun rôle ou un rôle très faible, ceci se traduit par le fait que les coefficients des produits combinés dans (II.11) soit nuls : $(e_{12} = e_{13} = e_{23} = 0)$

Pour les autres cas, il faut toujours fixer la forme du modèle pour ne pas s'engager

dans des calculs qui donnent théoriquement des résultats nuls, les considérations seront claires si on envisage le cas du modèle de Taylor selon notre modélisation, il peut être écrit comme suit :

$$T = e^{k_0} V^{k_1} \quad (\text{II.19})$$

Avec : $C = e^{k_0}$ et $n = \frac{1}{K_1}$

K_0 et k_1 sont donnés par la relation (II.17).

II.3. Préparation des expériences

Les expériences ont été réalisées en grande partie au Ateliers Maghrébin de Mécanique (AMM) complexe sidérurgique SIDER EL HADJAR ANNABA et le laboratoire de recherche des technologies avancées en production mécanique du département de génie mécanique de l'université Badji Mokhtar Annaba.

Les équipements et les conditions opératoires mis en œuvre pour la réalisation du travail sont comme suite :

II.3.1. Machine-outil

Les essais ont été réalisés sur une perceuse radiale modelé 2A554 n° 6318 (figure II.3a), est conçue pour une large application dans l'industrie grâce à son universalité. La tête porte-broche est réalisée sous forme d'une unité séparée autonome.

La gamme de vitesse de la broche 18 à 2000 tr/min nombre de vitesse de rotation de la broche est de 24 à 2000 tr/min la gamme d'avance de la broche 0,1 à 5 mm/tr (figure II.3b). Nombre d'avance de travail est de 12.



Figure II.3a. Perceuse radiale modelé 2A554



Figure II.3b. Sélecteur des avances

La fréquence de rotation est de 1430 tr/min.

La puissance de moteur de mouvement principale est de 5,5 KW.

La puissance de moteur de déplacement (avance) est de 2,2 KW.

II.3.2. Matière à usiner

Nous nous sommes servis d'une barre forgée de l'acier C35 ayant les caractéristiques mécaniques et chimiques présentées dans le tableau (II.4) :

Tableau II.4. Caractéristiques mécaniques et chimiques de l'acier C35 avant traitement thermique.

Composition chimique				Caractéristiques mécaniques
C	0,37	Ni	0,010	Dureté : 95 HRB 210 HB
Mn	0,63	Cr	0,013	
Si	0,30	Mo	0,002	
P	0,003	V	0,003	Résistance à la rupture : 69 dN/mm ²
S	0,010	Sn	0,001	
Cu	0,020	B	-	Allongement : 9 %
Al	0,015	W	-	
Ti	0,001	-	-	
Nb	0,000	Co	-	

II.3.3. Choix du régime de coupe

Deux séries d'expériences sont réalisés avec des paramètres de coupe bien déterminée. La première série consiste à percer l'acier C35 à l'état recuit, la deuxième concerne le perçage du même type d'acier mais après avoir subi une trempe, les paramètres de coupe choisis comme suite :

A. Vitesse de coupe (V_c) en (m/min) :

La vitesse de coupe est le chemin (distance) parcourue en mètres par minute par un point placé sur la périphérie du foret. Elle correspond en cinématique à la vitesse circonférentielle uniforme. Son choix dépend des facteurs suivants :

- la matière à usiner (généralement, plus la matière est tendre, plus V_c est élevée).
- la nature de la matière de l'outil de coupe.
- le genre d'usinage : ébauche, finition, tournage, filetage ... etc...
- la profondeur de passe : Plus la quantité de matière est importante moins la vitesse de coupe est grande.
- la forme de la pièce et de sa fixation et du serrage de l'outil de coupe.
- la rigidité du montage de l'outil de coupe ainsi que le bon serrage de la pièce.

- le lubrifiant : une abondante lubrification permet d'augmenter la vitesse de coupe.
- le type de la machine : une machine robuste peut supporter des vitesses de coupe plus élevées par rapport à une machine de construction plus légère.

Compte tenu de tous ces facteurs la vitesse de coupe recommandée en pratique peut être choisie entre 20 et 30 m/min [84].

B. Fréquence de rotation (N) en (tr/min) :

Le calcul du nombre de tours se fait en fonction des vitesses de coupe (V_c) qu'on choisit selon la matière à usiner dans l'intervalle de 15 à 30 m/min et du diamètre du foret (D) entre 10 et 20mm [65].

$$N = \frac{1000.V_c}{\pi.D} \quad (\text{II.20})$$

C. Choix de l'avance (f) en (mm/tr) :

L'avance en perçage est fonction du diamètre du foret [84] :

- foret hélicoïdal : (f) perçage = $0.01 \times \Phi$ foret.
- foret à plaquettes carbures : (f) perçage = $0.02 \times \Phi$ foret.
- le paramètre de performance qui en découle est vitesse d'avance (v_f) en mm/min.

D. Vitesse d'avance (Vf) en (mm/min) :

En ce qui concerne la productivité c'est la vitesse d'avance qui en est un des facteurs principaux car elle conditionne le temps de coupe :

$$v_f = f \times N \quad (\text{II.21})$$

E. Profondeur de perçage (p) en (mm) :

La profondeur de perçage c'est la longueur qu'on peut percer sans déburrage ou brise-copeaux, elle est choisie comme suit :

- Diamètre foret <14 mm : $P = \Phi$ foret.
- Diamètre foret >14 mm : $P = 0.5 \times \Phi$ foret.

F. Temps de coupe (t) en (min) :

$$t = \frac{L}{V_f} \quad (\text{II.22})$$

Ou L : profondeur du trou

Le calcul des nombres de tours pour toutes les combinaisons nous permet de faire le choix des fréquences de rotation disponibles sur la machine. Ces derniers sont repris pour

déterminer les vitesses de coupe réelles utilisées pour nos expériences et enfin on peut fixer les valeurs des éléments du régime de coupe comme suit :

Tableau II.5. Valeur des éléments du régime de coupe.

Valeur minimale	Valeur maximale
$V_c = 12,56 \text{ m/min}$ $f = 0,10 \text{ tr/min}$ $D = 10\text{mm}$	$V_c = 25,12 \text{ m/min}$ $f = 0,22 \text{ tr/min}$ $D = 20\text{mm}$
Valeur minimale codifiée (-1)	Valeur maximale codifiée (+1)

II.3.4. Préparation des éprouvettes :

Les ébauches sont obtenues à partir du lingot d'acier C35 produit par la sidérurgie algérienne SIDER ELHADJAR conformément à la norme AFNOR (figure II.a), chauffé dans un four à gaz jusqu'à 1300° pendant 3h (figure II.4b) et forgé sous forme d'une barre de section 120x120 mm (figure II.4c). Après un recuit d'homogénéisation, des éprouvettes ont été coupées (figure II.4d) et surfacées de longueur 60 à 80 mm.



a) Lingot d'acier C35 (XC38)



b) Four à gaz



c) Forgeage de lingot



d) Découpage des éprouvettes

Figure II.4. Illustration de la préparation des éprouvettes

Suite à la forge de la barre un traitement thermique de recuit est nécessaire afin d'éliminer les contraintes internes du au forgeage, à cette effet on a chauffé la barre jusqu'à A3+50, après le maintien et le refroidissement notre barre est prête à être découpée et usinée.

II.3.4.1. Traitement thermique des éprouvettes

➤ *Recuit des éprouvettes*

Ce traitement thermique souvent appliqué sur des pièces forgées ou trempées, pour faciliter leur usinage, éliminer les contraintes internes du au forgeage, éliminer l'écrouissage par déformation à froid (laminage, pliage...), éliminer les effets de ségrégations au cours du processus de solidification (produit coulé), éliminer les contraintes de soudage et de trempe, etc. Le recuit a pour but l'obtention d'états proches de l'équilibre thermodynamique.

On a choisi le "recuit d'homogénéisation ou de diffusion" qui est le mieux adapté pour notre type d'acier, car nos ébauches sont découpées d'une barre obtenue par forgeage à chaud, alors que ce procédé favorise une structure hétérogène au niveau des grains austénitiques. Cette hétérogénéité chimique qui se conserve plus ou moins lors des transformations ultérieures, est néfaste pour les propriétés mécaniques du métal.

Pour éliminer ou au moins réduire cette hétérogénéité on fait appel à un recuit d'homogénéisation. La température du traitement d'homogénéisation par diffusion est en général comprise entre 900 à 1000 °C. Le cycle thermique de traitement comprend :

- ✓ un chauffage jusqu'à 950°C, température dite de traitement.
- ✓ un maintien isotherme à la température de traitement pendant 30min.
- ✓ un refroidissement au four.

➤ *Trempe des éprouvettes*

Elle consiste à chauffer les ébauches à la température entre 850°C et 900°C dite d'austénisation en fonction du pourcentage de carbone que comprend notre acier qui est de 0,37%. Après 60 min de maintien dont la durée est en fonction de la massivité de la pièce, pour favoriser la diffusion des divers éléments d'alliage (en particulier le carbone), un refroidissement brutal obtenu par une trempe à l'eau à la température ambiante, toute en remuant pour éviter le phénomène de la caléfaction jusqu'à refroidissement complet, provoquant le cisaillement du réseau sursaturé en carbone et l'apparition d'une structure en aiguilles (la martensite).

Pour ce traitement un four électrique professionnel de marque **WOT 9703-423 404** (figure II.5), avec une porte à grande ouverture. Il peut atteindre une température d'utilisation de 1200 °C et possédant une homogénéité de température. Ce four est équipé

d'une isolation multicouches en briques réfractaires légères, une isolation arrière économique, une courbe de température précise grâce à une cadence rapide des battements du relai thermocouple de type S, une ouverture d'arrivée d'air réglable en continu au plafond pour une bonne ventilation, une cheminée d'évacuation dans la voûte lui permettant un temps de refroidissement et d'un programmateur situé sur le bord du four pouvant être prélevé de son support pour une utilisation aisée large. La température de 867°C a été mesurée par un thermomètre infrarouge model Cyclops 100B (figure.II.6).



Figure II.5. Illustration du traitement thermique (trempe)



Figure II.6. Thermomètres infrarouges

II.3.4.2. Revenu des éprouvettes après trempe

L'augmentation de la ténacité s'obtient malheureusement toujours plus ou moins au détriment de la dureté et de la limite d'élasticité. Les contraintes résiduelles se forment en raison des grandes différences de température entre le cœur et la surface de la pièce lors de la trempe. La dilatation thermique provoque des contraintes qui dépassent la limite d'écoulement plastique et parfois même la résistance à la rupture (fissures de trempe).

D'autres contraintes résiduelles qui varient fortement d'un grain à l'autre prennent naissance lors de la transformation martensitique.

Nous avons chauffé les pièces qui viennent d'être trempées dans un four électrique (figure II.7) à une température inférieure au point de transformation soit à 240°C et après 180min de temps de maintien à cette température, on a laissé refroidir à l'air.



Figure II.7. Illustration de l'opération de revenu au four électrique

II.3.5. Contrôle des éprouvettes après traitement thermique :

II.3.5.1. Contrôle de la dureté :

Des mesures de duretés du matériau ont été prélevées avant et après traitement thermique à l'aide d'un duromètre universel de marque Zwick/ Roell ZHU (figure II.8).



Figure II.8. Duromètre universel de marque Zwick/ Roell ZHU.

Le contrôle de la dureté des ébauches après traitement thermique a révélé une augmentation de la dureté de l'acier C35 de 1,9 % en comparaison avec celle d'origine. Le tableau (II.6) illustre cette différence :

Tableau II.6. Illustration de la dureté de l'acier C35 avant et après traitement thermique.

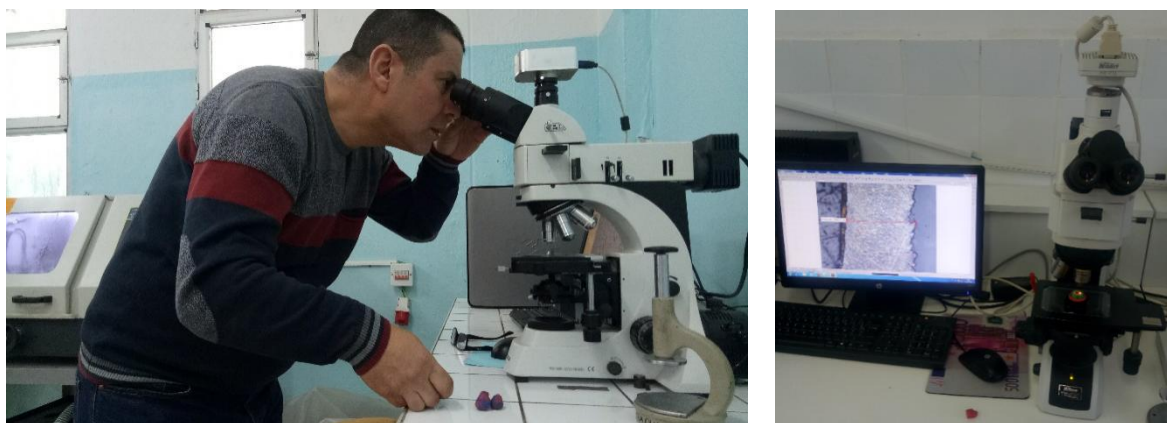
Type de traitement	Dureté (HB)	Dureté (HRB)	Dureté (HRC)
Avant traitement	230	98,5	20
Après recuit	210	95,5	16
Après trempe	462	/	47
Après revenu	367	/	38

L'étude comparative de l'usure des outils utilisés lors des essais de perçage de l'acier C35 avant et après trempe a révélé un comportement phénoménal peu rencontré en usinage, que nous essayons d'élucider en observation des copeaux au microscope ...

Cette thèse ne comportera que les résultats des essais et l'observation de la texture du copeau. La compression, le comportement dynamique par la technique des barres de hopkinson, feront l'objet d'un travail ultérieur.

II.3.5.2. Observation de la texture

L'observation de l'acier au microscope model Nikon Eclipse (figure II.9) a montré une importante transformation de sa texture après traitement thermique. En effet en comparant la microstructure d'origine avec celle après la trempe agrandis à la même échelle, on observe très clairement la transformation en perlite globulaire ce qui correspond avec la teneur du carbone de notre acier C35.

**Figure II.9.** Microscope model Nikon Eclips

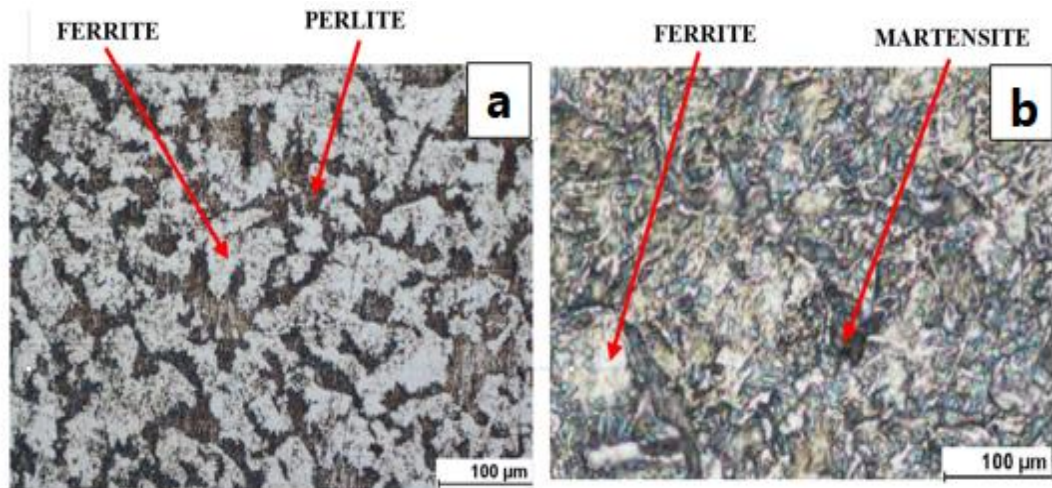


Figure II.10. *Texture du C35, a) Avant trempe, b) Après trempe*

L'objectif d'un traitement thermique est d'améliorer les caractéristiques des matériaux pour les rendre plus favorables à un emploi donné par :

- l'augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique.
- l'augmentation de la dureté pour permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs (résilience) ainsi donner une meilleure tenue de l'élément.
- la régénération d'un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi un forgeage.
- l'élimination des tensions internes (écrouissage) des matériaux ayant subi une déformation plastique froid (emboutissage, fluotournage).

Bien que notre matériau le C35 soit un acier à bas carbone, l'effet du traitement thermique lui a été bénéfique et on a pu atteindre les objectifs suscités. En effet les résultats du traitement thermique montrent clairement que sa dureté et sa résilience ont augmenté, voir (tableau II.6). L'amélioration de la structure cristalline (Figure II,10). Nous pouvons dire que nous avons atteint notre objectif et notre matière est prête pour étudier son comportement mécanique en d'autre terme son usinabilité par sa mise en œuvre en perçage.

II.3.6. choix des outils de coupe

Pour réaliser nos expériences nous avons utilisé des forets hélicoïdaux en acier rapide (HSS) de diamètre 10 et 20 mm (figure II.11), rectifié selon DIN 338 et 345 (selon le type de fixation), avec une forme de goujure type N. Foret standard pour une utilisation universelle, ce type de forets est le moins chère et le plus utilisé dans l'industrie. Il est fabriqué en acier fortement allié. Sa dureté, généralement élevée (> 60 HRC), est garantie jusqu'à une température de 600°C. Sa résistance à l'usure et sa grande ténacité à haute température lui confèrent une bonne qualité de coupe. Il assure des perçages propres et une

précision de concentricité élevée dans l'acier avec une résistance jusqu'à 1000 N/mm². Grâce à son affûtage en croix à 118° angle de pointe selon DIN 1412C, il peut être centré avec précision lors du perçage, permet une bonne évacuation de la chaleur et réduit en outre la force de poussée nécessaire. Doté d'une géométrie de sa partie active (figure II.15), lui confèrent une bonne performance de perçage, avec une bonne qualité de surface du trou et une durée de vie optimale. C'est un paramètre essentiel pour le calcul des efforts de coupe générés pendant le perçage.

Figure II.11. Modèles de forets utilisés pour les essais.



- foret hélicoïdal à queue conique de 20mm de diamètre : il a une longueur totale de 240mm. La partie active y compris la partie de guidage a une longueur de 100mm environ, avec un angle au sommet $2\chi_r = 120^\circ$.
- foret hélicoïdal à queue cylindrique de 10mm de diamètre : il a une longueur totale de 137mm et une longueur taillé de 88mm avec un angle au sommet $2\chi_r = 118^\circ$.

II.3.7. Réalisation des expériences

Les expériences ont été réalisées suivant les conditions de coupe illustrées dans le Tableau (II.7).

Tableau II.7. Régime de coupe lors du perçage de l'acier C35.

Conditions de coupe	
Vitesse de coupe (V_c)	12.56 ÷ 25.12 m/min
Avance (f)	0.10 ÷ 0.22 mm/tr
Diamètre (D)	10 ÷ 20 mm
Débit de lubrification ϕ	2.8 l/min

Les trous percés sont débouchant, leur profondeur entre 60 et 80mm, cependant l'usinage a été effectué avec une lubrification abondante à base de l'huile soluble d'un débit de 2.8L/min et un cycle de débouillage adopté.



Figure II.12. Illustration d'opérations de perçage pour les diamètres 20 et 10mm.

Nous avons débité une grande quantité de copeaux pour la réalisation des essais, durant un temps net de 729 minutes soit d'environ 13 heures pour l'usinage de l'acier avant trempe et 100 minutes soit d'environ 02 heures pour la cas de l'acier après trempe.



Figure II.13. Échantillons de copeaux suite à la réalisation des essais.

II.4. Critères de l'usure et méthode de mesure

II.4.1. Introduction

Le choix des meilleures conditions d'usinage vis-à-vis de l'usure, que ce soit avec des vitesses conventionnelles ou à grande vitesse, consiste à trouver les conditions de coupe en perçage, en établissant un compromis entre la vitesse de coupe et la durée de vie des outils. La durée d'utilisation de l'outil étant limitée par son degré d'usure, il en résulte que les temps d'usinage sont en rapport direct avec l'usure. Le coût de l'usinage, qui intéresse en définitive l'entreprise, est une conséquence de la tenue des outils à l'usure.

Les méthodes pour la recherche des conditions opératoires d'un couple outil-matière mettent en évidence la nécessité d'établir la capacité d'usinabilité avant tout autre mesure de ces caractéristiques. La qualité du travail d'un outil dans le processus d'usinage dépend de son degré d'usure. L'importance de cette usure a une influence directe sur :

- la qualité et la précision dimensionnelle de la surface obtenue.
- la tenue de l'outil dans le temps.
- la puissance nécessaire à la coupe.

II.4.2. Critères de l'usure

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

Les phénomènes physiques qui provoquent la dégradation progressive du tranchant et, corrélativement, des qualités géométriques et mécaniques de la surface usinée, se traduisent par des modifications d'aspect visibles à l'œil nu ou à l'aide d'un microscope. Le travail mécanique fourni pour créer un copeau est presque intégralement transformé en chaleur. L'élévation de la température qui en résulte est l'une des causes majeures de l'endommagement de l'outil. Les parties actives du foret, en contact avec la pièce ou le copeau s'usent suivant trois types d'usure (Figure II.15).

- l'usure de la dépouille, est caractérisée par un marquage le long des arêtes principales et centrales dans la direction de l'écoulement du métal. Elle est maximum au niveau du bec à cause de la vitesse de coupe élevée dans cette zone du foret. Le critère d'usure est la largeur de l'usure, nommée VB_{max} .

L'usure admissible a été choisie égale à 0,5mm au lieu de 0,3mm, ceci conformément à la norme ISO 3685: 1993 relative aux essais de durée de vie des

outils car la bande de l'usure sur la surface en dépouille dans notre cas est irrégulière.

- l'usure des listels, est parfois accompagnée par une entaille; cette usure est gênante car elle oblige à enlever lors de réaffûtage une partie importante de matière. Ce type d'usure est important lorsque le matériau usiné est abrasif, écrouissable ou bien si l'affûtage n'est pas symétrique.
- l'usure de la face de coupe, est constatée parfois sous forme d'une usure en cratère. Elle ne perturbe pas le fonctionnement du foret. Il est rare de le faire disparaître par affûtage.

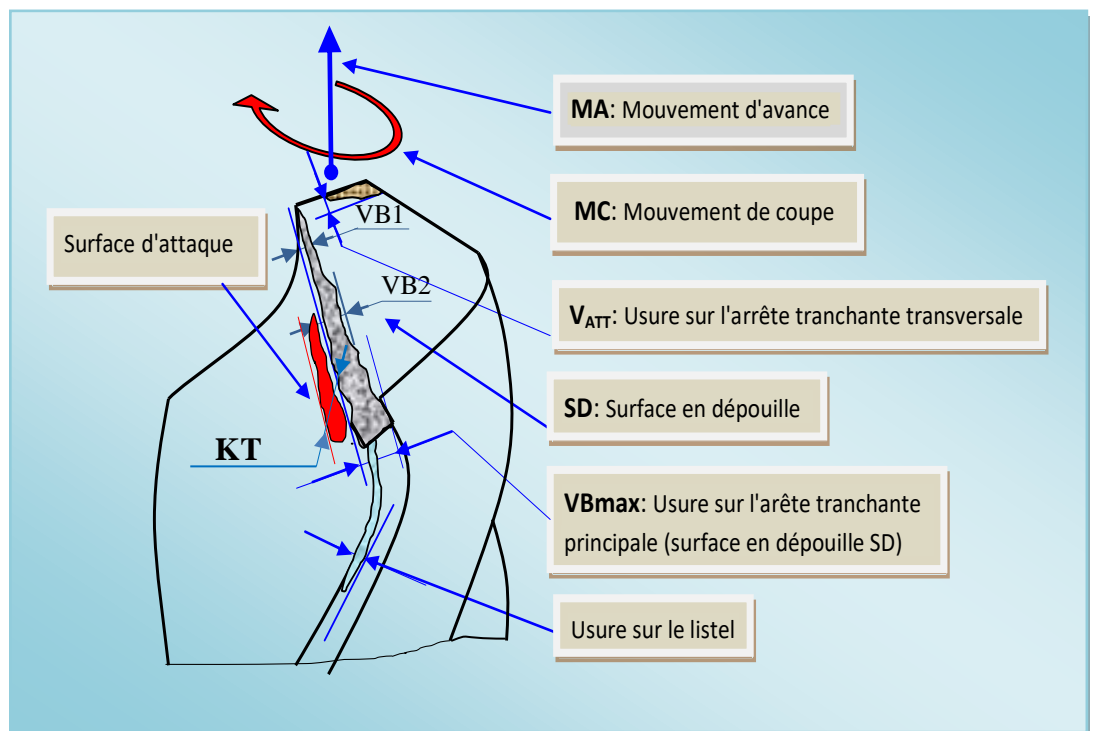


Figure II.14. Illustration des zones de mesure de l'usure sur la partie active du foret hélicoïdal [85]

II.4.3. Méthode de mesure de l' d'usure

Les mesures d'usure ont été réalisées sur un microscope d'atelier conçu initialement pour contrôler les paramètres de filetage (figure II.16).

Dans son état initial ce microscope ne pouvait pas être utile pour mesurer et contrôler l'évolution de l'usure. C'est pourquoi une conception d'un mécanisme fabriqué par Dr. Mokas directeur de cette thèse et le directeur du LRTAPM, cette conception a permis le bon positionnement des forets afin que les différents paramètres de la partie active soient mesurés avec précision. Il s'agit notamment de l'usure suivant les surfaces d'attaque, de dépouille, l'arête tranchante transversale (ou centrale) et le listel.

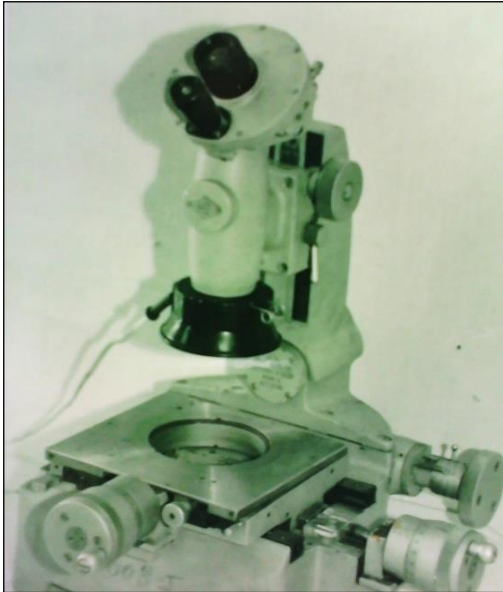


Figure II.15. Microscope d'atelier

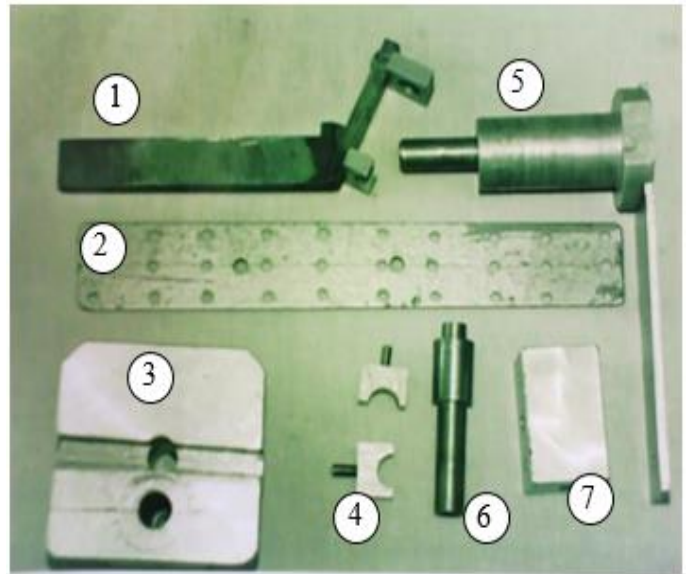


Figure II.16. Elements éclatés du dispositif de positionnement des forets.

Tableau II.8. Nomenclature du dispositif de positionnement.

N°	Pièce	Nombre	Nuance	Fonctionnement
1	Porte foret incliné	01	E24	Permet de positionner horizontalement l'arête tranchante principale des deux types de foret afin de mesurer l'usure sur la surface en dépouille.
2	support oculaire	01	AlMn	Sert à adapter la position du système viseur (oculaire du microscope optique), en fonction de la position du foret.
3	Socle	01	AlMn	Peut supporter et positionner les différents modèles de porte foret selon les différents diamètres.
4	brides	02	E24	Met en position horizontale le foret de diamètre 20 afin de visionner l'usure sur le listel.
5	Tourelle	01	E24	Permet de déplacer les forets dans un plan horizontal pour faciliter le visionnement des différents éléments de la partie active des forets.
6	Douille	01	E24	Peut être supportée par (1) à la place du foret de diamètre 20 pour positionner les forets de diamètres 10 afin de pouvoir lire l'usure sur la surface en dépouille.
7	Cube	01	AlMn	Supporte le foret de diamètre 10mm dans un plan, horizontal pour permettre la lecture de l'usure sur la surface d'attaque.

Après le montage des éléments du dispositif réalisé au sein de l'atelier du département du génie mécanique, les forets peuvent être placés et orientés convenablement suivant les différentes positions. Ceci facilite les mesures et le contrôle des différents paramètres de la partie active du foret. La figure (II.18) illustre le dispositif assemblé.



Figure II.17. Orientation et positionnement des forets sur le dispositif.

Le dispositif de mesure et de contrôle ainsi assemblé est adapté au microscope optique. L'ensemble peut donner finalement l'appareil de mesure des différents paramètres d'usure de la partie active de n'importe quelle foret.

CHAPITRE III
TRAITEMENT ET ANALYSE
DES RESULTATS

III.1. Introduction

Le présent travail est une continuité d'une étude récente du Dr. Mokas et al [4], l'objectif scientifique de l'étude d'apporter d'autres éléments de réponses quant à la compréhension de l'influence des paramètres de coupe tels que la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f) ainsi que le diamètre du foret (D). Ces paramètres susceptibles d'influencer sur la durée de vie des forets hélicoïdaux (HSS) qui a été choisie comme critère principale pour l'évaluation de l'usinabilité de l'acier C35 avant et après traitement thermique. L'objectif industriel de répondre à un besoin exprimé par les AMM compte tenu de la forte utilisation des forets pour percer des trous sur l'acier C35. Pour cela nous avons réalisé des essais de perçage sur l'acier C35 avant et après, avec des forets hélicoïdaux en acier rapide, suivant un plan d'expériences L8.

ce chapitre comporte un traitement graphique des résultats obtenus sur la tenue des forets qui nous a permis de mettre en évidence l'effet des différentes combinaisons du plan d'expériences sur la durée de vie des outils testés, suivi d'une analyse statistique à l'aide du logiciel **Statgraphics** afin de dégager des modèles mathématiques ainsi que d'établir l'analyse de la variance ANOVA, Cette analyse détermine le pourcentage de contribution des facteurs, des interactions et les termes carrés sur les paramètres étudiés.

III.2. Plan des expériences

Tableau III.1. Matrice de planification des expériences type 2^3 .

N° Essais	Valeurs codifiées des facteurs			Valeurs réelles des facteurs			Paramètre s de sortie
	V_c	f	D	V_c (m/min)	f (tr/min)	D (mm)	Y (min)
1	-1	-1	-1	12.56	0.10	10	Y1
2	+1	-1	-1	25.12	0.10	10	Y2
3	-1	+1	-1	12.56	0.22	10	Y3
4	+1	+1	-1	25.12	0.22	10	Y4
5	-1	-1	+1	12.56	0.10	20	Y5
6	+1	-1	+1	25.12	0.10	20	Y6
7	-1	+1	+1	12.56	0.22	20	Y7
8	+1	+1	+1	25.12	0.22	20	Y8

III.3. Résultats de l'usure sur la partie active des forets testés

III.3.1 Introduction

Dans l'usinage des métaux, on constate que la forme géométrique et l'état physique de l'outil sont modifiés par des sollicitations mécaniques et thermiques engendrées par les mouvements relatifs entre la pièce, l'outil et le copeau. Ces modifications qui augmentent progressivement au fur et à mesure que le temps d'usinage augmente, sont appelées usure, et qui apparaissent sur les différentes parties actives de l'outil, zone sur laquelle se fait le prélèvement de l'usure. Nous avons retenu comme critère de la mort du foret la valeur admissible de l'usure sur la surface en dépouille ($VB_{\max} = 0,5 \text{ mm}$), les zones les plus sollicitées par ordre décroissant sont les surfaces en dépouille, les surfaces d'attaque, et les listels.

III.3.2. Usure de l'arête tranchante principale (VB)

Elle constitue la zone la plus sollicitée par la coupe parce qu'elle se trouve directement confrontée à la matière à enlever poussée par la force de l'avance. Elle incarne le critère de la mort du foret (VB_{\max}), ce dernier est prélevé sur l'arête tranchante principale (ATP) qui représente la cuité du foret, engendrée par l'intersection de la surface d'attaque et la surface en dépouille, comme cette dernière se trouve confrontée directement avec la matière à enlever et subit des efforts de pression importants provoqués par l'avance, l'usure sur cette arête est la plus importante. C'est pour cela qu'on l'a choisie comme zone principale de mesure de l'usure. Cette dernière a été prise suivant trois points :

- ✓ VB1 : mesure prise au voisinage de l'arête tranchante transversale ou centrale.
- ✓ VB2 : mesure prise au milieu de l'ATP.
- ✓ VB3 ou VB_{\max} : mesure prise au voisinage de la périphérie du foret.

L'usure VB_{\max} représente la zone où la vitesse de coupe et le couple sont au maximum. Par conséquent l'usure est importante et c'est elle qui constitue finalement le critère de la mort du foret. L'usure a été relevée de façon évolutif en fonction du temps d'usinage à des intervalles réguliers dès le début des tests jusqu'à la mort du foret. Cette évolution est illustrée par la figure (III.1b). La figure (III.1a) illustre comment placer le foret sur le dispositif de positionnement pour mesurer

l'usure sur la surface en dépouille. L'observation à travers l'oculaire du microscope est montrée à la figure (III.1c).

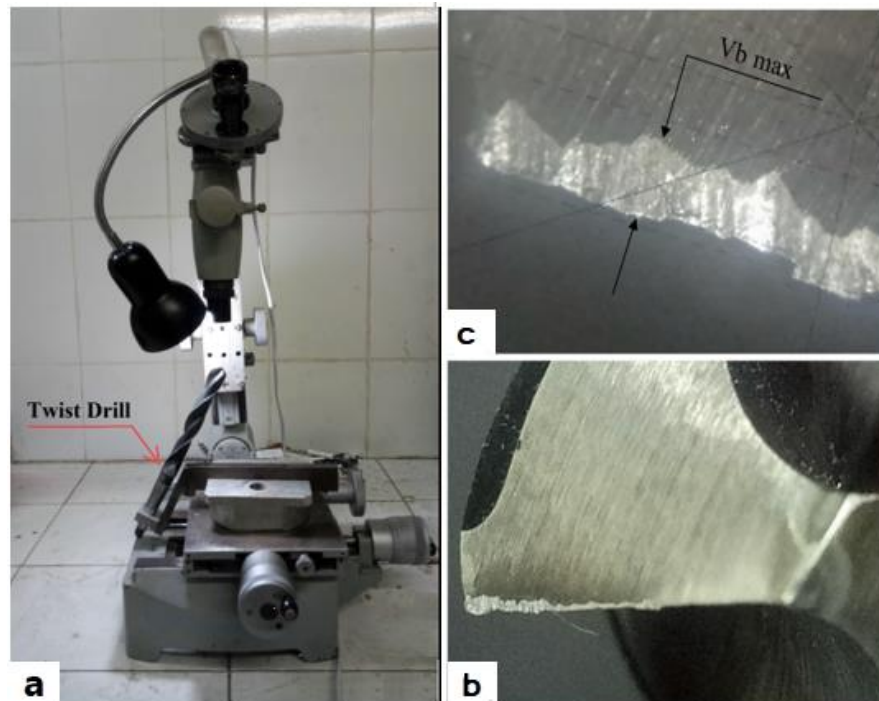


Figure III.1. Usure de l'arrêt tranchante principale a) microscope d'atelier, b) usure du foret hélicoïdale, c) observation à travers l'oculaire du microscope

III.3.2.1. Traitement graphique des résultats de l'usure de l'arête tranchante principale

La figure (III.2a) illustre l'évolution de l'usure en dépouille de l'outil pour différentes conditions de coupe dictée par la planification des expériences lors du perçage du matériau à l'état non trempé.

Les courbes d'usure pour ce test (figure III.2a) se caractérisent par la tendance conventionnelle de l'évolution de l'usure. En effet, la première phase est une usure initiale (rodage) suivie par une usure régulière (maturation) et enfin une usure accélérée catastrophique (figure III.2a).

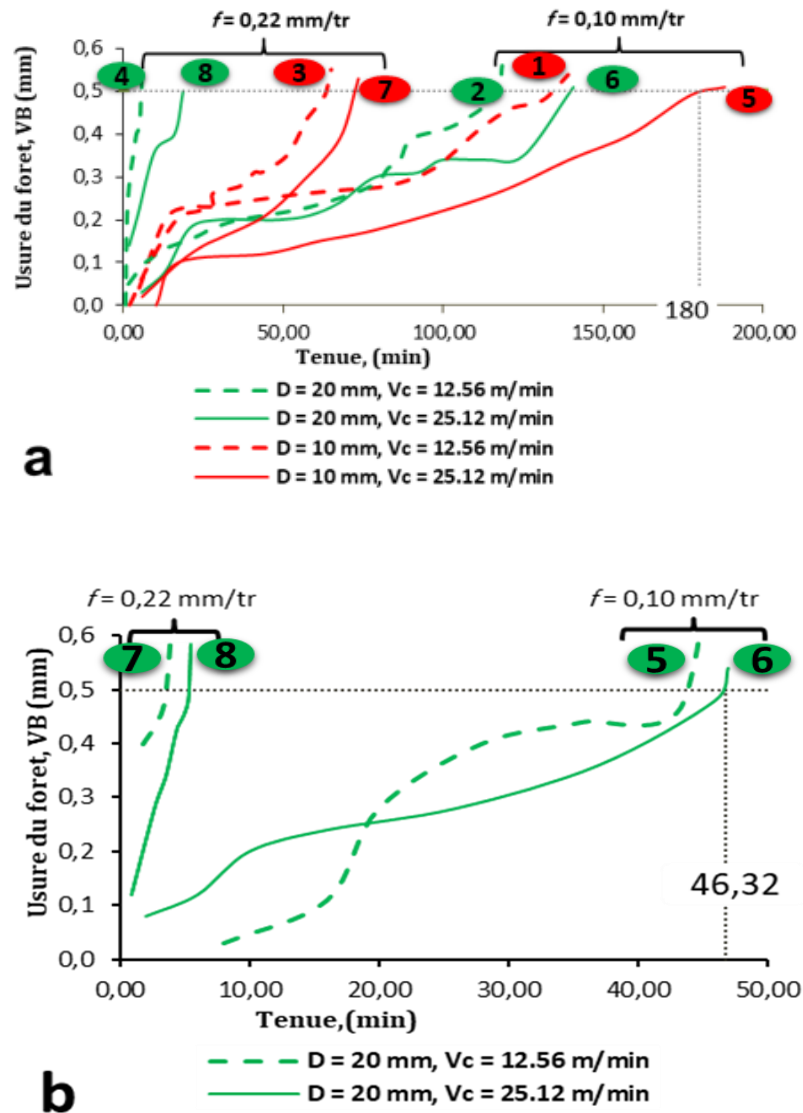


Figure III.2. Évolution de l'usure en dépouille en fonction du temps d'usinage.
 a) pour les différentes combinaisons du plan d'expériences, avant trempe.
 b) pour les combinaisons du $\varnothing 20 \text{ mm}$ du plan d'expériences, après trempe.

Dans le cas où l'acier a subi une trempe, la figure (III.2b) montre uniquement les résultats d'usure du foret de diamètre 20 mm relative aux régimes (5 à 8). Pour les régimes (1 à 4) correspondant aux forets de diamètre 10 mm, les résultats obtenus sont insuffisants pour une représentation sous forme de courbe et ceci est dû à une dégradation rapide du tranchant accompagnée d'un sifflement.

Ce que nous avons soutiré de nos résultats de recherche, c'est que le principe général du phénomène de l'usure des outils de coupe est étroitement lié au régime de coupe dont l'élément prépondérant est la vitesse de coupe.

Tableau III.2. Résultats de la tenue des forets testés pour les cas du perçage du C35.

N° Essais	Régime de coupe			Usure en dépouille VB_{max} mm	Durée de vie des fores	
	V_c m/min	f mm/tr	D mm		Après recuit T (min)	Après trempe T (min)
1	12.56	0.10	10	0.5	134	0.103
2	25.12	0.10	10	0.5	117	0.512
3	12.56	0.22	10	0.5	63.25	0.031
4	25.12	0.22	10	0.5	5.25	0.198
5	12.56	0.10	20	0.5	180	44
6	25.12	0.10	20	0.5	139.75	46.32
7	12.56	0.22	20	0.5	71.4	3.60
8	25.12	0.22	20	0.5	18.61	5.34

Le Tableau des résultats des expériences avant et après trempe contient les valeurs de la tenue (T) pour les différentes combinaisons.

Pour les tests avant trempe la meilleure tenue de vie du foret est 180 min relative au régime 5 et Pour les tests après trempe la meilleure tenue de vie du foret est 46.32 min relative au régime 6.

III.3.3. Usure sur l'arête tranchante transversale

L'arête tranchante transversale ou arête centrale est obtenue par l'intersection des deux surfaces en dépouille formant le cône du bec de l'outil. Elle est très importante pour un foret en perçage, car elle prépare un avant trou pour faciliter l'engagement et la pénétration du foret dans la matière. Son usure augmente l'effort de pénétration du foret, mais ne constitue pas le critère de la mort du foret. La figure (III.3) illustre le placement des forets de diamètre 20mm sur le dispositif de positionnement pour la mesure de l'usure sur l'arête tranchante transversale et aussi sa lecture à travers l'oculaire du microscope.

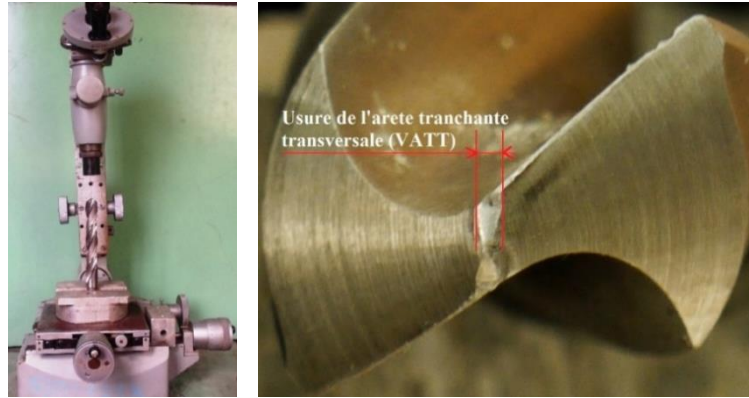


Figure III.3. Technique de lecture et mesure de l'usure sur l'arête centrale (V_{ATT}) [4].

III.3.3.1. Traitement graphique des résultats de l'usure de l'arête transversale

La figure (III.4) illustre l'évolution de l'usure de l'arête transversale de l'outil en fonction du temps d'usinage, (a) pour les différentes combinaisons du plan d'expériences avant trempe et (b) pour les combinaisons du $\varnothing 20\text{mm}$ du plan d'expériences après trempe

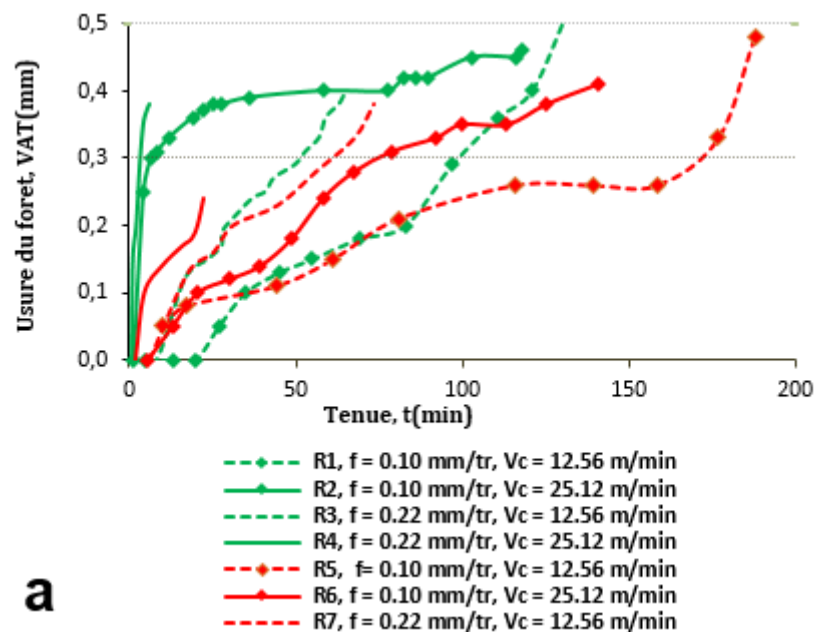


Figure III.4. Évolution de l'usure de l'arête transversale en fonction du temps d'usinage. a) pour les différentes combinaisons du plan d'expériences, avant trempe.

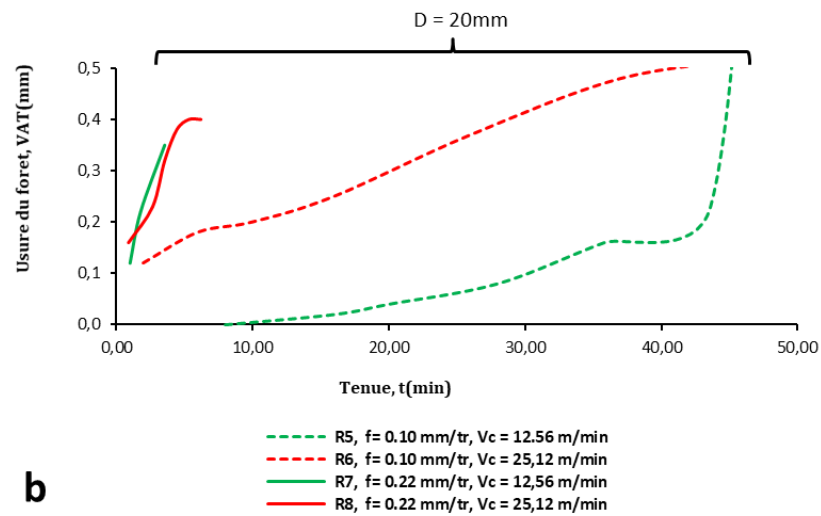


Figure III.4. Évolution de l'usure de l'arête transversale en fonction du temps d'usinage. b) pour les combinaisons du Ø20mm du plan d'expériences, après trempe.

Les essais avant trempe (figure 4a) les courbes d'usure se caractérisent par la tendance conventionnelle de l'évolution de l'usure.

Pour les essais après trempé, l'arête transversale a été affectée suite à la dégradation rapide du foret de diamètre 10 mm.

Tableau III.3 : Usure sur l'arête centrale (V_{ATT}) pour les cas du perçage du C35.

N° Essais	Régime de coupe			VB_{max} mm	Traitements thermique C35			
	V_c m/min	f mm/rev	D mm		Après recuit		Après trempe	
					T (min)	V_{ATT} (mm)	T (min)	V_{ATT} (mm)
1	12.56	0.10	10	0.5	134	0.53	0.103	-
2	25.12	0.10	10	0.5	117	0.46	0.512	-
3	12.56	0.22	10	0.5	63.25	0.39	0.031	-
4	25.12	0.22	10	0.5	5.25	0.36	0.198	-
5	12.56	0.10	20	0.5	180	0.48	44	0.23
6	25.12	0.10	20	0.5	139.75	0.40	46.32	0.52
7	12.56	0.22	20	0.5	71.4	0.37	3.60	0.22
8	25.12	0.22	20	0.5	18.61	0.18	5.34	5.32

Avant trempe le tableau des résultats des expériences contient les valeurs d'usure sur l'arête transversale pour les différentes combinaisons qui correspondent

à l'usure admissible $VB=0.5\text{mm}$. la meilleure et la faible usure mesurée pour ce teste est $0,18\text{mm}$ relative au régime 8.

Pour les essais après trempe le tableau contient uniquement les valeurs d'usure relatives aux forets du diamètre 20. La meilleure et la faible usure mesurée pour ce teste est $0,22\text{mm}$ relative au régime 7.

III.3.4. Usure en cratère sur la surface d'attaque (KT)

La surface d'attaque est en forme d'hélice pour permettre l'évacuation du copeau vers l'extérieur du trou percé. C'est la surface sur laquelle glisse le copeau enlevé provoquant une usure en cratère (KT). Dans le cas du perçage cette dernière est insignifiante par rapport à l'usure sur la surface en dépouille (VB_{max}). La figure (III.5) illustre le placement des forets de diamètre 20mm sur le dispositif de positionnement pour mesurer l'usure en cratère sur la surface d'attaque et aussi sa lecture à travers l'oculaire du microscope.

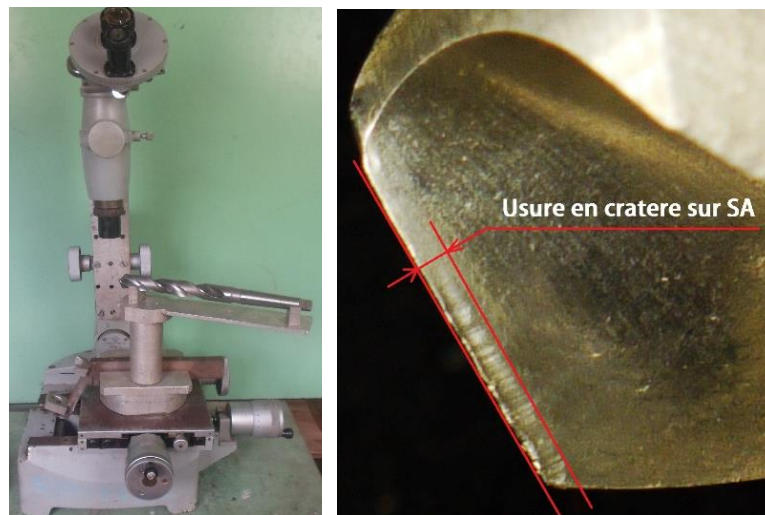


Figure III.5. *Technique d'observation de l'usure sur la surface d'attaque [4].*

III.3.5. Usure sur le listel ou arête tranchante latérale (L)

Le listel est caractérisé par sa surface lisse qui lui permet de résister à l'usure. C'est la partie qui calibre le diamètre du trou percé.

La figure (III.6) montre la position des forets sur le support de contrôle pour pouvoir observer l'usure à travers l'oculaire.

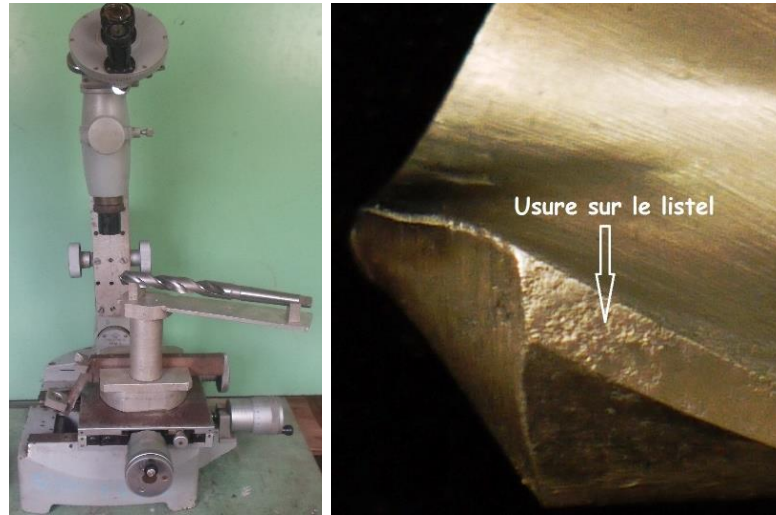


Figure III.6. Technique d'observation de l'usure sur le listel [4].

Tableau III.4. Usure en cratère (KT) et sur le listel (L) pour les cas du perçage du C35.

N°	Régime de coupe			VB_{max} mm	Traitements thermique C35					
	V_c m/min	f mm/tr	D mm		Après recuit			Après trempe		
					T (min)	KT (mm)	L (mm)	T (min)	KT (mm)	L (mm)
1	12.56	0.10	10	0.5	134	0.29	0.33	0.103	-	-
2	25.12	0.10	10	0.5	117	0	0.51	0.512	-	-
3	12.56	0.22	10	0.5	63.25	0.11	0.35	0.031	-	-
4	25.12	0.22	10	0.5	5.25	0.18	0.48	0.198	-	-
5	12.56	0.10	20	0.5	180	0.27	0.52	44	0.56	0.48
6	25.12	0.10	20	0.5	139.75	0.35	0.31	46.32	0.39	0.53
7	12.56	0.22	20	0.5	71.4	0.36	0.24	3.60	0.43	0.45
8	25.12	0.22	20	0.5	18.61	0.13	0.29	5.34	0.21	0.41

L'usure en cratère et sur le listel ont été suivie et observée pendant les expériences. Étant donné que le dommage causé sur ces dernières s'est avéré insignifiante comparativement avec l'usure en dépouille (VB_{max}), ils ne feront pas l'objet d'une étude statistique car leur prédiction est inutile.

À titre d'exemple, l'usure en cratère la plus élevée est 0.36mm ou a été enregistrée au régime 7 avant trempe, l'usure la plus élevée après trempe est 0.56mm ou a été enregistrée au régime 5 tandis que celle sur le listel est 0,52 avant trempe et 0.53mm après trempe.

III.4. Analyse comparative des résultats de l'usure sur les parties actives du foret

La représentation graphique des résultats expérimentaux met en évidence l'effet des différents éléments du régime de coupe du plan d'expériences sur la durée de vie des outils testés.

La comparaison des tenues selon les figures (III.2a et 2b) pour les régimes ayant trois facteurs qui changent permet de distinguer l'influence de ces derniers sur la tenue du foret.

Nous rappelons que la tenue des forets est liée directement à l'usure sur la surface en dépouille (VB_{\max}) dont la valeur admissible retenue est de 0,5mm, tandis que l'usure de l'arête centrale est secondaire.

III.4.1. Analyse comparative des résultats de l'usure avant trempe

Il ressort du traitement graphique des résultats de l'usure avant trempe d'après les figures (III.2a et III.4a) et de la lecture des tableaux (III.2 et III.3) ce qui suit :

A. Influence de la vitesse de coupe (V_c)

L'usure sur la surface en dépouille (VB_{\max}), s'accroît avec l'augmentation de la vitesse de coupe, ce qui confirme les principes généraux de l'usure des outils, contrairement à l'usure sur l'arête tranchante transversale (VATT) qui diminue, d'après la comparaison entre les différents régimes (tableau III.3).

B. Influence de l'avance (f)

L'analyse des résultats de l'usure en dépouille (VB_{\max}) s'accroît avec l'augmentation de l'avance. Cela est clair quand on compare le régime (1 avec 3), le régime (2 avec 4), le régime (5 avec 7) et le régime (6 avec 8) ce qui confirme les principes généraux de l'usure des outils, par contre l'usure sur l'arête centrale (VATT) diminuée avec l'augmentation de l'avance (tableau III.3).

C. Influence du diamètre du foret (D)

Les valeurs des tenues obtenues pour le grand diamètre de 20 mm sont nettement bien meilleures que celles obtenues pour les forets de 10 mm de diamètre (tableau III.2).

L'augmentation du diamètre (D), diminue l'usure sur les arêtes centrale et augmente la tenue des forets, contrairement à d'autres procédés d'usinage où l'usure s'accroît et la tenue des outils diminue avec l'augmentation de la profondeur de passe. Ce phénomène a également été observé dans l'étude de Mokas et all [4]. Cet état de fait est dû probablement à la dispersion des contraintes, des efforts de coupe et de la chaleur dans la zone de coupe, du fait que les surfaces de contact sont plus importantes. Pour les gros diamètres, la disponibilité d'espace pour assurer une bonne lubrification et une bonne évacuation du copeau.

III.4.2. Analyse comparative des résultats de l'usure sur les parties actives après trempe

Il est a noté que la figure (III.4b) montre uniquement les résultats d'usure du foret de diamètre 20 mm relative aux régimes (5 à 8).

En effet lors de l'usinage en dur on observe dès le début une fragmentation sur les arêtes de coupe actives des forets de diamètre 20 mm (figure III.7a) et une dégradation rapide (usure prématurée) sur les forets de diamètre 10 mm (figure III.7b). La dureté de la matière et probablement les efforts de coupe appliqués à la surface de contact sont les causes directes de ce phénomène (paragraphe I.12 Influence du traitement thermique sur l'usinabilité des aciers).

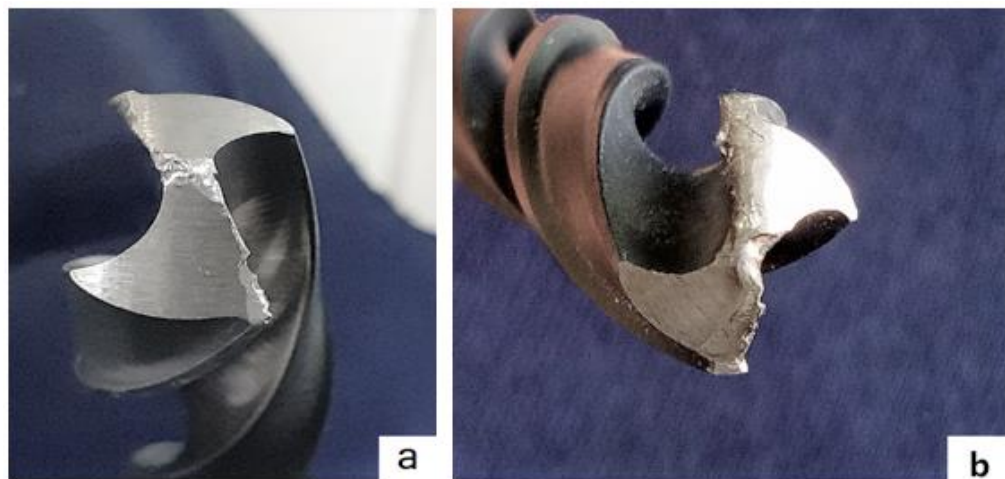


Figure III.7. L'effet de la dureté sur l'usure, a) Fragmentation du foret $\varnothing 20$, b) Usure prématurée du foret $\varnothing 10$

Il ressort du traitement graphique des résultats de l'usure après trempe d'après les figures (III.2b et III.4b) et de la lecture des tableaux (III.2 et III.3) ce qui suit :

A. Influence de la vitesse de coupe (V_c)

En comparant les valeurs de l'usure pour la vitesse de coupe maximum et la vitesse minimum, on a constaté l'effet controversé de la vitesse de coupe lors du perçage de l'acier C35 à l'état trempé (tableau III.3), la durée de vie de l'outil augmente avec la croissance de la vitesse de coupe est cela pour les différents régimes de coupes (5 à 8) (tableau III.3). Ce qui contredit les principes généraux de l'usure des outils.

Ce phénomène est déjà rencontré dans l'étude récente de Mokas et al [4], nous allons comparer entre les deux études dans le but de donner des explications solvables en investiguant toutes les pistes qui pourront dévoiler ce secret dans ce qui suit. L'usure sur l'arête centrale s'accroît avec l'augmentation de la vitesse de coupe (tableau III.3).

B. Influence de l'avance (f)

L'analyse des résultats de la tenue fait ressortir que l'usure en dépouille s'accroît avec l'augmentation de l'avance. Cela est clair quand on compare le régime (1 avec 3), le régime (2 avec 4), le régime (5 avec 7) et le régime (6 avec 8), contrairement à l'usure sur l'arête tranchante transversale qui diminue, d'après la comparaison le régime (5) avec le régime (7) et s'accroît lorsque on compare le régime (6) avec le régime (8) (tableau III.3).

C. Influence du diamètre du foret (D)

Cas similaire à celui de l'usinage à l'état doux, les valeurs de la tenue obtenues avec les forets de diamètre 20mm sont nettement meilleures que celles obtenues avec les forets de diamètre 10mm malgré la chute importante de la tenue (T) lors du perçage dans l'acier dur.

III.4.3. Discussions des résultats de l'usure en dépouille

Dans tous les aspects phénoménologiques de l'usure qui affecte les forets en 3 zones (surface en dépouille, surface d'attaque et listels), l'usure en dépouille est la plus dangereuse qui gouverne la durée de vie du foret.

Pour mieux lire et analyser les résultats de ce travail, nous devons comparer la tenue des outils selon deux plans, plan horizontal qui représente l'effet de régime de coupe et plan vertical qui évoque la dureté de la matière.

III.4.3.1. Discussions selon le plan horizontal

La meilleure performance obtenue à l'état recuit est la tenue $T = 180$ min qui correspond au régime 5 relative avec le foret de diamètre 20 mm, faible vitesse de coupe $V_c = 12.56$ m/min et la faible avance $f = 0.10$ mm/tr.

- à l'état doux l'avance (f) est le premier facteur influant sur la tenue. Cela devient clair quand on compare le régime (1 avec 3), le régime (2 avec 4), le régime (5 avec 7) et le régime (6 avec 8).
- avec l'augmentation de la vitesse de coupe on assiste à une usure plus importante de l'outil et par conséquent une diminution de la tenue, le cas du perçage de l'acier à l'état doux.
- à l'état doux les valeurs de la tenue obtenues lors du perçage avec les forets du grand diamètre (20 mm) sont nettement meilleures que celles obtenues pour les forets de diamètre 10 mm.
- au régime (6), avant trempe et au premier essai l'usure admissible est atteinte à la minute 223, ce qui nous a fait croire que la durée de vie de l'outil est considérablement amélioré. Mais après vérification et suite aux instructions du directeur de la thèse l'essai a été refait ce qui nous a montré que les paramètres du régime 6 provoque une perte de la matière au niveau de l'arrêt principale figure (III.8).

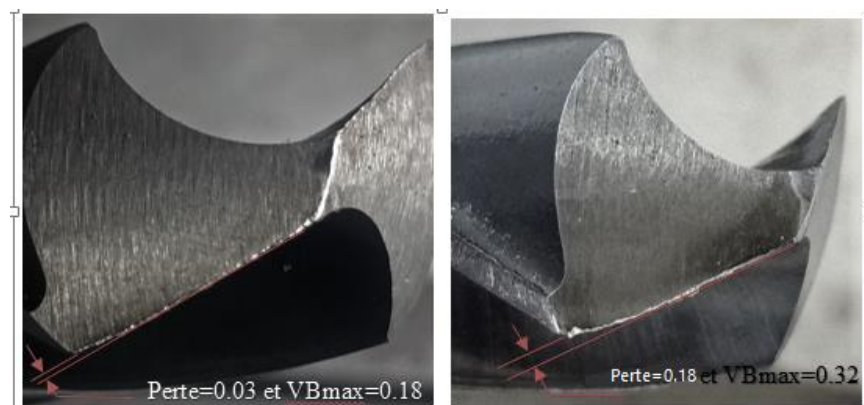


Figure III.8. Phénomène de la perte de la matière,
a) Perte après 58 min, b) Perte après 140 min.

- aux régimes des faibles vitesses on a constaté la présence de l'arête rapportée ce phénomène est provoqué par le soudage sous pression du copeau sur l'arête de coupe. Il est courant avec les matières collantes telles que les aciers à bas carbone (notre cas), les aciers inoxydables et l'aluminium (figure III.9).

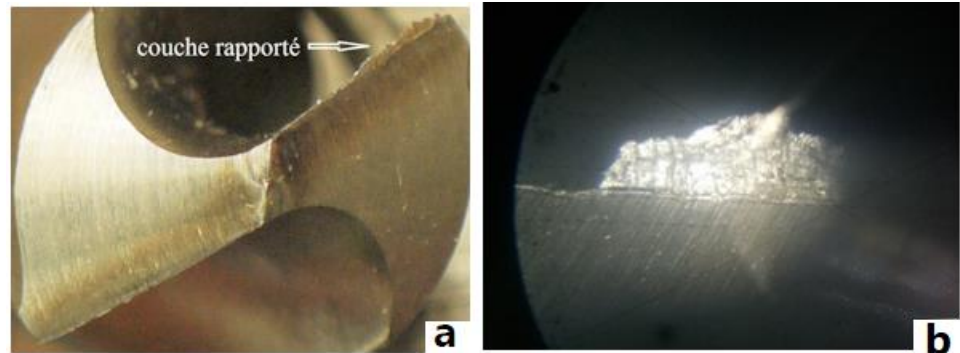


Figure III.9. Phénomène de l'arête rapportée, a) à l'échelle macroscopique [4], b) à l'échelle microscopique.

III.4.3.2. Discussions selon le plan vertical

- la meilleure performance obtenue à l'état trempé est la tenue $T = 46.32$ min qui correspond aux forets de diamètre 20 mm, faible vitesse de coupe $V_c = 25,12$ m/min et faible avance $f = 0.10$ mm/tr; (régime 5),
- la durée de vie de l'outil a chuté de 180min (avant trempe) à 46.32min (après trempe).
- malgré la chute importante des valeurs de la tenue après la trempe, l'avance (f) est le deuxième facteur influant sur la tenue. Cela devient clair quand on compare le régime (1 avec 3), le régime (2 avec 4), le régime (5 avec 7) et le régime (6 avec 8).
- les valeurs de la tenue de l'outil obtenues lors du perçage avec les forets du grand diamètre (20 mm) après trempe sont toujours meilleures que celles obtenues pour les forets de diamètre 10 mm malgré la chute importante de la dureté (T) entre le perçage dans l'acier C35 trempé par rapport au perçage dans l'acier non tempé.
- l'augmentation de l'usure avec l'augmentation de la vitesse de coupe n'a pas été conservé après le traitement thermiquement (trempe) du l'acier C35, ou il a été relevé qu'avec l'augmentation de la vitesse de coupe la durée de vie

du foret s'accroît. Autrement dit l'usure diminue, ceci est cohérent avec l'étude [4].

L'expression du sens physique de ce phénomène inhabituelle du comportement à l'usure des forets HSS en fonction du traitement thermique de l'acier, nous a poussé à faire des investigations complémentaires au niveau de la microstructure de l'acier C35 et du copeau cisailé relative au régime (6). Cette dernière a révélé ce qui suit :

- à l'état recuit (figure III.10a), l'acier présente une structure typique des aciers hypoeutectoides composé principalement de ferrite et de perlite. Lors du cycle thermique de la trempe, une partie de l'austénite résultant du chauffage du matériau à la température de 867°C se transforme à la suite du refroidissement en martensite (figure III.10b) alors qu'il reste de la structure ferritique résiduelle non transformée.

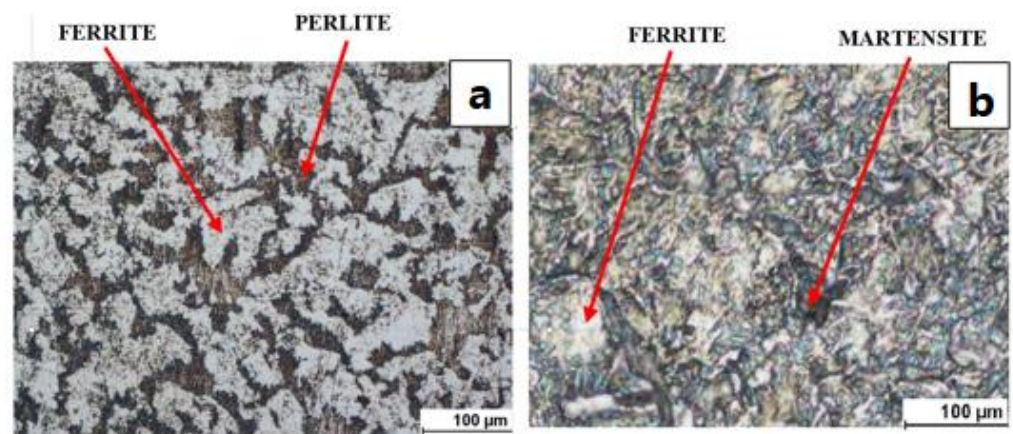


Figure III.10. Microstructure de l'acier C35. a) État recuit, b) État trempé

La martensite étant une solution solide d'insertion du carbone dans le fer est caractérisée par une dureté élevée ce qui aura comme conséquence à fragiliser le matériau en plus des tensions internes que ce dernier a subi.

- lors du perçage de l'acier C35 à l'état durci, On constate que la morphologie et l'analyse structurale du copeau cisailé (figure III.11) du régime (6) est proche de la structure du métal avant trempe (figure III.10a). En effet on observe une reformation de la ferrite ainsi que des cristaux de perlite qui réapparaissent, ce phénomène ne peut avoir lieu qu'à la température proche de la température de recristallisation.

Cette convergence dans la structure est probablement due à l'atténuation de l'effet de la trempe. On peut dire que le matériau a subi un revenu ce qui a causé le ramollissement du métal et facilité son usinage.



Figure III.11. Morphologie du copeau lors du perçage au régime N°6 après trempe $V_c=25,12$, $f=0,10$ et $D=20$

- l'effet de la dureté montre aussi qu'avec les grands diamètres des forets, les faibles vitesses et faibles avances (régime 5), le rapport de la tenue avant et après trempe est de l'ordre de 4 fois. Par contre aux faibles vitesses et grandes avances de coupe (régime 7), le rapport atteint la valeur de 19 fois. Ce que l'avance accélère l'usure 19 fois lors de l'usinage de l'acier C35 durci avec les grands diamètres.
- pour les grands diamètres et les grandes vitesses de coupe le rapport des tenues est Le même (3) ce qui signifié que l'avance n'a pas d'influence, ce phénomène est observé pour les régimes 6 et 8
- en usinage dur on constate que l'effet de l'avance est plus prononcé qu'aux vitesses de coupe (régime 5 avec 7) et (régime avec 8).

Tableau III.5. Comparatif des rapports de la tenue du foret.

Régime	V_c (m/min)	f (mm/tr)	D (mm)	Tenue (min)		Rapport tenues T_1 / T_2
				T_1 avant trempe	T_2 après trempe	
5	12.56	0,10	20	180	44	4
6	25.12	0,10	20	139.75	46.32	3
7	12.56	0,20	20	71.4	3.6	19
8	25.12	0,20	20	18.61	5.34	3

III.4.4. Conclusion

L'augmentation de la vitesse de coupe provoque une forte augmentation de la température qui a pour conséquence le changement de la microstructure (un revenu) et une amélioration du phénomène de glissement du copeau à l'interface.

L'usinage après la trempe provoque des efforts et résistance à la rupture de la matière sont plutôt élevées par rapport à l'état recuit.

L'usinage après la trempe provoque des efforts et résistance à la rupture de la matière sont plutôt élevées par rapport à l'état recuit (paragraphe I.12 Influence du traitement thermique sur l'usinabilité des aciers) et ce phénomène devient plus évident avec les grande avance $f = 0,20$ mm/tr les régimes (3, 4,7 et 8) (tableau III.3).

Dans le cas des grandes vitesse l'épaisseur du copeau a une forte influence sur le phénomène de recristallisation, plus le copeau est faible d'épaisseur plus la recristallisation est importante et donc on tend encore plus vers la structure d'origine de l'acier non trempé notamment en terme de taille du grain.

Lors du perçage de l'acier C35 à l'état trempé, l'observation des microstructures du copeau a montré que la température du traitement thermique (revenu) a été atteinte par inadvertance lors du perçage avec les grandes vitesses de coupe (tableau III.3 les régimes 2, 4, 6 et 8).

Cette augmentation de la température a également des conséquences sur le comportement thermomécanique du matériau ou l'adoucissement thermique rentre fortement ou de manière significative avec les phénomènes de durcissement (augmentation des contraintes d'écoulement) suite à l'augmentation de vitesses de déformation (plus grande vitesse de coupe).

Il est à remarquer également que l'influence de l'avance sur la tenue des forets avant tempe et plus importante que celle de la vitesse de coup et du diamètre.

L'usure sur le listel est insignifiante à cause des surfaces lisses de ce dernier ne permettant pas un frottement important qui peut être source de dégagement intense de chaleur, influant sur l'accroissement de l'usure.

Par fois l'usure n'est pas toujours croissante, cela est dû au phénomène de l'arête rapportée qui protège les arêtes tranchantes contre l'usure au cours de l'usinage, par contre ce phénomène à des conséquences négatives sur l'état de

surface des trous réalisés. En outre, au cours de la disparition de l'arête rapportée et suite à sa forte adhésion avec la surface d'attaque, ce phénomène peut engendrer des émiettements de la matière, qui d'une part dégradent la partie active de l'outil, et d'autre part, empêche l'usure d'évoluer équitablement sur les deux arêtes tranchantes du foret et l'apparition de l'arête rapportée sur la surface d'attaque pour certains régimes.

III.5. Traitement statistique et analyse des résultats de la tenue (T) par la méthode de l'ANOVA

L'analyse des résultats par la méthode des moindres carrés qui a été entreprise pour le cas précédent nécessite un calcul manuel très long ou l'élaboration d'un programme de calcul approprié, alors que l'utilisation de la méthode d'analyse de variance (ANOVA) [86] permet d'avoir des résultats de façon plus rapide avec une corrélation (R^2) plus élevée et en incluant facilement l'interaction des éléments du régime de coupe que nous estimons d'un bon intérêt pour aboutir à des résultats plus précis.

L'analyse de variance ou analyse factorielle (ANOVA) est une technique permettant de savoir si une ou plusieurs variables dépendantes ou variables à expliquer qui est dans notre cas la tenue des forets (T) illustrées par le tableau (II.2), et en relation avec une ou plusieurs variables dites indépendantes ou variables explicatives qui sont dans notre cas les éléments du régime de coupe (V_c , f , D). Pour cela nous avons opté pour le reste de notre recherche l'utilisation de la méthode (ANOVA) en utilisant le logiciel d'analyse "Statgraphics".

III.5.1. Traitement des résultats de la tenue des forets avant trempe

Le résultat des valeurs expérimentales de la durée de vie (T) des forets pour les différentes combinaisons des paramètres du perçage avant trempe sont illustrés par le tableau (III.2).

Le résumé de l'analyse statistique plus approfondie de l'ANOVA en se servant par le programme du logiciel "Statgraphics" est donné sous forme de tableau (tableau III.6) et du diagramme de Pareto (figure III.12).

Il nous a permis de renseigner sur les facteurs et les interactions les plus significatifs, avec un régime optimale $V_c=12.56$ m/min, $f=0.10$ mm/tr, $D=20$ mm, $T=180$ min (tableau III.2).

Tableau III.6. Analyse de la variance pour (T) avant la trempe de l'acier C35.

<i>Source</i>	<i>Sum of squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean square</i>
A: V_c	1217,66	1	1217,66
B:F mm/tr	12138,5	1	12138,5
C:D mm	880,902	1	880,902
AB	420,25	1	420,25
AC	6,78602	1	6,78602
BC	358,156	1	358,156
Total error	0,0	0	
Total (corr.)	23871,4	6	

Le coefficient de corrélation $R^2 = 100\%$ signifient que les réponses sont très bien expliquées par les modèles proposés.

L'analyse statistique plus approfondie en se servant de l'ANOVA nous a permis de détecté le modèle suivant la durée de vie (T) en fonction des effets principaux et de leurs interactions :

$$T = 103,46 + 0,951964 * V_c + 67,5 * f + 7,23317 * D - 27,2028 * V_c * f + 0,0414809 * V_c * D - 31,5417 * f * D \quad (\text{III.1})$$

Le diagramme de Pareto (figure III.12) montre clairement que l'augmentation de l'avance provoque la régression de la tenue des forets suivie par la vitesse de coupe, tandis que le diamètre est le troisième facteur influant.

Quant au rôle des interactions, on remarque sur la figure (III.12) que la combinaison "vitesse de coupe - avance" et a la combinaison "avance - diamètre" ayant une influence, mais qui reste relativement insignifiante. Le coefficient de détermination $R^2 = 100\%$.

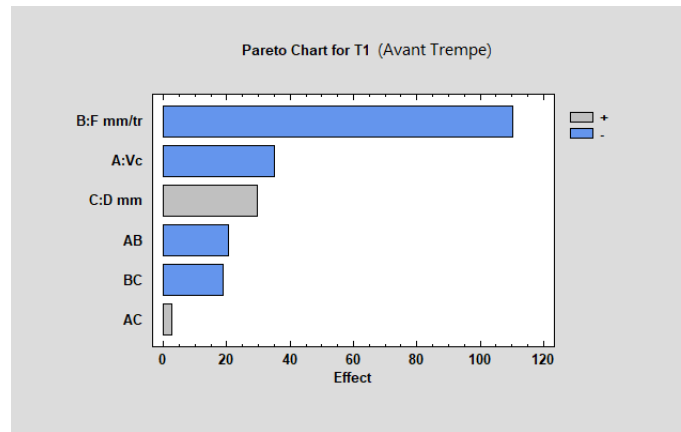


Figure III.12. Diagramme de Pareto avant trempe

III.5.2. Traitement des résultats de la tenue des forets après trempe

Le résultat des valeurs expérimentales de la durée de vie (T) des forets pour les différentes combinaisons des paramètres du perçage après trempe sont illustrés par le tableau (III.2).

Le résumé de l'analyse statistique plus approfondie de l'ANOVA en se servant par le programme du logiciel "Statgraphics" est donné sous forme du tableau (tableau III.7) et du diagramme de Pareto (figure III.13).

Tableau III.7 : Analyse de la variance pour (T) après la Trempe de l'acier C35

Source	Sum of squares	Df	Mean square	F-Ratio	P-Value
A:Vc	2,68656	1	2,68656	188,13	0,0463
B:F mm/tr	835,71	1	835,71	58521,05	0,0026
C:D mm	1210,71	1	1210,71	84780,90	0,0022
AB	0,0844605	1	0,0844605	5,91	0,2484
AC	1,51728	1	1,51728	106,25	0,0616
BC	820,004	1	820,004	57421,20	0,0027
Total error	0,0142805	1	0,0142805		
Total (corr.)	2870,73	7			

Le coefficient de corrélation $R^2 = 99,99\%$ signifie que les réponses sont très bien expliquées par les modèles proposés.

L'analyse statistique (ANOVA) plus approfondie a permis la détection du modèle linéaire générale suivant de la durée de vie (T) en fonction des effets principaux et de leurs interactions :

$$T = -76,7727 - 0,0721338*Vc + 341,004*f + 7,5987*D - 0,272691*Vc*f + 0,0138694*Vc*D - 33,7475*f*D \quad (III.2)$$

Selon la colonne de (P-value) du tableau (III.7) et le diagramme de Pareto (Figure III.13) on constate que le diamètre (D) suivie par l'avance et l'interaction diamètre avance ont une influence significative sur la tenue T suivie par la vitesse de coupe.

Le diagramme de Pareto (figure III.13) confirme de façon très claire l'effet bénéfique avec l'augmentation du diamètre du foret contrairement au petit diamètre l'usure ne s'est pas manifestée suivie par l'avance. Quant au rôle de la vitesse de coupe qu'appart l'effet controversé n'a pas d'influence sur la durée de vie des forets. L'interaction diamètre avance et très influant. Par contre les interactions vitesse de coupe diamètre et vitesse de coupe avance n'ont pas d'influence sur l'usure.

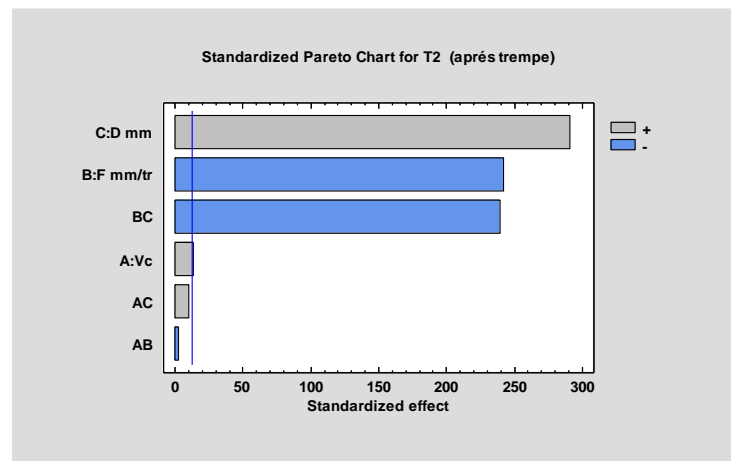


Figure III.13. Diagramme de Pareto après trempe.

III.6. Conclusion générale et perspectives

III.6.1. Conclusion

Le présent travail est une continuité d'une étude récente du Dr. Mokas et al afin de confirmer l'hypothèse de cette étude ou d'apporter d'autres éléments de réponses quant à la compréhension de l'influence des paramètres de coupe sur la durée de vie des forets hélicoïdaux (HSS) d'une part et de répondre à un besoin industriel exprimé par les AMM compte tenu de sa forte utilisation des forets HSS sur l'acier C35 d'autre part.

L'étude expérimentale menée sur l'acier C35 et la modélisation statistique de l'usinabilité en perçage de l'acier C35 trempés et non trempés a permis de

caractériser son usinabilité, et pour évaluer l'influence des paramètres de coupe nous avons pris comme critère de base la tenue des forets définie par l'usure de l'ATP.

Quoi que l'étude du phénomène de l'usure des outils de coupe soit pavée d'une grande complexité par l'intervention de plusieurs phénomènes qui en régissent, il demeure d'un énorme intérêt par les résultats intéressants qu'il porte à la technologie de la coupe des métaux. Cette étude nous a permis d'enrichir nos connaissances et contribuer par ce modeste travail à donner un plus dans ce domaine.

Après une recherche bibliographique, nous sommes arrivés à définir et à décrire les méthodes ainsi que les critères permettant d'évaluer et de caractériser le phénomène de l'usure des outils de coupe en particulier celui des forets hélicoïdaux auquel nous nous sommes intéressés.

Deux méthodes d'évaluation du phénomène de l'usure des outils de coupe ont été mises au point par les chercheurs :

- méthodes accélérées basées sur le principe d'un gain décisif en temps et en matière, et qui sont appréciées lors de la réception des matériaux.
- méthodes de longue durée ou classiques qui permettent d'aboutir à des résultats onéreux et d'une bonne précision, bien qu'elles exigent un temps important et une grande consommation de matière pour aboutir aux résultats intéressants.

Les paramètres se répartissent en plusieurs types, l'avance et le plus influent facteur sur la tenue des forets suivie par la vitesse de coupe et le diamètre lors de perçage de l'acier C35 a l'état doux, par contre lors du perçage de l'acier C35 à l'état trempé la profondeur de passe représentée par le diamètre du foret est le premier facteur influent sur la tenue des forets suivie par l'avance et l'interaction avance diamètre.

Dans une recherche méthodique, nous avons passé en revue les bases théoriques de la méthode de planification des expériences que nous avons optimisée par la méthode des moindres carrées pour analyser les résultats obtenus. Nous avons introduit dans ce contexte l'action des paramètres de coupe sur l'usure des forets hélicoïdaux, ainsi que celle de leurs interactions que nous estimons d'un bon intérêt pour aboutir à des résultats plus précis.

Nous sommes enfin arrivés à un système qui lie l'action simultanée des éléments du régime de coupe (V_c , f , et D), au critère de l'usure des forets hélicoïdaux.

Toutes ces considérations ont trouvé l'application pour caractériser l'influence des paramètres du régime de coupe sur la tenue des forets hélicoïdaux qui peuvent d'autant plus participer à l'évaluation de l'usinabilité de l'acier mis en œuvre.

Les modèles statiques des critères d'évaluation de l'usinabilité obtenus sont indispensables d'une part pour l'établissement des abaques qui seront exploités directement par les bureaux de méthode des entreprises de fabrication mécanique et d'autre part, ils sont réutilisés pour une éventuelle étude d'optimisation du processus de coupe. Les modèles auxquels nous avons abouti et qui ont fait l'objet de notre étude sont jugés adéquats par l'appréciation du coefficient de détermination.

Cette modeste recherche à laquelle nous avons contribué est jugée d'un immense intérêt tant sur le plan économique que sur le plan technologique, car les modèles obtenus peuvent être utilisés pour les calculs du prix de revient de l'opération de perçage de l'acier considéré. Nous pouvons affirmer que ces résultats demeurent exploitables pour évaluer les caractéristiques d'usinabilité de l'acier que nous avons mis en œuvre, et permettent aussi de gérer d'une manière juste les facteurs du régime de coupe afin d'atteindre la productivité optimale.

Au stade actuel de notre recherche, particulièrement sur le perçage de l'acier C35 nous pouvons conclure les points suivants :

a- l'évolution de l'usure en fonction du temps suit une allure typiquement analogue à celle observée en tournage. Le foret s'use en service suivant la surface en dépouille, la surface d'attaque, l'arête tranchante transversale, ainsi que le listel.

b- l'usure déterminante est celle qui se produit sur la surface en dépouille. La bande de l'usure a une forme irrégulière. En effet elle est plus accentuée au voisinage du listel, puisque la vitesse de coupe sur le périphérique est plus grande qu'au centre du foret.

c- à l'état non traité, une augmentation de la vitesse de coupe et de l'avance contribue à accentuer l'usure, alors qu'elle diminue avec l'augmentation du diamètre. À l'état trempé, l'augmentation du diamètre et un phénomène

contradictoire s'est manifesté. En effet, nous avons constaté que l'augmentation du diamètre et la vitesse de coupe améliorent la tenue des forets : Les outils ont tendance à mieux résister à l'usure suite au phénomène de détrempe relevé par l'observation microscopique de la texture du copeau provoqué par la hausse de la température dans la zone de coupe.

d- l'usure sur l'arête tranchante transversale qui est un élément essentiel pour la pénétration du foret, se manifeste de façon plus importante lors du perçage de l'acier après trempe. Le phénomène est uniquement influencé aux valeurs élevées de la vitesse de coupe et l'avance.

e- l'influence des éléments du régime de coupe sur l'usure du listel et de la surface d'attaque s'est montrée insignifiante.

f- les tenues des forets pour les différents régimes sont assez importantes, que l'on peut se permettre de conclure que l'acier usiné est doté d'une bonne usinabilité.

g- les modèles trouvés sont d'une très bonne corrélation avec les résultats expérimentaux et peuvent être utiles en production.

Étant donné que l'usinabilité est une propriété complexe des matériaux et qu'elle est peu étudiée en perçage, nous avons levé un peu de mystères qui l'entourent. Notre travail pourra contribuer à initier d'autres éventuelles recherches.

III.6.2. Perspectives

Comme perspectives à ce travail, nous envisageons de développer les aspects suivants :

- étendre la gamme des vitesses de coupe en vue de mieux expliquer l'effet.
- mener un complément d'étude dynamique sur le C35 trempé pour mieux comprendre son comportement mécanique qui a causé le phénomène observé lors des tests d'usinage effectués dans ce travail.
- intégrer la microstructure dans les modèles de prédictions.
- déterminer l'usinabilité d'autres nuances de matériaux, en intégrant d'autres critères complémentaires tels que les efforts de coupe.
- étudier le comportement de nouveaux matériaux à outil de coupe carbure métallique, revêtu et non revêtu, céramique et CBN ...

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **CETIM**. *Tournage dur et usinage à grande vitesse*, Centre technique des industries mécaniques (CETIM), 2000. Rapport, 86p.
- [2] **P. DARNIS, O. CAHUC ET Y. COUÉTARD**. *Energy balance with mechanical actions measurement during turning process*. International seminar on improving machine tool performance, la Baule, 3-5 Juillet (2000).
- [3] **EZUGWU, EO**. *Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45,12-13,1353-1367,2005,Elsevier.
- [4] **NACER MOKAS, LAKHDAR BOULANOUAR**. *Étude et modélisation statistique de l'usinabilité des matériaux trempés et non trempés en perçage*. Thèse de doctora. Annaba Algerie, 2016.
- [5] **TONSHOFF, HK. SPINTIG, W. KONIG, W. NEISES.AN**, *Machining of holes developments in drilling technology*, CIRP annals,43,2,551-561,1994,Elsevier.
- [6] **G. BITTES** : *Contribution à la connaissance des mécanismes fondamentaux liés à l'usinabilité des aciers de construction*. Thèse PhD. Université de Toulon, 1993.
- [7] **H.K. TONSHOFF, W. KASTNER, R. SCHNADT**: *Usinabilité des aciers forgés en coupe interrompue*, *Journal of Matériel. Processing Technology*, Décembre 1989 pp 219-236.
- [8] **B. GRUBER** : *Outillage et mesure*. Dunod spes pp 51 - 63 1981.
- [9] **A. SEBHI** : *Étude tribologique des outils de coupe et aciers*. Thèse de doctorat. Université Ferhat Abbès – Sétif ALGERIE. (2013).
- [10] **F. ZEMZEMI** : *Caractérisation de modèles de frottement aux interfaces pièce-outil-copeau en usinage : application au cas de l'usinage des aciers et de l'inconel 718*. Thèse de doctorat. N° d'ordre : 2007-33.
- [11] **T. B. BOUCHNAK** : *Étude du comportement en sollicitations extrêmes et de l'usinabilité d'un nouvel alliage de titane aéronautique : le ti555-3*. Mechanics of materials. Arts et Métiers Paris Tech, 2010. French. NNT: 2010ENAM0051. Pastel-00560093.
- [12] **UA KHASHABA, IA EI-SONBATY, AI SELMY, AA MEGAHED**. *Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: Part II- Effect of drill wear*, Composites: Part A 41(2010) 1130-1137.
- [13] **G. POULACHON, A. MOISAN, I.S. JAWAHIR** : *comportement, propriété et usinabilité des aciers durcis*. Laboratoire bourguignon des matériaux et des procédés. ENSAM 2002. machining. Research laboratory.414. CRMS, university of Kentucky Lexington. KY.40506-0108.USA.
- [14] **A. KARAALIDJAAL** : *contribution à la modélisation coupe-paramètres d'usinage à l'aide de la méthode de traitement de donné par groupe*. Thèse de doctorat. Tlemcen Algérie, 2013.

- [15] **G. COHEN** : *Étude des effets thermiques et mécaniques en usinage à sec. Application à la qualité de la pièce en tournage*. slideplayer.fr/slide/3024517. Université de Toulouse 2009.
- [16] **M. T. KAGNAYA** : *contribution à l'identification des mécanismes d'usure d'un wc-6%co en usinage et par une approche tribologique et thermique*. Thèse de doctorat. ED n°.432 : SMI (Sciences des Métiers de l'Ingénieur). Paris 2009.
- [17] **MAYSSA GUEDICHE**. *Modélisation et Simulation de l'Usure des Outils de Coupe au cours du processus d'enlèvement de matière* : Approche expérimentale et numérique (MOSUOC). Autre. Université de Lyon, 2017. Français. NNT : 2017LYSEE006. tel-02493414
- [18] **F. TAYLOR**, *On the art of cutting metals*, Transactions of ASME 1907, 28:70–350, 1907
- [19] **O. TEBBI, F. GUERIN, B. DUNON** : *Estimation de la fiabilité des composants mécaniques par les essais accélérés*. LASQUO : Laboratoire en sureté de fonctionnement, qualité et organisation institut des sciences et techniques de l'ingénieur d'Angers France. Article. 2005.
- [20] **M. Z. ZAHAF, M. BENGHERSALLAH, A. AMIRAT**, *Contribution in developing a rapid strategy in assessing hardened steel machining*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2020) 111:525–535. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06122-y>
- [21] **M. ROUDGÉ**. *Modélisation expérimentale par les réseaux de neurones du perçage multi-matériaux*. Thèse de doctorat, Bordeaux 2011.
- [22] **H. TAKEYAMA ET R. MURATA**, *Basic Investigation of Tool Wear*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 85, p.33-37, 1963
- [23] **E. USUI, T. SHIRAKASHI ET T. KITAGAWA**, *Analytical prediction of cutting Tool wear*, Wear, vol. 100, p. 129-151, 1984
- [24] **J. F. ARCHARD**, *Contact and Rubbing of Flat Surfaces*, Journal of Applied Physics, vol. 24 (8), p. 981- 988, 1953
- [25] **Y. YEN, J. SÖHNER, B. LILLY ET T. ALTAN**, *Estimation of tool wear in orthogonal cutting using the finite element analysis*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 146, p. 82-91, 2004
- [26] **M.C. SHAW**, *Metal Cutting Principles*, Oxford Science Publications, p. 651, 2005
- [27] **H.O. GEKONDE, S.V. SUBRAMANIAN**, *Tribology of tool–chip interface and tool wear mechanisms*, Surface and Coatings Technology Vol. 149 (2002), pp 151-160.
- [28] **C.J.E. ANDREWES, H.-Y. FENG, W.M. LAU**. *Machining of an aluminum/SiC composite using diamond inserts*, Journal of Materials Processing Technology Vol. 102 (2000), pp 25-29.
- [29] **S.P.F.C. JASPERS, J.H. DAUTZENBERG**. *Material Behaviour in Metal Cutting: Strains, Strain Rates and Temperatures in Chip Formation*, Journal of Materials Processing Technology Vol. 121 (2002), pp 123-135.

- [30] **F. LEROY.** *Usinage et usinabilité, techniques de l'ingénieur*, MC2, M 725, (1984), pp 3-7.
- [31] **E. USUI, A. HIROTA, M. MASUKO.** *Analytical prediction of three dimensional cutting process. Part 3. Cutting temperature and crater wear of carbide tool*, Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry Vol. 100 (1978), pp 222-228
- [32] **S. LO CASTO, E. LO VALVO, E. LUCCHINI, S. MASCHIO, M. PIACENTINI, V.F. RUISI.** *Ceramic materials wear mechanisms when cutting nickel-based alloys*, Wear Vol. 225-229 (1999), pp 227-233.
- [33] **A. MOLINARI, M. NOUARI.** *Modeling of tool wear by diffusion in metal cutting*, Wear Vol. 252 (2002), pp 135-149.
- [34] **G. POULACHON.** *Aspects phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage CBN des aciers durcis. Application : usinabilité de l'acier 100Cr6.* Thèse de Mécanique et Matériaux (1999). ENSAM, N° d'ordre 1999-14.
- [35] **SULTAN, AZ. SHARIF, SAFIAN. KURNIAWAN, DENNI.** *Chip formation when drilling AISI 316L stainless steel using carbide twist drill*, Procedia Manufacturing, 2, 224-229, 2015, Elsevier
- [36] **DAVID A. STEPHENSON***, **ETHAN HUGHEYA**, **AND ALEEM A. HASHAMB**, *Air flow and chip removal in minimum quantity lubrication drilling*, Procedia Manufacturing 34 (2019) 335-342, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>
- [37] **ANDREAS BAUMANN A, EKREM OEZKAYA B, DIRK SCHNABEL A, DIRK BIERMANN B, PETER EBERHARD A,***, *Cutting-fluid flow with chip evacuation during deep-hole drilling with*, European Journal of Mechanics / B Fluids 89 (2021) 473–484, Elsevier.
- [38] **M.A. DAVIES, T.J. BURNS, C.J. EVANS.** *On the dynamics of chip formation in machining hard metals.* Annals of the CIRP (1997). Vol. 46/1/1997, pp25-30.
- [39] **R. KOMANDURI, T. SCHROEDER, B.F. VON TURKOVICH, J. HAZRA, D.G. Flom** *On the catastrophic shear instability in high-speed machining of AISI 4340 steel.* Trans. ASME. Journal of Engineering for Industry (1982). Vol. 104, pp 121-131.
- [40] **G. POULACHON.** *Usinabilité des matériaux difficiles. Application aux aciers durcis.* Techniques de l'ingénieur (2004), BM 7048, pp 1-18.
- [41] **B. CHANGEUX.** *Loi de comportement pour l'usinage. Localisation de la déformation et aspects microstructuraux.* Thèse de Mécanique et Matériaux (2001). ENSAM, N° d'ordre : 2001-12.
- [42] **A. VYAS, M.C.** *Shaw Mechanics of saw-tooth chip formation in metal cutting.* Journal of Manufacturing Science and Engineering (1999), vol. 121, pp 163-172.
- [43]. **R. HARI NATH REDDY A, MATHEW ALPHONSE A,***, **V.K. BUPESH RAJA B, K. PALANIKUMAR C, D.R. SAI KRISHNA SANJAY D, K.V. MADHU SUDHAN A**, *Evaluating the wear studies and tool characteristics of coated and uncoated HSS drill bit – A review*, Materials Today: Proceedings 46 (2021) 3779–3785, Elsevier.

- [44] **TOMAS, P. SMITH, R AND OTHERS.** *The wear failure of titanium nitride coated drills*, Third International Conference on Manufacturing Engineering, 1986 Technology for Manufacturing Growth; Preprints of Papers, The 49,1986, Institution of Engineers, Australia.
- [45] **NITIN P. SHERJE A,* , SAMEER A. AGRAWAL B, ASHISH M. UMBARKAR C,**
- [46] **OKAY S, KAPLAN Y, MOTORCU AR, NALBANT M.** *Evaluation of Cutting Tool Wear Characteristics and Removed Chip Volumes in Drilling of AISI D2 and AISI D3 Cold Work Tool Steels*, AISI D3,2013, 7th International Advanced Technologies Symposium (IATS'13), 30 October-1 November 2013, Istanbul, Turkey.
- [47] **P. BECKERS, J.F. DEBONGNE, B. DELTOUR, L. MASSET.** *Modèles de forces de coupe*. Université de Liège. Rapport LMF/R4 1995.
- [48] **M. SELAIMIA :** *Étude des efforts de coupe et de la rugosité lors de l'usinage du PE80*. Guelma Algérie – 2008.
- [49] **SANDVIK COROMANT :** coromant.france@sandvik.com. F-45100 ORLEANS.
- [50]. **A.A. CZAPLICKI :** *L'usinabilité et la coupe des métaux*. Revue de la société royale belge des ingénieurs et industries n°12 pp 708 - 736. 1962.
- [51] **S. BELHADI :** *étude de l'usinage des aciers traités lors du tournage avec des matériaux de coupe de haute technologie : étude expérimentale de la formation du copeau*. Thèse de doctorat 2009.
- [52] **M.A. YALLESE, L. BOULANOUAR, S. BELHADI, N. OUELAA :** *influence des conditions d'usinage sur les efforts de coupe lors du tournage du 100cr6 (60hrc) avec le cbn* *Sciences & Technologie B – N°25*, Juin 2007.
- [53] **LES EFFORTS DE COUPE :** *Préparation De Production En Productique Mécanique Étude De Fabrication Et Analyse D'usinage (3PM-EFAU)* https://analyse-fabrication.univ-lille.fr/co/ch4_5_3.html
- [54] **M. MONTOYA** "Optimisation du perçage d'empilages CFRP/Titane et/ou Aluminium» thèse de Doctorat. École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers 2013.
- [55] <http://www.accreteil.fr/lycees/94/ebnanlycreteil/cours/techno/html /rugosite00.htm>
- [56] **L.B :** *Usinabilité des aciers spéciaux*. Mat. et tech. Pp 235 - 242. 1974.
- [57] **R BONHOMME, GH GODIN :** *La qualité de surface des pièces usinées, influence des conditions d'usinage et influence du matériau usinée*. Revue matériaux et technique. 66. N°3.1978.
- [58] **J.F. DEBOGNIE.** *Complément de fabrication mécanique et FAO*. (LMECA 2453). Edition 2013.
- [59] **R. KAMGUEM :** *Inspection automatique et sans contact de la rugosité des surfaces usinées*. Thèse de doctorat, Montréal 2013.
- [60]. *Forets À Brise-Copeaux MTS* <http://www.somta.co.za/index.php/produits-dapplication/1650>.

- [61] **ST. ENACHE.** *La qualité des surfaces usinées.* Édition DUNOD 1972, 340 pp.
- [62] **S. NIKETH, G.L. SAMUEL,** *Surface texturing for tribology enhancement and its application on drill tool for the sustainable machining of titanium alloy,* 2017, Journal of Cleaner Production doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.178
- [63] **EZUGWU, EO.** *Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys,* International Journal of Machine Tools and Manufacture,45,12-13,1353-1367,2005,Elsevier.
- [64] **PRASSAN SHAH A, NAVNEET KHANNA A,B,*, ANIL KUMAR SINGLA C, ANUJ BANSAL C,** *Tool wear, hole quality, power consumption and chip morphology analysis for drilling Ti-6Al-4V using LN2 and LCO2,* Tribology International,163 (2021) 107190
- [65] **S.Y. MAURICE :** *la coupe et les émulsions, machines-outils.* N°309 pp.83-95, 1974.
- [66] **MAMESTA. HEAT. ET SURFACE TREATMENT.** *Durcissement /Trempe Rend l'acier plus dur et résistant à l'usure.*
<http://www.hst.nl/upload/file/Downloads/Leaflet%20Harden-Veredelen%20FR.pdf>.
- [67] Diagramme de transformations en refroidissement continu : <https://fr.wikipedia.org/wiki/>
- [68] **O. DANYLOVA, C. ESNOUF :** *Étude des relations microstructures / propriétés mécaniques des aciers bas carbone micro alliés, en fonction des paramètres du traitement thermique et thermomécanique.* 195p ref 78 ref. Thèse doctorat / France 2000.
- [69] **Y. BRUN :** *La Durée économique de coupe.* Machine-outil.nod.778 pp 6-9.1974.
- [70] **MOODLE2.INSALYON.FR/PLUGINFILE.PHP/55466/** Optimisation de l'usinage - Moodle - INSA Lyon. 2016.
- [71] www.industrie-mag.com/article8677.html. 2016
- [72] **M. JRAD :** *Modélisation du perçage à grande vitesse : Approches analytique, numérique et expérimentale.* Université de Metz Génie Mécanique des matériaux. Thèse de doctorat. Metz 2007.
- [73] **M. ROMAGNOL :** *Autre méthode d'essai d'aptitude à la coupe des outils en carbure métalliques essai à vitesse constante de moyenne durée.* 322 pp 33 - 38.1976.
- [74] **N. GUIBERT :** *Étude et modélisation de l'influence des phénomènes de coupe sur les performances du forage vibratoire.* Thèse de doctorat Grenoble 2008.
- [75] **LUKYANOV, AD. ONOYKO, TS. NAJAFABADI, TA. OPTIMIZATION OF PROCESSING** conditions when drilling deep holes: Twist drills, Procedia Engineering, 206,427-431,2017,Elsevier
- [76] **B. PEROVIC:** *Fertigungstenique.* Springer, Berlin 1990 ISBN 3-540- 51870-3
- [77] **A. PEREGUINIAK :** *Perfectionnement des procédés d'usinage par l'outil axial des matériaux difficile à usiner.* Département français des sciences techniques.
<http://masters.donntu.org/2006/mech/pereguiniak/diss/indexf.htm>

- [78] **NOTECH.FRANCESERV.COM** : *Lubrification en fonction du matériau percé.*
- [79] **TEJAS NA, RAHUL M. CADAMBIA***, *Effect of Point Angle in Twist Drill Bit on Delamination in CFRP*, Materials Today: Proceedings 21 (2020) 1278–1282, Science Direct, Elsevier.
- [80] **M Khechana** : *Détermination de l'usinabilité des aciers.* Thèse de Magistère ANNABA 1992.
- [81] **L. BOULANOUAR**: *Modélisation statistique pour la détermination de l'usinabilité des aciers difficilement usinables.* Thèse (Ph.D), pp 200, sofia, 1986
- [82] **G. ALBERT, O. CAHUC, R. LAHEURTE, P. DARNIS** "*étude expérimentale de la coupe en fraisage*". 18^{ème} congrès français de mécanique, CNRS, université de Bordeaux 2007.
- [83] **Y.P. Adler ET E.V. MARKOVA** : *Planification des expériences pour rechercher les conditions optimales.* Naouka, Moscou, 1971.
- [84] *ACC_0910_DRILLING_GB-en.pdf* www.bosch-pt.com/download/
- [85] *MORPHOLOGIE-DE-LUSURE-SUR-LA-PARTIE-ACTIVE-ET-DE-GUIDAGE-DUN-FORET- helicoidal_fig12_307868620* <https://www.researchgate.net>
- [86] **Murad, Y., Abu Zaid, J.**, *Finite Element Modelling of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Different Configuration of Carbon Fiber Sheets*, (2019) International Review of Civil Engineering (IRECE), 10 (4), pp. 188-196.doi: <https://doi.org/10.15866/irece.v10i4.16870>