

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY جامعة باجي مختار-عناية

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Année 2011

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : MAGISTER

**USINABILITE DE L'ACIER C18 LORS DES OPERATIONS DE
PERÇAGE**

Option : CONSTRUCTION MECANIQUE

Par

Nacer MOKAS

DIRECTEUR DE MEMOIRE : Lakhdar BOULANOUAR Prof. U.B.M. Annaba

DEVANT LE JURY

ZEGHIB NACEREDDINE	Prof.	PRESIDENT	Université B. Mokhtar Annaba
LAGRED AHMED	MC/A	EXAMINATEUR	Université B. Mokhtar Annaba
HAMADECHE HAMID	MC/A	EXAMINATEUR	Université B. Mokhtar Annaba

TABLE DES MATIERES

Abstract	I
Résumé	II
ملخص	III
Remerciements	IV
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VI
Table des matières.....	VII
Introduction	1

CHAPITRE I : ETUDE ET ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE .....	.....
1.1. Introduction	2
1.2. Généralité	2
1.3. Principales opérations de coupe	4
1.4. Recherche de l'optimum en usinage	7
1.5. Différentes définitions de l'usinabilité	8
1.5.1. Définition de l'usinabilité selon [6]	8
1.5.2. Définition de l'usinabilité selon [4]	9
1.5.3. Définition de l'usinabilité selon Mr BERAD GRUBER	9
1.5.4. Définition de l'usinabilité selon Mr M . KNOWLTON.....	9
1.5.5. Définition de l'usinabilité selon Mr A . MOSTACHI.....	9
1.5.6. Définition selon [66].....	9
1.5.7. Synthèse des définitions et adoption.....	9
1.6. Critères dévaluation de l'usinabilité.....	10
1.6.1. Critère d'après P . MATHON	10
1.6.2. Critère selon ROBELET et GODIN	10
1.6.3. Critère selon B . ROUMESY.....	10
1.6.4. Synthèse des critères et adoption	11
1.7. Méthodes de détermination de l'usinabilité.....	11
1.7.1 Essais accélérés	12
1.7.2 Essais de longue durée.....	12
1.7.3 Méthode graphique.....	12
1.7.4 Méthode analytique.....	13
1.7.5 Analyse et position du problème.....	13
1.8. Importance du perçage dans la fabrication mécanique.....	14
1.8.1 Généralité.....	14
1.8.2 Condition optimales de perçage en fonction du matériau.....	15
1.8.3 Sélection et utilisation des forets.....	15
1.8.4 Choix du cycle de déburrage.....	16
1.8.5 Principaux types d'un foret hélicoïdal.....	16
1.8.6 Géométrie d'un foret hélicoïdale.....	17

VII

Usinabilité de l'acier c18 lors des opérations de perçage

1.9. Développement des critères d'évaluation de l'usinabilité.....	19
1.9.1. Introduction	19
1.9.2. Durée de vie des outils conséquences économiques.....	19
1.9.3. Les efforts de coupe et puissance absorbée.....	21
1.9.4. Influences des facteurs de coupe sur les efforts	22
1.9.5. Effort de coupe et puissance absorbée en perçage.....	24
1.9.6. Qualité de surface usinée.....	26
1.9.7. Lubrification méthodes et produits.....	32
1.10. Conclusion et position du problème.....	33
CHAPITRE II : METHODOLOGIE DE RECHERCHE ET PREPARATION DES EXPERIENCES	
2.1. Méthodologie de recherche.....	34
2.1.1. Méthode uni factorielle.....	34
2.1.1. Méthode multifactorielle.....	35
2.2. Préparation des expériences.....	43
2.2.1. Machine outil.....	43
2.2.2. Matière à usiner.....	44
2.2.3. Préparation des éprouvettes.....	44
2.2.4. Les outils de coupe.....	47
2.2.5. Condition de coupe.....	48
2.2.6. Appareil de mesure.....	49
CHAPITRE III : REALISATION ET RESULTAT DES EXPERIENCES.....	56
3.1. But de l'étude.....	56
3.1. Introduction.....	56
3.1.1. Choix des valeurs du nombre de tour.....	56
3.2.2. Régime de coupe pour la série longue	56
3.2.3. Régime de coupe pour la série courte.....	57
3.2.4. Critère et mesure de l'usure.....	57
3.3. Plans des expériences.....	59
3.3.1. Plans des expériences série longue.....	59
3.3.2. Plans des expériences série courte.....	60
3.4. Résultats et interprétation de l'usure des forets.....	60
3.4.1. Traitement graphique des résultats de l'usure	60
3.4.2. Analyse comparative des résultats de l'usure.....	69
3.4.3. Traitement statistique des résultats de la tenue.....	70
3.4.4. Détermination des modèles de l'usure.....	71
3.4.5. Analyse des modèles de l'usure des forets.....	77
3.5. Traitement et analyse des résultats de la rugosité.....	78
3.5.1. Traitement des résultats.....	78
3.5.2. Analyse des résultats en fonction des éléments du régime de coupe.....	79
3.5.3. Analyse statistique de la rugosité des surfaces usinée.....	8

3.5.4. Analyse de la modélisation de la rugosité.....	82
CONCLUSION ET RECOMMANDATION	83
A)- Conclusion.....	83
B)- Recommandation	84
Perspective.....	87
Références bibliographiques.....	88
Annexe A	93

abstract

The objective of this study is the determination of the machinability of the steel C18 during drilling. To reach to this objective, two trials series of longue duration have been realized with the helicoid drill of high speed steel, of different length and diameters .The drilling length is about 80mm with abundant lubrication and a cycle of adopts stripping.

The enterprise methodology for the realization of trials is so the experienced planning. The principle studied factors are the wear (life of drill) and the roughness of the machined surface. The criterion of the wear restraint eligibility is of 0.5mm along the surface in skin.

The results shows that the steel C18 is characterized by the best machinability, made that the life of the tool for the different machining condition vary between 19 and 495 min. The values of the roughness Ra vary between 2,18 and 6,24 μm .

Key words : machining, drilling, drill, high speed steel, roughness, wear, tool life.

Résumé

L'objectif de cette étude est la détermination de l'usinabilité de l'acier C18 lors des opérations de perçage. Pour atteindre ce objectif, deux séries d'essais de longue durée ont été réalisés avec des forets hélicoïdaux en acier rapide, de différentes longueurs et diamètres. La longueur du perçage est d'environ de 80 mm en présence d'une lubrification abondante et d'un cycle de déburrage adopté.

La méthodologie entreprise pour la réalisation des essais est celle de la planification des expériences. Les principaux facteurs étudiés sont l'usure (durée de vie du foret) et la rugosité de la surface usinée. Le critère de l'usure admissible retenue est de 0,5 mm suivant la surface en dépouille. Les résultats montrent que l'acier C18 se caractérise par une bonne usinabilité, du fait que la durée de vie de l'outil pour les différentes conditions d'usinage varie entre 19 et 495 min. Les valeurs de la rugosité Ra varient entre 2.18 et 6.24 μm .

MOTS CLES : usinabilité, perçage, foret, acier rapide, rugosité, usure, durée de vie.

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو تبيان تشغيلية الفولاذ C18 أثناء عملية التنقيب. ولبوغ هذا الهدف مجموعتان من التجارب طويلة المدى قد أجريت باستعمال أدوات ثقب حلزونية من الفولاذ السريع، مختلفة من حيث الطول والقطر. أما طول الثقب فيقارب 80 مم مع استعمال التبريد المتواصل و إخراج المثقب بطريقة مدروسة.

المنهجية المتبناة لإجراء هذه التجارب هي طريقة تخطيط التجارب، و من أهم العناصر المدروسة هي تآكل أداة التنقيب (عمر المثقب) و حالة السطح المشغل، حيث عنصر التآكل المقرر هو 0.5 مم حسب سطح الخلوص.

تظهر النتائج المتحصل عليها أن تشغيلية الفولاذ C18 جيدة من حيث عمر أداة التنقيب ؛ بالنسبة لجميع ظروف التشغيل و التي تتراوح بين 19 و 495 دقيقة. أما حالة السطوح (Ra) فهي تتراوح بين 2.18 و 6.24 μm .

الكلمة المفتاح: تشغيلية ، الفولاذ ، التنقيب ، المثقب ، الفولاذ فائق سرعة القطع ، تثلم ، عمر الأداة .

Remerciements

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail soit Mené à bien.

Je remercie en particulier mon encadreur Pr **Lakhdar BOULANOUAR** pour toutes ses précieuses orientations et sa grande patience.

Je tiens aussi à remercier les membres du jury, le Pr **ZEGHIB NACEREDDINE** et Messieurs MC/A **LAGRED AHMED** et **HAMADECHE HAMID** pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Mes remerciements vont également à Messieurs **Reda MEKFA** et **Salim BELHADI** pour leur généreuse collaboration sans oublier le personnel du bloc « E » pour leur aimable accueil et leur grande aide.

A toute ma famille et en particulier ma fille **Nour Elhouda**, sans oublier **Oussama**, **Asma**, la petite **Khaoula** et leur maman **Saliha**.

introduction

Le progrès de l'industrie mécanique connaît une grande concurrence entre les producteurs dans ce domaine, car la valeur d'une pièce produite en mécanique est définie par la quantité et la qualité du produit durant un temps bien précis. Ces facteurs ne se méritent que par l'application d'une méthodologie permettant d'optimiser les conditions de travail.

L'usinage par enlèvement de matière se classe parmi les procédés les plus utilisés comparativement à ceux par déformations ou autres, l'étude et l'analyse des phénomènes qui accompagnent l'usinage demeurent un domaine inévitable pour comprendre le mécanisme de la coupe.

En dévoilant les secrets de ce mécanisme on pourra exploiter de façon rationnelle le système d'usinage, en adoptant les conditions les plus adéquates. Ces conditions sont en relation directe avec les paramètres technico-économiques tels que la précision macro et micro- géométrique et le prix de revient, elles contribuent aussi à obtenir une productivité optimale. Toutes ces notions s'englobent sous le phénomène de *l'usinabilité des aciers*.

Dans ce travail sont exposés les résultats d'une étude expérimentale pour la détermination de l'usinabilité de l'acier **C 18** lors des opérations de perçage. Le premier chapitre a été consacré à l'éclaircissement de la notion d'usinabilité. Dans un premier temps, nous avons décrit d'une manière attrayante, les différentes définitions, critères, méthodes d'évaluations et modes de traitement des résultats, et enfin nous avons analysé et positionné le problème.

Le second chapitre a fait l'objet de la description de la méthodologie de recherche qui convient à notre sujet. Il s'agit de la *méthode de planification optimisée avec celle des moindres carrés*. Dans laquelle on a abouti à l'expression (2.18) capable avec les considérations qui en suivent de déterminer les actions de N facteurs X avec celles des produits combinés sur un paramètre de sortie Y. Nous avons trouvé que si l'adéquation d'un modèle est limitée à une certaine valeur, l'action des produits combinés des facteurs sert à améliorer la précision du modèle cherché.

Dans notre cas nous avons envisagé l'action simultanée des éléments du régime de coupe sur les paramètres de l'usinabilité (tenue, vitesse technologique et rugosité).

Le dernier chapitre est réservé aux résultats obtenus. Ces derniers sont exprimés et analysés graphiquement. Des modèles liant les paramètres d'entrées avec ceux de sorties des différents critères de l'usinabilité ont été élaborés et analysés.

L'analyse statistique a montré que les modèles obtenus sont très adéquats avec les résultats expérimentaux.

CHAPITRE I :

ETUDE ET ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Introduction:

Il faut savoir que la recherche, à l'université, ne se passe pas seulement à manipuler des appareils, à observer, mais qu'on passe plus de la moitié de son temps devant du papier, à lire ce que les autres ont pu écrire sur le sujet, ou à rédiger ses propres articles. Les recherches bibliographiques sont donc de la plus grande importance.

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 entamée elle permet aussi de recueillir le maximum d'information concernant le thème en question.

1.2. Généralités:

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 » ou « formage » 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 gazeux, 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 mm. 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). La vitesse de coupe est la vitesse de déplacement de l'arête tranchante de l'outil par rapport à la pièce. Elle est définie en m/min. Etant donnée la forte puissance requise pour la coupe, l'avance qui définit la quantité de matière enlevée est limitée. Les différents procédés d'usinage sont (les symboles sont ceux de la norme NFE 05-019 de 1992) : l'alésage (al) ; le brochage (br) ; le fraisage : fraisage en bout (frb), fraisage en roulant (frr) ; le décolletage ; le mortaisage ; le lamage ; le perçage (pc), filetage (fl), taraudage ; le pierrage (pi) ; le rabotage (rb) ; la rectification : rectification plane (rcp), rectification cylindrique (rcc) ; le planage ; le rodage (rd) ; le tournage (to) : dressage (dr), chariotage ; l'étincelage (éi) ; l'électroérosion (ée) ; le polissage (po) ; l'électro-polissage (ep) ; la super finition (sf) ; le sablage : sablage à sec (sas), sablage humide (sah) ; le grattage (gr) ; le meulage (me) ; le découpage (dé) : découpage plasma, découpage jet d'eau, découpage laser ; le grenailage : grenailage sphérique (gns), grenailage angulaire (gna) ; le galetage (ga) ; le roulage : usinage entre galets, comme le filetage à froid ; le polygonaage .

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).

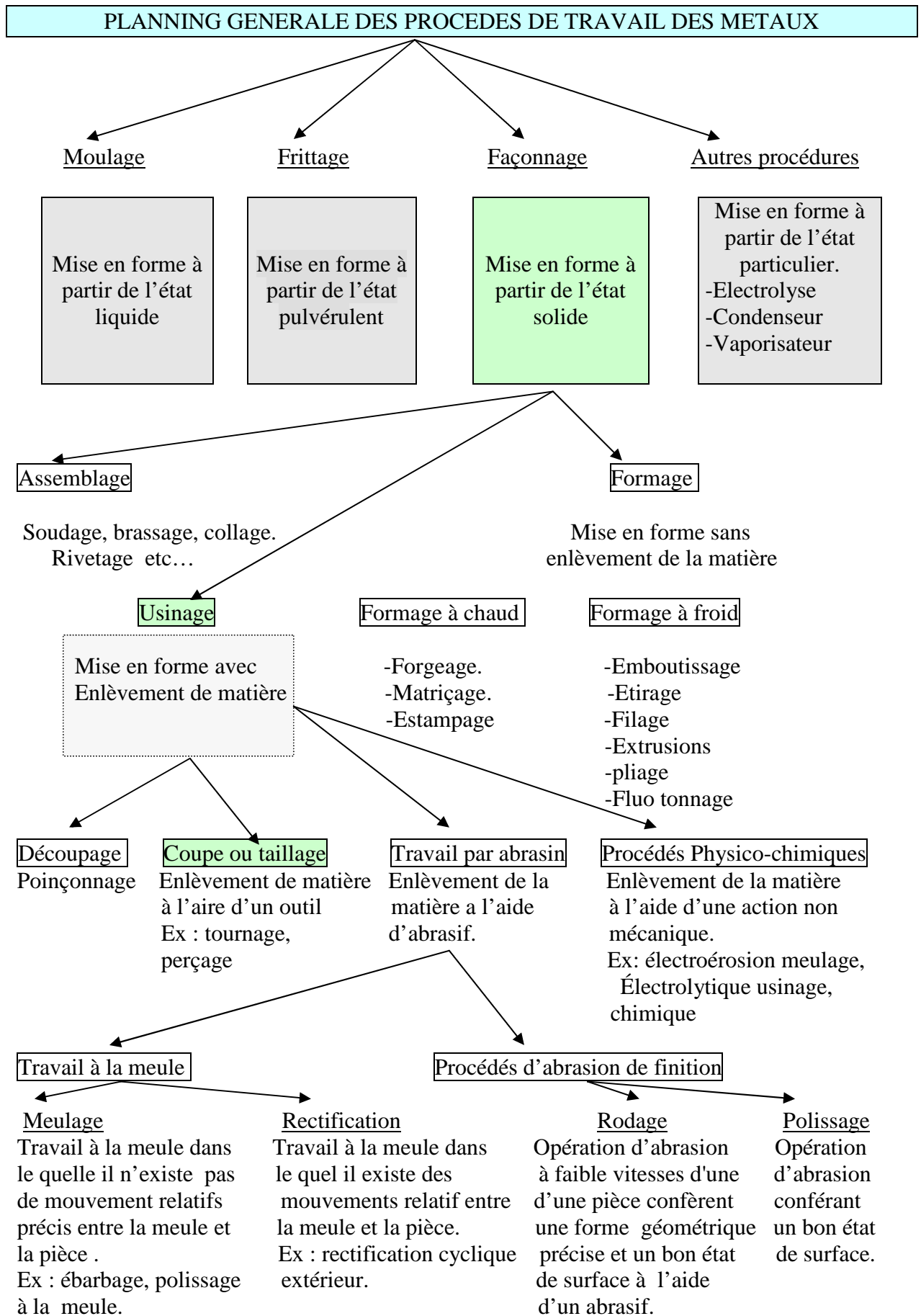


Figure 1.1: planning générale des procédés de travail des métaux.

1.3. Principales opérations de coupe :

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 (1.2) 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 mouvement de coupe 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 rayant 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 (*a*). Les grandeurs géométriques et cinématiques utilisées pour caractériser le mouvement de coupe et le mouvement d'avance, sont les suivants :

A)- La vitesse du coupe : (V_c) (m/min) 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 se calcule ainsi:

$$V_c = \frac{\pi \times d \times N}{1000} \quad (1.1)$$

- la vitesse de rotation (N) (N^{br} tr/min) désigne le nombre de tours par minute accomplis par la pièce dans le mouvement de coupe. En permutant les termes de la formule précédente, on obtient :

$$N = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times d} \quad (1.2)$$

B)- L'avance par tour : (V_f) ou (t) en (mm/tr) elle est la vitesse avec laquelle progresse l'outil suivant l'axe de rotation pendant une révolution de la pièce, 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. En tournage, si on veut calculer la vitesse d'avance de l'outil, on applique cette formule :

$$V_f = f \times N \quad (1.3)$$

- f = avance en mm/tour. - N = fréquence de rotation réglée sur la machine en tour/min.

C)-La profondeur de passe : (a) (mm) 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 se fait en fonction de la surépaisseur de métal à enlever, les limites sont déterminées par:

a-Limite maximum: Puissance de la machine, rigidité de la pièce et de l'outil, nature du matériau à usiner.

b-Taille de copeau minimum: Finesse de l'arête tranchante, forme du bec de l'outil, nature du matériau à usiner.

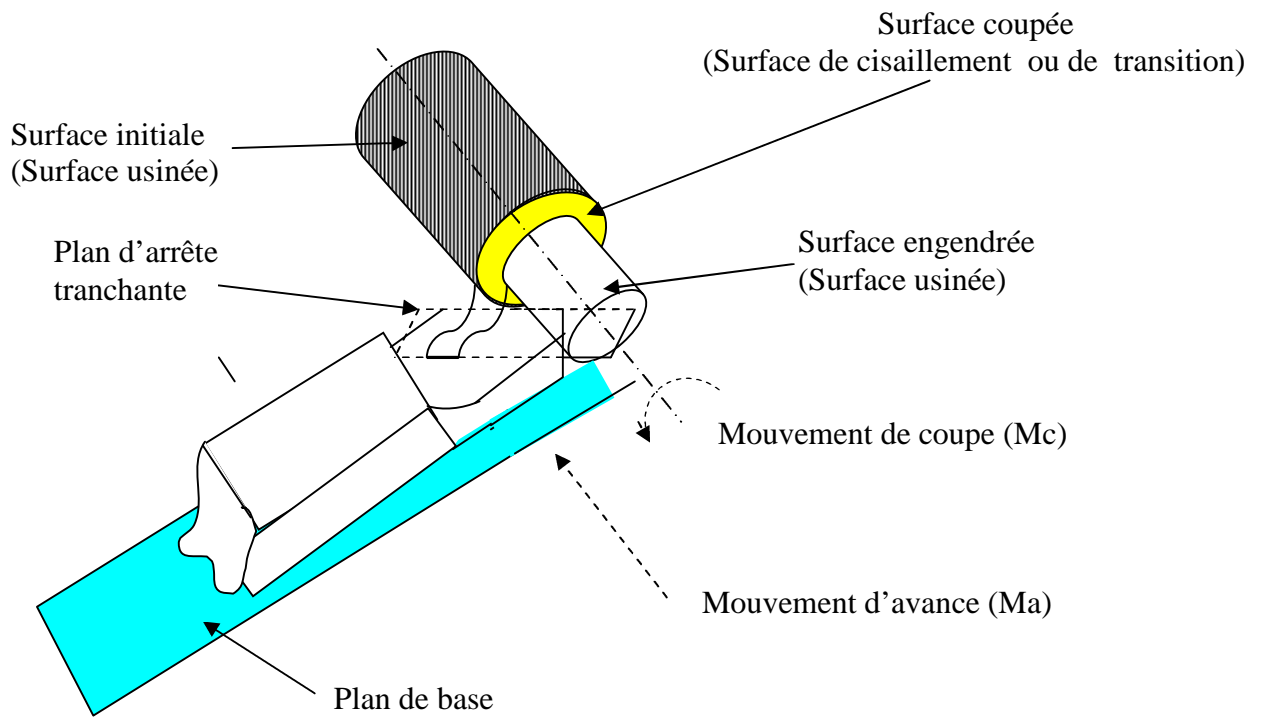


Figure 1.2: Tournage longitudinale

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 1.2).

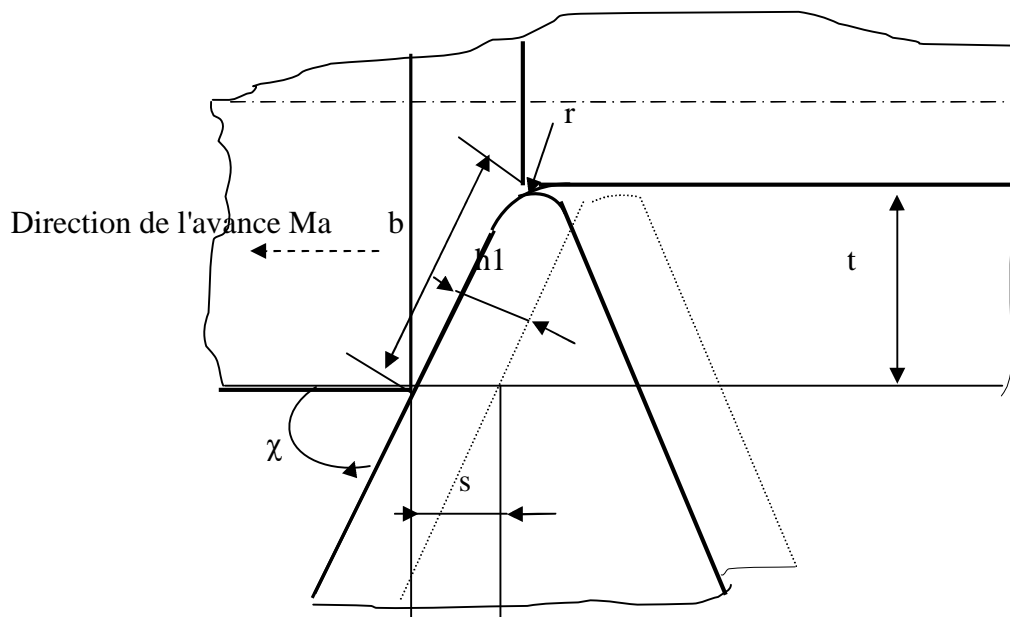


Figure1.3: Grandeurs géométriques de la coupe en tournage.

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 (t) et l'avance par tour(s) définissent la quantité de copeau à enlever. Elle est caractérisée par son épaisseur (h_1) et sa largeur (b), ce qui déduit évidemment la réaction :

$$t.s = h_1.b \quad (1.4)$$

Le rayon du bec désigne la projection de l'arrondie 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 supérieure 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 figure (1.4) correspond à l'enlèvement d'une couche de métal d'épaisseur $h_1 = s$ 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 :

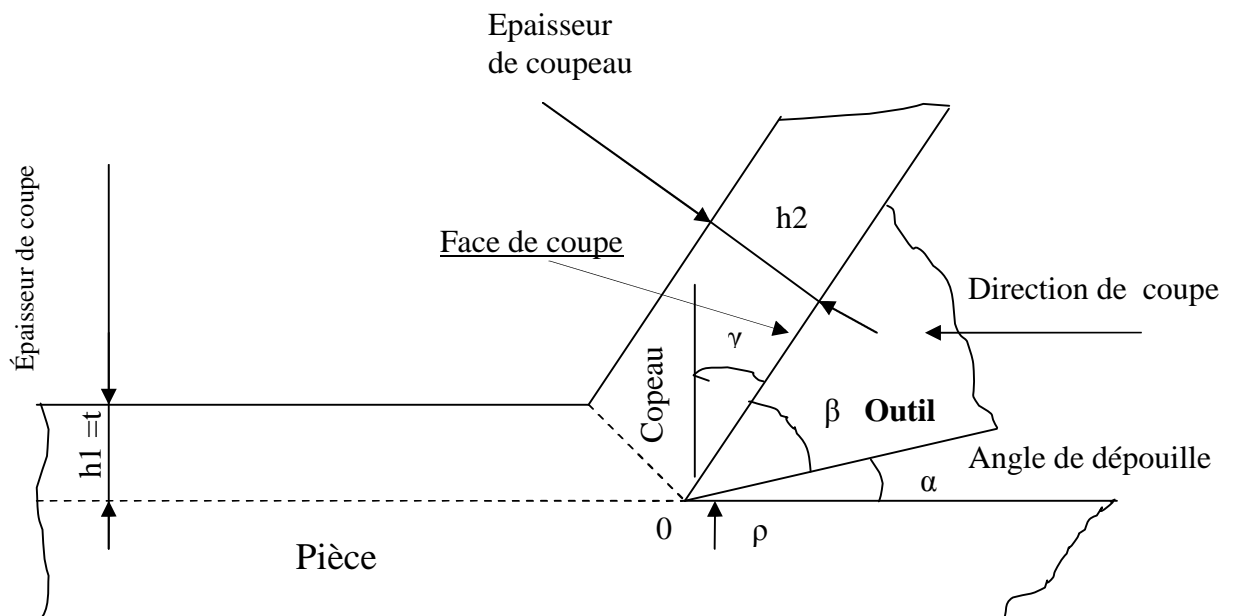


Figure 1.4: Grandeurs géométrique de la coupe orthogonale pure.

-La face de dépouille de l'outil:

Evite 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 la quelle 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 quelque 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.

1.4 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 conduisant à un optimum.

Le choix du critère optimalité peut correspondre à de différentes éventualités, en général le prix de revient est considéré comme critère quant on se penche à de stricts considération 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 groupés par domaines techniques, et on se contente de ne prendre en considération que certains, sur les quels on peut agir pour optimiser le travail. Ces facteurs sont essentiellement liés aux éléments suivants :

A)-*La machine outil* :

- Automatisation des opérations d'usinage ou auxiliaires (commande numérique).
- Augmentation de la puissance des moteurs.
- Commande automatique des vitesses.
- Stabilité du système usinant en diminution les vibrations.
- Palier antifriction pour éviter les pertes de puissances à haute vitesse.
- 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 en utilisant des nuances comme céramiques etc...

D)-*L'usinabilité des métaux* :

Amélioration de l'usinabilité des métaux 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 :

- 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 toute fois vérifier que le travail d'usinage peut effectivement être exécuté avec les équipements existant 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'étant 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 faite trois variables principales à optimiser entre les mains de l'usine :-La vitesse de coupe. -L'avance.-La profondeur de passe.

On peut y ajouter le nombre de passe, où la gamme d'usinage mais ils sont liés à la profondeur de passe. On se contrera donc dans la suite de parler de trois variables [14].

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 stable, 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 façons selon les chercheurs, on reprendra quelques uns de ces définitions dans ce qui suit. Pour cette raison, nous avons optés pour l'usinabilité de l'un acier C18 au cours du perçage comme sujet de recherche. D'après nos investigations ce thème n'a pas fait l'objet de recherche.

1.5 Différentes définitions de l'usinabilité :

1.5.1 Définitions de l'usinabilité selon [6] :

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 compositions données, 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 les quels l'usinabilité maximale est recherchée même au détriment des caractéristiques mécaniques (pièce peut sollicitées) et les aciers à usinabilités améliorés qui doivent avoir de hautes caractéristiques après traitement (pièce fortement sollicitées). Les inclusions qui jouent un très grand rôle dans l'usinabilité peuvent être présentes involontairement ou provoqués. 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 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 les des caractéristiques (manganèse, chrome...) [6].

1.5.2 Définition de l'usinabilité selon [4] :

Selon les chercheurs dans le domaine de la coupe des métaux 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 [4].

1.5.3. Selon Mr BERAD GRUBER :

L'usinabilité dans un matériau c'est l'aptitude de ce dernier à être amené à des dimensions et des formes déterminées, avec un état de surface définie, 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 [5].

1.5.4. Selon Mr M.KNOWLTON :

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 [6].

1.5.5. Usinabilité selon A.MOSTACHI:

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 anocif 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 pièce fabriquée [1].

1.5.6. Définition selon [66]:

La modélisation de l'usinage exige la connaissance des relations exprimant avec précision le comportement du matériau dans les zones primaire et secondaire de cisaillement. Relation contraire d'écoulement-déformation, taux de déformation-température et lois de frottement outil-copeau, sont nécessaires pour prédire la forme du copeau, l'effort et la température. La loi de rupture est indispensable lors de cisaillement à taux élevée et localisée.

1.5.7. Synthèse des définitions et adoption :

D'après toutes les définitions données par les chercheurs dont j'ai reporté quelques une nous pouvons retenir celle qui a 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 sa technique ses machines outils et le type de pièces qu'il fabrique.

L'aptitude d'usinage du matériau se réfère principalement à :

- l'état de surface usinée.
- L'effort spécifique de coupe.
- La durée de vie de l'outil [2].

De façon générale les paramètres influant sur l'usinabilité et les conséquences requises sont résumés dans la figure (1.5):

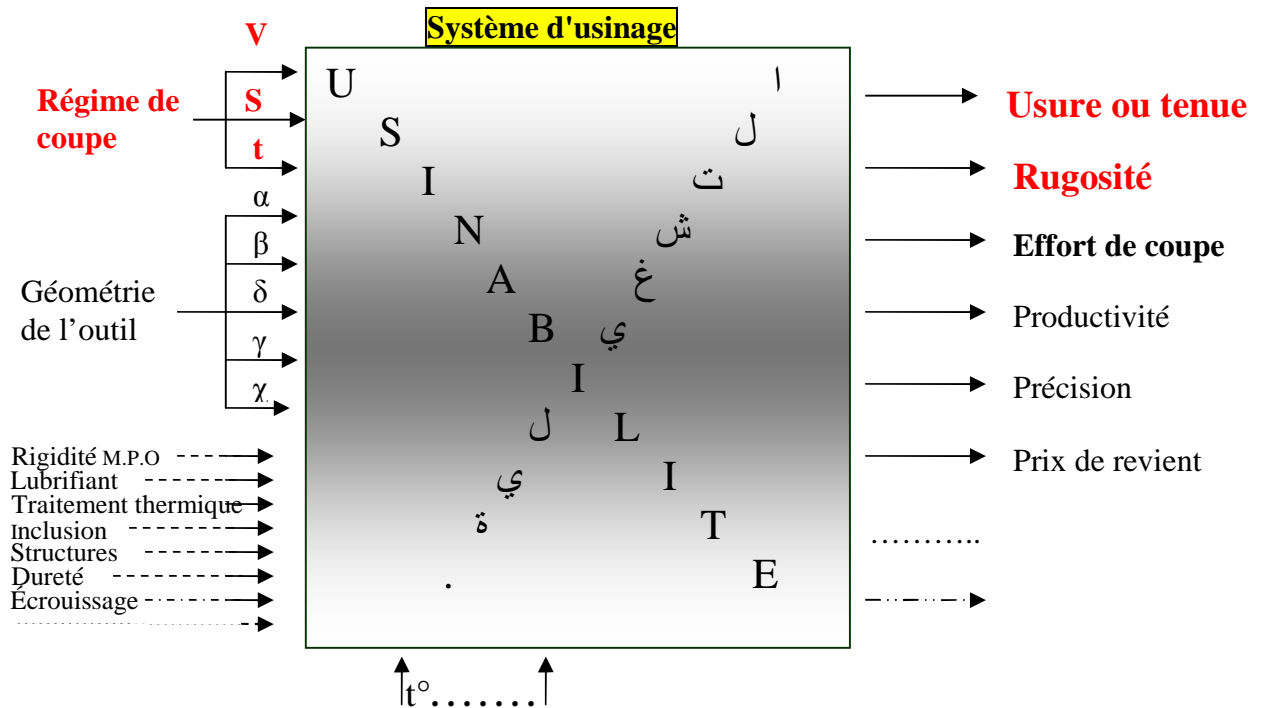


Figure1.5: Paramètres influents sur l'usinabilité.

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 les quelles elle a été apprécié [3].

1.6 Critères d'évolutions de l'usinabilité :

Étant donné que l'usinabilité a été définie de différentes façons cependant les critères de son évaluation se diffèrent aussi d'un chercheur à l'autre.

1.6.1 Critère d'après P.MATHON :

Les principaux critères sont classés selon l'ordre suivant :

- La rugosité de la surface usinée définissant l'aptitude au finie de surface.
- La force de coupe définissant la résistance à la coupe.
- La durée de vie de l'outil ou la vitesse de coupe permettant d'obtenir une durée de vie de l'outil donnée ou l'usure pour un temps donné.

Par contre d'autres chercheurs prennent l'usure de l'outil comme l'effet le plus observable [7].

1.6.2 Critère selon ROBELET ET G.ODIN :

Ils classent les critères d'usinabilité de la façon suivante :

- L'usure de l'outil.
- L'effort de coupe.
- La température de coupe [8].

1.6.3 Critères selon B.ROUMESY :

Les critères d'évaluation de l'usinabilité en deux catégories :

- A)- **Critère direct** : basé sur l'évolution de l'usure avec ses différentes formes (figure1.5).

- * Critère de l'usure frontale (VB).
- * Critère de la mort de l'outil.
- * Critère de l'usure volumétrique ou massique.
- * Critère basé sur les variations des côtes de la surface usinée, utilisé pour déterminer l'usinabilité des aciers.

B)- Critère indirect: basé sur la variation de certaines grandeurs en fonction de l'usure de l'outil telle que :

- L'effort de coupe et le travail spécifique.
- La rugosité de la surface usinée.
- La température dans la zone de coupe.

Il est à mentionner que le critère utilisé est recommandé par I.S.O pour les outils en carbure métalliques est l'usure frontale VB (VB max), ou en critère (KT) [9].

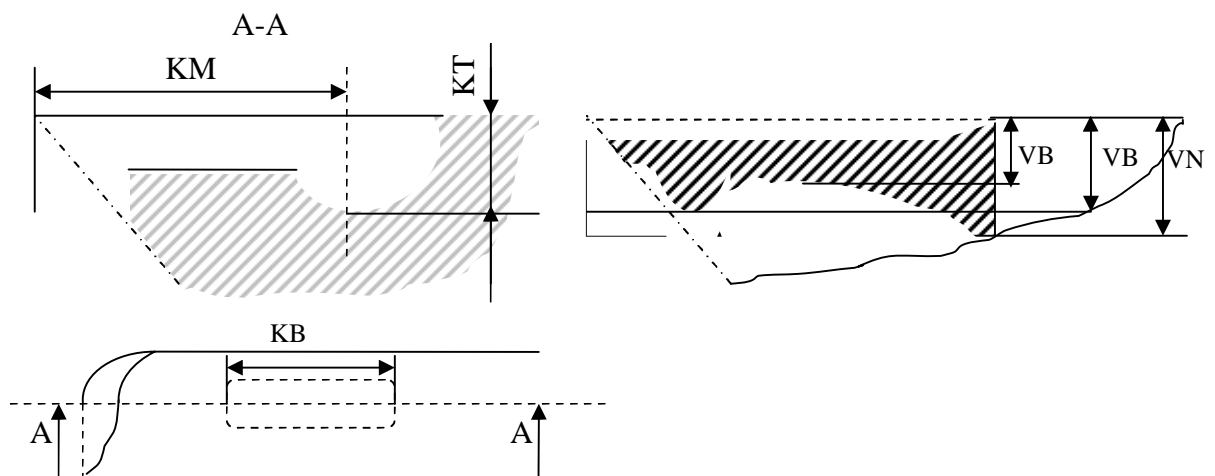


Figure1. 6: Critères directs de l'évaluation de l'usinabilité selon [7]

1.6.4 Synthèse des critères et adoptions :

Finalement pour résumer les critères d'évaluation de l'usinabilité, il faut poser ceux qui sont en liaison directe avec l'objectif technico-économique dans ce domaine, soit la tenue de l'outil, la facilité de l'usinage et la précision des côtes. La majorité des chercheurs évaluent l'usinabilité par les critères ordonnés comme suit :

- La tenue de l'outil (vitesse de coupe technologique) critère dépendant (Vb, KT, V60).
- Les efforts de coupes.
- La qualité de surface.

L'absence de la température de coupe prouve qu'il s'agit d'un effet parasite lié directement à l'effort de coupe et à l'usure [10].

1.7. Méthodes de déterminations de l'usinabilité :

Pour déterminer l'usinabilité, plusieurs méthodes ont été mises au point, dont les plus essentielles sont les méthodes basées sur la mesure de l'usure, ces méthodes sont plus réalistes en pratique, et se divisent en deux types selon la durée de l'essai :

- 1-Essais de longue durée.
- 2-Essais accélérés (rapide) [16].

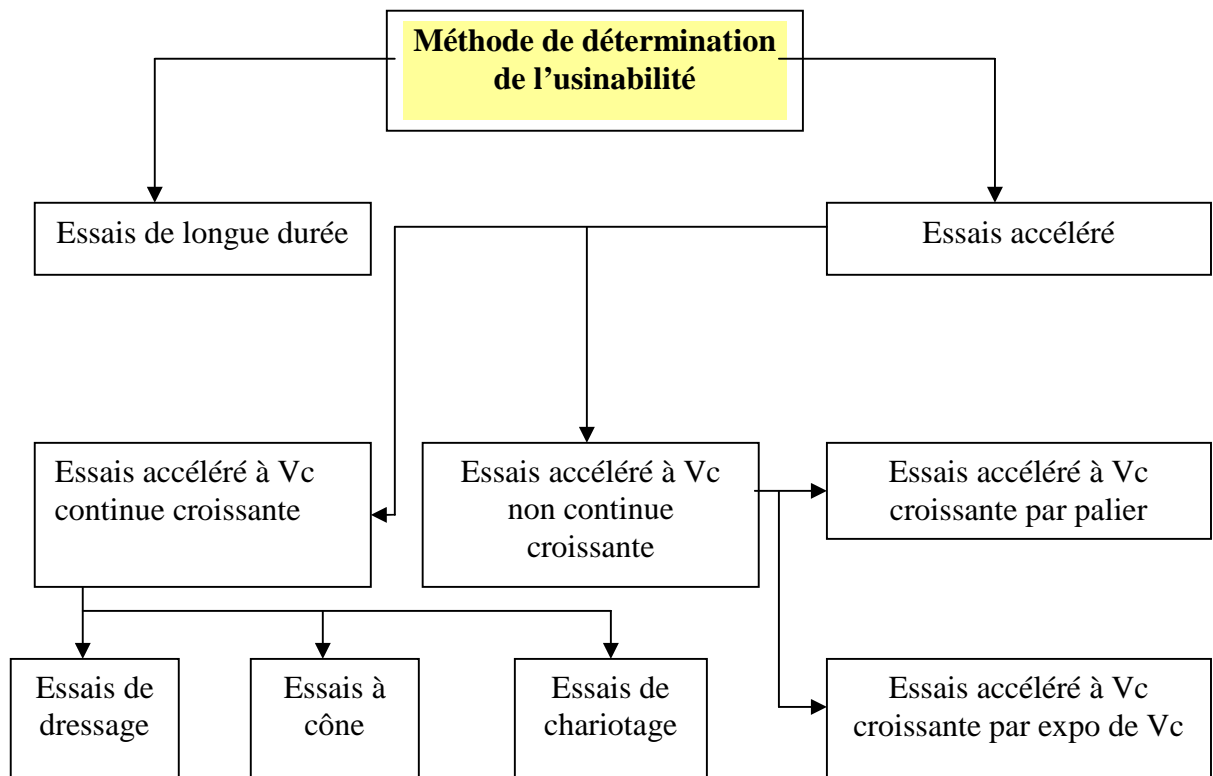


Figure 1.7: Méthodes de détermination de l'usinabilité.

1.7.1 Essais accélérés :

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.

1.7.2 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 (V), en traçant la droite en échelle bilogarithmique de la loi de **TAYLOR** et en se référant au graphique, on peut déduire les coefficients nets. 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 définies.

1.7.3 Méthode graphique :

La tenue de l'outil étant 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 dépouilles), Les résultats d'une série d'essais seront traités graphiquement en dressant les courbe d'usure en fonction du temps de coupe.

$$VB = F(t)$$

La tenue des outils de coupe atteinte pour un critère d'usure préalablement choisi (VB), il suffit de déduire la valeur de celle ci à partir de la courbe tracée.

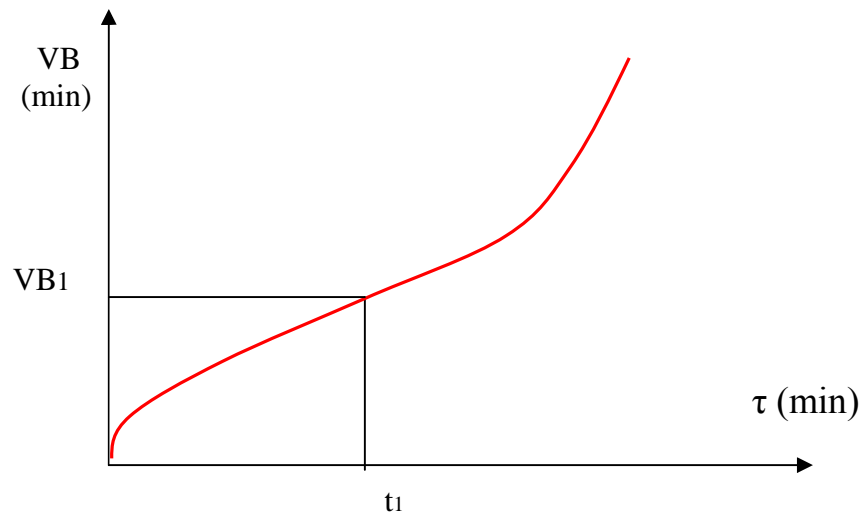


Figure 1.8: Courbe d'usure de l'outil en fonction du temps.

Pour déterminer l'usure d'un outil (VB₁) en temps (t₁) il suffit de projeter la valeur de l'usure admissible sur la courbe VB=F(t) et la reprojeter sur l'axe des temps (τ).

1.7.4 Méthode analytique :

Cette méthode 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 suivante :

$$VB = C_n \cdot V^b \cdot S^c \cdot t^d \cdot \tau^a \quad (1.5)$$

- VB : L'usure de l'outil (mm).
- V : Vitesse de coupe (m/min).
- S : Vitesse d'avance de l'outil (mm/tr).
- τ : Temps d'usinage (min).
- t : La valeur de la profondeur de passe (mm)
- C_n : Constante tenant compte des facteurs influant sur l'usure et ne figurant pas dans l'équation
- les exposants (a, b, c et d) sont des coefficients indiquant respectivement le degré d'influence du temps, de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe.

1.7.5 Analyse et position du problème :

Les deux méthodes de mesure de l'usure des outils de coupe, expérimentale et par modèle de calcul exigent la présence d'une certaine corrélation entre elle, à cet effet nous pourrions dire que les essais de longue durée réalisés dans des conditions proches de celle utilisés dans l'industrie, offrent des résultats moins dispersés, malgré qu'ils imposent un grand volume de matière et nécessitent beaucoup de temps pour apprécier les résultats. Un minimum de matière, en un temps très réduit, suffisent pour jouir des informations quoi qu'elles ne sont

pas précises vis à vis de celles recueillit 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. Le tableau (1.1) illustre une étude comparative portée sur les deux méthodes.

Tableau 1.1: Comparaison des deux méthodes de longue et de courte durée.

Essai	Avantages	Inconvénients
Essais de longues durées.	-Résultats de bonne précision. -Condition de travail proche de celle pratiquement adaptée.	Pertes importantes en temps et matière
Essais rapides	-Économie en matière et temps réduit	Résultats de faibles précisions

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 (I.S.O), en 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 par (VB max).

1.8. Importance du perçage dans la fabrication mécanique :

1.8.1 Généralité :

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

L'opération de perçage par usinage (avec un foret) est une des plus utilisées dans la fabrication de pièces mécaniques. 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.

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.

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 24 000 tr/min, et jusqu'à 63 000 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 mouvement de coupe et d'avance en perçage sont donnés à l'outil (figure.1.9).

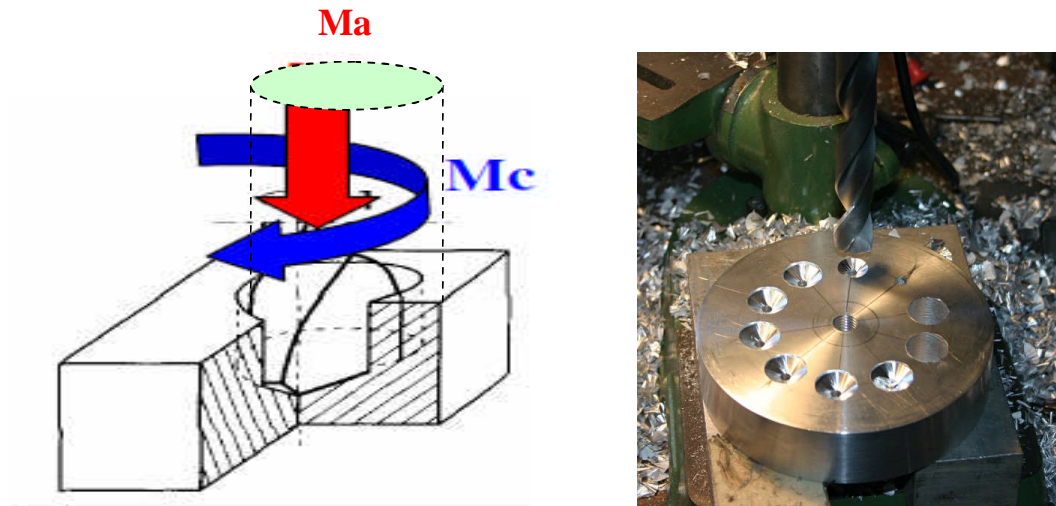


Figure 1.9: Illustration du mouvement de coupe (M_c) et celui d'avance (M_a) en perçage.

Le perçage est l'une des opérations d'usinage par enlèvement de copeaux les plus répandues, il mérite de ce fait une attention particulière. Les progrès dans le domaine de l'affûtage des forets, peuvent entraîner en production de notables améliorations de la précision et des économies appréciable [14].

1.8.2. Conditions optimales de 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 faisant 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 entre 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. Par exemple les meilleures conditions de perçage pour l'acier au carbure sont les suivants [14] :

Les vitesses de coupe recommandées sont fonction de la teneur en carbure de ces aciers :

- Jusqu'à 0,4% C.....vitesse de coupe de 24 à 30,5 m/min.
- Entre 0,4% et 0,7% C. V=18 à 24 m/min
- Au dessus de 0,7% C. V=12 à 18 m/min [17].

1.8.3 Sélection et utilisation des forets :

Les forets hélicoïdaux universels sont généralement utilisés 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. [17]. La vitesse de dégageur 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'en tasse et

l'arrivée du lubrifiant devient impossible ce qui nécessite le déburrage du foret qu'on appelle le déburrage. Une étude expérimentale a été faite pour régler le cycle de déburrage calculée en fonction du diamètre du foret et de la longueur du trou à percer de la façon suivante :

- 1^{er} déburrage L_1 (longueur percée) = $4d$ ou d c'est le diamètre du foret.
- 2^{ème} déburrage $L_2 = 4d$.
- 3^{ème} déburrage $L_3 = 1,5d$.
- 4^{ème} déburrage $L_4 = d$ jusqu'à la fin du trou.

1.8.4 Choix du cycle de déburrage:

La fréquence de déburrage 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 (1.10) [12].

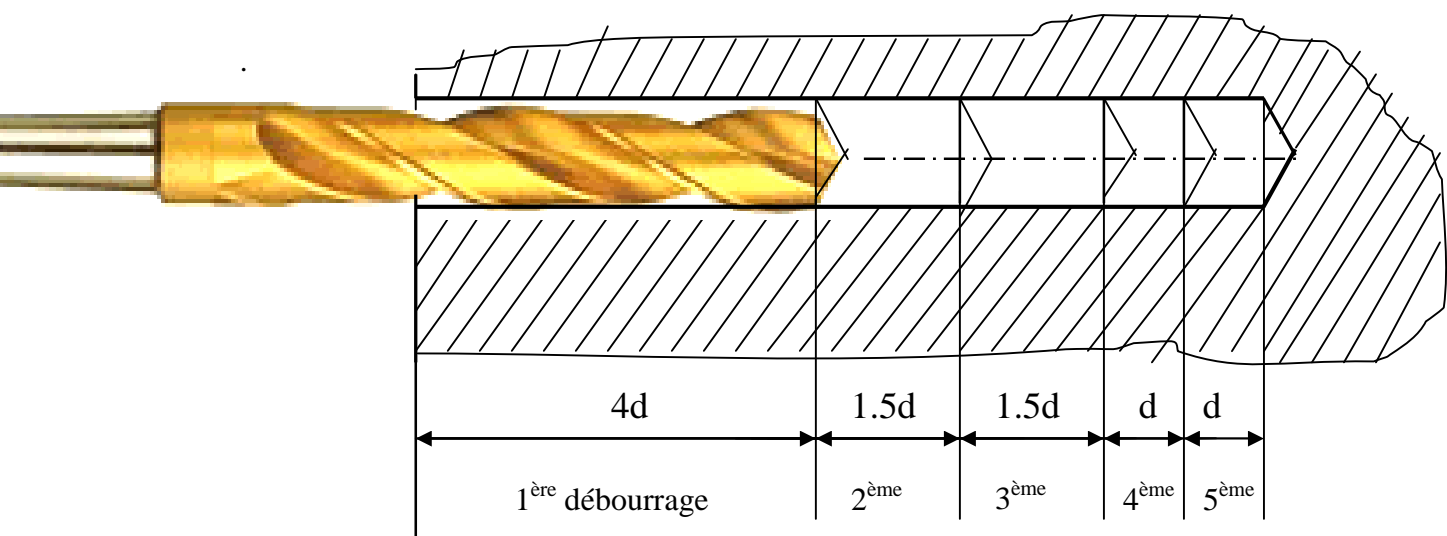


Figure 1.10 : Cycle de déburrage en perçage.

1.8.5 Principaux types de foret hélicoïdaux :

La queue d'un foret diffère selon sont mode de fixation. On distingue le foret à queue conique qui se fixe dans le né de la broche d'une perceuse par emmanchement conique (cône mors) et le foret à queue cylindrique qui se fixe sur la perceuse par le serrage des mors du mandrin.



Figure 1.11 : Foret à queue cylindrique.



Figure 1.12: Foret à queue conique.

1.8.6 Géométrie d'un foret hélicoïdal :

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

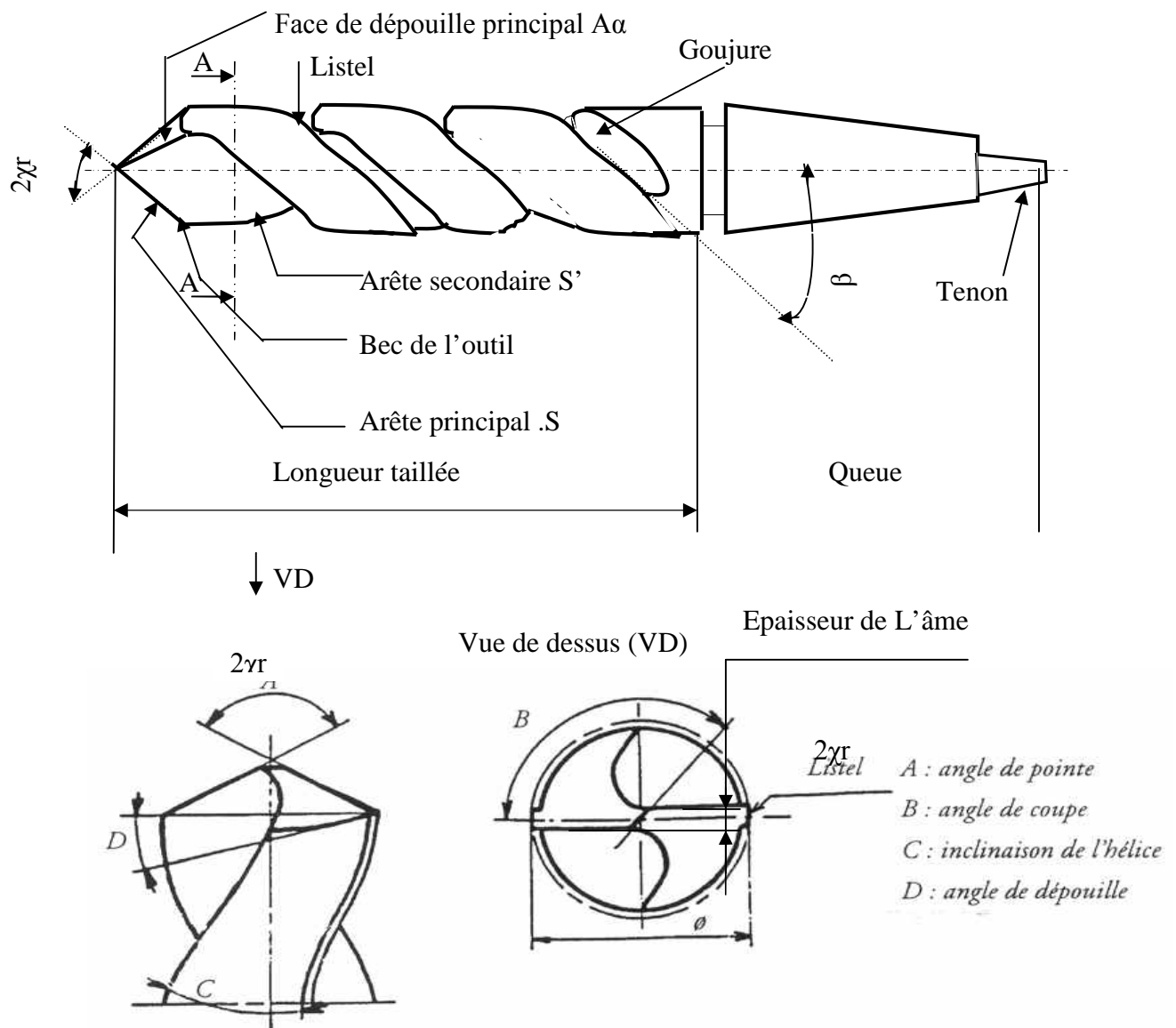


Figure 1.13: Principaux éléments d'un foret hélicoïdale.

La forme géométrique du bec d'un foret est d'une importance capitale pour que celui-ci soit rentable. Il est formé par l'intersection des deux hélices suivant un angle suscité et taillé de façon à permettre une facilitée 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 finalement le travail pour donner la forme finale du trou .Tout  a celons une forme géométrique bien déterminé, détaillée dans la figure (1.14).

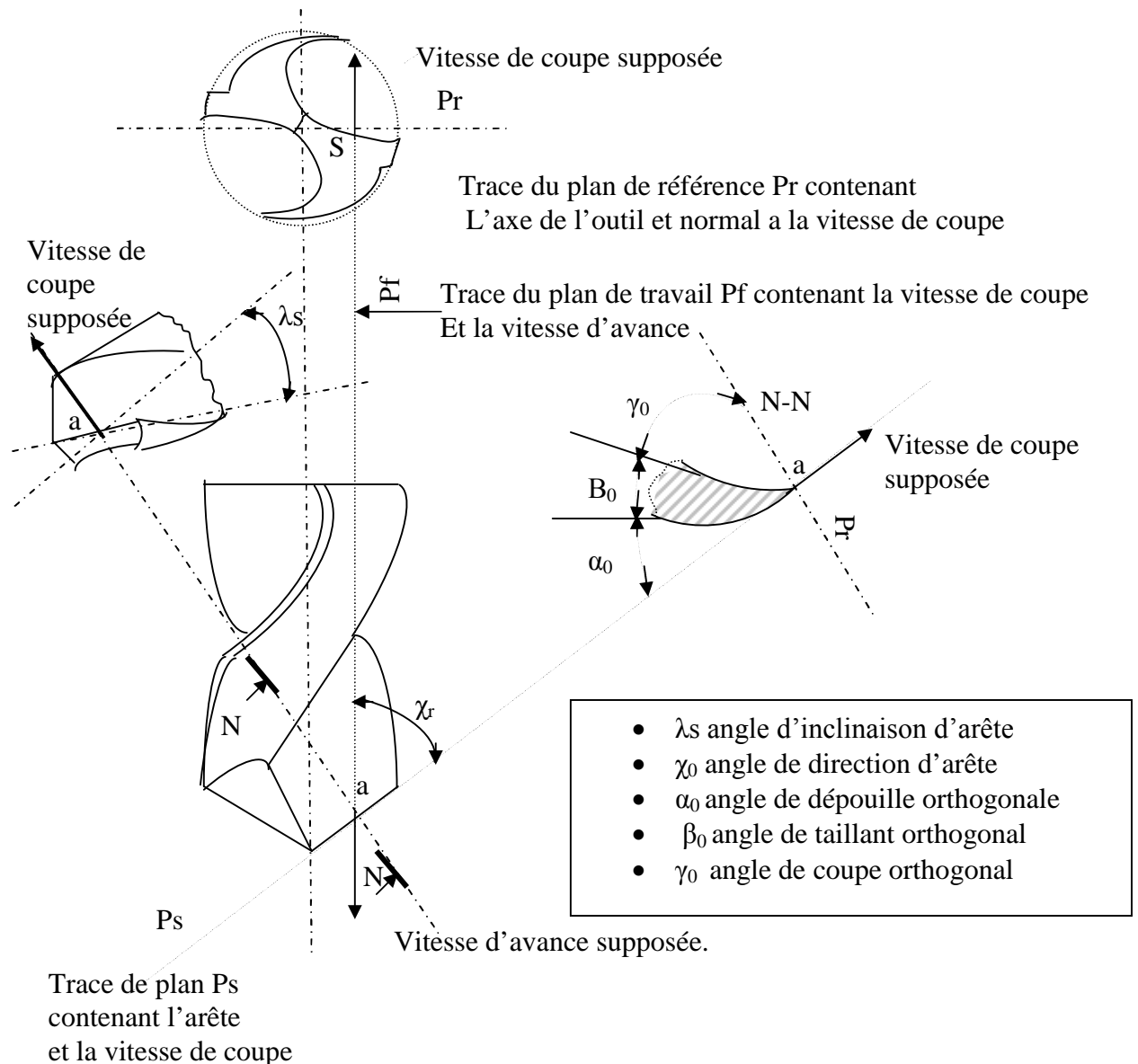


Figure 1.14: Géométrie du bec d'un foret hélicoïdal.

L'amincissement de la partie centrale du foret (l' me) 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 appelée «affûtage 3 ponts ». Une machine conçue spécialement pour permettre de l'obtenir automatiquement (figure 1.15).

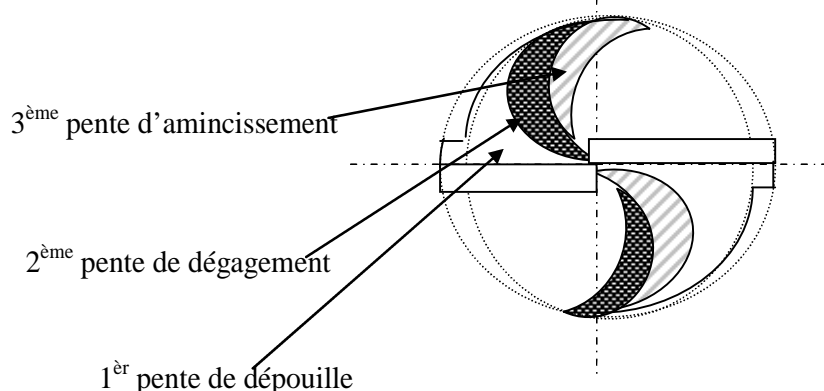


Figure 1.15: Amincissement de la partie centrale d'un foret hélicoïdal.

1.9 Développement des critères dévaluation de l'usinabilité :

1.9.1 Introduction:

Comme il a été déjà dit les critères d'évaluation de l'usinabilité ont été définis par les chercheurs en plusieurs façons, et nous avons adopté celles qui sont en liaison direct avec l'objectif technico-économique soit la tenue de l'outil, la facilité de l'usinage et la précision des côtes, de ce fait la majorité des chercheurs évaluent l'usinabilité par les critères ordonnés comme suite:

- La tenue de l'outil (vitesse de coupe technologique) critère dépendant (V_B , K_T , V_{60})
- Les efforts de coupes.
- La qualité de surface.

1.9.2 Durée de vie des outils conséquences économiques :

Les études portant sur les économies réalisées en usinage relèvent de l'estimation de la durée de vie de l'outil de coupe et sont généralement traitées de la façon suivant :

Ayant établi le critère d'usure de l'outil (en générale la longueur 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 représenté par la droite de TAYLOR) en fonction de la variable de coupe en question (par exemple : la vitesse de coupe). De cette ligne est déduite la durée de vie optimale en vue du coût minimum ou du débit maximum pour l'opération d'usinage envisagé.

Or comme la ligne de probabilité 50% il en résulte que si on usine à la vitesse de coupe correspondante à la vie optimale susdite, seul un outil sur deux atteint cette longévité. Cet état de fait n'étant pas acceptable et pour améliorer le résultat, les données expérimentales sont ultérieurement élaborées dans le but d'en déterminer la distribution moyenne.

A cet égard, plusieurs auteurs ont récemment publié des études visant à établir sur des bases sûres le type de distribution auquel on peut s'attendre.

Dans ces études on considère non seulement l'usure, mais aussi le risque de rupture instantané de l'outil. Cependant on admet souvent qu'une distribution logarithmique normale avec variance constante soit applicable dans tout le domaine de la variable de coupe considérée. Il s'ensuit que l'écart quadratique moyen est également constant de sorte que pour augmenter la limite de confiance « α » de la vie d'outil il suffit de choisir une valeur convenablement réduite de l'abscisse (variable de coupe) ainsi, par exemple, en utilisant les coordonnées logarithmiques pour la vie d'outil (T) et la vitesse de $V_{50} - \text{Log } V_{\alpha}$ (ou $\alpha > 50\%$) est déterminé par le produit m θ de l'écart quadratique moyen θ coupe (V), la distance Log et d'un facteur m , Ainsi pour $m = 1$ on obtient :

$$\alpha = 67\% , \text{ pour } m = 2, \alpha = 95\% , \text{ pour } m=3, \alpha=99\%$$

On a donc un moyen de choisir la limite de confiance qui apparaît convenable dans chaque cas particulier. En ce qui concerne la vie optimale de l'outil, selon cette théorie, celle-ci n'est pas influencée par le choix de α . Par conséquent, la valeur déterminée sur la ligne de régression est utilisée comme allure de coupe programmée entre deux changements d'outils. Pourtant, ce procédé présente deux points faibles. Le plus évident est le manque d'un critère d'évaluation économique dans le choix de la limite de confiance, c'est pourquoi on est amené dans la pratique à choisir une marge de sécurité qui met l'opérateur à l'abri de toute surprise.

Une enquête récente dans l'industrie mécanique a révélé que les conditions d'usinage sont en générale réglées sur une limite de confiance proche de 99%. Cet état de fait entraîne un coût de fabrication excessivement élevé lorsque la vitesse de coupe est réduite sans raison précise. Il est donc nécessaire de baser le choix de la limite de confiance optimale sur les facteurs suivants :

- Les moyens de réparations de la pièce en cours d'usinage et par fois de l'outil (dommages causés par l'usure prématurée de l'outil) sont évalués.
- En multipliant le montant ainsi calculé par la probabilité de cet événement, on obtient une fonction « pénalité » qui croît lorsque la limite de confiance augmente.
- En réduisant le taux d'enlèvement de matière sans modifier la durée de vie programmée. La limite de confiance augmente et augmente le coût d'usinage ainsi il existe donc une valeur optimale de α pour la quelle le coût total résultant de la somme de ces deux termes est minimum. Cette valeur est associée à la valeur optimale des conditions de coupe.

Toutefois, cette solution n'évite pas la deuxième contrainte relative à l'indépendance de la durée de vie optimale de l'outil des conditions de coupe et de la limite de confiance, cette hypothèse est justifiable seulement dans le cas où la loi de TAYLOR généralisée est valable dans tout le domaine des variables de coupe, ce qui n'est pas vrai en principe.

En effet l'expérience acquise sur tout par l'emploi des machines et des outils sophistiqués montre clairement que la ligne de régression tracée sur un diagramme à coordonnées logarithmiques n'est en général pas une droite de TAYLOR, mais une courbe dont la pente augmente avec le débit dans la région économique des conditions de coupe. De plus si on ajoute à la dispersion de la vitesse d'usure un certain risque de rupture instantanée de l'outil, les limites de confiance sont représentées en générale par des courbes. Il s'ensuit que les théories basées sur les conclusions dérivant de la forme mathématique simple de la loi de TAYLOR perdent leur signification pratique.

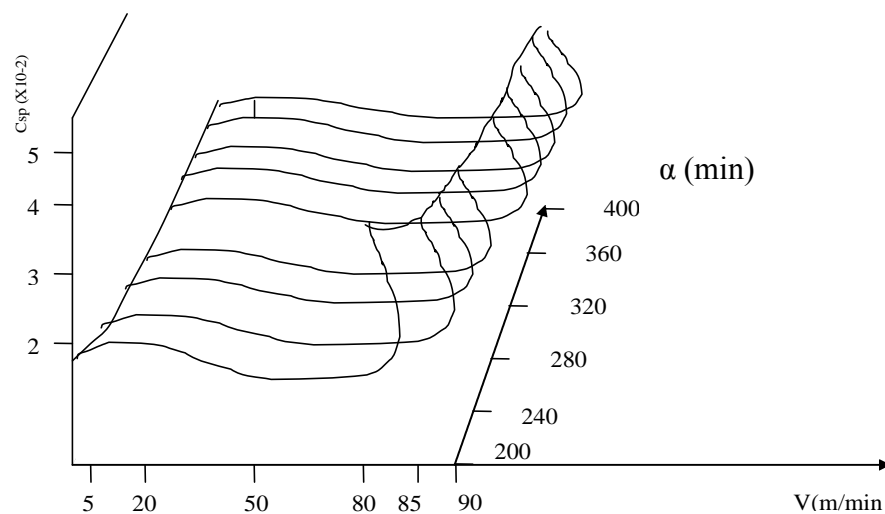


Figure 1.16: Coût attendu de tournage d'acier avec plaquettes en carbures en fonction de la limite de confiance de la vie de l'outil (α) et de la vitesse de coupe (V). distribution logarithmique de la vie par usure avec un certain taux de rupture subite.

Une autre approche du problème permettant de sortir de cette impasse, est 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 expérimentaux qui tienne compte de ce point de vue afin d'en tirer un tableau réaliste de la dispersion. Ayant aussi acquis une orientation générale sur les variations éventuelles de cette dispersion on procède d'une façon analogue à celle décrite plus haut, mais appliquée selon un critère différent [18].

1.9.3 Les efforts de coupes et puissance absorbée :

A)- Généralité:

Les efforts déterminent la puissance nécessaires à la coupe, interviennent d'autre part dans la stabilité du phénomène de coupe, la précision d'usinage et l'état de surface réalisé.

Après avoir répété 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 KRONEMBERG. Il traite ensuite l'influence des différents facteurs de coupe :

- Pente d'affûtage
- Avance et profondeur de passe.
- Vitesse de coupe.

Les deux principaux types de dynamomètres actuellement utilisés pour la mesure des efforts de coupe sont décrits :

- Le dynamomètre à jauges.
- Le dynamomètre quartz [19].

B) - Les efforts de coupe définition et intérêt de leur mesure :

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la composition dans trois directions Privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toute opération d'usinage.

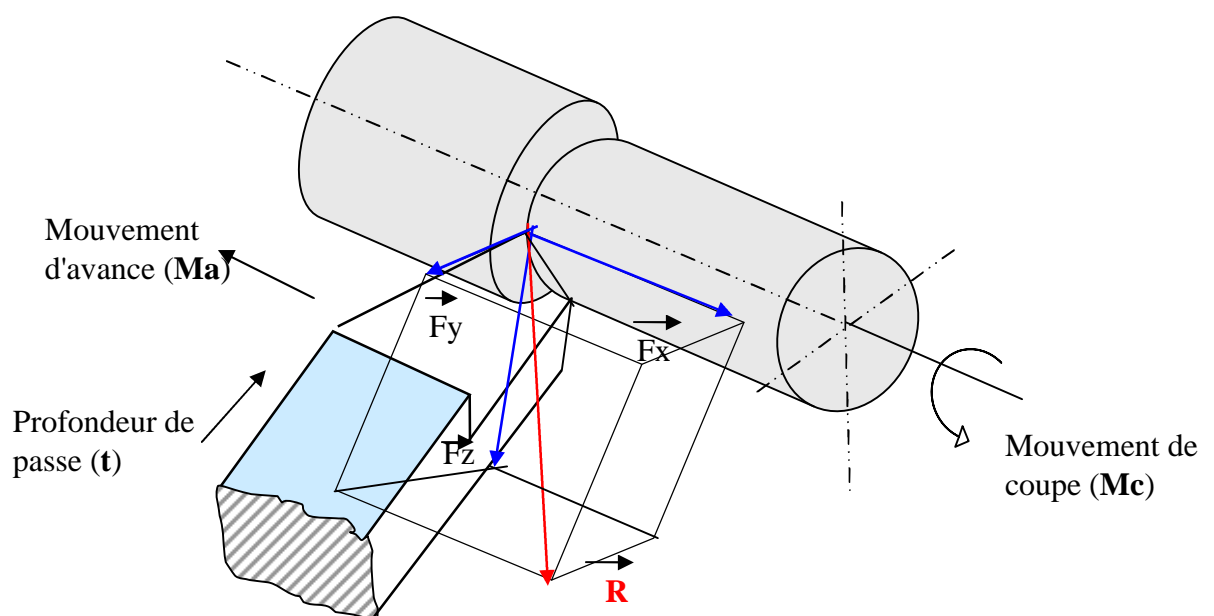


Figure 1.17: Composante de l'effort de coupe en tournage.

1⁰)- **Fz ou (Fv)** : Composante dans le sens de la vitesse de coupe appelé *effort tangentiel ou effort principale de coupe*. C'est la composante ayant la plus grande valeur absolue.

2⁰)- **Fx ou (Fs)** : Composante dans la sens de l'avance appelée *effort d'avance ou effort axial en tournage*. Joue un rôle fondamental dans le processus de coupe.

3⁰)- **Fy ou (Fp)** : Composante dans le sens de la profondeur de passe, perpendiculaire au plan formé par les deux autres, appelée *effort de refoulement ou effort radiale*. Il n'est pas très importance et disparaît dans le cas de la coupe orthogonale Pure [14].

La composante Fv donne à la partie principale de l'énergie de coupe E nécessaire à l'enlèvement du copeau pendant l'unité de temps :

$$E = Fv.vt \quad (1.6)$$

Où V = vitesse de coupe.

L'énergie due à la composante Fs est en effet très faible à coté de E car la vitesse d'avance est de l'ordre du centième par rapport à la vitesse de coupe dans le cas général, mais en connaissance des efforts de coupe est à la base de l'évolution de la puissance nécessaire à la coupe et quant on veut connaître le rendement mécanique d'une machine-outil, on a besoin de savoir quelle est la puissance prise à l'outil et donc d'avoir des renseignements sur les efforts de coupe. La valeur des efforts de coupe sert ainsi à dimensionner les organes de la machine et à prévoir les déformations des pièces.

Elle intervient dans la précision d'usinage dans les conditions d'apparitions des vibrations auto-excitées, ou broutage et indirectement dans la formation de l'état de surface.

Enfin, les efforts de coupes étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal dans le processus de formation du copeau, sont susceptibles de fournir des renseignements sur l'usinabilité du matériau coupé. Mais, il convient de remarquer que les efforts de coupe, si on n'en fait pas une analyse détaillée, ne sont pas un critère significatif de l'usinabilité [14].

1.9.4 Influence des facteurs de coupe sur les efforts :

A)- influence des angles d'outils coupes négatif :

L'effort de coupe augmente quand l'angle de coupe diminue. La composante tangentielle varie environ de 1% pour 1 degré d'angle.

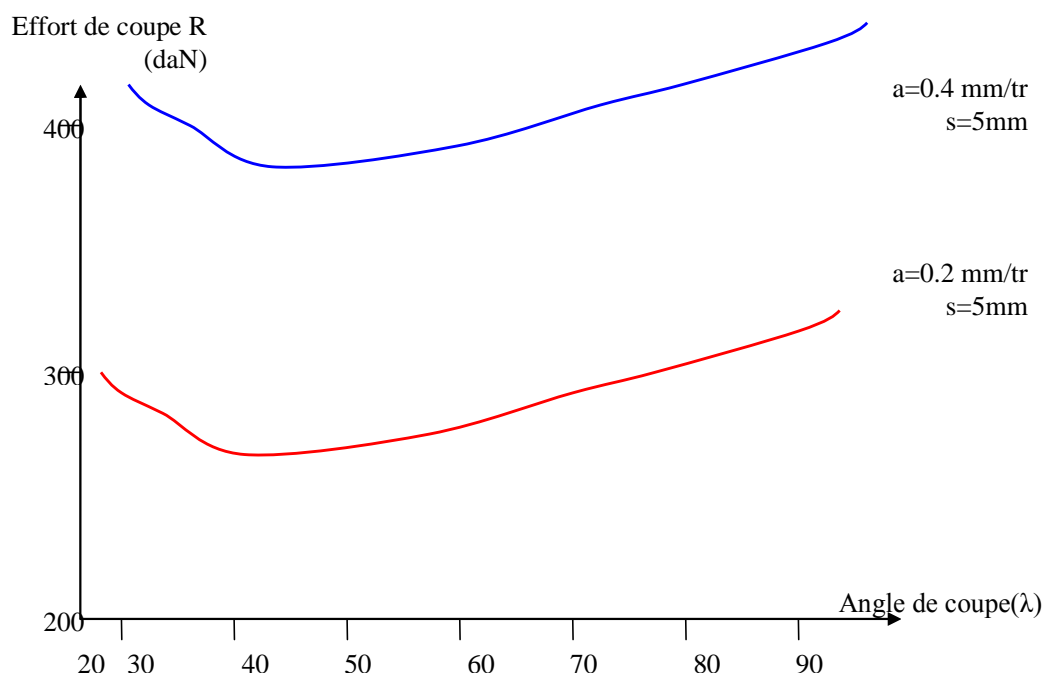


Figure 1.18: Variation de l'effort de coupe principal avec l'angle de direction.

La variation de l'angle de direction entre 45° et 90° n'entraîne pas de grandes variations de la grandeur de l'effort de coupe. Pour un angle de 40° à 60° on constate un minimum.

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 négatif est de donner au taillant de l'outil une valeur plus élevée qui autorise des coupes avec chocs.

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.

B)- Influence de la vitesse de coupe :

La variation de l'effort de coupe avec la vitesse de coupe affecte généralement l'allure de la figure (1.19). Il y a d'abord une diminution de l'effort de coupe avec la diminution de la vitesse de coupe, due à une diminution du frottement copeau outil. Puis l'apparition de l'arrête rapportée provoque une augmentation de l'effort de coupe jusqu'à un maximum. Ensuite l'effort décroît à cause de la disparition de l'arrête rapportée en sa valeur qui tend vers une limite avec 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.

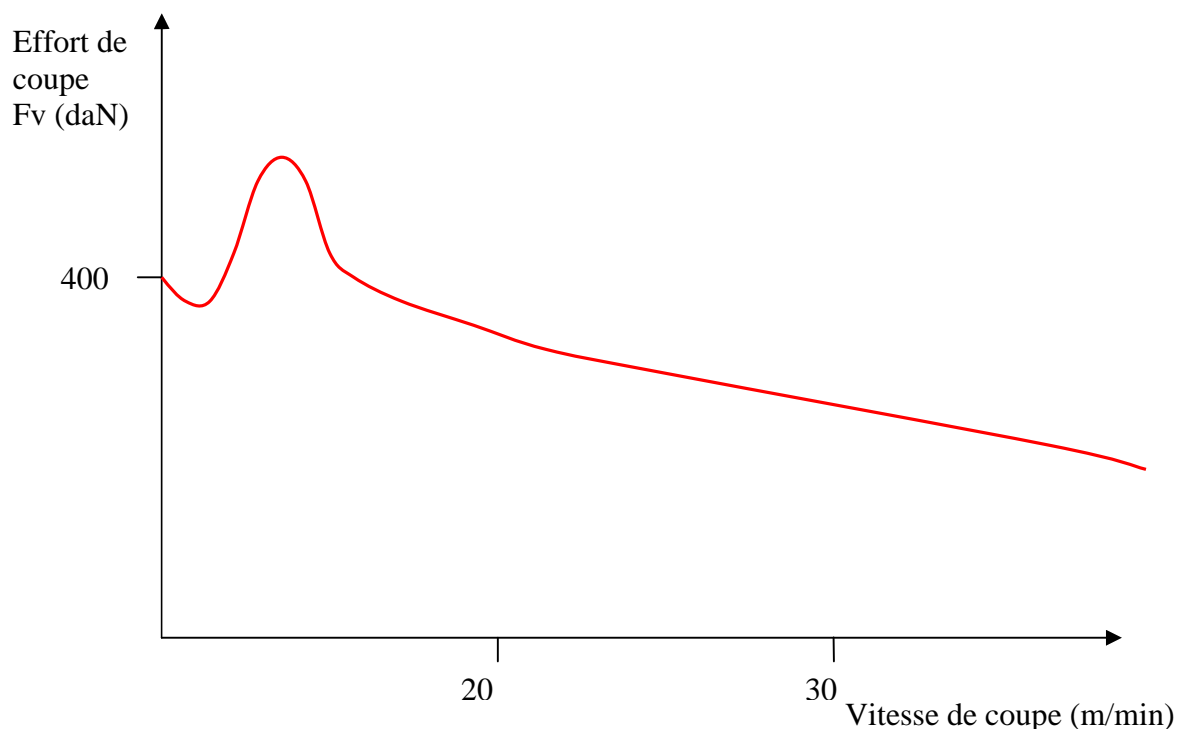


Figure 1.19: Variation de l'effort de coupe avec la vitesse de coupe.

c- Influence de l'avance et de la profondeur de passe :

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.

En fonction de l'avance, l'effort de coupe s'exprime par une fonction de puissance :

$$F = K \cdot S^m \quad (1.7)$$

- (m) étant inférieur à 1

Il en résulte que l'effort augmente moins vite que l'avance. Si on considère l'effort spécifique de coupe (effort F divisé par la section de coupe : F/S), on ce qui revient au même, l'énergie spécifique de coupe (énergie pendant l'unité de temps pour enlever un volume de métal F.v/s.v). On a une fonction décroissante de l'avance :

$$F/S = K/a \cdot S^{m-1} \tag{1.8}$$

La figure (1.20) montre en coordonnées bilogarithmiques la variation de l'effort de coupe spécifique en fonction de l'avance. La courbe représentative est une droite inclinée dont la pente est d'autant plus forte que la ductilité du métal est plus élevée aux avances suffisamment grandes. La courbe devient une droite parallèle à l'axe des avances, c'est à dire que l'énergie spécifique de coupe est constante, ou autrement dit l'effort de coupe est proportionnel à l'avance.

La décroissance de la courbe s'explique par la pente décroissante des efforts parasites (frottement de l'outil en dépouille, arrête rapportée, influence de l'arête de l'outil) dans la valeur totale de l'effort [14].

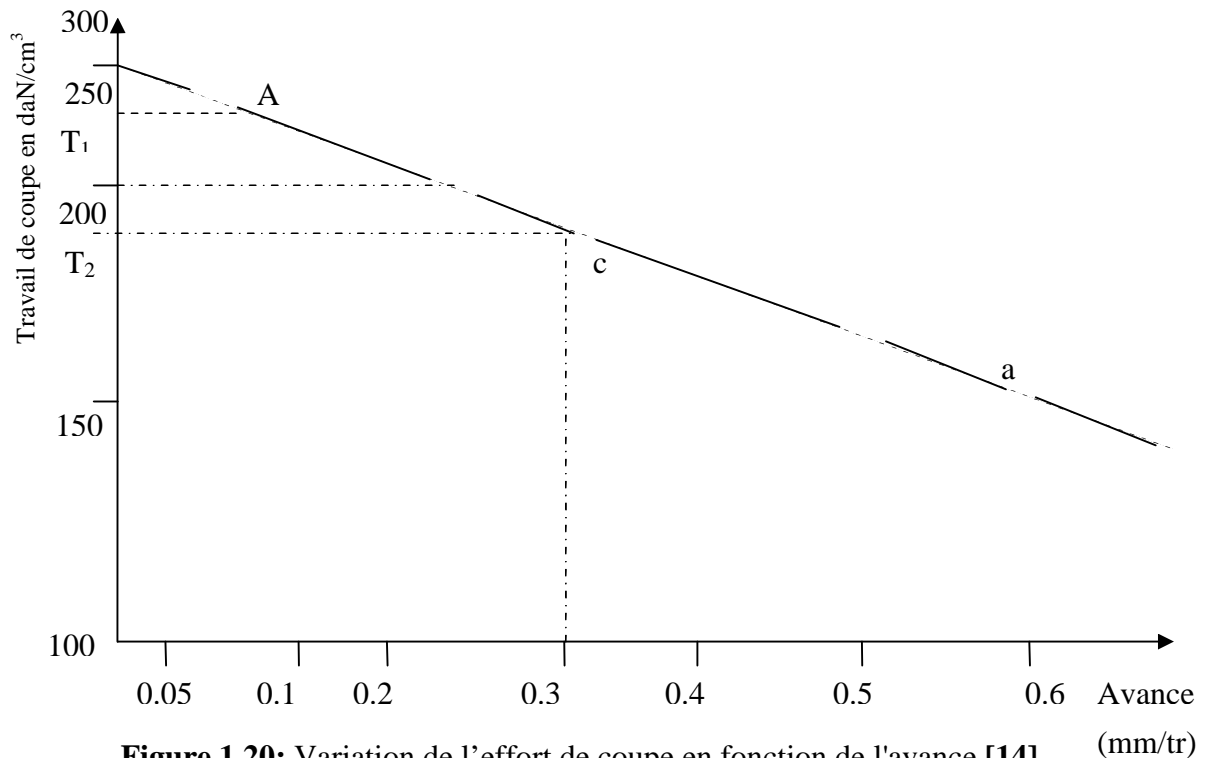


Figure 1.20: Variation de l'effort de coupe en fonction de l'avance [14].

1.9.5 Effort de coupe et puissance absorbée en perçage :

A)- Effort de coupes :

- La résultante (R) des efforts de coupe s'exerçant sur une arête qui admet trois composantes :
- Fc : Effort tangentiel de coupe.
 - Fa : Effort d'avance.
 - Fp : Effort de pénétration.

Si le foret est parfaitement affûté et si la matière de la pièce est homogène on a :

$$\begin{matrix} \rightarrow & \rightarrow & & \rightarrow & \rightarrow & & \rightarrow & \rightarrow \\ F_e = F'e & & F_a = F'a & & F_p = F'p \end{matrix}$$

Les composantes \vec{F}_p et \vec{F}'_p égales et pratiquement opposées s'annulent. La résultante des efforts d'avances $F_a = 2 F_a$ est portée par l'axe du foret, les forces F_c et F'_c constituent le couple résistant au forage donc on a les résultats expérimentaux suivant :

$$\text{Effort d'avance : } F_a \approx k.a.d \tag{1.9}$$

- Fa: Effort d'avance en newtons (N)
- a : Avance en (mm/tr).
- d : Diamètre du foret en (mm).
- K : Coefficient déterminé expérimentalement.

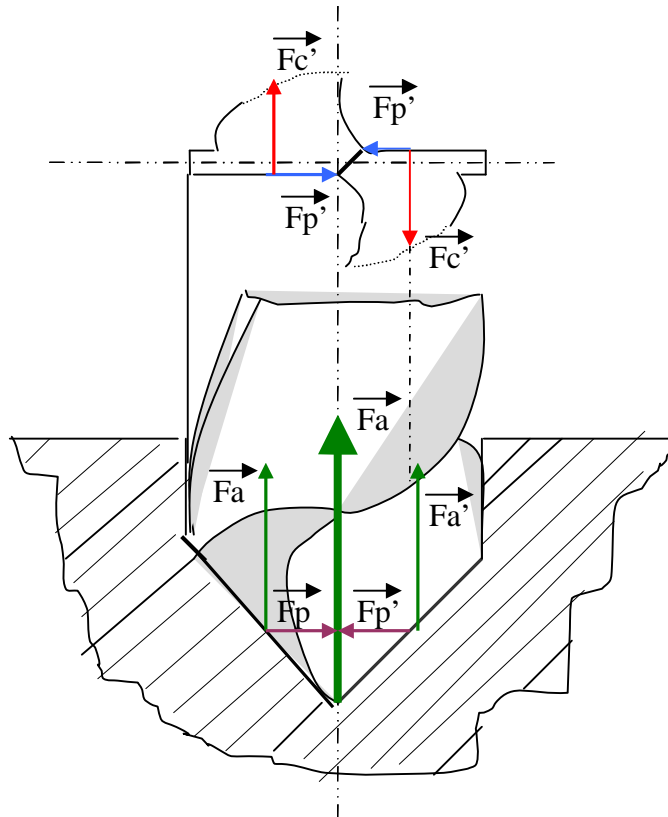


Figure 1.21: Effort de coupe en perçage [12].

Remarques.

L'amincissement de l'âme du foret (affûtage du type 3 pentes par exemple) réduit notablement l'effort de pénétration :

- 75% environ pour les aciers.
- 50% environ pour les alliages légers.

B)- puissance absorbée par la coupe :

La puissance absorbée par la coupe est proportionnelle à la résistance à la rupture de la matière (**R**), à un coefficient dépendant de la composition de la matière (**K**), à la section du copeau (**S**), à la vitesse de coupe (**V**) et inversement proportionnelle au rendement mécanique de la machine (60ρ) [13] et [17].

$$p_w = \frac{R.K.S.V}{60\rho} \text{ en (Kw)} \tag{1.10}$$

Puissance nécessaire à la coupe :

$$p = k.a.d.v. \quad (w) \quad (1.11)$$

p : Puissance nécessaire à la coupe en watts.

a : Avance en (mm/tr).

d : Diamètre du forêt en (mm).

v : Vitesse de coupe en (m/min).

k : Coefficient déterminé expérimentalement [12].

1.9.6. Qualité de surface usinée:

A)- Introductions :

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 coupes suivant les quelles se déroule l'usinage avec les outils de perçage, (foret, foret aléateur).

B)- Rugosité de surfaces usinées en perçage :

Lorsque ces opérations 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 prévues comme opérations finales la rugosité créée grâce à elles, interviendront directement en service. Compte tenue qu'elles sont très courantes en construction mécanique, et plus particulièrement en grande série, il importe d'en régler l'exécution et avec elle la qualité que l'on peut en atteindre.

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 entremêlés de dépôt, auquel succèdent des arrachements profonds des refoulements de métal et des rayures provenant de copeau, sur tout au-delà de 10 (m/min), la fonte ne donne pas lieu à des rayures car le copeau fragmenté ne se prête pas à ce rôle destructeur [1].

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 cannelés profonds (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. La hauteur théorique des aspérités soit (R_c) est de 20 à 30 fois inférieure à la hauteur réelle.

C)- Facteur de rugosité pour le perçage, le lamage et le chambrage :

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

C.1)- Propriétés du matériau usiné.

C.2)- Paramètres définissant le régime de coupe.

C.3)- Phénomène du copeau adhérent.

- C.4)- Géométrie de l'outil.
- C.5)- Usure de l'outil.
- C.6)- Rigidité de la machine- outil.
- C.7)- Fluides réfrigérants et lubrifiants.

C.1)- Influence du matériau usiné :

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

- a)-La forme de l'outil et traces qu'il laisse sur la pièce usinée pendant son mouvement de coupe.
- b)-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.
- c)-Arête rapportée (copeau adhérent).
- d)-Phénomènes dynamique et frottement entre les faces de l'outil et le copeau de la pièce usinée.
- e)-Echauffement local des couches superficielles de la pièce accompagnée de contrainte rémanente d'extension.
- f)-Changement de phases des diverses couches métalliques amenant une structure différenciée de volumes spécifiques variés.

Il faut dire que les deux derniers phénomènes évoqués dans la liste ci-dessus n'ont été traité par aucun auteur dans le cadre de ces problèmes [20].

Les essais pratiqués ont permis de conclure qu'une amélioration nette de la rugosité lorsqu'on augmente la dureté (HB) du matériau usiné (figure 1.22), 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.

Structure et rugosité pourront être liées en comparant les courbes du type:

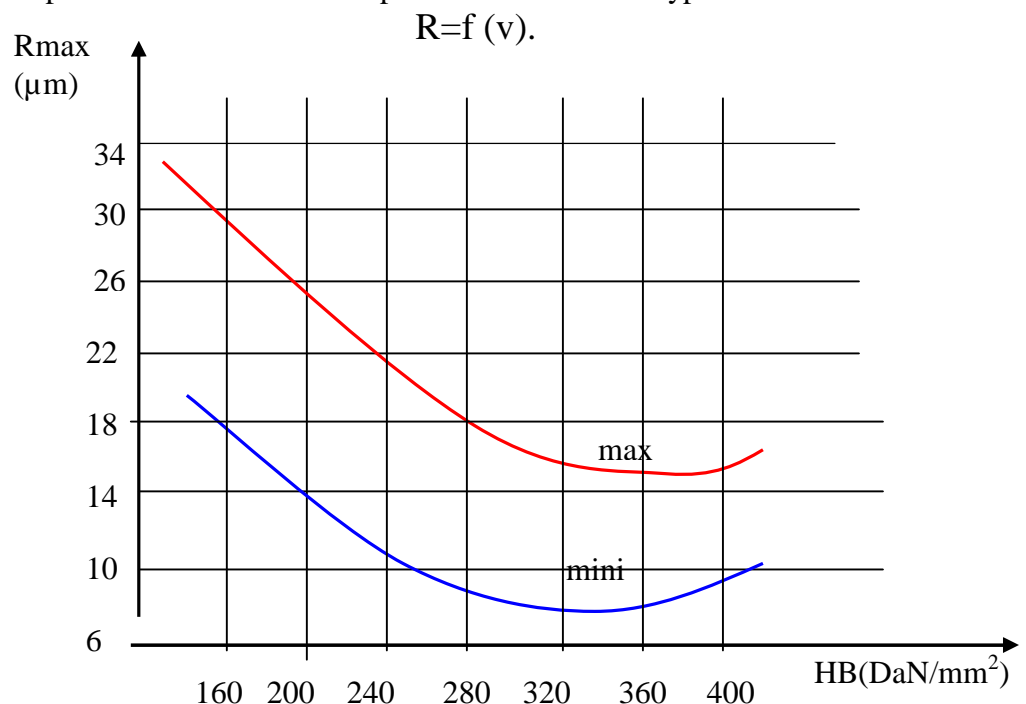


Figure 1.22 : Variation des hauteurs d'aspérités en fonction de la dureté du matériau usiné.

La rugosité obtenue du perçage des aciers ferritiques à teneurs en carbone égale à 0.05% et moins, n'est pas satisfaisant. Les déformations plastiques intenses engendrent un copeau adhérent.

Lorsque la teneur en carbone augmente (0.13 à 0.18 %), ainsi que celle en soufre et en phosphore (respectivement 0.015% et 0.045%) on obtint des résultats satisfaisants, comme exemple le perçage de l'acier étiré à froid.

C.2)-Influence du régime de coupe :

* influence de la vitesse de coupe:

C'est encore la vitesse de coupe qui prédomine par son influence prononcée sur la rugosité du perçage et chambrage la figure (1.23) traduit la rugosité obtenue pour le perçage de l'acier C 45. Le refroidissement était effectué avec une émulsion (débit 22 l/min) les courbes 1 et 2 correspondent au perçage avec respectivement une avance $S = 0.38\text{mm/tr}$ et $S = 0.28\text{mm/tr}$ tandis que la courbe 3 reprend l'avance $S = 0.28\text{mm/tr}$ mais avec un refroidissement à l'huile sulfuré. Il semble que la hauteur maximale d'aspérités soit extrême pour $V=15$ à 20 m/min en perçage.

La variation de la rugosité à vitesse de coupe croissante s'explique par la formation et la modification du copeau adhérent (arrêts rapportée) qui apparaît non seulement sur les lèvres mais aussi à leur intersection avec l'arête transversale.

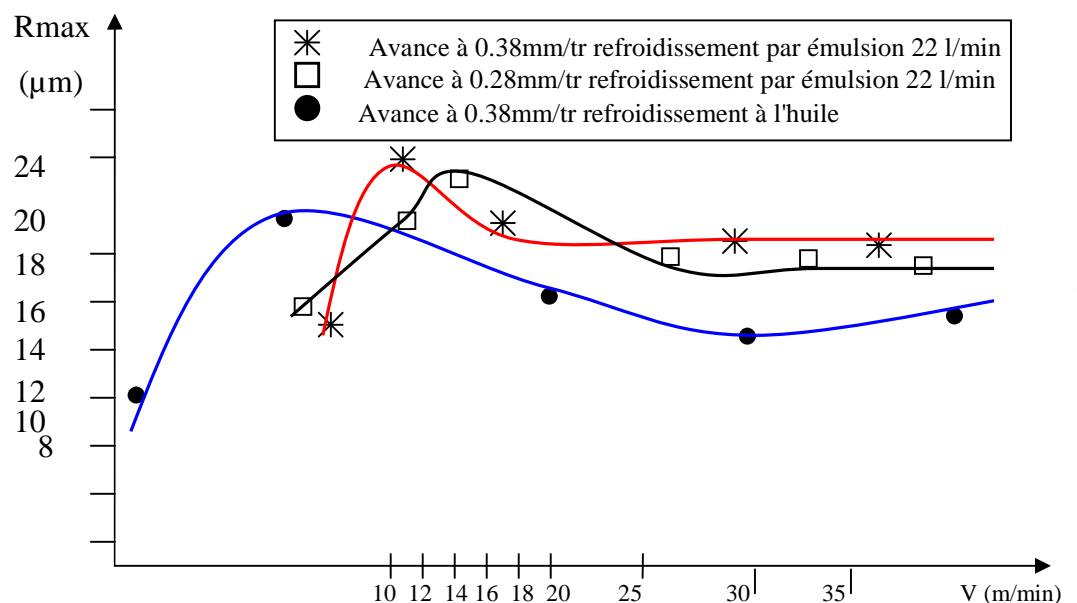


Figure 1.23 : Rugosité des surfaces percées à différentes avances en fonction de la vitesse de coupe.

* Influence de l'avance:

L'influence de l'avance sur la rugosité représentée par la figure (1.25), pour les travaux de centrage dans l'acier C 45 à vitesse $V = 31\text{m/min}$, on constate qu'augmenter l'avance revient à accroître la rugosité de la surface usinée.

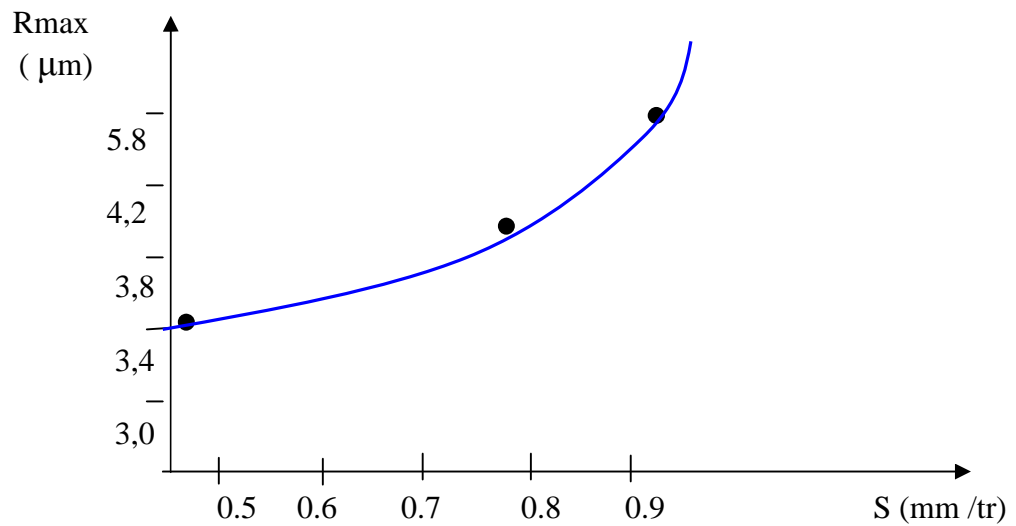


Figure 1.25: Variation de la rugosité en fonction de l’avance (cas du perçage).

C.3)- Influence du copeau adhérent (arête rapportée) :

L’arête rapportée altère la géométrie de l’outil et participe à la détérioration de la micro géométrie des arêtes tranchantes. Les formes et les dimensions de celle ci évoluent très rapidement pendant la coupe et les forces de frottements entre outil et pièce provoquent la rupture périodique. Ces particules sont écrasées sur la surface travaillée et se transforment en paillettes qui se stratifient par dessus les arêtes et les creux des aspérités pour augmenter la rugosité finale [6].

Sur la figure (1.24) on peut constater l’évolution de la hauteur des copeaux adhérent en fonction de la vitesse de coupe.

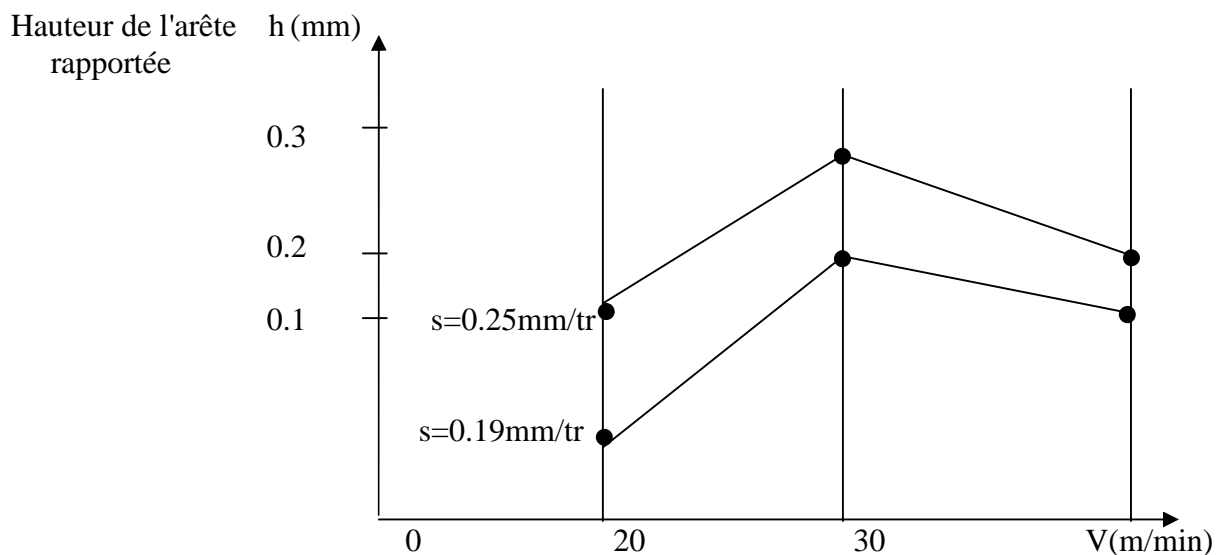


Figure 1.24 : Variation de la hauteur de l’arête rapportée en fonction de la vitesse de coupe.

C.4)- Influence de la géométrie de l’outil :

Parmi les affûtages supplémentaires susceptibles d’améliorer le travail des forets ont un effet positif sur la rugosité, l’affûtage double ou (deux - tailles). C’est l’exécution sur la face en dépouilles des baguettes de canaux brise copeau. L’affûtage « deux - tailles » des arêtes tranchants 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 amélioration de l'état de surface. En parallèle il est recommandé de compléter l'affûtage double par un détalonnage des baguettes permettant d'attribuer aux témoins cylindriques un véritable angle de coupe, on évite aussi le grippage voire la rupture du foret pendant le travail. Les brises copeaux seront exécutées sur la face en dépouille.

Ce sont des canaux dont les positions alternent sur les deux tranchants. Ils sont d'une importance capitale pour le perçage long qui ne laisse pas au copeau la faculté de se dégager (bourrage) au risque de rayer la paroi usinée. En même temps, la fragmentation des copeaux réduit la température et l'usure du foret. Il en résulte une amélioration de l'état de surface. Il a été reconnu expérimentalement que la rugosité obtenue sur les parois de trous borgnes est de 10 à 15% supérieure à celle des trous débouchant (trous libres). Cette remarque n'a rien d'extraordinaire si l'on pense que les conditions de coupe, l'évacuation de la chaleur et les copeaux présentent plus de difficultés [20].

C.5)- Influence de l'usure de l'outil :

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 arrêts actifs et des témoins cylindrique. La figure (1.26) montre l'influence de l'usure de deux forets en carbure métallique sur la rugosité pour le travail de fonte grise à $V=85\text{m/min}$ et $S=0.27\text{mm/tr}$ sans refroidissement. L'allure particulière des courbes tracées s'explique de la façon suivante :

-Les premiers trous usinés ont une rugosité relativement élevée, conséquences directe de la rugosité initiale des faces actives du foret.

-Suit à un certain polissage de celles-ci, la rugosité des parois percées diminue sensiblement.

- Puis, on voit apparaître l'usure des points d'attaques, les lèvres s'émoussent (arrondi de rayant $\rho < 30\mu\text{m}$) et sont réunies alors les conditions favorables à la naissance du copeau adhérent, sur les crêtes tranchantes et sur les parois usinées. Les aspérités grandissent, la rugosité des pièces usinées croît.

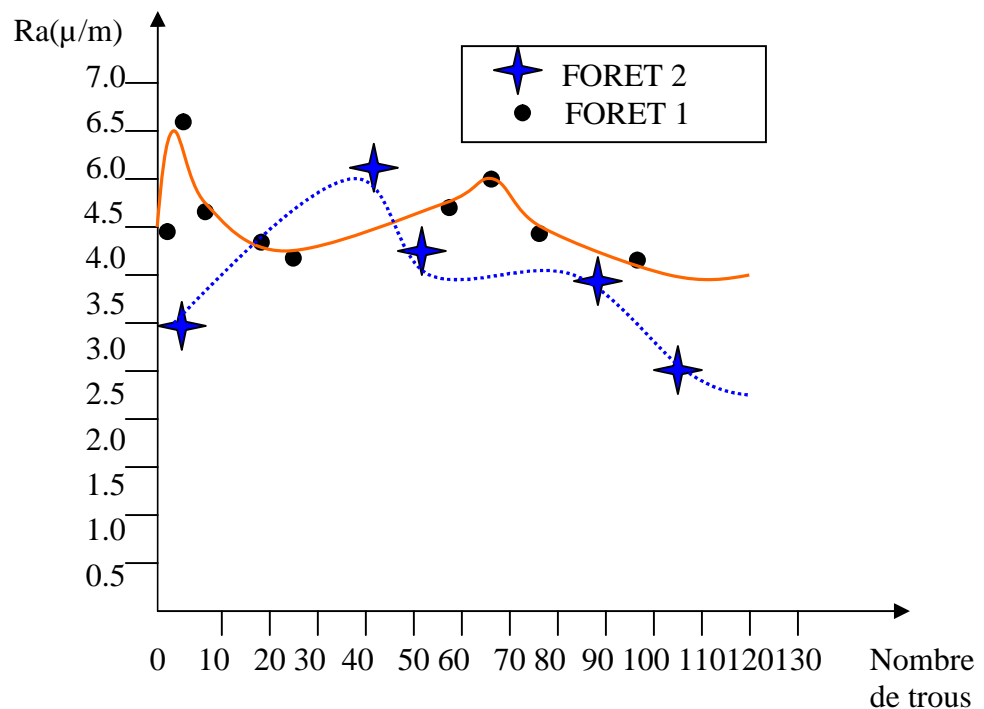


Figure. 1.26: Influence de l'usure de l'outil sur la rugosité des surfaces usinées lors du perçage.

C.6)- Influence de la rigidité de la machine- outil :

Si la machine outil n'est pas suffisamment rigide l'apparition de vibration sur ces différents organes (console table, colonne), pourra augmenter la rugosité des surfaces usinés 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 tout comme le foret d'ailleurs qui se présente à nouveau perpendiculairement à la surface frontale de la pièce. Le retour s'effectue donc dans une position relative différente et le foret, dans sa course de sortie aplanit les cerfs et quelques aspérités mais en crée d'autres et la rugosité résultante ne

peu qu'augmenter. Il se dégage des faits rapportés ci- dessus que le travail accompli sur une perceuse ou plus généralement sur une machine-outil qui n'est pas suffisamment rigide, un risque d'augmenter considérablement les hauteurs d'aspérités sans que l'on puisse apprécier quantitativement l'étendue des dégâts apportés par ce défaut seul.

C.7)- Influence des fluides réfrigérants et lubrifiants :

Les résultats expérimentaux montrent que l'apport de fluide réfrigérant et lubrifiant améliore l'état de surface, non seulement pour l'abaissement des aspérités, mais par un nivellement général du micro profil.

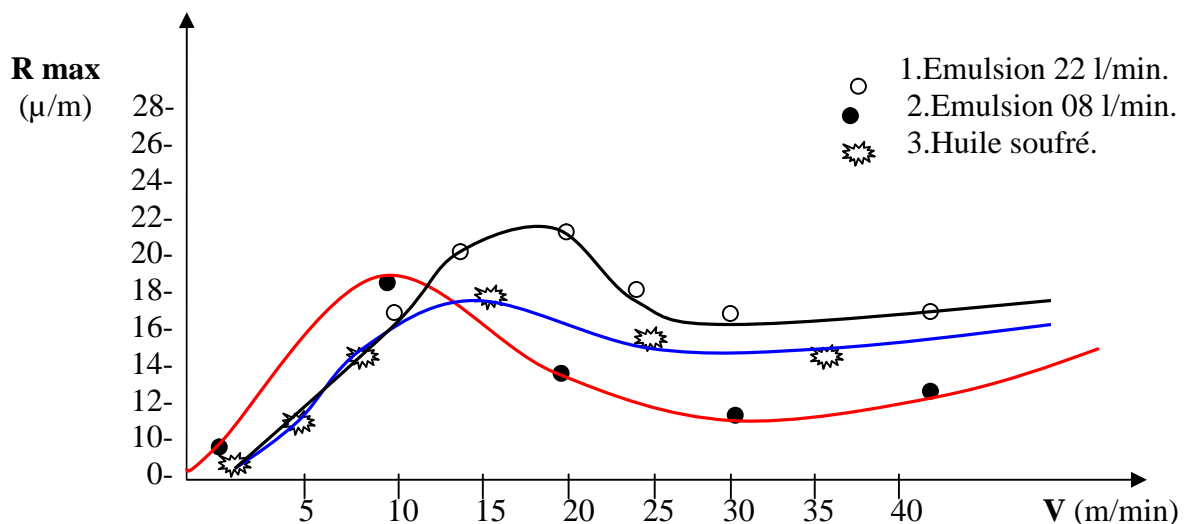


Figure 1.27: Influence des fluides réfrigérants et lubrifiants sur la rugosité des parois de trous percés.

Pour l'acier, l'absorption de chaleur par l'émulsion joue un rôle de premier rang dans la qualité micro géométrique de la surface. On obtient des résultats encore meilleur avec une huile minérale soufrée de (1 à 1.5 %) et de viscosité de 3.75° Engler à 50°C . Outre sa capacité de refroidissement, ce liquide constitue un film protecteur résistant entre l'arête de

l'outil et la surface usinée, le copeau adhérent n'a plus tendance à se former, la rugosité diminue de 30 à 35 % par rapport à celle réalisée avec une émulsion. L'illustration de cette différence apparaît sur la figure (1.27) qui résume des expériences conduites sur le perçage de l'acier C 45, courbe 1 émulsion débitée à 22 (l/min) , courbe 2 émulsion débitée de 8 (l/min), Courbe 3 huiles soufrées.

La présence du soufre dans l'huile rend le dépôt métallique sur l'arête de coupe très fragile et la fréquence de rupture devient si grande que les faces actives restent sous protection et s'usent rapidement. En contre partie, l'huile évacue mal la chaleur et la durée de vie de l'outil s'en résulte. C'est pour quoi ce fluide est préconisé pour améliorer la rugosité seulement dans le cas de pièces courtes en acier et pour les forets de grands diamètres.

1.9.7 Lubrification méthodes et produits :

A)- Introduction :

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 accourt aux liquides d'arrosage et de lubrification, ces dernières 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 ajoutées 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 de soufre [15].

B)- Rôle du lubrifiant :

La lubrification permet de changer le coefficient de frottement entre deux pièces mécaniques afin de faciliter le glissement ou le roulement entre elles ainsi que d'éviter l'usure et les échauffements.

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 d'*epilamen* (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 1^{er} groupe on 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 peu ajouter à l'eau du savon ou des agents mouillants spéciaux qui diminuent brusquement la tension superficielle de l'eau, leur capacité thermique est très élevée ; aussi

ils sont employées pour accroître la tenue de l'outil lorsque l'effet refroidissant est déterminant.

C)- 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 soluble 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 2^{ème} 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 tensio-actives 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 c'est-à-dire activées par du soufres [15].

D)- 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.

1.10 Conclusion et position du problème:

La naissance d'un nouveau besoin industriel pour réduire le coût et améliorer la qualité du produit ont 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. Elle a été définie de plusieurs façons selon les chercheurs et pour synthétiser nous retenons la plus répandue et qui se rapproche de l'objectif de notre étude dans ce qui suit:

" *L'usinabilité est la facilité 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.

Les critères sont divisés en deux catégories:

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

Finalement nous décidons de retenir la méthode de longue durée pour la réalisation de nos recherches bien qu'elle exige une grande quantité de matière et beaucoup de temps, mais elle dégage des résultats très proches la réalité. Concernant les critères évaluant l'usinabilité de l'acier C18 au cours du perçage, la durée de vie du foret est celui qui s'impose le plus car nous pensons qu'il est le plus déterminant par rapport aux autres critères et comme critère complémentaire la rugosité de la surface usinée.

CHAPITRE II:

METHODOLOGIE DE RECHERCHE ET PREPARATION DES EXPERIENCES :

2.1 : Méthodologie de recherche :

L'étude du phénomène de l'usure des forets hélicoïdaux suppose la connaissance des différents facteurs qui s'imposent pour provoquer leur endommagement. Parmi ces facteurs nous citons ceux du régime de coupe comme la vitesse (V), l'avance (S) et la profondeur de passe pour notre cas c'est le diamètre du foret (t), la géométrie de l'outil (r , α , β , γ , x , ε ...) et les caractéristiques du matériau mis en œuvre (HB, Rr, %C, %S, ...), ainsi que les conditions de travail (machine, lubrification ...), Tous ces facteurs constituent les paramètres d'entrée du système d'usinage. La tenue, la précision, les efforts etc... présentent les paramètres de sortie (figure 2.1).

SYSTEME D'USINAGE

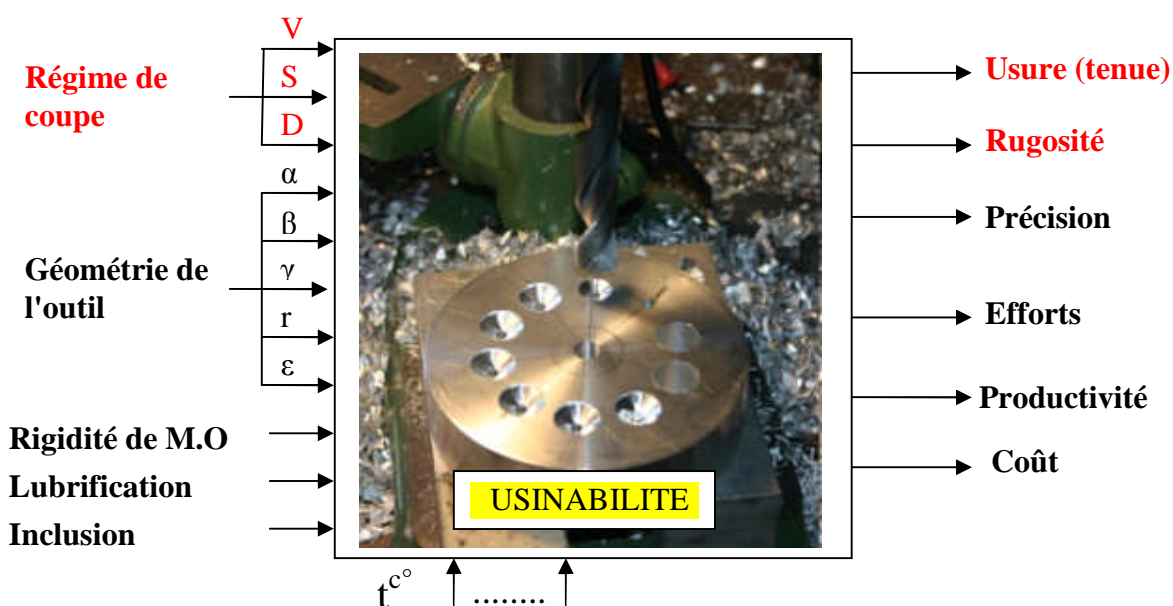


Figure 2.1 : Schéma structural du procédé d'usinage.

Soient X_1, X_2, \dots, X_n les paramètres d'entrée, et Y_1, Y_2, \dots, Y_n ceux de sortie. Pour étudier l'action d'un ou de plusieurs facteurs (X_1, X_2, \dots, X_n) sur un paramètre Y , on est amené à utiliser les deux méthodes suivantes :

2.1.1. Méthode uni factorielle :

Cette méthode est utilisée lorsqu'il s'agit de caractériser l'action d'un seul facteur X sur un paramètre Y . Il s'agit de déterminer une relation du type $Y = F(X)$, en se basant sur le plan d'expérience présenté dans le tableau (2.1).

Tableau 2.1: Illustre la méthode unifactorielle.

N°	facteur	paramètre			
	X ₁	Y ₁	Y ₁	Y ₃	Y _{moy}
1	X ₁₁	Y ₁₁	Y ₂₁	Y ₃₁	Y _{moy1}
2	X ₁₂	Y ₁₂	Y ₂₂	Y ₃₂	Y _{moy2}
.
I	X _{i1i}	Y _{1i}	Y _{2i}	Y _{3i}	Y _{moyi}
.
n	X _{1n}	Y _{1n}	Y _{2n}	Y _{3n}	Y _{moyn}

Dans ce cas les essais ont été répétés trois fois. Ceci est dans le but d'augmenter la fiabilité des résultats.

2.1.2. 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 2.2)

Tableau 2.2: Illustre la méthode multifactorielle.

N°	Facteurs						paramètres			
	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 _{in}	.	X _{mn}	Y _{1n}	Y _{2n}	Y ₁	Y _{moyn}

Chaque facteur Xi 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) nous nous servons de X_{min}, X_{max}. (Figure 2.1 et Figure 2.2)

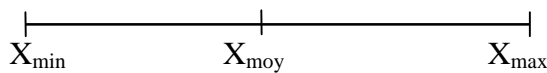


Figure 2.2 : Intervalle de variation à trois niveaux

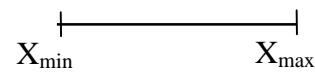


Figure 2.3: Intervalle de variation à deux niveaux

Le nombre d'expériences N est une fonction du nombre de facteurs (m) et du nombre de niveaux P, adopté pour chaque variable :

$$N = P^m \tag{2.1}$$

La matrice des expériences planifiées illustré dans le tableau (2.3), prend la même forme que celle du tableau (2.2) tout 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 2.3: La matrice des expériences planifiées.

N°	facteurs							paramètres			
	X_1	X_2	X_3	.	X_j	.	X_m	Y_{11}	Y_{21}	Y_{31}	$Y_{\text{moy}1}$
1	-1	-1	-1					Y_{12}	Y_{22}	Y_{32}	$Y_{\text{moy}2}$
2	0	-1	-1					.	.	.	.
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					.	.	.	.
...
N	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	$.Y_{1N}$	Y_{2N}	Y_{3N}	Y_{moy}

Dans notre cas, les facteurs sont au nombre de trois (V, Set 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 2.4: 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}	$Y_{\text{moy}1}$
2	+1	-1	-1	Y_{12}	Y_{22}	Y_{32}	$Y_{\text{moy}2}$
3	-1	+1	-1	Y_{13}	Y_{23}	Y_{33}	$Y_{\text{moy}3}$
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}	$Y_{\text{moy}8}$

Dans la coupe des métaux, les lois liant la sortie Y d'un système d'usinage aux paramètres d'entrée X_1, X_2, \dots, X_n sont en général de la forme :

$$Y = C \cdot X_1^{k_1} \cdot X_2^{k_2} \tag{2.2}$$

-C : est une constante tenant compte de l'influence des facteurs ne figurant pas dans la relation (2.2).

- 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 [1].

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 [45].

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 (2.2) prend la forme suivante :

$$Y = C \cdot (X_1, X_2, \dots, X_n) \cdot X_1^{\alpha(X_1, X_2, \dots, X_n)} \cdot X_2^{\beta(X_1, X_2, \dots, X_n)} \cdot X_3^{\gamma(X_1, X_2, \dots, X_n)} \cdot X_n^{\delta(X_1, X_2, \dots, X_n)} \quad (2.3)$$

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

Pour définir la relation (2.3) on détermine les fonctions :

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

Pour cela on fait recourt à la méthode des moindres carrés, qui repose sur la minimisation des écarts quadratiques δY_i illustré dans la figure (2.4).

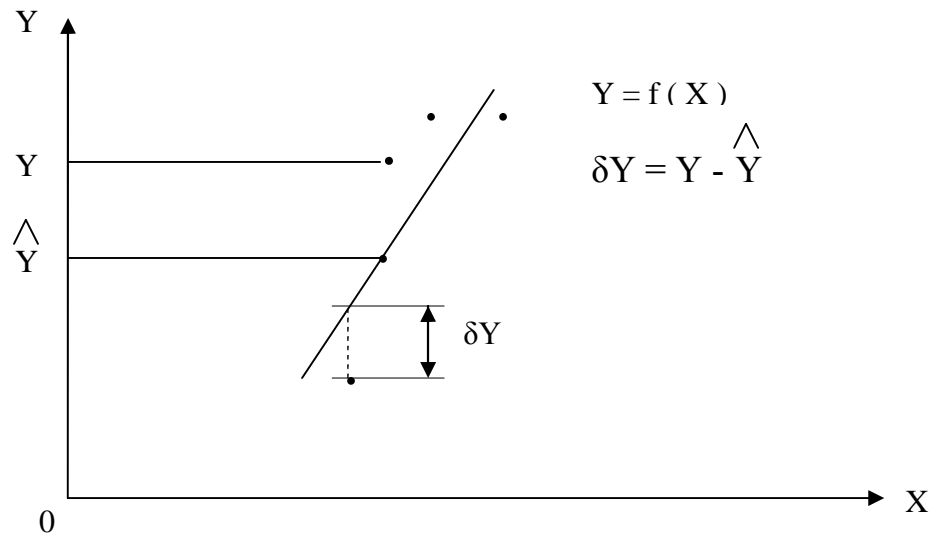


Figure 2.4: Interprétation géométrique de la méthode des moindres carrés.

Y : Valeur de sortie relevée directement de l'expérience.

\hat{Y} : Valeur de Y obtenue par le modèle.

Si nous prenons les logarithmes des deux membres de l'équation (2.3) nous obtenons :

$$\begin{aligned} \ln Y = \ln C \cdot (X_1, X_2, \dots, X_n) + \alpha(X_1, X_2, \dots, X_n) \ln X_1 + \beta(X_1, X_2, \dots, X_n) \ln X_2 \\ + \gamma(X_1, X_2, \dots, X_n) \ln X_3 + \dots, \delta(X_1, X_2, \dots, X_n) \ln X_n \end{aligned} \quad (2.4)$$

Si on pose les changements de variables suivants :

$$\begin{aligned} * y = \ln Y ; C(X_1, X_2, \dots, X_n) = \ln C(X_1, X_2, \dots, X_n) ; X_1 = \ln X_1 ; X_2 = \ln X_2 ; \\ X_3 = \ln X_3 \dots ; X_n = \ln X_n \end{aligned}$$

a- Coefficients et exposant pour modèle simple:

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

$$\left. \begin{aligned} e_0 &= 1/N \sum Y_i \\ e_1 &= 1/N \sum Y_i X_{1i} \\ e_2 &= 1/N \sum Y_i X_{2i} \\ e_3 &= 1/N \sum Y_i X_{3i} \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

- Ce qui entraîne qu'à ce moment on peut dire que la relation (2.11) 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 :

$$X_i = \frac{2[\ln X_i - \ln X_{i\max}]}{[\ln X_{i\max} - \ln X_{i\min}]} + 1 \quad (2.15)$$

- Pour trois paramètres, nous aurons :

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \frac{2[\ln X_1 - \ln X_{1\max}]}{[\ln X_{1\max} - \ln X_{1\min}]} + 1 \\ X_2 &= \frac{2[\ln X_2 - \ln X_{2\max}]}{[\ln X_{2\max} - \ln X_{2\min}]} + 1 \\ X_3 &= \frac{2[\ln X_3 - \ln X_{3\max}]}{[\ln X_{3\max} - \ln X_{3\min}]} + 1 \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

b- Coefficients et exposant pour modèle combiné:

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 constantes du modèle seront calculés d'après les formules suivantes:

$$\left. \begin{aligned} e_0 &= 1/N \sum Y_i \\ e_1 &= 1/N \sum Y_i X_{1i} \\ e_2 &= 1/N \sum Y_i X_{2i} \\ e_3 &= 1/N \sum Y_i X_{3i} \\ e_{12} &= 1/N \sum Y_i X_{1i} X_{2i} \\ e_{13} &= 1/N \sum Y_i X_{1i} X_{3i} \\ e_{23} &= 1/N \sum Y_i X_{2i} X_{3i} \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

- Ce qui entraîne qu'à ce moment on peut dire que la relation (2.11) est définie pour le modèle combiné comme suite :

$$Y = e_0 + e_1 X_1 + e_2 X_2 + e_3 X_3 + e_{12} X_{12} + e_{13} X_{13} + e_{23} X_{23} \quad (2.18)$$

- 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 :

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

$$Y = e^{k_0} X_1^{(k_1 + k_{12} \ln X_2)} X_2^{(k_2 + k_{23} \ln X_3)} X_3^{(k_3 + k_{13} \ln X_3)} \quad (2.18.1)$$

N°2 :

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

$$Y = e^{k_0} X_1^{(k_1 + k_{13} \ln X_3)} X_2^{(k_2 + k_{12} \ln X_1)} X_3^{(k_3 + k_{23} \ln X_2)} \quad (2.18.2)$$

N°3 :

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

$$Y = e^{k_0} X_1^{(k_1 + k_{12} \ln X_2 + k_{13} \ln X_3)} X_2^{(k_2 + k_{23} \ln X_3)} X_3^{k_3} \quad (2.18.3)$$

N°4 :

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

$$Y = e^{k_0} X_1^{(k_1 + k_{13} \ln X_3)} X_2^{(k_2 + k_{12} \ln X_1 + k_{23} \ln X_3)} X_3^{k_3} \quad (2.18.4)$$

N°5 :

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

$$Y = e^{k_0} X_1^{(k_1 + \ln X_2)} X_2^{k_2} X_3^{(k_3 + k_{13} \ln X_1 + k_{23} \ln X_2)} \quad (2.18.5)$$

N°6 :

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

$$Y = e^{k_0} X_1^{(k_1 + k_{12} \ln X_2 + k_{13} \ln X_3)} X_2^{k_2} X_3^{(k_3 + k_{23} \ln X_2)} \quad (2.18.6)$$

N°7 :

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

$$Y = e^{k_0} X_1^{k_1} X_2^{(k_2 + k_{12} \ln X_1)} X_3^{(k_3 + k_{13} \ln X_1 + k_{23} \ln X_2)} \quad (2.18.7)$$

N°8 :

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

$$Y = e^{k_0} X_1^{k_1} X_2^{(k_2 + k_{12} \ln X_1 + k_{23} \ln X_3)} X_3^{(k_3 + k_{13} \ln X_1)} \quad (2.18.8)$$

Nous avons dit, au début de ce chapitre que le coefficient C du modèle (2.2) ne sera plus une constante mais une fonction de X_1, X_2, \dots, X_n (2.3), 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 :

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

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 (2.18) 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 (2.11) 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 :

$$T = e^{k_0} V^{k_1}$$

Avec : $C = e^{k_0}$ et $n=1/k_1$

K_0 et k_1 sont donnés par la relation (2.17) :

2.2. Préparation des expériences :

Les expériences ont été réalisées au laboratoire de fabrication mécanique de l'institut du Génie Mécanique de l'université de Annaba. En mettant en œuvre nos propres moyens, machine outil, les outils de coupe, la matière à usiner et aussi les instruments de contrôle dans les conditions opératoires suivantes :

2.2.1. Machine outil :

Les essais ont été réalisés sur une perceuse à colonne modèle 2H125T n° 6963, fabriquée en 1971 en URSS, destinée pour la fabrication unitaire et petite série. La puissance du moteur électrique est de 2,2 KW et sa fréquence de rotation est de 1430 tr/min (Figure 2.5). Les fréquences de rotation disponibles sur la broche de la machine sont :

(45 ; 63 ; 90 ; 125 ; 355 ; 500 ; 710 ; 1000 ; 1400 ; 2000) tr/min

Les avances disponibles sur la machine sont comme suit :

(0,1 ; 0,14 ; 0,2 ; 0,28 ; 0,4 ; 0,56 ; 0,8 ; 1,12 ; 1,6) mm/tr

La machine ainsi décrite est munie d'un étau jouant le rôle de dispositif de serrage et de positionnement de la pièce.

Les essais ont été réalisés en présence d'une lubrification abondante à base de l'huile soluble avec un débit de 2,4 l/min.



Figure 2.5 : Peseuse à colonne modèle 2H125T.

La perceuse dispose d'une manette pour sélectionner les avances et une autre pour la sélection du nombre de tour selon le régime de coupe adopté (Figure 2.6).



Figure 2.6: Sélecteur des nombres de tours et des avances.

2.2.2. Matière à usiner :

Nous nous sommes servis d'une barre laminée de l'acier C18 ayant les caractéristiques mécaniques et chimiques présentées dans le tableau (2.5) :

Tableau 2.5: Caractéristiques mécaniques et chimiques de l'acier C18.

Composition chimique	Caractéristiques mécaniques
C : 0,180 %	-Dureté : 67.8 HRB -Résistance max : 59 daN/mm ² -Allongement : 10 %
Mn : 0,492 %	
Si : 0,307 %	
P : 0,09 %	
S : 0,033 %	
Cr : 0.032 %	
Mo : 0,021 %	
Ni : 0,078 %	
V : traces	
Cu : 0,195	

2.2.3. Préparation des éprouvettes :

A partir d'une barre laminée de longueur 6mm de section 120x120 mm², des ébauches on été découpées à l'aide d'une scie mécanique suivant des longueurs variant de 75 à 95 mm.



Figure 2.7: Opération de découpage de la barre d'acier sur la scie mécanique.

En suite nous avons procédé au surfaçage des deux faces des éprouvettes sur une fraiseuse verticale 6 H 11, de puissance 4,5KW, ceci pour assurer le parallélisme de la surface d'appui avec celle de travail, ce qui réduit la longueur des échantillons à une hauteur de 70 à 80 mm.



Figure 2.8: Préparation des deux faces des éprouvettes.

Après avoir terminé la préparation des éprouvettes, nous avons procédé au traçage et au centrage de la face de travail afin d'avoir un bon guidage du foret et une bonne répartition des trous selon le diamètre choisi.

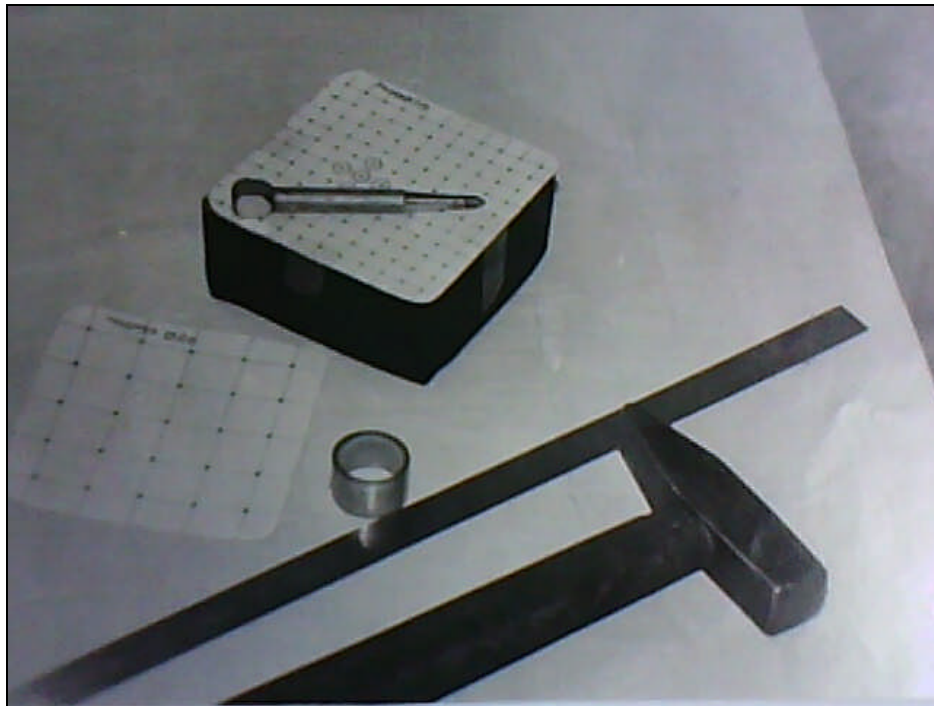


Figure 2.9 : Traçage et centrage de l'ébauche.

L'éprouvette étant prête, on la positionne sur l'étau de la perceuse toute en lui assurant une bonne fixation en respectant la perpendicularité de la surface de travail à l'axe du foret.



Figure 2.10: Positionnement de la pièce sur l'étau.

2.2.4. Les outils de coupes :

Pour réaliser les expériences nous avons utilisé deux séries de forets (série courte et série longue) dont chaque une comprend deux diamètres différents détaillées dans ce qui suit:

A)- Série courte :

a-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 $2\chi_r = 120^\circ$.

b- 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 $2\chi_r = 118^\circ$.

B)- Série longue :

a-Foret hélicoïdale à queue conique de 20mm de diamètre : Il a une longueur totale de 315mm et une longueur taillée de 210mm, la partie active est de 10mm. L'angle au sommet $2\chi_r = 120^\circ$.

b- Foret hélicoïdal à queue cylindrique de 9mm de diamètre : IL a une longueur totale de 175mm, et une longueur de guidage de 115mm, et d'un angle au sommet $2\chi_r = 118^\circ$.

Les modèles de forets utilisés pour nos essais sont en acier rapide (HSS ou *High Speed Steel*). C'est un 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. L'affûtage peut être effectué à la main.

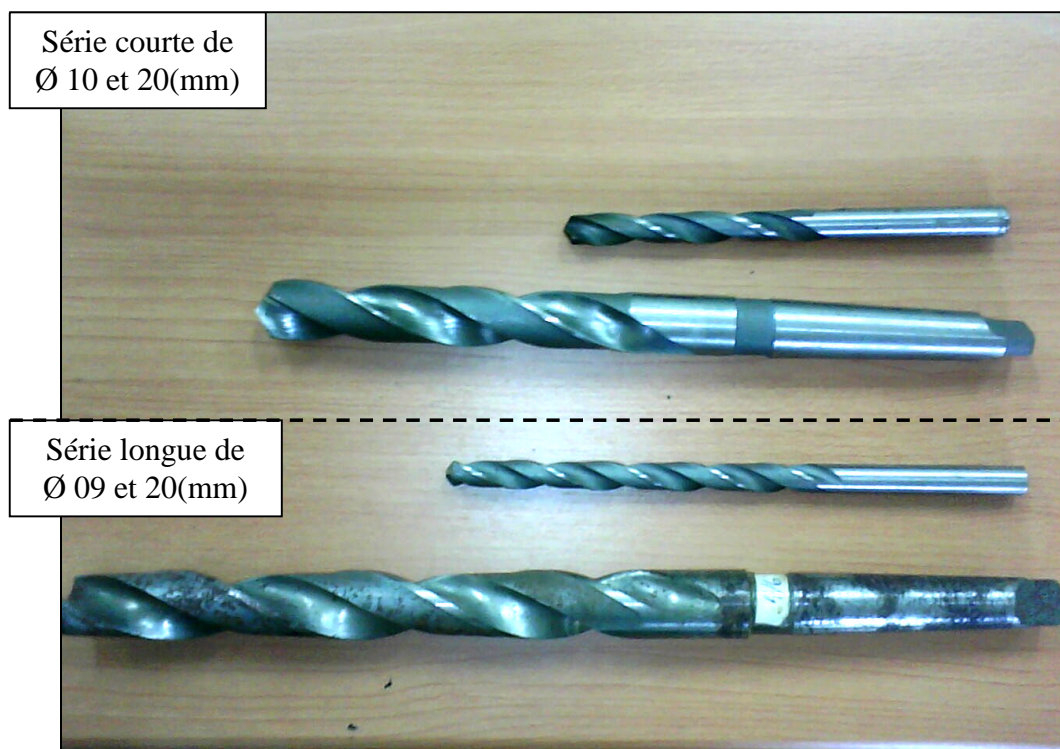


Figure 2.11 : Modèles de forets utilisés pour les essais.

2.2.5 Conditions de coupe :

Les expériences ont été réalisées suivant les conditions de coupe illustrées sur le tableau (2.6):

Tableau 2.6: Conditions de réalisation des essais lors de l'usinage de l'acier C18 avec les deux séries de forets.

Conditions de coupe	Série courte	Série longue
Vitesse (V)	11.15 → 22.30 m/min	14.14 → 31.41 m/min
Avance (S)	0.1 → 0.2 mm/tr	0.10 → 0.28 mm/tr
Diamètre (D)	10 → 20 mm	09 → 20 mm
Débit de la lubrification $\phi=$	2.4 l/min	2.5 l/min

La longueur à percer varie de 70 à 80mm, cependant les trous percés sont débouchant. L'usinage a été effectué avec une lubrification abondante à base d'huile soluble et avec un débit de 2,5 l/min.

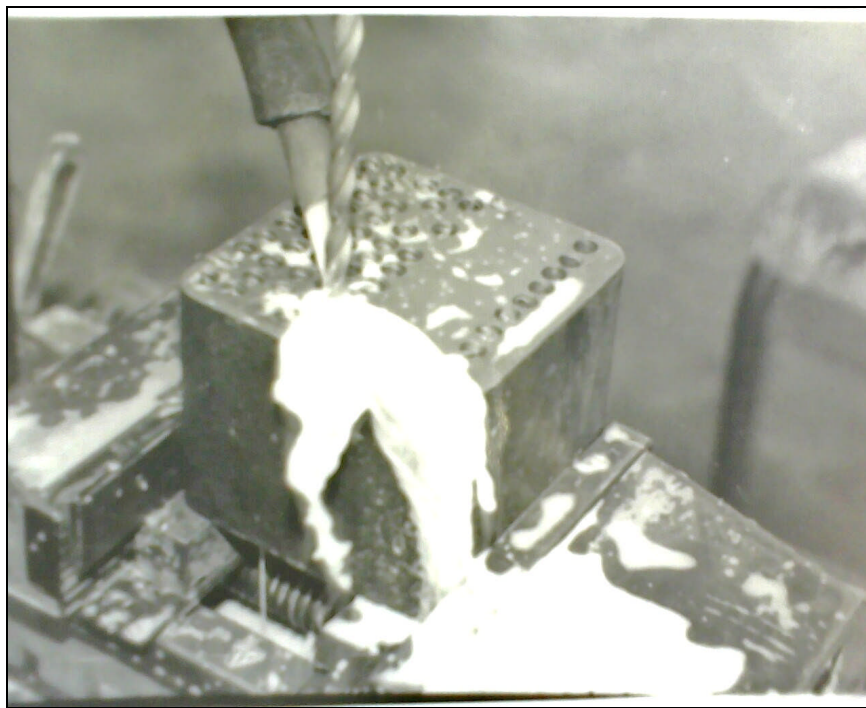


Figure 2.12: Illustration d'une opération de perçage.

Nous avons consommé 64 échantillons pour la réalisation des essais, avec un nombre de trous percés égale à 2710 pendant un temps net de 3138 minute soit d'environ 52 heures.



Figure 2.13: Lot de pièces suite à la réalisation des essais.

2.2.6. Appareil de mesure et méthode :

A)- Appareil de mesure d'usure :

Les mesures d'usure ont été réalisées sur un microscope d'atelier conçu initialement pour contrôler les paramètres de filetage figure (2.14).



Figure 2.14 : Microscope d'atelier (aperçu initial).

Dans son état initial ce microscope ne pouvait pas nous être utile pour mesurer et contrôler l'évolution de l'usure. C'est pour quoi nous avons procédé à la conception et à la fabrication d'un dispositif, qui permet 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 et le listel.

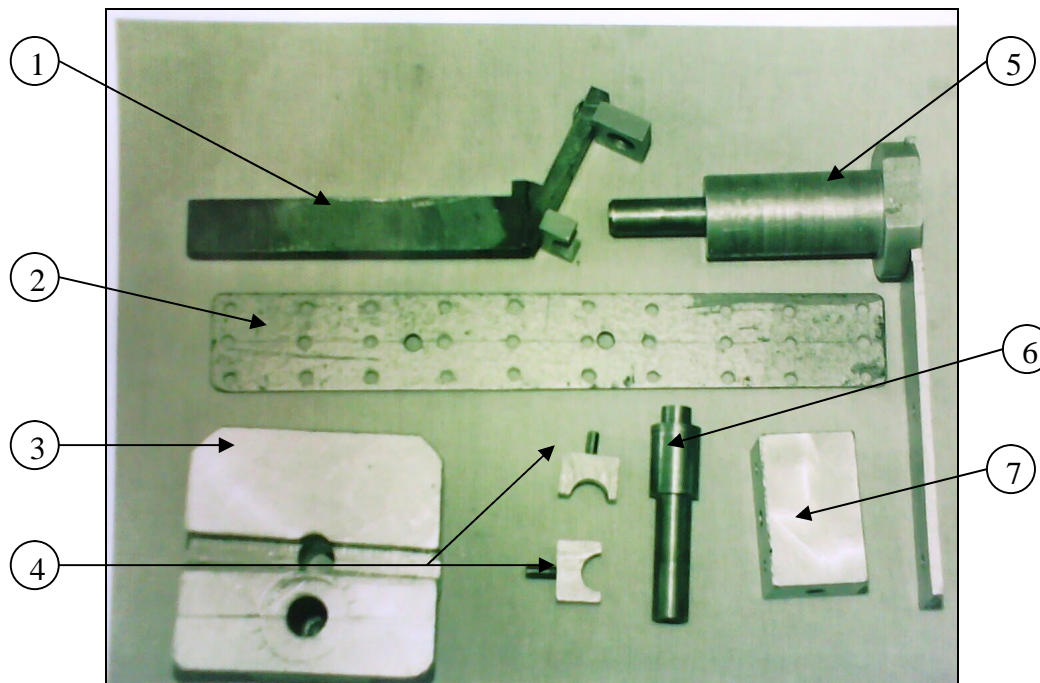


Figure 2.15: Elements éclatés du dispositif de positionnement conçu et réalisé.

Tableau 2.7: Nomenclature du dispositif de positionnement.

N°	Pièce	N ^{bre}	Fonctionnement
1	Porte foret incliné	01	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	Sert à adapter la position du système viseur (oculaire du microscope optique), en fonction de la position du foret.
3	Socle	01	Peut supporter et positionner les différents modèles de porte foret selon les différents diamètres.
4	brides	02	Met en position horizontale le foret de diamètre 20 afin de visionner l'usure sur le listel.
5	Tourelle	01	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	Peut être supporté par (1) à la place du foret de diamètre 20 pour positionner les forets de diamètres 10 et 09 afin de pouvoir lire l'usure sur la surface en dépouille.
7	Cube	01	Supporte les forets de diamètres 09 et 10 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 Genie 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 (2.16) illustre le dispositif assemblé.

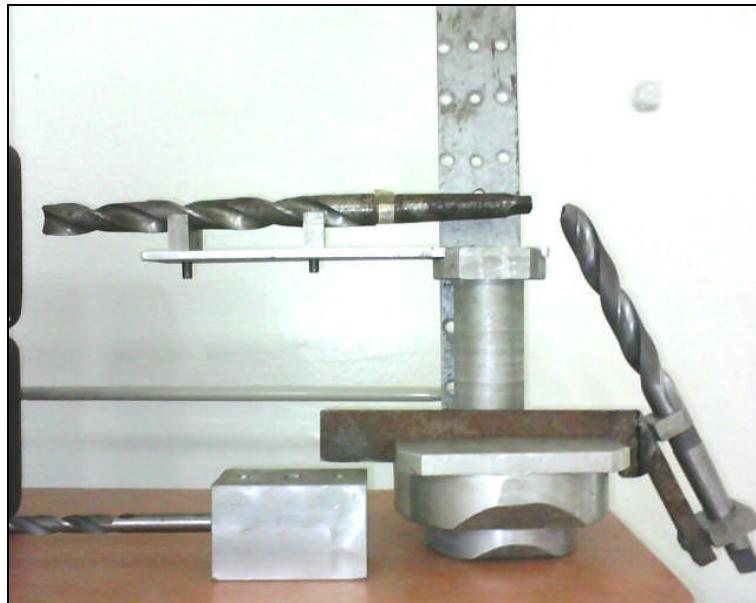


Figure 2.16: Orientation et positionnement des forets sur le dispositif.

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.

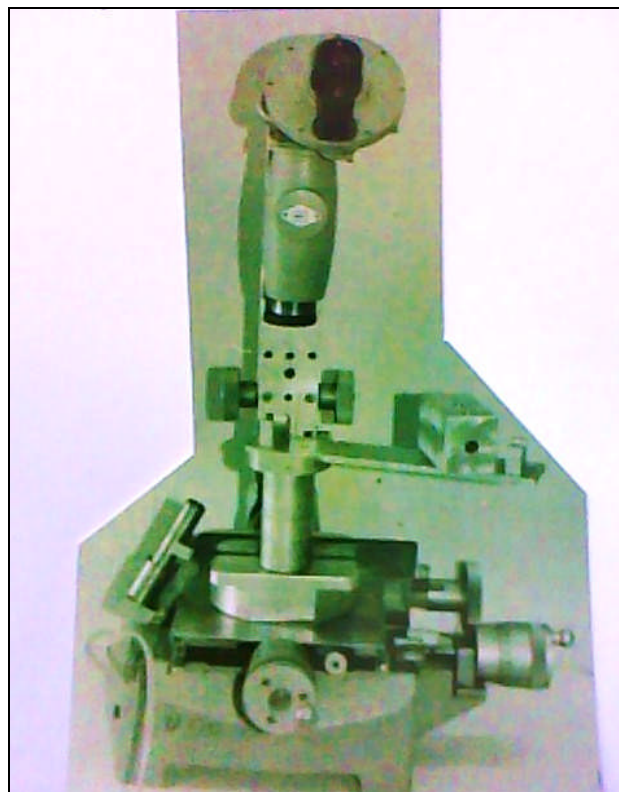


Figure 2.17: Vue générale du dispositif et du microscope optique.

B)- Méthode de mesure de l'usure :

b.1- Mesure de l'usure sur la surface en dépouille:

La figures (2.18) nous montre comment placer les forets de diamètre 09 , 10 et 20mm sur le dispositif de positionnement pour mesurer l'usure sur la surface en dépouille et aussi sa lecture à travers l'oculaire du microscope.

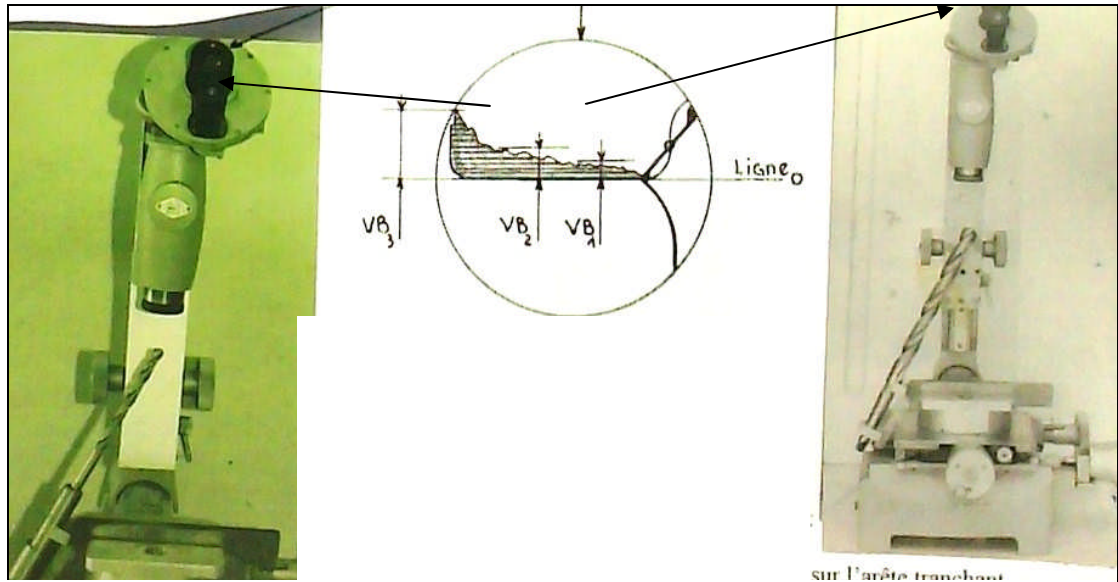


Figure 2.18: Lecture et mesure de l'usure sur la surface en dépouille des forets ($\varnothing 09$ et 10, à gauche et $\varnothing 20$ à droite).

b.2- Mesure de l'usure sur l'arête tranchante transversale:

La figure (2.19) nous montre comment placer les forets de diamètre 09, 10 et 20mm sur le dispositif de positionnement pour mesurer l'usure sur l'arête tranchante transversale et aussi sa lecture à travers l'oculaire du microscope.

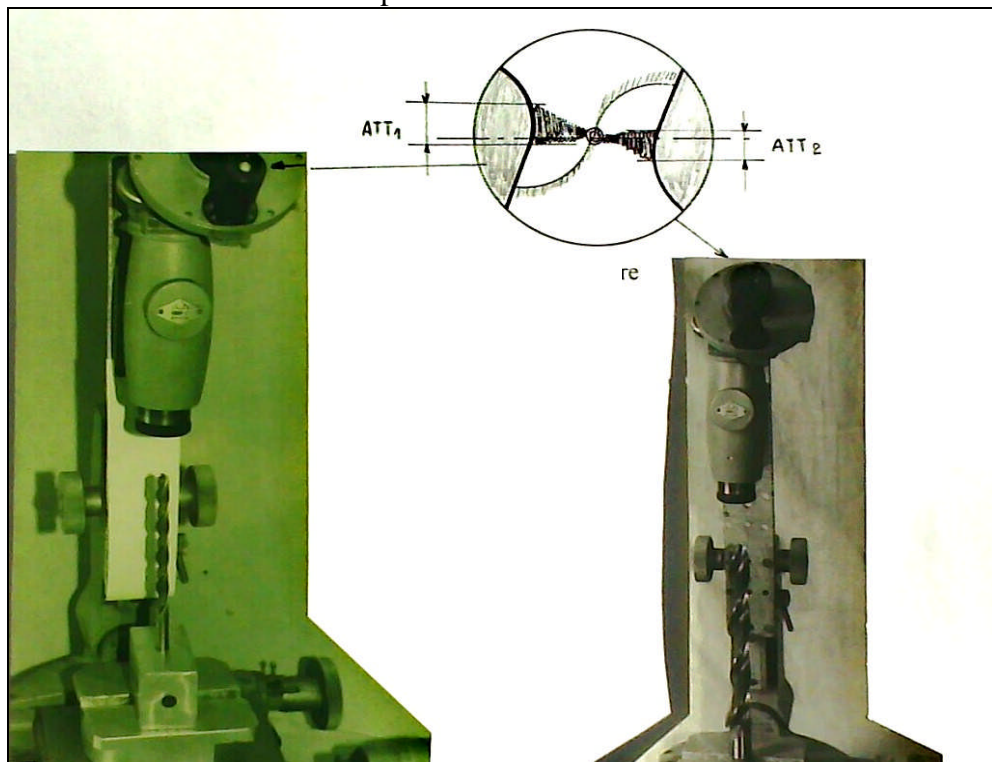


Figure 2.19: Lecture et mesure de l'usure sur L'arête tranchante transversale des forets ($\varnothing 09$ et 10, à gauche et $\varnothing 20$ à droite).

b.3- Mesure de l'usure sur la surface d'attaque et le listel:

Pour mesurer l'usure sur la surface d'attaque et le listel les figures (2.22) et (2.23) montrent comment on positionne les forets sur le support de contrôle pour pouvoir les visionner à travers l'oculaire et les illustrer respectivement par les figures (2.20) et (2.21).

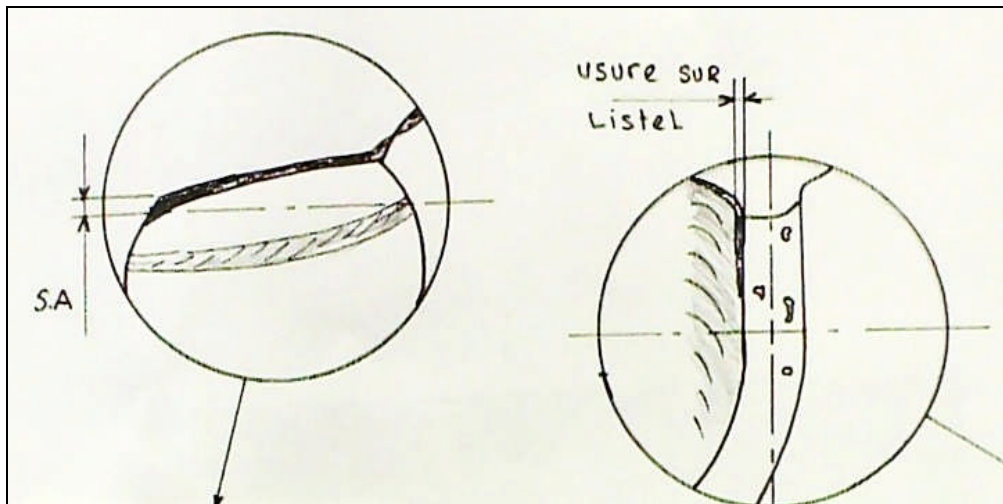


Figure 2.20: Usure sur la surface d'attaque à travers l'oculaire du microscope.

Figure 2.21: Usure sur le listel. A travers l'oculaire du microscope.

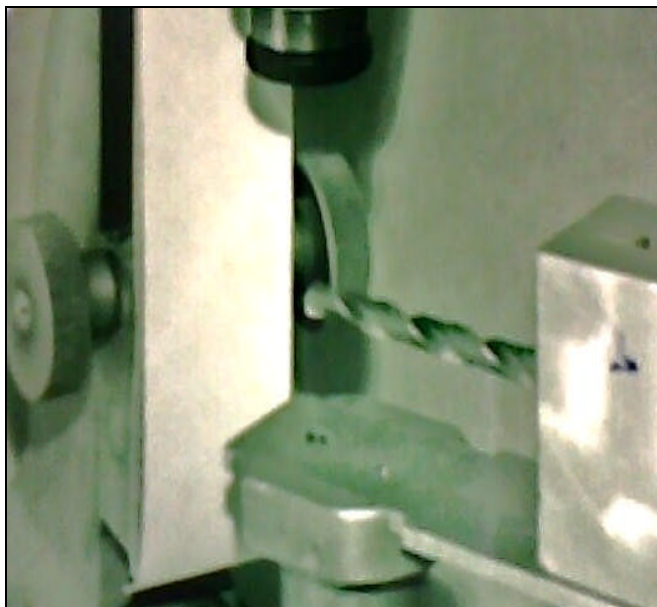


Figure 2.22: Mesure de l'usure sur la surface d'attaque et le listel du foret Ø09 et 10.

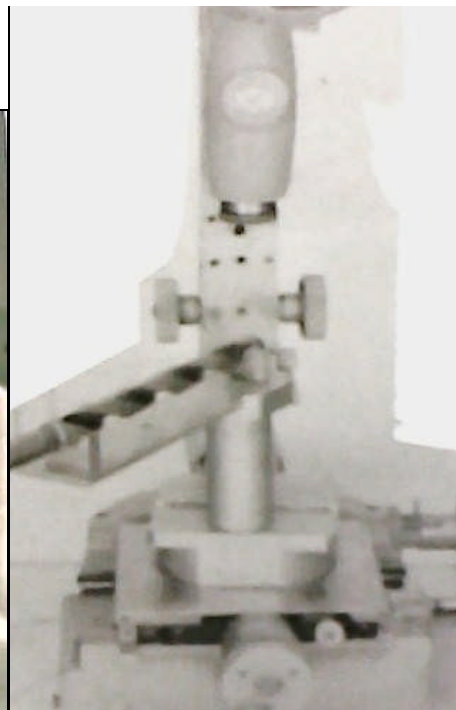


Figure 2.23: Mesure de l'usure sur la surface d'attaque et le listel du foret Ø20

C)- mesure de la rugosité :**c.1- Appareil de mesure, description et méthode :**

Cet appareil de petite dimension de 150x70x70 (mm³) qui fonctionne avec un courant continu de 9V est destiné pour mesurer la rugosité de 0.5 à 8 µm sur une longueur de 40mm. Avant de le mettre en œuvre, le rugosimètre (3) doit être étalonné en faisant parcourir son sensible palpeur (2) d'un mouvement de va et vient sur une plaque d'étalonnage(1) pour mettre l'appareil à zéro. La lecture se fait sur l'écran (4).

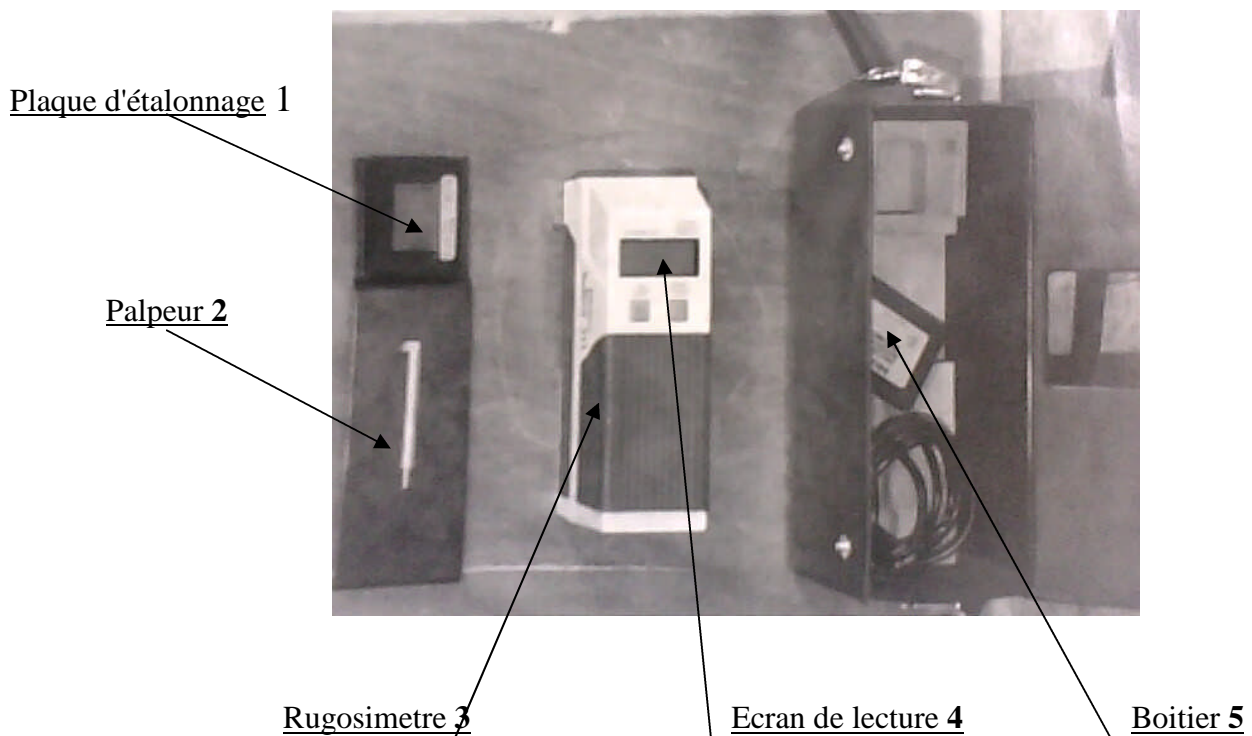


Figure 2.24 : Ensemble du rugosimetre.

c.2- Préparation des éprouvettes :

Les éprouvettes ont été découpées par une scie mécanique suivant un plan coupant les rangées de pièces longitudinalement, afin de pouvoir accéder et contrôler la rugosité de la surface usinée avec le palpeur du rugosimetre.

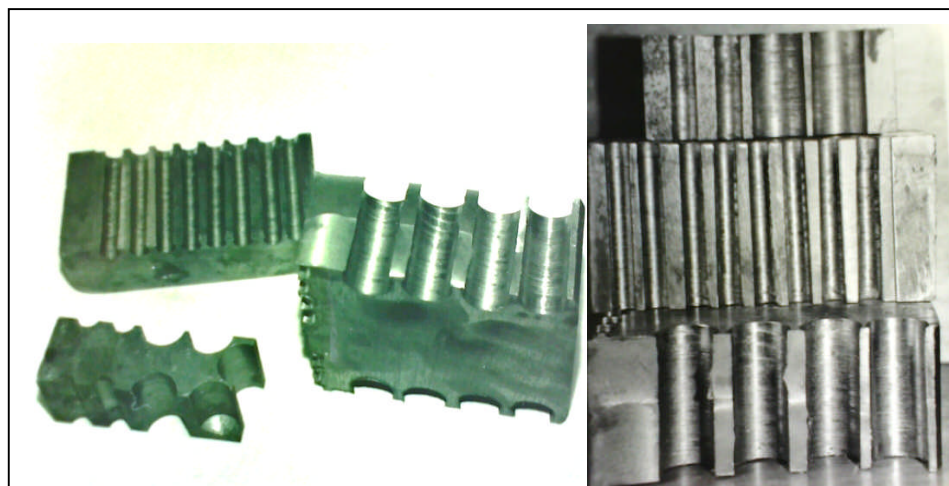


Figure 2.25: Eprouvettes découpées pour mesurer la rugosité de la surface usinée.

c.3- Méthode de contrôle avec un rugosimetre :

Le rugosimetre est très sensible il doit être placé sur une table stable à plan horizontal. Après avoir étalonné l'appareil et nettoyé les surfaces à contrôler, le palpeur parcourt la surface à contrôler d'un mouvement de va et vient et affiche la mesure sur son écran.

Les prises de mesure doivent être reprises au moins trois fois pour chaque surface et retenir finalement la valeur moyenne.



Figure 2.26 : Rugosimetre en position de travail

CHAPITRE III:

REALISATION ET RESULTATS DES EXPERIENCES :

3.1. But de l'étude :

L'objectif de cette recherche est de définir le degré de l'influence des éléments du régime de coupe sur la tenue des forets qui est choisis comme critère essentielle de l'usinabilité de l'acier C18 et l'état de surface usinées comme critère secondaire.

Les résultats expérimentaux relevés au chapitre 2 du suivie de l'usure des forets hélicoïdaux lors des opérations de perçage en fonction du temps d'usinage et des conditions de coupe, sont représentés dans ce chapitre sous forme de graphiques.

3.2. Introduction :

Les expériences on été réalisés au laboratoire du Département du Génie Mécanique de Annaba, dans les conditions opératoires suivantes :

- Procédé d'usinage : perçage sur une perceuse à colonne 2H125T Pm: 2.2 KW.
- Montage des forets : on a utilisé les douilles de cône morse pour la fixation des forets de diamètre 20mm et le mandrin de la perceuse pour les forets de diamètre 09 et 10mm des deux séries courtes et longues.
- Longueur de perçage : de 70mm à 80mm suivant l'échantillon.
- Lubrification : on a utilisé l'huile soluble avec un débit de 2,4 à 2,5 l/min.
- Matière à usiner : acier C18 avec les caractéristiques mécanique et chimique indiqués au tableau (2.5).
- Conditions de coupe : les conditions de coupe sont choisies en fonction des capacités de la perceuse 2H125T comme suite :
 - * **n** : nombre de tour sur la broche :
45 .63.90.125.180.250.355.500.710.1000.1400.2000. (tr/min).
 - * **s** : avance : 0,1 . 0, 14 . 0, 2 . 0, 28 . 0, 4 . 0, 56 . 0, 8 . 1, 12 . 1, 6(min/tr).
 - * **t** : profondeur de passe : correspond au diamètre du foret utilisé.
- Série courtes : diamètre de 10mm à 20mm (longueur min = 88mm ; longueur max = 240)
- Série longue : diamètre de 09mm à 20mm (longueur min = 115mm ; longueur max = 315)

3.2.1. Choix des valeurs du nombre de tour :

Les essais de perçage sont exécutés sur des ébauches en acier C18 avec des forets hélicoïdaux en acier rapide. Par conséquent le calcul du nombre de tour se fait en fonction des vitesses de coupe choisies selon cette matière dans l'intervalle suivant:

$$V = (15 \text{ à } 30) \text{ m/min.}$$

3.2.2. Régime de coupe pour la série longue :

- Diamètres des forets $D = 09 \text{ à } 20\text{mm}$
- Vitesse de coupe pour l'acier C18, $V = 15 \text{ à } 30 \text{ m/min}$
- Après avoir calculé les nombres de tours pour toutes les combinaisons en fonction des qu'elles on choisit les nombre de tour correspondants disponible sur la boîte des vitesses de la

perceuse et enfin corriger ces vitesses de coupes selon les nouvelles valeurs des nombres de tours, on arrête finalement les valeurs des éléments du régime de coupe comme suite :

- Valeur minimale : $V = 14,14 \text{ m/min}$
 $S = 0,10 \text{ tr/min}$
 $D = 09\text{mm}$
 - Valeur maximale : $V = 31,41\text{m/min}$
 $S = 0,28 \text{ tr/min}$
 $D = 20 \text{ mm}$
- Valeur codifiée Par (-1)
 Valeur codifiée Par (+1)

3.2.3. Régime de coupe pour la série courte :

- Diamètres des forets $D = 10 \text{ à } 20\text{mm}$
- Vitesse de coupe pour l'acier C18, $V = 15 \text{ à } 30 \text{ m/min}$
- Après avoir calculé les nombres de tours pour toutes les combinaisons en fonction des qu'elles on choisit les nombre de tour correspondants disponible sur la boîte des vitesses de la perceuse et enfin corriger ces vitesses de coupes selon les nouvelles valeurs des nombres de tours, on arrête finalement les valeurs des éléments du régime de coupe comme suite :

- valeur minimale : $V = 11,15 \text{ m/min}$
 $S = 0,10 \text{ tr/min}$
 $D = 09 \text{ mm}$
 - valeur maximale : $V = 22,30 \text{ m/min}$
 $S = 0,2 \text{ tr/min}$
 $D = 20 \text{ mm}$
- Valeur codifiée Par (-1)
 Valeur codifiée Par (+1)

3.2.4 Critère et mesure de l'usure:

Bien que les mesure de l'usure on été prise sur les différente partie actives du foret sous cités, mais nous avons retenue comme critère de la mort du foret l'atteinte de la valeur admissible de l'usure sur la surface en dépouille (**VBmax = 0,5 mm**).

L'usure a été prise essentiellement dans quatre zones les plus sollicitées par la coupe situées dans le bec du foret:

a- Usure sur la surface en dépouille (SD) à partir de l'arête tranchante principale (ATP) , qui est engendrée par l'intersection de la surface d'attaque et la surface en dépouille et 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 surface 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 à coté de l'arête tranchante transversale.
- VB2: Mesure prise au milieu de l'arête tranchante principale.
- VB3: Mesure prise au bord du bec du foret. Dans cette zone l'effort de coupe est maximal par conséquent l'usure est importante et c'est elle qui constitue finalement le critère de la mort du foret, figure (3.1) et (3.2).

b- L'arête tranchante transversale (ATT) qui est obtenue par l'intersection des deux surfaces en dépouille formant le bec de l'outil.

- c- La surface d'attaque (SA). C'est la zone sur laquelle glisse le copeau enlevé, la mesure de l'usure a été prise en longueur (L) et non pas en profondeur (Kt).
- d- Le listel ou arête tranchante latérale où l'effort de coupe est maximal. C'est la zone où se forme réellement le trou percé. Il est caractérisé par sa surface lisse qui lui permet de résister à l'usure.

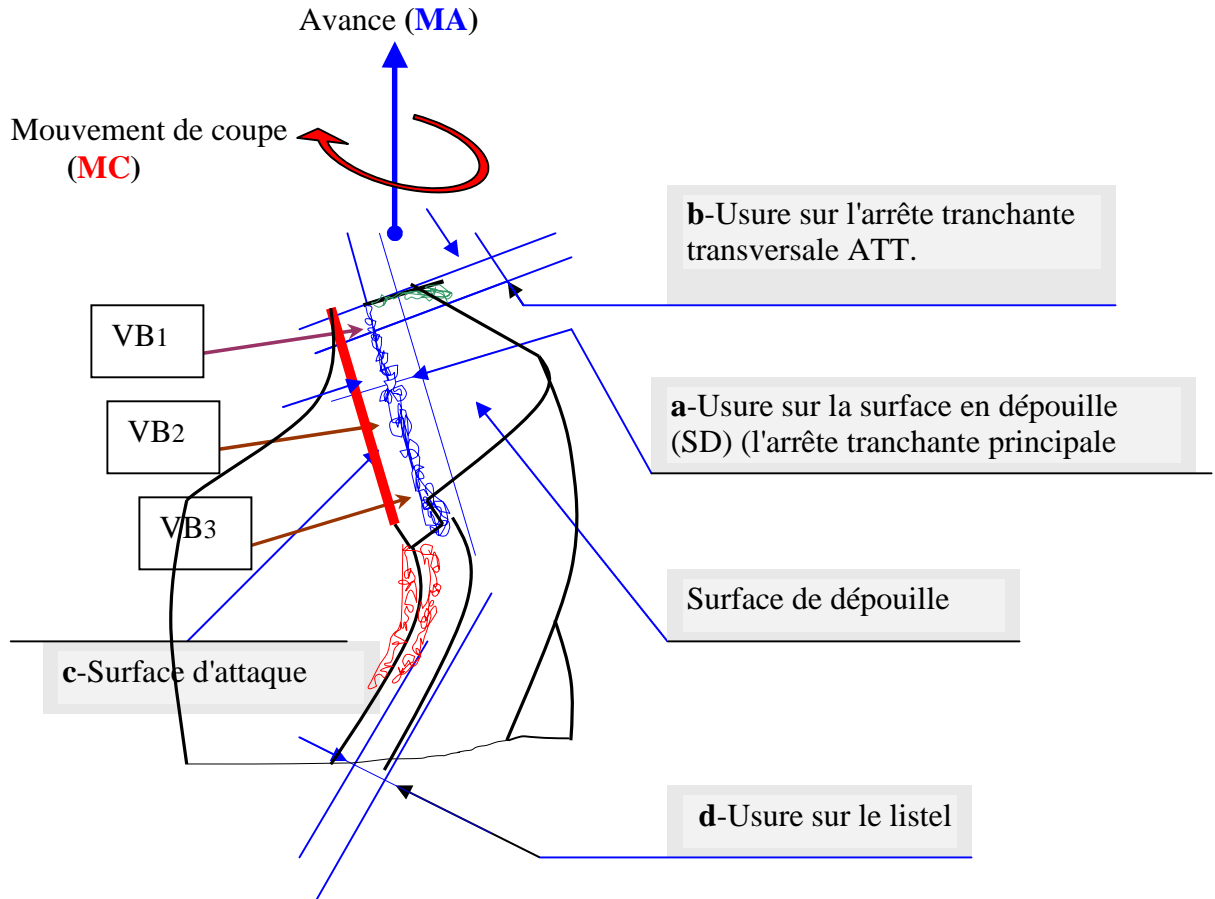


Figure 3.1: Zones d'usure sur des différentes parties actives d'un foret.

La figure (3.2) illustre la mesure de l'usure sur la surface de dépouille qui constitue la zone la plus sollicitée par la coupe et incarne le critère de la mort du foret (VB max).

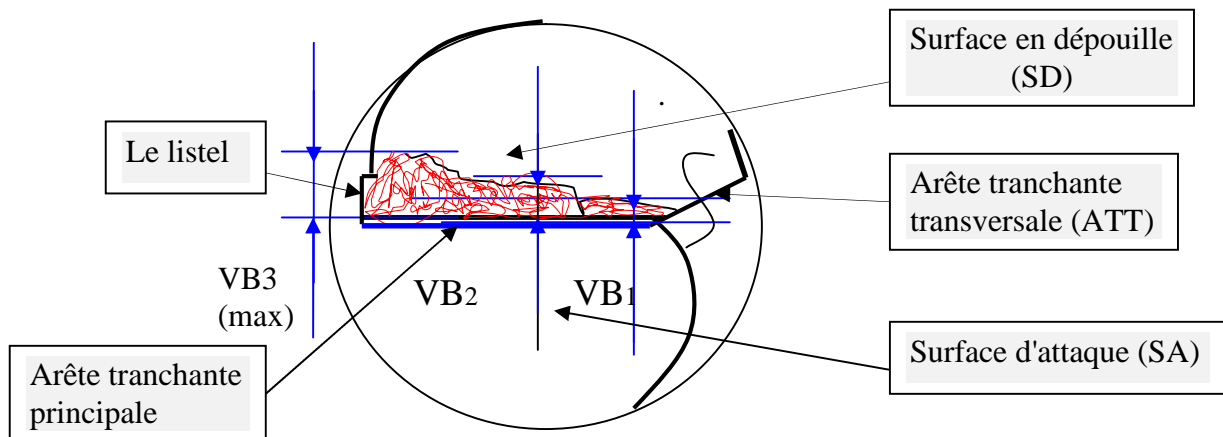


Figure 3.2: Zone de prise de mesure de l'usure sur la surface en dépouille.

L'arête tranchante transversale est très importante pour un foret en perçage, car elle prépare un avant trou pour faciliter la pénétration du foret dans la matière. Son usure augmente l'effort de coupe nécessaire pour l'avance du foret, mais ne constitue pas le critère de la mort du foret.

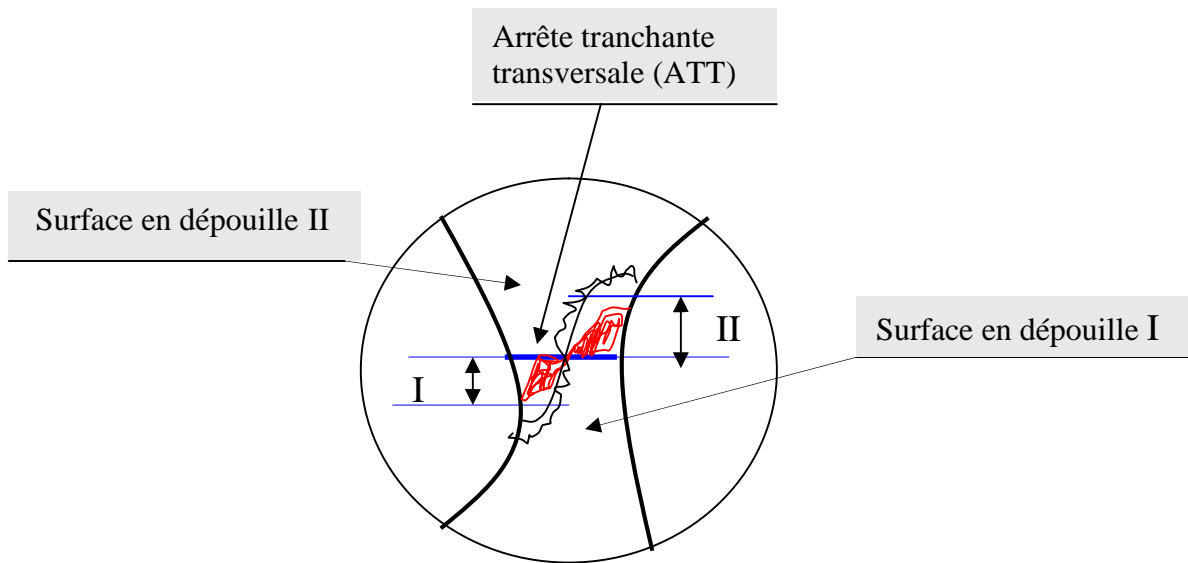


Figure 3.3: Usure sur l'arête tranchante transversale (ATT).

3.3 Plan des expériences :

3.3.1 Plans des expériences pour la série longue :

Tableau 3.1: Illustre la méthode de planification des expériences pour la série longue.

Plan des expériences	Valeurs codifiées des facteurs			Valeurs réelles des facteurs			paramètres
	V	S	D	V (m/min)	S (tr/min)	D (mm)	Y (min)
1	-1	-1	-1	14.14	0.10	09	Y1
2	+1	-1	-1	31.41	0.10	09	Y2
3	-1	+1	-1	14.14	0.28	09	Y3
4	+1	+1	-1	31.41	0.28	09	Y4
5	-1	-1	+1	14.14	0.10	20	Y5
6	+1	-1	+1	31.41	0.10	20	Y6
7	-1	+1	+1	14.14	0.28	20	Y7
8	+1	+1	+1	31.41	0.28	20	Y8

Dans le but de réduire les erreurs systématiques, les expériences ont été réalisées selon le tableau (3.2).

Tableau 3.2: Illustre l'ordre de réalisation des essais pour la série longue.

N° d'ordre d'après le plan d'expérience	1	2	3	4	5	6	7	8
N° d'ordre de la réalisation	2	3	8	5	1	4	6	7

3.3.2. : plan d'expérience pour la série courte :

Tableau 3.3: Illustre la méthode de planification des expériences pour la série courte.

Plan des expériences	Valeurs codifiées des facteurs			Valeurs réelles des facteurs			paramètres
	V	S	D	V (m/min)	S (min/tr)	D (mm)	Y (min)
1	-1	-1	-1	11.15	0.10	10	Y1
2	+1	-1	-1	22.30	0.10	10	Y2
3	-1	+1	-1	11.15	0.20	10	Y3
4	+1	+1	-1	22.30	0.20	10	Y4
5	-1	-1	+1	11.15	0.10	20	Y5
6	+1	-1	+1	22.30	0.10	20	Y6
7	-1	+1	+1	11.15	0.20	20	Y7
8	+1	+1	+1	22.30	0.20	20	Y8

Dans le but de réduire les erreurs systématiques les expériences ont été réalisées selon le tableau (3.4).

Tableau 3.4: Illustre l'ordre de réalisation des essais pour la série courte.

N° d'ordre d'après le pan d'expérience	1	2	3	4	5	6	7	8
N° d'ordre de la réalisation	2	3	8	5	1	4	6	7

3.4 Résultats et interprétations de l'usure des forets :

3.4.1 Traitement graphique des résultats de l'usure:

A)- Evolution de l'usure sur la surface en dépeuille (SD) en fonction du temps :
a- série longue :

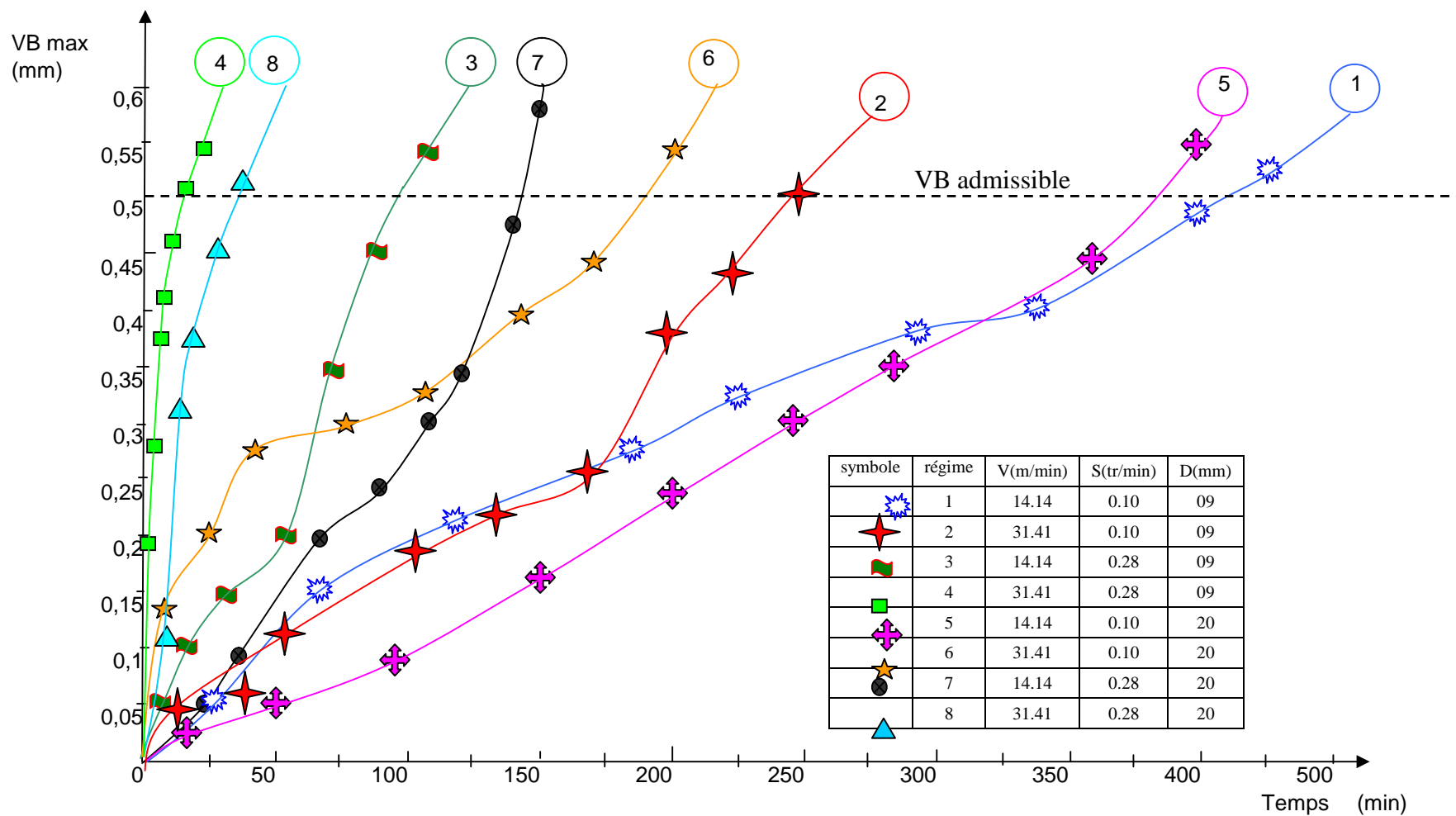


Figure 3.4: Evolution de l'usure sur la surface en dépeuille (SD) en fonction du temps pour tous les forets de la série longue.

b- série courte :

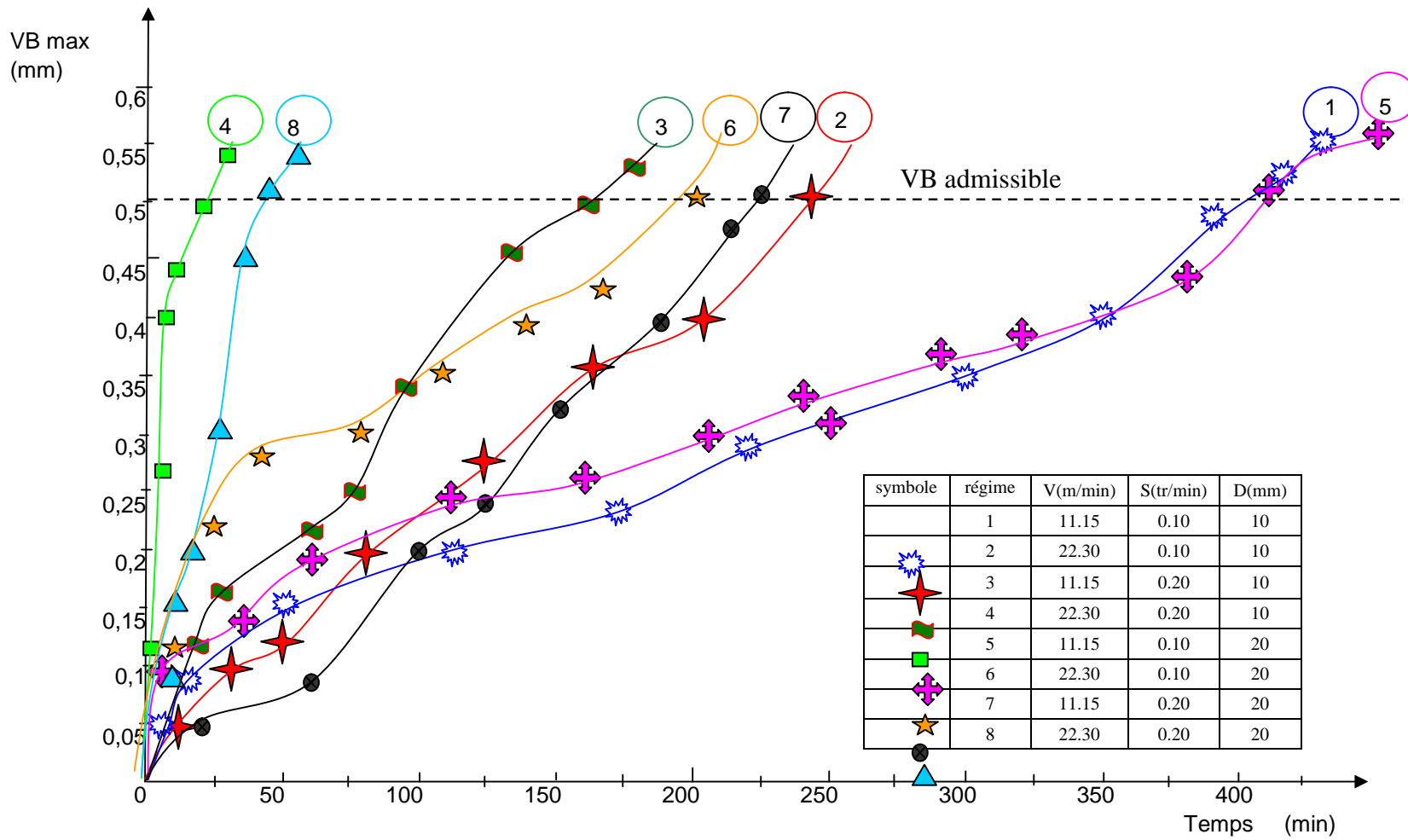


Figure 3.5: Evolution de l'usure sur la surface en dépouille (SD) en fonction du temps pour tous les forets de la série courte.

B)- Evolution de l'usure sur l'arrête tranchante transversale (ATT) en fonction du temps:

a- série longue:

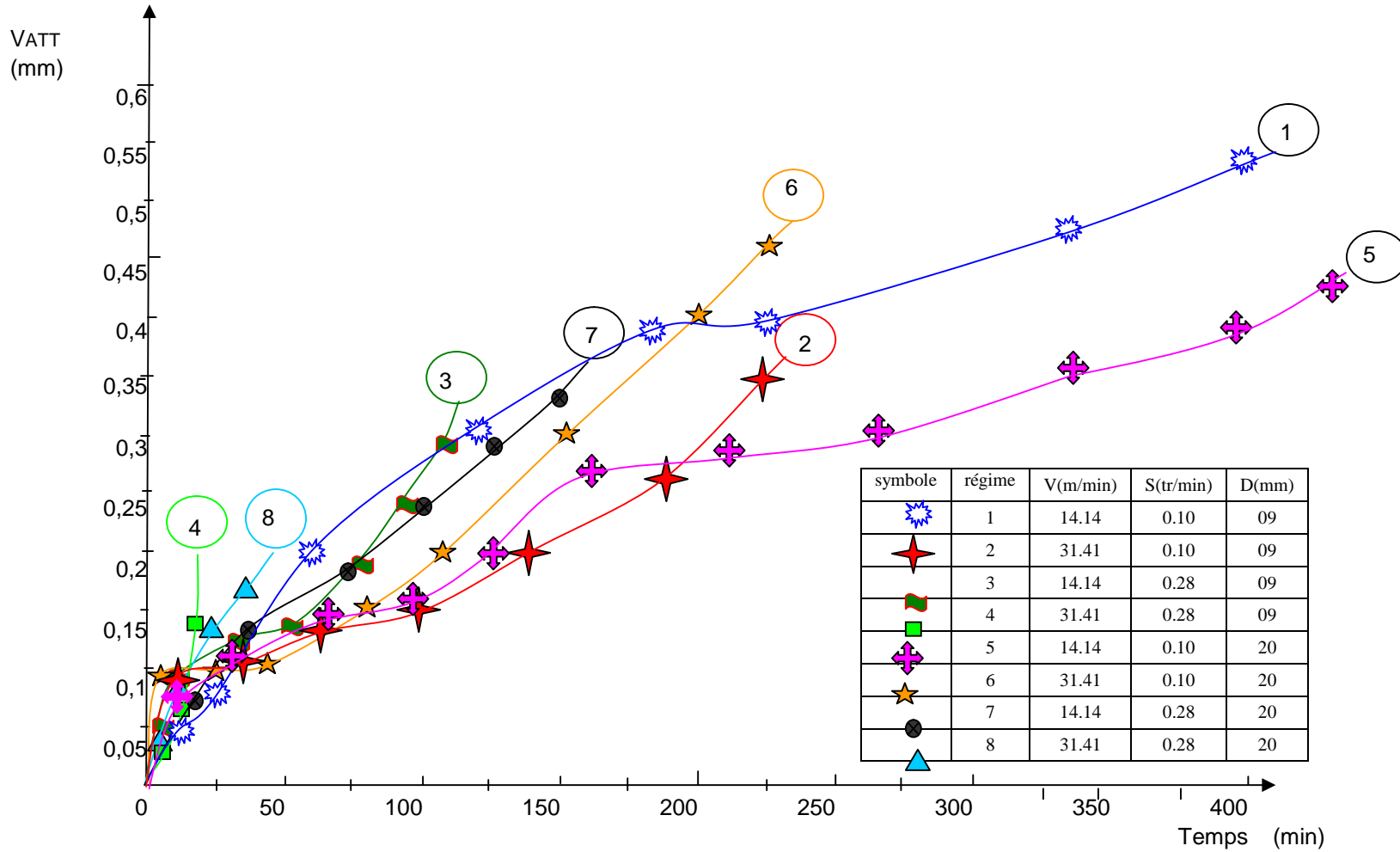


Figure 3.6: Evolution de l'usure sur l'arrête tranchante transversale en fonction du temps pour tous les forets de la série longue.

b- série courte :

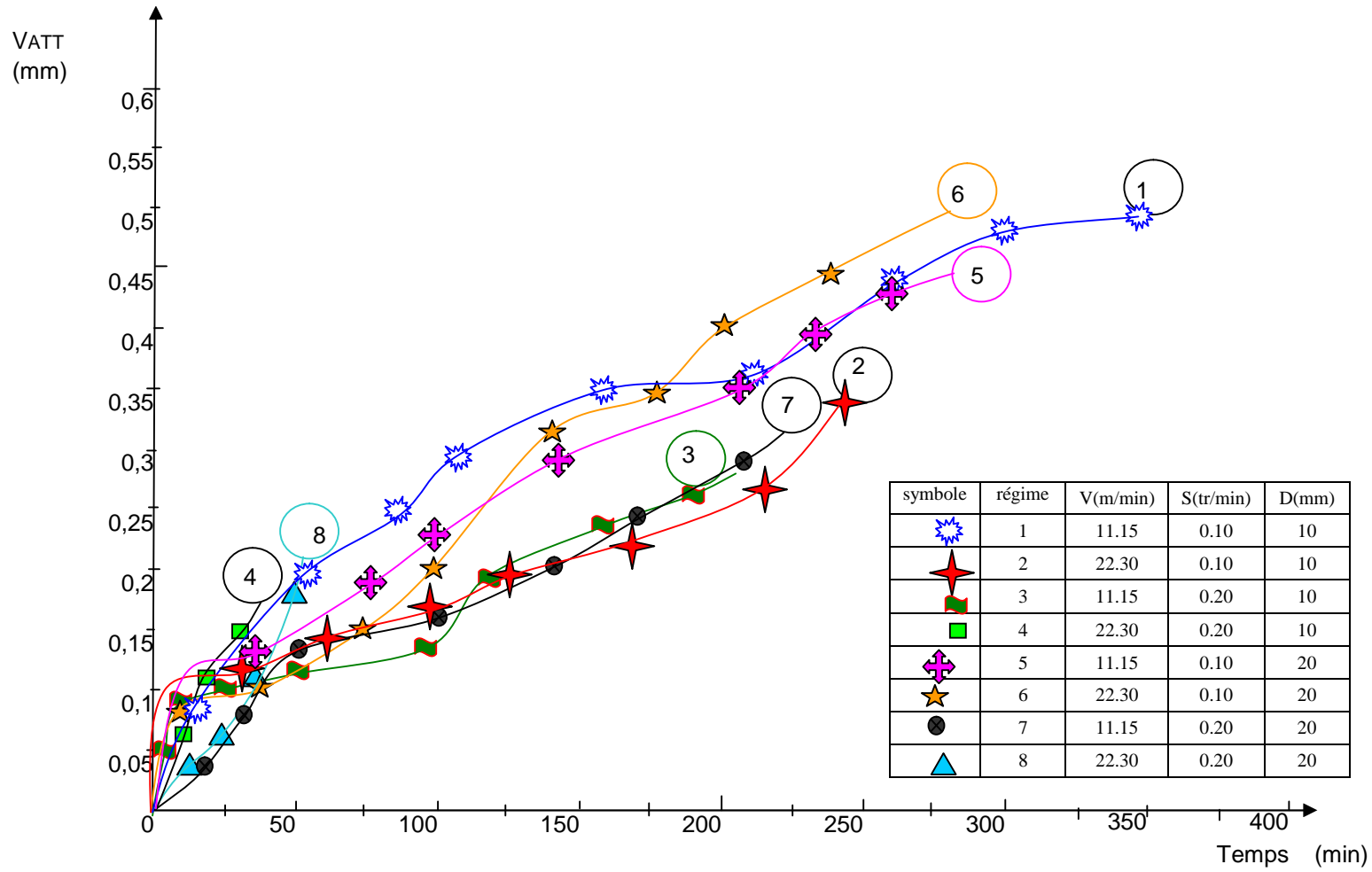


Figure 3.7: Evolution de l'usure sur l'arrête tranchante transversale ATT en fonction du temps pour tous les forets de la série courte.

**C)- Evolution de l'usure sur le listel en fonction du temps:
a- série longue:**

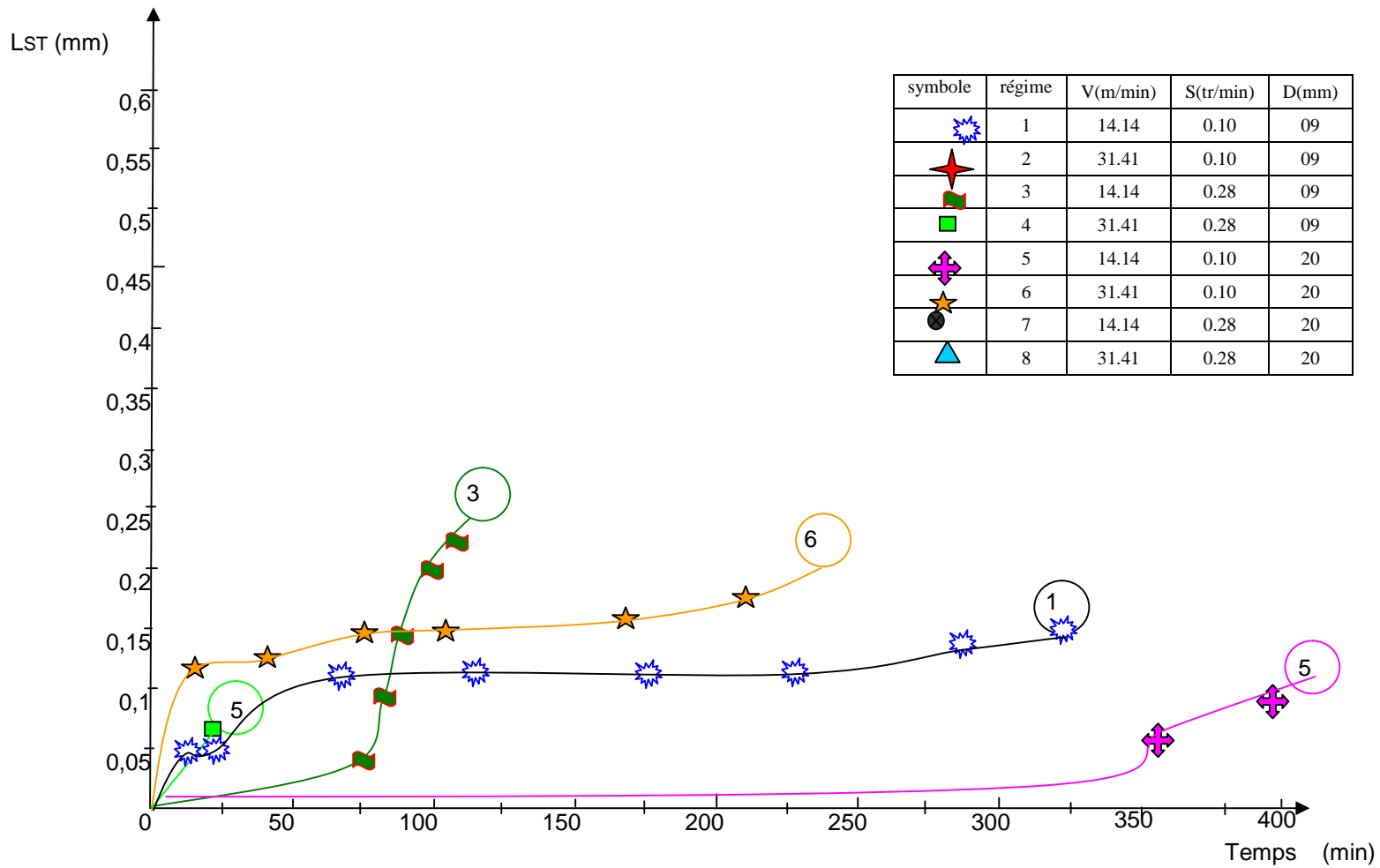


Figure 3.8: Evolution de l'usure sur le listel en fonction du temps pour tous les forets de la série longue:

Remarque : les régimes 2 ; 7 ; 8 ne présentent pas d'usure sur le listel.

b- série courte :

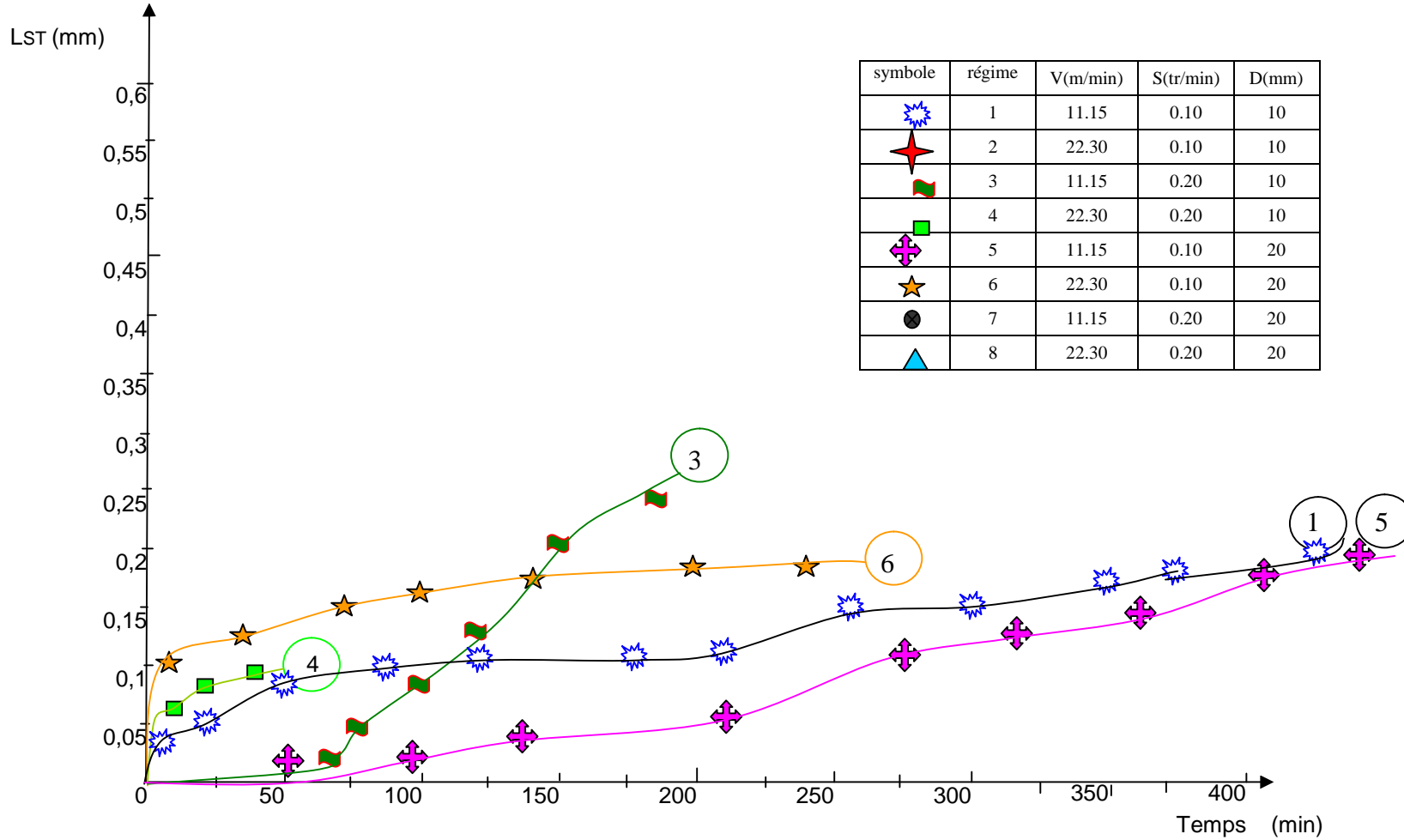


Figure 3.9: Evolution de l'usure sur le listel en fonction du temps pour tous les forets de la série courte:

Remarque : les régimes 2 ; 7 et 8 ne présentent pas d'usure sur le listel.

**D)- Evolution de l'usure sur la surface d'attaque (SA) en fonction du temps:
a-série longue :**

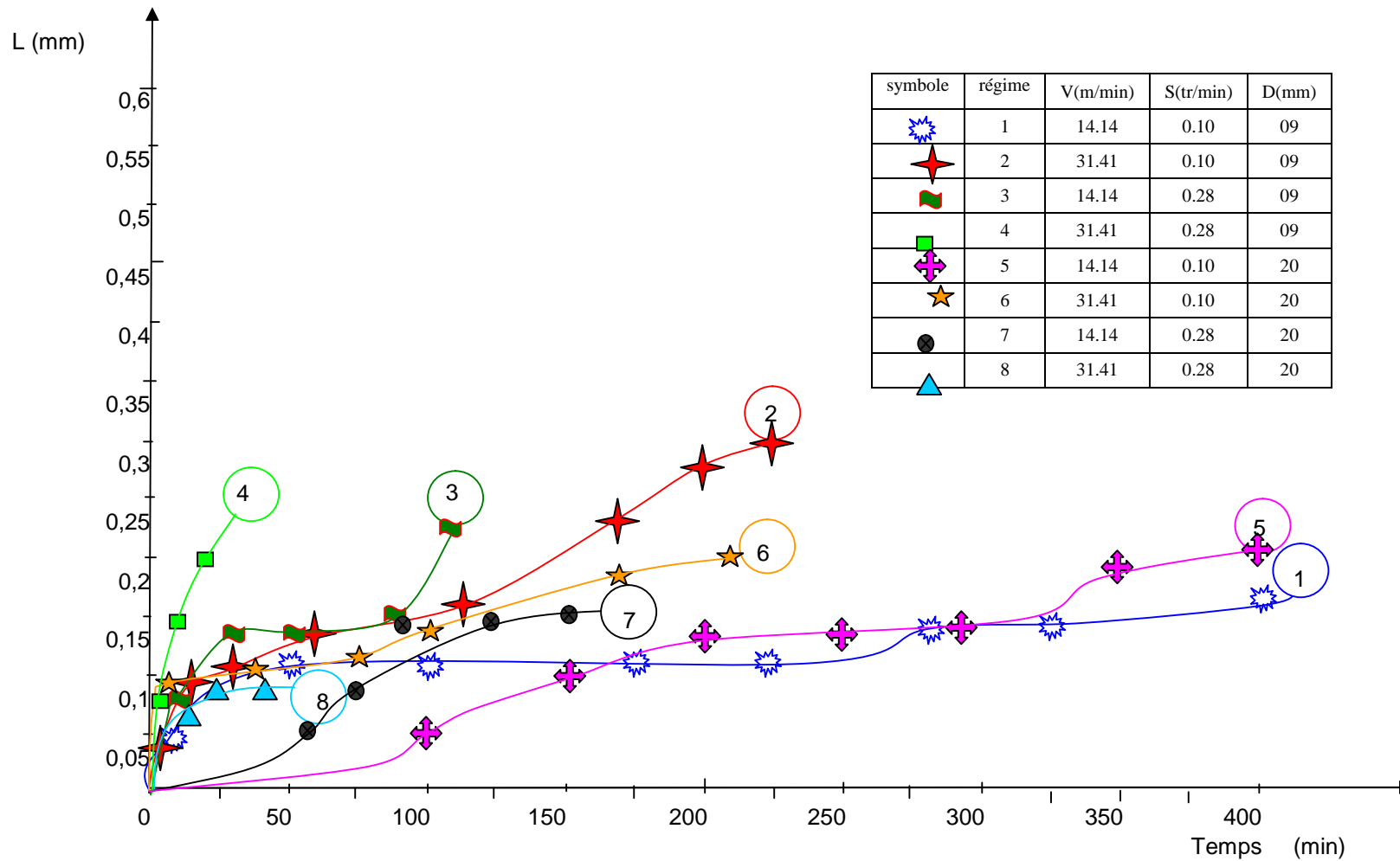


Figure 3.10: Evolution de l'usure sur la surface d'attaque SA en fonction du temps pour tous les forets de la série longue :

b- série courte :

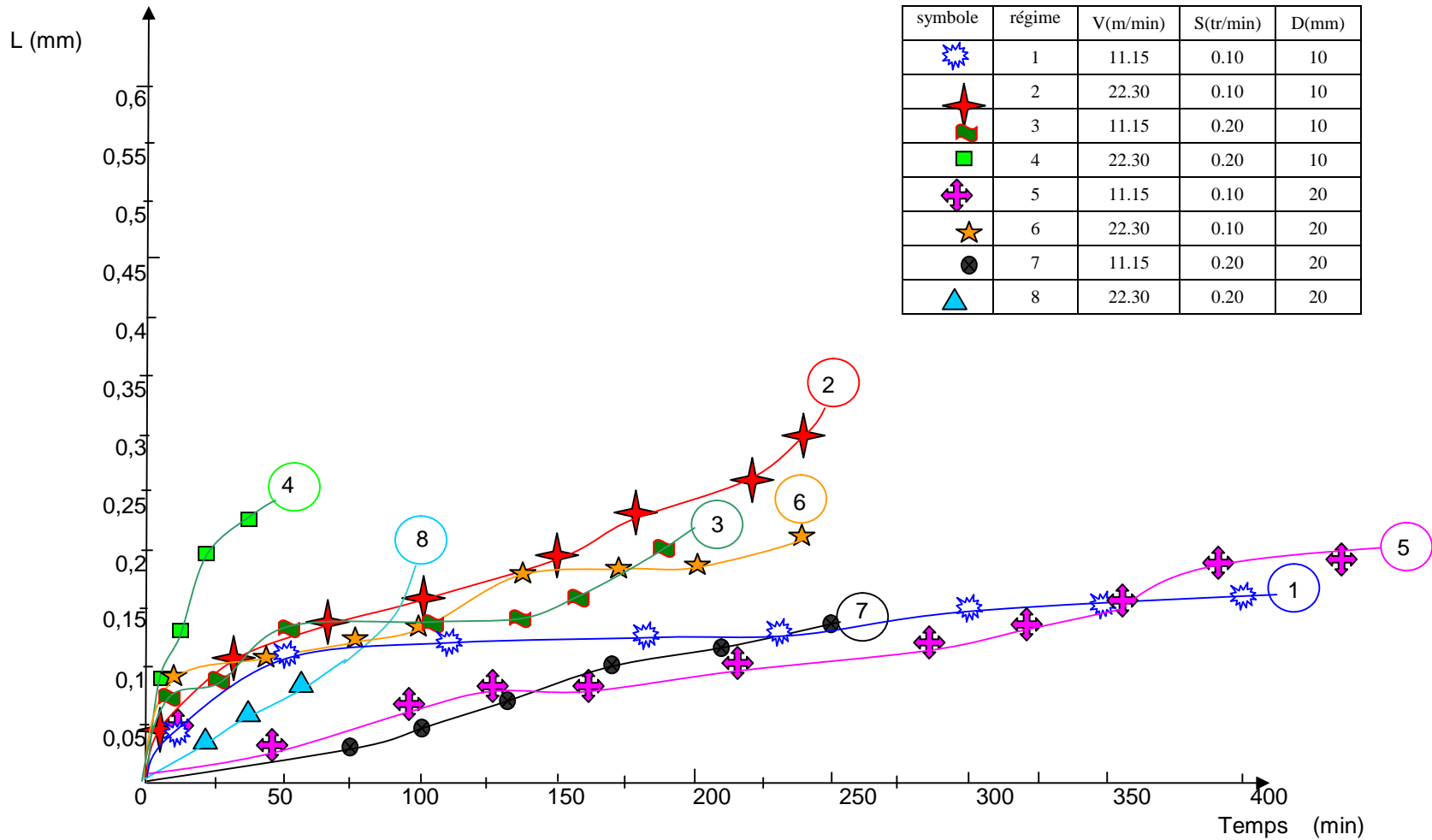


Figure 3.11 : Evolution de l'usure sur la surface d'attaque (SA) en fonction du temps pour tous les forets de la série courte :

3.4.2 Analyse comparative des résultats de l'usure :

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

La comparaison des tenues selon les graphes pour les régimes ayant un seul facteur qui change permet de distinguer l'influence de ce dernier sur la tenue du foret.

A)- influence de la vitesse de coupe (V) :

D'après les figures (3.4);(3.5);(3.6);(3.7);(3.8);(3.9);(3.10);(3.11), on remarque pour les régimes suivant ayant comme variable la vitesse de coupe V :

(1; 2) – (3; 4) Ø 09 et (5; 6) – (7; 8) Ø 20 de la série longue.

(1; 2) – (3; 4) Ø10 et (5; 6) – (7; 8) Ø 20 de la série courte.

L'usure sur la surface de dépouille (VBmax), la surface d'attaque (L) et l'arrête tranchante transversale (VATT) s'accroît avec l'augmentation de la vitesse de coupe, ce qui confirme les principes généraux de l'usure des outils.

B)- influence de l'avance (S):

D'après les figures (3.4);(3.5);(3.6);(3.7);(3.8);(3.9);(3.10);(3.11) on remarque pour les régimes suivant ayant comme variable l'avance (S) :

(1; 3) – (2; 4) Ø 09 et (5; 7) – (6; 8) Ø 20 de la série longue.

(1; 3) – (2; 4) Ø 10 et (5; 7) – (6; 8) Ø 20 de la série courte.

L'usure sur la surface de dépouille (VBmax), la surface d'attaque (L) et l'arrête tranchante transversale (VATT) s'accroît avec l'augmentation de l'avance.

C)- influence du diamètre du foret (D):

D'après les figures (3.4);(3.5);(3.6);(3.7);(3.8);(3.9);(3.10);(3.11) on constate que pour les régimes suivants, où le diamètre est considéré comme variable :

(1; 5) – (2; 6) – (3; 7) – (4; 8) de la série longue.

(1; 5) – (2; 6) – (3; 7) – (4; 8) de la série courte.

La tenue du foret augmente avec l'augmentation du diamètre (D), contrairement à d'autres procédés d'usinage où la tenue diminue avec l'augmentation de la profondeur de passe et cela est dû probablement à la dissipation rapide 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. Toutefois il est à noter que l'influence du diamètre sur la durée de vie est relativement plus faible par rapport à la vitesse et l'avance.

D)- Influence de la longueur des forets (L):

Concernant la longueur des forets et bien que les régimes de coupe ne sont pas toute à fait les mêmes pour les deux séries (courte et longue), néanmoins on peut faire une approche de comparaison qui nous révèle que la longueur n'influe pas beaucoup sur l'usure des forets mais surtout sur l'état de surface. Cela se concrétise en faisant l'analyse de la majorité des essais ayant les mêmes numéro d'ordre et supposés avoir presque les mêmes régimes dans les tableaux (3.14) et (3.15), correspondent pour les séries courte et longue, on constate que pour les numéros (2),(3),(4),(5) et (7), l'état de surface est meilleur pour les essais ayant été fait par les forets de la série courte. En effet, la longueur du foret joue en défaveur pour la rugosité car plus le foret est long plus il est moins rigide. Par conséquent les efforts de coupe donnent naissance à des vibrations sur le corps du foret qui s'avèrent néfaste pour l'état de surface.

E)- Remarques générales:

Ce qui est acquis des résultats des recherches concernant les procédés de perçage, c'est que le principe général du phénomène de l'usure des outils de coupe est lié principalement à la vitesse de coupe ; plus cette dernière augmente on assiste à une usure plus importante.

Il est à remarquer également que l'influence de la vitesse sur la tenue des forets est plus importante que celle de l'avance et du diamètre. L'usure sur le listel est insignifiante à cause des surfaces lisses de ces dernières ne permettant pas un frottement important qui peut être source de dégagement intense de chaleur, influant sur l'accroissement de l'usure.

Parfois 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 a 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, dégradant la partie active de l'outil.

En d'autre part, l'usure n'évolue pas équitablement sur les deux arêtes tranchantes du foret et l'apparition de l'arête rapportée sur la surface d'attaque pour certains régimes.

3.4.3 Traitement statistique des résultats de la tenue:

A)- Traitement de la tenue pour la série courte des forets (Ø10 et 20) mm:

Tableau 3.5: Valeurs expérimentales de la durée de vie des forets (série courte) pour les différentes combinaisons.

N°	Paramètres d'entrée (Facteurs)						paramètres de sortie
	Valeurs codifiées des facteurs			Valeurs réelles des facteurs			Tenue T (min)
	V	S	D	V	S	D	
1	-1	-1	-1	11.15	0.1	10	478.42
2	+1	-1	-1	22.30	0.1	10	245.44
3	-1	+1	-1	11.15	0.2	10	180.90
4	+1	+1	-1	22.30	0.2	10	33.75
5	-1	-1	+1	11.15	0.1	20	484.32
6	+1	-1	+1	22.30	0.1	20	239.76
7	-1	+1	+1	11.15	0.2	20	158.45
8	+1	+1	+1	22.30	0.2	20	54.12

B)- traitement de la tenue pour la série longue des forets (Ø09 et 20) mm :

Tableau 3.6: Valeurs expérimentales de la durée de vie des forets (série longue) pour les différentes combinaisons.

N°	Paramètres d'entrée (Facteurs)						paramètres de sortie
	Valeurs codifiées des facteurs			Valeur réelle des facteurs			Tenue T (min)
	V	S	D	V	S	D	
1	-1	-1	-1	14.14	0.1	09	495,08
2	+1	-1	-1	31.41	0.1	09	226,99
3	-1	+1	-1	14.14	0.28	09	108,11
4	+1	+1	-1	31.41	0.28	09	19,22
5	-1	-1	+1	14.14	0.1	20	401,16
6	+1	-1	+1	31.41	0.1	20	218,40
7	-1	+1	+1	14.14	0.28	20	147,10
8	+1	+1	+1	31.41	0.28	20	30,20

La détermination d'un modèle puissance (non linéaire) est tâche accompagnée de difficulté, c'est pourquoi nous avons procédé à la linéarisation de forme suivante du modèle:

$$T = e^{k_0} \cdot V^{k_1} \cdot S^{k_2} \cdot D^{k_3} \quad (3.1)$$

En introduisant la fonction logarithmique de part et d'autre de l'équation (3.1), on obtient la relation linéaire suivante :

$$\ln T = e_0 + e_1 \ln V + e_2 \ln S + e_3 \ln D \quad (3.2)$$

En faisant un changement de variable on obtient la forme suivante :

$$Y = e_0 + e_1 X_1 + e_2 X_2 + e_3 X_3 \quad (3.3)$$

La détermination des coefficients $e_0 ; e_1 ; e_2 ; e_3$ est assuré grâce à l'expression (2.14). L'adéquation des valeurs calculées par ce modèle avec celles obtenues expérimentalement est vérifiée par le calcul du coefficient de corrélation R.

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3.4)$$

Où : \hat{Y} : valeurs calculées d'après le modèle.

Y_i : valeurs de l'expérience.

\bar{Y} : moyenne arithmétique de Y_i .

Selon l'expression (2.17), sont déterminées les constantes et les exposants du modèle (3.5), dans le cas où on veut intégrer l'effet des interactions des facteurs V, S et D sur le paramètre d'optimisation (T) on obtient ainsi un modèle de la forme :

$$T = e^{k_0} V^{k_1+k_{12} \ln S} \cdot S^{k_2 + k_{23} \ln D} \cdot D^{k_3+k_{13} \ln V} \quad (3.5)$$

L'adéquation des valeurs calculées par ce modèle avec celles obtenues expérimentalement sont vérifiées par le calcul du coefficient de corrélation R.

3.4.4. Détermination des modèles de l'usure :

Les modèles statistiques de la tenue et ceux de la vitesse technologique lors de l'usinage de l'acier C18 avec les deux séries (longue et courte) des forets sont:

A)- Modèle de l'usure pour la série courte :

a.1)- Modèle simple :

Le calcul élaboré pour le cas du modèle simple à permis de déduire les valeurs des constantes des exposants pour le cas de la série courte des forêts :

-Les valeurs des exposants pour le modèle simple sont:

$$k_0 = 5,002 ; k_1 = -1,486 ; k_2 = -2,005 ; k_3 = 0,118$$

- Ainsi le modèle obtenu de la tenue est :

$$T = \frac{e^{5,002} \times D^{0,118}}{V^{1,486} \times S^{2,005}} \tag{3.6}$$

- A partir du modèle (3.6) on déduit celui de la vitesse de coupe technologique :

$$V = \frac{e^{3,366} \times D^{0,079}}{T^{0,673} \times S^{1,349}} \tag{3.6'}$$

- En utilisant le modèle prédictif (3.6) nous pouvons calculer les tenues prédites pour chaque régime de coupe et dresser le tableau comparatif suivant:

Tableau 3.7 : Valeurs expérimentales et prédite calculée par le modèle simple de la durée de vie des forêts (série courte) pour les différentes combinaisons du plan d'expérience.

N°	Valeurs réels des facteurs			Tenue obtenue par expérience	Prédite modèle simple
	V	S	D	T(min)	T(min)
1	11.15	0.1	10	478,42	549,60
2	22.30	0.1	10	245,44	196,00
3	11.15	0.2	10	180,90	136,63
4	22.30	0.2	10	33,75	49,27
5	11.15	0.1	20	484,32	596,53
6	22.30	0.1	20	239,76	212,61
7	11.15	0.2	20	158,45	148,29
8	22.30	0.2	20	54,12	52,94
Valeur du coefficient de corrélation R = 0,93					

B)- Modèle d'usure pour la série longue :

Le calcul élaboré pour le cas du modèle simple à permis de déduire les valeurs des constantes des exposants pour le cas de la série longue des forêts :

a.1)- Modèle simple:

- Les valeurs calculées de la constante et des exposants sont :

$$k_0 = 5,93 ; k_1 = -1,47 ; k_2 = -1,69 ; k_3 = 0,16$$

- Par conséquent le modèle trouvé sera de la forme suivante

$$T = \frac{e^{5,93} \cdot D^{0,16}}{V^{1,47} \cdot S^{1,69}} \quad (3.7)$$

Par déduction de (3.7) nous pouvons exprimer l'expression de la vitesse de coupe technologique :

$$V = \frac{e^{4,03} \cdot D^{0,10}}{T^{0,68} \cdot S^{1,14}} \quad (3.7')$$

En utilisant le modèle prédictif (3.7), nous pouvons calculer les tenues prédites pour chaque régime de coupe et dresser le tableau des résultats des tenues expérimentales et prédites de la série longue:

Tableau 3.8: Valeurs expérimentales et prédite calculée par le modèle simple de la durée de vie des forets (série longue) pour les différentes combinaisons du plan d'expérience.

N°	Valeurs réels des facteurs			Tenue obtenue par expérience	Prédite modèle simple
	V	S	D	T (min)	T (min)
1	14.14	0.1	09	495,08	531,86
2	31.41	0.1	09	226,99	167,54
3	14.14	0.28	09	108,11	93,35
4	31.41	0.28	09	19,22	28,91
5	14.14	0.1	20	401,16	604,47
6	31.41	0.1	20	218,40	190,41
7	14.14	0.28	20	147,10	106,10
8	31.41	0.28	20	30,20	32,86
Valeur du coefficient de corrélation R = 0,88					

Malgré la validité du coefficient de corrélation R= 0.88, pour la série longue nous avons tenté la méthode combinée, faisant inclure l'effet des interactions entre les éléments du régime de coupe, dans le but d'augmenter la corrélation entre les valeurs prédites par le modèle (3.7) et celles expérimentales, sachant que le coefficient R= 0.88 est fort acceptable.

B)- Modèles faisant inclure l'effet des interactions (modèle combines) :

Afin de mettre en évidence le degré de l'influence de chaque élément du régime de coupe, nous avons choisies d'étudier l'influence de l'interaction entre la vitesse et l'avance, puis celle

de l'avance et le diamètre, ensuite celle de la vitesse et du diamètre et enfin celle des éléments du régime de coupe ensemble c'est à dire la vitesse, l'avance et le diamètre en même temps.

b.1- Influence de l'interaction entre la vitesse et l'avance (V,S) :

- Le modèle de la tenue obtenu est :

$$T = \frac{e^{12,30} \cdot S^{1,87} \cdot D^{0,16}}{V^{(3,55 - 1,16 \ln S)}} \quad (3.8)$$

- Par déduction de (3.8) nous pouvons exprimer l'expression de la vitesse de coupe technologique :

$$V = \frac{e^{(3,01+10,54 \ln S)} \cdot S^{(0,52+1,60 \ln S)} \cdot D^{(0,04+0,13 \ln S)}}{T^{(0,28 + 0,08 \ln S)}} \quad (3.8')$$

- Ainsi les résultats des tenues expérimentaux et prédites de la série longue sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau 3.9: Valeurs expérimentales et prédites calculées par le modèle combiné entre la vitesse et l'avance, de la durée de vie des forets (série longue) pour les différentes combinaisons du plan d'expérience.

N°	Valeurs réels des facteurs			Tenue obtenue par expérience	Prédite modèle combiné entre V et S
	V	S	D	T (min)	T (min)
1	14.14	0.1	09	495,08	405,24
2	31.41	0.1	09	226,99	202,22
3	14.14	0.28	09	108,11	119,04
4	31.41	0.28	09	19,22	22,78
5	14.14	0.1	20	401,16	460,47
6	31.41	0.1	20	218,40	229,78
7	14.14	0.28	20	147,10	137,30
8	31.41	0.28	20	30,20	25,89
Valeur du coefficient de corrélation R = 0,97					

b.2- Influence de l'interaction entre l'avance et le diamètre (S, D) :

-Le modèle de la tenue obtenu est :

$$T = \frac{e^{3,08} \cdot D^{1,25}}{V^{1,47} \cdot S^{(3,28 - 0,61 \ln D)}} \quad (3.9)$$

- Par déduction de (3.9) nous pouvons exprimer l'expression de la vitesse de coupe technologique :

$$V = \frac{e^{2,10} \cdot D^{0,85}}{T^{0,68} \cdot S^{(2,23 - 0,41 \ln D)}} \quad (3.9')$$

- Ainsi les résultats des tenues expérimentales et prédites de la série longue sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau 3.10: Valeurs expérimentales et prédite calculée par le modèle combiné entre la l'avance et le diamètre, de la durée de vie des forets (série longue) pour les différentes combinaisons du plan d'expérience.

N°	Valeurs réels des facteurs			Tenue obtenue par expérience	Prédite modèle combiné entre S et D
	V	S	D	T (min)	T (min)
1	14.14	0.1	09	495,08	601,15
2	31.41	0.1	09	226,99	196,62
3	14.14	0.28	09	108,11	82,16
4	31.41	0.28	09	19,22	25,44
5	14.14	0.1	20	401,16	529,94
6	31.41	0.1	20	218,40	163,40
7	14.14	0.28	20	147,10	119,95
8	31.41	0.28	20	30,20	37,05
Valeur du coefficient de corrélation R = 0,92					

b.3- Influence de l'interaction entre la vitesse et le diamètre (V, D) :

-Le modèle de la tenue obtenue est :

$$T = \frac{e^{7,87}}{V^{2,11} \cdot S^{1,69} \cdot D^{(0,69 - 0,28 \ln V)}} \quad (3.10)$$

- Par déduction de (3.10) nous pouvons exprimer l'expression de la vitesse de coupe technologique :

$$V = \frac{e^{7,87}}{T^{0,47} \cdot S^{1,80} \cdot D^{(0,32 - 0,13 \ln V) \ln V}} \quad (3.10')$$

- Ainsi les résultats des tenues expérimentales et prédites de la série longue sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau 3.11: Valeurs expérimentales et prédite calculée par le modèle combiné entre la vitesse et le diamètre, de la durée de vie des forets (série longue) pour les différentes combinaisons du plan d'expérience.

N°	Valeurs réels des facteurs			Tenue obtenue par expérience	Prédite modèle combiné entre V et D
	V	S	D	T (min)	T (min)
1	14.14	0.1	09	495,08	547,51
2	31.41	0.1	09	226,99	166,49
3	14.14	0.28	09	108,11	94,51
4	31.41	0.28	09	19,22	28,72
5	14.14	0.1	20	401,16	568,35
6	31.41	0.1	20	218,40	206,72
7	14.14	0.28	20	147,10	98,13
8	31.41	0.28	20	30,20	35,64
Valeur du coefficient de corrélation					R = 0,91

b.4- Influence de l'interaction entre la vitesse, l'avance et le diamètre (V,S et D) :

- Le modèle de la tenue obtenu est :

$$T = e^{11,40} \cdot V^{(0,28 \ln D - 4,19)} \cdot S^{(0,28 - 1,16 \ln V)} \cdot D^{(0,61 \ln S + 0,40)} \quad (3.11)$$

- Par déduction de (3.11) nous pouvons exprimer l'expression de la vitesse de coupe technologique :

$$V = \left[\frac{T^{(3,57 \ln D - 0,23)}}{e^{11,40} \cdot S^{(0,28 - 1,16 \ln V)} \cdot D^{(0,61 \ln S + 0,40)}} \right]^{1 / (0,28 \ln D - 4,19)} \quad (3.11')$$

Ainsi les résultats des tenues expérimentales et prédites de la série longue sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau 3.12: Valeurs expérimentales et prédite calculée par le modèle combiné entre la vitesse, l'avance et le diamètre, de la durée de vie des forets (série longue) pour les différentes combinaisons du plan d'expérience.

N°	Valeurs réels des facteurs			Tenue obtenue par expérience	Prédite modèle combiné entre V,S et D
	V	S	D	T (min)	T (min)
1	14.14	0.1	09	495,08	472,27
2	31.41	0.1	09	226,99	233,25
3	14.14	0.28	09	108,11	105,00
4	31.41	0.28	09	19,22	19,88
5	14.14	0.1	20	401,16	402,12
6	31.41	0.1	20	218,40	223,60
7	14.14	0.28	20	147,10	141,00
8	31.41	0.28	20	30,20	31,69
Valeur du coefficient de corrélation R = 0,99					

C)- Etude comparatif des résultats des tenues obtenues par modèle le simple et les modèles combinés pour la série longue :

Tableau 3.13: Valeurs expérimentales et prédites calculées par le modèle simple et les différents modèles combinés, de la durée de vie des forets (série longue) pour les différentes combinaisons du plan d'expérience.

N°	Valeurs réels des facteurs			Tenue obtenue par expérience	Prédite modèle simple	Prédite, modèle combiné			
						Interaction entre V,S	Interaction entre S,D	Interaction entre V ,D	Interaction entre V,S,D
	V	S	D	T (min)	T (min)	T (min)	T (min)	T (min)	T (min)
1	11.15	0.1	10	495.08	568,044	431,535	563,039	531,017	553,783
2	22.30	01	10	226.99	225,968	214,813	183,180	151,658	239,934
3	11.15	0.2	10	108.11	100,117	120,268	76,631	91,362	107,131
4	22.30	0.2	10	19.22	39,280	22,593	23,704	26,172	19,22
5	11.15	0.1	20	401.16	644,310	490,441	517,215	557,996	460,950
6	22.30	0.1	20	218.40	256,366	244,135	159,849	186,230	233,806
7	11.15	0.2	20	147.10	113,580	136,603	114,559	96,203	133,604
8	22.30	0.2	20	30.20	44,564	25,662	35,297	30,970	26,87
Valeur des coefficients de corrélation					R=0,88	R = 0,97	R=0,92	R=091	R = 0,99

3.4.5. Analyse des modèles de l'usure des forets :

A)- Modèles simples:

L'analyse des modèles simples (3.6, 3.6') et (3.7, 3.7'), respectivement pour la série courte et longue des forêts testés montre que les tenues prédites calculées par les modèles (3.6) et (3.7) diminuent avec l'augmentation de la vitesse de coupe et l'avance, alors qu'elles augmentent avec l'accroissement du diamètre du forêt.

Le classement des exposants suivant leurs valeurs absolues, traduit de façon claire l'ordre du degré d'influence de chaque élément du régime de coupe (V, S et D) sur la tenue (T). Ainsi l'avance occupe la première place suivie par la vitesse de coupe et enfin le diamètre :

- Série courte : exp de S= -2,005 ; exp de V= -1,486 ; exp de D= 0,118
- Série longue : exp de S= -1,690 ; exp de V= -1,472 ; exp de D= 0,160

Il est à noter que le degré de l'influence de l'avance est supérieur à celui de la vitesse de coupe dans le cas du perçage, ceci s'explique par le fait que le forêt attaque la matière par trois arêtes tranchantes et travaille dans des conditions difficiles. Sa pénétration dans la matière nécessite des efforts de coupes très importants, ce qui peut engendrer une élévation de la température et par conséquent l'usure sera intensifié.

L'examen des exposants de la vitesse technologique représentées par les modèles (3.6') et (3.7') indiquent que l'augmentation de la tenue (T) et l'avance (S) agissent dans le sens d'affaiblir la vitesse technologique (V). L'influence la plus importante est également celle de l'avance (S) avec un exposant égale à (1.148) pour la série longue et de (1.349) pour la série courte, suivie par le diamètre et enfin la durée de vie.

Les valeurs des coefficients de corrélation sont : 0,93 pour la série courte et 0,88 pour la série longue, sont assez élevées, ce qui témoigne la bonne adéquation des modèles trouvées. Autrement dit, ils sont en bonne corrélation avec les valeurs expérimentales illustrées par les tableaux (3.7) et (3.8).

B)- Modèles combinés :

Nous avons intégré en premier lieu l'effet de l'interaction entre V et S.

Le traitement des résultats à permis de trouver le modèle (3.8), avec un coefficient $R = 0.97$ supérieur à celui du modèle simple.

En second lieu nous avons inclus l'effet de l'interaction de l'avance et du diamètre, qui a donné à son tour le modèle (3.9) avec un coefficient $R = 0.92$ supérieur à celui du modèle simple mais inférieur au modèle précédent.

En troisième lieu, nous avons inclus l'effet de l'interaction entre la vitesse et le diamètre, ce qui a donné le modèle (3.10) avec un coefficient $R = 0.91$, cette fois ci inférieur à ceux trouvés précédemment, mais toujours mieux que celui du modèle simple.

En dernier lieu, nous avons intégré l'effet mutuelle de tous les facteurs (V, S et D), le traitement des résultats a abouti à la détermination du modèle (3.11) avec un coefficient de corrélation $R = 0.99$ très acceptable.

Il en découle de cette étude, que l'effet des l'interaction entre vitesse et avance, avance et diamètre et enfin vitesse et diamètre, apportent un plus à la corrélation, encore mieux l'effet de l'interaction des trois facteurs en même temps.

Nous pouvons en conclure par cette étude comparatif que l'effet de l'avance occupe le premier rang car associé a la vitesse une fois et au diamètre une autre fois a donné une amélioration au résultat, suivie de la vitesse de coupe, et enfin le diamètre du forêt.

3.5. Traitement et analyse des résultats de la rugosité:

3.5.1. Traitement des résultats :

A)- Traitement des résultats pour la série courte :

Tableau 3.14: Valeurs expérimentales de la rugosité des surfaces, lors du perçage de l'acier C18 avec la série courte des forets, pour les différentes combinaisons du plan d'expériences.

N°	Facteurs						Paramètres de sortie
	Valeurs codifiées des facteurs			Valeurs réelles des facteurs			Ra (μm)
	V	S	D	V	S	D	
1	-1	-1	-1	11,15	0,1	10	3,35
2	+1	-1	-1	22,30	0,1	10	2,70
3	-1	+1	-1	11,15	0,2	10	3,48
4	+1	+1	-1	22,30	0,2	10	3,15
5	-1	-1	+1	11,15	0,1	20	5,62
6	+1	-1	+1	22,30	0,1	20	4,95
7	-1	+1	+1	11,15	0,2	20	6,02
8	+1	+1	+1	22,30	0,2	20	5,15

B)- Traitement des résultats pour la série longue :

Tableau 3.15: Valeurs expérimentales de la Rugosité des surfaces, lors du perçage de l'acier C18 avec la série longue des forets, pour les différentes combinaisons du plan d'expériences.

N°	Facteurs						Paramètres de sortie
	Valeurs codifiées des facteurs			Valeur réelle des facteurs			Ra (μm)
	V	S	D	V	S	D	
1	-1	-1	-1	14,14	0,1	09	3,12
2	+1	-1	-1	31,41	0,1	09	2,80
3	-1	+1	-1	14,14	0,28	09	3,68
4	+1	+1	-1	31,41	0,28	09	3,28
5	-1	-1	+1	14,14	0,1	20	5,74
6	+1	-1	+1	31,41	0,1	20	4,78
7	-1	+1	+1	14,14	0,28	20	6,24
8	+1	+1	+1	31,41	0,28	20	5,44

3.5.2. Analyse des résultats en fonction des éléments du régime de coupe:

A)- Influence de la vitesse de coupe (V):

En analysant les combinaisons du plan d'expérience mettant en exergue l'effet de la variation de la vitesse de coupe sur la rugosité (Ra) pour les deux séries de forets testés (courte et longue), on remarque qu'avec l'augmentation de la vitesse de coupe la rugosité s'améliore (voir la comparaison entre les combinaisons suivantes: (1 et 2) , (3 et 4) , (5 et 6) et (7 et 8) des tableaux (3.14)et (3.15). Ceci peut être expliqué par le fait qu'avec l'augmentation de la vitesse de coupe on augmente le nombre de tour sur le nez de la broche, ce qui augmente le nombre de tour de l'outil pendant la coupe par rapport au pas d'avance du foret. Les sillons tracés par l'arrachement de la matière sur la surface usinée sont plus rapprochés et les aspérités diminuent. Cela n'est pas sans risque car la température s'élève et une lubrification bien étudiée est conseillée.

B)- Influence de l'avance (S):

En analysant les combinaisons du plan d'expérience mettant en exergue l'effet de la variation de l'avance sur la rugosité (Ra) pour les deux séries de forets testés (courte et longue), on remarque qu'avec la diminution de l'avance la rugosité s'améliore (voir la comparaison entre les combinaisons suivantes: (1 et 3), (2 et 4), (5 et 7) et (6 et 8) des tableaux (3.14) et (3.15).

Ceci peut être expliqué par le fait qu'avec la diminution de l'avance, le pat tracé par la partie active du foret sur la surface usinée diminue et par conséquent l'état de surface s'améliore, aussi l'épaisseur du copeau devient plus fine et altère moins la surface usinée. Les efforts de coupe sont moins importants ce qui donne moins de vibration dans le système usinant, phénomène jouant en faveur de la rugosité.

C)- influence du diamètre du foret (D):

En analysant les combinaisons du plan d'expérience mettant en exergue l'effet de la variation du diamètre sur la rugosité (Ra) pour les deux séries de forets testés (courte et longue), on remarque qu'avec l'augmentation du diamètre du foret la rugosité se dégrade (voir la comparaison entre les combinaisons suivantes: (1 et 5), (2 et 6), (3 et 7) et (4 et 8) des tableaux (3.14) et (3.15).

Ceci peut être expliqué par le fait qu'avec l'augmentation du diamètre, les longueurs des arêtes tranchantes principales augmentent également, ce qui conduit à l'accroissement des surfaces de frottement (effets de coupe), qui peuvent générer non seulement un dégagement de chaleur intense mais aussi des vibrations dans le système usinant. Sachant qu'il existe une étroite relation entre les vibrations et la rugosité. Ajouté à cela on peut citer l'augmentation de la quantité de copeau enlevée qui en s'évacuant frotte sur la surface usinée, en la dégradant.

3.5.3. Analyse statistique de la rugosité des surfaces usinée:**A)- Traitement statistique par le modèle simple pour la série longue:**

Le calcul élaboré pour le cas du modèle simple a permis de déduire les valeurs des constantes des exposants suivant :

-Les valeurs des exposants pour le modèle simple sont:

$$k_0 = 0,43 ; k_1 = -0,17 ; k_2 = 0,12 ; k_3 = 0,68$$

Le traitement statistique des résultats de la rugosité (série longue) a permis la détermination du modèle suivant :

$$Ra = \frac{e^{0,43} \cdot S^{0,12} \cdot D^{0,68}}{V^{0,17}} \quad (3.12)$$

Ainsi les résultats des rugosités expérimentales et prédites de la série longue sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau 3.16: Valeurs expérimentales et prédites calculées par le modèle simple, de la rugosité des surfaces usinées (série longue) pour les différentes combinaisons du plan d'expérience.

N°	Valeurs réels des facteurs			Valeurs expérimentales	Prédite du modèle simple
	V	S	D	Ra (µm)	Ra (µm)
1	14.14	0.1	09	3,12	3,262
2	31.41	0.1	09	2,80	2,841
3	14.14	0.28	09	3,60	3,727
4	31.41	0.28	09	3,20	3,246
5	14.14	0.1	20	5,74	5,620
6	31.41	0.1	20	4,78	4,895
7	14.14	0.28	20	6,24	6,420
8	31.41	0.28	20	5,44	5,592
Valeur du coefficient de corrélation R = 0,96					

B)- Traitement statistique par le modèle simple de la série courte:

Le calcul élaboré pour le cas du modèle simple à permis de déduire les valeurs des constantes des exposants suivant :

$$k_0 = 0,08 ; k_1 = -0,19 ; k_2 = 0,12 ; k_3 = 0,68$$

Par analogie le modèle de prédiction de la rugosité (Ra) pour la série courte est donné par l'expression suivante :

$$Ra = \frac{e^{0,08} \cdot S^{0,12} \cdot D^{0,68}}{V^{0,19}} \tag{3.13}$$

Ainsi les résultats des rugosités expérimentales et prédites de la série longue sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau 3.17: Valeurs expérimentales et prédite calculée par le modèle simple, de la rugosité des surfaces usinées (série courte) pour les différentes combinaisons du plan d'expérience.

N°	Valeurs réels des facteurs			Valeurs expérimentales	prédite modèle simple
	V	S	D	Ra (µm)	Ra (µm)
1	11,15	0,1	10	3,35	3,366
2	22,30	0,1	10	2,70	2,951
3	11,15	0,2	10	3,48	3,680
4	22,30	0,2	10	3,15	3,228
5	11,15	0,1	20	5,62	5,942
6	22,30	0,1	20	4,95	5,210
7	11,15	0,2	20	6,02	6,493
8	22,30	0,2	20	5,50	5,693
Valeur du coefficient de corrélation R = 0,97					

3.5.4. Analyse de la modélisation de la rugosité:

Bien que le perçage n'est pas dans la majorité des cas un procédé de finition, car la rugosité obtenue lors des opérations de ce procédé n'est pas toujours satisfaisante. Il est à noter que l'analyse des modèles (3.12) et (3.13) respectivement pour la série longue et courte, traitant l'influence des éléments du régime de coupe sur la rugosité qui est considérée comme critère complémentaire pour l'évaluation de l'usinabilité, montre qu'avec l'accroissement de la vitesse de coupe la rugosité s'améliore alors qu'elle se dégrade avec l'augmentation de l'avance et le diamètre.

L'augmentation de l'avance, provoque l'élévation de la hauteur des aspérités sur la surface à usiner. L'accroissement du diamètre du foret fait apparaître de grands efforts de coupe qui influent sur le système M.O.D.O.P et provoquent des vibrations, créant un phénomène nuisant à la qualité de surface, par contre l'augmentation de la vitesse contribue à la diminution de l'effort de coupe ce qui favorise la coulabilité du copeau et le travail dans des situations plus au moins stables.

Le classement des exposants en valeurs absolues traduit l'ordre des degrés d'influence de chacun des éléments du régime de coupe (V, S et D), sur la tenue du foret hélicoïdal.

Le diamètre du foret occupe le premier rang par un coefficient égale à 0,681 suivit de la vitesse de coupe avec un exposant de 0,17 et enfin l'avance avec un exposant égale à 0,128.

Les coefficients de corrélation (R) sont respectivement pour la série longue et la série courte de $R= 0.96$ et $R= 0.97$ prouvent que les modèles obtenus sont en parfaite corrélation avec les résultats expérimentaux.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

A)- Conclusions:

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 et comme cas particulier celui des forets hélicoïdaux au quel 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 du domaine de la coupe des métaux et se répartissent comme suite : 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. Et les méthodes de longue durée ou classiques qui permettent d'aboutir à des résultats onéreux et d'une bonne précision, malgré qu'elles exigent un temps important et une grande consommation de matière pour aboutir aux résultats intéressants.

Les critères se répartissent en plusieurs types, mais seule la vitesse de coupe demeure le critère principal qui influe le plus sur la tenue des outils de coupe suivie par l'avance.

Dans une recherche méthodique, nous avons tracé les bases théoriques de la méthode de planification des expériences que nous avons optimisée par la méthode des moindres carrés 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 produits combinées 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 de N facteurs de X d'entrée du système d'usinage sur un paramètre de sortie Y. Ensuite nous avons envisagé l'action simultanée des éléments du régime de coupe (V, S, et D), sur le critère de l'usure des forets hélicoïdaux.

Toutes ces considérations ont trouvées l'application pour caractériser l'influence des paramètres du régime de coupe sur la tenue des forets hélicoïdaux et 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 des entreprises de fabrication mécanique et d'autre part ils sont réutilisés pour une éventuelle étude d'optimisation du processus de coupe. Les modèles aux quels nous sommes abouties et qui ont fait l'objet de notre étude sont jugés adéquats par l'appréciation du coefficient de corrélation.

Cette modeste recherche à la quelle 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, aussi 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.

Concernant de façon particulière le perçage, domaine de notre recherche on constate ce qui suit :

- a- L'allure de l'usure des forets est analogue à celle des outils de tour. 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, cela s'explique par le fait que la vitesse de coupe sur le périphérique est plus grande qu'au centre du foret.

c- L'analyse des résultats représentés graphiquement montre qu'avec l'augmentation de la vitesse et de l'avance l'usure augmente, alors qu'elle diminue avec l'augmentation du diamètre ainsi que les modèles trouvés sont d'une très bonne corrélation avec les résultats expérimentaux et peuvent être utiles en production.

d- L'influence des éléments du régime de coupe sur l'usure du listel et de la surface d'attaque s'est montrée insignifiante.

e- L'influence des éléments du régime de coupe sur l'usure de l'arête tranchante transversale est relativement faible par rapport à celle de l'usure en dépouille.

f- Les tenues des forets pour les différents régimes sont importantes, ce qui permet de conclure que l'acier usiné a une bonne usinabilité.

Etant donné que l'usinabilité est une propriété complexe des matériaux et qu'elle est peu étudiée en perçage, nous ne pouvons affirmer que nous avons levé tous les mystères qui l'entourent. Notre travail pourra contribuer à initier d'autres éventuelles recherches.

B)- Recommandations:

a- Finalement il est à retenir que la vitesse de coupe est le facteur le plus influant sur la tenue du foret, cependant il est conseillé de choisir lors des opérations de perçage les vitesses de coupes et avances minimales dans la mesure du possible selon bien sûr le diamètre du foret et le type de matière mis en œuvre. Et pour simplifier la tâche à l'utilisateur afin d'avoir directement le nombre de tour correspondant aux éléments du régime de coupe choisie, nous avons pu conclure et extraire de nos recherches le diagramme suivant :

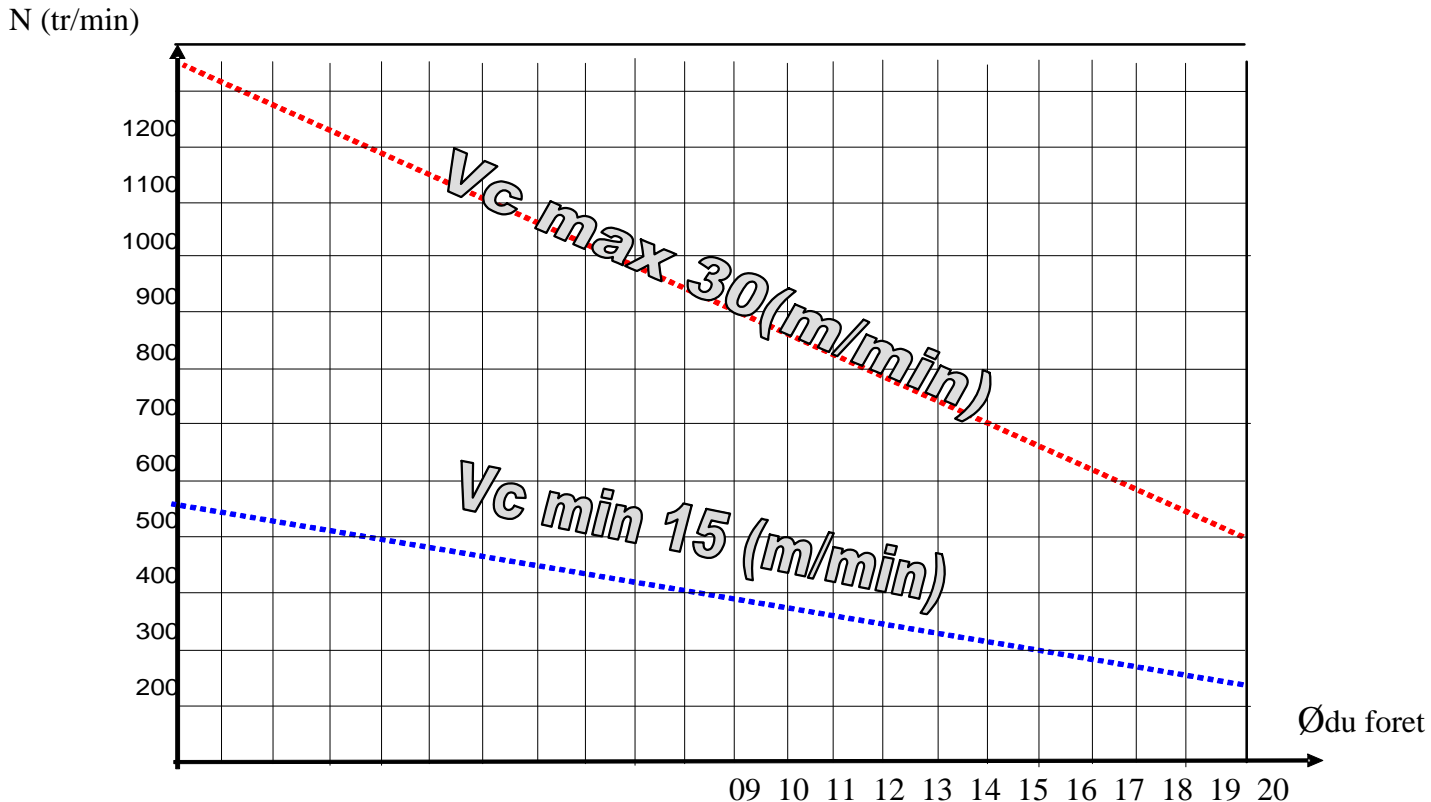


Figure 1 : Abaque pour choix du nombre de tour en perçage de l'acier C18.

b- Pour les trous longs dépassant quatre fois le diamètre et plus il est recommandé de percer avec lubrification abondante tout en débouillant au delà de quatre fois le diamètre.

c- Concernant la qualité du trou percé (rugosité et cylindricité...) défaut provoqué par l'usure et le flambage du foret et pour améliorer la productivité en perçage, une étude a été faite en 1997 par la société AOS (Affûtage Outillage Service), spécialisée dans la fabrication et affûtage d'outils coupants, a découvert ce qu'elle a appelé, du fait de sa configuration le " **foret carre** ". Encore mieux il existe le foret cylindrique plein ayant une seule goujure avec une partie active munie de plaquette interchangeable.

c.1- Description du foret carre :

Le foret carre en carbure monobloc est de conception cylindrique de diamètre comprenant deux listels à goujures droite et un nombre de dent égale à deux avec un angle d'hélice de 0°, lui confère un couple résistant parfaitement centré par rapport à son axe. La pointe à son extrémité est d'angle variable suivant la matière à usiner. Il permet la réalisation de trous débouchant ou borgnes. Il peut disposer de deux canaux d'arrosage pour favoriser la lubrification et l'évacuation des copeaux pour les profondeurs pouvant atteindre jusqu'à 15 fois le diamètre.

- 1)- le "foret carré" conçu à section pleine carrée.
- 2)- le "foret carré" doté de canaux de lubrification.



Figure 2 : Modèle de foret carré.

On distingue très bien sur le foret (2) les canaux d'amenée du lubrifiant.

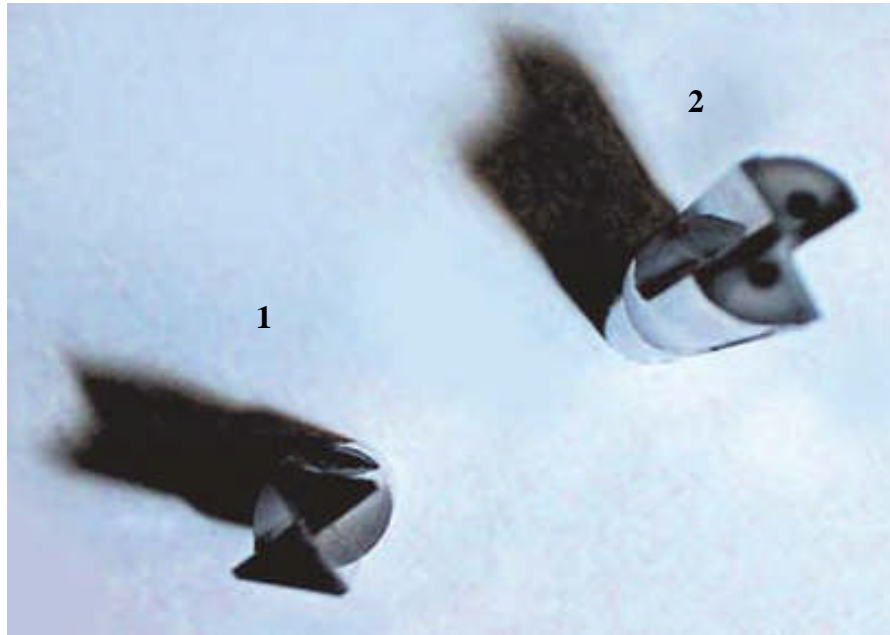


Figure 3 : Représentation de la pointe des "forets carrés"

c.2- *Avantage et inconvénients :*

Pour déterminer le potentielle du foret carre en fonction de celui hélicoïdale et de manière à établir un comparatif, il a été réalise des expériences ayant permis de dégager les avantages et les inconvénients dans ce qui suit :

L'analyse dimensionnelle du perçage avec le foret carré a montré que l'on peut obtenir une précision de cylindricité de 5 et de 50 μm sur le diamètre, ce foret permettant des perçages de plus grand profondeur en évitant les problèmes de flambages des forets classiques par conséquent l'état de surface (rugosité) s'améliore. Ce qui lui confère l'avantage de se présenter comme un foret de génération maîtrisant la profondeur de perçage jusqu'à 15 fois son diamètre [63].

Malgré les résultats élaborés par cette étude, cet axe de recherche propose toujours des sujets qu'il faudra entamer la recherche.

Nous souhaitons que notre travail trouve une continuité pour mieux éclaircir le phénomène de l'usure des outils coupant et pour quoi pas contribuer à une modélisation du phénomène de la coupe des métaux .

PERSPECTIVE

PERSPECTIVE

Comme perspectives à ce travail, nous envisageons de développer les aspects suivants :

- 1)- déterminer l'usinabilité d'autres nuances de matériaux à usiner, en intégrant d'autres critères complémentaires tels que les efforts de coupe.

- 2)- étudier le comportement de nouveaux matériaux à outil (carbure métallique, revêtu et non revêtu, céramique de coupe et CBN : (Cubic boron nitride) ...

références bibliographiques

- [1] 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.
- [2] B. ROUMESY, C. BEDRIN: Test rapide d'usinabilité par mesure Thermoélectrique . mec . n° 301 pp 34- 36. 1975.
- [3] S.Y.MAURICE : la coupe et les émulsions machine-outil.
- [4] QUILLET : *Encyclopédie des sciences industriels*. mec.8311 n° 183.1983.
- [5] BERARD GRUBER : *Outillage et mesure*. Dunod spes pp 51 - 63 1981.
- [6] L.B : *Usinabilité des aciers spéciaux*. Mat. et tech. Pp 235 - 242 . 1974.
- [7] P.MATHON : *Aptitude à l' usinage des métaux* mécanique Pp 20 - 26 . 1973.
- [8] M.ROBELET.GODIN : *Etude comparée de deux tests rapides d'usinabilité, corrélation avec les résultats d' essai de longue durée* Revue de met pp 1021-1032 . 1973.
- [09] B ROUMESY : *Détermination des lois d' usures des outils de Coules*. machine-outil n° 321 pp 61 à 63 1975.
- [10] M.ROMAGNOL : *Autre méthode d' essai d' aptitude à la coupe des outils encarbure métalliques essai à vitesse constante de moyenne durée* .met. et tech. 322 pp 33 - 38 .1976.
- [11] B.ROUMESY C.BEDRIN: *Méthodes d'essais rapides pour la détermination de la tenue de coupe des outils*. mat.et tech. pp 277 - 284.1976.
- [12] A CHEVALIER J.BAHAR : *Guide du technicien en fabrication mécanique* P.170.1991.
- [13] V.BAWIN et C.DELFORGE: *Manuel pratique d' atelier le court mécanique* 1978.
- [14] R. LOUD WEIL : *Optimisation des opérations d'usinages à l'aide de modèles* Journée d'études. Pp 26-30 1971.

- [15] V.ARCHINOV et ALEXIEV: *Coupe des métaux et outils de coupe*. Édition MIR.1972
- [16] F.LEROY : *Usinage et usinabilité technique de l'ingénieur* DUNOD.1979
- [17] F.WALACE : *Section et utilisation de forêts hélicoïdales* N° 314 décembre 1974.
- [18] Y BRUN : *la Durée économique de coupe*. Machine-outil.nod.778 pp 6-9.1974.
- [19] G ODI : *Journée d' informatique sur la coupe des métaux*. Saint-Étienne, mec. mat. élect. pp 2-6.1970.
- [20] 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.
- [21] ML.BOULANOUAR : *Etude complexe de la tenue d' un outil de tour*. Séminaire national de mécanique. Université de ANNABA les 30 et 31/12 1990.
- [22] M KHECHANA : *Détermination de l' usinabilité des aciers*. Thèse de Magistère ANNABA 1992.
- [23] S. POPOV : *Coupe des métaux*. Technica-sofia 1975
- [24] J.POMEY : *Phénomène de mécanique physique qui régissent la coupe des métaux* . mec. Mat.élect. pp 8-35 1970.
- [25] A. COMPAS et ROLLET : *Technologie professionnelle générale pour les mécaniciens*, tomes I, II, III, Foucher, 1979.
- [26] A.DOURNIER et R. SAGET: *Le fraisage des métaux*, F4, Delagrave, 1972.
- [27] A.CHEVALIER : *Etude de la coupe des métaux*, Delagrave, 1972 .
- [28] A.R. METRAL : *Machine-outil*, Dunod 1978.
- [29] V.LIOUBIMOV : *Etude de la coupe des métaux* .Cours sur la coupe des métaux, 1982
- [30] COLLECTIVITE D' AUTEURS : *Usinage T.G.V. des métaux ferreux*. Société de mécanique magnétique S.2M, Juillet 1984.
- [31] M. LEFEBRE : *fraisage combiné de carbure*, CETIM, 1989.

- [32] M. LEFEBRE, J.C. CRAPART, P. CHERRY, C. TOURNIER: *Les dépôts P.V.D. en fraisage combiné*. CETIM, Etablissement de Senl Octobre, 1989.
- [33] COLLECTIVITE D' AUTEURS : *Outils, comment en prolonge la tenue*. Revue périodique, machine de production, I.S.S.N, 1989 .
- [34] COLLECTIVITE D' AUTEURS : *Fraisage, Un domaine ou l' outil va de plus en plus vite*. Revue périodique, Machine de production ,ISSN19
- [35] S.ENACHE,A.DORIN ET E. STRAJESCU: *Contribution concernant l' établissement des conditions de coupe*. ROMANIA, 1976 .
- [36] E.K. LERY, C.L. TSAI, M.P. GROOVER: *Analytical investigation of the effect of wear on the temperature variation in a metal cutting tool*, *Journal of engineering for industry*, Ferrier, 1976 .
- [37] Renault-Mathon : *Essai rapide d' usinage*, *Revue fondeur d' aujourd' hui*,Fevrier, 1976 .
- [38] PIERRE-MATHON : *Etude de l' usinabilité des fontes malléables*. *Revue de foundries*, Fevrier, 1969 .
- [39] G.S. KAINI, M.N CHATURVEDI: *theoreircal investgation of temperature in hot machining. Physical prosperties of workpiece and tool material*. February, 1975
- [40] K. MAYER : *Evolution des outils de coupe en aciers rapides et métaux durs*. Pechiney uginé Kuhlman, 1979 .
- [41] R. BONHOMME, G. ODIN: *La qualité de surface des pièces usinées, influence des conditions d' usinage et influence matériaux usiné*. *Revue matériaux et techniques* 66, N° 3, 1978 .
- [42] P. SIMONIN : *Mesure de l' usinabilité des malléables à partir de l'essai*,*R. Mathon centre technique des industrie de la fonderie*.Mai 1976 .
- [43] M. GALLY : *Les effets thermiques associés à la coupe des métaux, la mesure des températures de coupe, machine-outil*.Novembre 1971.
- [44] M. GALLY ET C. BEDRIN: *Mesure des températures de coupe par les méthodes thermoélectriques*. *Machine-outil* n° 287pp 73-80 .Juin, 1972.
- [45] B. ROUMESY, C. BEDRIN: *Usinabilité et coupe des métaux*, *Matériaux et techniques*. Aout/ Sept, 1981.

- [46] L. BOULANOUAR, N. ZEGHIB, MC. DJAMAA: *Traitement statistique pour la détermination de l'usinabilité des aciers*. Rapport N° 1, Projet de recherche J2301/01/90, Annaba, Nov, 1991.
- [47] Y.P. ADLER ET E.V. MARKOVA: *Planification des expériences pour recherche les condition optimales*. Naouka, Moscou, 1971.
- [48] D.ROUSSEAU : *Etat de surface et durée de vie des outillages*,
Revue matériaux et techniques. Avril, 1976.
- [49] S.Y. MAURICE : *la coupe et les émulsions, machines-outils*.
N° 309 pp.83-95, 1974 .
- [50] QUILLET : *Encyclopédie des sciences industrielles*
Mécanique. N° 183, 1983.
- [51] H.K. TONSHOFF, W. KASTNER, R. SCHNADT: *Usinabilité des aciers forgés en coupe interrompue*, *Journal of matériel. processing technology*, Décembre 1989 pp .219-236 .
- [52] G. CARRO-CAO, ET M. SANTOCHI: *La formation du copeau et la surface Usinée*. *Mécanique et Matériaux* ,N° 353 pp .465- 475, Novembre 1979 .
- [53] G.H. GAUTSHI : *Mesure des forces de coupe par captures piezo-électriques multidirectionnels*. *Machine-outil*, N° 329, Avril 1976.
- [54] L. BOULANOUAR : *Coupé des métaux et outils-coupants*. I.G.M.
université de Annaba, 1994.
- [55] I. ANDONOV ET L. BOULANOUAR: *Détermination complexe de l'usinabilité de l'acier à outil 50 Cr Ni Mo 8*, *I.S.M.E. Gabrovo*, Bulgarie1984.
- [56] I. ANDONOV ET L. BOULANOUAR: *Détermination complexe de l'usinabilité de l'acier à outil Z 40 Cr Ni Mo 62*, *I.S.M.E Sofia*, 1985.
- [57] E.S BOJANOV, I. VOUTCHKOV: *Méthodes statistiques pour la modélisation et l'optimisation des objectifs multifactoriels* Sofia Technica, 1973.
- [58] L. BOULANOUAR: *Analyse statistique et orientations pour la prédiction de l'usure d'un outil de tour*. Symposium républicain, Varna, 1985.
- [59] T.N LOLADZE : *Stabilité et résistance à l'usure d'un outil*
Machinostroenié, Moscou, 1982.
- [60] A.D. MAKAROV : *Optimisation du processus de coupe*, Moscou 1976

- [61] P. MATHON : *Usinabilité et lois générales de l'usinage des aciers et des fontes*. *Mécanique Matériaux Electricité*, N° 246-247, 1970.
- [62] L. BOULANOUAR : *Modélisation statistique pour la détermination de l'usinabilité des aciers difficilement usinables*. Thèse (Ph.D), pp 200, sofia, 1986 .
- [63] AFFUTAGE OUTILLAGE SERVICE (A O S): *Conception et expérimentation d'un nouveau type d'outils coupant le foret carré* . 10 septembre 2007.
- [64]: GERARD.POULACHON : *Comportement, propriétés, et usinabilité des aciers durcis* .Laboratoire bourguignon des matériaux et des procédés. ENSAM 2002.[gerard.poulachon @cluny.ensam.fr](mailto:gerard.poulachon@cluny.ensam.fr)
- [65] MAINTENANCE DES EQUIPEMENTS INDUSTRIELS DU LYCEE LATECOERE D'ISTRES: *Conception et expérimentation d'un nouveau type d'outil coupant ,le "foret carré"* 1997.
www.mei-latecoere.com
- [66] GERARE POULACHON, ALPHONCE MOISAN, I.S. JAWAHIR: *comportement , propriété et usinabilité des aciers durcis*.Laboratoire bourguignon des matériaux et des procédés. ENSAM 2002.
E-mail: [gerard.poulachon @cluny.ensam.fr](mailto:gerard.poulachon@cluny.ensam.fr)
machining. Research laboratory.414. CRMS, university of Kentucky Lexington. KY.40506-0108.USA.E-mail: [jawahir @ engr.uk.edu](mailto:jawahir@engr.uk.edu)

ANNEXE A

Résultats des expériences

1) - Série longue :

Les expériences ont été réalisées dans l'ordre selon le tableau (3.6).

Expérience N° 1

Cet essai a été réalisé selon le régime de coupe suivant:

$$* V = 14.14 \text{ (m/min)} \quad * S = 0.10 \text{ (min/tr)} \quad * D = 09 \text{ (mm)} \quad * n = 500 \text{ tr/min}$$

Tableau 2.A : résultats de l'usure sur la partie active du foret selon le régime (1).

N°	Nbr de trous	temps par série (mn)	Usure sur la surface en dépouille VB (mm)			Usure des listels Lt (mm)	Usure de l'arrête tranchante V _{ATT} (mm)	Usure sur la surface d'attaque L (mm)	
				VB1	VB 2				VB3
01	05	008.30	I	0.03	0.06	0.02	0.04	0.04	0.04
			II	0.04	0.06	0.05	0.03	0.05	0.03
02	10	025.05	I	0.04	0.07	0.05	0.04	0.07	0.04
			II	0.05	0.05	0.05	0.03	0.07	0.03
03	26	063.93	I	0.09	0.09	0.15	0.12	0.20	0.12
			II	0.11	0.12	0.13	0.11	0.12	0.11
04	20	102.33	I	0.10	0.11	0.18	0.12	0.25	0.12
			II	0.13	0.13	0.20	0.11	0.25	0.11
05	20	118.73	I	0.11	0.15	0.21	0.12	0.29	0.12
			II	0.13	0.15	0.22	0.11	0.26	0.11
06	30	179.83	I	0.14	0.19	0.27	0.12	0.39	0.12
			II	0.15	0.17	0.25	0.11	0.33	0.11
07	30	227.93	I	0.16	0.23	0.32	0.12	0.39	0.12
			II	0.15	0.21	0.28	0.11	0.34	0.11
08	30	286.03	I	0.16	0.27	0.38	0.13	0.44	0.13
			II	0.16	0.21	0.34	0.14	0.41	0.14
09	30	329.13	I	0.17	0.30	0.41	0.13	0.47	0.13
			II	0.16	0.27	0.38	0.14	0.43	0.14
10	30	376.23	I	0.17	0.38	0.43	0.13	0.49	0.13
			II	0.16	0.27	0.39	0.14	0.45	0.14
11	20	408.03	I	0.18	0.37	0.48	0.13	0.53	0.13
			II	0.16	0.29	0.41	0.14	0.46	0.14
12	20	448.03	I	0.18	0.38	0.50	0.17	0.55	0.17
			II	0.17	0.37	0.47	0.14	0.56	0.14
13	10	457.73	I	0.19	0.41	0.52	0.17	0.60	0.17
			II	0.17	0.37	0.50	0.15	0.57	0.15
14	05	495.08	I	0.20	0.44	0.55	0.17	0.65	0.17
			II	0.18	0.37	0.52	0.15	0.58	0.15

Remarque : Cet essai a été repris trois fois, suite à la cassure de l'arête tranchante transversale temps d'usinage de 55 min et d'une usure sur (ATT) de 0.14 mm. La deuxième cassure, après un temps d'usinage de 270min et d'une usure sur (ATT) de 0.3mm. Ce n'est qu'à la troisième fois que l'essai a réussi.

Expérience N° 2

Cet essai a été réalisé selon le régime de coupe suivant:

* V = 31.41 (m/min) * S = 0.10 (min/tr) * D = 09 (mm) * n = 1000tr/min

Tableau 3.A : résultats de l'usure sur la partie active du foret selon le régime (2).

N°	Nbr de trous	temps par série (mn)	Usure sur la surface en dépouille VB (mm)			Usure des listels Lt(mm)	Usure l'arrête tranchante V _{ATT} (mm)	Usure sur la surface d'attaque L (mm)	
			I	VB1	VB2				VB3
01	03	002.31	I	0.02	0.03	0.04	RAS	0.03	RAS
			II	0.03	0.04	0.04	RAS	0.04	RAS
02	05	006.61	I	0.04	0.04	0.04	RAS	0.04	RAS
			II	0.05	0.05	0.04	RAS	0.07	RAS
03	10	013.86	I	0.05	0.05	0.04	RAS	0.06	0.03
			II	0.06	0.06	0.05	RAS	0.10	0.04
04	10	021.56	I	0.06	0.07	0.08	RAS	0.07	0.04
			II	0.06	0.08	0.07	RAS	0.10	0.05
05	10	029.26	I	0.06	0.08	0.10	RAS	0.07	0.05
			II	0.08	0.09	0.10	RAS	0.11	0.09
06	10	036.96	I	0.06	0.08	0.10	RAS	0.08	0.07
			II	0.09	0.09	0.11	RAS	0.12	0.11
07	15	048.58	I	0.06	0.11	0.11	RAS	0.09	0.08
			II	0.10	0.12	0.12	RAS	0.13	0.12
08	20	063.98	I	0.07	0.11	0.11	RAS	0.09	0.10
			II	0.11	0.12	0.13	RAS	0.14	0.12
09	20	099.40	I	0.09	0.12	0.17	RAS	0.10	0.13
			II	0.11	0.14	0.20	RAS	0.15	0.13
10	20	114.80	I	0.10	0.14	0.18	RAS	0.12	0.13
			II	0.15	0.21	0.20	RAS	0.16	0.15
11	30	137.90	I	0.11	0.15	0.21	RAS	0.16	0.20
			II	0.16	0.21	0.22	RAS	0.20	0.22
12	30	160.00	I	0.13	0.16	0.24	RAS	0.18	0.18
			II	0.18	0.22	0.25	RAS	0.22	0.24
13	12	169.24	I	0.17	0.17	0.25	RAS	0.20	0.18
			II	0.20	0.22	0.30	RAS	0.22	0.24
14	15	180.79	I	0.20	0.20	0.30	RAS	0.22	0.20
			II	0.21	0.21	0.37	RAS	0.25	0.26
15	15	192.34	I	0.21	0.22	0.35	RAS	0.22	0.20
			II	0.23	0.24	0.42	RAS	0.26	0.26
16	15	203.89	I	0.24	0.24	0.40	RAS	0.26	0.22
			II	0.25	0.25	0.46	RAS	0.29	0.28
17	15	215.44	I	0.25	0.27	0.45	RAS	0.28	0.22
			II	0.26	0.29	0.49	RAS	0.31	0.28
18	15	226.99	I	0.25	0.30	0.51	RAS	0.32	0.24
			II	0.26	0.32	0.53	RAS	0.35	0.30

Remarque : L'essai (2) a été réalisé avec débouillage très fréquent et c'est caractérisé par une forme de copeau continu et normal. Cassure sur la surface de dépouille et une usure de SA progressive, cependant rien à signaler sur le listel.

Expérience N° 3

Cet essai a été réalisé selon le régime de coupe suivant:

* V = 14,14(m/min) * S = 0.28 (min/tr) * D = 09 (mm) * n = 500tr/min

Tableau 8.A : résultats de l'usure sur la partie active du foret selon le régime (3).

N°	Nbr de trous	temps par série (mn)	Usure sur la surface en dépouille VB (mm)			Usure des listels Lt(mm)	Usure l'arrête tranchante V _{ATT} (mm)	Usure sur la surface d'attaque L (mm)	
			I	VB1	VB2				VB3
01	03	001.50	I	0.03	0.05	0.04	RAS	0.05	RAS
			II	0.04	0.04	0.05	RAS	0.03	RAS
02	05	004.00	I	0.04	0.05	0.05	RAS	0.06	0.02
			II	0.05	0.06	0.07	RAS	0.05	0.03
03	10	009.39	I	0.06	0.07	0.07	RAS	0.09	0.05
			II	0.06	0.06	0.09	RAS	0.07	0.06
04	10	014.00	I	0.07	0.08	0.10	RAS	0.10	0.08
			II	0.08	0.08	0.12	RAS	0.10	0.08
05	15	021.78	I	0.08	0.10	0.13	RAS	0.10	0.08
			II	0.10	0.08	0.13	RAS	0.10	0.08
06	20	031.57	I	0.10	0.12	0.14	RAS	0.12	0.14
			II	0.10	0.12	0.15	RAS	0.11	0.10
07	20	041.52	I	0.10	0.13	0.15	RAS	0.12	0.14
			II	0.13	0.12	0.17	RAS	0.11	0.12
08	20	056.50	I	0.12	0.15	0.20	RAS	0.13	0.14
			II	0.14	0.15	0.19	RAS	0.12	0.14
09	23	068.12	I	0.14	0.17	0.23	RAS	0.15	0.14
			II	0.15	0.16	0.21	RAS	0.14	0.14
10	16	076.30	I	0.16	0.18	0.35	0.03	0.19	0.14
			II	0.17	0.18	0.25	0.02	0.17	0.14
11	10	081.00	I	0.18	0.18	0.39	0.08	0.24	0.15
			II	0.17	0.18	0.31	0.14	0.20	0.14
12	19	090.78	I	0.18	0.19	0.45	0.15	0.24	0.16
			II	0.17	0.18	0.31	0.16	0.21	0.15
13	16	098.63	I	0.18	0.20	0.48	0.16	0.25	0.17
			II	0.18	0.19	0.35	0.17	0.22	0.15
14	10	103.65	I	0.20	0.21	0.51	0.18	0.26	0.20
			II	0.19	0.20	0.40	0.20	0.23	0.18
15	10	108.50	I	0.21	0.22	0.54	0.19	0.28	0.22
			II	0.20	0.22	0.48	0.22	0.25	0.19

Remarque :

Dès le début de cet essai on a observé une cassure sur l'arête tranchante transversale, le cycle de débouillage a été très fréquent. Apparition de l'arête rapportée. L'usure est minimale sur le listel, et apparition de brulure sur (ATT) avec usure normal.

Expérience N° 4

Cet essai a été réalisé selon le régime de coupe suivant:

$$* V = 31.41 \text{ (m/min)} \quad * S = 0.28 \text{ (min/tr)}$$

$$* D = 09 \text{ (mm)} \quad * n = 1000 \text{ tr/min}$$

Tableau 5.A : résultats de l'usure sur la partie active du foret selon le régime (4).

N°	Nbr de trous	temps par série (mn)	Usure sur la surface en dépouille VB (mm)			Usure des listels Lt (mm)	Usure l'arrête tranchante VATT (mm)	sure sur la surface d'attaque L (mm)	
			I	VB1	VB 2				VB3
01	02	00.62	I	0.03	0.04	0.10	RAS	0.03	RAS
			II	0.02	0.03	0.18	RAS	0.04	RAS
02	05	01.86	I	0.05	0.07	0.12	RAS	0.04	RAS
			II	0.02	0.06	0.27	RAS	0.04	RAS
03	10	04.96	I	0.06	0.10	0.19	RAS	0.05	RAS
			II	0.05	0.12	0.38	RAS	0.05	RAS
04	10	08.06	I	0.06	0.07	0.25	0.06	0.06	0.05
			II	0.07	0.11	0.42	0.03	0.07	0.05
05	15	13.02	I	0.07	0.09	0.30	0.06	0.06	0.06
			II	0.09	0.13	0.46	0.03	0.07	0.08
06	10	16.12	I	0.10	0.11	0.42	0.06	0.10	0.11
			II	0.11	0.15	0.52	0.03	0.13	0.13
07	10	19.22	I	0.10	0.15	0.47	0.06	0.12	0.14
			II	0.11	0.18	0.54	0.03	0.13	0.20

Remarque :

Cet essai a été réalisé avec un cycle de déburrage non fréquent, le temps de réalisation est très court. Le copeau est continu et long, avec apparition de brulure sur surface d'attaque. Apparition de l'arête rapporté plus des cassures sur le listel.

Expérience N° 5

Cet essai a été réalisé selon le régime de coupe suivant:

* V = 14.14 (m/min) * S = 0.10 (min/tr) * D = 20 (mm) * n = 250 tr/min

Tableau 1.A : résultats de l'usure sur la partie active du foret selon le régime (5).

N°	Nbr de trous	temps par série (mn)	Usure sur la surface en dépouille VB (mm)			Usure des listels Lt (mm)	Usure l'arrête tranchante V _{ATT} (mm)	Usure sur la surface d'attaque L (mm)	
				VB1	VB 2				VB3
01	02	003.00	I	RAS	0.01	0.02	RAS	0.02	RAS
			II	RAS	0.01	0.01	RAS	0.03	RAS
02	05	010.50	I	RAS	0.02	0.02	RAS	0.09	RAS
			II	RAS	0.02	0.01	RAS	0.04	RAS
03	10	025.92	I	0.03	0.03	0.03	RAS	0.08	RAS
			II	0.02	0.02	0.03	RAS	0.13	RAS
04	15	048.75	I	0.04	0.04	0.05	RAS	0.12	RAS
			II	0.02	0.03	0.03	RAS	0.14	RAS
05	15	071.30	I	0.04	0.06	0.05	RAS	0.17	0.03
			II	0.04	0.04	0.04	RAS	0.20	AR
06	15	094.80	I	0.5	0.08	0.09	RAS	0.21	0.05
			II	0.05	0.07	0.07	RAS	0.24	0.03
07	15	118.30	I	AR	0.10	0.10	RAS	0.25	0.06
			II	0.05	0.09	0.08	RAS	0.28	0.06
08	20	148.51	I	0.07	0.11	0.16	RAS	0.28	0.10
			II	0.08	0.09	0.11	RAS	0.30	0.09
09	23	185.52	I	0.08	0.14	0.22	RAS	0.35	0.12
			II	0.09	0.10	0.15	RAS	0.39	0.10
10	10	201.30	I	0.10	0.16	0.24	RAS	0.42	0.13
			II	0.10	0.14	0.16	RAS	0.37	0.11
11	20	241.15	I	0.13	0.16	0.32	RAS	0.42	0.14
			II	0.12	0.17	0.19	RAS	0.40	0.12
12	20	281.62	I	0.15	0.17	0.35	RAS	0.45	0.14
			II	0.13	0.14	0.20	RAS	0.43	0.13
13	20	321.84	I	0.17	0.19	0.38	RAS	0.46	0.17
			II	0.15	0.16	0.26	RAS	0.46	0.14
14	20	361.63	I	0.20	0.25	0.44	CA	0.57	0.20
			II	0.18	0.22	0.32	0.07	0.56	0.15
15	10	381.52	I	0.22	0.28	0.50	0.05	0.59	0.21
			II	0.20	0.26	0.38	0.08	0.58	0.19
16	10	401.16	I	0.25	0.35	0.54	0.05	0.62	0.21
			II	0.21	0.32	0.51	0.08	0.59	0.19

Remarque :

Essai très long, et perçage avec débouillage à moyenne fréquence. On remarque l'apparition de l'arête rapporté sur la surface d'attaque, aussi des cassures sur la surface de dépouille. L'usure de l'arête tranchante transversale est très élevée avec traces de brûlures.

Expérience N° 6

Cet essai a été réalisé selon le régime de coupe suivant:

$$* V = 31.41 \text{ (m/min)} \quad * S = 0.10 \text{ (min/tr)}$$

$$* D = 20 \text{ (mm)} \quad * n = 500 \text{ tr/min}$$

Tableau 4.A : résultats de l'usure sur la partie active du foret selon le régime (6).

N°	Nbr de trous	temps par série (mn)	Usure sur la surface en dépouille VB (mm)			Usure des listels Lt (mm)	Usure l'arrête tranchante V _{ATT} (mm)	Usure sur la surface d'attaque L (mm)	
			I	VB1	VB 2				VB3
01	02	06.72	I	0.04	0.09	0.14	0.13	0.09	0.02
			II	0.05	0.10	0.13	0.12	0.08	0.08
02	05	23.52	I	0.04	0.10	0.17	0.13	0.10	0.03
			II	0.05	0.11	0.20	0.12	0.09	0.10
03	05	40.32	I	0.05	0.13	0.22	0.13	0.11	0.05
			II	0.06	0.15	0.27	0.12	0.10	0.11
04	10	73.92	I	0.05	0.14	0.27	0.15	0.10	0.07
			II	0.06	0.16	0.30	0.12	0.15	0.12
05	10	107.52	I	0.05	0.18	0.32	0.15	0.20	0.08
			II	0.08	0.19	0.33	0.12	0.21	0.13
06	12	147.84	I	0.08	0.20	0.36	0.16	0.26	0.08
			II	0.10	0.25	0.40	0.13	0.31	0.17
07	06	168.00	I	0.08	0.24	0.37	0.16	0.32	0.10
			II	0.15	0.28	0.43	0.14	0.34	0.18
08	10	201.60	I	0.15	0.27	0.52	0.17	0.39	0.10
			II	0.18	0.31	0.54	0.14	0.40	0.18
09	05	218.40	I	0.11	0.30	0.55	0.17	0.42	0.11
			II	0.19	0.35	0.62	0.14	0.43	0.20

Remarque :

Il est à noter que l'essai (6) s'est caractérisé par un copeau long et continu, avec une usure constante sur le listel et une apparition de cratère. Usure sur la surface d'attaque (SA) insignifiante sauf légère cassure. Sans oublier l'usure progressive sur l'arête tranchante transversale (ATT). Des brûlures sur la surface en dépouille avec une légère cassure.

Expérience N° 7

Cet essai a été réalisé selon le régime de coupe suivant:

$$* V = 14.14 \text{ (m/min)} \quad * S = 0.28 \text{ (min/tr)}$$

$$* D = 20 \text{ (mm)} \quad * n = 250 \text{tr/min}$$

Tableau 6.A : résultats de l'usure sur la partie active du foret selon le régime (6/7).

N°	Nbr de trous	temps par série (mn)	Usure sur la surface en dépouille VB (mm)			Usure des listels Lt(mm)	Usure l'arrête tranchante V _{ATT} (mm)	Usure sur la surface d'attaque L (mm)	
				VB1	VB 2				VB3
01	02	002.40	I	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	
			II	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	
02	05	008.40	I	0.04	0.03	0.06	RAS	0.01	RAS
			II	0.02	0.03	0.06	RAS	0.04	RAS
03	10	020.40	I	0.06	0.06	0.06	RAS	0.07	RAS
			II	0.03	0.04	0.06	RAS	0.08	RAS
04	15	038.40	I	0.08	0.06	0.07	RAS	0.10	RAS
			II	0.06	0.06	0.08	RAS	0.13	RAS
05	19	061.20	I	0.06	0.06	0.14	RAS	0.15	0.05
			II	0.08	0.10	0.20	RAS	0.15	0.02
06	10	073.20	I	0.11	0.13	0.20	RAS	0.15	0.07
			II	0.10	0.13	0.22	RAS	0.17	0.03
07	10	085.20	I	0.10	0.14	0.22	RAS	0.18	0.10
			II	0.11	0.13	0.24	RAS	0.20	0.09
08	10	096.70	I	0.13	0.15	0.24	RAS	0.19	0.12
			II	0.14	0.16	0.27	RAS	0.23	0.09
09	10	107.70	I	0.15	0.16	0.27	RAS	0.20	0.14
			II	0.15	0.17	0.30	RAS	0.24	0.10
10	10	118.70	I	0.16	0.18	0.28	RAS	0.22	0.14
			II	0.17	0.19	0.32	RAS	0.26	0.12
11	10	125.80	I	0.17	0.19	0.33	RAS	0.25	0.14
			II	0.19	0.20	0.34	RAS	0.28	0.12
12	15	136.45	I	0.19	0.23	0.43	RAS	0.28	0.15
			II	0.20	0.23	0.48	RAS	0.30	0.13
13	15	147.10	I	0.21	0.31	0.54	RAS	0.31	0.15
			II	0.24	0.28	0.57	RAS	0.32	0.13

Remarque:

Pour cet essai le perçage a été effectué sans déburrage avec un copeau long et continu, une légère usure sur le listel. Apparition de cratères sur la surface d'attaque (SA), aussi apparition d'une tache blanche sous forme d'hélice sur la surface d'attaque. Apparition d'arête rapportée sur la surface en dépouille.

Expérience N° 8

Cet essai a été réalisé selon le régime de coupe suivant:

$$* V = 31.41 \text{ (m/min)} \quad * S = 0.28 \text{ (min/tr)}$$

$$* D = 20 \text{ (mm)} \quad * n = 500\text{tr/min}$$

Tableau 7.A : résultats de l'usure sur la partie active du foret selon le régime (7/8).

N°	Nbr de trous	temps par série (mn)	Usure sur la surface en dépouille VB (mm)			Usure des listels Lt(mm)	Usure l'arête tranchante V _{ATT} (mm)	Usure sur la surface d'attaque L (mm)	
				VB1	VB2				VB3
01	02	01.20	I	0.02	0.03	0.04	RAS	0.03	0.01
			II	0.03	0.05	0.08	RAS	0.03	0.03
02	20	13.20	I	0.03	0.06	0.10	RAS	0.06	0.02
			II	0.05	0.07	0.10	RAS	0.08	0.04
03	10	19.20	I	0.06	0.09	0.30	RAS	0.08	0.07
			II	0.09	0.10	0.32	RAS	0.10	0.04
04	05	21.58	I	0.06	0.18	0.37	RAS	0.09	0.07
			II	0.09	0.18	0.37	RAS	0.11	0.04
05	05	24.52	I	0.08	0.21	0.45	RAS	0.10	0.08
			II	0.10	0.25	0.46	RAS	0.13	0.04
06	05	27.85	I	0.08	0.22	0.47	RAS	0.11	0.08
			II	0.10	0.29	0.50	RAS	0.14	0.05
07	05	30.56	I	0.10	0.28	0.52	RAS	0.12	0.08
			II	0.10	0.30	0.53	RAS	0.16	0.05

Remarque :

Concernant l'essai (8), on a observé un usinage sans débourrages et un copeau long et continue avec des brulures sur l'arête tranchante transversale, plus une apparition de l'arête rapportée sur les différentes parties actives du foret, plus des cassures. Cependant, Pas d'usure sur le listel.

2) - **Série courte** : Les expériences ont été réalisées dans l'ordre selon le tableau (3.5).

Expérience N° 1

Cet essai a été réalisé selon le régime de coupe suivant:

* V = 11.15 (m/min) * S = 0.10 (min/tr) * D = 10 (mm) * n = 500 tr/min

Tableau12.A : résultats de l'usure sur la partie active du foret selon le régime (1).

N°	Nbr de trous	temps par série (mn)	Usure sur la surface en dépouille VB (mm)			Usure des listels Lt(mm)	Usure l'arrête tranchante V _{ATT} (mm)	Usure sur la surface d'attaque L (mm)	
			I	VB1	VB2				VB3
01	05	08.13	I	0.01	0.03	0.05	0.04	0.04	0.04
			II	0.01	0.02	0.04	0.03	0.05	0.03
02	10	17.82	I	0.03	0.06	0.09	0.05	0.07	0.04
			II	0.03	0.05	0.08	0.04	0.07	0.03
03	20	50.02	I	0.07	0.10	0.15	0.10	0.20	0.12
			II	0.05	0.11	0.14	0.08	0.12	0.11
04	20	82.42	I	0.07	0.12	0.19	0.10	0.25	0.12
			II	0.05	0.13	0.18	0.08	0.25	0.11
05	20	114.82	I	0.09	0.15	0.21	0.11	0.29	0.12
			II	0.07	0.15	0.20	0.09	0.26	0.11
06	35	171.52	I	0.10	0.19	0.25	0.12	0.39	0.12
			II	0.09	0.17	0.23	0.10	0.33	0.11
07	25	212.02	I	0.12	0.22	0.29	0.12	0.39	0.12
			II	0.10	0.21	0.27	0.11	0.34	0.11
08	30	260.62	I	0.14	0.28	0.34	0.14	0.44	0.13
			II	0.12	0.22	0.31	0.15	0.41	0.14
09	30	308.62	I	0.14	0.30	0.37	0.14	0.47	0.13
			II	0.13	0.28	0.35	0.15	0.43	0.14
10	30	357.22	I	0.16	0.36	0.40	0.15	0.49	0.13
			II	0.14	0.30	0.38	0.16	0.45	0.14
11	20	389.62	I	0.17	0.38	0.47	0.16	0.53	0.13
			II	0.15	0.32	0.45	0.16	0.46	0.14
12	20	413.62	I	0.18	0.40	0.49	0.17	0.55	0.17
			II	0.16	0.37	0.48	0.16	0.56	0.14
13	15	437.92	I	0.19	0.42	0.55	0.17	0.60	0.17
			II	0.17	0.39	0.52	0.16	0.57	0.15
14	10	454.12	I	0.20	0.44	0.57	0.18	0.65	0.17
			II	0.17	0.41	0.54	0.17	0.58	0.15
15	10	470.32	I	0.20	0.46	0.60	0.18	0.65	0.17
			II	0.19	0.43	0.56	0.17	0.58	0.15
16	05	478.42	I	0.22	0.47	0.62	0.18	0.65	0.17
			II	0.20	0.45	0.57	0.17	0.58	0.15

Remarque :

Pour l'essai (1) on observe un usinage avec déburrage fréquent, un copeau long et continue, avec une apparition d'arête rapportée sur la surface en dépouille. Cependant, une usure moyenne sur le listel et la surface d'attaque (SA) plus apparition de cratères.

Expérience N° 2

Cet essai a été réalisé selon le régime de coupe suivant:

* V = 22.30 (m/min) * S = 0.10 (min/tr) * D = 10 (mm) * n = 1000 tr/min

Tableau12.A : résultats de l'usure sur la partie active du foret selon le régime (2).

N°	Nbr de trous	temps par série (mn)	Usure sur la surface en dépouille VB (mm)			Usure des listels Lt(mm)	Usure l'arrête tranchante V _{ATT} (mm)	Usure sur la surface d'attaque L (mm)	
			I	VB1	VB2				VB3
01	02	01.64	I	0.01	0.01	0.02	RAS	0.03	RAS
			II	0.02	0.02	0.03	RAS	0.04	RAS
02	05	05.74	I	0.02	0.03	0.04	RAS	0.04	RAS
			II	0.03	0.03	0.04	RAS	0.07	RAS
03	10	13.94	I	0.03	0.03	0.04	RAS	0.06	0.03
			II	0.03	0.04	0.05	RAS	0.10	0.04
04	10	22.14	I	0.04	0.05	0.07	RAS	0.07	0.05
			II	0.05	0.06	0.07	RAS	0.10	0.05
05	10	30.34	I	0.05	0.07	0.09	RAS	0.07	0.06
			II	0.07	0.08	0.10	RAS	0.11	0.09
06	10	38.54	I	0.06	0.08	0.10	RAS	0.08	0.07
			II	0.09	0.09	0.11	RAS	0.12	0.11
07	15	50.84	I	0.06	0.10	0.11	RAS	0.09	0.08
			II	0.19	0.11	0.12	RAS	0.13	0.13
08	20	67.24	I	0.07	0.10	0.11	RAS	0.09	0.10
			II	0.11	0.12	0.13	RAS	0.14	0.14
09	20	83.64	I	0.09	0.12	0.15	RAS	0.10	0.12
			II	0.11	0.14	0.20	RAS	0.15	0.15
10	20	100.04	I	0.10	0.15	0.18	RAS	0.12	0.13
			II	0.15	0.18	0.22	RAS	0.16	0.16
11	30	124.64	I	0.11	0.17	0.25	RAS	0.16	0.19
			II	0.16	0.21	0.28	RAS	0.20	0.17
12	30	149.24	I	0.13	0.20	0.29	RAS	0.18	0.22
			II	0.18	0.23	0.33	RAS	0.22	0.18
13	15	169.24	I	0.17	0.24	0.32	RAS	0.20	0.19
			II	0.20	0.25	0.36	RAS	0.22	0.24
14	15	208.54	I	0.20	0.26	0.37	RAS	0.21	0.20
			II	0.21	0.27	0.40	RAS	0.25	0.26
15	15	220.84	I	0.21	0.27	0.40	RAS	0.22	0.20
			II	0.23	0.28	0.43	RAS	0.26	0.26
16	15	233.14	I	0.25	0.29	0.45	RAS	0.25	0.21
			II	0.26	0.30	0.46	RAS	0.29	0.27
17	10	241.34	I	0.26	0.31	0.47	RAS	0.27	0.23
			II	0.25	0.32	0.48	RAS	0.31	0.28
18	05	245.44	I	0.25	0.33	0.50	RAS	0.32	0.25
			II	0.26	0.35	0.51	RAS	0.34	0.29

Remarque : L'essai (2) a été réalisé avec débouillage très fréquent et c'est caractérisé par une forme de copeau continu et normal. Une cassure sur la surface en dépouille et une l'usure sur (SA) était progressive, cependant rien à signaler concernant le listel.

Expérience N° 3

Cet essai a été réalisé selon le régime de coupe suivant:

$$* V = 11.15 \text{ (m/min)} \quad * S = 0.20 \text{ (min/tr)}$$

$$* D = 10 \text{ (mm)} \quad * n = 500 \text{ tr/min}$$

Tableau12.A : résultats de l'usure sur la partie active du foret selon le régime (3).

N°	Nbr de trous	temps par série (mn)	Usure sur la surface en dépouille VB (mm)			Usure des listels Lt(mm)	Usure l'arrête tranchante V _{ATT} (mm)	Usure sur la surface d'attaque L (mm)	
			I	VB1	VB2				VB3
01	02	1.63	I	0.00	0.03	0.04	RAS	0.05	RAS
			II	0.00	0.05	0.07	RAS	0.03	RAS
02	05	05.70	I	0.03	0.05	0.07	RAS	0.06	0.02
			II	0.05	0.06	0.10	RAS	0.05	0.03
03	10	13.85	I	0.04	0.07	0.10	RAS	0.09	0.05
			II	0.06	0.06	0.13	RAS	0.07	0.06
04	15	26.07	I	0.05	0.09	0.13	RAS	0.10	0.08
			II	0.07	0.08	0.16	RAS	0.10	0.08
05	20	42.37	I	0.06	0.10	0.15	0.03	0.10	0.08
			II	0.08	0.09	0.19	0.02	0.10	0.08
06	20	58.67	I	0.07	0.12	0.17	0.03	0.12	0.14
			II	0.09	0.12	0.21	0.02	0.11	0.10
07	20	74.97	I	0.09	0.13	0.23	0.04	0.12	0.14
			II	0.10	0.12	0.25	0.02	0.11	0.12
08	30	99.42	I	0.11	0.14	0.32	0.07	0.13	0.14
			II	0.13	0.15	0.35	0.06	0.12	0.14
09	25	119.79	I	0.12	0.17	0.37	0.12	0.15	0.14
			II	0.14	0.16	0.38	0.10	0.14	0.14
10	20	136.09	I	0.13	0.18	0.42	0.14	0.19	0.14
			II	0.16	0.18	0.42	0.13	0.17	0.14
11	15	148.31	I	0.14	0.18	0.48	0.18	0.24	0.15
			II	0.17	0.20	0.43	0.16	0.20	0.14
12	15	160.53	I	0.15	0.19	0.50	0.21	0.24	0.16
			II	0.19	0.21	0.46	0.19	0.21	0.15
13	15	172.75	I	0.16	0.24	0.52	0.22	0.25	0.17
			II	0.21	0.23	0.48	0.20	0.22	0.15
14	10	180.90	I	0.17	0.27	0.53	0.24	0.26	0.20
			II	0.22	0.25	0.50	0.22	0.23	0.18

Remarque :

Concernant l'essai (3), le perçage a été effectué avec un débouillage fréquent. Le copeau était long et continu. Une usure sur le listel et sur la surface d'attaque progressive. Apparition d'arête rapportée sur la surface d'attaque.

Expérience N° 4

Cet essai a été réalisé selon le régime de coupe suivant:

$$* V = 22.30 \text{ (m/min)} \quad * S = 0.20 \text{ (min/tr)}$$

$$* D = 10 \text{ (mm)} \quad * n = 1000 \text{ tr/min}$$

Tableau10.A : résultats de l'usure sur la partie active du foret selon le régime (4).

N°	Nbr de trous	temps par série (mn)	Usure sur la surface en dépouille VB (mm)			Usure des listels Lt(mm)	Usure l'arrête tranchante V _{ATT} (mm)	Usure sur la surface d'attaque L (mm)
			I	VB1	VB2				VB3
01	02	0.64	I	0.01	0.03	0.12	RAS	RAS
			II	0.02	0.04	0.17	RAS	RAS
02	05	02.24	I	0.02	0.06	0.20	RAS	RAS
			II	0.03	0.05	0.26	RAS	RAS
03	07	04.48	I	0.04	0.11	0.26	RAS	RAS
			II	0.05	0.13	0.37	RAS	RAS
04	10	07.68	I	0.05	0.12	0.32	0.06	0.06
			II	0.06	0.15	0.40	0.03	0.07
05	10	10.88	I	0.06	0.15	0.39	0.06	0.06
			II	0.07	0.18	0.44	0.03	0.07
06	15	15.68	I	0.07	0.17	0.43	0.06	0.10
			II	0.09	0.22	0.49	0.03	0.13
07	10	18.88	I	0.09	0.20	0.46	0.06	0.12
			II	0.10	0.26	0.51	0.03	0.13
08	05	20.48	I	0.10	0.22	0.47	0.07	0.13
			II	0.11	0.30	0.53	0.04	0.14
09	05	33.75	I	0.11	0.25	0.49	0.08	0.14
			II	0.12	0.31	0.55	0.06	0.14

Remarque :

Cet essai a été réalisé avec un cycle de déburrage à moyenne fréquence, durant un temps de réalisation très court, dégageant un copeau continu et long. On remarque aussi des traces de brûlure sur la surface d'attaque et apparition de l'arête rapporte sur le listel.

Expérience N° 5

Cet essai a été réalisé selon le régime de coupe suivant:

* V = 11,15 (m/min) * S = 0,10 (min/tr) * D = 20 (mm) * n = 500 tr/min

Tableau 9.A : résultats de l'usure sur la partie active du foret selon le régime (5).

N°	Nbr de trous	temps par série (mn)	Usure sur la surface en dépouille VB (mm)			Usure des listels Lt(mm)	Usure l'arrête tranchante V _{ATT} (mm)	Usure sur la surface d'attaque L (mm)	
			I	VB1	VB2				VB3
01	02	03.62	I	0.01	0.02	0.08	0.02	0.03	0.02
			II	0.02	0.03	0.10	0.01	0.04	0.05
02	05	12.67	I	0.02	0.04	0.11	0.01	0.06	0.02
			II	0.04	0.05	0.13	0.01	0.07	0.05
03	10	30.77	I	0.03	0.06	0.13	0.02	0.09	0.03
			II	0.07	0.07	0.15	0.01	0.11	0.06
04	15	58.29	I	0.05	0.11	0.16	0.01	0.13	0.04
			II	0.08	0.11	0.21	0.03	0.15	0.07
05	15	85.44	I	0.07	0.12	0.17	0.02	0.17	0.05
			II	0.10	0.14	0.22	0.05	0.18	0.08
06	20	121.64	I	0.09	0.15	0.19	0.05	0.20	0.07
			II	0.12	0.17	0.24	0.07	0.23	0.10
07	20	157.84	I	0.11	0.18	0.22	0.06	0.24	0.09
			II	0.14	0.20	0.26	0.08	0.26	0.11
08	30	212.14	I	0.13	0.21	0.25	0.07	0.25	0.10
			II	0.16	0.24	0.29	0.09	0.28	0.12
09	30	266.44	I	0.15	0.24	0.30	0.11	0.28	0.12
			II	0.18	0.26	0.32	0.13	0.30	0.14
10	30	302.86	I	0.16	0.25	0.33	0.12	0.32	0.13
			II	0.18	0.28	0.38	0.15	0.33	0.16
11	20	339.06	I	0.18	0.29	0.37	0.14	0.35	0.15
			II	0.20	0.31	0.41	0.16	0.36	0.18
12	20	375.72	I	0.19	0.30	0.39	0.14	0.37	0.17
			II	0.21	0.32	0.45	0.17	0.38	0.20
13	20	411.92	I	0.20	0.31	0.42	0.17	0.39	0.18
			II	0.22	0.35	0.46	0.19	0.41	0.21
14	10	430.02	I	0.20	0.33	0.44	0.19	0.40	0.21
			II	0.22	0.37	0.47	0.21	0.42	0.23
15	10	448.12	I	0.20	0.33	0.47	0.20	0.41	0.22
			II	0.22	0.37	0.49	0.23	0.43	0.24
16	10	466.22	I	0.20	0.33	0.50	0.21	0.43	0.23
			II	0.22	0.37	0.52	0.25	0.44	0.25
17	05	475.27	I	0.20	0.33	0.52	0.22	0.45	0.24
			II	0.23	0.37	0.53	0.26	0.47	0.27
18	05	484.32	I	0.21	0.35	0.52	0.16	0.46	0.25
			II	0.24	0.39	0.54	0.13	0.48	0.28

Remarque : Essai très long, et perçage avec déburrage à moyenne fréquence. On remarque l'apparition de l'arête rapporté sur le listel et aussi des cassures sur la surface en dépouille.

Expérience N° 6

Cet essai a été réalisé selon le régime de coupe suivant:

* V = 22,30 (m/min) * S = 0,10 (min/tr) * D = 20 (mm) * n = 500 tr/min

Tableau 9.A : résultats de l'usure sur la partie active du foret selon le régime (5).

N°	Nbr de trous	temps par série (mn)	Usure de l'arrête tranchante principale ATP VB (mm)			Usure des listels (mm) Lt	Usure l'arrête tranchante (mm) ATT	Usure sur la surface d'attaque SA(mm)	
			VB1	VB 2	VB3				
01	02	003.05	I	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	
			II	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	
02	05	010.60	I	0.00	0.01	0.03	RAS	0.04	RAS
			II	0.00	0.01	0.04	RAS	0.03	RAS
03	10	034.90	I	0.00	0.02	0.04	RAS	0.07	RAS
			II	0.00	0.02	0.05	RAS	0.06	RAS
04	15	061.65	I	0.01	0.03	0.06	RAS	0.13	RAS
			II	0.02	0.04	0.06	RAS	0.10	RAS
05	20	095.65	I	0.03	0.06	0.12	RAS	0.14	0.03
			II	0.05	0.08	0.18	RAS	0.12	0.02
06	10	117.70	I	0.05	0.08	0.17	RAS	0.16	0.04
			II	0.06	0.10	0.20	RAS	0.14	0.03
07	10	125.20	I	0.07	0.10	0.20	RAS	0.18	0.05
			II	0.08	0.13	0.23	RAS	0.16	0.04
08	10	139.20	I	0.08	0.12	0.22	RAS	0.20	0.06
			II	0.10	0.14	0.26	RAS	0.18	0.05
09	10	159.50	I	0.13	0.15	0.25	RAS	0.22	0.08
			II	0.12	0.16	0.30	RAS	0.20	0.06
10	10	173.20	I	0.14	0.17	0.27	RAS	0.24	0.09
			II	0.13	0.19	0.34	RAS	0.22	0.07
11	10	192.60	I	0.16	0.20	0.31	RAS	0.26	0.10
			II	0.15	0.22	0.39	RAS	0.25	0.09
12	15	208.75	I	0.18	0.23	0.42	RAS	0.28	0.12
			II	0.17	0.25	0.46	RAS	0.27	0.10
13	15	225.40	I	0.19	0.26	0.46	RAS	0.30	0.13
			II	0.20	0.29	0.52	RAS	0.29	0.11
14	15	239.76	I	0.20	0.30	0.54	RAS	0.30	0.12
			II	0.22	0.33	0.57	RAS	0.33	0.13

Remarque :

Il est à noter que l'essai 6 s'est caractérisé par un copeau long et continu, avec une usure constante sur le listel et une apparition de cratère. Usure sur la surface d'attaque (SA) insignifiante sauf légère cassure. Sans oublier l'usure progressive sur l'arête tranchante transversale (ATT). Des brûlures sur la surface en dépouille avec une légère cassure.

Expérience N° 7

Cet essai a été réalisé selon le régime de coupe suivant:

* $V = 11.15$ (m/min) * $S = 0.20$ (min/tr)

* $D = 20$ (mm) * $n = 250$ (tr/min)

Tableau12.A : résultats de l'usure sur la partie active du foret selon le régime (7)

N°	Nbr de trous	temps par série (mn)	Usure sur la surface en dépouille VB (mm)			Usure des listels Lt(mm)	Usure l'arrête tranchante V _{ATT} (mm)	Usure sur la surface d'attaque L (mm)	
			I	VB1	VB2				VB3
01	02	003.10	I	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	
			II	RAS	RAS	RAS	RAS	RAS	
02	05	010.85	I	0.00	0.01	0.03	RAS	0.04	RAS
			II	0.00	0.01	0.04	RAS	0.03	RAS
03	10	035.90	I	0.00	0.02	0.04	RAS	0.07	RAS
			II	0.00	0.02	0.05	RAS	0.06	RAS
04	15	061.65	I	0.01	0.03	0.06	RAS	0.13	RAS
			II	0.02	0.04	0.06	RAS	0.10	RAS
05	20	092.65	I	0.03	0.06	0.12	RAS	0.14	0.03
			II	0.05	0.08	0.18	RAS	0.12	0.02
06	10	107.70	I	0.05	0.08	0.17	RAS	0.16	0.04
			II	0.06	0.10	0.20	RAS	0.14	0.03
07	10	123.20	I	0.07	0.10	0.21	RAS	0.18	0.05
			II	0.08	0.13	0.23	RAS	0.16	0.04
08	10	139.20	I	0.08	0.12	0.24	RAS	0.20	0.06
			II	0.10	0.14	0.26	RAS	0.18	0.05
09	10	158.45	I	0.13	0.15	0.26	RAS	0.22	0.08
			II	0.12	0.16	0.29	RAS	0.20	0.06

Remarque :

Concernant l'essai (7), le perçage a été effectué sans débouillage avec un copeau long et continu, une légère usure sur le listel et aussi une apparition d'une tache blanche sous forme d'hélice sur la surface d'attaque. Apparition de l'arête rapportée sur la surface en dépouille.

Expérience N° 8

Cet essai a été réalisé selon le régime de coupe suivant:

$$* V = 22.30 \text{ (m/min)} \quad * S = 0.20 \text{ (min/tr)}$$

$$* D = 20 \text{ (mm)} \quad * n = 500 \text{ tr/min}$$

Tableau11.A : résultats de l'usure sur la partie active du foret selon le régime (8).

N°	Nbr de trous	temps par série (mn)	Usure sur la surface en dépouille VB (mm)			Usure des listels Lt(mm)	Usure l'arrête tranchante V _{ATT} (mm)	Usure sur la surface d'attaque L (mm)	
			I	VB1	VB2				VB3
01	02	01.32	I	0.01	0.03	0.06	RAS	0.02	RAS
			II	0.03	0.04	0.09	RAS	0.03	RAS
02	15	11.22	I	0.03	0.05	0.12	RAS	0.02	0.01
			II	0.05	0.07	0.15	RAS	0.03	0.01
03	15	21.12	I	0.05	0.08	0.18	RAS	0.04	0.02
			II	0.07	0.09	0.20	RAS	0.05	0.03
04	10	27.72	I	0.06	0.10	0.21	RAS	0.05	0.03
			II	0.09	0.12	0.23	RAS	0.06	0.03
05	10	34.32	I	0.08	0.11	0.25	RAS	0.07	0.04
			II	0.10	0.13	0.28	RAS	0.08	0.04
06	10	40.92	I	0.10	0.13	0.42	RAS	0.09	0.06
			II	0.11	0.15	0.45	RAS	0.10	0.05
07	05	44.22	I	0.10	0.16	0.46	RAS	0.10	0.07
			II	0.12	0.18	0.48	RAS	0.12	0.05
08	05	47.52	I	0.11	0.20	0.50	RAS	0.11	0.08
			II	0.13	0.24	0.52	RAS	0.14	0.06
09	05	50.82	I	0.12	0.23	0.51	RAS	0.12	0.08
			II	0.14	0.28	0.52	RAS	0.15	0.07
10	05	54.12	I	0.12	0.27	0.53	RAS	0.13	0.08
			II	0.15	0.31	0.55	RAS	0.17	0.07

Remarque :

Concernant l'essai (8) on observe un usinage sans déburrage et un copeau long et continu avec des brûlures sur l'arête tranchante transversale, plus une apparition de l'arête rapportée sur les différentes parties actives du foret, plus des cassures. Cependant, Pas d'usure sur le listel.