



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université de Tissemsilt



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences et de la Technologie

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme
de Master académique en
Filière : **Génie mécanique**
Spécialité : **Installation Energétique et Turbomachine**

Présentée par : **NASNAS Djamal**

Thème

**Optimisation des paramètres d'usinage en
tournage dur basée sur la température de
coupe**

Soutenu le,

Devant le Jury :

| | | | |
|----------------------------|-----------|--------|-----------------|
| M. KHERRIS Sahraoui | Président | Prof. | Univ-Tissemsilt |
| M. HAMDY Amine | Encadreur | M.C.A. | Univ-Tissemsilt |
| M. MERGHACHE Sidi Mohammed | Examineur | M.C.A. | Univ-Tissemsilt |

Année universitaire : 2020-2021

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mon encadreur Dr. HAMDI AMINE

A mes très chers parents, en témoignage et en gratitude de leurs dévouements, de leur soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leur réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affectations sans limite. A ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance :

Mes chères sœurs et mes frères

Toute ma famille

Mes chers amis

Tous nos collègues de la promotion installation énergétique et turbomachine de l'année universitaire 2020-2021.

Remerciement

Je souhaite d'abord remercier mon encadreur Dr. HAMDI AMINE d'avoir accepté de diriger ce travail ainsi que pour son entière disponibilité et ses précieux conseils et son soutien durant toute la période de l'élaboration de ce travail.

Un grand merci à tous les enseignants de département Génie Mécanique université El-Wancharissi de Tissemsilt.

Nos remerciement vont aussi aux :

Les membres de jury pour avoir accepté de participer au jury ainsi l'attention qu'ils ont porté à ce travail.

Je ne saurais oublier tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont prodigué leurs encouragements et m'ont offert leurs soutiens.

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1.1 Principe de l'essai Rockwell Cône (HRC)..... | 14 |
| Figure 1.2 Les différents matériaux dur..... | 14 |
| Figure 1.3 Positionnement des superalliages..... | 16 |
| Figure 1.4 Schéma illustratif d'un matériau composite..... | 17 |
| Figure 1.5 Opération du tournage dur | 19 |
| Figure 1.6 Lubrification en brochage..... | 20 |
| Figure 1.7 Matériaux des outils de coupe..... | 22 |
| Figure 1.8 Dureté des matériaux des outils..... | 27 |
| Figure 1.9 Dureté et ténacité des matériaux d'outils..... | 27 |
| Figure 1.10 Préparation des arêtes pour les outils de coupe à un point unique en tournage dur | 28 |
| Figure 1.11 Comparaison qualitative des capacités des processus de tournage dur et de rectification | 29 |
| Figure 2.1 Représentation des différents flux thermiques et sources de chaleur | 32 |
| Figure 2.2 Exemples de différentes plaquettes de tournage disponible..... | 34 |
| Figure 2.3 Choix de paramètres de la coupe..... | 35 |
| Figure 2.4- Distribution des flux de chaleur générés par une coupe orthogonale..... | 35 |
| Figure 2.5 Circuit thermocouple outil-travail pour mesurer les températures de coupe .. | 36 |
| Figure 2.6 Méthodes d'étalonnage des thermocouples outil-pièce. (a) Méthode du bain de métal décrite (b) Méthode de chauffage électrique..... | 37 |
| Figure 2.7 Fil de platine isolé noyé dans un insert de coupe pour former un thermocouple avec le copeau | 39 |
| Figure 2.8 Fil de cuivre isolé noyé dans une pièce en fonte pour former un thermocouple avec une perceuse | 39 |
| Figure 2.9 Mesure de la température par thermocouples..... | 40 |
| Figure 2.10 Plaquette instrumentée CIRTES d'après..... | 41 |
| Figure 2.11 Pyromètre à infrarouge..... | 42 |
| Figure 2.12 Les valeurs de la température de l'outil pour certains endroits..... | 42 |
| Figure 2.13 Mesure par lunettes pyrométriques..... | 43 |
| Figure 2.14 Température de coupe/durée de vie de l'outil..... | 44 |
| Figure 3.1 Vue sur l'étape expérimentale | 47 |
| Figure 3.2 Étalonnage du thermocouple d'outillage | 48 |
| Figure 3.3 Circuit de thermocouple d'outillage pour la mesure de la température | 48 |
| Figure 3.4 Image de logiciel Minitab16 et les données expérimentales..... | 50 |

| | |
|---|----|
| Figure 3.5 Image de logiciel Design Expert11 et les donnés expérimentales..... | 50 |
| Figure 3.6Effet des conditions de coupe sur le rapport S/N de la température sans refroidissement | 53 |
| Figure 3.7 Effet des conditions de coupe sur le rapport S/N de la température avec refroidissement haute pression..... | 53 |
| Figure 3.8Qualité Relationnelle Grise (GRG)..... | 58 |
| Figure 3.9 Graphique de contour de désirabilité pour $Tsec$ | 59 |
| Figure 3.10 Barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et de paramètre ($Tsec$), ainsi que les désirabilités combinées = 1 | 60 |
| Figure 3.11 Graphique de la fonction de désirabilité de $Tsec$ [DF = 1] | 60 |
| Figure 3.12 Graphique de contour de désirabilité pour $Trhp$ | 61 |
| Figure 3.13 Barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et de température $Trhp$, ainsi que les désirabilités combinées = 1..... | 62 |
| Figure 3.14 Graphique de la fonction de désirabilité de $Trhp$ [DF = 1]..... | 62 |
| Figure 3.15 Graphique de contour de désirabilité pour MRR..... | 63 |
| Figure 3.16 Barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et de paramètre MRR, ainsi que les désirabilités combinés = 0.941..... | 64 |
| Figure 3.17 Graphique de la fonction de désirabilité de MRR [DF = 0.941]..... | 64 |
| Figure 3.18 Graphique de contour de désirabilité pour $Tsec$, $Trhp$ et MRR..... | 65 |
| Figure 3.19 Barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et des paramètres $Tsec$, $Trhp$ et MRR , ainsi que la désirabilité combinée = 0.752..... | 66 |
| Figure 3.20 Graphique de la fonction de désirabilité de $Tsec$, $Trhp$ et MRR [DF = 0.752]..... | 66 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 3.1 Valeurs expérimentales de la température de coupe (T_{sec} : température de tournage à sec, Tr_{hp} : température de tournage à refroidissement haute pression) et le débit de matière enlevée (MRR)..... | 49 |
| Tableau 3.2 Rapports S/N des valeurs expérimentales de la température de coupe..... | 51 |
| Tableau 3.3 Table de réponse S/N pour (a) température de coupe à sec, (b) température de coupe avec refroidissement haute pression..... | 52 |
| Tableau 3.4 Résultats expérimentale normalisé ($x_i(k)$)..... | 54 |
| Tableau 3.5 Coefficients du GR ($\eta_i(k)$)..... | 55 |
| Tableau 3.6 Niveau relationnel gris et son ordre (Grey relational grade (GRG))..... | 57 |
| Tableau 3.7 Conditions de l'optimisation des paramètres de tournage dur..... | 58 |
| Tableau 3.8 Optimisation de la réponse pour T_{sec} | 60 |
| Tableau 3.9 Optimisation de la réponse pour Tr_{hp} | 61 |
| Tableau 3.10 Optimisation de la réponse pour MRR | 63 |
| Tableau 3.11 Optimisation de la réponse pour T_{sec} , Tr_{hp} et MRR | 65 |

LISTE DES SYMBOLES

| | | |
|-------------------------------|--|----------|
| Vc | Vitesse de coupe | [m/min] |
| f | Vitesse d'avance | [mm/min] |
| ap | Profondeur de passe | [mm] |
| DL | Degré de liberté | |
| SC | Somme des carrés | |
| MC | Carrés moyens | |
| F | Valeur de Fisher | |
| P | Probabilité d'obtenir du résultat par hasard | |
| Cont% | Taux de contribution [%] | |
| R² | Coefficient de corrélation | |
| S/N | Rapport signal sur bruit | |
| MRR | Le taux d'enlèvement matière | |
| $\eta_i(k)$ | Les coefficients du Relationnel Gris | |

LISTE DES ABRÉVIATIONS

| | |
|--|--|
| HRC | Dureté de Rockwell |
| ANOVA | Analyse de la variance |
| RSM | Méthodologie de surface de réponse |
| GRA | Analyse relationnelle grise |
| GRC | Coefficient relationnel gris |
| GRG | Grade relationnel gris |
| DF | Fonction de désirabilité |
| RNA | Réseau de neurones artificiels |
| RQ | La régression quadratique |
| PCD | Diamants polycristallin |
| TiC | Titane de carbure |
| TiN | Titane de nitrure |
| CBN | Nitrure de bore cubique |
| TD | Tournage dur |
| Al₂O₃ | Oxyde d'aluminium |
| Si₃N₄ | Nitrure de silicium |
| C | Cutting |
| MA | Mechanical abrasion |
| Si₃N₄-TiC | Céramiques à base de nitrure de silicium |
| PMC | Composite à matrice polymère |
| MMC | Composite à matrice métallique |

| | |
|--------------|---|
| CMC | Composites à matrice céramique |
| EDM | L'usinage à décharge électrique |
| A.R.S | Aciers rapides supérieurs |
| PM | Métallurgie des poudres |
| Trhp | Tournage dur refroidissement haute pression |
| Tsec | Tournage dur à sec |
| MSR | Méthodologie de surface de réponse |

Sommaire

| | |
|----------------------------|----|
| Liste des figures | |
| Liste des tableaux | |
| Nomenclature | |
| Abréviations | |
| Introduction générale..... | 11 |

Chapitre 1 : Usinage des matériaux durs

| | |
|---|----|
| 1.1 Introduction..... | 13 |
| 1.2 Matériaux dur..... | 13 |
| 1.2.1 Aciers..... | 14 |
| 1.2.2 Fontes | 15 |
| 1.2.3 Titane et ses alliages | 15 |
| 1.2.4 Superalliages | 15 |
| 1.2.5 Matériaux composites | 16 |
| 1.2.6 Céramiques | 17 |
| 1.3 Applications industrielles des matériaux durs usinés..... | 17 |
| 1.4 Procédés d'usinage des matériaux durs..... | 18 |
| 1.4.1 Tournage dur | 18 |
| 1.4.2 Brochage dur..... | 19 |
| 1.4.3 Alésage dur..... | 20 |
| 1.4.4 Fraisage dur..... | 20 |
| 1.5 Matériaux des outils de coupe..... | 21 |
| 1.5.1 Aciers rapides supérieurs (A.R.S) | 22 |
| 1.5.2 Carbures..... | 22 |
| 1.5.3 Cermets (carbures cimentés)..... | 23 |
| 1.5.4 Céramiques | 24 |
| 1.5.5 Nitrure de bore cubique (CBN)..... | 25 |
| 1.5.6 Diamants polycristallin (PCD)..... | 26 |
| 1.6 Sélection de matériau et de la géométrie d'outil de coupe..... | 26 |
| 1.7 Avantages de l'usinage dur par rapport à l'usinage conventionnel..... | 28 |

| | |
|--|-----------|
| 1.8 Conclusion..... | 29 |
| Chapitre 2 : Température dans les procédés d’usinage | |
| 2.1 Introduction..... | 31 |
| 2.2 Sources de chaleur en usinage..... | 31 |
| 2.2.1 Température de coupe..... | 32 |
| 2.2.2 Mesure de la température..... | 33 |
| 2.3 Méthodes de mesure de la température de coupe..... | 33 |
| 2.3.1 Mesures indirectes de la température de coupe..... | 35 |
| 2.3.2 Mesures directes de la température de coupe..... | 36 |
| 2.3.2.1 Mesure de température de coupe par thermocouple..... | 36 |
| 2.3.2.2 Mesure de température par la méthode optique..... | 42 |
| 2.3.2.3 Mesure par lunettes pyrométriques..... | 43 |
| 2.4 Effets de la température..... | 43 |
| 2.4.1 Effet de la température sur l’outil..... | 43 |
| 2.4.2 Effet de la température sur la pièce..... | 44 |
| 2.5 Conclusion..... | 44 |
| Chapitre 3 Optimisation des paramètres d’usinage | |
| 3.1 Introduction..... | 46 |
| 3.2 Partie expérimentale..... | 46 |
| 3.3 Logiciels utilisés..... | 49 |
| 3.3 Optimisation mono-objective..... | 50 |
| 3.3.1 Optimisation mono-objective par la méthode de Taguchi..... | 50 |
| 3.4 Optimisation multi-objective..... | 53 |
| 3.4.1 Optimisation multi-objective par la méthode GRA..... | 53 |
| 3.4.2 Optimisation multi-objective par la méthode MSR..... | 58 |
| 3.4.2.1 Optimisation des conditions de coupe pour Tsec..... | 58 |
| 3.4.2.2 Optimisation des conditions de coupe pour Trhp..... | 60 |
| 3.4.2.3 Optimisation des conditions de coupe pour MRR..... | 62 |
| 3.4.2.4 Optimisation combinée des conditions de coupe pour Tsec, Trhp et MRR | 64 |
| 3.5 Conclusion | 67 |
| Conclusion générale..... | 68 |
| Bibliographie..... | 69 |
| Résumé..... | 71 |

Introduction générale

Aujourd'hui, le tournage dur (TD) est l'opération d'usinage dominante dans un atelier d'usinage des matériaux trempés. Le TD est défini comme le processus de coupe en un seul point des pièces mécaniques de précision dont les valeurs de dureté sont supérieures à 45 HRC, mais qui sont plus généralement comprises entre 58 et 68 HRC. Les matériaux durs usinés comprennent généralement les fontes, les aciers à outils, les aciers pour roulements, les aciers traités thermiquement et les aciers de cémentation. L'application de cette technique dans les branches industrielles de pointe telles que : les bagues de roulement, les arbres de transmission, les roues dentées, les matrices des moules,...etc.

Lors de l'usinage des pièces par tournage dur, l'énergie mécanique est transformée en énergie thermique (c'est-à-dire chaleur). Il convient de noter qu'un grand taux de la chaleur se trouve dans la zone de cisaillement primaire, à partir de laquelle les copeaux et les pièces tournées porteront la chaleur. La chaleur générée aux interfaces en raison du phénomène de friction augmentera l'usure de l'outil et produira une surface détériorée sur les pièces usinées. A cet égard, les fluides de coupe sont utilisés pour limiter les défauts et l'impact négatif associé de la chaleur et du frottement entre l'outil et la pièce. A noter que les opérateurs des industries d'usinage sont confrontés à des problèmes de santé, dont la majorité de ces maladies est dues à l'effet négatif du fluide de coupe.

Donc, l'objectif de ce mémoire est d'optimiser les paramètres d'entrée (vitesse de coupe V_c , vitesse d'avance f , profondeur de passe ap et la dureté de matériau H) lors de tournage dur à sec et à refroidissement haute pression. Pour cela, nous utilisons les techniques d'optimisation mono et multi-objectives comme : Taguchi, GRA, DF,...etc.

C'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux de recherche de ce mémoire qui est répartie en trois chapitres:

Le premier chapitre présente une synthèse sur les processus d'usinage des matériaux durs (généralités sur l'usinage dur).

Dans le deuxième chapitre, nous nous intéressons par la température de coupe en usinage dur et leur impact sur l'intégrité de surface.

Dans le chapitre trois, nous faisons l'optimisation des conditions de coupe (V_c , f , ap et H) lors de tournage dur pour deux cas : sec et refroidissement haute pression.

En dernier lieu, nous avons terminé par une conclusion générale suivie d'une liste de bibliographie.

CHAPITRE 1 :

Usinage des matériaux durs

1.1- Introduction

L'usinage est le plus largement utilisé pour donner au produit final la forme et les dimensions souhaitées par le mécanisme d'enlèvement de matière. L'ensemble des processus et des opérations effectuées sur un ébauche (pièce à l'état brute) jusqu'à la pièce finie est dit l'usinage. La matière enlevée (copeaux) à partir de l'ébauche en étapes séquentielles à l'aide des différents outils de coupe (point unique ou multipoints). Donc, l'usinage implique l'enlèvement d'une partie de la matière de la pièce (surépaisseur d'usinage) afin de produire une géométrie spécifique à un degré défini de précision et de qualité de surface. Les procédés d'usinage sont largement utilisés pour la finition de pièces à la fois métalliques (ferreux : aciers et fontes, non-ferreux : alliage de cuivre, alliage d'aluminium, ...etc) et non métalliques (polymères, composites, verre). L'usinage traditionnel, dit aussi conventionnel, nécessite la présence d'un outil plus dur que la pièce à usiner. Cet outil doit être pénétré dans la pièce à une certaine profondeur. De plus, un mouvement relatif entre l'outil et la pièce est responsable de la formation ou de la génération de la forme utile. L'absence de l'un de ces éléments dans tout processus d'usinage, comme l'absence de contact outil-pièce ou de mouvement relatif, rend le processus non traditionnel. L'usinage traditionnel peut être classé selon l'action d'usinage de la coupe (C : cutting) et de l'abrasion mécanique (MA : mechanical abrasion).

1.2- Matériaux dur

L'essor de développement du processus d'usinage conventionnel dépend de la dureté du matériau de l'outil, qui doit être beaucoup plus élevée que la dureté du matériau de la pièce. Le défi réside dans l'usinage de ces matériaux plus durs avec des avantages économiques et technologiques est le but des industriels et des chercheurs.

Les matériaux (c'est-à-dire mous ou durs) sont généralement classés en fonction de leur dureté, qui peut être mesurée par différentes techniques. La dureté est la résistance d'un matériau à la pénétration d'un corps plus dur. Les méthodes couramment utilisées pour mesurer le paramètre sans dimension sont ceux de : Brinell, Vickers, Knoop, Rockwell, ...etc. Le principe est toujours identique : il est consiste à appliquer sur le matériau à tester une force à l'aide d'un pénétrateur indéformable (plus dur) et à mesurer la taille de l'empreinte laissée sur la surface (F/S). Le test de dureté le plus utilisé consiste un ensemble standard d'échelles désignées par une lettre (c'est-à-dire : B, C, D, E, F, ... etc).

Les différentes lettres correspondront à différentes échelles et seront utilisées pour enregistrer les valeurs de dureté de différents matériaux. Plus la valeur numérique enregistrée dans l'échelle est élevé, plus la valeur de dureté sera élevée, plus le matériau est dur. La figure 1.1 représente le principe de l'essai de dureté Rockwell Cône (HRC).

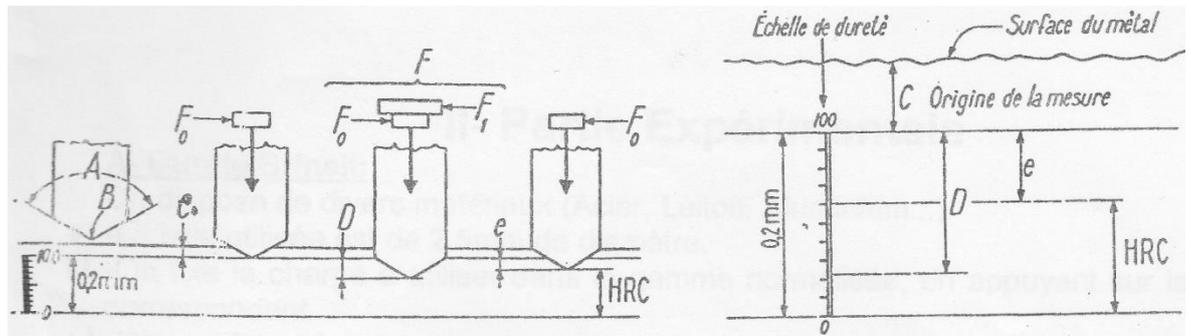


Figure 1.1- Principe de l'essai Rockwell Cône (HRC)

Les matériaux durs sont ceux dont les valeurs de dureté mesurées sur l'échelle Rockwell C doivent être supérieures à 45 HRC [1]. En outre, les matériaux sont classés comme matériaux extrêmement durs (indice de dureté supérieur à 55 HRC) et matériaux moyennement durs (indice de dureté inférieur à 55 HRC et supérieur à 45 HRC) [2].

Quelques matériaux durs comprennent la fonte blanche/réfrigérée, les aciers (tels que : les outils, les roulements, les cémentés, les chromés durs, les traités thermiquement, ...etc.) et les superalliages [1]. L'usinage de ces matériaux est appelé usinage dur. L'organigramme suivant illustre les différents matériaux durs.

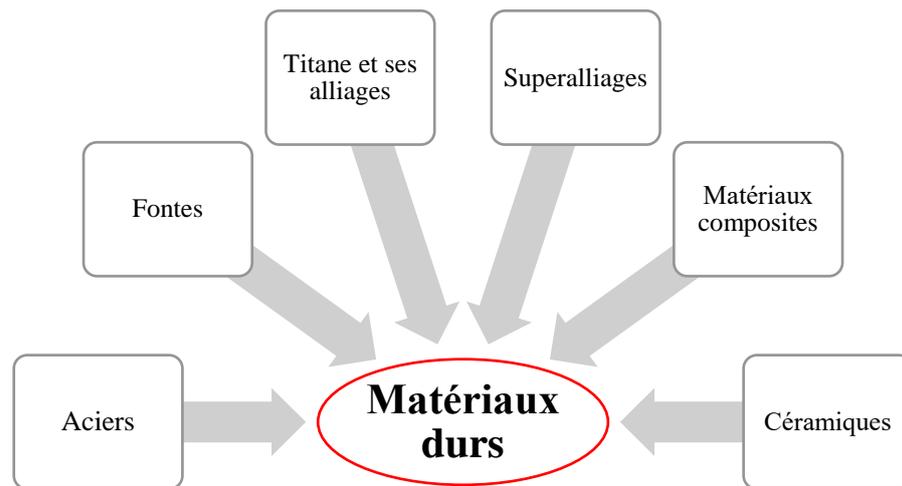


Figure 1.2- Les différents matériaux durs

1.2.1- Aciers

L'acier est une famille de matériaux, dont le fer et le carbone sont les principaux constituants. Les aciers sont largement utilisés dans les machines, les outils, l'automobile, l'aérospatiale, ...etc. Les propriétés de cette famille peuvent être modifiées et contrôlées par un traitement thermique. En général, les aciers sont traités par traitement thermique afin d'améliorer son propriétés comme : la dureté, la résistance à l'usure, ...etc, ce qui offre une plus grande résistance à la déformation et se traduit par un usinage difficile [2].

1.2.2- Fontes

Les fontes grises (fontes moulées) sont utilisées en grandes quantités pour des applications générales, leur faible coût en étant la raison principale. Les fontes grises sont une plage de dureté typiquement comprise entre 180 et 320 HB. Dans ce cas, les Pc-BN dépassent de loin les performances des outils en carbures et en céramique.

Les céramiques à base de nitrure de silicium ($\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC}$) présentent une excellente résistance à l'usure lors de l'usinage de la fonte grise. Les fontes blanches ou trempées sont beaucoup plus dures, plus fragiles et plus résistantes à l'usure que les fontes grises à cause de la présence de carbure de fer (cémentite), au lieu de graphite. Leur dureté varie typiquement de 45 à 65 HRC [3].

1.2.3- Titane et ses alliages

L'usinage du titane et de ses alliages est classé parmi les matériaux difficiles à couper en raison de leur réactivité chimique et de leur mauvaise conductivité thermique. Cette affinité chimique entraînera la suppression de certains éléments d'alliage importants de l'outil de coupe. De plus, le soudage de certains copeaux entraînera l'écaillage de l'outil de coupe [4].

1.2.4- Superalliages

Les superalliages sont connus pour leurs propriétés de résistance à la chaleur ainsi que leur haute résistance, leur rigidité et leur ténacité. Les alliages à base de nickel, de fer et de cobalt constituent la famille des superalliages et sont connus pour leur résistance et leur dureté élevées à des températures élevées, leur faible affinité chimique et leur faible diffusivité thermique [5] (figure 1-3). Les applications des superalliages incluent les turbines à gaz, l'automobile, la marine, les machines de pétrochimique, ...etc.

Les défis de l'usinage des superalliages sont expliqués comme suit [5] :

- a) Des résistances plus élevées sont observées pendant l'usinage même à des températures élevées (faible conductivité thermique des superalliages),
- b) Pendant l'usinage, le matériau subit un écrouissage, ce qui entraînera une usure de bec d'outil,
- c) La présence de carbure abrasif en superalliage entraînera une usure abrasive élevée qui affectera la durée de vie de l'outil de coupe,
- d) Une usure par diffusion peut se produire avec l'utilisation des outils de coupe disponibles en raison des températures de coupe élevées,
- e) Le soudage ou l'adhérence se produit sur la face de coupe d'un outil, ce qui entraîne une entaille et un enlèvement important des matériaux de l'outil,
- f) Pendant l'usinage des superalliages, la formation de copeaux discontinus accélère la dégradation de l'outil de coupe résultant de la formation d'un cratère,

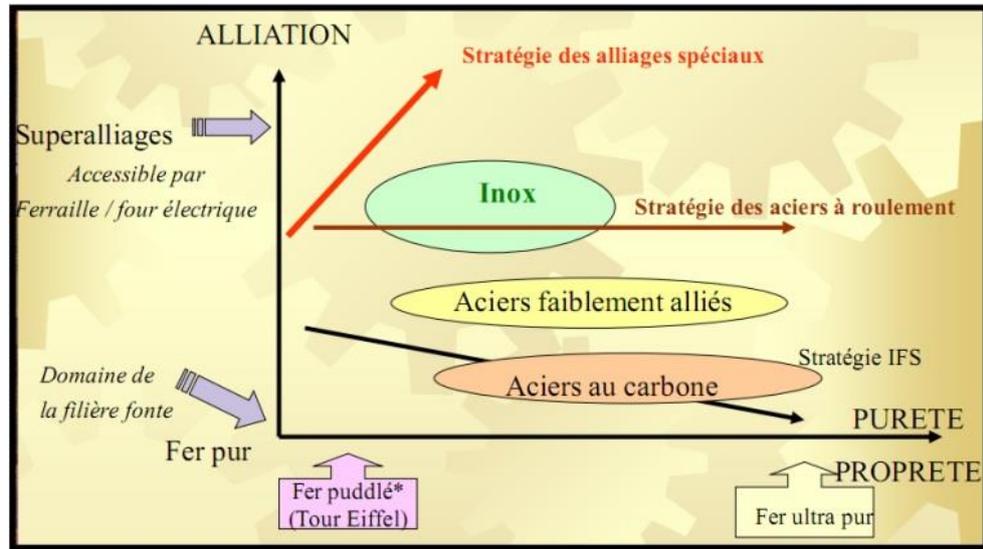


Figure 1.3- Positionnement des superalliages [5]

1.2.5- Matériaux composites

Un composite est un matériau, composé d'au moins deux matériaux différents, possédant des propriétés physiques et chimiques différentes. Le matériau composite offre des propriétés nettement meilleures par rapport au matériau d'origine. Il est à noter qu'au moins un des matériaux constitutifs fera office de renfort et l'autre de matrice. La matrice et le renfort sont les principaux matériaux constitutifs du composite (figure 1-4). Les fonctions de la matrice dans les composites sont répertoriées ci-dessous [6]:

- 1- Protéger les matériaux de renforcement,
- 2- Répartir uniformément la contrainte dans les matériaux de renforcement.
- 3- Obtenir la forme finale de la pièce composite.

Le renforcement (particules et fibres) dans les matériaux composites peut posséder les objectifs suivants [6] :

- 1- Réduction de poids étant l'objectif principal doit servir de caractéristiques légères, pour réduire la consommation d'énergie,
- 2- Atteindre les propriétés mécaniques les plus élevées (résistance et dureté) des composites,
- 3- Renforcer la matrice dans des directions préférentielles,
- 4- Assurer la résistance à la fatigue et la résistance aux chocs thermiques les plus élevées à des températures élevées,
- 5- Améliorer la résistance à la corrosion et à l'usure.

Les propriétés des matériaux composites (physiques, mécaniques et chimiques) dépendent du type de renfort et du matériau de matrice et de leur fraction volumique. La classification des matériaux composites se fait selon le matériau de matrice utilisé, par exemple, le composite à matrice polymère (PMC), le composite à matrice métallique (MMC) et les composites à matrice céramique (CMC). L'usinage des MMC reste une tâche difficile,

qui pourrait être due à l'influence d'un grand nombre de variables (matériau de la matrice, type de matériau de renfort et son orientation, environnement de coupe, variables de coupe, matériau de l'outil et sa géométrie, rigidité de la machine-outil,...etc.). Le contrôle de ces variables réduira les forces de coupe, la consommation d'énergie, la durée de vie de l'outil, l'intégrité de la surface, ...etc. Les MMC sont utilisés dans un large éventail d'applications, notamment dans les secteurs de l'aviation, de l'armée et de l'automobile [6].

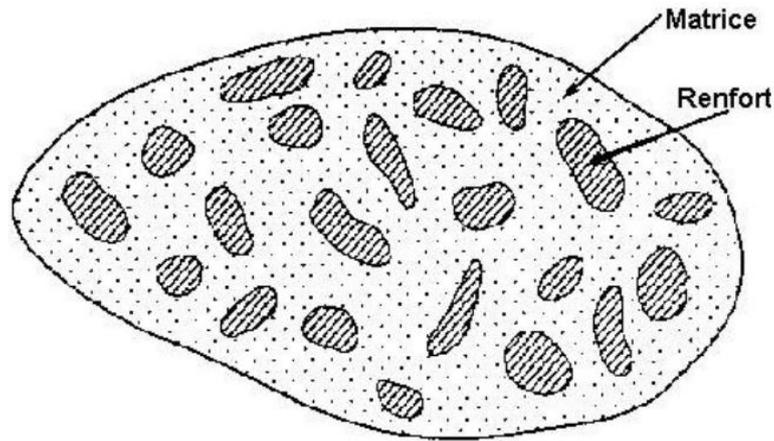


Figure 1.4- Schéma illustratif d'un matériau composite [6]

1.2.6- Céramiques

Les céramiques sont des matériaux d'ingénierie bien connus comprenant des éléments métalliques et non métalliques possédant des caractéristiques attrayantes, telles que les résistances à température élevée, la faible densité, la résistance à l'oxydation, la résistance à l'usure et à la corrosion, l'inertie chimique, la rigidité, la dureté et de meilleures caractéristiques d'isolation électrique et thermique. Les matières premières naturelles utilisées pour la production de la céramique sont la pierre de silice, le sable de silice, le graphite, le calcaire, la magnésie, le kaolin, les minéraux (zirconium, titane et borate). Les propriétés de la céramique, telles que la fragilité, une dureté plus élevée et la résistance au fluage, rendent son usinage difficile par un procédé conventionnel et ont tendance à provoquer des fissures, des fractures et un écaillage des bords. Les matériaux céramiques possèdent une faible ténacité et n'offrent pas de résistance à la propagation des fissures. De plus, les matériaux céramiques posent des difficultés d'usinage en raison du coût d'outillage élevé qui limite le matériau pour une large gamme d'applications [7].

1.3- Applications industrielles des matériaux durs usinés

La valeur de dureté des matériaux durs se situe généralement supérieure à 45 HRC. Les matériaux durs, à savoir les aciers alliés durcis, les superalliages, la céramique, le titane et ses alliages,...etc., sont largement utilisés dans les principaux domaines des applications du génie mécanique (tels que les secteurs automobile et aérospatial) pour la production de pièces de transmission. Les matériaux durs sont utilisés pour les applications qui comprennent les engrenages, les essieux, les roulements, les arbres, les arbres à cames, les

pignons d'entraînement, les disques d'embrayage, les vilebrequins, les épaulements d'arbre, les pales de compresseur et les aubes de turbine [8]. L'usinage de matériaux durs présentant des avantages technologiques et économiques. Les surfaces de roulement des roues dentées sont généralement fabriquées avec des matériaux durs [8]. Les applications typiques de l'usinage de matériaux durs dans le processus de tournage comprennent les opérations suivantes telles que le chariotage, l'alésage, le dressage, le tournage de profil, le rainurage et le filetage, ...etc.

1.4- Procédés d'usinage des matériaux durs

Au début des années 80, des progrès technologiques ont eu lieu dans le domaine de l'usinage dur pour fabriquer des pièces dures. Bien que les chercheurs aient signalé que le processus de rectification est le plus préféré pour la finition fine. De nombreux avantages correspondant à l'usinage de matériaux durs en utilisant un outil de coupe ne doivent pas être négligés. Chaque processus d'usinage produira sa propre texture de surface et l'enlèvement des couches de matière de la pièce dépend de son mécanisme [9]. En conséquence, une attention particulière est essentielle pour étudier les différentes procédées d'usinage de matériaux durs avec les outils de coupe. Ces techniques sont discutées ci-dessous.

1.4.1-Tournage dur

Le terme tournage dur (TD) désigne le tournage d'acier et de fonte dont la valeur de la dureté sur l'échelle Rockwell C est supérieure à 45 HRC, généralement dans la plage de 45 HRC à 68 HRC ou jusqu'à 70 HRC. Ce processus a été développé comme une alternative au processus de rectification traditionnelle dans le but de réduire le nombre de modifications et de configuration industries pour l'usinage des roulements à billes, des arbres de transmission, les essieux, les composants du moteur et les engrenages, ...etc. Le tournage dur s'est avéré capable de réduire le temps d'usinage et les coûts de plus de 70% tout en fournissant plus souplesse, haute qualité et temps de production plus courts [10, 11].

La technique du tournage dur est quelquefois classée dans le domaine de l'usinage à grande vitesse, bien que les vitesses de coupe puissent paraître modestes (figure 1-5).

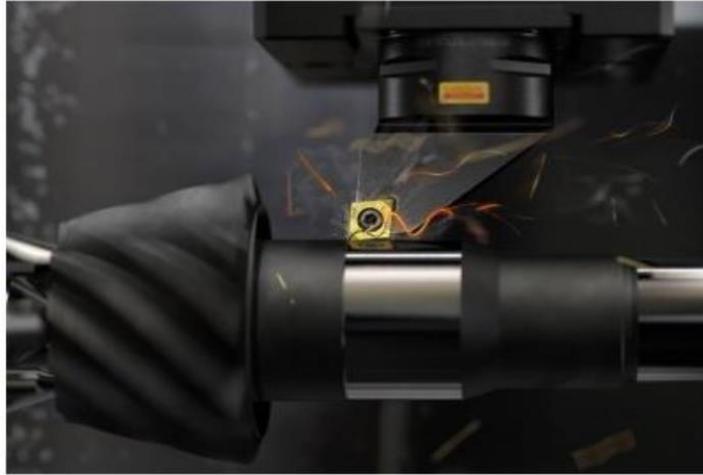


Figure 1.5- Opération du tournage dur [11]

Le procédé de tournage dur (TD) se définit comme une opération de tournage des métaux durs (aciers et fontes) [12]. Ces matériaux sont traités et durcis thermiquement, ayant une dureté entre 45 HRC et 68 HRC [12]. Les outils utilisés, dans ce cas, ont des propriétés spécifiques comme la résistance à l'usure, la résistance à la température, la bonne stabilité chimique...etc.

a) Signification du terme «dur»

- Dur au sens de la dureté du matériau usiné, du point de vue résistance à la pénétration d'un indenteur. De même, il faudrait discuter sur la correspondance entre dureté et résistance mécanique qui est loin d'être régulière.
- Dur au sens de difficulté à usiner le matériau, conséquence de sa très mauvaise usinabilité, un matériau peut être difficile à usiner sans pour autant être dur ! Peut être cité pour exemple le tournage du cuivre électrolytique qui pose de véritables problèmes de fragmentation du copeau liés à sa très grande ductilité.
- Dur au sens de la difficulté de l'opération d'usinage (alésage profond, travail aux chocs,...etc).

1.4.2- Brochage dur

Le brochage est un procédé d'usinage qui consiste à enlever la matière par coupe à l'aide d'un outil à dents multiples étagées qui se déplace parallèlement à la surface à usiner. L'outil utilisé est appelé broche et la machine est appelée brocheuse. Cette opération est effectuée généralement en une seule passe rectiligne dans laquelle sont incluses les opérations d'ébauche et de finition. Le temps de coupe est relativement court. La figure 1.6 représente la lubrification en brochage.



Figure 1.6- Lubrification en brochage

1.4.3- Alésage dur

L'alésage est également les opérations de tournage et de perçage internes, dans lequel il sert de finition des trous forés ou augmente le diamètre d'un trou. Les principaux objectifs des opérations d'alésage [1]:

- Maintenir le diamètre du trou avec une tolérance dimensionnelle et une précision précise en maintenant la rugosité de surface de la pièce à une valeur minimale,
- L'opération d'alésage sert également à assurer la centricité, circularité,...etc.

Les avantages techniques de l'opération d'alésage comprennent l'usinage de trous de grand diamètre. L'usinage de l'acier trempé avec une dureté de 63 HRC réduira le temps d'usinage de 1560 s, en cas de rectification interne à 140 s en alésage [1]. L'avantage économique de l'usinage avec alésage entraînera une réduction de 35% des salaires, des machines et des coûts d'exploitation et de 55% du coût des équipements par rapport au processus de rectification. L'outil en nitrure de carbone (CBN) à géométrie définie est traité de manière plus économique que le tournage dur et la rectification. La limitation de l'opération d'alésage se réfère à la qualité de surface de la pièce usinée [1].

1.4.4- Fraisage dur

La technologie de fraisage dur a attiré une attention considérable dans la fabrication de matrices et de moules, qui peuvent partiellement remplacer l'usinage à décharge électrique (EDM) [1]. Lors de l'usinage de matériaux durcis (c'est-à-dire au-dessus de 45 HRC), le processus de fraisage entraînera une grande quantité de contraintes de flexion et de torsion, alors que seule la contrainte de flexion est rencontrée en tournage. Le processus de fraisage peut produire des pièces usinées avec une bonne qualité de surface, ce qui se traduira par une meilleure résistance à la fatigue par rapport à la rectification. La réduction de la durée de vie de l'outil serait le principal inconvénient du processus de fraisage dur. Les principaux inconvénients incluent l'usure et la durée de vie des outils et leur impact sur la qualité de la surface et l'usinabilité. Cet inconvénient peut être surmonté avec un choix approprié de

combinaison pièce-matériau de l'outil, géométrie de l'outil, porte-outil, utilisation de liquide de refroidissement et paramètres de coupe [1].

1.5- Matériaux des outils de coupe

La sélection des outils de coupe nécessite une connaissance préalable des propriétés de matériau d'outils, de la géométrie de l'outil (angle de coupe, rayon de bec, angle de tranchant, angle d'inclinaison), des porte-outils, des conditions de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de coupe), environnement de coupe (lubrifiant sec, humide et en quantité minimale) et des matériaux à usiner [11]. Le manque d'informations sur les paramètres susmentionnés peut entraîner un usinage de mauvaise qualité. La géométrie des outils de coupe est une préoccupation majeure pour les industries de coupe des métaux car elle affecte directement le type des copeaux, le taux de production, la durée de vie des outils, la direction et l'amplitude des forces de coupe, l'intégrité de la surface et les contraintes résiduelles d'usinage. La sélection du matériau de l'outil de coupe et les conditions de fonctionnement appropriées jouent un rôle essentiel dans l'usinage. Par exemple, un outil en céramique fonctionnant dans des conditions de rigidité élevée (c'est-à-dire les vibrations) avec des coupes continues et des températures de coupe plus élevées. La sélection appropriée des conditions d'usinage se traduira par des pièces usinées de meilleure qualité à un coût réduit. Quelques caractéristiques souhaitables des matériaux d'outils de coupe sont discutées ci-dessous [12] :

- 1- Capacité du matériau de l'outil à conserver une limite élastique et une dureté élevée à des températures élevées (c'est-à-dire une dureté à chaud),
- 2- Capacité du matériau de l'outil à offrir une meilleure résistance aux caractéristiques d'écaillage (c.-à-d. la ténacité à la rupture),
- 3- Capacité du matériau à résister aux forces de coupe cycliques (résistance à la fatigue) et à absorber l'énergie maximale avant la rupture (ténacité),
- 4- Capacité du matériau à offrir une résistance à l'usure (à la fois à l'abrasion et à l'adhérence) et à améliorer la durée de vie de l'outil,
- 5- Le matériau doit avoir une meilleure conductivité thermique,
- 6- Capacité du matériau à résister aux chocs mécaniques et thermiques,
- 7- Faible affinité chimique pour empêcher une éventuelle réaction chimique à haute température,
- 8- Capacité du matériau à offrir une résistance à l'oxydation et à la corrosion.

La fabrication d'outils de coupe avec les caractéristiques susmentionnées est considérée comme une tâche difficile pour les fabricants. Une recherche et un développement approfondis ont eu lieu dans le développement des matériaux d'outils de coupe à travers le monde. Les principaux fabricants (Kennametal, General Electric, Sumitomo, Sandvik,...etc)

de matériaux et d'outils de coupe avancés (porte-outils, inserts ou outils de coupe intégrés, etc.) contribuent à hauteur de 80 % au total marché mondial. Les principaux matériaux d'outils de coupe utilisés dans l'usinage des matériaux durs sont répertoriés avec leur dureté accrue, tels que les aciers rapides, les carbures (frittés et revêtus), les céramiques (alumine et nitrure de silicium) et les matériaux extra durs (diamant polycristallin et nitrure de bore cubique polycristallin) [9]. L'organigramme suivant résume les différents outils de coupe

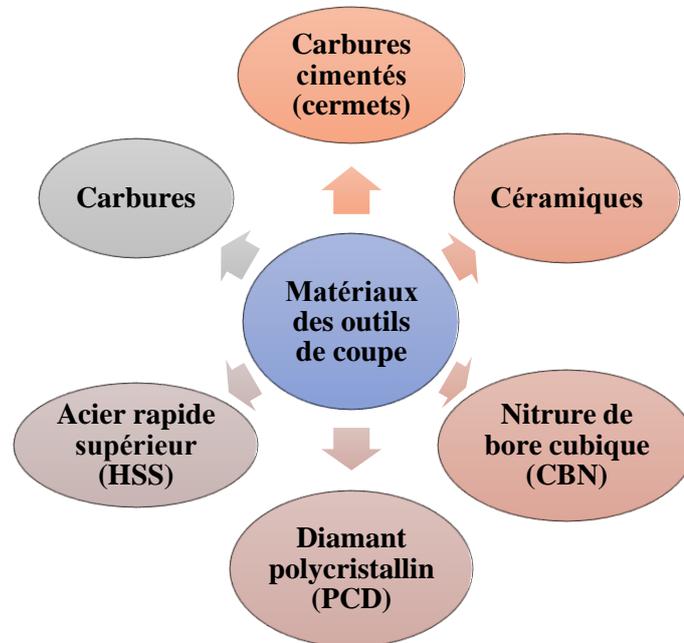


Figure 1.7- Matériaux des outils de coupe

1.5.1- Aciers rapides supérieurs (A.R.S)

Le traitement thermique des aciers alliés avait non seulement amélioré la dureté et la résistance, mais avait également aidé à fonctionner à des vitesses de coupe élevées. De plus, l'ajout d'éléments d'alliage (molybdène, chrome, vanadium, tungstène et cobalt, ...etc) aux aciers à haute teneur en carbone avait amélioré les propriétés comme : résistance à l'usure, ténacité, dureté à chaud,...etc. La dureté de l'ARS peut être augmentée jusqu'à 75 HRC. Les outils ARS sont fabriqués par le biais de divers processus tels que la fabrication de l'acier, le forgeage, le laminage et l'usinage. Le développement technologique de la métallurgie des poudres a permis d'obtenir les propriétés souhaitées avec une structure uniforme. Les revêtements (TiN, TiAlN, TiCN) appliqués aux aciers se traduiront par une amélioration des caractéristiques d'usinabilité. L'outil ARS conservera sa dureté jusqu'à 500 °C. Notez que l'outil HSS n'est généralement pas préféré pour les applications d'usinage dur en raison de sa faible dureté [12].

1.5.2- Carbures

Les carbures ont pris une tournure vertigineuse en termes de développement depuis l'année 1930. Aujourd'hui, ces matériaux dominent 70% du marché. Les outils en carbure sont fabriqués à partir des poudres céramiques liées très souvent avec du cobalt, ils sont

parfois appelés carbures cémentés. Les premières applications des carbures de coupe se sont faites sous forme de plaquettes brasées sur des corps d'outils en acier ordinaire [11].

1.5.3- Cermets (carbures cémentés)

Les carbures cémentés sont également appelés carbure fritté ou cermets. Les carbures cémentés sont développés à partir de stellites. Les stellites sont des alliages de tungstène, de chrome et de cobalt. La technique de la métallurgie des poudres (Powder metallurgy : PM) est généralement utilisée pour fabriquer les outils en carbure cémenté, dans lesquels la forme en poudre de carbure (tungstène ou titane) et de cobalt est initialement pressée dans le moule et celle-ci est frittée à une température d'environ 1300 à 1600 °C [12]. Une petite quantité de carbures de tantale, de titane ou de vanadium est ajoutée pour améliorer les caractéristiques spécifiques des carbures cémentés. Le cobalt est utilisé comme liant, dont la proportion varie de 6 à 12%. Il est à noter que le cobalt fond à 1493 °C et forme une phase soluble avec des grains de carbure de tungstène à 1275 °C. Cela réduira davantage la porosité. Une augmentation du pourcentage de cobalt améliorera la ténacité de l'outil, tandis que sa dureté et sa résistance diminueront [12]. La dureté du matériau de l'outil est directement proportionnelle à la quantité de liant et à la taille du carbure de tungstène. Notez que la dureté s'améliorera avec une taille de grain de carbure de tungstène réduite et la teneur en liant et vice versa. La granulométrie du carbure de tungstène est généralement comprise entre 600 et 2100 HV. En général, le carbure cémenté est très résistant à l'usure et semble fragile. Cette caractéristique n'est généralement pas utilisée dans les opérations de planification, où le tranchant subit les contraintes d'impact soudaines et provoque un écaillage précoce [12]. Cependant, les outils en carbure cémenté sont les mieux adaptés pour couper des aciers à haute résistance qui fonctionneront à des vitesses de coupe élevées.

Aujourd'hui, les industries de coupe de métaux ont utilisé des revêtements durs en couches minces et des processus de diffusion thermique pour améliorer la durée de vie des outils. Une enquête récente a montré que la technologie de revêtement est appliquée à 50 % des ARS, 85% des carbures et 40% des outils ultra-durs [7]. Aujourd'hui, une large gamme de matériaux de revêtement (TiN, TiAlN, TiCN, MoS₂, CrN, Al₂O₃, ...etc.) et méthodes (dépôt physique en phase vapeur, dépôt chimique en phase vapeur, assisté par plasma et température modérée) sont disponibles pour offrir des avantages significatifs (durée de vie de l'outil, productivité élevée, coupe à avance élevée) à la technologie d'usinage. Les avantages significatifs de l'application d'un revêtement sur les outils de coupe sont les suivants [7]:

- Améliorer la dureté de surface et la résistance à l'usure (usure en cratère, en flanc, abrasive et adhésive),
- Minimiser le coefficient de frottement et faciliter l'enlèvement des copeaux,
- Réduire les forces de coupe et génération de chaleur,

- Améliorer la résistance à la corrosion et à l'oxydation,
- Enfin, améliorer l'intégrité de surface des pièces usinées.

Les principaux inconvénients de la technologie de revêtement sont les suivants [7]:

- Les outils sont plus coûteux et ne conviennent qu'à des applications uniques (c'est-à-dire des plaquettes indexables),
- La rectification des outils éliminent les matériaux de revêtement.

1.5.4- Céramiques

Au début des années 1950, les premiers outils céramiques sont apparus. Le matériau principal constitutif de la céramique comprend l'oxyde d'aluminium à grains fins (Al_2O_3). De plus, Ce dernier est fritté sous haute pression et température. Les céramiques sont classées en deux principaux types comme les céramiques blanches (Al_2O_3 pur) et les céramiques noires (combinaison Al_2O_3 , TiC et ZrO_2) [7]. Les outils en céramique offrent une meilleure dureté et des caractéristiques de résistance à l'usure qui permettent au matériau de résister à une température supérieure à 1500 °C. Ainsi, l'usinage des matériaux avec des outils en céramique a permis d'utiliser des vitesses de coupe élevées sans utiliser de fluides de refroidissement [12]. De plus, l'outil en céramique a une meilleure stabilité chimique et n'affectera pas défavorablement l'usinabilité (c'est-à-dire aucune usure par diffusion).

L'intégrité de surface sur la finition de surface usinée n'est pas beaucoup affectée avec les outils en céramique. Cependant, une ténacité plus faible pendant l'usinage limitera l'utilisation d'outils en céramique. La ténacité des outils en céramique d'alumine peut être améliorée avec le mélange homogène de proportions appropriées d'oxydes de chrome ou de zirconium, de titane et de magnésium [13]. En général, les outils en céramique sont principalement disponibles avec trois combinaisons principales, telles que l'alumine (Al_2O_3), le nitrure de silicium (Si_3N_4) et Si-ALON (composition mixte de Si, Al, O et N). Al_2O_3 offre une meilleure résistance à l'usure qui convient pour couper la famille des aciers trempés; cependant, ils sont de nature fragile. Si_3N_4 est connu pour sa ténacité, qui convient pour couper efficacement la fonte. Les propriétés de Si-ALON dépendront de la proportion de Al_2O_3 et de Si_3N_4 . Une proportion plus élevée de Al_2O_3 dans Si-ALON se traduira par une dureté améliorée, et la ténacité augmentera avec la proportion plus élevée de Si_3N_4 . Les outils en céramique sont souvent les mieux adaptés pour l'usinage de la principale classe de matériaux ferreux et super-alliés. L'usinage de matériaux tendres (c'est-à-dire le cuivre, le laiton et l'aluminium) avec des outils en céramique peut toujours entraîner la formation d'arêtes rapportées. Les récents développements en nanotechnologie ont permis de renforcer les matériaux céramiques, suspendus uniformément, et ont fourni une résistance maximale aux chocs et à l'usure. Les revêtements des matériaux d'outils en céramique donnent souvent de bons résultats, mais entraînent un coût plus élevé. De plus, une faible adhérence des

matériaux de revêtement sur le substrat en céramique pourrait limiter l'application de revêtements sur les outils en céramique. L'usinage de matériaux durs par la céramique améliorera la durée de vie de l'outil de 20 fois par rapport aux outils commerciaux modernes [13].

1.5.5- Nitrure de bore cubique (CBN)

Après le diamant, le CBN est le deuxième matériau synthétique le plus dur connu, développé artificiellement pour couper des matériaux difficiles à usiner. Lors de l'usinage de matériaux durs, les outils se détériorent car ils subissent des contraintes, des températures et des vibrations plus élevées. La température de fusion du matériau CBN est d'environ 2730 °C, possédant ainsi une excellente résistance à l'oxydation et conservant une dureté avec une plus grande stabilité jusqu'à une température de 2000 °C. Les outils CBN sont plus performants que les céramiques dans l'usinage de matériaux souples [13]. Il est intéressant de noter que l'outil CBN offre de meilleures propriétés (mécanique, résistance aux chocs thermiques, faible usure et excellente conductivité thermique) par rapport aux outils en carbure. La seule limitation est que l'outil CBN doit fonctionner à une vitesse d'avance faible pour limiter l'usure de l'outil et une meilleure durée de vie de l'outil. Le matériau de nitrure de bore cubique polycristallin (PCBN) a été développé pour effectuer des opérations de tournage et autres opérations d'usinage (y compris des matériaux durs tels que les aciers, la fonte et les superalliages). L'outil PCBN offre une résistance à l'abrasion environ deux fois supérieure à celle de la céramique et dix fois supérieure à celle du carbure. La préparation appropriée des arêtes des plaquettes PCBN est indispensable pour améliorer la durée de vie de l'outil. Le chanfreinage d'arête d'un outil de coupe se traduira par une meilleure performance pour les produits industriels sur une période de temps. Cependant, avec le développement de la technologie avancée des outils de coupe, la préparation des arêtes offre de meilleures solutions (performances de coupe et durée de vie des outils améliorées) par rapport aux arêtes de coupe chanfreinées. L'outil PCBN recouvert d'une couche mince de 2 à 15 µm comme substrat, soit avec un dépôt chimique en phase vapeur soit avec un dépôt physique en phase vapeur, améliore les performances de l'outil [13]. En plus d'une dureté améliorée, le PCBN est chimiquement plus stable et fournit une couverture de protection à l'outil contre la résistance aux chocs thermiques. La technologie de revêtement offre de meilleurs avantages techniques, mais l'intégrité de la surface (défauts de surface, finition et contraintes résiduelles) des outils revêtus n'est pas améliorée de manière significative. Il est intéressant de noter que les outils non revêtus ont plus de chances de conduire à des contraintes résiduelles en compression lors de l'usinage [13].

1.5.6-Diamants polycristallin (PCD)

Le PCD fait partie du groupe constitutif des matériaux extra durs. Le développement récent de la technologie des outils a montré que les outils PCD utilisés sont disponibles avec trois grades différents. Ces qualités sont classées en fonction de la taille des grains (gros grains 50 μm , grains fins 5 μm et d'ultrafins 0,5 μm). Les outils à gros grains possèdent une résistance élevée à l'abrasion, qui sont utilisés dans l'usinage de matériaux à haute teneur en silicium, aluminium, graphite, fonte grise, céramique, carbure de tungstène. Une résistance élevée à l'abrasion et une excellente netteté des arêtes d'outil sont les principales caractéristiques de l'outil PCD à granulométrie fine, où elles conviennent pour l'usinage d'aluminium, de cuivre, de fibre de verre, de carbone à faible teneur moyenne en silicium, de contreplaqué de bois, de panneaux de fibres et de bois durs. Les outils diamantés à grain ultrafin offrent une ténacité supérieure à la pointe d'un outil et sont utilisés dans l'usinage des plastiques, du bois, de l'aluminium et du cuivre. Il est intéressant de noter que les outils à granulométrie grossière possèdent une meilleure résistance à l'usure, tandis qu'une finition de surface supérieure sera obtenue avec les outils à granulométrie ultra-fine. L'outil PCD possède des caractéristiques supérieures du diamant. Le composite est fritté avec un liant métallique sous l'influence des hautes températures et pressions. De plus, les outils PCD peuvent offrir une résistance à l'usure environ 500 fois supérieure à celle du carbure de tungstène. Les outils PCD sont extrêmement fragiles et présentent une faible ténacité et une plus grande tendance à réagir avec le fer. Les outils PCD remplacent les outils à haute dureté (carbure de tungstène revêtu et non revêtu, céramique et diamant naturel) dans l'usinage des fibres de carbone et des composites renforcés par matrice métallique, du bois, des plastiques, de la céramique, ...etc [13].

1.6- Sélection de matériau et de la géométrie d'outil de coupe

La sélection d'un matériau d'outil approprié définira l'efficacité du processus en termes de degré d'intégrité de surface, de précision et d'économie. Les matériaux d'outils susmentionnés sont de classe générale, dans lesquels une grande variété de matériaux d'outils et de plaquettes de coupe sont actuellement développés par les fabricants d'outils. De plus, pour une fabrication durable, l'environnement de coupe (c.-à-d. lubrifiant sec, humide et en quantité minimale), l'application de fluide de coupe (c.-à-d. solide, liquide et semi-solide) et le type de fluide de coupe (MOS_2 , huiles végétales, synthétique/minérale) les huiles,...etc) influenceront davantage les performances d'usinage. Notez que quelques matériaux d'outils sont plus sensibles aux fluides de coupe, ce qui aura un effet négatif sur la durée de vie de l'outil et les performances d'usinage (intégrité de surface, précision dimensionnelle, économie, ...etc.). Pour un usinage durable, les paramètres tels que la géométrie et la forme de l'outil, les porte-outils, les variables liées à l'usinage et les fluides de coupe ont montré un

comportement non linéaire complexe sur les performances d'usinage et rendent difficile le réglage des conditions optimales. De plus, les propriétés du matériau de l'outil telles que la dureté, la ténacité et les caractéristiques de dureté à chaud détermineront la durée de vie de l'outil (voir les figures 1.8 et 1.9). De plus, la géométrie de l'outil (rayon du bec, forme de l'arête de coupe, ...etc.) détermine les performances de la qualité d'usinage (voir figure 1.10). Par conséquent, la sélection d'un matériau d'outil et d'une géométrie appropriée pour le processus d'usinage est considérée comme une tâche difficile pour les fabricants et nécessite des connaissances préalables sur l'usinage des matériaux durs [14].

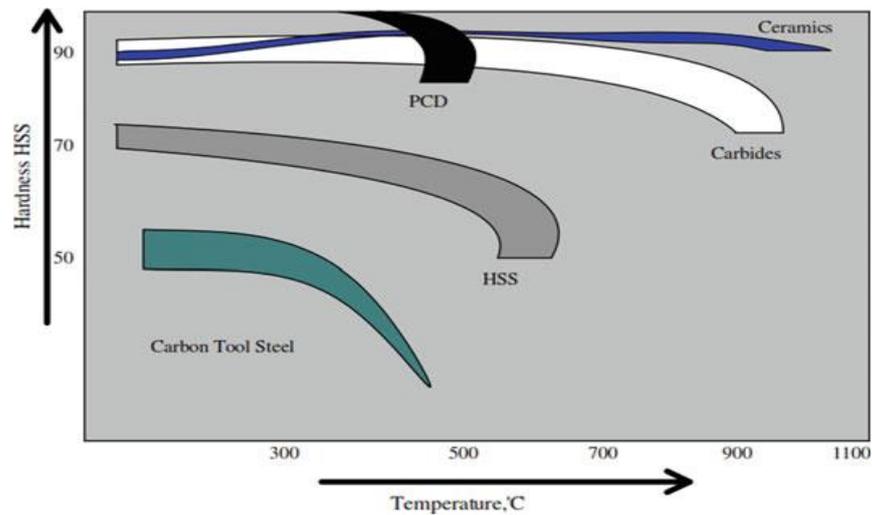


Figure 1.8- Dureté des matériaux des outils [14]

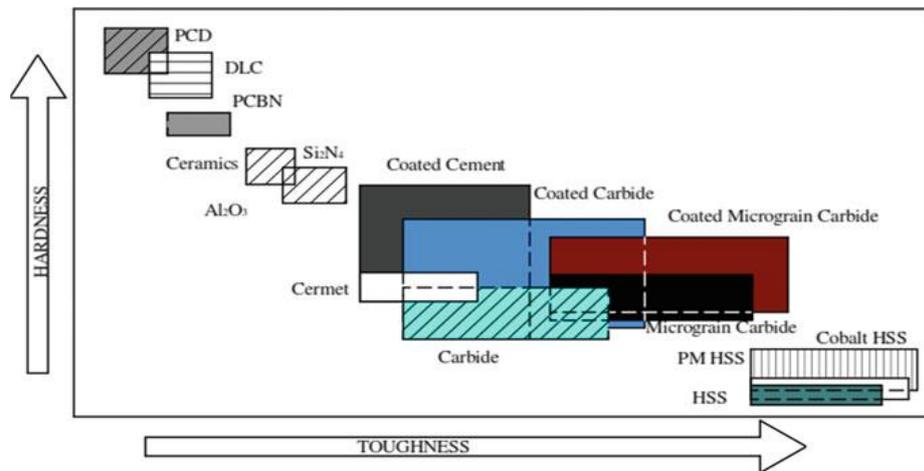


Figure 1.9- Dureté et ténacité des matériaux d'outils [14]

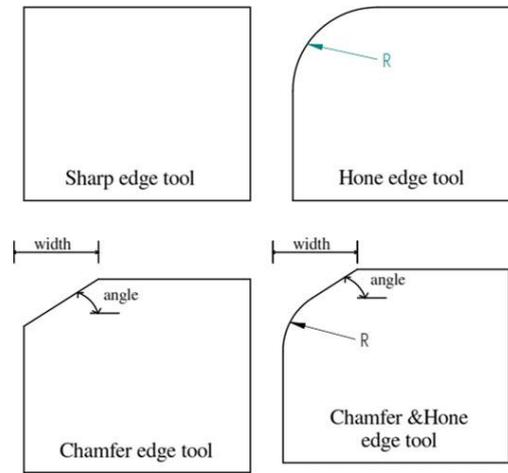


Figure 1.10- Préparation des arêtes pour les outils de coupe à un point unique en tournage dur [14]

1.7- Avantages de l'usinage dur par rapport à l'usinage conventionnel

Le but des fabricants comprennent l'amélioration continue de la productivité et de la qualité des produits lors de l'usinage de matériaux durs (difficiles à couper). Les méthodes conventionnelles d'usinage dur permettent un meilleur taux d'enlèvement de matière et permettent de réaliser des économies dans la fabrication des pièces mécaniques. Par conséquent, les facteurs suivants sont pris en compte lors de l'usinage de matériaux durs pour obtenir les meilleurs résultats :

- 1) Rigidité du système de machine-outil et du porte-outil,
- 2) Propriétés du matériau de l'outil, telles que la dureté et la ténacité,
- 3) Géométrie de l'outil,
- 4) Environnement de coupe.

Le choix approprié des paramètres se traduira par une meilleure durée de vie de l'outil, un taux d'enlèvement de matière, une intégrité de surface, une précision dimensionnelle et un coût d'usinage réduit. De plus, le fraisage dur est un processus en une seule étape qui aide à couper des pièces de forme complexe (moule et filière). Les opérations de perçage dur trouveront des applications majeures dans la coupe de profils internes, de flancs d'engrenages internes, de cannelures et de profils de multiples rainures de clavette. Dans la fabrication des engrenages, le profil est usiné avec un processus de taillage, qui remplace l'exigence du processus de rectification [14]. Le processus de tournage dur offrira une plus grande flexibilité dans la fabrication de profils complexes en une seule étape par rapport à la rectification. D'après la littérature, on peut conclure que l'usinage de matériaux durs avec un processus d'usinage conventionnel est toujours une alternative compétitive et attrayante par rapport aux processus d'usinage non traditionnels [14]. La figure 1.11 montre une comparaison qualitative des capacités des processus de tournage dur et de rectification.

Le processus de tournage remplace le processus de rectification pour finir la géométrie de la pièce qui est des matériaux extrêmement difficiles à couper avec des avantages significatifs en termes de flexibilité, d'écologie, d'économie et de qualité.

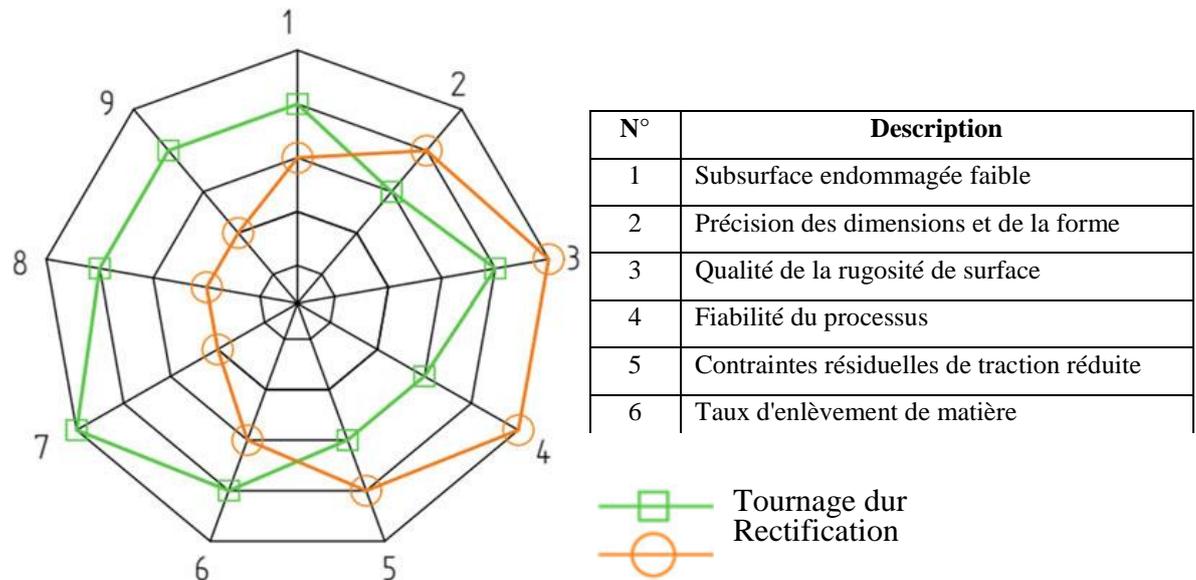


Figure 1.11- Comparaison qualitative des capacités des processus de tournage dur et de rectification [14]

1.8. Conclusion

De nombreux efforts de recherche sont faits pour améliorer les caractéristiques de performance dans le processus de tournage dur. Dans la plupart des études, les chercheurs ont tenté d'optimiser les paramètres d'influence tels que la géométrie de l'outil, les matériaux et les revêtements, la dureté du matériau, les paramètres de coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance, rayon de bec, profondeur de coupe,...etc.) pour un meilleur usinage (c.-à-d. usure des outils, rugosité de surface, taux d'enlèvement de matière, forces de coupe, contraintes résiduelles,...etc.). Pour atteindre un meilleur indice d'usabilité, diverses approches, à savoir analytique/numérique, un facteur à la fois, la conception statistique des expériences (FFD, CCD, BBD, Taguchi), sont largement utilisées. De plus, cela aidera également le personnel de l'industrie à connaître les combinaisons d'outils et de matériaux appropriés et leurs propriétés.

CHAPITRE 2 :

Température dans les procédés d'usinage

2.1- Introduction

La puissance consommée dans la coupe des métaux est largement convertie en chaleur autour de l'arête de l'outil de coupe, et de nombreux problèmes économiques et techniques de l'usinage sont causés directement ou indirectement par cette action cette chaleur. Le flux de chaleur et la répartition de la température dans l'outil et le matériau usiné près de l'arête de l'outil de coupe joue un rôle dans l'usinage. Donc, Les limites imposées par les températures de coupe ont été le moteur du développement des matériaux d'outils. Il est donc important de comprendre les facteurs qui influencent la production de chaleur et la distribution de la chaleur. Toutefois, la détermination des températures et de la distribution des températures dans la région proche de l'outil est techniquement difficile.

Les températures de coupe sont intéressantes car elles affectent les performances d'usinage. La température dans la zone de déformation primaire, où se produit la majeure partie de la déformation impliquée dans la formation des copeaux, influencent les propriétés mécaniques du matériau usiné et donc les forces de coupe. Pour cette raison, la plupart des analyses les plus complètes de la mécanique de la coupe utilisent des modèles de comportement dépendant de la température. Les températures sur la face de coupe de l'outil ont une forte influence sur la durée de vie de l'outil. Dans certains cas, les constituants du matériau de l'outil diffusent dans le copeau ou réagissent chimiquement avec le fluide de coupe ou le copeau, entraînant finalement une défaillance de l'outil. Étant donné que les températures de coupe augmentent avec la vitesse de coupe, les mécanismes d'usure d'outil activés par la température limitent les vitesses de coupe maximales pour de nombreuses combinaisons outil-pièce. Une compréhension des températures dans cette région donne donc un aperçu des exigences en matière de matériaux et de revêtements d'outils. Enfin, les températures sur la face en relief de l'outil affectent la finition et l'état métallurgique de la surface usinée.

2.2- Sources de chaleur en usinage

La température à des effets importants sur les efforts de coupe et l'usure des outils, l'aspect thermique de la coupe a donc été largement étudiée depuis de nombreuses années. À cause de la complexité des phénomènes mis en jeu en usinage, il est très difficile de prédire l'intensité et la distribution des sources de chaleur.

Les processus mécaniques et thermiques sont extrêmement couplés parce que les propriétés des matériaux varient avec la température. On indique souvent que 90 à 100 % de l'énergie mécanique consommée est finalement convertie en énergie thermique, Les principales sources de chaleur proviennent :

- ✓ Des déformations plastiques des zones de cisaillement primaire et secondaire,

- ✓ De la dissipation du frottement générée à l'interface outil-copeau et entre la face de dépouille de l'outil et la surface usinée de la pièce. La chaleur ainsi créée va se répartir dans les différentes parties de l'outil, de la pièce et du copeau (figure 2.1). Le transfert de chaleur dans le copeau et dans la pièce s'effectue majoritairement par transport alors que dans l'outil le transfert s'effectue principalement par diffusion. De fait, la répartition des flux ne se fait pas de manière équivalente et dépend bien sûr des conditions de coupe et des propriétés thermiques des matériaux. Seul un faible pourcentage de la chaleur générée est transmis à l'outil et la pièce, la majorité étant évacuée par le copeau [15].

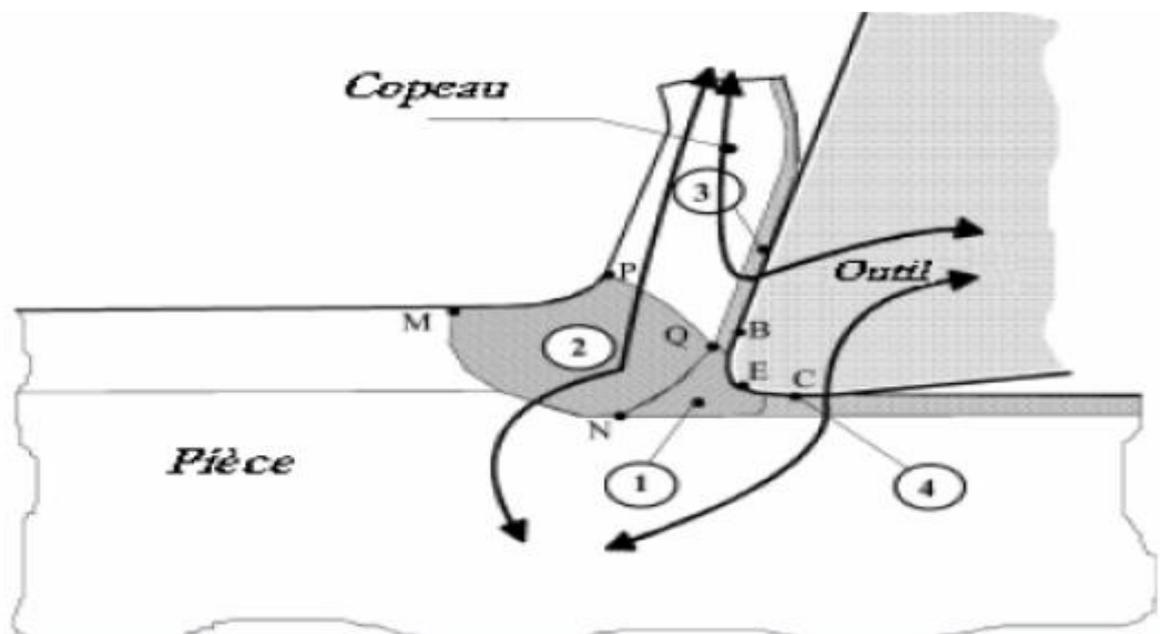


Figure 2.1- Représentation des différents flux thermiques et sources de chaleur [15]

2.2.1- Température de coupe

La puissance absorbée par la coupe produit de la chaleur qui se propage dans les zones à proximité de la pointe de l'outil. La chaleur produite émane du travail de coupe (formation du copeau) mais aussi du travail fourni pour combattre les efforts de frottements pièce-outil-copeau inévitable, il est nécessaire de connaître les origines et les influences afin d'optimiser les choix des paramètres et de minimiser les effets néfastes de la température de coupe sur le couple pièce-outil ainsi que la machine-outil [16].

Il y a lieu ainsi de se pencher sur les préoccupations Suivantes :

- Moyens de mesure de la température de coupe.
- Origine et bilan thermique de coupe.
- Répartition la température de coupe.
- Paramètres d'influence.
- Modélisation de la température de coupe.

2.2.2- Mesure de la température

Les températures de coupe sont plus difficiles à mesurer avec précision que les forces de coupe. La force de coupe est un vecteur complètement caractérisé par trois composantes, tandis que la température est un champ scalaire, qui varie dans tout le système et qui ne peut être décrit de manière unique par des valeurs en quelques points. Pour cette raison, il n'existe pas d'analogie simple au dynamomètre de force de coupe pour mesurer les températures de coupe ; au lieu de cela, un certain nombre de techniques de mesure basées sur divers principes physiques ont été développées. Des méthodes particulières ne donnent généralement que des informations limitées sur la distribution complète de la température [17].

Il existe de nombreuses méthodes pour mesurer l'élévation de température en usinage [18], l'utilisation de thermocouples, la caméra infrarouge, l'analyse métallographique, l'utilisation de poudres fines à température de fusion constante et l'emploi de peintures thermosensibles, appliquées à l'usinage.

La technique des thermocouples s'utilise de deux façons différentes :

- Avec des thermocouples de faibles dimensions insérés dans l'outil de coupe,
- En utilisant le thermocouple naturel formé par la pièce et l'outil eux-mêmes.

Bien qu'assez simple d'utilisation, les techniques des thermocouples restent imprécises et ne permettent d'obtenir qu'une température moyenne à l'interface outil copeau. Pour avoir une information complète sur la distribution de la température d'autres techniques doivent être envisagées.

2.3- Méthodes de mesure de la température de coupe

➤ Définition de la coupe

Afin de mieux situer les techniques, on peut dire que la coupe des métaux intervient dans un ensemble de procédés d'élaboration de pièces, par enlèvement de matière en quantités pouvant représenter une proportion notable du matériau brut. Cet enlèvement est alors réalisé par l'action d'un outil possédant un ou plusieurs tranchants de section convexe animé d'un mouvement relatif à la pièce appropriée. Une machine-outil fournit à la fois la puissance mécanique nécessaire et réalise le contrôle du mouvement relatif. Cet ensemble constitue un système qui doit être considéré de plusieurs points de vue cinématique, dynamique, commande.

➤ Les outils de coupe

Les outils coupants sont des instruments destinés à travailler la matière par enlèvement sous forme de copeaux. Il existe une très grande variété d'outils de coupe : Différents type de géométries, de matériaux et de revêtements. Malgré leur destination ainsi

que leur aspect extérieur différent, n'importe quel outil comporte une partie active, c'est à dire celle qui enlève directement le copeau. La partie active de tous les outils de coupe, quel que soit sa forme ressemble à un outil de tournage classique. Tandis que les dents des outils de coupe spéciaux, tels que la meule ont des grains dont les arêtes enlèvent les copeaux [18]. On exige de l'outil d'avoir les propriétés suivantes :

- La pression d'exécution de la forme de la pièce à usiner ;
- La précision des cotes à usiner ;
- L'état de surface de la pièce à usiner ;
- L'efficacité influence sur le rendement du travail ;
- La solidité (stabilité) ;
- Le prix de revient bas.

Le choix de l'outil et de son mode de coupe sont directement déterminés par le type d'opérations à réaliser. Il existe ainsi une multitude d'outils avec de caractéristiques spécifiques concernant leurs géométries, leurs matériaux ou leurs revêtements. Quelques exemples sont présentés en figure 2-2.



Figure 2.2- Exemples de différentes plaquettes de tournage disponible [19]

➤ **Paramètres de coupe**

Lors d'un usinage par enlèvement de matière, on se retrouve, dans la majorité des cas, dans la configuration suivante :

- Une lame d'outil pénètre dans la matière et enlève un copeau ;
- L'outil suit une trajectoire par rapport à la pièce à usiner, où les mouvements sont assurés par les éléments constitutifs de la machine-outil.

La figure suivante (figure 2.3) montre les paramètres d'influence essentiels dont en dépend le choix des paramètres de coupe.

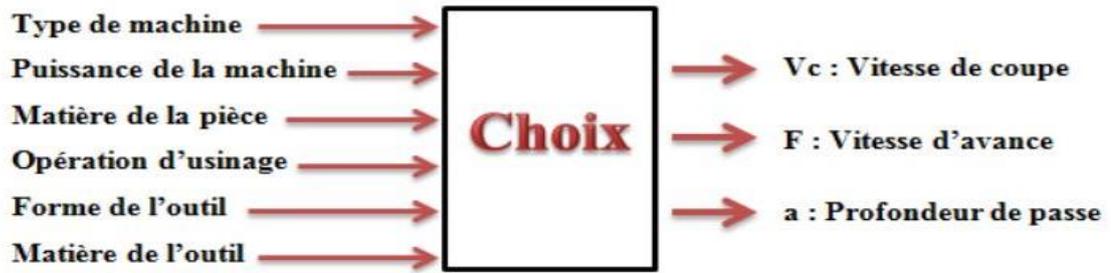


Figure 2.3- Choix de paramètres de la coupe

Durant l'usinage, il est supposé que la majorité de la puissance mécanique mise en œuvre se transforme en puissance thermique. Les zones de cisaillement (primaire, secondaire, et tertiaire) générées par la coupe sont le siège de production de chaleur. Les flux de chaleur issus de ces zones sources sont dissipés, d'une façon non équivalente, dans la pièce, l'outil de coupe, le copeau, et une partie minimale est évacuée par l'air (figure 2.4)

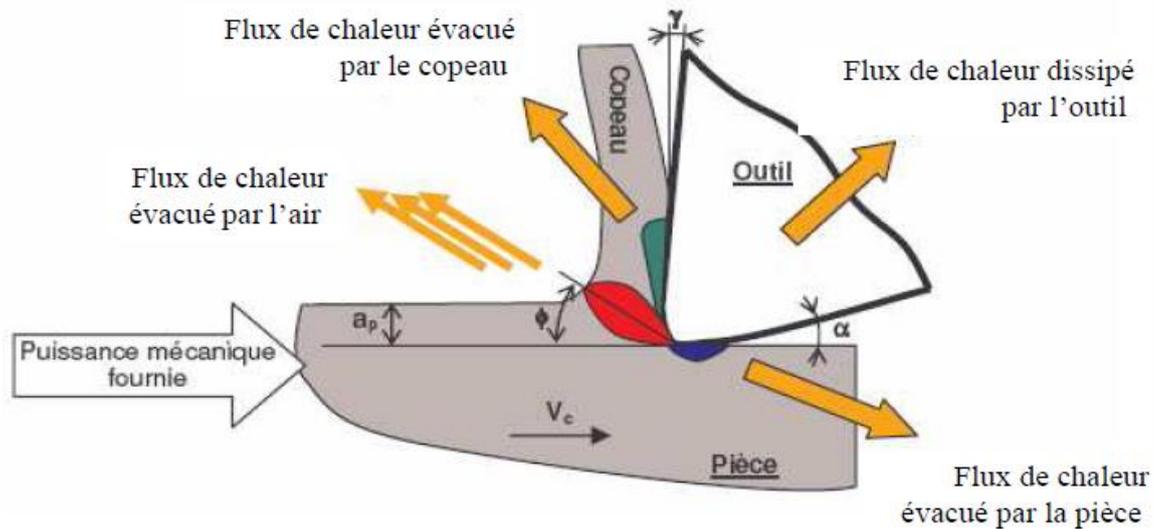


Figure 2.4- Distribution des flux de chaleur générés par une coupe orthogonale [15]

Lors de la coupe, la connaissance des phénomènes thermiques induits est primordiale pour la compréhension de la coupe et pour améliorer l'usinabilité de certains matériaux. De plus, ces températures influent sur le produit final (contraintes résiduelles, états de surfaces, tolérances géométriques ...).

2.3.1- Mesures indirectes de la température de coupe

En 1971, Rosseto et al. [16] ont mesuré la température de coupe à l'aide d'un vernis thermosensible. Ce dernier est déposé sur l'outil et change de couleur à partir d'une valeur de température bien définie. La frontière entre deux couleurs présente l'isotherme. Casto 1989 a utilisé une méthode inspirée de celle mise en place par Rosseto et al [16]. Elle consiste à introduire une poudre, dont on connaît le point de fusion, entre deux parties d'une plaquette.

Lorsque la température de fusion de la poudre est atteinte, l'essai est arrêté. Les points où la poudre a atteint son point de fusion matérialisent l'isotherme [16].

Dans le cas des aciers rapides, la cartographie de la température de l'outil peut être décrite par la mesure des micro-duretés dans le matériau. Après une calibration préalable duretés/températures, cette méthode propose de remonter à la distribution de la température dans l'outil par les mesures de micro-duretés à la fin des essais.

2.3.2- Mesures directes de la température de coupe

2.3.2.1- Mesure de température de coupe par thermocouple

La méthode du thermocouple outil-pièce (figure 2.5), développée pour la première fois dans les années 1920, utilise l'outil et la pièce comme éléments d'un thermocouple. La jonction chaude est l'interface entre l'outil et la pièce, et la jonction froide est formée par les sections distantes de l'outil et de la pièce, qui doivent être connectées électriquement et maintenues à une température de référence constante. Au moins une branche du circuit doit être isolée de la machine-outil, bien qu'en pratique les deux branches soient souvent isolées pour éliminer le bruit des éléments rotatifs du système [20].

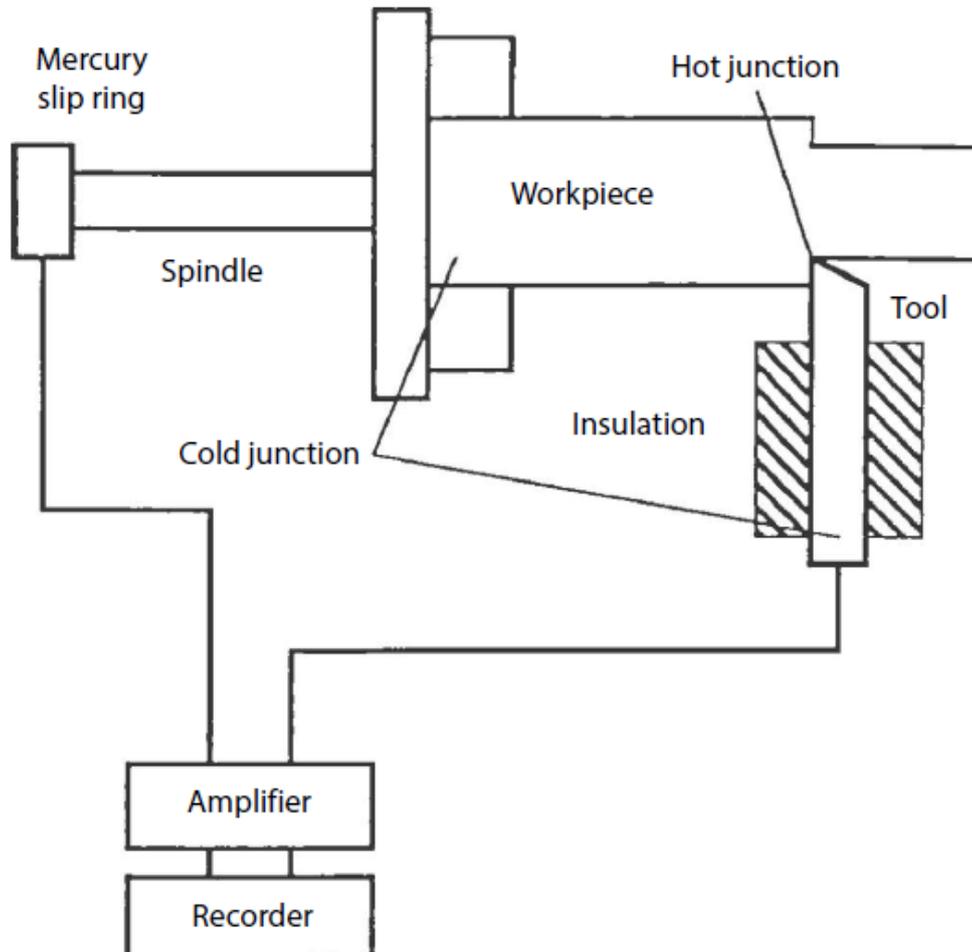


Figure 2.5- Circuit thermocouple outil-travail pour mesurer les températures de coupe [17]

Cette méthode ne peut être utilisée que lorsque l'outil et la pièce sont des conducteurs électriques, et ne peut donc pas être utilisée avec de nombreux outils de coupe en céramique.

La puissance thermoélectrique du circuit est généralement faible et doit être estimée en calibrant le circuit par rapport à un thermocouple de référence. L'étalonnage est essentiel pour obtenir des résultats précis [21]. La plupart des méthodes d'étalonnage impliquent de comparer la force électromotrice produite par l'outil et la puce avec celle produite par un thermocouple standard lorsque les deux sont chauffés par un bain de métal, une torche de soudage ou une bobine d'induction (figure 2.6). Il est également souvent difficile de maintenir la soudure froide à température constante ; ceci est particulièrement vrai lorsqu'on utilise de petites plaquettes d'outils indexables, car dans ce cas une jonction chaude secondaire peut apparaître à l'interface entre la plaquette et le porte-outil. Cette erreur peut être minimisée grâce à un circuit de compensation ou en réalisant des connexions électriques à l'aide de fils constitués de matériaux ayant un faible pouvoir thermoélectrique lorsqu'ils sont couplés au matériau de l'insert [20,21]. L'exigence qu'une branche du circuit soit isolée de la machine-outil peut également créer des difficultés ; la présence du matériau isolant réduit souvent la rigidité du système d'usinage et conduit à des vibrations lors des tests à grande vitesse.

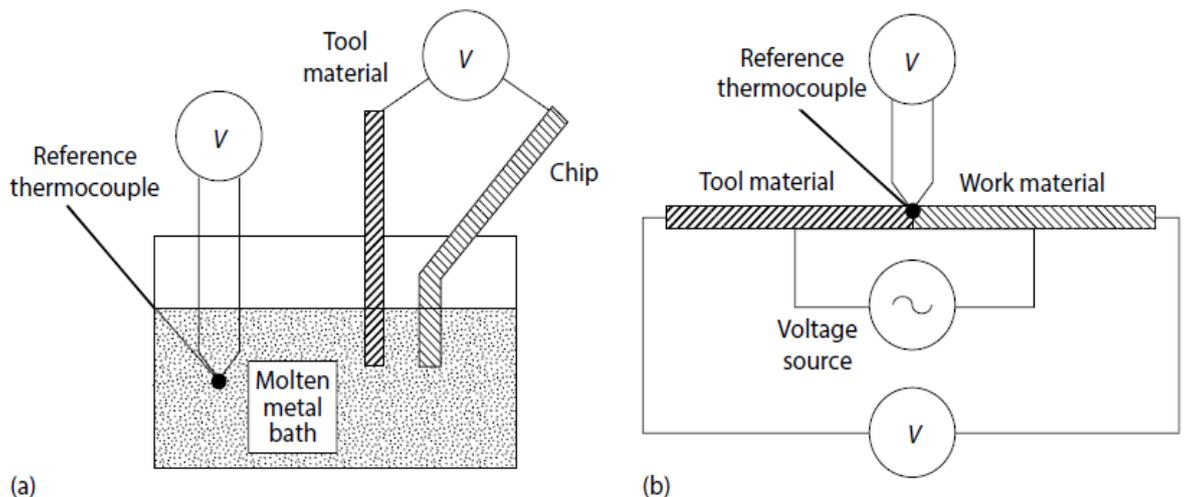


Figure 2.6- Méthodes d'étalonnage des thermocouples outil-pièce. (a) Méthode du bain de métal décrite (b) Méthode de chauffage électrique [17]

On suppose généralement que la méthode du thermocouple outil-travail mesure une température interrassiale moyenne, bien que l'interprétation ait parfois été remise en question [22]. Sur la base d'une analyse du champ de potentiel [8], l'interprétation physique de la tension mesurée dépend des caractéristiques thermoélectriques des matériaux impliqués. Pour les outils tranchants, la quantité mesurée dans la méthode du thermocouple outil-pièce est la force électromotrice (fem) thermique moyenne à l'interface outil-copeau. Si la fem thermoélectrique varie linéairement avec la différence de température entre les jonctions chaude et froide, cette fem correspond à la température interrassiale moyenne. Pour les

relations température (emf) non linéaires, cependant, la température obtenue en substituant la force électromotrice mesurée dans la relation température emf diffère de la température interracial moyenne. Pour les outils en carbure et les matériaux de travail les plus courants, la différence entre ces températures est de l'ordre de cinq pour cent, et on peut supposer que la méthode du thermocouple outil-travail mesure les températures interraciales moyennes. Pour les combinaisons de matériaux avec des caractéristiques thermoélectriques plus non linéaires, cependant, cette interprétation entraîne une erreur plus importante.

Des méthodes similaires à la technique du thermocouple outil-pièce comprennent celles dans lesquelles des fils isolés sont noyés dans l'outil (voir figure 2.7) ou la pièce (voir figure 2.8). Dans le premier cas, la jonction chaude est formée au point de contact entre la pièce et le fil noyé dans l'outil ; dans le second cas, la jonction chaude se forme lorsque l'outil coupe le fil. Dans les deux cas, la jonction froide est formée de la même manière que dans la méthode du thermocouple outillage. Si le matériau du fil est correctement sélectionné (par exemple, un fil de cuivre pour un outil en carbure de tungstène [16]), la puissance thermoélectrique du circuit peut être augmentée, améliorant le rapport signal/bruit de la mesure. Aussi, l'interprétation de la mesure n'est pas un problème, puisque la température mesurée est clairement la température au point où se forme la soudure chaude. Si un certain nombre d'essais sont effectués avec des fils à différents emplacements, la distribution des températures le long du râteau de l'outil ou de la face de dépouille peut être mesurée. Ces méthodes ont été le plus largement utilisées dans les essais de forage [16] mais ont également été appliquées dans des études de coupe orthogonale. Pour le perçage, le fil noyé peut être remplacé par une feuille noyée isolée, ce qui permet de cartographier la distribution de température à travers la lèvre du foret en un seul test]. Les principaux inconvénients de ces méthodes sont qu'elles nécessitent un étalonnage soigneux, une préparation fastidieuse des échantillons et une réduction des données. Dans le cas de fils noyés dans la pièce, le temps nécessaire à l'outil et au fil pour atteindre l'équilibre thermique limite également la vitesse de coupe maximale utilisable [23].

La mesure de la température par un thermocouple se base sur le principe suivant : si deux métaux sont soudés à leurs extrémités et si une de ces soudures est portée à une température bien déterminée, l'autre étant maintenue à une température différente, on observera alors une force électromotrice entre les deux jonctions.

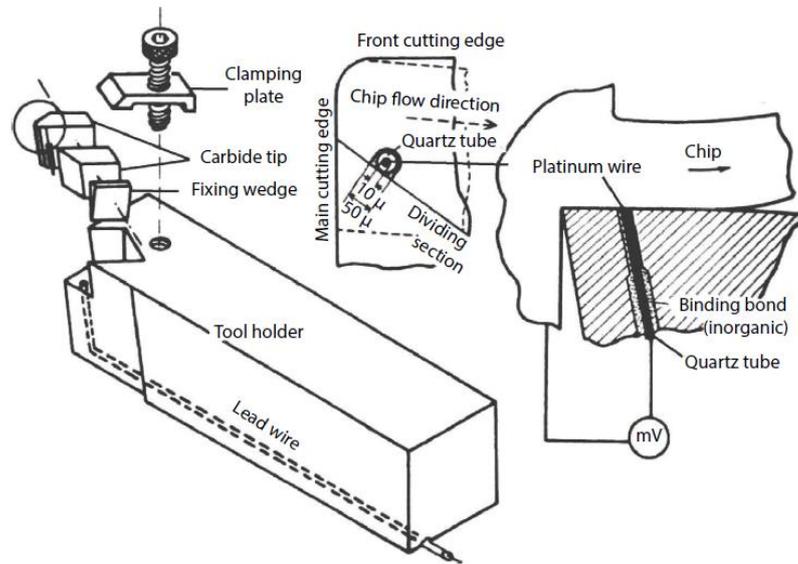


Figure 2.7- Fil de platine isolé noyé dans un insert de coupe pour former un thermocouple avec le copeau [17].

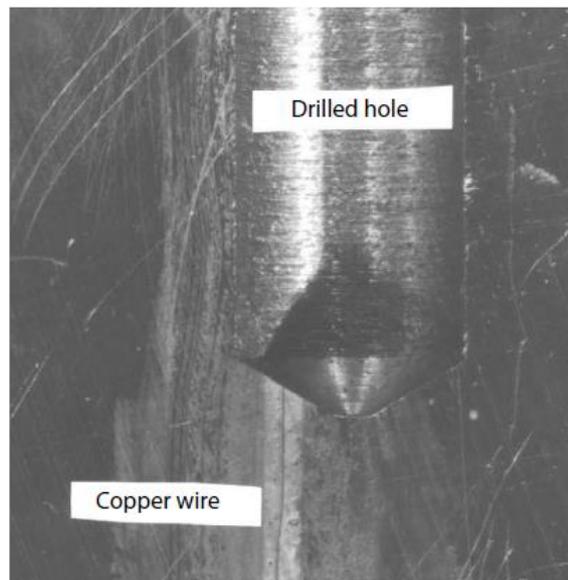


Figure 2.8- Fil de cuivre isolé noyé dans une pièce en fonte pour former un thermocouple avec une perceuse [17]

L'évaluation de cette force, qui dépend des matériaux utilisés, symbolise la température mesurée. L'avantage des thermocouples est la simplicité et la flexibilité de réalisation et d'utilisation pour de simple acquisition et ce à moindre coût.

Il existe plusieurs types de thermocouples, les plus répandus sont les thermocouples standard et dynamique [24].

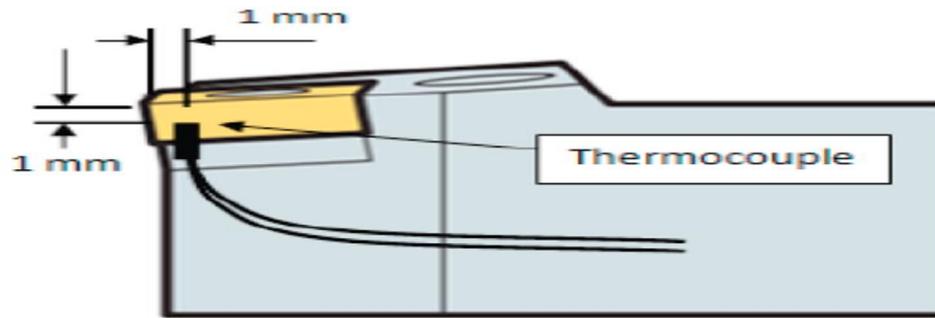


Figure 2.9- Mesure de la température par thermocouples

– **Thermocouples dynamiques**

Ce type de thermocouple est généralement utilisé en tribologie. Le principe est de prendre deux corps en mouvement relatif comme deux éléments d'un thermocouple [24].

Elle a été mise en œuvre durant les années 20. Cette technique a été utilisée par pour estimer la température à l'interface outil-copeau pendant l'usinage. L'outil est utilisé comme un élément du thermocouple et la pièce comme étant le deuxième élément. A l'interface entre ces deux éléments, il y a formation d'une jonction qui par la suite jouera le rôle d'un thermocouple. Cette méthode a aussi été utilisée en rectification par Outwater et al et dans le cas de contact glissant de deux corps métalliques [24].

– **Thermocouples incorporés (standard)**

Ce sont les plus utilisés pour l'évaluation de la température. En usinage, l'utilisation de ces thermocouples nécessite des perçages de trous dans lesquels les thermocouples sont insérés. Pour estimer la température dans la zone de coupe et d'établir la cartographie thermique dans l'outil. Dans ce cas, on cherche à placer un ou plusieurs thermocouples au plus près de la zone sollicitée.

L'avantage de cette méthode est la possibilité de les utiliser dans tous les procédés de coupe (avec ou sans lubrification). Cette méthode utilisée avec succès pour l'évaluation de la cartographie thermique dans un outil carbure. Dans la suite de ces travaux, le Calvez a optimisé le contact thermique entre le thermocouple et les parois des trous en utilisant une colle d'argent qui assure une bonne fixation des thermocouples (à 0,5 mm des faces de coupe et de dépouille) et une bonne conductivité thermique. Par contre, le temps de réponse (temps de réponse dans l'air agité est différent au temps de réponse dans l'air calme) de ces thermocouples n'autorise que l'analyse des régimes stationnaires. Ces résultats montrent que loin du point chaud, la température est faiblement sensible aux variations de vitesse et d'avance. Après comparaison avec d'autres techniques de mesure (pyromètre, caméra thermique ...), à une position de 0,5 mm de l'arête de coupe, l'erreur de mesure due au thermocouple est estimée à environ 05%.

En utilisant un thermocouple implanté à une profondeur de 0,025mm à partir de la surface de la pièce usinée, il a été démontré qu'avec l'élévation de l'énergie de coupe, la propagation de la chaleur dans la pièce est plus élevée dans le cas d'un acier dur que dans le cas d'un acier doux.

Les principaux inconvénients dus à l'utilisation des thermocouples sont :

- Le temps de réponse du thermocouple ;
- La difficulté d'implantation des thermocouples et leur localisation dans l'outil ;
- Le risque de modification du champ thermique et de la conductivité en présence de trous et des capteurs ;
- La fragilisation de la tête de l'outil lors de l'intégration des thermocouples ;
- L'impossibilité d'accéder à la température en tête d'outil ;

Les gradients de température dans la zone de coupe étant très importants, une variation de position entraîne des différences de température très importante [25].

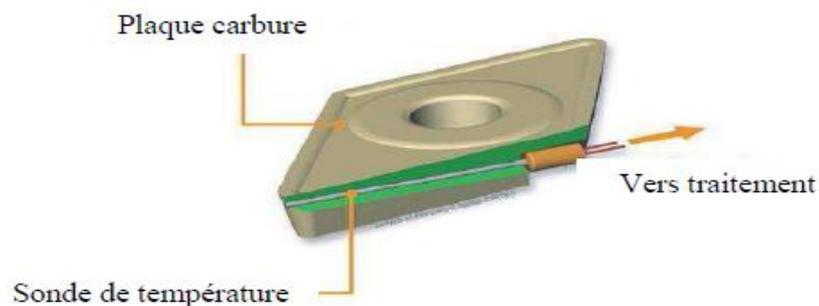


Figure 2.10- Plaquette instrumentée CIRTES [25]

L'utilisation des thermocouples ne permet d'obtenir qu'une cartographie des températures loin de la pointe d'outil, voire dans le meilleur des cas une température globale de la zone de coupe. Plusieurs chercheurs ont choisi d'estimer la température moyenne au niveau l'arête de coupe en utilisant une méthode de résolution du problème inverse de diffusion de la chaleur dans l'outil. A l'aide de deux thermocouples implantés dans l'outil, la température est mesurée en deux endroits. Ensuite, un modèle très simplifié est utilisé pour remonter à la température en pointe de l'outil.

Cette méthode présente des limites. Elle néglige la dynamique du système expérimental d'identification de la température à l'arête de coupe de l'outil.

L'inconvénient de ce modèle c'est qu'il ne correspond pas à la réalité. Le bruit introduit n'est pas représentatif des gradients de température élevés observé en coupe. De plus, il ne prend pas en compte de la géométrie complexe de l'outil et des transferts de chaleur dans celui-ci qui sont tridimensionnels [26].

Du fait de la complexité de la géométrie de l'outil et les transferts de chaleur dans celui-ci, on peut conclure que les différents modèles et techniques de chauffe utilisés pour la

calibration (non représentatifs des conditions thermiques, à la pointe d'outil, générées en coupe) présentés ci-dessus rendent les résultats très approximatifs [26].

2.3.2.2- Mesure de température par la méthode optique

La méthode d'implantation des thermocouples reste une technique onéreuse et ne permet, pas d'effectuer des mesures de la température de contact outil-copeau. De plus, la difficulté liée à la connaissance pour reproduire les conditions de coupe afin de nourrir les modèles basés sur la méthode inverse et les erreurs de mesures liées à l'usure de l'outil. Il est donc, nécessaire d'utiliser d'autres systèmes de mesure de température directes qui permettent une acquisition locale et au cours du temps au niveau de la zone de coupe (outil/pièce/copeau), voir même au niveau des zones de cisaillement. Les seules méthodes permettant de faire des relevés de températures de la zone de coupe sur lesquelles l'évolution du contact pièce-outil copeau n'influe pas, sont celles basées sur l'émission d'onde électromagnétique d'un corps lorsqu'il est chauffé. Les techniques les plus répandues sont le pyromètre optique, la caméra infrarouge et la caméra proche infrarouge.

Le pyromètre est une technique basée sur l'émission d'onde électromagnétique. Le principe consiste à comparer deux énergies (dans la même bande de longueur d'onde), celle émise par le corps chauffé à celle émise par une source étalon. L'étalonnage d'un pyromètre se fait à l'aide d'un corps noir (figure 2.11 et 2.12) [25].



Figure 2.11- Pyromètre à infrarouge [24]

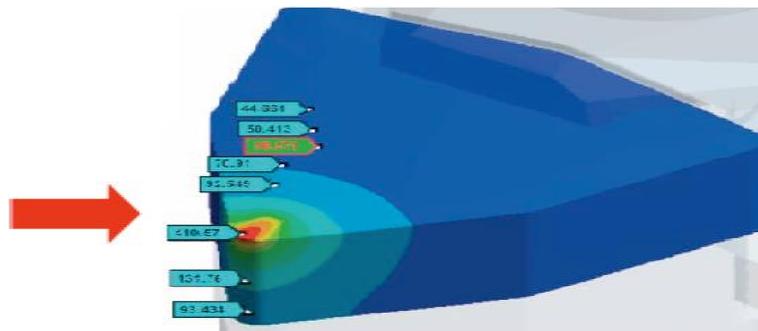


Figure 2.12- Les valeurs de la température de l'outil pour certains endroits [26]

2.3.2.3- Mesure par lunettes pyrométriques

Se font soit sur la surface externe du copeau, soit sur la surface de l'outil dégagée pendant un court instant. Ces dernières sont délicates, car prises premières sont utiles pour ajuster un modèle, mais il est températures internes du copeau à partir de mesures sur sa face la surface de l'outil dégagée en des instants très courts. Les très difficile d'extrapoler les externe (figure 2.13) [26].

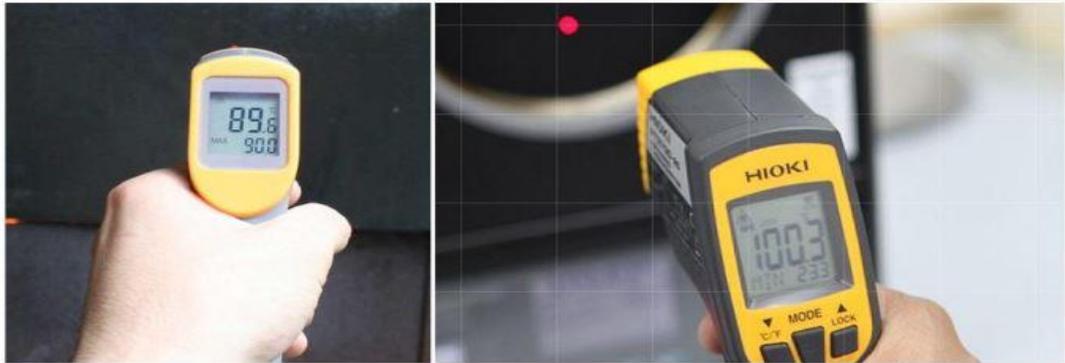


Figure 2.13- Mesure par lunettes pyrométriques [26]

2.3.2.4- Autres méthodes

Les distributions de température peuvent également être estimées en enduisant des spécimens de peintures thermosensibles. Les limites de cette méthode sont bien documentées ; il apparaît qu'il convient au mieux à des comparaisons qualitatives. De même, la température des copeaux d'acier peut être estimée de façon grossière en notant leur couleur, qui donne une indication du degré d'oxydation dépendant de la température qu'ils ont subi. Il s'agit également d'une méthode qualitative qui convient principalement aux comparaisons sur des plages limitées de conditions de coupe.

Le flux de chaleur dans un outil à refroidissement interne a été estimé en mesurant l'élévation de température dans le fluide de refroidissement et utilisé pour estimer les températures d'interface de l'outil sur la base d'une solution inverse.

2.4- Effets de la température

2.4.1- Effet de la température sur l'outil

La température influe négativement sur la tenue de l'outil à chaud surtout lorsqu'on dépasse la limite recommandée pour le matériau de coupe choisi l'usure provoquée par une haute température de coupe se manifeste plus fortement dans les aciers au carbone et les aciers rapides, par suite de leurs résistances à chaud relativement faible. L'usure est d'autant plus rapide que la température de la partie active est élevée comme montre la figure 2.14.

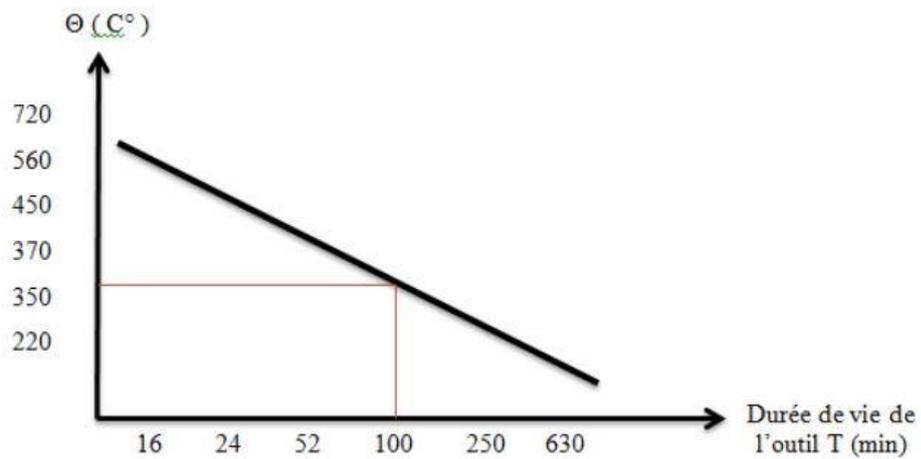


Figure 2.14-Température de coupe/durée de vie de l'outil [25]

2.4.2- Effet de la température sur la pièce

Contribue à la formation du copeau par la réduction des efforts de coupe mais:

- Risque de déformation (contraintes résiduelles dilatation - retrait).
- Difficulté de contrôle dimensionnel (écarts de température).
- Danger de la pression sur les appuis (dilatations).
- Mauvais état de surface (microsoudures et arrachement).

2.5- Conclusion

Les températures de coupe sont plus difficiles à mesurer avec précision que les forces de coupe. La force de coupe est un vecteur complètement caractérisé par trois composantes, tandis que la température est un champ scalaire, qui varie dans tout le système et qui ne peut être décrit de manière unique par des valeurs en quelques points. Pour cette raison, il n'existe pas d'analogie simple au dynamomètre de force de coupe pour mesurer les températures de coupe ; au lieu de cela, un certain nombre de techniques de mesure basées sur divers principes physiques ont été développées. Des méthodes particulières ne donnent généralement que des informations limitées sur la distribution complète de la température.

CHAPITRE 3 :

Optimisation des paramètres d'usinage

3.1- Introduction

La température de coupe est considérée comme le principal facteur des difficultés dans l'usinage dur (tournage dur, fraisage dur,...etc.), d'où la nécessité de mesurer la température à l'interface outil-pièce au cours du processus de tournage dur (*TD*). A cet égard, ce chapitre traite l'optimisation des conditions de coupe (vitesse de coupe V_c , vitesse d'avance f ,...etc.) afin de minimiser la température de coupe dans les deux cas étudiés (tournage dur à sec (*Tsec*) et à refroidissement haute pression (*Trhp*)). L'optimisation est effectuée selon deux méthodes sont :

- Optimisation mono-objective par la méthode de Taguchi.
- Optimisation multi-objectives par deux méthodes (analyse relationnelle grise (GRA) et fonction de désirabilité (DF)).

3.2- Partie expérimentale

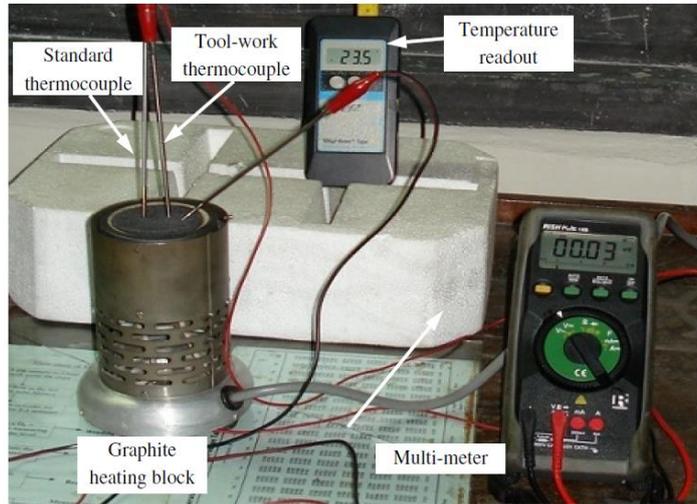
Les valeurs expérimentales utilisées dans l'étape de l'optimisation sont de l'article publié par le chercheur Mia et al. [27]. Dans ce travail, trois arbres en acier AISI 1060 (Longueur = 200 mm, Diamètre extérieur = 120 mm, Diamètre intérieur = 45 mm) ont été traités thermiquement pour atteindre trois valeurs de dureté (H), à savoir 40 HRC, 48 HRC et 56 HRC. Le traitement thermique est effectué dans un four à induction avec élément chauffant approprié. La température de trempe est 900 °C et le temps de maintien 90 minutes. Les températures à 375°C, 235°C et 150°C sont utilisées respectivement dans l'étape de revenu.

Un tour central motorisé de puissance 7,5 kW est utilisé pour effectuer les essais expérimentaux des opérations de tournage à sec (Dry turning) et à refroidissement haute pression (High pressure coolant HPC). L'huile de coupe a été fournie à une pression de 80 bars, à un débit de 6 l/min, à travers une buse externe de 0,5 mm de diamètre. Pour une meilleure pénétration et lubrification, le jet d'huile était dirigé le long de l'arête de coupe auxiliaire afin que l'huile puisse atteindre sous les copeaux qui s'enlèvent [28]. L'insert en carbure revêtu (avec TiCN, WC, Co) (spécification ISO-SNMM 120408) placé sur le support PSBNR 2525 M12 a été utilisé. La vitesse de coupe (V_c) et la vitesse d'avance (f) sont choisis dans l'intervalle de la pratique industrielle récente, comme 58, 81, 115 m/min et 0,10, 0,12, 0,14 mm/tr, respectivement. La profondeur de coupe a été maintenue constante 1,0 mm. Ces paramètres d'entrée sont orientées dans 27 essais expérimentaux pour la coupe à sec et le même nombre pour la coupe HPC. Le plan exploité est la conception factorielle complète (FFC)[27]. La vue photographique du montage expérimental est illustrée à la figure 3.1.

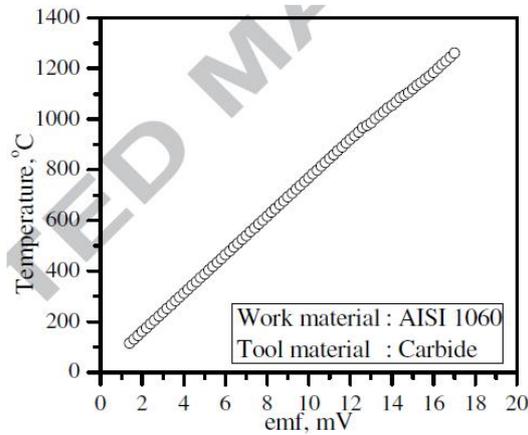


Figure 3.1- Vue sur l'étape expérimentale [27]

La température moyenne à l'interface outil-pièce a été mesurée à l'aide d'un thermocouple d'outillage sophistiqué [30]. La configuration et les équipements d'étalonnage du thermocouple sont illustrés à la figure 3.2 (a) [31]. Le copeau d'acier AISI 1060 (matériau usiné) et le matériau de carbure de tungstène (matériau d'outil) a été jointe pour créer les jonctions du thermocouple. Puisqu'il y a possibilité d'initiation de force électromotrice parasite (CEM), une extension de l'insert d'outil a été produite par la tige de carbure. Un bloc de graphite a été utilisé comme dissipateur thermique. La température d'une jonction a été mesurée en utilisant un thermocouple de type k qui a été considéré comme la température de référence. Dans le même temps, la force électromotrice (du thermocouple développé) a été mesurée à l'aide d'un multimètre numérique. Ensuite, une relation entre la température mesurée et la force électromotrice générée a été tracée, comme le montre la figure 3.2 (b), dans laquelle le coefficient de corrélation s'est avéré être 0,999. Enfin, la température de l'arête de coupe de l'outil a été mesurée en suivant les faits mentionnés précédemment. Les cycles d'usinage ont été effectués pendant un certain temps de sorte que la force électromotrice générée atteigne une valeur stable et seulement alors que cette force a été enregistrée [27]. Le diagramme schématique du circuit de mesure de la température est présenté à la figure 3.3.



(a) Configuration de l'étalonnage



(b) Relation de la température avec la FEM générée

Figure 3.2- Étalonnage du thermocouple d'outilage [27]

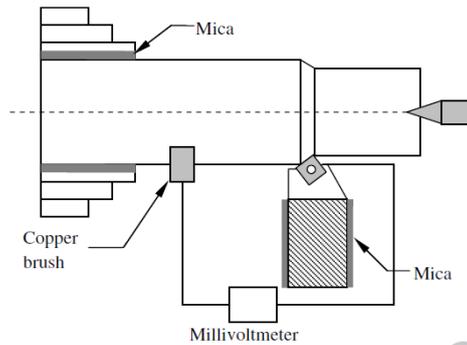


Figure 3.3- Circuit de thermocouple d'outilage pour la mesure de la température [27]

Le taux d'enlèvement matière en tournage dur est calculé par la relation suivante :

$$MRR = 1000 \times Vc \times f \times ap \quad (3.1)$$

Le tableau 3.1 montre le plan expérimental avec les températures de coupe mesurées et le taux d'enlèvement de matière (*MRR*).

Tableau 3.1- Valeurs expérimentales de la température de coupe (T_{sec} : température de tournage à sec, T_{rhp} : température de tournage à refroidissement haute pression) et le débit de matière enlevée (MRR)

| <i>Trail n°</i> | <i>A: Vc [m/min]</i> | <i>B: f [mm/tr]</i> | <i>C: H [HRC]</i> | <i>T_{sec} [°C]</i> | <i>T_{rhp} [°C]</i> | <i>MRR [Cm³/min]</i> |
|-----------------|----------------------|---------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 58 | 0.1 | 40 | 700 | 595 | 5800 |
| 2 | 58 | 0.1 | 48 | 735 | 635 | 5800 |
| 3 | 58 | 0.1 | 56 | 920 | 792 | 5800 |
| 4 | 58 | 0.12 | 40 | 726 | 632 | 6960 |
| 5 | 58 | 0.12 | 48 | 761 | 672 | 6960 |
| 6 | 58 | 0.12 | 56 | 958 | 835 | 6960 |
| 7 | 58 | 0.14 | 40 | 764 | 670 | 8120 |
| 8 | 58 | 0.14 | 48 | 799 | 710 | 8120 |
| 9 | 58 | 0.14 | 56 | 996 | 920 | 8120 |
| 10 | 81 | 0.1 | 40 | 750 | 645 | 8100 |
| 11 | 81 | 0.1 | 48 | 785 | 685 | 8100 |
| 12 | 81 | 0.1 | 56 | 976 | 875 | 8100 |
| 13 | 81 | 0.12 | 40 | 750 | 660 | 9720 |
| 14 | 81 | 0.12 | 48 | 785 | 700 | 9720 |
| 15 | 81 | 0.12 | 56 | 998 | 892 | 9720 |
| 16 | 81 | 0.14 | 40 | 805 | 708 | 11340 |
| 17 | 81 | 0.14 | 48 | 840 | 748 | 11340 |
| 18 | 81 | 0.14 | 56 | 1035 | 942 | 11340 |
| 19 | 115 | 0.1 | 40 | 809 | 725 | 11500 |
| 20 | 115 | 0.1 | 48 | 844 | 765 | 11500 |
| 21 | 115 | 0.1 | 56 | 1064 | 932 | 11500 |
| 22 | 115 | 0.12 | 40 | 833 | 746 | 13800 |
| 23 | 115 | 0.12 | 48 | 868 | 786 | 13800 |
| 24 | 115 | 0.12 | 56 | 1098 | 972 | 13800 |
| 25 | 115 | 0.14 | 40 | 854 | 770 | 16100 |
| 26 | 115 | 0.14 | 48 | 889 | 810 | 16100 |
| 27 | 115 | 0.14 | 56 | 1150 | 1045 | 16100 |

3.3- Logiciels utilisés

Les logiciels de statistique utilisés pour l'optimisation mono et multi-objectifs sont Minitab16 et Design Expert 11. La figure 3.4 représente une image de logiciel Minitab16 avec les données expérimentales et la figure 3.5 illustre le logiciel Design Expert11. Les deux logiciels permettent d'analyser les données expérimentales et de voir les différents paramètres de sortie afin de trouver les paramètres optimales (paramètres de réglage : vitesse de coupe V_c , vitesse d'avance f , profondeur de passe ap et la dureté du matériau usiné H).

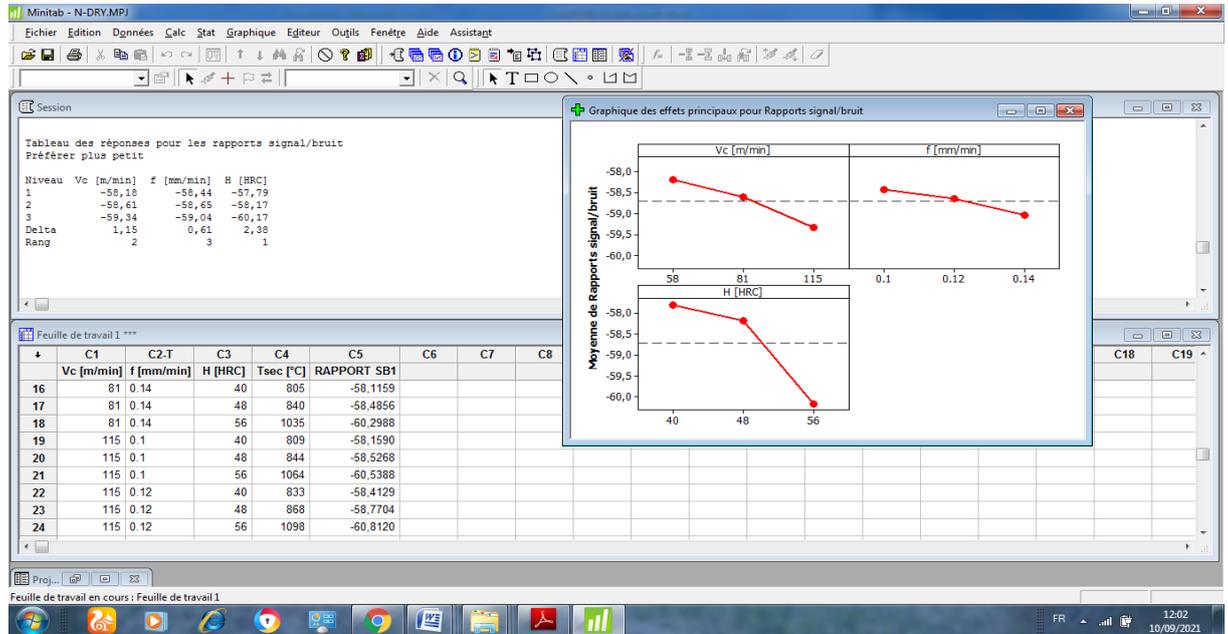


Figure 3.4- Image de logiciel Minitab16 et les donnés expérimentales

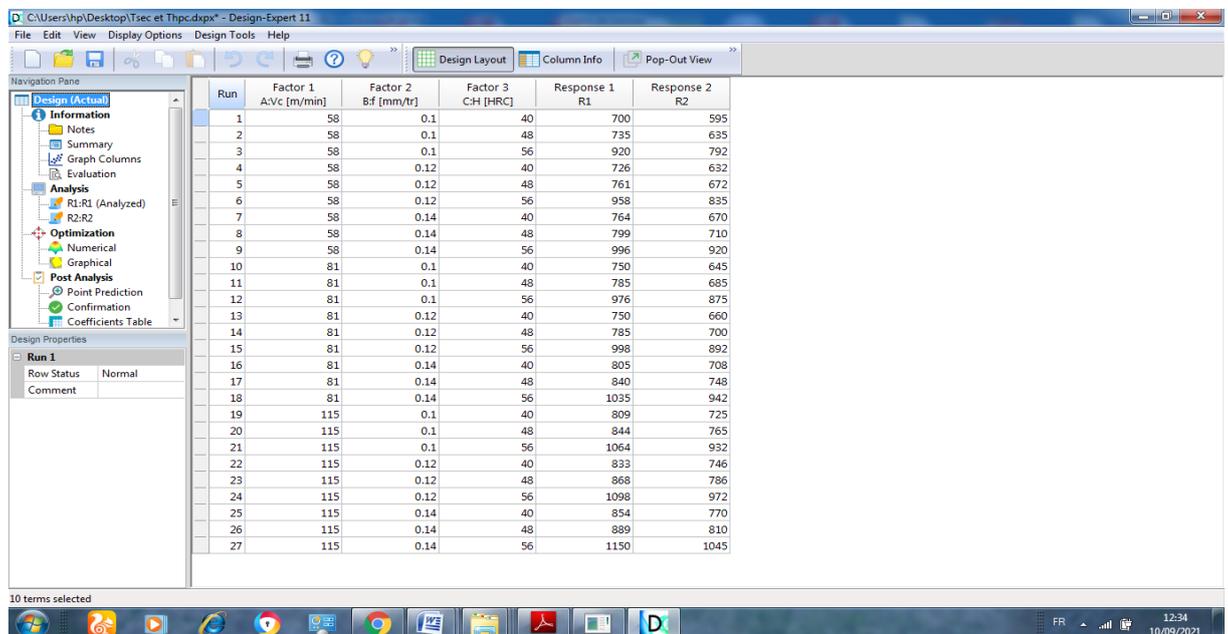


Figure 3.5- Image de logiciel Design Expert11 et les donnés expérimentales

3.3- Optimisation mono-objective

3.3.1- Optimisation mono-objective par la méthode de Taguchi

Dans cette étape d'optimisation mono-objective, la méthode de Taguchi est utilisée afin de calculer le rapport signal/bruit (S/N). Ce dernier optimise les paramètres d'entrée pour un seul objectif. Le rapport S/N est généralement calculé par trois équations suivantes [30]:
Nominal est le meilleur :

$$S/N = 10 * \log\left(\frac{\bar{y}}{s_y^2}\right) \quad (3.2)$$

Le plus petit est le meilleur :

$$S/N = -10 * \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right) \quad (3.3)$$

Le plus grand est le meilleur :

$$S/N = -10 * \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right) \quad (3.4)$$

L'objectif est de minimiser la température à l'interface outil-pièce. Donc, le rapport S/N de la température de coupe est calculé en utilisant l'équation (3.3) «Le plus petit est le meilleur (minimiser)». Les rapports signal/bruit S/N des résultats expérimentaux sont présentés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2-Rapports S/N des valeurs expérimentales de la température de coupe

| Trail n° | A: V_c | B: f | C: H | T_{sec} [°C] | S/N [dB] | $Trhp$ [°C] | S/N [dB] |
|----------|----------|--------|--------|----------------|----------|-------------|----------|
| 1 | 58 | 0.1 | 40 | 700 | -56,90 | 595 | -55,49 |
| 2 | 58 | 0.1 | 48 | 735 | -57,32 | 635 | -56,05 |
| 3 | 58 | 0.1 | 56 | 920 | -59,27 | 792 | -57,97 |
| 4 | 58 | 0.12 | 40 | 726 | -57,21 | 632 | -56,01 |
| 5 | 58 | 0.12 | 48 | 761 | -57,62 | 672 | -56,54 |
| 6 | 58 | 0.12 | 56 | 958 | -59,62 | 835 | -58,43 |
| 7 | 58 | 0.14 | 40 | 764 | -57,66 | 670 | -56,52 |
| 8 | 58 | 0.14 | 48 | 799 | -58,05 | 710 | -57,02 |
| 9 | 58 | 0.14 | 56 | 996 | -59,96 | 920 | -59,27 |
| 10 | 81 | 0.1 | 40 | 750 | -57,50 | 645 | -56,19 |
| 11 | 81 | 0.1 | 48 | 785 | -57,89 | 685 | -56,71 |
| 12 | 81 | 0.1 | 56 | 976 | -59,78 | 875 | -58,84 |
| 13 | 81 | 0.12 | 40 | 750 | -57,50 | 660 | -56,39 |
| 14 | 81 | 0.12 | 48 | 785 | -57,89 | 700 | -56,90 |
| 15 | 81 | 0.12 | 56 | 998 | -59,98 | 892 | -59,00 |
| 16 | 81 | 0.14 | 40 | 805 | -58,11 | 708 | -57,00 |
| 17 | 81 | 0.14 | 48 | 840 | -58,48 | 748 | -57,47 |
| 18 | 81 | 0.14 | 56 | 1035 | -60,29 | 942 | -59,48 |
| 19 | 115 | 0.1 | 40 | 809 | -58,15 | 725 | -57,20 |
| 20 | 115 | 0.1 | 48 | 844 | -58,52 | 765 | -57,67 |
| 21 | 115 | 0.1 | 56 | 1064 | -60,53 | 932 | -59,38 |
| 22 | 115 | 0.12 | 40 | 833 | -58,41 | 746 | -57,45 |
| 23 | 115 | 0.12 | 48 | 868 | -58,77 | 786 | -57,90 |
| 24 | 115 | 0.12 | 56 | 1098 | -60,81 | 972 | -59,75 |
| 25 | 115 | 0.14 | 40 | 854 | -58,62 | 770 | -57,72 |
| 26 | 115 | 0.14 | 48 | 889 | -58,97 | 810 | -58,16 |
| 27 | 115 | 0.14 | 56 | 1150 | -61,21 | 1045 | -60,38 |

Le tableau 3.2 montre que les faibles températures de coupe dont leurs valeurs de rapport S/N sont : - 56,90 (dB) pour la température de coupe en tournage dur à sec (T_{sec} : réseau orthogonal 11 1). Dans ce cas, les conditions de coupe sont : $V_c = 58$ m/min, $f = 0,10$

mm/tr et la dureté $H = 40$ HRC. Dans le deuxième cas (tournage dur à refroidissement haute pression $Trhp$), la faible température dont leurs valeurs de rapport S/N sont : -55,49 (dB), ($Trhp$ réseau orthogonal 1 11).

Par la conception de Taguchi, le tableau 3.3 illustre les niveaux optimaux des conditions de coupe (V_c , f et H) pour les valeurs optimales de la température de coupe.

Tableau 3.3- Table de réponse S/N pour (a) température de coupe à sec, (b) température de coupe avec refroidissement haute pression

| Niveau | A : V_c [m/min] | B : f [mm/tr] | C : a_p [mm] |
|------------|-------------------|-----------------|----------------|
| (a) | | | |
| 1 | - 58,18 | - 58,44 | - 57,79 |
| 2 | - 58,61 | - 58,65 | - 58,17 |
| 3 | - 59,34 | - 59,04 | - 60,17 |
| Delta | 1,15 | 0,61 | 2,38 |
| Rank | 2 | 3 | 1 |
| (b) | | | |
| 1 | - 57,04 | - 57,28 | - 56,67 |
| 2 | - 57,56 | - 57,60 | - 57,16 |
| 3 | -58,41 | -58,12 | -59,17 |
| Delta | 1,37 | 0,84 | 2,50 |
| Rank | 2 | 3 | 1 |

Les valeurs de tableau 3.3 sont représentées sous formes graphiques dans les deux figures 3.6 et 3.7. À partir de ces graphiques et les deux tableaux (3.2 et 3.3), les conditions de coupe optimales sont facilement déterminées pour minimiser la température de coupe de tournage dur à sec et de tournage dur à refroidissement haute pression. Les meilleurs niveaux correspondent à des valeurs plus élevées de rapport S/N des deux cas ($Tsec$ et $Trhp$). Alors, les niveaux et les rapports S/N des trois facteurs (A : V_c , B : f et C : H) donnant les meilleures valeurs de température sont : pour $Tsec$ (facteur V_c (niveau 1, S/N = - 58,18), facteur f (niveau 1, S/N = - 58,44) et facteur H (niveau 1, S/N = - 57,79)), et pour $Trhp$ (facteur V_c (niveau 1, S/N = - 57,04), facteur f (niveau 1, S/N = - 57,28) et facteur H (niveau 1, S/N = - 56,67)).

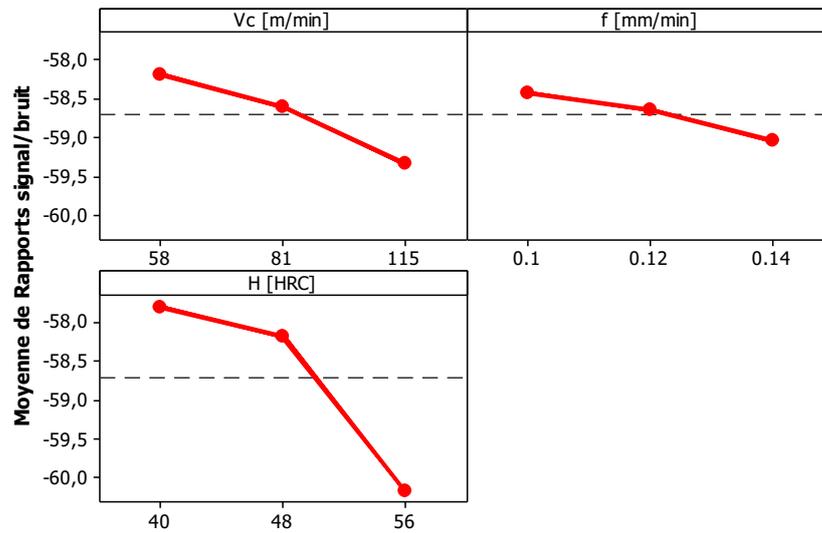


Figure 3.6- Effet des conditions de coupe sur le rapport S/N de la température sans refroidissement

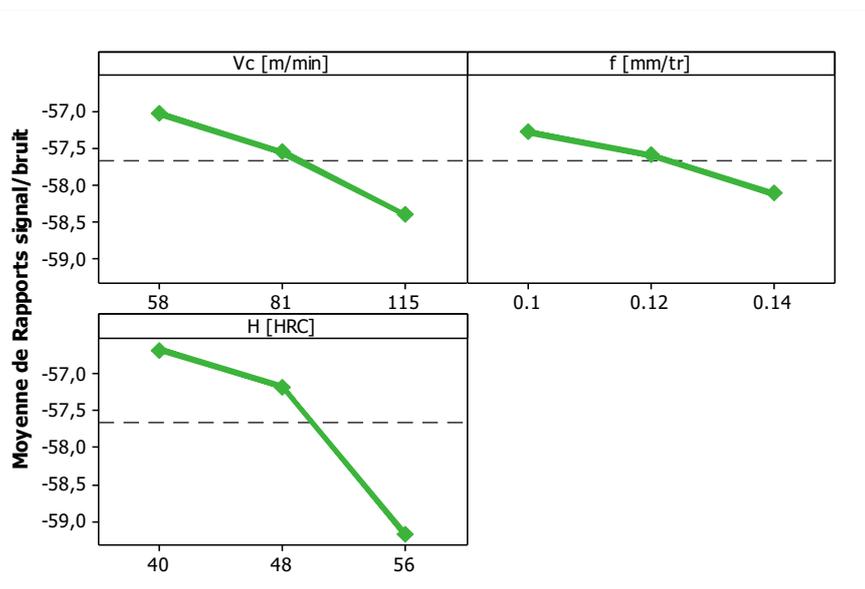


Figure 3.7- Effet des conditions de coupe sur le rapport S/N de la température avec refroidissement haute pression

3.4- Optimisation multi-objective

3.4.1- Optimisation multi-objective par la méthode GRA

L'analyse relationnelle grise est l'une des techniques d'optimisation multi-objective la plus largement utilisée par les chercheurs et les fabricants. GRA a été développé afin de donner une solution précise de la situation groupée des objectifs différents. Donc, le but de cette technique est de déterminer la combinaison optimale des paramètres de tournage dur qui nous permet de minimiser les deux paramètres de la température de coupe (T_{sec} et $Trhp$) et maximiser le taux d'enlèvement de matière (MRR), simultanément. Le MRR représente la productivité dans notre cas.

Cette méthode de l'optimisation s'effectue en trois étapes principales à savoir :

a) La normalisation

Afin de rendre la température (T_{sec} et $Trhp$) en même grandeur dans l'intervalle de normalisation $[0, 1]$, les données expérimentales sont analysés selon le but d'optimisation (minimiser ou maximiser). Dans ce cas, la valeur idéale est égale 1.

- Pour la minimisation du critère, c'est le cas de la température, alors la séquence originale est normalisée comme suit :

$$x_i(k) = \frac{\max(x_i^0(k)) - x_i^0(k)}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (3.5)$$

- Pour la maximisation du critère, c'est le cas de débit du copeau enlevé (MRR), alors la séquence originale est normalisée comme suit :

$$x_i(k) = \frac{x_i^0(k) - \min(x_i^0(k))}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (3.6)$$

Où :

- $x_i(k)$: la valeur normalisée de la séquence,
- $\max(x_i^0(k))$: la plus grande valeur de $x_i^0(k)$ de la $k^{ième}$ réponse,
- $\min(x_i^0(k))$: la plus petite valeur de $x_i^0(k)$ de la $k^{ième}$ réponse.

Les données traitées par la normalisation sont données dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4- Résultats expérimentale normalisé ($x_i(k)$)

| N° Essai. (i) | T_{sec} | $Trhp$ | MRR |
|----------------------------|-----------|--------|-------|
| Valeur idéale | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 1 | 1 | 1 | 0 |
| 2 | 0,92 | 0,91 | 0 |
| 3 | 0,51 | 0,56 | 0 |
| 4 | 0,94 | 0,92 | 0,11 |
| 5 | 0,86 | 0,83 | 0,11 |
| 6 | 0,52 | 0,46 | 0,11 |
| 7 | 0,86 | 0,83 | 0,22 |
| 8 | 0,78 | 0,74 | 0,22 |
| 9 | 0,34 | 0,27 | 0,22 |
| 10 | 0,89 | 0,88 | 0,22 |
| 11 | 0,81 | 0,80 | 0,22 |
| 12 | 0,39 | 0,37 | 0,22 |
| 13 | 0,88 | 0,85 | 0,38 |

| | | | |
|----|------|------|------|
| 14 | 0,81 | 0,76 | 0,38 |
| 15 | 0,34 | 0,34 | 0,38 |
| 16 | 0,76 | 0,75 | 0,54 |
| 17 | 0,68 | 0,66 | 0,54 |
| 18 | 0,25 | 0,29 | 0,54 |
| 19 | 0,76 | 0,71 | 0,55 |
| 20 | 0,68 | 0,62 | 0,55 |
| 21 | 0,19 | 0,25 | 0,55 |
| 22 | 0,70 | 0,66 | 0,78 |
| 23 | 0,63 | 0,57 | 0,78 |
| 24 | 0,11 | 0,16 | 0,78 |
| 25 | 0,66 | 0,61 | 1 |
| 26 | 0,58 | 0,52 | 1 |
| 27 | 0 | 0 | 1 |

b) Calcul des coefficients du Relationnel Gris :

Les coefficients du Relationnel Gris (Grey Relational) ($\eta_i(k)$) peuvent être calculés par :

$$\eta_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \omega\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \omega\Delta_{\max}}; \quad 0 < \eta_i(k) \leq 1 \quad (3.7)$$

Où :

- $\Delta_{0i}(k)$: la différence en valeur absolue entre $x_0^k(k)$ et $x_i^k(k)$,
- Δ_{\min} : la plus petite valeur de $\Delta_{0i}(k)$,
- Δ_{\max} : la plus grande valeur de $\Delta_{0i}(k)$, coefficient de distinction et sa valeur est comprise entre 0 à 1.

$$\Delta_{0i}(k) = \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (3.8)$$

$$\Delta_{\min} = \min_{\forall j \in i} \min_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (3.9)$$

$$\Delta_{\max} = \max_{\forall j \in i} \max_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (3.10)$$

La valeur de ω est en générale égale à (0,5).

La valeur du coefficient η a été prise (0,5). Les valeurs des coefficients "Gris Rationnelle Coefficients" est présentés dans le tableau 3.5.

Tableau 3.5- Coefficients du GR ($\eta_i(k)$)

| <i>N° Essai. (i)</i> | <i>Tsec</i> | <i>Trhp</i> | <i>MRR</i> |
|----------------------|-------------|-------------|------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 0,86 | 0,85 | 1 |
| 3 | 0,50 | 0,53 | 1 |
| 4 | 0,89 | 0,86 | 0,82 |

| | | | |
|----|------|------|------|
| 5 | 0,79 | 0,74 | 0,82 |
| 6 | 0,46 | 0,48 | 0,82 |
| 7 | 0,78 | 0,75 | 0,69 |
| 8 | 0,69 | 0,66 | 0,69 |
| 9 | 0,43 | 0,41 | 0,69 |
| 10 | 0,81 | 0,82 | 0,69 |
| 11 | 0,72 | 0,71 | 0,69 |
| 12 | 0,45 | 0,44 | 0,69 |
| 13 | 0,81 | 0,77 | 0,57 |
| 14 | 0,72 | 0,68 | 0,57 |
| 15 | 0,43 | 0,43 | 0,57 |
| 16 | 0,75 | 0,66 | 0,48 |
| 17 | 0,62 | 0,59 | 0,48 |
| 18 | 0,40 | 0,39 | 0,48 |
| 19 | 0,67 | 0,63 | 0,47 |
| 20 | 0,61 | 0,57 | 0,47 |
| 21 | 0,38 | 0,40 | 0,47 |
| 22 | 0,63 | 0,60 | 0,39 |
| 23 | 0,57 | 0,54 | 0,39 |
| 24 | 0,36 | 0,37 | 0,39 |
| 25 | 0,59 | 0,56 | 0,33 |
| 26 | 0,54 | 0,51 | 0,33 |
| 27 | 0,33 | 0,33 | 0,33 |

c) Calcul du GRG (Grey relational grade) :

Après avoir calculé la moyenne des coefficients du relationnel gris (Grey Relational Coefficients), les α_i (Grey Relational Grade) peuvent être obtenu comme suit :

$$\alpha_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \eta_i(k) \quad (3.11)$$

Où : n est le nombre des caractéristiques de performance (dans notre cas $n = 2$).

La plus grande valeur de grade relationnel gris (Grey Relational Grade) est considérée comme la relation la plus forte entre la séquence idéale ($x_0(k)$) et la séquence donnée ($x_i(k)$). La séquence idéale ($x_0(k)$) est la meilleure réponse dans le processus expérimental. Ainsi, le Grade Relationnel (Relational Grade) supérieur correspond à la combinaison des paramètres la plus proche de l'optimale. Selon le tableau 3.6 et la figure 3.8, la combinaison des paramètres de coupe de l'expérience 1 a eu la qualité grise (GRG) la plus

élevée et ceci signifie que cette expérience présente la combinaison des paramètres optimaux qui donne une (T_{sec} et $Trhp$) minimale, et un MRR maximum.

Tableau 3.6- Niveau relationnel gris et son ordre (Grey relational grade (GRG))

| <i>N° Essai. (i)</i> | <i>Tsec et MRR</i> | | <i>Trhp et MRR</i> | |
|----------------------|------------------------------------|--------------|------------------------------------|--------------|
| | <i>GRG (α_i)</i> | <i>Ordre</i> | <i>GRG (α_i)</i> | <i>Ordre</i> |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 0,93 | 2 | 0,92 | 2 |
| 3 | 0,75 | 5 | 0,76 | 5 |
| 4 | 0,85 | 3 | 0,84 | 3 |
| 5 | 0,80 | 4 | 0,78 | 4 |
| 6 | 0,64 | 10 | 0,65 | 11 |
| 7 | 0,73 | 6 | 0,72 | 7 |
| 8 | 0,69 | 9 | 0,67 | 9 |
| 9 | 0,56 | 16 | 0,55 | 16 |
| 10 | 0,69 | 10 | 0,75 | 6 |
| 11 | 0,70 | 7 | 0,70 | 8 |
| 12 | 0,57 | 14 | 0,56 | 15 |
| 13 | 0,69 | 11 | 0,67 | 10 |
| 14 | 0,64 | 12 | 0,62 | 12 |
| 15 | 0,50 | 20 | 0,50 | 19 |
| 16 | 0,61 | 13 | 0,57 | 13 |
| 17 | 0,55 | 17 | 0,57 | 14 |
| 18 | 0,44 | 23 | 0,43 | 23 |
| 19 | 0,57 | 15 | 0,55 | 17 |
| 20 | 0,54 | 18 | 0,52 | 18 |
| 21 | 0,42 | 25 | 0,43 | 24 |
| 22 | 0,51 | 19 | 0,49 | 20 |
| 23 | 0,48 | 21 | 0,46 | 21 |
| 24 | 0,37 | 26 | 0,38 | 26 |
| 25 | 0,46 | 22 | 0,44 | 22 |
| 26 | 0,43 | 24 | 0,42 | 25 |
| 27 | 0,33 | 27 | 0,33 | 27 |

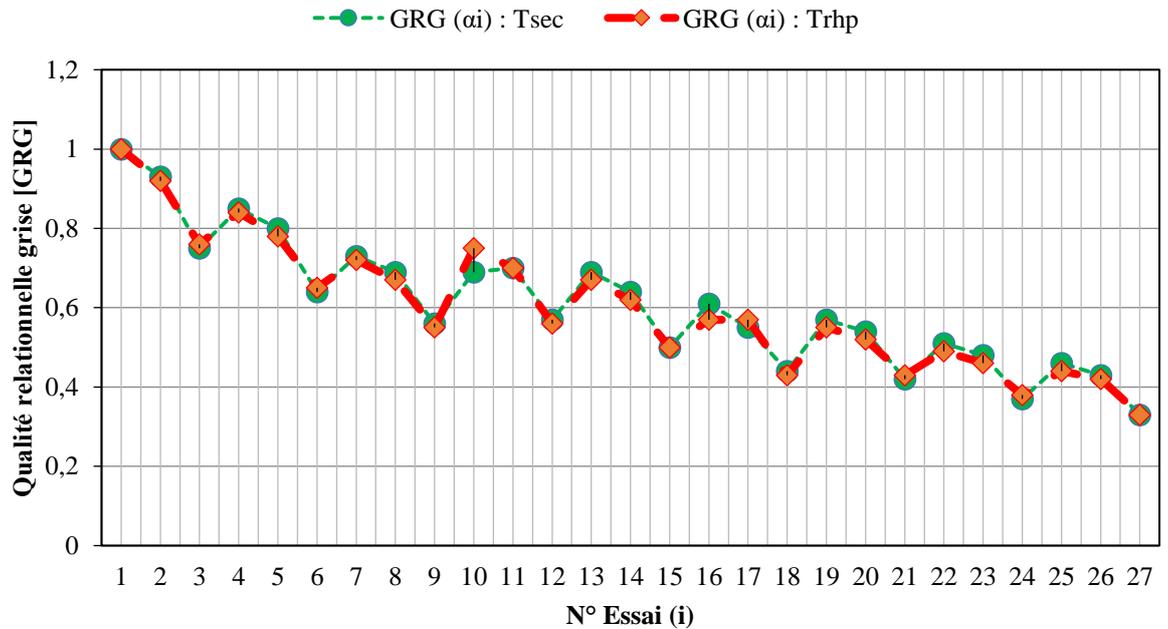


Figure 3.8- Qualité Relationnelle Grise (GRG)

3.4.2- Optimisation multi-objective par la méthode MSR

Le but essentiel de l'optimisation numérique est de trouver les valeurs optimales des conditions d'usinage dur afin de produire la plus faible valeur des deux cas de température (T_{sec} et $Trhp$) et la plus grande valeur du taux d'enlèvement de matière (MRR). La fonction de désirabilité (FD) est utilisée afin d'optimiser les paramètres de sorties. Le but des conditions de coupe et les paramètres de réponses, ainsi que leurs limites inférieures et supérieures sont illustrés dans le tableau 3.7.

Tableau 3.7- Conditions de l'optimisation des paramètres de tournage dur

| Conditions | But | Limite | |
|---------------------------------|-----------|------------|------------|
| | | inférieure | supérieure |
| Vitesse de coupe, V_c [m/min] | In range | 58 | 115 |
| Vitesse de coupe, f [mm/rev] | In range | 0,10 | 0,14 |
| Dureté de matériau, H [°C] | In range | 40 | 56 |
| T_{sec} [°C] | Minimiser | 700 | 1150 |
| $Trhp$ [°C] | Minimiser | 595 | 1045 |
| MRR [Cm ³ /min] | Maximiser | 5800 | 16100 |

3.4.2.1- Optimisation des conditions de coupe pour T_{sec}

L'objectif choisi dans ce premier cas est la température de coupe de tournage à sec (T_{sec}) sans prendre par considération les autres paramètres de sortie ($Trhp$ et MRR). Le tableau 3.8 représente les résultats de l'optimisation de température de coupe à sec par la méthodologie de surface de réponse (MSR). La figure 3.9 montre le graphique de contour de

désirabilité (100 %) pour le premier critère d'évaluation. La figure 3.10 représente le graphique des barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et de la réponse (T_{sec}), ainsi que la désirabilité combinée $DF = 1,000$. La figure 3.11 illustre les résultats de graphique de l'optimisation de T_{sec} . Les conditions de coupe optimales sont : $V_c = 58.71$ m/min, $f = 0.11$ mm/tr et $H = 40.22$ HRC. La température de coupe pour ces conditions égale à 697.34 °C.

Tableau 3.8- Optimisation de la réponse pour T_{sec}

| Solution n° | V_c [m/min] | f [mm/rev] | H [HRC] | T_{sec} [°C] | Désirabilité | Remarques |
|-------------|---------------|--------------|---------------|----------------|--------------|------------------|
| 1 | 58.715 | 0.113 | 40.227 | 697.347 | 1,000 | Sélection |
| 2 | 67.647 | 0.102 | 40.144 | 696.763 | 1,000 | |
| 3 | 60.261 | 0.103 | 40.552 | 691.132 | 1,000 | |
| 4 | 58.000 | 0.100 | 40.000 | 675.585 | 1,000 | |
| 5 | 62.282 | 0.105 | 40.355 | 694.095 | 1,000 | |
| 6 | 61.146 | 0.101 | 40.540 | 689.399 | 1,000 | |
| 7 | 59.328 | 0.107 | 40.795 | 698.476 | 1,000 | |
| 8 | 60.683 | 0.103 | 41.068 | 698.637 | 1,000 | |
| 9 | 69.830 | 0.100 | 40.119 | 698.020 | 1,000 | |
| 10 | 63.435 | 0.104 | 40.093 | 692.411 | 1,000 | |

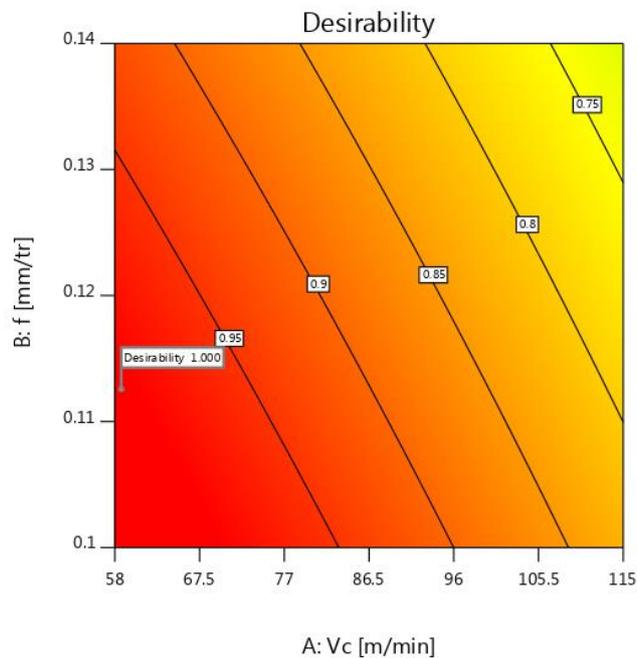


Figure 3.9- Graphique de contour de désirabilité pour T_{sec}

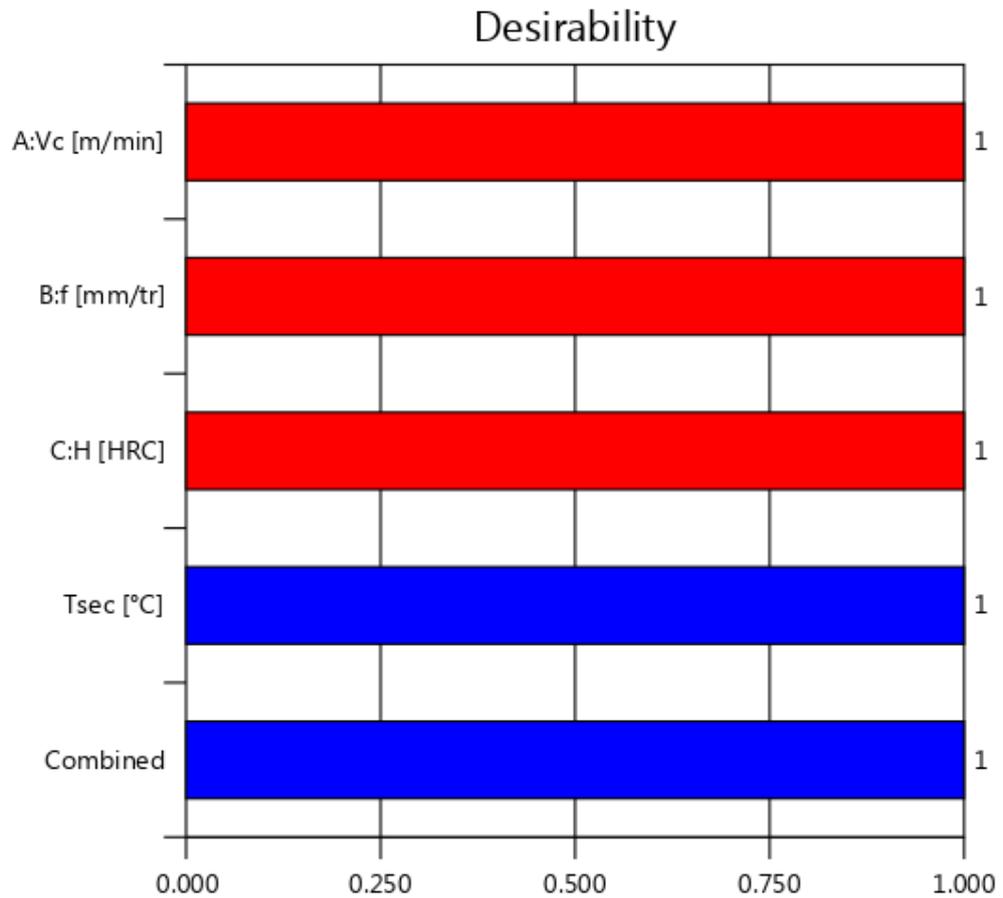


Figure 3.10- Barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et de paramètre (T_{sec}), ainsi que les désirabilités combinés = 1

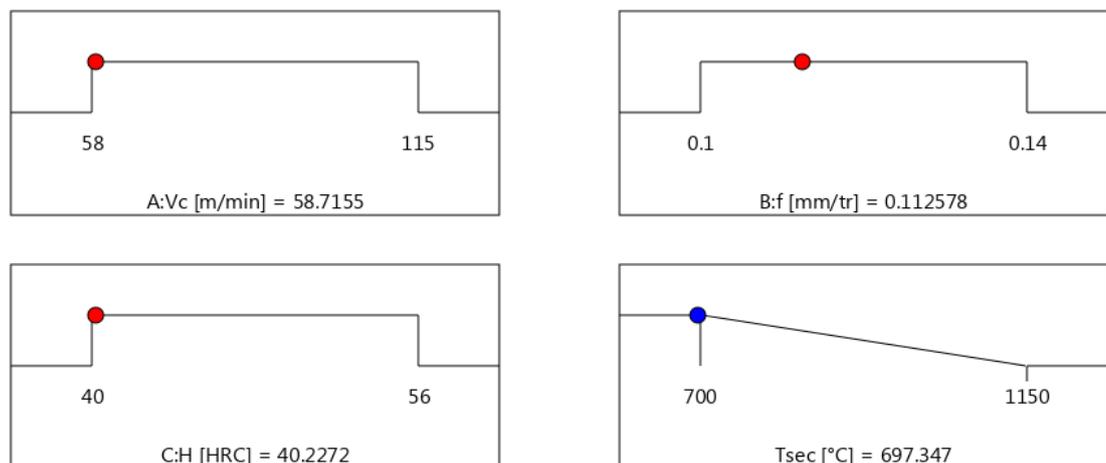


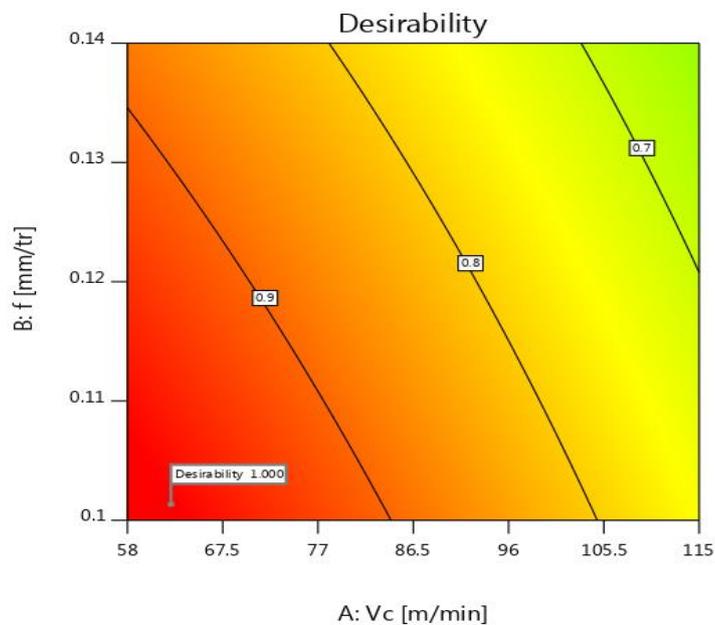
Figure 3.11- Graphique de la fonction de désirabilité de T_{sec} [DF = 1]

3.4.2.2- Optimisation des conditions de coupe pour $Trhp$

L'objectif choisi dans ce deuxième cas est la température de coupe de tournage dur avec refroidissement haute pression ($Trhp$) sans prendre par considération les autres paramètres de sortie (T_{sec} et MRR). Le tableau 3.9 montre la réponse de température de coupe $Trhp$. D'après la figure 3.12 représente le graphique de contour de désirabilité (100 %) pour le deuxième critère d'évaluation.

Tableau 3.9-Optimisation de la réponse pour $Trhp$

| Solution n° | V_c [m/min] | f [mm/rev] | H [HRC] | $Trhp$ [°C] | Désirabilité | Remarques |
|-------------|---------------|--------------|---------------|----------------|--------------|------------------|
| 1 | 62.344 | 0.101 | 40.706 | 594.215 | 1,000 | Sélection |
| 2 | 59.075 | 0.100 | 40.211 | 579.420 | 1,000 | |
| 3 | 64.668 | 0.102 | 40.148 | 593.809 | 1,000 | |
| 4 | 58.101 | 0.100 | 41.680 | 594.976 | 1,000 | |
| 5 | 58.080 | 0.105 | 40.888 | 593.393 | 1,000 | |
| 6 | 58.478 | 0.110 | 40.156 | 592.205 | 1,000 | |
| 7 | 59.204 | 0.111 | 40.038 | 594.276 | 1,000 | |
| 8 | 60.816 | 0.104 | 40.131 | 588.413 | 1,000 | |
| 9 | 64.679 | 0.104 | 40.038 | 594.911 | 1,000 | |
| 10 | 59.524 | 0.110 | 40.084 | 593.769 | 1,000 | |

**Figure 3.12- Graphique de contour de désirabilité pour $Trhp$**

La figure 3.13 représente le graphique des barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et de la température de coupe à refroidissement haute pression ($Trhp$), ainsi que la désirabilité combinée $DF = 1,000$. La figure 3.14 illustre les résultats de graphique de l'optimisation de $Trhp$. Donc, les paramètres de coupe optimaux s'avèrent: $V_c = 62.34$ m/min, $f = 0,10$ mm/tr et $H = 40.7$ HRC. La température de coupe avec refroidissement haute pression est $Trhp = 594.21$ °C.

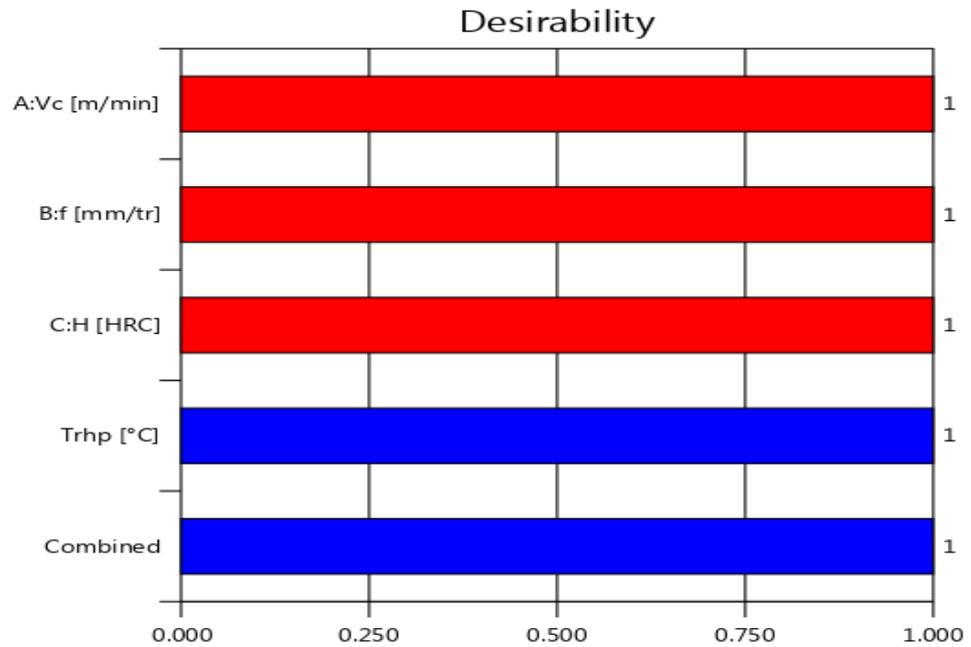


Figure 3.13- Barres analogues des désirabilités des conditions de coupe et de température $Trhp$, ainsi que les désirabilités combinés = 1

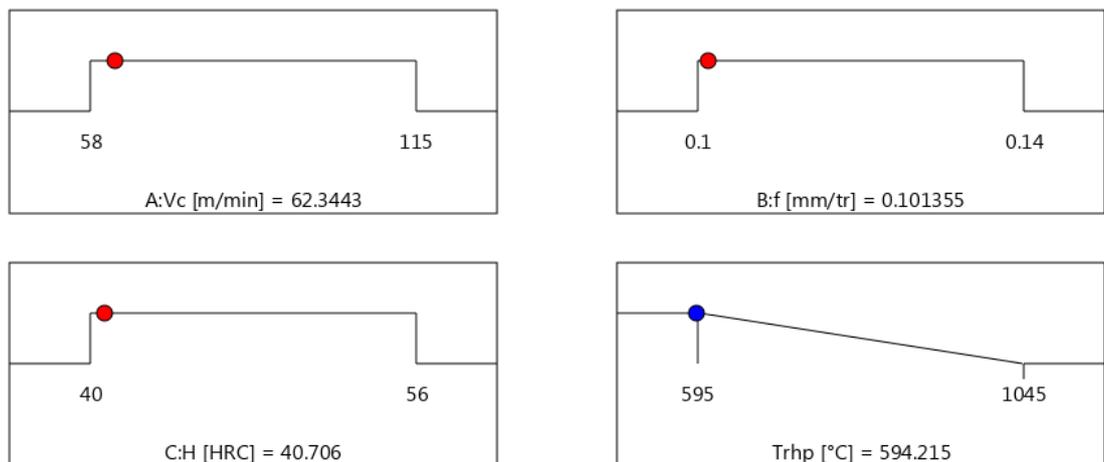


Figure 3.14- Graphique de la fonction de désirabilité de $Trhp$ [DF = 1]

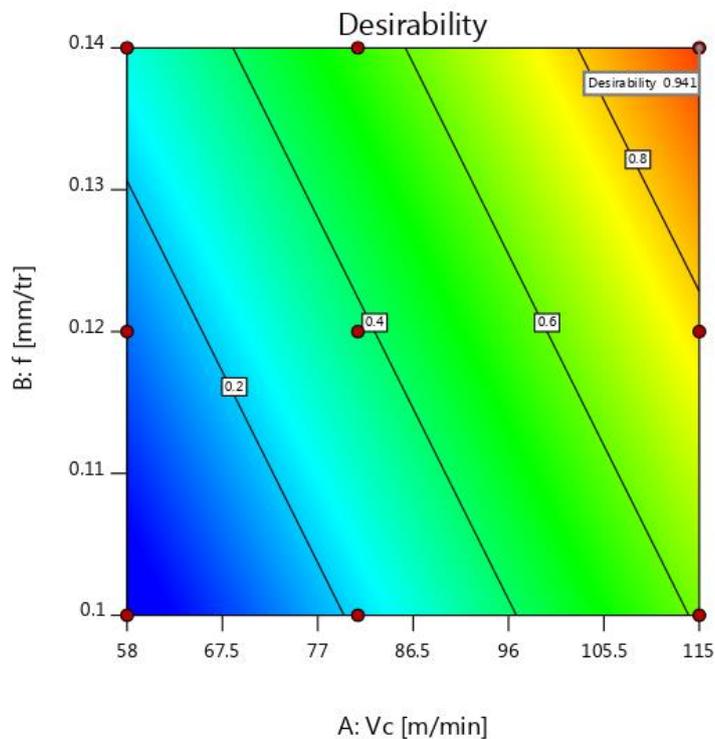
3.4.2.3- Optimisation des conditions de coupe pour MRR

L'objectif choisi dans ce troisième cas est le taux d'enlèvement de matière de tournage dur (MRR) sans prendre par considération les autres paramètres de sortie ($Tsec$ et $Trhp$).

Le tableau 3.10 résume les résultats de l'optimisation du taux de matière enlevée. La figure 3.15 illustre le graphique de contour de désirabilité (100 %) pour le troisième critère d'évaluation.

Tableau 3.10- Optimisation de la réponse pour MRR

| Solution n° | V_c [m/min] | f [mm/rev] | H [HRC] | MRR [°C] | Désirabilité | Remarques |
|-------------|---------------|--------------|-----------|------------|--------------|------------------|
| 1 | 115.000 | 0.140 | 56.000 | 15493.33 | 0.941 | Sélection |
| 2 | 115.000 | 0.140 | 48.000 | 15493.33 | 0.941 | |
| 3 | 115.000 | 0.140 | 40.000 | 15493.33 | 0.941 | |
| 4 | 115.000 | 0.140 | 41.029 | 15493.33 | 0.941 | |
| 5 | 115.000 | 0.140 | 54.230 | 15493.33 | 0.941 | |
| 6 | 115.000 | 0.140 | 55.675 | 15493.33 | 0.941 | |
| 7 | 115.000 | 0.140 | 55.831 | 15493.33 | 0.941 | |
| 8 | 115.000 | 0.140 | 43.694 | 15493.33 | 0.941 | |
| 9 | 115.000 | 0.140 | 45.614 | 15493.33 | 0.941 | |
| 10 | 115.000 | 0.140 | 40.347 | 15493.32 | 0.941 | |

**Figure 3.15- Graphique de contour de désirabilité pour MRR**

La figure 3.16 représente le graphique des barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et de la réponse (MRR), ainsi que la désirabilité combinée $DF = 0.941$. La figure 3.17 illustre les résultats de graphique de l'optimisation de MRR . Donc, les paramètres de coupe optimaux s'avèrent: $V_c = 115$ m/min, $f = 0,14$ mm/tr et $H = 56$ HRC. Le débit de matière enlevée est $MRR = 15493,33$ cm³/min.

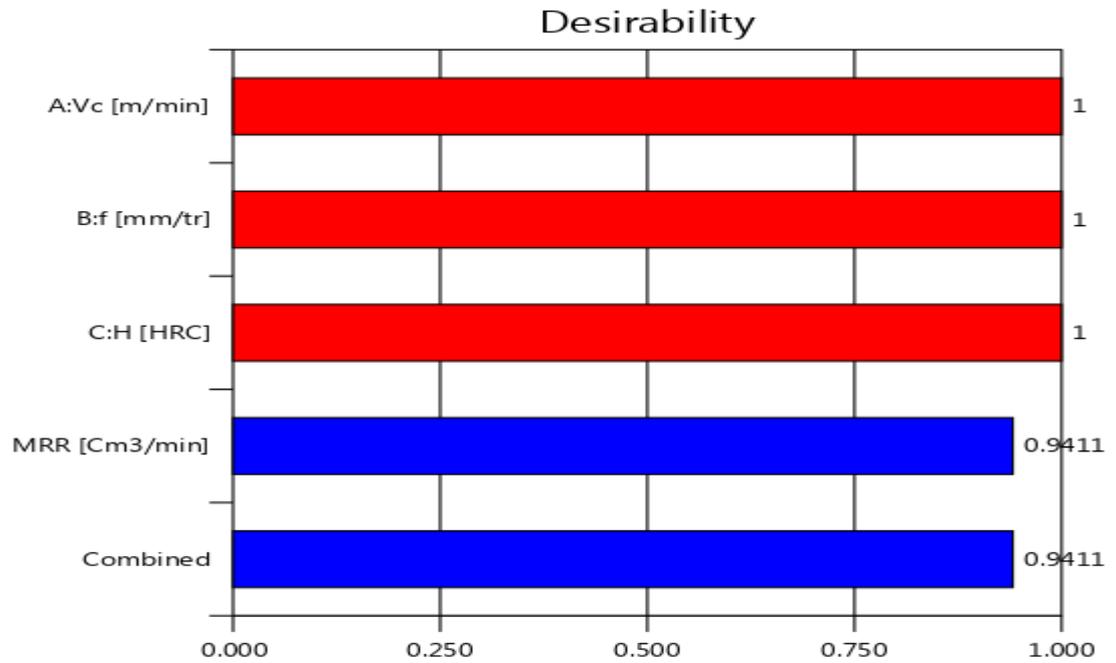


Figure 3.16- Barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et de paramètre *MRR*, ainsi que les désirabilités combinés = 0.941

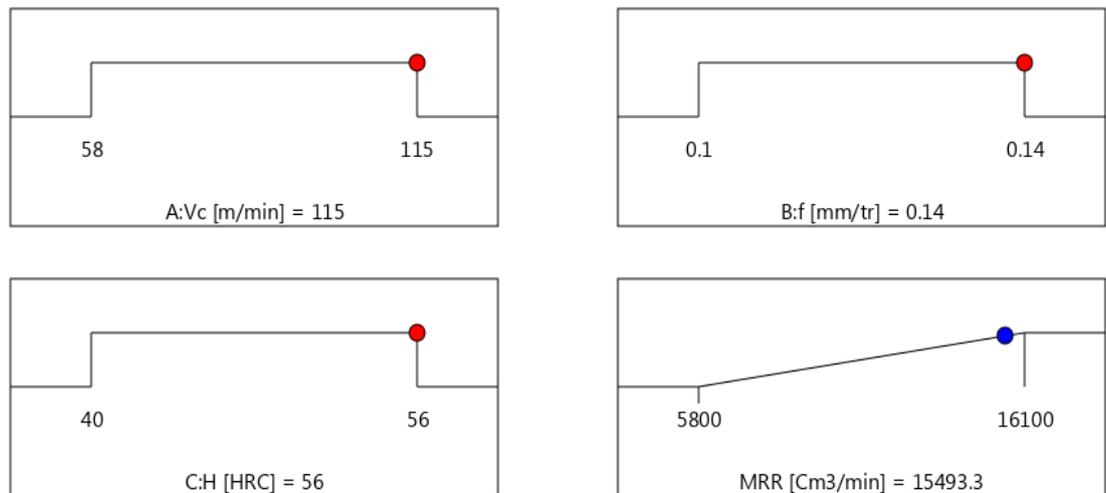


Figure 3.17- Graphique de la fonction de désirabilité de *MRR* [DF = 0.941]

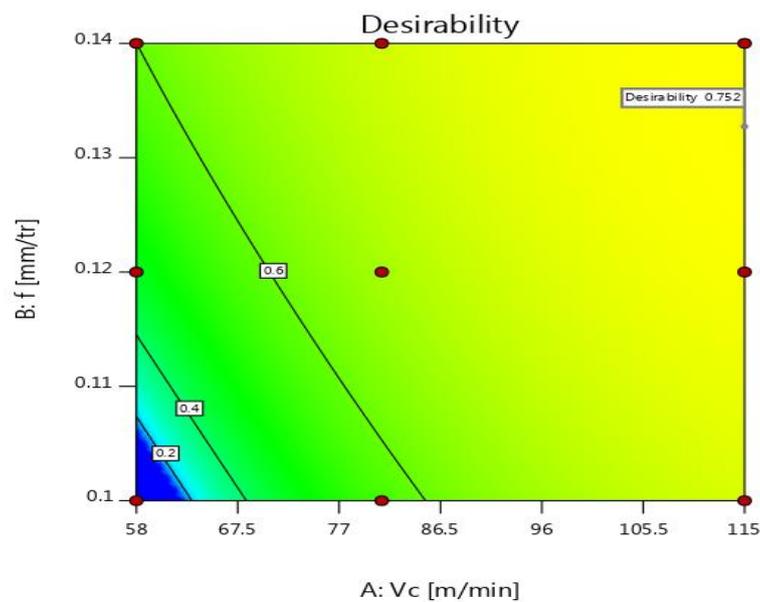
3.4.2.4- Optimisation combinée des conditions de coupe pour *Tsec*, *Trhp* et *MRR*

L'objectif est de faire l'optimisation combinée de trois paramètres de sortie, à savoir : température de coupe à sec *Tsec*, température de coupe avec refroidissement haute pression *Trhp* et le taux d'enlèvement de matière *MRR*.

Le tableau 3.11 résume les résultats de l'optimisation de trois paramètres de sortie. La figure 3.18 montre le graphique de contour de désirabilité (100 %) pour les trois critères d'évaluation.

Tableau 3.11- Optimisation de la réponse pour T_{sec} , $Trhp$ et MRR

| S n°. | V_c [m/min] | f [mm/rev] | H [HRC] | T_{sec} [°C] | $Trhp$ [°C] | MRR [cm ³ /min] | DF | Remarques |
|----------|----------------|--------------|---------------|----------------|----------------|----------------------------|--------------|------------------|
| 1 | 115.000 | 0.133 | 40.000 | 813.057 | 755.425 | 14878.041 | 0.752 | Sélection |
| 2 | 114.998 | 0.133 | 40.000 | 812.850 | 755.129 | 14863.178 | 0.752 | |
| 3 | 114.998 | 0.133 | 40.000 | 812.919 | 755.226 | 14868.078 | 0.752 | |
| 4 | 114.997 | 0.133 | 40.000 | 813.220 | 755.661 | 14889.791 | 0.752 | |
| 5 | 114.998 | 0.133 | 40.000 | 813.381 | 755.895 | 14901.407 | 0.752 | |
| 6 | 114.995 | 0.132 | 40.000 | 812.614 | 754.791 | 14846.138 | 0.752 | |
| 7 | 114.998 | 0.132 | 40.000 | 812.543 | 754.691 | 14841.066 | 0.752 | |
| 8 | 114.998 | 0.133 | 40.000 | 813.623 | 756.246 | 14918.767 | 0.752 | |
| 9 | 114.998 | 0.133 | 40.000 | 813.775 | 756.467 | 14929.666 | 0.752 | |
| 10 | 114.997 | 0.132 | 40.000 | 812.156 | 754.143 | 14813.184 | 0.752 | |

**Figure 3.18- Graphique de contour de désirabilité pour T_{sec} , $Trhp$ et MRR**

La figure 3.19 illustre le graphique des barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et des réponses, ainsi que la désirabilité combinée $DF = 0.752$. La figure 3.20 illustre les résultats de graphique de l'optimisation de tous les paramètres de sortie.

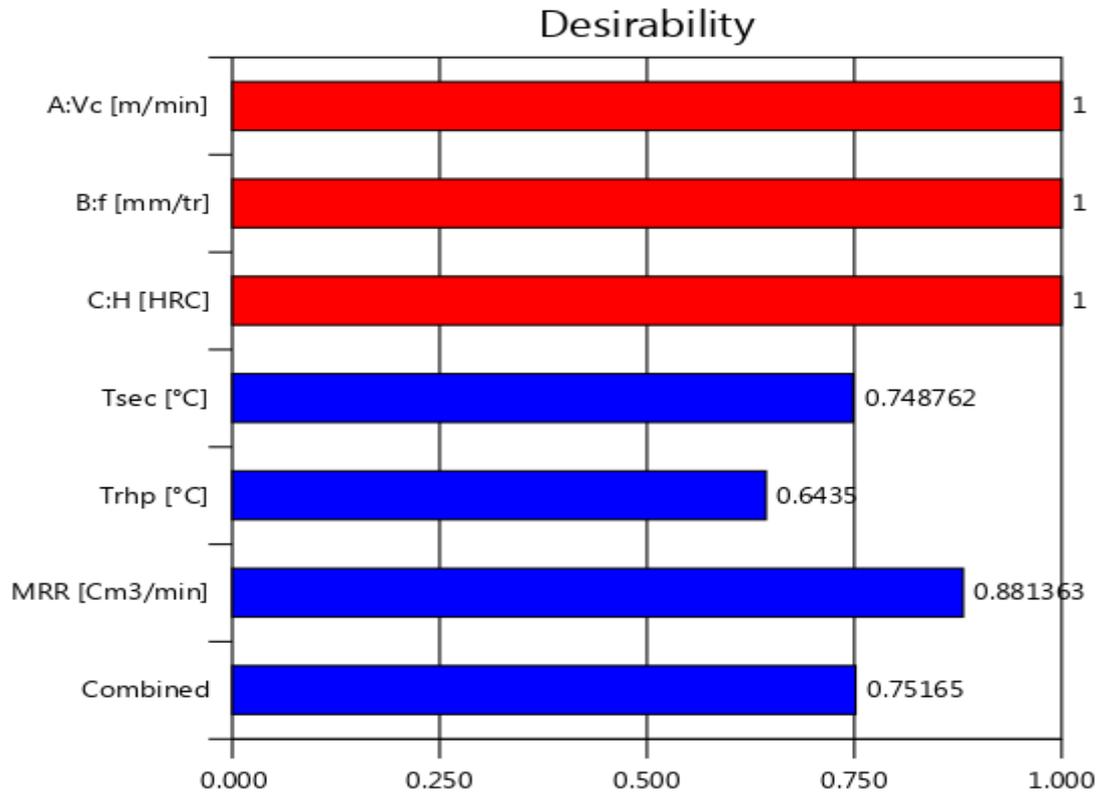


Figure 3.19- Barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et des paramètres T_{sec} , Tr_{hp} et MRR , ainsi que la désirabilité combiné = 0.752

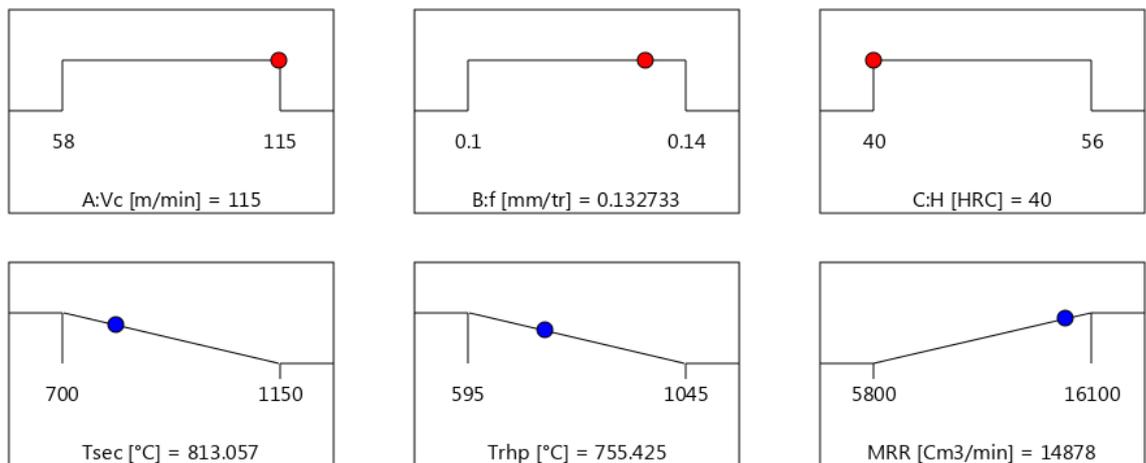


Figure 3.20- Graphique de la fonction de désirabilité de T_{sec} , Tr_{hp} et MRR [DF = 0.752]

D'après le tableau 3.11 et les figures (3.18-3.20), les valeurs des paramètres de coupe optimaux pour obtenir une meilleure qualité des paramètres de sortie (T_{sec} , Tr_{hp} et MRR) sont : $V_c = 115$ m/min, $f = 0,13$ mm/tr et $H = 40$ HRC. Toutefois, pour ce régime de coupe, les paramètres étudiés sont : $T_{sec} = 813.05^\circ\text{C}$, $Tr_{hp} = 755.42^\circ\text{C}$ et $MRR = 14878.04$ cm³/min, avec une désirabilité égale 0.75.

3.5- Conclusion

Dans ce chapitre, nous faisons l'optimisation mono et multi-objective des conditions de coupe de tournage dur d'acier AISI 1060. Deux cas sont étudiés : le tournage à sec (T_{sec}) et le tournage à refroidissement haute pression ($Trhp$). L'optimisation a été faite pour minimum de température (T_{sec} et $Trhp$) et maximum de productivité (maximum de taux d'enlèvement de matière MRR). La conclusion intéressante de ce chapitre est :

- Pour l'optimisation mono-objective, les paramètres optimaux sont : $V_c = 58$ m/min, $f = 0,1$ mm/tr, $ap = 0,1$ mm et $H = 40$ HRC.
- Pour l'optimisation multi-objectives, les paramètres optimaux sont : $V_c = 115$ m/min, $f = 0,13$ mm/tr, $ap = 0,1$ mm et $H = 40$ HRC.

Conclusion générale

Ce travail de mémoire a permis d'optimiser les paramètres d'entrée (vitesse de coupe V_c , vitesse d'avance f , profondeur de passe ap et dureté du matériau H) lors de tournage dur d'acier AISI 1060. Les paramètres de sortie étudiés sont : la température de coupe à sec (T_{sec}), la température de coupe avec refroidissement haute pression ($Trhp$) et le taux d'enlèvement de matière (MRR). L'étude a été réalisée pour deux objectifs principaux, à savoir :

- Minimum température de coupe (T_{sec} et $Trhp$),
- Maximum de productivité (maximum de MRR).

D'après les deux chapitres théoriques et le chapitre d'optimisation, les principales conclusions retirées à partir de cette étude sont :

- Le tournage dur est un procédé d'usinage dur très utilisé dans l'industrie mécanique de précision, il occupe une place importante dans la mécanique automobile.
- Le processus de TD généré à l'interface outil-pièce une grande température à cause de l'usure d'outil. A cet égard, le fluide de coupe est utilisé afin de diminuer la chaleur entre l'outil/pièce et améliorer l'intégrité de surface.
- La méthode de Taguchi (ou méthode de signal/bruit (S/N)) peut être efficace pour l'optimisation mono-objective et les deux autres méthodes (analyse relationnelle grise (GRA) et fonction de désirabilité (DF)) sont utilisées pour l'optimisation multi-objective.
- La plus faible valeur de température égale 700 °C et la plus grande égale 1115 °C lors de tournage dur à sec d'acier AISI 1060. Dans le deuxième cas, la plus faible $Trhp$ égale 595 °C et la plus grande égale 1045 °C. Donc, la lubrification haute pression diminuer la température de coupe.
- Par l'optimisation mono-objective, les paramètres optimaux sont : $V_c = 58$ m/min, $f = 0,1$ mm/tr, $ap = 0,1$ mm et $H = 40$ HRC. Le signal/bruit est : pour T_{sec} (facteur V_c (niveau 1, S/N = - 58,18), facteur f (niveau 1, S/N = - 58,44) et facteur H (niveau 1, S/N = - 57,79)), et pour $Trhp$ (facteur V_c (niveau 1, S/N = - 57,04), facteur f (niveau 1, S/N = - 57,28) et facteur H (niveau 1, S/N = - 56,67)).
- Par l'optimisation multi-objectives, les paramètres optimaux sont : $V_c = 115$ m/min, $f = 0,13$ mm/tr, $ap = 0,1$ mm et $H = 40$ HRC. Toutefois, pour ce régime de coupe, les paramètres étudiés sont : $T_{sec} = 813.05^\circ\text{C}$, $Trhp = 755.42^\circ\text{C}$ et $MRR = 14878.04$ cm³/min, avec une désirabilité égale 0.75.

Bibliographie :

- [1] V.P. Astakhov : Machining of hard materials—definitions and industrial applications, in *Machining of Hard Materials* (Springer, London, 2011), pp. 1–32.
- [2] M.W. Cook, P.K. Bossom : Trends and recent developments in the material manufacture and cutting tool application of polycrystalline diamond and polycrystalline cubic boron nitride. *Int. J. Refract Metal Hard Mater.* 18(2–3), 147–152 (2000).
- [3] G. Grzesik : Machining of hard materials, in *Machining: Fundamentals and Recent Advances*, ed. by P. Davim (Springer, London, 2008), pp. 97–126.
- [4] E.O. Ezugwu, Z.M. Wang : Titanium alloys and their machinability—a review. *J. Mater. Process. Technol.* 68(3), 262–274 (1997).
- [5] E.O. Ezugwu, Z.M. Wang, A.R. Machado : The machinability of nickel-based alloys: a review. *J. Mater. Process. Technol.* 86(1–3), 1–16 (1999).
- [6] U.K. Karl : Metal matrix composites: custom-made materials for automotive and aerospace engineering, in *Basics of Metal Matrix Composites*, ed. by K.U. Kainer (Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, FRG, 2006).
- [7] A. Gorin, M.M. Reddy : Advanced ceramics: Some challenges and solutions in machining by conventional methods. *Appl. Mech. Mater.* 624, 42–47 (2014).
- [8] H.A. Kishawy, A. Hosseini : Machining difficult-to-cut materials. *Mater. Form. Mach. Tribol.* (2019).
- [9] J. Rech, A. Moisan : Surface integrity in finish hard turning of case hardened steel. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 43(5), 543–550 (2003).
- [10] T.N. Wong, S.L. Siu : A knowledge-based approach to automated machining process selection and sequencing. *Int. J. Prod. Res.* 33(12), 3465–3484 (1995).
- [11] <https://www.sandvik.coromant.com/sitecollection/documents/downloads/global/brochures/fr-fr/c-1040-161.pdf> . Date de la dernière consultation du site: 30/05/2021
- [12] R. Suresh, S. Basavarajappa, V.N. Gaitonde, G.L. Samuel : Machinability investigations on hardened AISI 4340 steel using coated carbide insert. *Int. J. Refract Metal Hard Mater.* 33, 75–86 (2012).
- [13] V.P. Astakhov, J.P. Davim, Tools (geometry and material) and tool wear, in *Machining* (Springer, London, 2008), pp. 29–57 ;
- [14] G. C. Manjunath Patel, R. Ganesh Chate, B. Mahesh Parappagoudar, K. Gupta : *Machining of Hard Materials : A Comprehensive Approach to Experimentation, Modeling and Optimization*. Springer Briefs in Applied Sciences and Technology, 2020.
- [15] R. Berghid : *Impact de la signature des outils de coupe sur la variation de la géométrie des pièces mécaniques*. Université de Constantine, 2006

- [16] A. Achour : Etude du comportement en usure des outils de coupe en fonction du revêtement. Université de Constantine, 2006.
- [17] A. David, J. Stephenson, S. Agapiou : Metal Cutting Theory and Practice, Third Edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016.
- [18] M. Habak : Etude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier à roulement 100cr6. Thèse de doctorat. Ecole doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur, 2006 ENAM 57, 2006.
- [19] A. Maurel-pantel, « Etude expérimentale et modélisation par éléments finis du procédé de fraisage », Université de Franche-Comté, 2009.
- [20] D. A. Stephenson, Tool-work thermocouple temperature measurements—Theory and implementation issues, ASME J. Eng. Ind. 115, 432–437, 1993.
- [21] K. J. Trigger, R. K. Campbell, and B. T. Chao, A tool-work thermocouple compensation circuit, ASME Trans. 80, 302–306, 1958.
- [22] E. M. Trent: Metal Cutting. Butterworths, London, U.K., p. 58, 1977.
- [23] M. Bono and J. Ni, A method for measuring the temperature distribution along the cutting edges of a drill, ASME J. Manuf. Sci. Eng. 124, 921–923, 2002.
- [24] M.A. Yaltese, Etude du Comportement à l'Usure des Matériaux de Coupe Modernes en Tournage Dur, Thèse Doctorat, Université d'Annaba, 2005.
- [25] Malek HABAK, Étude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le Comportement en tournage de l'acier à roulement 100cr6. Thèse de Mécanique et Matériaux. ENSAM, (décembre 2006), P 191, Paris.
- [26] Thèses M. Abdelghani : L'évolution de la température de coupe au niveau de l'interface outil pièce en tournage. Mémoire de master, université de Ouargla, 2014
- [27] M. Mia, N.R. Dhar : Response Surface and Neural Network based Predictive Models of Cutting Temperature in Hard Turning. Journal of Advanced Research, 2016.
- [28] M. Mia, N.R. Dhar . Effect of high pressure coolant jet on cutting temperature, tool wear and surface finish in turning hardened (HRC 48) steel. J Mech Eng; 45(1):1-6, 2015.
- [29] N. Dhar, M. Kamruzzaman : Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition. Int J of Mach Tool Manuf; 47(5):754-9, 2007.
- [30] M. Mia, N. Dhar : Optimization of surface roughness and cutting temperature in high pressure coolant-assisted hard turning using Taguchi method. Int J Adv Manuf Technol; 1-15, 2016.
- [31] A. Hamdi, S.M. Merghache, T. Aliouane : Effect of cutting variables on bearing area curve parameters (BAC-P) during hard turning process. Archive of Mechanical Engineering 67(1):73-95, 2020.

Résumé : Dans le processus d'usinage par tournage dur, la température de coupe à l'interface outil-pièce est considérée comme le facteur principal d'obtention d'une mauvaise qualité des pièces. La température plus basse est nécessaire car la pièce ou l'outil sont affectés par la chaleur générée dans l'interface outil/copeau. Donc, l'étude de ce paramètre de sortie a un grand intérêt technologique. L'objectif principal de ce travail est d'optimiser les paramètres de coupe afin d'obtenir une température minimale et une productivité maximale lors du tournage d'acier dur à l'aide d'un outil de coupe en carbure revêtu. La température de coupe est mesurée expérimentalement par le thermocouple pour deux cas de tournage sec et avec lubrification haute pression (HPC). L'optimisation repose sur la l'analyse relationnelle grise (GRA), la fonction de désirabilité (DF) et la méthode de Taguchi afin de sélectionner les paramètres d'entrées optimales.

Mots clés : Tournage dur, température, optimisation, GRA.

المخلص: في عملية الخراطة الصلبة، تعتبر درجة حرارة القطع في واجهة جزء الأداة هي العامل الرئيسي في تحقيق جودة الأجزاء الرديئة. تعد درجة الحرارة المنخفضة ضرورية لأن القطعة أو الأداة يتأثران بالحرارة المتولدة في واجهة الأداة/القطعة. لذلك، فإن دراسة معلمة الإخراج هذه ذات أهمية تقنية كبيرة. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تحسين معلمات القطع من أجل تحقيق أدنى درجة حرارة وأقصى إنتاجية عند تصنيع الفولاذ الصلب باستخدام أداة القطع المطلية بالكربيد. يتم قياس درجة حرارة القطع بشكل تجريبي بواسطة المزيج الحراري لحالتين من الخراطة الجافة والتزييت بالضغط العالي (HPC). يعتمد التحسين على التحليل العلائقي الرمادي (GRA)، ووظيفة الاستحسان (DF) وطريقة Taguchi لتحديد معلمات الإدخال المثلى.

الكلمات الرئيسية: الخراطة الصلبة، درجة الحرارة، التحسين، GRA.

Summary: In the hard-turning machining process, the cutting temperature at the tool-part interface is considered to be the main factor in achieving poor part quality. The lower temperature is necessary because the part or tool is affected by the heat generated in the tool / chip interface. Therefore, the study of this output parameter is of great technological interest. The main objective of this work is to optimize the cutting parameters in order to achieve minimum temperature and maximum productivity when turning hard steel using a coated carbide cutting tool. The cutting temperature is measured experimentally by the thermocouple for two cases of dry turning and with high pressure lubrication (HPC). The optimization relies on gray relational analysis (GRA), the desirability function (DF) and the Taguchi method to select the optimal input parameters.

Keywords: Hard turning, temperature, optimization, GRA.