

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA

Faculté : Technologie

Département : Génie mécanique

Domaine : Technologie

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Fabrication Mécanique et productique



Mémoire Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème

Effet de la rugosité de départ sur la qualité de surface réalisée par le traitement par brunissage

Réalisé par : KHELALFA ZAKARYA

Sous la direction de : M. LAOUAR Lakhdar Professeur \ Université ANNABA
Présenté et soutenu publiquement le

Composition du Jury :

Président BOUCHELAGHEM Abdelaziz Professeur Université ANNABA

Promoteur M. LAOUAR Lakhdar Professeur Université ANNABA

Examinateur Dr. MEKHILEF Slimane MC A Université ANNABA

Université Badji Mokhtar ANNABA 2024/2025

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à ceux qui méritent des remerciements. À ma chère maman et mon cher papa, dont les sacrifices et les encouragements constants m'ont permis de réaliser ce rêve. Merci pour votre amour inconditionnel et votre foi en mes capacités.

À mes sœurs pour leur soutien, leur compréhension et leurs mots réconfortants dans les moments difficiles.

Votre présence a été une source de motivation et de réconfort. À toute ma famille, qui m'a entouré de leur amour et de leur bienveillance. Vous avez tous contribué, d'une manière ou d'une autre, à ce parcours.

Merci à chacun d'entre vous d'avoir cru en moi et d'avoir fait partie de cette aventure. Ce mémoire est autant le vôtre que le mien.

Remerciement

Je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance envers le Professeur LAKHDAR LAOUAR pour avoir accepté de superviser ce projet et pour son engagement total, ses conseils précieux et son soutien infaillible tout au long de sa réalisation.

Je tiens également à adresser mes sincères remerciements aux membres de jury Pr. BOUCHELAGHEM Abdelaziz, et Dr MEKHILEF Slimane pour avoir examiné ce travail.

J'adresse également mes vifs remerciements à tous les membres du corps enseignant du Département de Génie Mécanique de l'Université BAJDI MOKHTAR ANNABA. Leur dévouement et leur soutien ont grandement contribué à l'enrichissement de mon parcours académique, et je suis reconnaissant envers ceux avec qui j'ai eu le privilège de travailler tout au long de mon cursus d'études.

Je souhaite exprimer mes remerciements aux doctorants, Mr. Mebarek Abderraouf Madjdi et pour leur soutien inestimable et le temps précieux qu'ils m'ont consacré pour la réalisation de la partie expérimentale.

Table des matières

Introduction générale	13
Chapitre 1 : Techniques de fabrication	15
1 Qualité de surface.....	16
1.1. Etat de surface	16
1.2.1.1. État physico-chimique.....	18
1.2.1.2. État géométrique	18
1.2.2. Géométrie des surfaces	19
1.2.2.1. Géométrie nominale	19
1.2.2.2. Géométrie réelle.....	19
1.2.2.3. Géométrie spécifiée	19
1.2.2.4. Géométrie mesurée	19
1.2.3. Les défauts d'états de surface.....	20
1.2.4. Différents écarts géométriques de l'état de surface	21
1.2.4.1. Écarts de forme	21
1.2.4.2. Écarts d'ondulation	21
1.2.4.3. Écarts de rugosité.....	21
1.3 La rugosité	22
1.3.1. Définition de la rugosité.....	22
1.3.2 Principaux critères de rugosité	22
1.3.3 Paramètres de rugosité	24
1.3.4 Défauts de la surface usinée	25
1.3.4.1 Écailles.....	25
1.3.4.2 Cavités	25
1.3.4.3 Microstries	25
1.3.4.4 Microfissures.....	25
1.3.5 Mesure de la rugosité.....	26
1.3.6 L'importance de la qualité de surface.....	27
1.5 Généralités sur l'usinage	28
1.6 Le but d'usinage	28
1.7 Les types d'usinage par enlèvement de matière	29
1.7.1 Fraisage	29

1.7.2	Le perçage	31
1.7.3	Le tournage	31
1.7.3.1	Procédé de tournage	31
1.7.3.2	Les machines de tournage	33
1.7.4	Support et entraînement des pièces sur un tour	35
1.7.5	Différentes opérations de tournage	36
1.8.6	Conditions de coupe	39
1.8.6.1	Principe	39
1.8.6.2	Critères de choix des paramètres d'usinage	40
1.8.6.2	Puissance de la machine	40
1.9	Les types d'usinage sans enlèvement de matière	42
1.9.1	Traitement mécanique de surface	43
1.9.2	Importance des traitements mécaniques de surface	43
1.9.2	Types de Traitement Mécanique de surface	44
1.9.2.1	Grenaillage – Traitement par projection de particules	44
1.9.2.2	Martelage – Traitement par choc	46
1.9.3	Brunissage - Traitement de finition par pression	46
1.9.2.2	Brunissage	47
1.9.2.3	Principe de brunissage	47
1.9.2.4	Le dispositif de brunissage	48
1.9.2.5	Intérêt et paramètres du brunissage	49
1.9.2.6	Effets du brunissage	50
1.9.2.7	Effets sur la qualité géométrique de surface	50
1.9.2.8	Conclusion	53
Chapitre 2 : Les plans d'expériences	54	
2	Introduction	55
2.1.	Définition des plans d'expériences	55
2.2.	Domaines d'utilisation et objectifs d'un plan d'expérience	56
2.2.1.	Domaines d'utilisation	56
2.2.2.	Objectif d'utilisation d'un plan d'expérience	56
2.3.	Notion d'espace expérimental ou domaine d'étude	56
2.4.	Notion de surface de réponse	57
2.5.	Méthode de plan factoriel complet	58
2.5.1.	Définition du plan factoriel complet	58

2.5.2. Modèle mathématique.....	58
2.5.3. Élaboration d'un plan d'expériences	59
2.5.4. Définition d'une interaction	59
2.6. Choix du plan	60
2.7. Plan de Box-Behnken	60
2.7.1. Propriétés du plan de Box Behnken	60
2.7.2. Modèle mathématique.....	61
2.7.3 Conclusion	62
Chapitre 3 : Étude expérimentale.....	64
3 Introduction.....	65
3.1. Présentation du matériau de la pièce	65
3.1.1. Caractéristiques et propriétés mécaniques du matériau de la pièce	65
3.1.1.1. Composition chimique	65
3.2. Traitement par tournage.....	67
3.2.1. Préparation de la pièce	67
3.2.1.1 Influence de N (vitesse de rotation)	68
3.2.1.2 Influence de f (avance).....	68
3.2.1.3 Influence de r (rayon de l'outil).....	68
3.2.1.4 Interactions	69
3.3. Traitement par Brunissage	70
3.3.1. Matrice d'expériences.....	70
La matrice d'expériences et réalisée conformément au plan de box behenken, présentée dans le Tableau 3.3 et Tableau 3.4.....	70
3.3.1.1. Régimes d'usinage représentatifs	71
3.3.2. Modèle de prédiction de la rugosité finale	72
3.3.3. Analyse des résultats et recommandations.....	73
3.3.4. Conditions optimales recommandées	73
Conclusion	74
Chapitre 4 : Résultats et discussion.....	75
4.1. Plan factoriel complet	76
4.1.1. Analyse des effets des paramètres d'usinage sur la rugosité finale	76
4.2. Plan de box.....	80
4.2.1. Optimisation avec objectif de minimisation	81
4.2.2. Effet de Rainitiale sur la Moyenne de Rafinale	81

4.2.3. Effet de f sur la Moyenne de <i>Rafinale</i>	81
4.2.4. Effet de R sur la Moyenne de <i>Rafinale</i>	81
4.3. Traitement de rendement η	85
4.3.1. Effet de 'Ra-initiale' sur la Moyenne de η	86
4.3.2. Effet de f sur la Moyenne de η	86
4.3.3. Effet de r sur la Moyenne de η	87
4.3.4 Conclusion	91
Conclusion générale	92
Références bibliographiques.....	93

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Désignation des outils de fraisage

Tableau 3.1 : Plan factoriel complet

Tableau 3.2 : Plan factoriel complet

Tableau 3.3 : niveaux des facteurs étudiés dans le plan de Box-Behnken

Tableau 3.4 : les résultats obtenus lors des 15 essais du plan Box-Behnken

Liste des Figures

FIGURE 1.1 : RELATION ENTRE LES E CARTES GEOMETRIQUES ET LE PROFIL	18
FIGURE 1.2 A : GEOMETRIE NOMINALE	19
FIGURE 1.2 B : GEOMETRIE REELLE	19
FIGURE 1.3 : LA GEOMETRIE SPECIFIEE ET MESUREE	20
FIGURE 1.4 : PROFIL DE SURFACE.....	20
FIGURE 1.5 : LES TYPES DE DEFAUTS DE SURFACE	22
FIGURE 1.6 : PRINCIPAUX CRITERES D'ETAT DE SURFACE.....	23
FIGURE 1.7 : PARAMETRES DE RUGOSITE.....	24
FIGURE 1.8: MICRO GEOMETRIE DE SURFACE POUR DIVERSES VITESSES DE COUPE.....	26
FIGURE 1.9 : RUGOSIMETRE	27
FIGURE 1.10 : OPERATION DE TOURNAGE	28
FIGURE 1.11 : METHODES ET DEMARCHES D'ETUDE DE L'USINAGE 1	
FIGURE 1.12 : TAUX D'UTILISATION DES DIFFERENTS TYPES DE PROCEDES DANS L'INDUSTRIE	28
FIGURE 1.13 : OPERATIONS PRINCIPALES DE FRAISAGE	30
FIGURE 1.14 : EXEMPLES DE TROUS REALISES DANS DES PIECES ISSUES DE PLUSIEURS SECTEURS DE L'INDUSTRIE	
MECANIQUE	31
FIGURE 1.15 : MOUVEMENTS DE COUPE ET D'AVANCE EN TOURNAGE	32
FIGURE 1.16 : COMPOSANTES DE TOUR	33
FIGURE 1.17 : MACHINE DE TOUR SEMI-AUTOMATIQUE	34
FIGURE 1.18 : MACHINE DE TOUR MULTIBROCHE	34
FIGURE 1.19 : MONTAGE EN L'AIR	35
FIGURE 1.20 : MONTAGE MIXTE	35
FIGURE 1.21 : MONTAGE ENTRE-POINTE	36
FIGURE 1.22 : CHARIOTAGE	36
FIGURE 1.23 : DRESSAGE EXTERIEUR ET INTERIEUR	37
FIGURE 1.24 : ALESAGE	37
FIGURE 1.25 : PERCAGE	37
FIGURE 1.26 : RAINURAGE	38
FIGURE 1.27 : CHANFREINAGE.....	38
FIGURE 1.28 : TRONCONNAGE.....	38
FIGURE 1.29 : FILETAGE	39
FIGURE 1.30 : CHOIX DES PARAMETRES DE COUPE.....	40
FIGURE 1.31 : VITESSE DE COUPE V_c.....	41
FIGURE 1.32 : VITESSE D'AVANCE V_f.....	42
FIGURE 1.33 : TOPOGRAPHIQUES RELATIVES A QUELQUES MODES DE FINITION.....	44
FIGURE 1.34 : GRENAILLAGE	45
FIGURE 1.35 : SCHEMA DE LA DEFORMATION DES IRREGULARITES DE SURFACE LORS D'UN TRAITEMENT PAR BILLE ...	47
FIGURE 1.38 : SCHEMA DU BRUNISSEUR A) SPHERIQUE B) CONIQUE C) CYLINDRIQUE PLATE D) CYLINDRIQUE BOMBE	48
FIGURE 1.38 : SCHEMA DU BRUNISSEUR	49
FIGURE 1.39 : EFFET DE L'EFFORT DU BRUNISSAGE SUR LA RUGOSITE DE SURFACE	51

FIGURE 1.40 : INFLUENCE DE LA VITESSE DE BRUNISSAGE SUR LA RUGOSITE	52
FIGURE 1.41 : INFLUENCE DE L'AVANCE SUR LA RUGOSITE : A) TOURNAGE [44], B) BRUNISSAGE [38].	53
Figure 2.1 : Schéma général d'un processus	
Figure 2.2 : Domaine d'étude d'un facteur	
Figure 2.3 : Réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse.	
Figure 2.4 : Illustration du plan de Box-Behnken pour trois facteurs	
Figure 3.1 : Tour parallèle 1A616	
Figure 3.2 : Outil de coupe utilisé	
Figure 3.3 : Outil de coupe utilisé	
Figure 3.4 : Pièce avant les essais	
Figure 3.5 : Opération de brunissage	
Figure 4.1: Graphique des effets principaux pour Ra	
Figure 4.2 : Graphique entre le facteur F et N	
Figure 4.3 : Graphique entre le facteur R et N	
Figure 4.4 : Graphique entre le facteur F et R	
Figure 4.5 : Graphique des effets principaux pour Ra-finale	
Figure 4.6 : Graphique entre le facteur f et Ra-initiale	
Figure 4.7 : Graphique entre le facteur R et N	
Figure 4.8 : Graphique entre le facteur F et R	
Figure 4.9 : Graphique des effets principaux pour η	
Figure 4.10 : Graphique entre le facteur F et Ra-initiale	
Figure 4.11 : Graphique entre le facteur R et Ra-initiale	
Figure 4.12 : Graphique entre le facteur R et F	

Nomenclature

$a_0, a_{ij} \dots$: Coefficients du modèle (à déterminer).

a : Vecteur des coefficients à estimer.

e : Vecteur des erreurs

L : Longueur de base servant de mesure et de calcul les paramètres de rugosité

MM : Ligne moyenne indiquant la direction générale du profil

Rp, Rv (ou Rm) : Hauteur, Profondeur maxi des pics et creux, par rapport à « MM »

RT : Rti(ou Ry) Ecart max sur la longueur d'évaluation, ($Ry=Rp+Rm$)

Rtm : Moyenne des Rtsur la longueur totale d'évaluation

Ri : Profondeur élémentaire de la rugosité

R : Profondeur moyenne de la rugosité

R max : Profondeur maximum de la rugosité

Rz : Hauteur des irrégularités.

Ra : Moyenne arithmétique des écarts de profil.

Smi : Pas des irrégularités du profil

Si : Pas

x_i : Niveau du facteur iii,

x : Matrice des niveaux des facteurs.

YP : Hauteur d'un pic par rapport à MM

YV : Profondeur d'un creux par rapport à « MM » Ynde saillies locales du profil 23 10

Introduction générale

Introduction générale

Avec des progrès rapides et continus dans tous les domaines, la fabrication mécanique se distingue comme l'un des secteurs les plus significativement améliorés. L'exigence d'améliorer la précision et la qualité des pièces fabriquées est devenue cruciale, surtout face à une concurrence intense dans l'industrie moderne, rendant indispensable la recherche d'outils et de connaissances en méthodes de production. Une surface lisse et précise d'une pièce de machine est souvent requise pour assurer une résistance à l'usure, une bonne étanchéité, un fonctionnement optimal des assemblages avec un aspect esthétique satisfaisant. Pour atteindre ces objectifs, les fabricants doivent adopter des solutions techniques avancées et mettre en place des stratégies de fabrication. Lors de l'usinage sur les machine-outil, il est essentiel de choisir le régime de coupe le mieux adapté au matériau à fabriquer pour garantir une qualité de surface optimale.

Dans le cadre de ce projet, nous nous sommes donné pour objectif d'adopter une approche fondée sur les plans d'expériences, afin d'analyser les conditions de coupe lors d'une opération de tournage. Cette démarche vise à quantifier l'effet de ces conditions sur la qualité de surface d'une pièce réalisée dans un matériau couramment utilisé dans l'industrie mécanique.

Le mémoire est structuré comme suit :

- Le premier chapitre, présente les concepts de l'usinage, en mettant en lumière les aspects essentiels du tournage et de brunissage, ainsi que sur la qualité de la surface usinée. Ont été mis en évidence les paramètres de coupe et leurs influences sur la rugosité de la surface obtenue.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des fondements des plans d'expériences et leurs applications, avec une attention particulière portée à la méthode des plans factoriels complets et ainsi qu'à la méthode de box behenken et aux avantages qu'elle permet d'assurer.
- Le troisième chapitre est consacré à la présentation de la partie expérimentale, menée dans le cadre d'une opération de tournage. Les essais ont été réalisés sur un échantillon en acier faiblement allié de nuance 30CDV12 8. L'expérimentation a été conduite conformément à la méthodologie des plans d'expériences, présentée dans le chapitre précédent.

Le mémoire se couronne par une conclusion générale, des références bibliographiques et des annexes.

Partie théorique

Chapitre 1 : Techniques de fabrication

Introduction

On appelle usinage toute opération de mise en forme par enlèvement de matière à l'aide d'une machine-outil destinée à conférer à une pièce des dimensions et un état de surface (écart de forme et rugosité) situés dans un intervalle de tolérance donné. D'un point de vue économique, le secteur industriel de l'usinage a une importance non négligeable puisqu'il produit environ 2,5 % du produit national brut d'un pays développé.

L'usinage concerne en premier lieu les matériaux métalliques et la plupart des objets métalliques d'utilisation courante qui ont subi déjà une ou plusieurs opérations de mise en forme. La mise en forme par usinage concerne également, mais de manière moins conséquente en général, toutes les autres classes de matériaux (céramiques, polymères, bois et matériaux dérivés, matériaux composites, verres, semi-conducteurs, etc..), selon des modalités spécifiques, dépendant des caractéristiques du procédé et du matériau. Lors de l'usinage d'une pièce, l'enlèvement de matière est réalisé par la combinaison de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil : le mouvement de coupe et le mouvement d'avance.

1 Qualité de surface

Les propriétés des solides dépendent fortement de l'état de leur surface. En effet, la surface, interface entre le solide et son environnement, joue un rôle essentiel dans des fonctions comme le frottement, la résistance à l'usure ou à la corrosion, la conduction thermique et électrique, la résistance mécanique, l'étanchéité, ou encore l'aspect visuel. [1]

1.1. Etat de surface

L'état de surface désigne les irrégularités créées par les procédés de fabrication (usinage, moulage, etc.). Il comprend des défauts macro-géométriques (formes, ondulations) et micro-géométriques appelés rugosité. Les surfaces industrielles ne sont jamais parfaitement lisses, et leur caractérisation repose sur des profils normalisés, bien que des mesures 3D (topographie) soient de plus en plus utilisées, sans être encore standardisées en production. L'état de surface se divise en deux aspects :

- Physico-chimique
- Géométrique

Le schéma (Figure 1.30) s'illustre la relation entre les écarts géométriques d'une surface et les longueurs d'onde associées aux irrégularités de cette surface. L'axe vertical représente les

amplitudes des écarts, c'est-à-dire les hauteurs des défauts, tandis que l'axe horizontal indique les longueurs d'onde, soit la distance entre deux irrégularités similaires sur le profil de surface.

En fonction de la longueur d'onde, on distingue plusieurs catégories d'écarts géométriques :

- **Le bruit de forme** (zone hachurée à gauche), correspondant à des longueurs d'onde très courtes (λ_s), regroupe les défauts extrêmement fins, souvent liés à des phénomènes microscopiques tels que des irrégularités de structure ou la présence de contaminants en surface.
- **La rugosité** regroupe les irrégularités de surface perceptibles à l'échelle micrométrique. Elle est principalement due aux procédés d'usinage ou à l'état de surface après élaboration.
- **L'ondulation**, qui se manifeste par des longueurs d'onde plus grandes (comprises entre λ_c et λ_f), résulte généralement de phénomènes périodiques tels que les vibrations de la machine-outil ou des déformations progressives survenues lors de la fabrication.
- **Les écarts de forme** concernent les irrégularités de grande échelle qui traduisent la différence entre la géométrie réelle de la pièce et sa géométrie idéale théorique, comme par exemple un cylindre présentant une ovalisation.
- Enfin, **la forme nominale** désigne la forme géométrique parfaite attendue, définie par le modèle théorique (ex. : cylindre parfait, sphère parfaite).

Ainsi, plus la longueur d'onde est élevée, plus l'on s'éloigne des défauts microscopiques pour s'approcher des déformations macroscopiques. Cette classification permet une analyse hiérarchisée des irrégularités, en séparant les composantes à différentes échelles.

Les filtres λ_s (bruit de haute fréquence), λ_c (filtrage de la rugosité) et λ_f (filtrage de la forme) sont utilisés en métrologie pour dissocier et analyser les différents niveaux d'irrégularités sur un profil de surface. Ces filtres sont essentiels pour la caractérisation fine et précise de l'état de surface selon les exigences fonctionnelles des pièces industrielles [2].

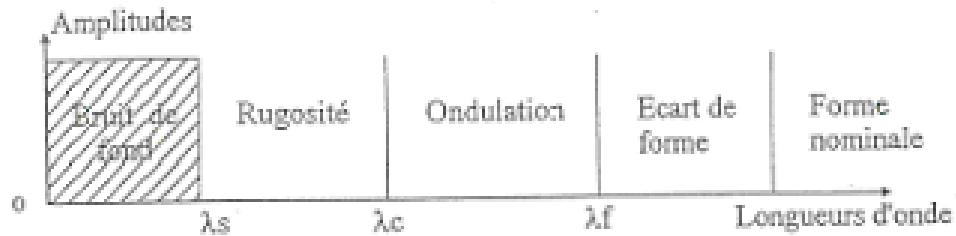


Figure 1.1 : Relation entre les écartes géométriques et le profil

- λ_s = filtre du bruit (très haute fréquence),
- λ_c = filtre de rugosité (fréquence moyenne),
- λ_f = filtre de forme (basse fréquence).

1.2.1.1. État physico-chimique

Une surface, « industrielle » ou non, est de nature plus ou moins complexe selon le matériau et peut être considérée comme la superposition de plusieurs strates (couches) résultant des différentes interactions entre le métal et son environnement. On peut par exemple rencontrer les couches suivantes :

- Une zone perturbée par divers phénomènes physiques et/ou chimiques pouvant atteindre quelques centaines de micromètres -Une zone transformée, constituée par un mélange d'oxydes divers
- Une zone contaminée, caractérisée par la présence de couches physisorbées et chimisorbées de molécules issues de l'atmosphère ambiante, de quelques nanomètres d'épaisseur En termes de surface, la notion d'épaisseur de surface et donc celle de « volume » apparaît alors clairement.

1.2.1.2. État géométrique

Il regroupe l'ensemble des défauts de forme ainsi que les écarts géométriques, qu'ils soient de nature micro- ou macro-géométrique. Ces irrégularités sont classées selon quatre catégories distinctes, identifiées par des numéros d'ordre.

1.2.2. Géométrie des surfaces

1.2.2.1. Géométrie nominale

La géométrie nominale représente le volume théorique parfait d'une pièce, délimité par des surfaces idéales. Elle est définie exclusivement par les dimensions et les formes spécifiées dans les plans de conception, à l'aide de cotes nominales (**Figure 1.31 a**).

1.2.2.2. Géométrie réelle

La géométrie réelle correspond aux surfaces effectivement obtenues après la fabrication de la pièce, en tenant compte des procédés de mise en œuvre appliqués. Elle reflète l'état final de la pièce, incluant les irrégularités et les écarts par rapport à la géométrie nominale (**Figure 1.31 b**).



Figure 1.2 a : Géométrie nominale

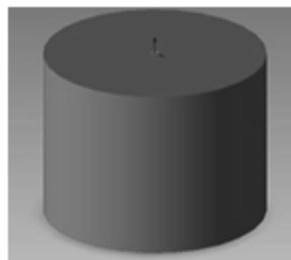


Figure 1.2 b : Géométrie réelle

1.2.2.3. Géométrie spécifiée

C'est le volume précédent auquel on affecte des tolérances délimitant les frontières théoriques à ne pas dépasser par la pièce réelle. Ce sont les dimensions et spécifications géométriques de position, d'orientation, de battement qui délimite cette géométrie (**Figure 1.32**).

1.2.2.4. Géométrie mesurée

C'est l'image de la géométrie réelle résultant de la mesure. Ce résultat est différent selon le type d'appareil utilisé (micromètre, calibre, colonne de mesure, machine à mesurer...) et le protocole de mesure utilisé (position des touches du micromètre, nombre et position des points de palpation, modèle mathématique utilisé par le calculateur...).

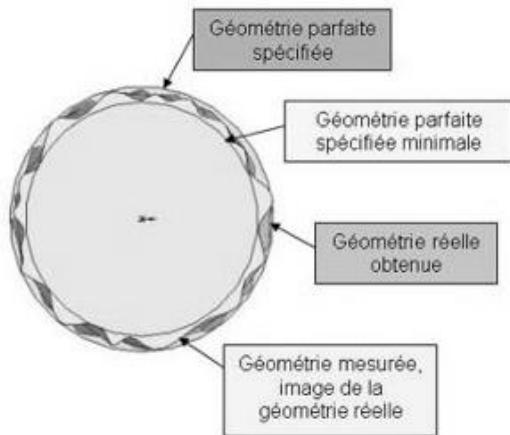


Figure 1.3 : La géométrie spécifiée et mesurée

1.2.3. Les défauts d'états de surface

L'aptitude fonctionnelle d'une pièce à remplir les exigences d'un système mécanique donné dépend de divers paramètres, parmi lesquels l'état de surface occupe une place déterminante. Cet état est défini par la micro géométrie de la surface, qui influence de manière significative plusieurs fonctions essentielles telles que le frottement, le glissement, le roulement, l'étanchéité, ainsi que l'aspect visuel dans certains cas. Afin de permettre un contrôle rigoureux de la qualité des surfaces, il est indispensable de quantifier leurs caractéristiques.

Cette quantification repose sur l'analyse d'un profil représentatif de la surface considérée, à partir duquel les différents paramètres géométriques peuvent être évalués.

La **Figure 1.4** illustre le profil de la surface.

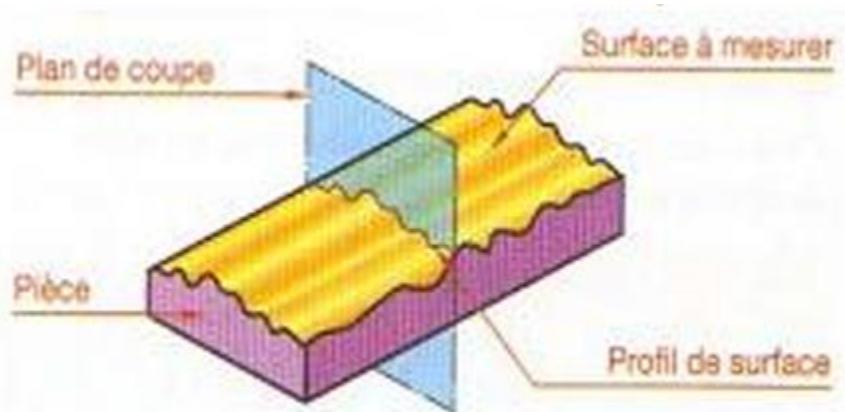


Figure 1.4 : Profil de surface

1.2.4. Différents écarts géométriques de l'état de surface

Un profil de surface est défini comme la courbe résultant de l'intersection entre la surface réelle d'une pièce et un plan spécifié, généralement orienté perpendiculairement à la direction principale des stries d'usinage. Ce profil reflète non seulement la géométrie nominale de la pièce, mais également l'ensemble des écarts géométriques induits par les procédés de fabrication. Ces écarts peuvent être classés selon leur ordre et leur nature en trois grandes catégories [2] :

1.2.4.1. Écarts de forme

Aussi appelés défauts du premier ordre ou défauts macro-géométriques, ils se traduisent par des écarts significatifs de forme (planéité, rectitude, circularité, cylindricité, etc.) ou de position (parallélisme, perpendicularité, coaxiale, etc.). Ces défauts sont généralement causés par des déformations mécaniques survenant lors de l'usinage ou après celui-ci, ainsi que par des défauts de bridage, de guidage, ou encore des fléchissements des éléments de la machine-outil

1.2.4.2. Écarts d'ondulation

Dits défauts du deuxième ordre, ils sont caractérisés par des irrégularités périodiques dont les longueurs d'onde sont supérieures à celles des rugosités. Ces défauts résultent principalement de vibrations de la machine, de déséquilibres dynamiques ou de déformations thermiques pendant le processus d'usinage [3].

1.2.4.3. Écarts de rugosité

La rugosité correspond aux défauts du troisième ordre (tels que les stries laissées par l'outil) et du quatrième ordre (comme les arrachements, fentes, microcavités, etc.). Ces irrégularités sont principalement dues à l'avance de l'outil coupant, à la vitesse de rotation de la pièce ou encore à des vibrations de haute fréquence. La rugosité se caractérise par plusieurs paramètres normalisés permettant d'en quantifier l'intensité et la distribution [1].

La **Figure 1.5** illustre les différents types de défauts de surface en fonction de leur échelle, en les classant selon leur ordre géométrique, depuis les irrégularités microscopiques (rugosité) jusqu'aux déformations globales (écarts de forme).

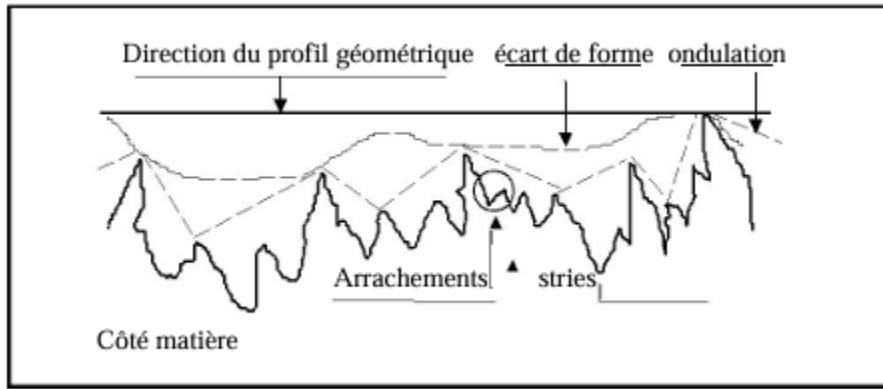


Figure 1.5 : Les types de défauts de surface .

1.3 La rugosité

1.3.1. Définition de la rugosité

La rugosité désigne l'ensemble des irrégularités présentes à la surface d'un matériau, qu'elles soient d'origine micrographique ou macrographique. Les surfaces issues de procédés d'usinage ne sont jamais parfaitement lisses ; elles comportent des irrégularités dues aux conditions d'usinage, aux caractéristiques de l'outil ou encore aux propriétés du matériau employé. L'état de surface influence fortement le comportement fonctionnel d'une pièce, notamment en ce qui concerne l'étanchéité, le frottement, le glissement ou la résistance à l'usure. Il est à noter que plus la rugosité est faible, plus la qualité de surface est élevée, ce qui implique un coût de fabrication plus important [2].

1.3.2 Principaux critères de rugosité

La caractérisation de la rugosité repose sur plusieurs paramètres normalisés, parmi lesquels :

- **Rugosité totale (R_t) :**

Elle représente la distance verticale totale entre le point le plus haut et le point le plus bas d'un profil.

$$R_t = R_p + R_v = R_{p3} + R_{v4}$$

Où

R_p : la hauteur maximale des saillies.

R_v : la profondeur maximale des creux.

- **Rugosité moyenne des sommets et creux (Rz) :**

Il s'agit de la moyenne arithmétique des cinq plus grandes hauteurs de crête à creux sur la longueur d'évaluation :

$$R_z = \frac{1}{5} (R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5})$$

- **Rugosité moyenne arithmétique (Ra) :**

Ce critère, le plus couramment utilisé, mesure la moyenne des valeurs absolues des écarts par rapport à la ligne moyenne sur une longueur donnée l_m .

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx$$

- **Rugosité maximale (Rmax) :**

Il s'agit de la plus grande hauteur de rugosité mesurée entre une saillie et un creux consécutif sur le profil observé.

- **Hauteur maximale des saillies (Rp) :**

Ce paramètre indique la distance maximale entre la ligne moyenne et la ligne des pics sur la longueur de base considérée.

L'ensemble de ces paramètres est représenté de manière synthétique dans la **Figure 1.6** qui résume graphiquement les principaux critères de rugosité d'une surface.

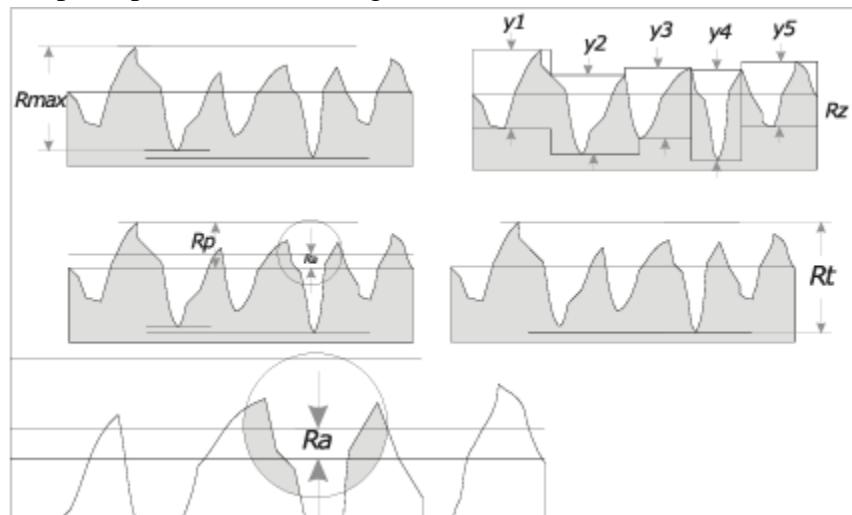


Figure 1.6 : Principaux critères d'état de surface

1.3.3 Paramètres de rugosité

Les paramètres d'état de surface les plus couramment utilisés sont récapitulés dans la **Figure 1.7**

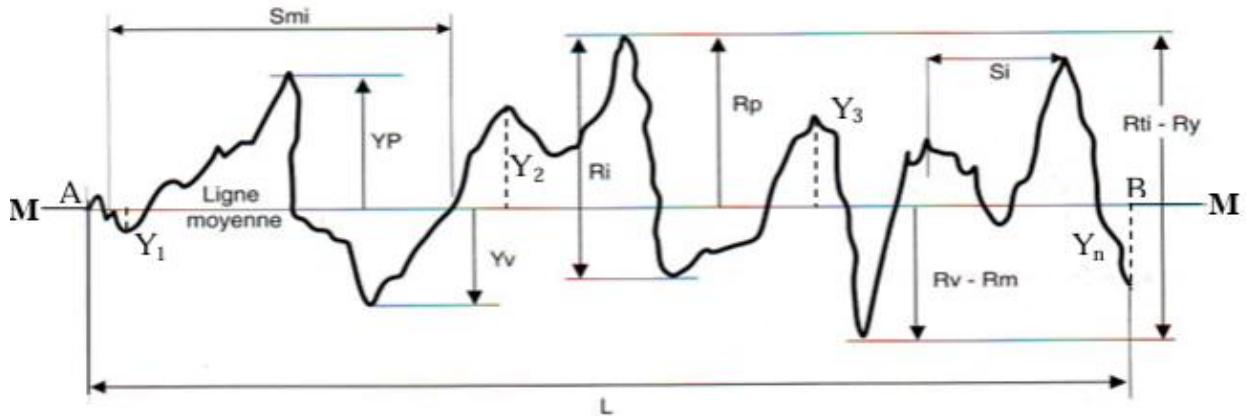


Figure 1.7 : Paramètres de rugosité

Où :

MM : Ligne moyenne indiquant la direction générale du profil

L : Longueur de base servant de mesure et de calcul les paramètres de rugosité

YP : Hauteur d'un pic par rapport à MM

Yv : Profondeur d'un creux par rapport à « MM » Yn

Rp, Rv (ou Rm) : Hauteur, Profondeur maxi des pics et creux, par rapport à « MM »

RT : Rti(ou Ry) Ecart max sur la longueur d'évaluation, ($Ry = Rp + Rm$)

Rtm : Moyenne des Rts sur la longueur totale d'évaluation

Ri : Profondeur élémentaire de la rugosité

R : Profondeur moyenne de la rugosité (moyenne Risur la longueur d'évaluation)

Rmax : Profondeur maximum de la rugosité-

Rz : Hauteur des irrégularités sur 10 points (moyenne des valeurs absolues des 5Yp et 5Yv les plus grands, sur 5 segments d'évaluation consécutifs).

Ra : Moyenne arithmétique des écarts de profil par rapport à la ligne moyenne, représente la valeur moyenne des distances des pointes successives.

Si : Pas de saillies locales du profil 23 10

Smi : Pas des irrégularités du profil (moyenne des Smi sur la longueur de base)

1.3.4 Défauts de la surface usinée

Plusieurs types de défauts peuvent être observés sur une surface usinée (**Figure 1.8**). Ces défauts résultent des interactions complexes entre l'outil, la pièce, et les conditions de coupe. Les principaux types de défauts rencontrés sont décrits ci-dessous :

1.3.4.1.1 Écailles

La formation des écailles est généralement attribuée à la présence d'une arête rapportée instable [20]. Lors de la croissance de cette arête, deux fissures peuvent apparaître : l'une dans la zone secondaire de cisaillement et l'autre sous le bec de l'outil. Cette dernière se propage sous la surface, dans la zone primaire de déformation. Lorsque l'arête de coupe rapportée se désagrège, un fragment contenant la fissure est arraché et reste incrusté à la surface de la pièce, donnant ainsi naissance aux écailles [3].

1.3.4.2 Cavités

Les cavités se forment par arrachement de matière, généralement dû à la propagation de fissures sous-jacentes à la surface, dans la région du bec de l'outil, en présence d'une arête rapportée. Elles sont souvent moins bien définies et de dimensions plus importantes lorsque cette arête est instable [21].

1.3.4.3 Microstries

Les microstries, ou stries de petite taille, résultent principalement des interactions locales entre l'arête de coupe et la surface de la pièce. Le labourage de la surface par des aspérités présentes sur l'arête génère des stries bien marquées. Les stries plus diffuses, quant à elles, peuvent être causées par la présence de micro-arêtes rapportées [4].

1.3.4.4 Microfissures

La présence de microfissures dans les surfaces usinées a été largement étudiée par plusieurs chercheurs. Ces fissures apparaissent lorsque le matériau est soumis à de fortes déformations, générant des concentrations de micro contraintes qui peuvent entraîner des ruptures localisées. La microfissuration suit généralement deux étapes : la nucléation de microfissures, puis leur coalescence. L'ensemble des observations expérimentales met en évidence une amélioration significative de l'état de surface avec l'augmentation de la vitesse de coupe. La figure I.36 illustre

ces résultats pour différentes vitesses, montrant que les rugosités mesurées sont proches des valeurs théoriques prédites à partir de la géométrie de l'outil et de l'avance [5].

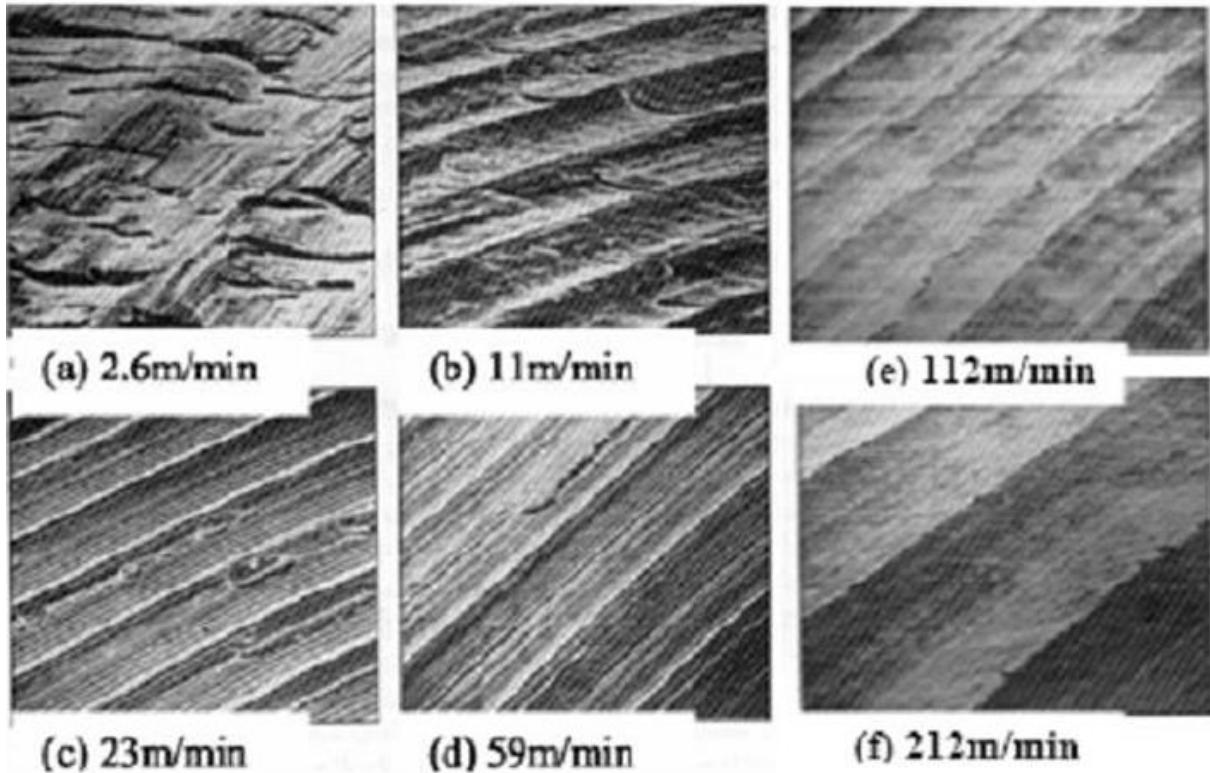


Figure 1.8: Micro géométrie de surface pour diverses vitesses de coupe

1.3.5 Mesure de la rugosité

Lorsque les comparaisons visuelles et tactiles ne suffisent pas à distinguer une différence de rugosité entre deux surfaces, il devient nécessaire d'utiliser un rugosimètre (**Figure 1.38**). Cet appareil permet de mesurer avec précision plusieurs paramètres caractérisant la rugosité, tels que R_a , R_z , R_t , entre autres. L'usage du rugosimètre est indispensable dans plusieurs secteurs industriels où la maîtrise de l'état de surface est critique. Parmi les domaines d'application les plus courants, on peut citer :

- **Le domaine mécanique** : L'optimisation de la rugosité améliore l'ancrage mécanique entre les composants, en particulier dans les systèmes où les forces de frottement sont déterminantes, comme dans les assemblages de type cône Morse.

- **Le contrôle qualité** : En fin de chaîne de production, l'analyse de la rugosité à l'aide d'un rugosimètre permet de vérifier la conformité de la finition des surfaces. Elle joue un rôle essentiel dans la détection et la correction des défauts pouvant survenir lors des opérations d'usinage.



Figure 1.9 : Rugosimètre

1.3.6 L'importance de la qualité de surface

Les états de surface représentent les irrégularités issues du procédé d'élaboration de la pièce. Ils sont généralement mesurés à l'aide de profilomètres à palpeur diamant, qui reproduisent graphiquement la forme, la profondeur et l'espacement des irrégularités. Dans un bureau d'étude, l'état de surface est un paramètre essentiel : il reflète la fonction, la rugosité, la géométrie et l'aspect final des surfaces usinées.

L'état de surface comprend des caractéristiques micro-géométriques, chimiques, physico-chimiques et cristallographiques. Ces qualités ne sont pas toujours évaluées selon des critères strictement définis, sauf dans certaines industries comme l'automobile ou l'emboutissage. En général, leur évaluation nécessite des équipements spécifiques souvent disponibles dans les grands laboratoires. On peut distinguer quatre principales caractéristiques :

- L'apparence : qualité de présentation et de contrôle.
- Le degré de soins : propreté et décontamination.
- La rugosité : capacité d'adhérence de revêtements.
- La dureté : résistance aux contraintes superficielles.

Il existe deux manières pour générer la surface recherchée : soit par le travail de forme, soit par le travail d'enveloppe. Dans le cas du travail de forme, c'est la forme de l'outil qui conditionne la surface finalement obtenue. Dans le cas du travail d'enveloppe, c'est la trace de l'arête de l'outil qui travaille (le point générateur) qui donne la surface finale (**Figure 1.10**) [33].



Figure 1.10 : Opération de tournage

1.5 Généralités sur l'usinage

Les procédés d'usinage par enlèvement de matière sont des techniques de mise en forme largement utilisées dans l'industrie. Il existe de nombreux procédés d'usinage, le fraisage, le perçage, le tournage, le découpage, etc. [8]

La **Figure 1.11** montre que la méthode expérimentale représente plus de 45% de l'ensemble des méthodes d'études des procédés d'usinage. En outre, le tournage représente presqu'un tiers des opérations d'usinage dans l'industrie devant le fraisage (**Figure 1.12**).

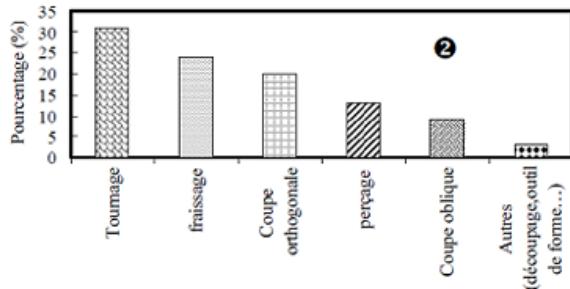
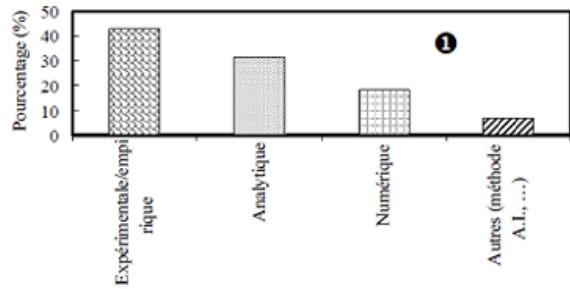


Figure 1.11 : Méthodes et démarches d'étude de l'usinage 1 Figure 1.12 : Taux d'utilisation des différents types de procédés dans l'industrie

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

1.6 Le but d'usinage

La fabrication implique la production de pièces mécaniques selon un plan précis et une évaluation globale. L'objectif est de déterminer les dimensions, la précision et la géométrie finale de la pièce, ainsi que l'état de toutes les surfaces formant la pièce usinée. À chaque étape du processus de production, le type de fabrication, la machine et l'outil appropriés sont choisis par le concepteur.

En général, les surfaces usinées peuvent être planes ou de révolution. Parmi les types de machines les plus importants, on trouve :

- Le fraisage (pour les surfaces planes)
- Le tournage (pour les surfaces de révolution)

Avec l'avènement de la révolution du contrôle numérique et des mises à jour majeures dans ce domaine, il est désormais possible d'usiner de nombreuses surfaces courbes.[8]

1.7 Les types d'usinage par enlèvement de matière

Les procédés d'usinage par enlèvement de matière à l'aide d'outils coupants constituent encore aujourd'hui une technique prédominante dans la mise en forme des matériaux. Parmi les différentes méthodes d'usinage existantes, le présent chapitre se focalise sur deux procédés fondamentaux : le tournage et le fraisage. Ces deux opérations, essentielles dans la fabrication de pièces mécaniques, reposent sur le principe de l'enlèvement progressif de matière afin d'obtenir les formes, les dimensions et les états de surface souhaités.[9]

1.7.1 Fraisage

L'opération de fraisage est sans aucun doute l'une des plus polyvalentes, permettant l'obtention de surfaces planes précises et aussi dans le cas des fraiseuses à commande numérique, de profils complexes et de surfaces 3D. Dans ce type de mise en forme, l'outil est entraîné en rotation par la broche de la machine, et un déplacement relatif est effectué entre la pièce et l'outil de coupe afin de produire sur la pièce la forme désirée. Les fraiseuses ont supplanté certaines machines (raboteuses, étaux limeurs) pour l'usinage de surfaces planes. Ces machines peuvent également servir pour des opérations de tournage. L'outil, une fraise, est fixé dans la broche et est animé d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe). Il peut se déplacer en translation par rapport à la pièce suivant trois directions. On note qu'il existe plusieurs types de fraiseuses

Le fraisage est considéré comme l'un des procédés d'usinage les plus polyvalents, offrant la possibilité de réaliser aussi bien des surfaces planes de haute précision que des géométries complexes, notamment avec l'utilisation de fraiseuses à commande numérique (CNC). Dans ce procédé, l'outil de coupe, appelé fraise, est entraîné en rotation par la broche de la machine, tandis qu'un mouvement relatif entre l'outil et la pièce permet d'obtenir la forme souhaitée. Le fraisage a progressivement remplacé certaines machines traditionnelles telles que les raboteuses et les étaux limeurs pour l'usinage de surfaces planes, en raison de sa plus grande flexibilité et efficacité.

La fraise, montée sur la broche, effectue un mouvement de coupe rotatif, tandis que la pièce ou l'outil peut se déplacer selon trois axes principaux, permettant un usinage tridimensionnel. Par ailleurs, certaines fraiseuses modernes sont capables d'effectuer des opérations de tournage, élargissant ainsi leur champ d'application. Il existe plusieurs types de fraiseuses, dont les

caractéristiques varient selon le nombre d'axes disponibles, la disposition des composants, et le niveau d'automatisation.[10]

La **Figure 1.13** présente les principales opérations de fraisage, tandis que le **Tableau 1.1** décrit la désignation des outils utilisés.

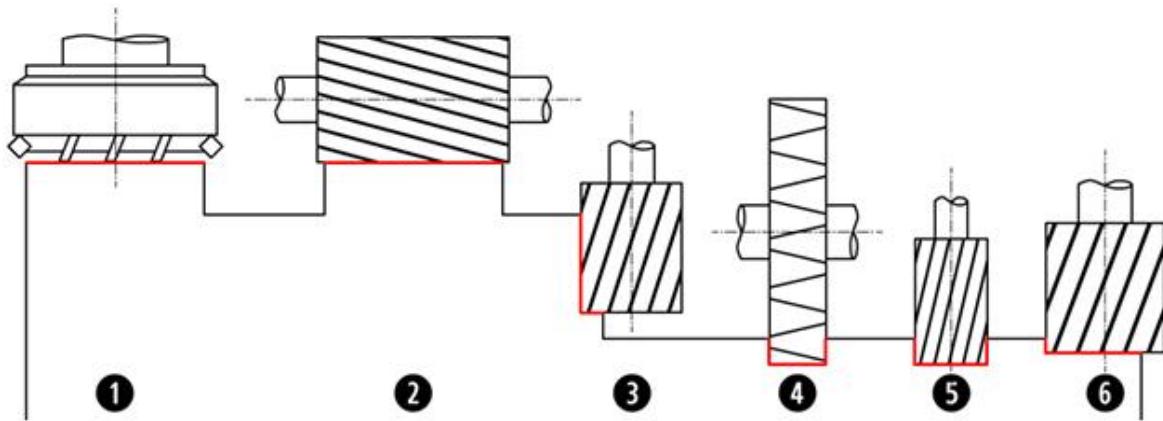


Figure 1.13 : Opérations principales de fraisage

Tableau 1.1 : Désignation des outils de fraisage

No outil	Désignation outil
1	Surfaçage de face
2	Surfaçage de profil
3	Surfaçage - dressage prédominant profil
4	Rainurage 3 tailles
5	Rainurage 2 tailles
6	Surfaçage - dressage prédominant face

1.7.2 Le perçage

Le perçage est une opération d'usinage avec enlèvement de matière, consistant à créer un trou cylindrique dans une pièce à l'aide d'un foret rotatif. Ce trou peut être débouchant (traversant) ou borgne (non traversant). Il peut aussi être lisse ou taraudé pour accueillir des éléments d'assemblage (vis, rivet). Le perçage est l'une des opérations les plus courantes en mécanique, utilisée dans des domaines comme l'automobile ou l'aéronautique (**Figure 1.14**) [10].

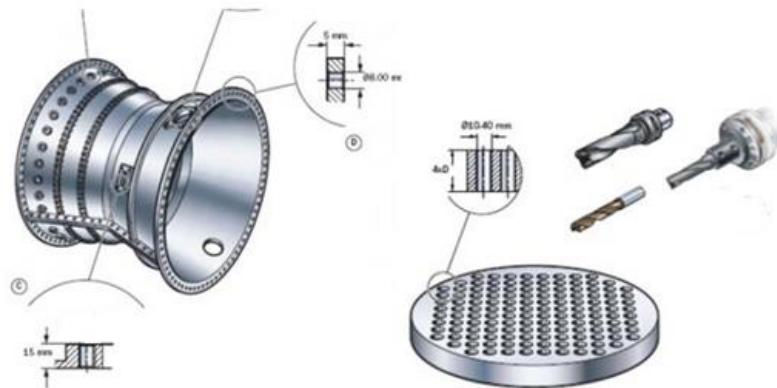


Figure 1.14 : Exemples de trous réalisés dans des pièces issues de plusieurs secteurs de l'industrie mécanique

[10]

1.7.3 Le tournage

Le tournage est l'un des procédés fondamentaux d'usinage. Il occupe une place essentielle dans la fabrication mécanique en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de sa capacité à produire une grande variété de formes géométriques [9].

1.7.3.1 Procédé de tournage

Le tournage est un procédé d'usinage par enlèvement de matière, mettant en œuvre un outil à arête unique. Dans ce procédé, la pièce effectue un mouvement de rotation autour de son axe, constituant le mouvement principal (ou mouvement de coupe), tandis que l'outil suit un mouvement d'avance de nature généralement rectiligne.

La combinaison de ces deux mouvements, couplée à la géométrie de l'outil de coupe, permet de réaliser des surfaces de révolution telles que des cylindres, des cônes, des plans ou encore des formes plus complexes [10].

Dans son mouvement (**Figure 1.15**), la pointe de l'outil décrit une ligne appelée génératrice, qui transforme la pièce en un solide de révolution. En faisant varier le déplacement radial de l'outil, il est possible d'obtenir différents solides de révolution aux formes variées (cylindre, cône, sphère, etc.). Le tournage permet également de façonnier des formes internes grâce à des opérations telles que le perçage, l'alésage et le taraudage [11].

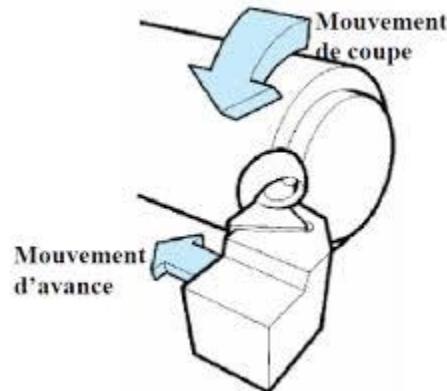


Figure 1.15 : Mouvements de coupe et d'avance en tournage

[13]

L'usage principal de ces machines concerne l'usinage des arbres. La pièce, généralement maintenue par un mandrin, est mise en rotation (mouvement de coupe) par la broche. L'outil peut effectuer un déplacement en translation suivant deux directions, perpendiculaires entre elles, situées dans un plan parallèle à l'axe de la broche. Le premier déplacement est parallèle à l'axe de la broche, tandis que le second lui est perpendiculaire [14]

La **Figure 1.16** présente les composantes de tour.

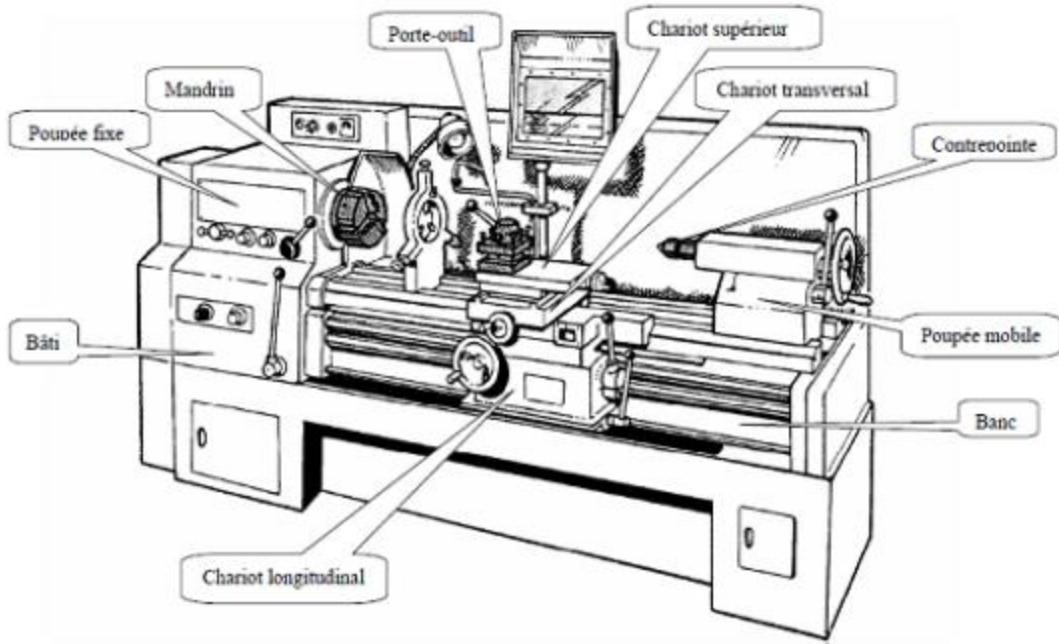


Figure 1.16 : Composantes de tour

1.7.3.2 Les machines de tournage

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

- **Tours parallèles à charioter et à fileter** : Ces machines, peu flexibles, conviennent aux travaux unitaires ou de petites et moyennes séries sur des pièces simples. Elles réalisent uniquement des surfaces dont les génératrices sont parallèles ou perpendiculaires à l'axe de la broche, en travail d'enveloppe [15].
- **Tours à copier** : Grâce à un système hydraulique de copiage pilotant le déplacement du chariot transversal, ces machines permettent la reproduction précise de pièces à partir d'un gabarit. Leur flexibilité les rend adaptées aux petites comme aux grandes séries, et elles peuvent usiner des surfaces de révolution aux génératrices quelconques [15].
- **Tours semi-automatiques** : Équipés d'un traînard similaire à celui d'un tour parallèle et d'une tourelle hexagonale à six postes d'outils, ces tours effectuent des mouvements longitudinaux contrôlés par des butées. Leur commande peut être manuelle ou partiellement automatique. Bien que limités en flexibilité, ils sont appropriés pour des travaux en moyenne série, offrant des opérations simples et précises grâce à des outillages spécifiques (**Figure 1.17**). [13]



Figure 1.17 : machine de tour semi-automatique

[16].

- **Tours automatiques** : Ces machines comportent plusieurs outils montés tangentiellement à la pièce. Les mouvements sont contrôlés par des cames spécifiques, qui déterminent la vitesse d'avance et la course de chaque outil. Chaque came est dédiée à une opération particulière sur une pièce donnée. Ces tours fonctionnent de manière entièrement automatique, mais présentent une flexibilité nulle. Ils sont adaptés aux très grandes séries de production [16].
- **Tours automatiques multibroches** : Ce type de tour est équipé, par exemple, de huit broches, chacune associée à un outil différent. Ces huit outils travaillent simultanément, réalisant des opérations distinctes. Les broches tournent par intervalles d'un huitième de tour pour présenter successivement la pièce devant chaque outil. Après un tour complet, la pièce est usinée. Il est possible de travailler directement dans la barre. Les réglages de ces machines sont longs, et les temps de transition entre séries immobilisent la machine. Ces tours sont réservés aux grandes et très grandes séries, principalement pour des pièces de petites dimensions, en raison de l'espacement entre les broches (**Figure 1.18**) [13].



Figure 1.18 : machine de tour multibroche

[16]

- **Tours à commande numérique (CN)** : Comme pour les tours à copier, la génératrice de la pièce peut être quelconque. Cependant, ici, la trajectoire de l'outil est obtenue par le

déplacement simultané de deux axes, dont les positions successives sont contrôlées par un calculateur exécutant un programme spécifique à la pièce. Ces tours sont généralement équipés d'un magasin d'outils et peuvent comporter un système automatique de chargement des pièces

- Leur grande flexibilité les rend particulièrement adaptés au travail unitaire ou aux petites séries répétitives [13].

1.7.4 Support et entraînement des pièces sur un tour

Il existe trois principaux types de montage de la pièce sur le tour :

- **Montage en l'air** : Utilisé pour les pièces courtes ($L < 4D$), ce montage consiste à fixer une extrémité de la pièce dans le mandrin, tandis que l'autre reste libre (**Figure 1.19**) [17].

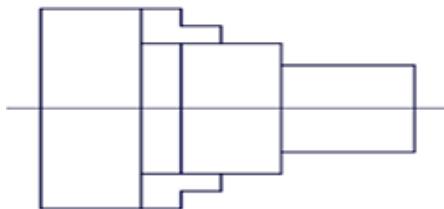


Figure 1.19 : Montage en l'air

[17].

- **Montage mixte** : Adapté aux pièces de longueur intermédiaire ($4D < L < 8D$), ce montage consiste à fixer une extrémité dans le mandrin, tandis que l'autre est soutenue par la poupée mobile (**Figure 1.20**).

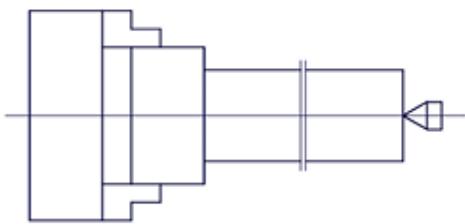


Figure 1.20 : Montage mixte

[17]

- **Montage entre-pointes** : Utilisé pour l'usinage des pièces longues ($L > 8D$), ce montage soutient la pièce aux deux extrémités à l'aide de deux pointes, complétées éventuellement par une lunette (**Figure 1.22**) [17].

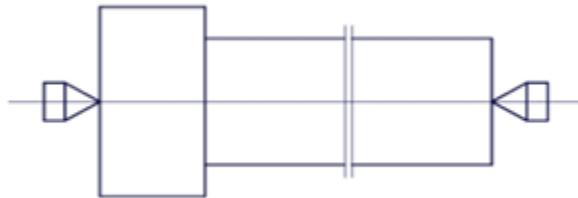


Figure 1.21 : Montage entre-pointe

[17]

1.7.5 Différentes opérations de tournage

Les principales opérations de tournage comprennent :

- **Chariotage** : Opération consistant à usiner une surface extérieure cylindrique ou conique par déplacement longitudinal ou transversal de l'outil (**Figure 1.22**)

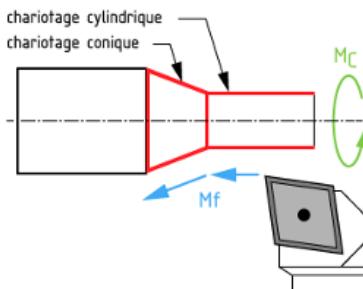


Figure 1.22 : Chariotage.

- **Dressage** : Opération qui consiste à usiner une surface plane, extérieure ou intérieure, perpendiculaire à l'axe de rotation de la broche (**Figure 1.23**)

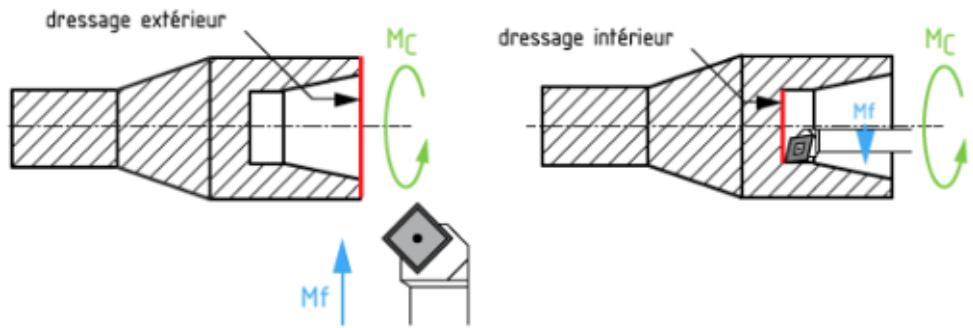


Figure 1.23 : Dressage extérieur et intérieur

- **Alésage :** Opération consistant à usiner une surface intérieure cylindrique ou conique, afin d'en améliorer la précision dimensionnelle et l'état de surface (Figure 1.24) [14].

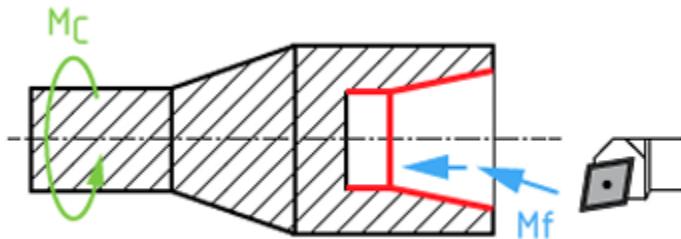


Figure 1.24 : Alésage

- **Perçage :** Opération consistant à réaliser un trou, débouchant ou borgne, à l'aide d'un foret, généralement selon un axe confondu avec celui de la pièce (Figure 1.25)

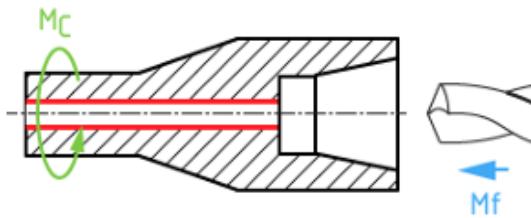


Figure 1.25 : Perçage.

Rainurage : Opération permettant d'usiner une rainure intérieure ou extérieure destinée, par exemple, au logement d'un circlips ou d'un joint torique (Figure 1.26).

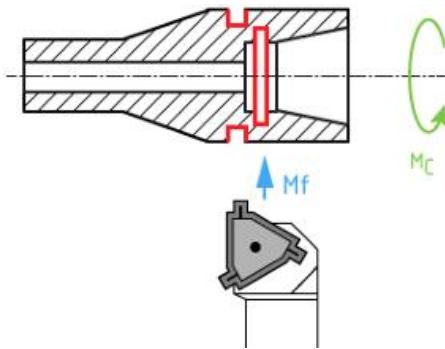


Figure 1.26 : Rainurage

- **Chanfreinage** : Opération visant à usiner un petit cône pour supprimer un angle vif sur la pièce (Figure 1.27).

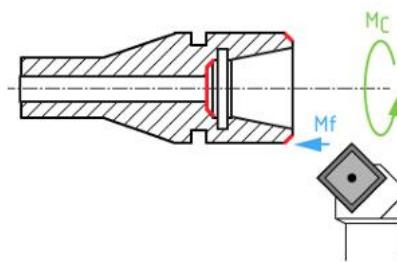


Figure 1.27 : Chanfreinage

- **Tronçonnage** : Opération consistant à usiner une rainure jusqu'à l'axe de la pièce pour en détacher un tronçon (Figure 1.28).

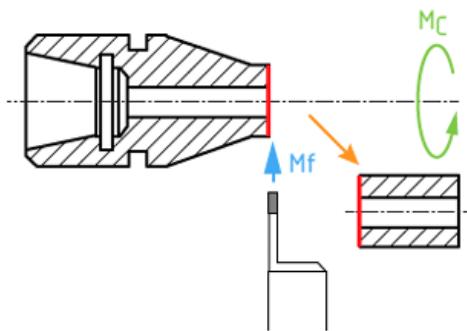


Figure 1.28 : Tronçonnage

- **Filetage** : Opération consistant à réaliser un filetage, qu'il soit extérieur ou intérieur (Figure 1.30).

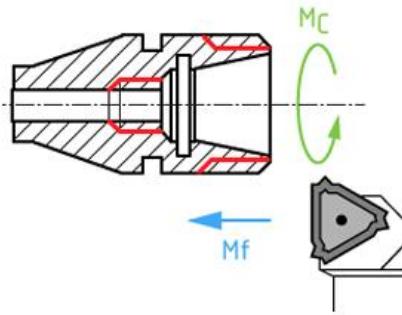


Figure 1.29 : Filetage

1.8.6 Conditions de coupe

1.8.6.1 Principe

Lors d'un usinage par enlèvement de matière, la configuration typique consiste en une lame d'outil qui pénètre dans la matière pour détacher un copeau. L'outil suit une trajectoire relative par rapport à la pièce à usiner, assurée par les composants mécaniques de la machine-outil.

Afin d'obtenir un usinage optimal caractérisé par un bon état de surface, une productivité élevée et une usure limitée de l'outil, il est essentiel de bien paramétrier les conditions de coupe. Plusieurs facteurs influencent le choix de ces paramètres, notamment :

- Le type de machine (tournage, fraisage, perçage).
- La puissance disponible de la machine.
- La nature du matériau usiné (acier, aluminium, etc.).
- La composition de l'outil (acier rapide, carbure, etc.).
- Le type d'opération (perçage, chariotage, surfaçage).

L'objectif final étant d'obtenir une pièce usinée avec des performances optimales, il est nécessaire de définir précisément les paramètres de coupe suivants (**Figure 1.30**) :

- La vitesse de coupe (V_c).
- La vitesse d'avance (F).
- La profondeur de passe (a).

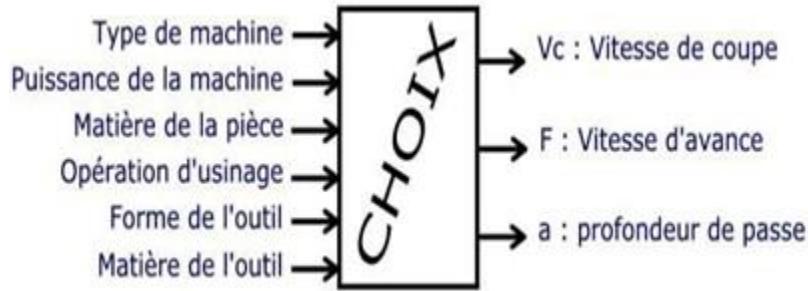


Figure 1.30 : Choix des paramètres de coupe

[18]

1.8.6.2 Critères de choix des paramètres d'usinage

Tous ces critères sont étroitement liés et influencent ensemble le choix des paramètres d'usinage.

1.8.6.1 Type de machine

Le choix de la machine dépend du type d'opération à réaliser. Selon la méthode d'usinage souhaitée, il faut opter pour un tournage, un fraisage ou un perçage. Il existe souvent plusieurs solutions pour effectuer un même type d'usinage.

1.8.6.2 Puissance de la machine

La puissance de la machine conditionne ses performances. Deux cas de figure sont à considérer :

- **Usinage d'ébauche** : l'objectif est d'enlever un maximum de matière en un minimum de temps, c'est-à-dire maximiser le débit de copeaux. La machine et la fixation de la pièce doivent donc être suffisamment robustes pour éviter tout blocage ou déplacement accidentel de la pièce.
- **Usinage de finition** : la priorité est la qualité de la surface et la précision des dimensions. Les efforts de coupe sont alors plus faibles et la puissance de la machine devient moins critique.

1.8.6.3 Nature du matériau

Les efforts de coupe varient fortement selon le matériau usiné (par exemple, polystyrène versus acier). Ce critère impacte notamment le choix de la puissance machine nécessaire.

1.8.6.4 Type d'opération

Comme pour le choix de la machine, la nature de l'opération influe sur les paramètres et la configuration de l'usinage.

1.8.6.5 Forme de l'outil

La forme de l'outil doit être adaptée au type d'usinage, de manière à optimiser la qualité et l'efficacité.

1.8.6.6 Matériau de l'outil

L'outil doit être plus dur et résistant que la pièce à usiner. Son matériau influence directement son usure et sa durée de vie.

1.8.6.7 Vitesse de coupe (Vc)

La pièce est entraînée en rotation par la broche à une certaine vitesse angulaire ω (**Figure 1.31**). La vitesse de coupe, c'est-à-dire la vitesse relative entre la surface de la pièce et l'outil, est donnée par la formule suivante [16]:

$$V_c = \frac{\pi * D * n}{1,000}$$

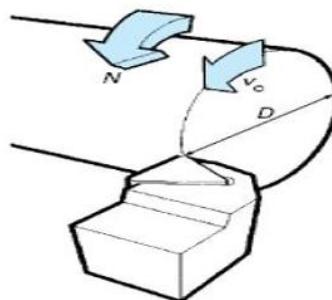


Figure 1.31 : Vitesse de coupe V_c

[19]

La vitesse de la broche est donnée par l'expression suivante :

$$N (tr/min) = \frac{1000 * V_c (m/min)}{\pi * D (mm)}$$

Par conséquent, un choix judicieux de la vitesse de coupe V_c nécessite de prendre en compte l'ensemble des paramètres précédemment évoqués.

La **vitesse d'avance** V_f (mm/min), représentée dans la **Figure 1.32**, correspond à la vitesse à laquelle l'outil est déplacé par rapport au bâti de la machine.

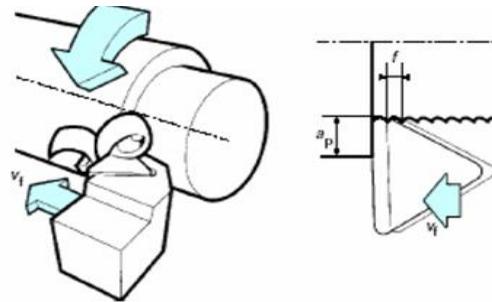


Figure 1.32 : Vitesse d'avance V_f

[19].

L'avance par tour f (mm/tr) désigne la distance parcourue par l'outil à chaque tour de la pièce. Ce paramètre est essentiel pour la qualité de la surface usinée : il influence à la fois l'épaisseur des copeaux et leur mécanisme de rupture.

La relation entre ces grandeurs est donnée par la formule suivante :

$$V_f = f * N$$

Où :

N : la vitesse de rotation de la pièce (tr/min)

1.9 Les types d'usinage sans enlèvement de matière

Dans de nombreuses applications industrielles, les pièces mécaniques sont soumises à des conditions de service sévères. Il est donc impératif que les matériaux utilisés présentent de bonnes propriétés mécaniques. Cependant, le choix de matériaux à haute performance peut s'avérer coûteux, ce qui représente un enjeu économique majeur pour les industriels. Une alternative efficace consiste à recourir à des procédés de finition par des traitements mécanique de surface appliqués à des matériaux conventionnels, permettant d'atteindre les performances requises tout en optimisant les coûts [20].

1.9.1 Traitement mécanique de surface

Les traitements mécaniques de surface (TMS) consistent à déformer plastiquement les couches superficielles d'un métal par une action mécanique. Cette action peut être réalisée par projection de particules (grenailage, sablage...) ou par déformation sous pression (brunissage, galetage...). Elle permet de modifier et d'améliorer les caractéristiques géométriques et mécaniques du matériau, telles que la rugosité, la forme, les contraintes résiduelles, voire même la dureté.

Ces traitements s'appliquent à tous les métaux déformables ($A > 6\%$), quel que soit leur état initial. Leur efficacité dépend des propriétés mécaniques du métal, notamment de son allongement et de sa dureté. Comme évoqué précédemment, les propriétés mécaniques des métaux sont liées à l'élasticité et à la plasticité. Lorsque la contrainte dépasse la limite élastique, une déformation plastique irréversible se produit, due au déplacement des atomes sur de longues distances au sein des grains. Cela modifie durablement la forme, la structure et les propriétés de la surface.

Selon Y.G. SHNEIDER, dans des conditions normales d'utilisation, la résistance à l'usure d'une surface est influencée à hauteur de 25 à 30 % par la résistance propre des reliefs, tandis que sa micro-géométrie régulière et optimisée contribue à 70 à 75 % [20].

1.9.2 Importance des traitements mécaniques de surface

D'après ce qui précède, la surface d'un solide représente une zone de transition sur quelques distances atomiques, séparant le matériau intérieur de son environnement (généralement le vide ou un gaz). Ses propriétés physiques, chimiques, structurales et électroniques diffèrent de celles du cœur du matériau, et tendent à s'en rapprocher au fur et à mesure qu'on pénètre vers l'intérieur.

La tenue mécanique de cette couche superficielle est cruciale, car elle est directement impliquée dans des sollicitations telles que le frottement ou l'usure. De plus, de nombreuses défaillances (rupture fragile, fatigue, corrosion sous contrainte) trouvent leur origine à la surface du matériau.

Les opérations de mise en forme influencent fortement la nature des couches superficielles. Par exemple, selon que l'usinage implique de la coupe, de la déformation ou encore de l'électroérosion, on observe des variations significatives de la composition, des contraintes résiduelles ou encore de la structure d'un acier.

Les traitements mécaniques de surface (TMS) induisent des modifications de l'état physique et structural, dépendant du procédé, de la profondeur affectée et aussi :

- des opérations de **prétraitement** (préparation de surface),
- des opérations de **post-traitement** (finitions ou parachèvements).

L'atteinte de bonnes propriétés mécaniques en surface dépend du choix pertinent des traitements. Cependant, les exigences peuvent parfois se contredire :

- une bonne résistance à l'usure nécessite un durcissement superficiel (carburation, nitruration, trempe, chromisation dure...);
- une résistance accrue à la fissuration suppose une surface plastique soumise à des contraintes de compression (comme avec l'écrouissage ou un dépôt de nickel);
- pour faciliter le glissement entre deux surfaces, des traitements comme la sulfuration ou le placage peuvent améliorer la plasticité sans altérer fortement la résistance à l'usure.

En conclusion, les TMS ont un impact non négligeable sur la topographie de surface. Leur diversité et leurs paramètres d'application permettent d'obtenir un large éventail de propriétés, non seulement en termes de rugosité initiale, mais aussi de son évolution lors du frottement ou du rodage.

La **Figure 1.33** illustre les topographiques relatives à quelques modes de finition [21].

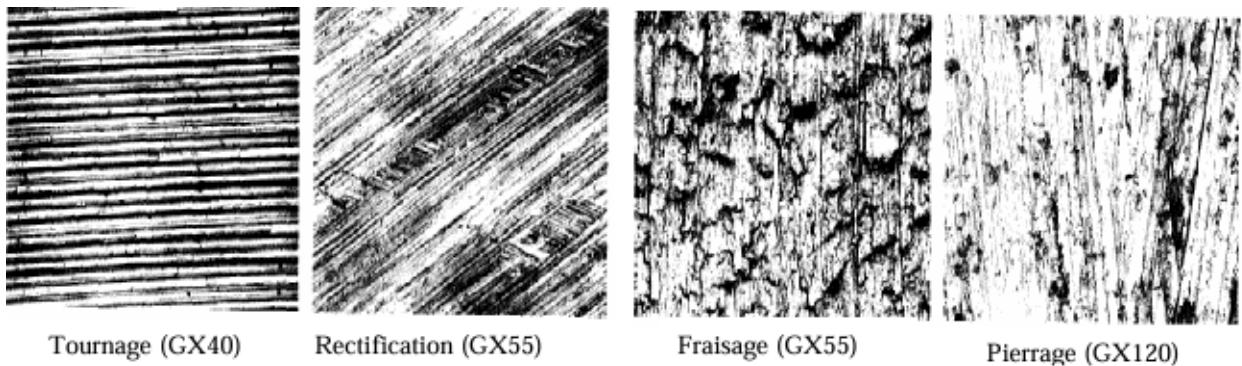


Figure 1.33 : Topographiques relatives à quelques modes de finition

[21]

1.9.2 Types de Traitement Mécanique de surface

1.9.2.1 Grenaillage – Traitement par projection de particules

1.9.2.1.1 Définition

Le grenaillage est un procédé qui consiste à projeter à grande vitesse des particules (souvent des billes métalliques) sur la surface d'un objet afin d'en modifier la structure superficielle. Il est utilisé pour le nettoyage, le formage de pièces minces (*peen forming*) et la mise en contrainte superficielle (*shot peening*). On parle aussi de grenaillage angulaire lorsque les particules projetées ont une

forme non sphérique, comme dans le cas du sablage, utilisé pour le décapage de surface (**Figure 1.34**) [24].

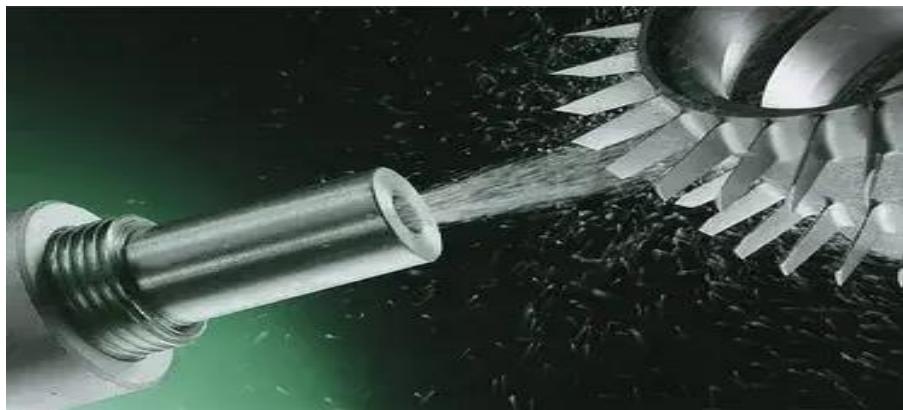


Figure 1.34 : Grenaillage

1.9.2.1.2 Objectifs généraux

Les objectifs principaux sont :

- Améliorer l'aspect et les propriétés techniques d'une surface par un traitement comparable au sablage.
- Appliquer une précontrainte (*shot peening*) afin d'optimiser les performances techniques des surfaces.

1.9.2.1.3 Le principe

Le principe repose sur la projection continue et rapide (jusqu'à 100 m/s) de billes en acier, verre ou céramique sur la surface à traiter. Ce martelage provoque une déformation plastique localisée, en dépassant la limite d'élasticité sur une fine couche de surface (quelques centièmes à dixièmes de mm).

- Le résultat dépend de plusieurs paramètres
- La matière de la pièce.
- La taille et le type de grenade.
- Le débit et la vitesse d'impact.
- La direction du jet.

Les procédés de projection incluent :

- **Pneumatique** : la grenade, mélangée à de l'air comprimé, est projetée via une buse ; méthode ciblée, souvent en cabine à manche.

- **Mécanique** : une roue à palettes projette la grenade par force centrifuge dans une grenadeuse à turbine.
- **Par ultrasons** : des billes sphériques sont mobilisées par une sonotrode dans une enceinte fermée, avec un impact plus doux sur la rugosité.

1.9.2.1.4 Avantages

Parmi les avantages, on peut citer :

- Ne nécessite pas de retouche après le traitement,
- Provoque une déformation très faible des pièces,
- Augmente fortement la durée de vie et la résistance à la fatigue (jusqu'à $\times 10$ pour les ressorts),
- Permet de concevoir des pièces plus légères et économiques,
- Améliore l'efficacité des traitements anticorrosion ultérieurs,
- Élimine les défauts des surfaces brutes de fonderie,
- Crée des micro-poches favorisant la lubrification,
- Compatible avec de nombreux métaux : aciers, fontes, bronze, aluminium, magnésium.

1.9.2.2 Martelage – Traitement par choc

Le martelage est un procédé de traitement mécanique de surface consistant à appliquer des impacts répétés à l'aide d'un marteau, manuel ou pneumatique. Cette action modifie la structure de la surface, créant une déformation plastique qui améliore ses propriétés mécaniques (dureté, résistance à la fatigue, contraintes résiduelles) [25].

Exemple : Le matériau étudié est un acier de construction à haute résistance S690, fourni sous forme de plaques de 10 mm d'épaisseur soudées bout à bout. Les zones du pied de soudure sont ensuite martelées manuellement ou automatiquement avec un marteau pneumatique (rayon R = 2 mm, fréquence 80 Hz). La vitesse est de 18 cm/min en manuel et 10 cm/min en automatique avec un bras robotisé [22].

1.9.3 Brunissage - Traitement de finition par pression

Le traitement de finition par pression est un procédé à froid sans enlèvement de matière. Il repose sur l'aptitude des matériaux à subir une déformation élasto-plastique en surface. Sous l'effet de la pression exercée par un outil (bille, galet, pointe sphérique) en métal dur, alliage ou diamant, les microreliefs initiaux de la pièce se déforment plastiquement. Ils se compriment et forment un nouveau relief plus régulier (**Figure 1.35**) [26].

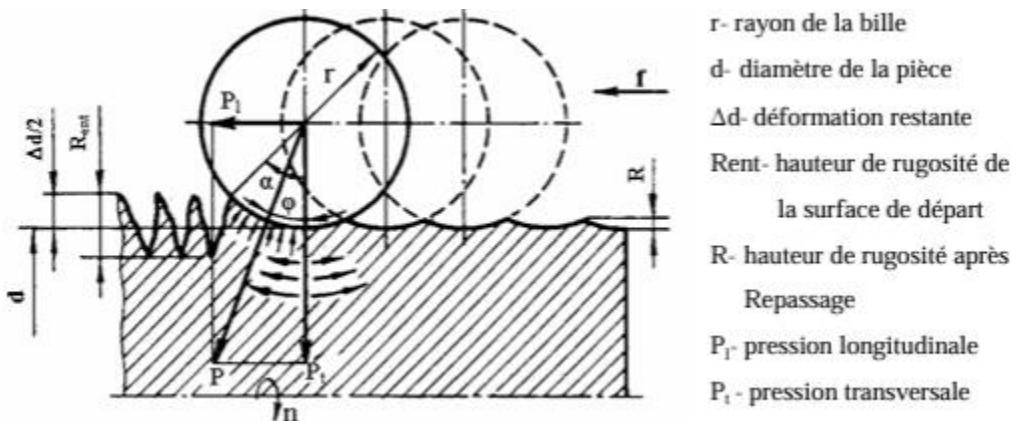


Figure 1.35 : Schéma de la déformation des irrégularités de surface lors d'un traitement par bille

1.9.2.2 Brunissage

Le brunissage est l'un de ces procédés. Il repose sur une déformation plastique superficielle visant à améliorer l'état de surface. Ce procédé est particulièrement adapté au parachèvement des surfaces de contact de pièces métalliques, qu'il s'agisse de matériaux durs ou plastiquement déformables [23]. L'opération est réalisée à l'aide d'un outil spécifique appelé brunissoir, qui agit mécaniquement sur la surface sans enlèvement de matière.

1.9.2.3 Principe de brunissage

Le brunissoir applique une pression contrôlée sur les crêtes de la surface usinée, provoquant un fluage localisé de la matière vers les zones en creux. Ce phénomène, induit progressivement lors de l'avance de l'outil, permet de niveler les aspérités présentes à la surface. Ainsi, le procédé conduit à la formation d'une couche superficielle écrouie, témoignant d'une amélioration notable de l'état de surface (Figure 1.36) [21].

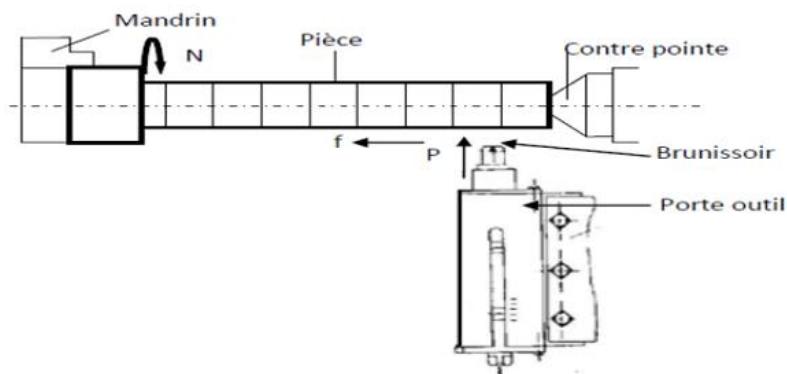


Figure 1.36 : Principe de brunissage

Le brunissage est réalisé à l'aide d'un outil muni d'une pointe en diamant ou d'une bille en acier trempé ou en carbure métallique. Il s'agit d'un procédé simple à mettre en œuvre, pouvant être effectué aussi bien sur des machines-outils conventionnelles (comme les tours ou fraiseuses) que sur des équipements spécialisés, tels que les brunisseuses. La géométrie de la partie active de l'outil est généralement sphérique, avec un rayon variant entre 0,8 mm et 5 mm. Toutefois, selon les exigences de l'usinage, des formes cylindriques, coniques ou même toriques peuvent être utilisées (Figure 1.37).

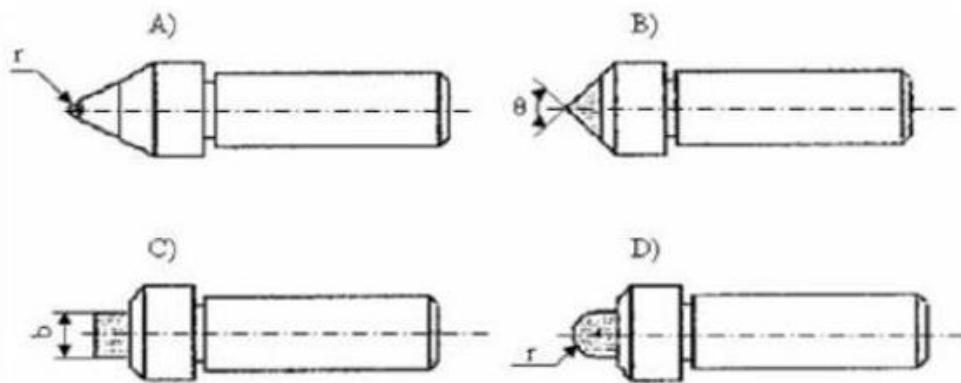


Figure 1.38 : Schéma du brunisseur A) sphérique B) conique C) cylindrique plate D) cylindrique bombé

[24]

1.9.2.4 Le dispositif de brunissage

La partie active sphérique (1) utilisée pour le brunissage est basée sur un porte-outil installé et serré dans le mandrin spéciale (2) au moyen d'une vis et se déplace dans le manchon guide (4). La

pression de brunissage est assurée à l'aide du ressort (5) qui est maintenu entre le mandrin et la butée mobile (6). Le réglage de l'effort de brunissage est effectué à l'aide de la vis de réglage (7) qui s'appuie sur le plateau (8).

La **Figure 1.38** représente le dispositif qui nous a permis d'installer le brunissoir sur une fraiseuse, sa partie supérieure rentre dans l'entrée de la fraiseuse, la partie inférieure reçoit le brunissoir qui reçoit à son tour la bille.

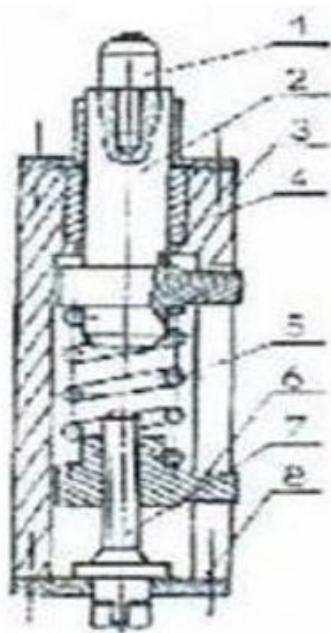


Figure 1.38 : Schéma du brunissoir

[25]

1.9.2.5 Intérêt et paramètres du brunissage

La recherche de surfaces présentant une qualité optimale, combinée aux exigences de rentabilité économique, a conduit à l'essor du brunissage en tant que procédé de finition performante. Cette technique permet d'atteindre des états de surface et des tolérances dimensionnelles comparables à ceux obtenus par des procédés classiques de finition tels que la rectification ou le tournage de précision sur matériaux durs. Il est bien établi que, dans les procédés d'usinage conventionnels, les coûts de fabrication augmentent de manière significative à mesure que la rugosité finale diminue. [36]

Le brunissage permet ainsi de réduire les coûts, non seulement par une diminution du temps de traitement, mais également grâce à une réduction des dépenses liées à l'outillage et à la préparation des pièces. De plus en plus adopté comme opération de parachèvement, le brunissage tend à remplacer les méthodes traditionnelles d'usinage par enlèvement de matière. Il constitue ainsi une

alternative technico-économique intéressante aux procédés conventionnels. Les performances du brunissage dépendent de nombreux paramètres de coupe, parmi lesquels : la vitesse d'avance, la vitesse de rotation et la force appliquée [27, 28].

D'autres facteurs peuvent également être pris en compte, tels que le nombre de passes, le rayon de la bille ou de la pointe de l'outil, la profondeur de pénétration ou encore l'interférence entre outil et surface [29, 30].

Enfin, les résultats obtenus dépendent fortement de la combinaison spécifique des paramètres opératoires, du type d'outil, de la nature du matériau traité, des conditions de traitement, ainsi que de l'état initial de la surface avant l'opération.

1.9.2.6 Effets du brunissage

Le brunissage, en induisant une déformation plastique superficielle, permet un lissage du profil micro géométrique de la surface ainsi qu'un durcissement par écrouissage des couches externes. Ces effets entraînent une amélioration significative des propriétés mécaniques et technologiques de nombreux alliages métalliques [31].

1.9.2.7 Effets sur la qualité géométrique de surface

Dans le domaine industriel, le brunissage est considéré comme étant un procédé de finition. Considéré dans l'industrie comme un procédé de finition, le brunissage est également qualifié de procédé d'usinage sans enlèvement de matière, c'est-à-dire à volume constant. L'amélioration de la qualité de surface résulte principalement de la réduction de la rugosité superficielle. Sous l'effet de la pression exercée par l'outil, les aspérités de surface s'écrasent, conduisant à une surface plus lisse tant sur le plan macro que micro-géométrique [26, 27].

Ce procédé permet d'abaisser la rugosité R_a jusqu'à $0,14 \mu\text{m}$, à partir d'une rugosité initiale avoisinant $4 \mu\text{m}$ [38]. Selon K. S. Rababa, l'application du brunissage sur des échantillons cylindriques en acier doux améliore sensiblement l'état de surface comparé à celui obtenu après un usinage classique. Il a également été observé qu'un brunissage à haute vitesse sur un acier allié (type O1) permet d'atteindre une rugosité optimale [29].

La **Figure 1.39** schématise l'effet de l'effort du brunissage sur la rugosité de surface.

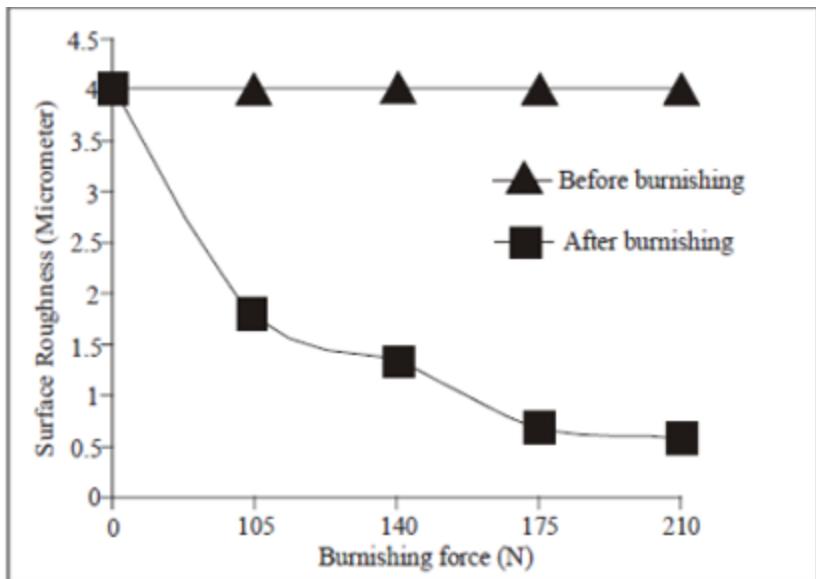


Figure 1.39 : Effet de l'effort du brunissage sur la rugosité de surface

[41]

Ces effets dépendent aussi de plusieurs paramètres influents, notamment la vitesse de rotation, l'avance, le rayon de la bille, ainsi que le nombre de passes effectuées. Ces variables sont généralement considérées comme les principaux facteurs d'entrée du procédé, ayant un impact significatif sur la qualité de la surface obtenue.

Selon plusieurs travaux, il a été observé qu'une vitesse de brunissage élevée combinée à une faible valeur d'avance (**Figure 1.40**) permet d'améliorer notablement la rugosité de surface. Cette amélioration peut être attribuée à l'élévation de la température dans la zone de déformation plastique, induite par l'augmentation de la vitesse. Cette température tend à se stabiliser après un certain seuil, rendant le matériau plus visqueux. Ce comportement favorise une meilleure déformation plastique et réduit le frottement entre l'outil et la pièce, ce qui diminue la rugosité et améliore l'aspect final de la surface.

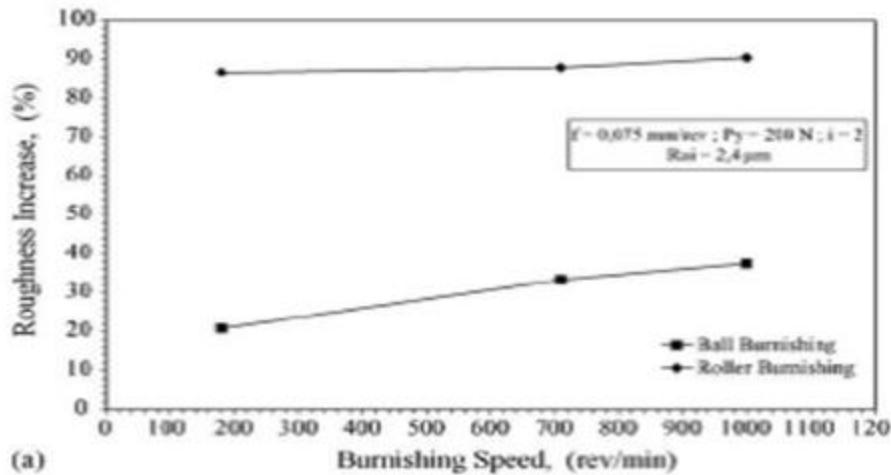


Figure 1.40 : Influence de la vitesse de brunissage sur la rugosité

[32].

Il a été démontré que des valeurs d'avance trop élevées nuisent à la qualité de l'état de surface obtenu après brunissage. Par analogie avec les procédés d'usinage conventionnels, l'augmentation de l'avance accroît le pas des sillons laissés sur la surface de la pièce (**Figure 1.41 a)** [33].

Dans ce cas, les aspérités de surface ne sont pas correctement nivelées, ce qui dégrade l'aspect géométrique de la surface et entraîne une augmentation de la rugosité.

En revanche, d'autres études ont mis en évidence que l'utilisation de faibles valeurs d'avance, combinées à des efforts modérés ou à des vitesses de brunissage élevées, permet d'obtenir des rugosités particulièrement faibles, souvent inférieures à $0,3 \mu\text{m}$ (**Figure 1.41 b)** [38].

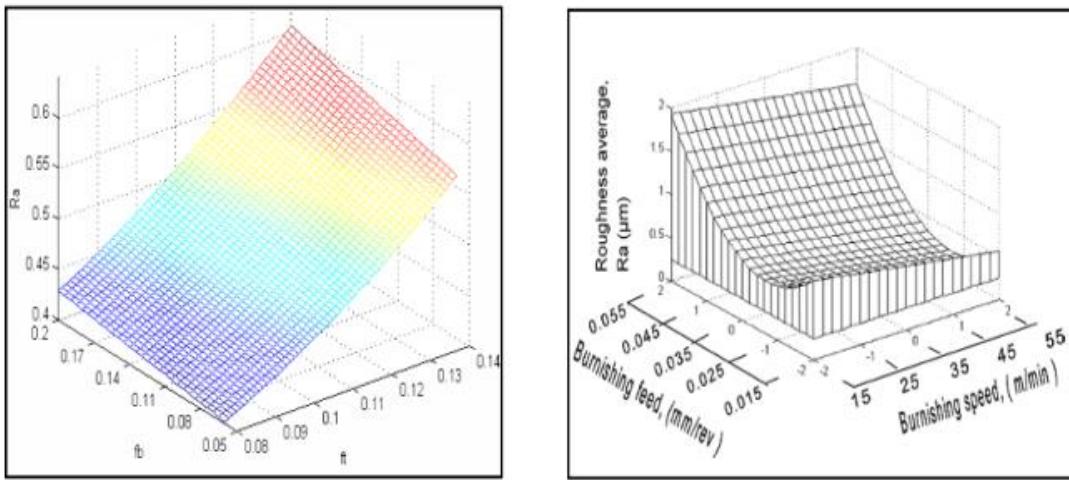


Figure 1.41 : Influence de l'avance sur la rugosité : a) tournage [34], b) brunissage [28].

Le brunissage est un procédé mécanique à froid qui améliore la qualité de surface en réduisant la rugosité et en durcissant la couche superficielle. Les paramètres tels que la vitesse, l'avance, la force, le rayon de l'outil et le nombre de passes influencent fortement la rugosité. Ce traitement améliore aussi la résistance à l'usure, à la fatigue et limite la propagation des fissures.

1.9.2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu sur les références bibliographiques relatives à la fabrication mécanique, incluant des explications sur les types des machines et des éclaircissements concernant l'effet des paramètres de coupe sur la rugosité des surfaces usinées ainsi que les mesures à prendre pour améliorer la productivité et la qualité des produits réalisées. En effet, la qualité de surface usinée dépend de plusieurs facteurs, notamment : la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de coupe, le rayon de l'outil de coupe et la lubrification de la zone de coupe. Pour illustrer l'impact de ces facteurs, nous prévoyons de réaliser une étude basée sur les plans d'expériences en utilisant le plan factoriel complet et le plan de box behenken qui seront développées en détail dans le prochain chapitre.

Chapitre 2 : Les plans d'expériences

2 Introduction

Dans le cadre d'une démarche expérimentale, l'expérience est définie comme une action volontairement menée sur un système afin d'en observer les conséquences et d'en analyser les effets. Elle constitue le seul moyen fiable pour établir des relations de cause à effet entre les paramètres manipulés et les résultats obtenus. Dans ce qui suit, sera présentée la méthodologie basée sur les plans d'expériences qui représente un important outil d'analyse de décisions et d'actions.

2.1. Définition des plans d'expériences

Les plans d'expériences (DOE – Design of Experiments) sont des méthodes rigoureuses permettant de structurer et d'optimiser les essais expérimentaux. Leur objectif principal est de déterminer et quantifier l'influence des facteurs d'entrée (ou variables indépendantes) sur une ou plusieurs réponses du système étudié. Le principe consiste à faire varier simultanément, selon une logique bien définie, les niveaux de certains paramètres d'entrée afin de construire un modèle mathématique liant les entrées et les sorties. Ce modèle sert ensuite à prédire, analyser et optimiser le comportement du système.

On a ainsi recours aux plans d'expériences dès que le problème étudié peut être formulé sous la forme fonctionnelle suivante [42] :

$$Y = f(X_i)$$

Où :

Y : les réponses mesurées.

X_i : les facteurs influents.

La **Figure 2.1** illustre le schéma général d'un système où ce type d'analyse s'applique, en mettant en évidence les liens entre les variables d'entrée, le processus, et les résultats obtenus.

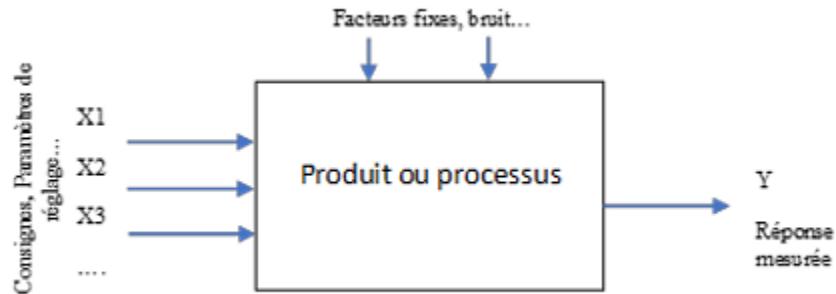


Figure 2.1 : Schéma général d'un processus [42].

2.2. Domaines d'utilisation et objectifs d'un plan d'expérience

2.2.1. Domaines d'utilisation

Les plans d'expériences sont utilisés dans les études industrielles en recherche développement. Ils interviennent dans de nombreux domaines industriels. On peut notamment citer :

- 2 L'industrie mécanique et automobile.
- 3 L'industrie métallurgique.
- 4 L'industrie chimique, pétrochimique et pharmaceutique.

2.2.2. Objectif d'utilisation d'un plan d'expérience

Les plans d'expériences sont utilisés pour identifier les facteurs influents, optimiser les réglages d'un procédé ou d'un équipement, et modéliser le comportement d'un système. Ils s'inscrivent dans une démarche d'amélioration continue, en permettant une meilleure maîtrise de la qualité sans recourir à des modifications complexes ou coûteuses [42].

2.3. Notion d'espace expérimental ou domaine d'étude

L'expérimentateur s'intéresse à une grandeur mesurable appelée réponse, qui constitue la variable d'intérêt principale. La valeur de cette réponse dépend de plusieurs paramètres contrôlables, appelés *facteurs*. Chaque facteur correspond à une variable expérimentale pouvant être représentée par un axe gradué, dont l'orientation traduit l'évolution de ses niveaux au cours des essais (**Figure 2.2**)

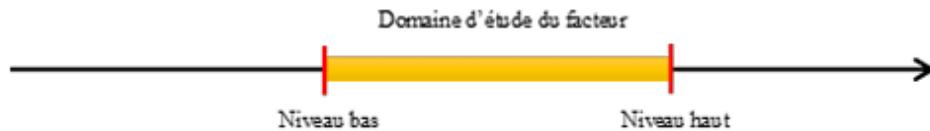


Figure 2.2 : Domaine d'étude d'un facteur [43]

2.4. Notion de surface de réponse

Pour représenter un plan d'expérience de manière géométrique, il faut parfois un espace plus grand, surtout quand plusieurs facteurs sont pris en compte. Dans un espace à trois dimensions, chaque point représente une réponse obtenue pour certaines valeurs des facteurs. Le défi principal dans la conception des expériences réside dans la détermination du nombre et de la localisation des points expérimentaux (**Figure 2.3**) [43].

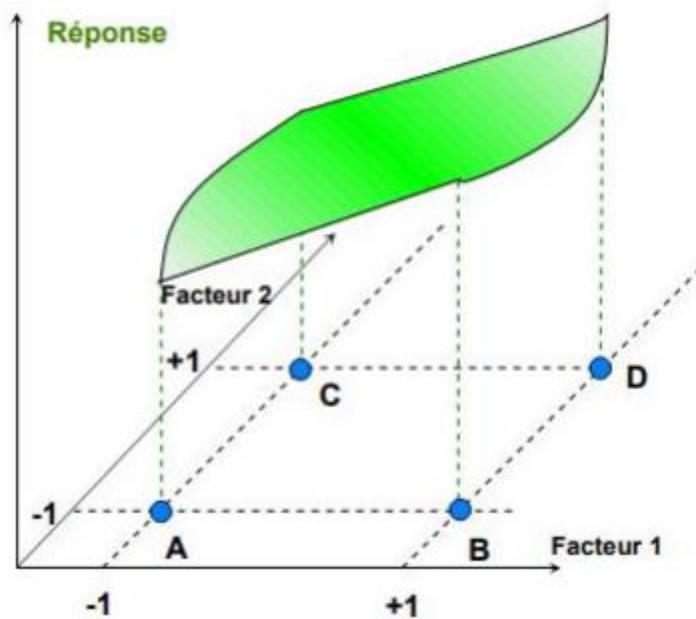


Figure 2.3 : Réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse.

Les réponses mesurées en certains points du plan d'expériences permettent de déterminer l'équation de la surface de réponse [43].

2.5. Méthode de plan factoriel complet

2.5.1. Définition du plan factoriel complet

Parmi les différentes méthodes de conception expérimentale, les plans factoriels sont largement utilisés en raison de leur simplicité de mise en œuvre et de leur capacité à révéler rapidement l'existence d'interactions entre les facteurs. Un plan factoriel complet correspond à la réalisation de toutes les combinaisons possibles des niveaux de chaque facteur aux limites du domaine d'étude. Il représente ainsi le nombre maximal d'essais pour ce type de plan. Le nombre total d'expériences, noté N , est donné par la formule suivante :

$$N = 2^k$$

Où

k : nombre de facteur

2.5.2. Modèle mathématique

Dans le cadre de la modélisation d'un plan d'expériences, une relation mathématique est postulée a priori pour exprimer la réponse en fonction des facteurs. Cette relation prend la forme d'un développement polynomial, issu d'un développement limité de Taylor-Maclaurin. En supposant les dérivées constantes, le modèle peut être représenté par un polynôme de degré variable :

$$Y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_{ij} + \dots + \sum a_{ii} x_i x_i + a_j \dots z + x_i x_j \dots z$$

Où :

Y : réponse mesurée au cours de l'expérience (grandeur d'intérêt),

x_i : niveau du facteur i ,

$a_0, a_{ij} \dots$: coefficients du modèle (à déterminer).

Pour garantir la validité du modèle, deux aspects essentiels doivent être pris en compte :

- **L'inadéquation du modèle** : elle désigne l'écart entre les prédictions théoriques et les données expérimentales réelles.

- **Les erreurs expérimentales** : elles reflètent les variations inhérentes à la réalisation des essais et à la précision des mesures.

Dans ce contexte, on travaille avec un système de n équations (correspondant à n essais) comportant P coefficients inconnus. Le modèle peut alors s'écrire sous forme matricielle :

$$Y = x_a + e$$

Où :

Y : le vecteur des réponses observées.

x : la matrice des niveaux des facteurs.

a : le vecteur des coefficients à estimer.

e : le vecteur des erreurs, représentant la différence entre les valeurs observées et celles prédictes par le modèle.

2.5.3. Élaboration d'un plan d'expériences

Pour élaborer un plan d'expériences, plusieurs étapes sont nécessaires :

- Clarification des objectifs visés.
- Identification des facteurs à étudier ainsi que de leurs plages de variation.
- Création de la matrice expérimentale.
- Réalisation des expériences.
- Analyse des résultats et création du modèle correspondant.
- Validation par un essai supplémentaire si nécessaire.

2.5.4. Définition d'une interaction

On parle d'interaction lorsque l'effet d'un facteur sur la réponse dépend du niveau d'un autre facteur. Autrement dit, une interaction est présente lorsque la variation de la réponse induite par un facteur n'est pas constante selon les niveaux de l'autre facteur. Ainsi, les effets simples d'un facteur ne sont pas indépendants, mais influencés par les niveaux de l'autre variable.

Pour optimiser le nombre d'essais, le **plan factoriel fractionnaire** constitue une alternative efficace. Il permet de réduire significativement le nombre de combinaisons expérimentales tout en

conservant une capacité d'analyse acceptable. Cette approche économise à la fois du temps et des ressources, tout en fournissant des estimations pertinentes pour l'évaluation du processus étudié.

Dans ce cadre, une étude expérimentale sera présentée dans le chapitre suivant (**Chapitre 3**). Elle vise à analyser l'influence des paramètres du système d'usinage, ainsi que les interactions éventuelles entre ces facteurs, en s'appuyant sur l'interprétation des résultats obtenus [43].

2.6. Choix du plan

Le choix du plan expérimental revêt une importance majeure, car il conditionne la quantité et la qualité des informations extraites, ainsi que leur interprétation.

Dans le cadre de cette étude, un plan à trois niveaux a été retenu pour chacun des facteurs, ce qui coïncide avec la structure du plan de Box-Behnken. Ce choix s'explique par des considérations pratiques :

- le nombre d'expériences est limité en raison de contraintes expérimentales.
- le modèle mathématique visé est de second degré, ce qui permet d'obtenir des résultats plus précis et fiables.

2.7. Plan de Box-Behnken

Le plan de Box-Behnken, proposé en 1960 par Box et Behnken, permet la construction directe de modèles quadratiques. Tous les facteurs y prennent trois niveaux codés : -1, 0 et +1. Ces plans sont appréciés pour leur simplicité de mise en œuvre et leur caractère séquentiel, qui permet d'ajouter de nouveaux facteurs sans invalider les essais déjà réalisés.

Pour trois facteurs, le plan est construit dans un espace cubique ; pour quatre facteurs ou plus, il s'étend à un hypercube. Ce type de plan respecte un critère d'optimisation géométrique, appelé iso variance par rotation, selon lequel l'erreur de prédiction est constante pour tous les points situés sur une sphère (ou hypersphère) centrée à l'origine du domaine expérimental.

Le plan de Box-Behnken à trois facteurs est le plus courant. Il comporte 12 essais positionnés au centre des arêtes du cube expérimental, auxquels s'ajoutent généralement 3 ou 4 points centraux pour évaluer la reproductibilité. Ces essais sont représentés sous forme de matrice, utilisée dans les calculs statistiques et analytiques [4,6].

2.7.1. Propriétés du plan de Box Behnken

Avant l'exécution des essais pour un plan à trois facteurs, certaines propriétés du plan expérimental peuvent être déterminées a priori. Il est ainsi possible d'estimer :

- L'erreur associée aux coefficients du modèle, à une constante près.
- L'erreur sur les réponses prédites par le modèle.
- La fonction de variance, qui décrit la répartition de l'erreur de prédiction dans l'ensemble du domaine expérimental.

Ces propriétés sont valables uniquement pour le modèle mathématique choisi, tel qu'il sera précisé dans le paragraphe suivant. Si le modèle venait à être modifié, une réévaluation des propriétés du plan serait alors nécessaire (**Figure 2.4**).

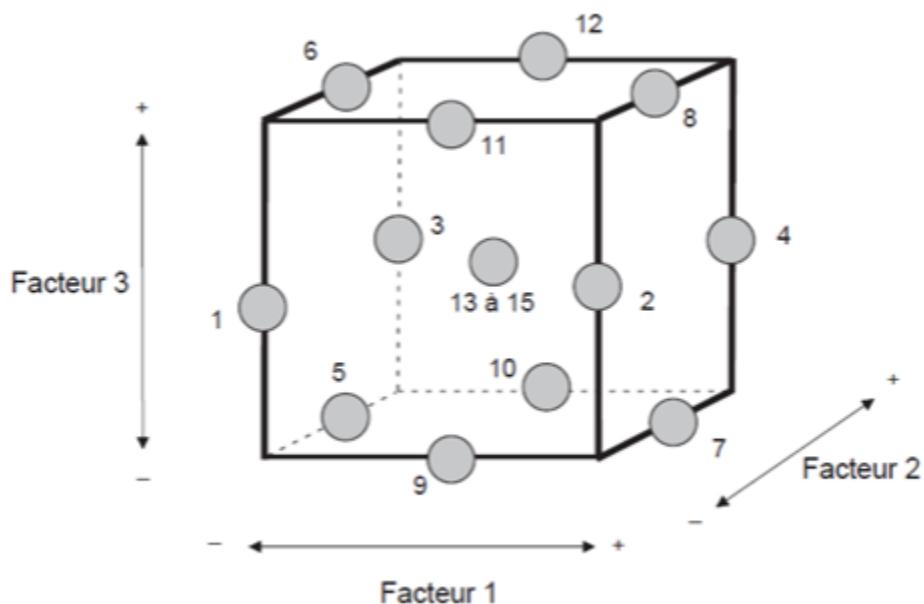


Figure 2.4 : Illustration du plan de Box-Behnken pour trois facteurs

2.7.2. Modèle mathématique

Pour le plan de Box-Behnken, on utilise un modèle mathématique du second degré [7] :

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_{12} X_1 X_2 + a_{13} X_1 X_3 + a_{23} X_2 X_3 + a_{11} X_1^2 + a_{22} X_2^2 + a_{33} X_3^2 + e$$

Ce modèle comprend 10 coefficients à estimer. Il nécessite donc au minimum 10 équations. Le plan expérimental de Box-Behnken comporte 13 points, soit 13 équations, ce qui est suffisant pour déterminer les coefficients. En pratique, on ajoute souvent trois points centraux pour évaluer l'erreur expérimentale, aboutissant à un système de 15 équations et 10 inconnues.

L'écart entre les données expérimentales et le modèle ajusté est composé de deux éléments :

- **Le manque d'ajustement** : qui reflète la différence entre le modèle mathématique supposé et le comportement réel du système.
- **L'erreur expérimentale** : qui résulte de la variabilité intrinsèque des mesures. En effet, la répétition d'un essai dans les mêmes conditions ne donne pas toujours exactement le même résultat ; cette dispersion est attribuée à des fluctuations expérimentales aléatoires.

2.7.3 Conclusion

La méthode des plans d'expériences permet d'optimiser le nombre d'essais tout en extrayant un maximum d'informations. Le modèle mathématique ainsi obtenu permet de prédire le comportement de la réponse étudiée et de générer la surface de réponse correspondante.

Partie expérimentale

Chapitre 3 : Étude expérimentale

3 Introduction

En se basant sur la littérature et la théorie concernant la texture et les caractéristiques des surfaces, le deuxième chapitre a été consacré à la définition de la méthodologie permettant de réaliser les expériences. Dans ce chapitre, et dans un premier temps, nous réaliserons des essais sur une pièce afin d'analyser l'effet des conditions de coupe, en l'occurrence, les paramètres d'entrée, fréquence de rotation N , profondeur de passe ap , vitesse d'avance f , rayon du bec de l'outil r , sur l'état de la surface réalisé qui est représenté par la rugosité Ra . Par la suite, nous effectuons au moyen du Brunissage la finition des surfaces réalisées, en analysant l'effet de la rugosité des surfaces de départ (surfaces tournées) sur l'état final de la surface obtenue.

Dans le cadre de ce travail, les opérations expérimentales ont été réalisées dans les ateliers spécialisés du département de génie mécanique de l'Université Badji Mokhtar – Annaba.

3.1. Présentation du matériau de la pièce

Le matériau étudié est un acier faiblement allié de nuance 30CDV12 8.

3.1.1. Caractéristiques et propriétés mécaniques du matériau de la pièce

3.1.1.1. Composition chimique

La composition chimique du matériau a été définie à partir d'une analyse réalisée au Laboratoire Centrale de Sider –El Hadjar –Annaba

C : 0.29 % ; Mn : 0.32% ; Si : 0.366% ; P : 0.0232% ; S : 0.01215% ; Cu : 0.068% ; Cr : 3.027% ; Ni : 0.1566% ; Mo : 2.34% ; V : 0.499%

3.1.1.2. Propriétés mécaniques

Les caractéristiques mécaniques ont été déterminées au laboratoire d'essai mécanique du département de Génie Mécanique de L'UBMA.

Dureté $HBW_{1/10} = 186$ Kgf/mm² ; Limite de rupture $R_m = 62.5$ daN/mm²

- a) **Machine-outil :** La machine-outil N°1 est un tour parallèle, model 1A616 de puissance 5.5 KW qui est illustrée dans la **Figure 3.1.**



Figure 3.1 : Tour parallèle 1A616

- b) Outil :** Pour l'exécution de ce travail on a choisi deux outils à plaquettes rapportées en carbure métallique avec un rayon du bec 1.6 et 2.3 mm (**voir Figure 3.2**)



Figure 3.2 : Outil de coupe utilisé

Dans le cas du Brunissage, l'outil employé est illustré dans la **Figure 3.3**.

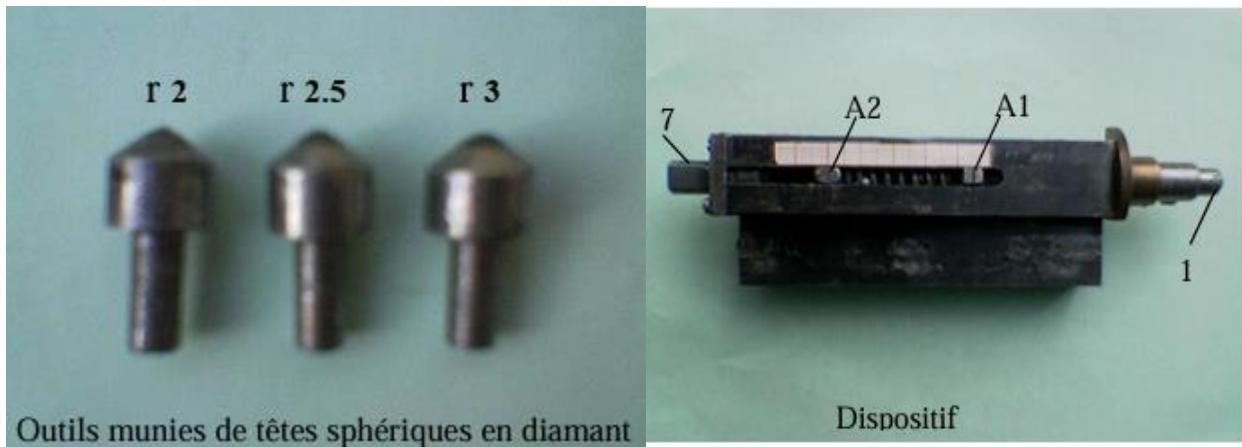


Figure 3.3 : Outil de brunissage

3.2. Traitement par tournage

3.2.1. Préparation de la pièce

La pièce a été segmentée en 16 paliers ce qui a permis de réaliser les essais selon un plan factoriel complet, en exploitant l'ensemble des niveaux définis, voir la **Figure 3.4**.



Figure 3.4 : préparation de la pièce sur le tour

3.2.1.1. Matrice d'expériences

La matrice d'expériences et réalisée conformément au plan factoriel complet qui est présenté dans le **Tableau 3.1** et **Tableau 3.2** respectivement.

Tableau 3.1 : Plan factoriel complet

Niveau	-1	+1
N (fréquence de rotation) [tr/min]	450	1800
f (avance) [mm/tr]	0,054	0,22
r (rayon du bec)	-1	+1

Avec la profondeur de passe (ap = 0,5 mm)

Tableau 3.2 : Plan factoriel complet

Essai N°	N	f	r	Ra [µm]
1 (1)	-1	-1	-1	1,180
2 (2)	1	-1	-1	1,146
3 (3)	-1	1	-1	3,229
4 (4)	1	1	-1	2,296
5 (5)	-1	-1	1	0,549
6 (6)	1	-1	1	0,687
7 (7)	-1	1	1	1,162
8 (8)	1	1	1	1,135

3.2.1.1 Influence de N (vitesse de rotation)

À une vitesse faible (N = -1, soit 450 tr/min), la rugosité moyenne Ra varie entre 1,180 et 3,229 µm. En revanche, à une vitesse élevée (N = +1, soit 1800 tr/min), Ra est plus stable, oscillant entre 0,549 et 1,135 µm. Cela indique qu'une vitesse de rotation plus élevée contribue à une amélioration de l'état de surface.

3.2.1.2 Influence de f (avance)

Lorsque l'avance est faible (f = -1, 0,054 mm/tr), Ra tend à être plus élevé, allant de 1,180 à 3,229 µm. En comparaison, une avance plus importante (f = +1, 0,22 mm/tr) génère une rugosité moindre, entre 0,549 et 1,135 µm. Cela montre que l'augmentation de l'avance a un effet positif sur la réduction de la rugosité.

3.2.1.3 Influence de r (rayon de l'outil)

Avec un petit rayon (r = -1), la rugosité varie de 1,146 à 3,229 µm. En revanche, un rayon plus important (r = +1) permet d'obtenir une rugosité plus faible, comprise entre 0,549 et 1,135 µm. Cela suggère qu'un rayon plus grand de l'outil améliore la qualité de finition.

3.2.1.4 Interactions

Le traitement des données par Minitab, a permis de dégager le modèle statistique exprimé par l'équation suivante ci-dessous, en mettant en évidence les interactions entre les facteurs étudiés, avec le coefficient de détermination élevé (**R² = 0,98**) qui confirme la fiabilité et la robustesse du modèle.

$$R_a = 1,4230 - 0,1070 N + 0,5325 f - 0,5398 r + 0,1330 N * f + 0,3348 N * r - 0,2673 f * r$$

Par conséquent, une augmentation de la vitesse de rotation (N) et du rayon de l'outil (r), ainsi qu'une diminution de l'avance (f), permettent globalement de réduire la rugosité Ra. Le modèle présente une forte cohérence avec les résultats expérimentaux. Ce modèle nous a permis de préparer des paliers avec différentes rugosités qui seront prises comme paramètres de départ lors des prochains essais, en l'occurrence, les essais de brunissage.

3.3. Traitement par Brunissage

L'opération de brunissage est réalisée sur le tour conformément au montage représenté dans la figure 3.5 ci-dessous

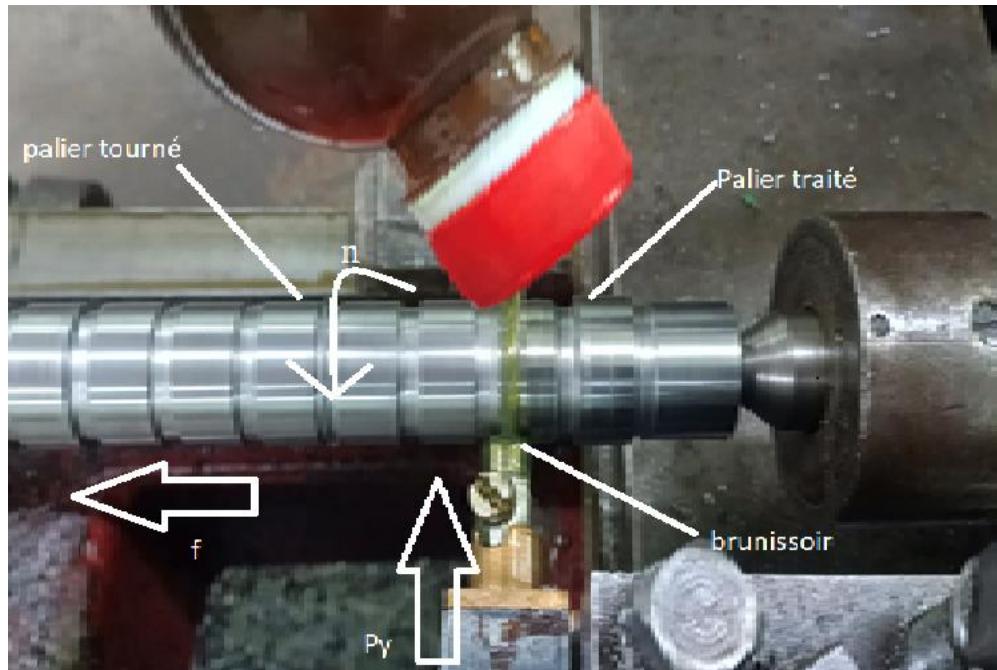


Figure 3.5 : Opération de brunissage

3.3.1. Matrice d'expériences

La matrice d'expériences est réalisée conformément au plan de box behenken, présentée dans le Tableau 3.3 et Tableau 3.4.

Dans cette étude, un plan d'expériences de type Box-Behnken a été mis en œuvre afin de modéliser l'influence de trois facteurs principaux sur la rugosité finale (Ra) après un traitement de brunissage. Les paramètres étudiés sont :

- $Ra_{initial}$: rugosité initiale (μm), estimée à partir du plan factoriel complet,
- f : l'avance (mm/tr),
- r : le rayon de la bille en diamant (mm).

Le **Tableau 3.3** présente les niveaux des facteurs étudiés dans le plan de Box-Behnken.

Tableau 3.3 : niveaux des facteurs étudiés dans le plan de Box-Behnken

Niveau	-1	0	+1
R _a initiale (rugosité estimée par plan factoriel complet) [µm]	0,549	1,884	3,229
f (avance) [mm/tr]	0,037	0,124	0,22
r (rayon de la bille en diamant) [mm]	2	2,5	3

(N= 560 tr/min ; ap = 0,5 mm)

3.3.1.1. Régimes d'usinage représentatifs

Voici les régimes d'usinage représentatifs correspondant aux trois niveaux de rugosité initiale, tels que définis par le plan factoriel complet :

- **R_a initiale = -1** (essai N°5) : N = 450 tr/min ; f = 0,054 mm/tr ; r = +1
- **R_a initiale = 0** (valeur estimée) : N = 1120 tr/min ; f = 0,148 mm/tr ; r = -1
- **R_a initiale = +1** (essai N°3) : N = 450 tr/min ; f = 0,22 mm/tr ; r = -1

Résultats expérimentaux : Rugosité finale et efficacité du traitement

Le **Tableau 3.4** suivant synthétise les résultats obtenus lors des 15 essais du plan Box-Behnken. Pour chaque essai, la rugosité initiale mesurée, les conditions opératoires (f et r), la rugosité finale mesurée (R_a finale) et l'efficacité du traitement η sont reportées :

Tableau 3.4 : les résultats obtenus lors des 15 essais du plan Box-Behnken

Essai N°	R _a initiale	R _a initiale (mesurée)	f	r	R _a finale	Réponse 1	Réponse 2
						η (Efficacité sur R _a) [%]	
1	-1	1,031	-1	0	0,796	22,79	
2	1	3,476	-1	0	1,897	45,42	
3	-1	0,849	1	0	1,012	-19,19	
4	1	3,303	1	0	1,022	69,05	
5	-1	0,656	0	-1	2,450	-273,47	
6	1	3,494	0	-1	1,698	51,40	
7	-1	0,713	0	1	0,585	17,95	
8	1	3,939	0	1	0,642	83,70	
9	0	1,483	-1	-1	1,680	-13,28	

10	0	1,674	1	-1	2,743	-63,85
11	0	2,402	-1	1	0,309	87,13
12	0	2,483	1	1	0,722	70,92
13	0	2,105	0	0	0,440	79,09
14	0	2,111	0	0	0,472	77,64
15	0	2,131	0	0	0,547	74,33

Remarque : L'efficacité du brunissage η est calculée selon la formule suivante :

$$\eta = \frac{\text{Ra initiale (mesurée)} - \text{Ra finale}}{\text{Ra initiale (mesurée)}} * 100$$

Des valeurs positives de η indiquent une diminution de la rugosité après le traitement, ce qui reflète un effet positif du brunissage. À l'inverse, des valeurs négatives traduisent une augmentation de la rugosité, signalant ainsi un impact défavorable du traitement.

3.3.2. Modèle de prédition de la rugosité finale

Le modèle mathématique obtenu à partir des essais est un modèle quadratique représentant **Ra finale** en fonction des trois facteurs. Il est formulé comme suit :

$$\begin{aligned} Ra_{finale} = & 0,486 + 0,052 Ra_{initiale} + 0,102 f - 0,789 r + 0,338 Ra_{initiale} * Ra_{initiale} \\ & + 0,358 f * f + 0,520 r * r - 0,273 Ra_{initiale} * f + 0,202 Ra_{initiale} * r \\ & - 0,162 f * r \end{aligned}$$

$R^2 = 87,84$

Le coefficient de détermination $R^2 = 87,84 \%$ indique une **très bonne adéquation** entre les prédictions du modèle et les données expérimentales, confirmant ainsi sa fiabilité pour l'optimisation du procédé.

Dans le cadre de cette étude, un plan d'expériences de type **Box-Behnken** a été mis en œuvre afin de modéliser l'influence de trois facteurs principaux sur la rugosité finale (**Ra**) après un traitement par brunissage. Les facteurs étudiés sont les suivants :

- La rugosité initiale (**Rainitiale**) estimée à partir d'un plan factoriel complet,
- L'avance (**f**) en mm/tr,
- Le rayon de la bille en diamant (**r**) en mm.

Un total de 15 essais a été réalisé, permettant de construire un modèle de régression quadratique représentant la rugosité finale en fonction des facteurs. Le modèle obtenu est le suivant :

$$Ra_{finale} = 0,486 + 0,052 \cdot Ri + 0,102 \cdot f - 0,789 \cdot r + 0,338 \cdot Ri^2 + 0,358 \cdot f^2 + 0,520 \cdot r^2 - 0,273 \cdot Ri \cdot f + 0,202 \cdot Ri \cdot r - 0,162 \cdot f \cdot r$$

Le coefficient de détermination associé ($R^2 = 87,84 \%$) indique une très bonne qualité d'ajustement du modèle aux données expérimentales, confirmant sa fiabilité pour la prédiction de la rugosité finale.

Les résultats obtenus montrent que :

- Certaines conditions expérimentales permettent d'obtenir une réduction de rugosité supérieure à 80 %, ce qui démontre l'efficacité du brunissage.
- À l'inverse, d'autres configurations peuvent entraîner une dégradation de l'état de surface, avec des valeurs négatives de η (jusqu'à -273 %), traduisant un effet défavorable.

3.3.3. Analyse des résultats et recommandations

Les résultats obtenus permettent de dégager plusieurs conclusions importantes :

- **Le rayon de la bille (r)** a l'effet le plus déterminant sur la rugosité finale, avec un impact fortement négatif sur Ra : plus le rayon est grand, meilleure est la finition de surface.
- **L'avance (f)** a un effet contraire : une avance plus élevée augmente la rugosité, ce qui est défavorable.
- L'interaction entre **Ra initiale** et **f** est également significative, soulignant l'importance de considérer les effets croisés dans l'optimisation.

3.3.4. Conditions optimales recommandées

Pour maximiser l'efficacité du traitement et obtenir une rugosité minimale, les paramètres suivants sont recommandés :

- **Avance (f)** : faible, autour de **0,037 mm/tr**
- **Rayon (r)** : élevé, **3 mm**
- **Ra initiale** : moyenne à élevée (les pièces ayant déjà une rugosité faible profitent peu du brunissage)

L'approche expérimentale basée sur le plan Box-Behnken a permis de modéliser avec précision l'impact des paramètres de brunissage sur la qualité de surface. Le traitement par brunissage s'avère hautement efficace dans les bonnes conditions, et le modèle obtenu constitue un outil de prédiction fiable pour optimiser les réglages en fonction des besoins industriels.

Conclusion

Dans ce chapitre, a été examiné, l'influence des paramètres de coupe sur la rugosité des surfaces usinées, en analysant quatre variables clés : la fréquence de rotation, la profondeur de passe, la vitesse d'avance et le rayon du bec de l'outil. À travers une approche méthodologique systématique, des essais expérimentaux ont été réalisés pour quantifier l'effet de ces paramètres sur la rugosité de surface, en l'occurrence " Ra". L'impact du Brunissage, une technique de finition, a également été évalué, démontrant son efficacité à réduire la rugosité des surfaces traitées. En outre, l'analyse des surfaces initialement tournées a révélé des interactions notables entre leur rugosité de départ et l'état final des surfaces, indiquant des pistes intéressantes pour de futures investigations. Dans l'ensemble, ce chapitre contribue à une compréhension approfondie des interactions entre les variables d'usinage et la qualité de surface, fournissant des fondements pour l'optimisation des procédés de fabrication dans le domaine de l'ingénierie mécaniqu

Chapitre 4 : Résultats et discussion

Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse des effets principaux et des interactions entre les paramètres d'usinage sur la rugosité moyenne finale "Ra", une des caractéristiques majeures de la qualité de surface. L'objectif est d'identifier les combinaisons de paramètres qui permettent de réaliser des surfaces avec une variété de rugosités, en vue d'étudier les performances du procédé de traitement de surface (brunissage) sur la qualité finale de la pièce.

4.1. Plan factoriel complet

4.1.1. Analyse des effets des paramètres d'usinage sur la rugosité

La **Figure 4.1** présente le graphique des effets principaux des paramètres d'usinage sur la rugosité moyenne (Ra),

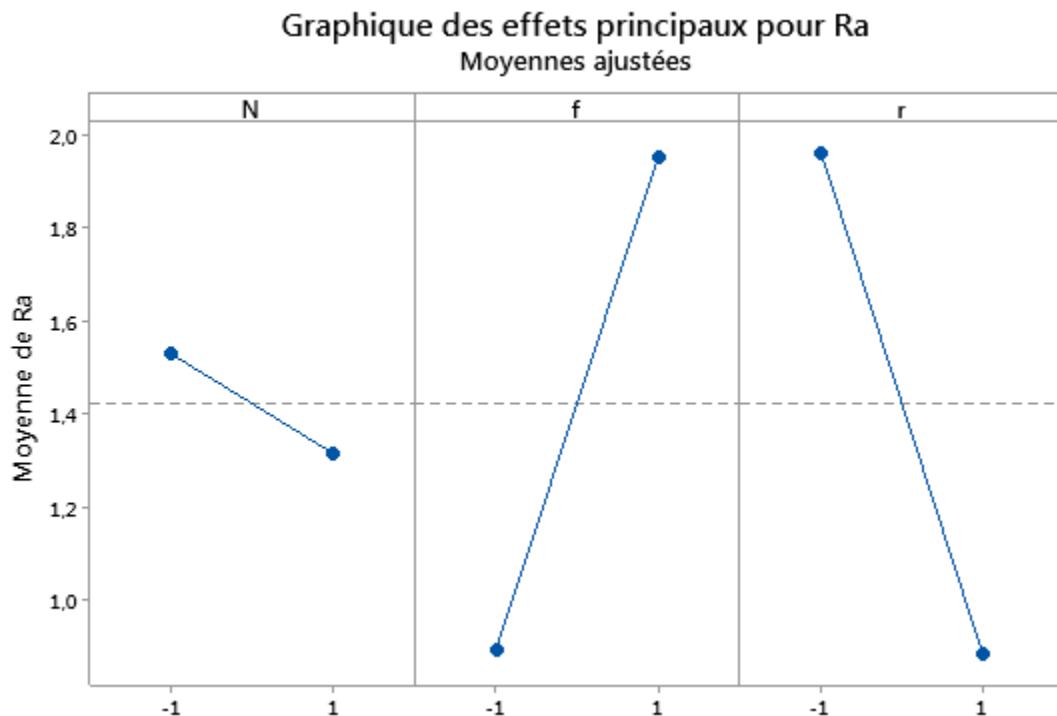


Figure 4.1: Graphique des effets principaux pour Ra

L'analyse des effets principaux des trois facteurs étudiés — la fréquence de rotation (N), l'avance par tour (f) et le rayon du bec (r) — met en évidence leurs influences respectives sur la rugosité finale (Ra).

- **Fréquence de rotation (N)** : L'augmentation de la fréquence de rotation, de 450 tr/min (-1) à 1800 tr/min (+1), entraîne une légère diminution de la rugosité finale (Ra). Ce comportement suggère que des vitesses plus élevées améliorent modérément l'état de surface, probablement en réduisant les efforts de coupe exercés pendant l'usinage.
- **Avance par tour (f)** : L'avance présente l'influence la plus marquée sur la rugosité. Lorsque l'avance passe de 0,054 mm/tr (-1) à 0,22 mm/tr (+1), une nette augmentation de Ra est observée. Ce résultat est cohérent avec les principes de coupe : une avance plus importante provoque des stries plus profondes sur la surface usinée, dégradant ainsi la qualité de finition.
- **Rayon du bec (r)** : Le rayon de la bille a également un impact significatif, mais dans le sens inverse de celui de l'avance. Une augmentation du rayon, de -1 à +1, entraîne une réduction notable de la rugosité. Un bec plus large permet un contact plus homogène entre l'outil et la pièce, atténuant les irrégularités et améliorant la finition de surface.

Le graphique présenté (**Figure 4.2**) illustre la variation de la rugosité moyenne (Ra) en fonction de deux paramètres principaux d'usinage : la fréquence de rotation (N) et l'avance par tour (f), tandis que le rayon du bec (r) est maintenu constant.

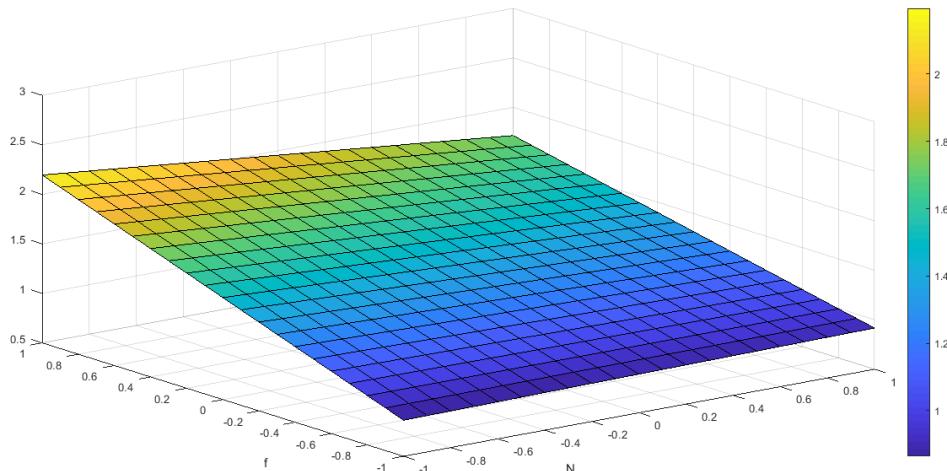


Figure 4.2 : Graphique entre le facteur F et N

L'interprétation du graphique met en évidence l'impact différencié des deux paramètres étudiés sur la rugosité moyenne (Ra), ainsi que la nature de leur interaction :

- **Effet de l'avance (f)** : L'influence de ce paramètre est dominante. Une augmentation de l'avance entraîne une hausse significative de Ra. Ce comportement s'explique par un

arrachage plus important de la matière et par la formation de stries plus profondes, ce qui détériore la qualité de surface. Cette tendance est cohérente avec les observations précédentes.

- **Effet de la fréquence de rotation (N)** : Bien que présent, l'effet de N est beaucoup plus modéré. Une hausse de la fréquence de rotation tend à réduire légèrement la rugosité. Cela pourrait être dû à une coupe plus rapide, donc plus douce, mais cette amélioration reste marginale en comparaison avec l'effet de f.
- **Interaction entre N et f** : La forme globalement plane de la surface indique une interaction faible entre ces deux paramètres. En d'autres termes, l'effet de l'un reste quasiment indépendant de la valeur de l'autre.

Ce graphique appuie les conclusions du modèle statistique : pour minimiser la rugosité Ra, il convient d'utiliser une faible avance (f) combinée à une fréquence de rotation élevée (N). Ces conditions se situent dans la zone de faible rugosité (zone bleue) de la surface représentée.

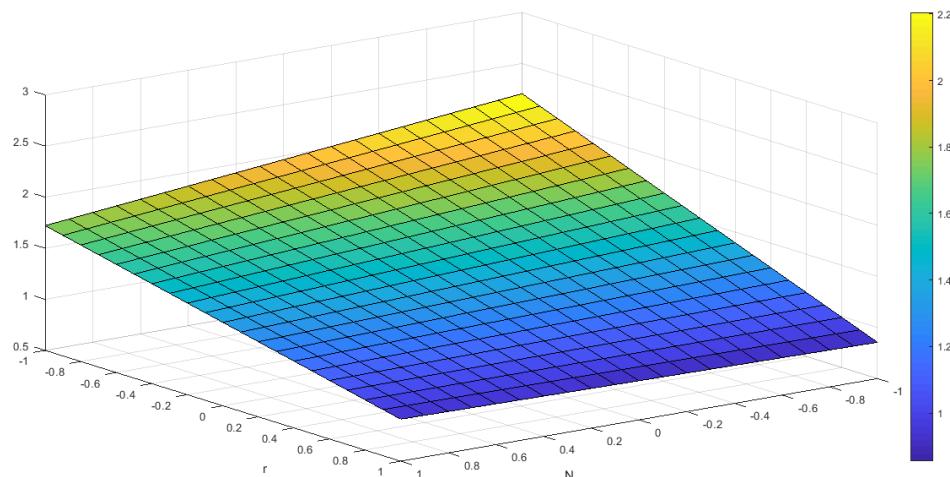


Figure 4.3 : Graphique entre le facteur r et N

La figure 4.4 présente une surface plane dont la pente est régulière, indiquant une variation linéaire de la réponse en fonction des deux facteurs étudiés :

- ✓ La rugosité diminue progressivement lorsque le rayon du bec (r) augmente, ce qui se traduit visuellement par une descente du plan de l'arrière gauche vers l'avant droit.
- ✓ Inversement, la rugosité augmente lorsque la fréquence de rotation (N) augmente, observable par une élévation du plan de l'avant gauche vers l'arrière droit.
- **Effet du rayon du bec (r)** : L'augmentation de r entraîne une diminution proportionnelle de la rugosité. Cela suggère qu'un rayon plus important améliore l'état de surface, probablement en raison d'un contact outil-pièce plus large qui atténue les irrégularités.

- **Effet de la fréquence de rotation (N)** : À l'inverse, l'augmentation de N conduit à une hausse de la rugosité. Une vitesse de rotation plus élevée pourrait induire des vibrations ou des phénomènes défavorables au niveau de la coupe, ce qui dégrade la qualité de surface.
- **Nature de la relation** : La planéité quasi parfaite de la surface indique une relation linéaire additive entre les deux facteurs. Il n'y a pas d'interaction notable entre N et R, c'est-à-dire que l'effet de l'un ne dépend pas de la valeur de l'autre dans le domaine étudié.

Pour obtenir la meilleure qualité de surface (c'est-à-dire minimiser la rugosité), il est recommandé d'utiliser un rayon du bec (r) aussi grand que possible et une fréquence de rotation (N) aussi faible que le permet la plage expérimentale.

La **Figure 4.4** présente une surface plane inclinée, indiquant une variation régulière et linéaire de la rugosité moyenne (Ra) en fonction des facteurs r et N . La surface représentée est un plan incliné, ce qui indique une variation linéaire et constante.

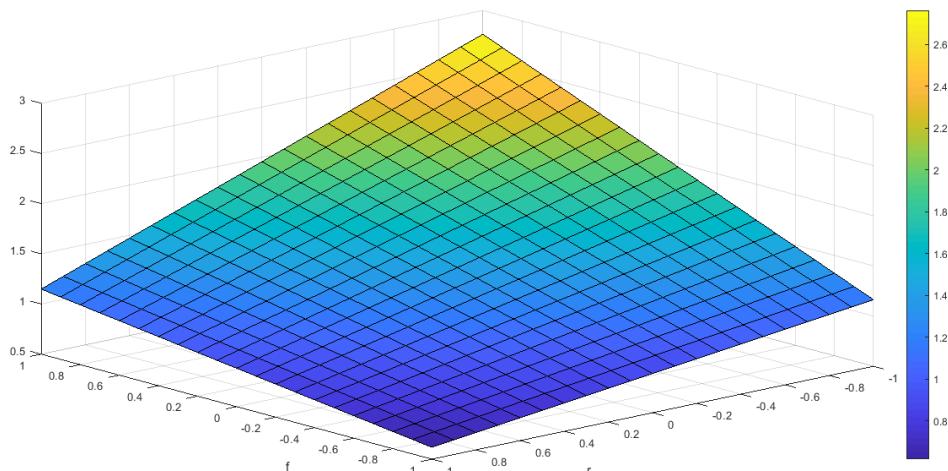


Figure 4.4 : Graphique entre le facteur F et r

Les valeurs de la variable dépendante (allant de 1 à 2,2, visibles en hauteur et en couleur) diminuent progressivement lorsque le facteur 'r' augmente, c'est-à-dire en se déplaçant de l'arrière gauche vers l'avant droit du graphique. À l'inverse, ces valeurs augmentent avec l'augmentation du facteur N, en allant de l'avant gauche vers l'arrière droit.

Les résultats se reposent sur :

- **Effet du rayon du bec (r) :** Une augmentation de R entraîne une diminution proportionnelle de la rugosité. Cela indique qu'un rayon plus grand améliore l'état de surface en répartissant les efforts de coupe sur une zone plus étendue.
- **Effet de la fréquence de rotation (N) :** Une augmentation de N provoque une hausse de la rugosité, ce qui peut être lié à une instabilité de coupe ou à une interaction défavorable avec le matériau à vitesses élevées.
- **Nature de la relation :** La forme plane de la surface traduit une relation **linéaire additive** entre les deux facteurs. Il n'existe pas d'interaction significative entre N et R : l'effet de l'un est indépendant de la valeur de l'autre dans le domaine étudié.

Pour réduire au maximum la rugosité finale, il convient de privilégier des valeurs élevées du rayon du bec (R) **et** des vitesses de rotation (N) faibles, dans les limites de l'expérience. de 'r' aussi élevées que possible et des valeurs de 'N' aussi basses que possible dans la plage des facteurs.

4.2. Plan de box

La **Figure 4.5** illustre le graphique des effets principaux des paramètres d'usinage sur la rugosité moyenne (R_a) en utilisant le plan de box.

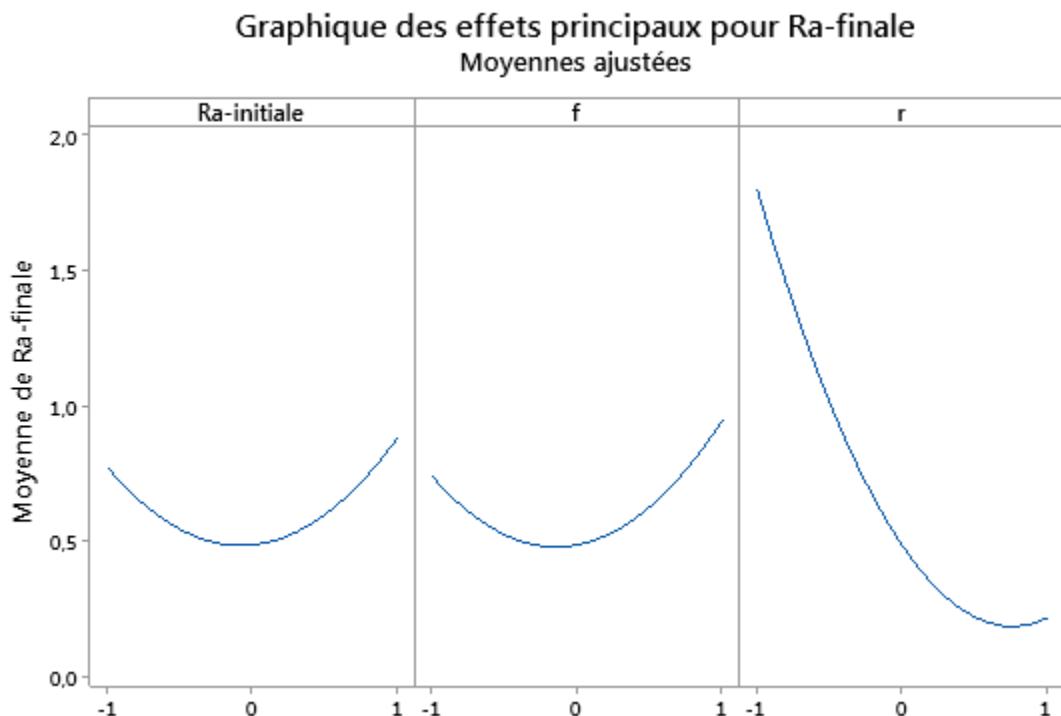


Figure 4.5 : Graphique des effets principaux pour Ra-finale

4.2.1. Optimisation avec objectif de minimisation

$$Ra_{\text{initiale}} = -0,35 ; f = -0,09 ; r = 0,81$$

$$Ra_{\text{initiale}} \simeq 1,415 \mu\text{m} ; f \simeq 0,124 \text{ mm/tr} ; r \simeq 3 \text{ mm}$$

$$Ra_{\text{finale}} = 0,151 \mu\text{m} \pm 0,254$$

4.2.2. Effet de Ra_{initiale} sur la Moyenne de Ra_{finale}

Lorsque la valeur de Ra_{initiale} passe de son niveau le plus bas (-1) vers le niveau intermédiaire (environ 0), la "Moyenne de Ra-finale" diminue de manière significative. Cela suggère que, dans cette plage, une augmentation de la rugosité initiale (jusqu'à un certain point) peut permettre au processus de mieux travailler pour réduire la rugosité finale, ou que des rugosités initiales très faibles sont difficiles à améliorer davantage.

Au-delà du niveau intermédiaire (environ 0) et jusqu'à la valeur maximale (1), la "Moyenne de Ra-finale" commence à augmenter. Cela indique que si la rugosité initiale est trop élevée, le processus ne parvient plus à la compenser efficacement, entraînant une rugosité finale plus importante.

La courbe présente un profil en "U", indiquant qu'il existe une valeur optimale (un minimum) de 'Ra-initiale' autour du point central codé (0) pour minimiser la rugosité finale.

4.2.3. Effet de f sur la Moyenne de Ra_{finale}

De manière très similaire à Ra_{initiale} , lorsque la valeur de f augmente de son niveau le plus bas (-1) vers le niveau intermédiaire (environ 0), la "Moyenne de Ra_{finale} " diminue. Si f représente l'avance (comme dans les processus d'usinage), cela peut signifier qu'une avance très faible n'est pas optimale, pouvant entraîner des frottements excessifs, une usure de l'outil, ou d'autres phénomènes dégradant la surface.

Au-delà du niveau intermédiaire (environ 0) et jusqu'à la valeur maximale (1), la moyenne de Ra_{finale} recommence à augmenter. Une avance trop élevée peut entraîner des marques d'outil plus prononcées ou une évacuation inefficace du matériau, dégradant ainsi la qualité de surface.

La courbe est également en forme de "U", indiquant qu'il y a une valeur optimale de ' f ' (autour du point central codé à 0) pour obtenir la rugosité finale la plus faible.

4.2.4. Effet de R sur la Moyenne de Ra_{finale}

C'est l'effet le plus prononcé. Lorsque la valeur de R augmente de son niveau le plus bas (-1) vers des valeurs plus élevées (environ 0.8), la Moyenne de Ra_{finale} diminue de manière très significative et rapide, atteignant des valeurs très faibles. Si R représente le rayon de bec d'un outil de coupe, ceci est cohérent avec les principes de l'usinage où un rayon de bec plus grand peut aider à réduire la rugosité de surface en permettant une meilleure finition.

Au-delà d'environ 0.8, la courbe montre une très légère augmentation de la Ra_{finale} ou une stagnation. Le minimum est atteint clairement vers la fin de la plage étudiée.

Ce facteur a l'impact le plus dominant sur la Ra_{finale} . La valeur optimale de R pour minimiser la rugosité finale se situe clairement vers la valeur la plus élevée de la plage étudiée (autour de 0.8), ce qui suggère qu'il faudrait privilégier des valeurs élevées de l' pour obtenir une surface lisse.

La **Figure 4.6** représente la surface de réponse de la rugosité finale Ra_{finale} en fonction de deux facteurs : l'avance f et la rugosité initiale $Ra_{initiale}$.

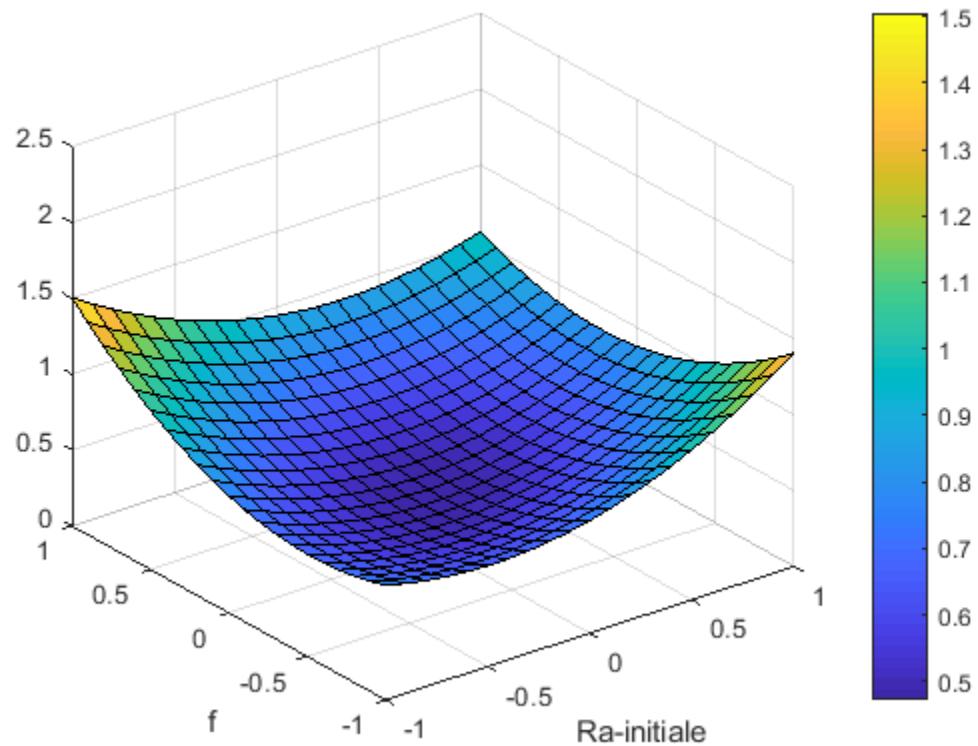


Figure 4.6 : Graphique entre le facteur f et $Ra_{initiale}$

La surface forme une cuvette dont le point le plus bas (correspondant au minimum de Ra_{finale}) est situé au centre du graphique, là où les valeurs de f et de $Ra_{initiale}$ sont proches de 0. La valeur minimale observée de Ra_{finale} est d'environ 0,5 μm .

À mesure que l'on s'éloigne de ce centre — que ce soit en augmentant ou en diminuant 'f' ou 'Ra-initiale' — la surface monte symétriquement. Cela se traduit visuellement par un passage progressif des couleurs du bleu (valeurs basses de Ra_{finale}) vers le jaune (valeurs plus élevées).

Le graphique montre que :

- La rugosité finale diminue lorsque les valeurs de f et $Ra_{initiale}$ se rapprochent simultanément de leur niveau intermédiaire (codé à 0). Cela signifie qu'un réglage équilibré ou moyen de ces deux facteurs est optimal pour la qualité de surface.
- La rugosité finale augmente significativement lorsque f s'écarte de 0 (vers -1 ou 1) et/ou lorsque $Ra_{initiale}$ s'écarte de 0 (vers -1 ou 1). Cela indique que des valeurs extrêmes de l'un ou l'autre de ces facteurs, ou des deux, sont détrimentaires à l'obtention d'une surface lisse.

La **Figure 4.7** montre l'effet du rayon de bec (r) et du nombre d'essais (N) sur la rugosité finale.

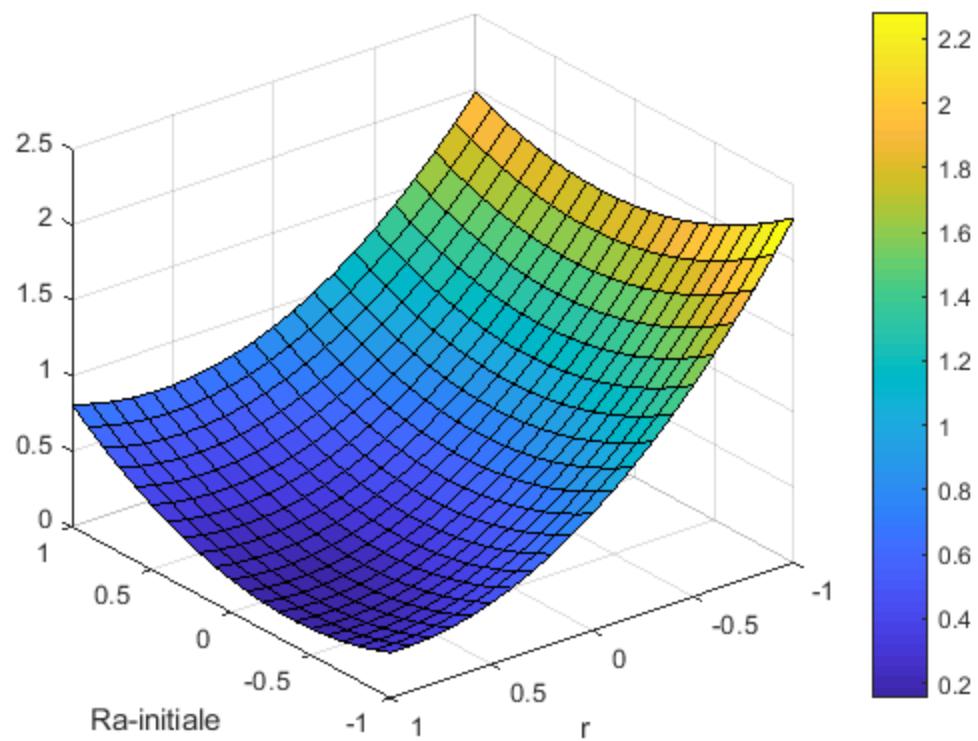


Figure 4.7 : Graphique entre le facteur r et N

La surface est également une cuvette, mais son point le plus bas est décalé. Il se situe lorsque $Ra_{initial}$ est proche de 0 et r est proche de la valeur maximale de la plage étudiée (environ 0.8 à 1). La valeur minimale de Ra-finale observée est d'environ 0.2.

La surface s'élève plus fortement le long de l'axe r à mesure que r diminue vers -1, comparé à l'élévation le long de l'axe $Ra_{initial}$ lorsque $Ra_{initial}$ s'éloigne de 0.

D'après ces résultats, on peut déduire que :

- La rugosité finale diminue le plus drastiquement lorsque ' r ' augmente vers son niveau le plus élevé (0.8 à 1) et que $Ra_{initial}$ est maintenue à son niveau intermédiaire (0). La diminution est particulièrement prononcée pour ' r ' passant de -1 à des valeurs positives.
- La rugosité finale augmente très rapidement lorsque ' r ' diminue vers son niveau le plus bas (-1). Elle augmente également lorsque $Ra_{initial}$ s'éloigne de 0 (vers -1 ou 1), mais l'impact de ' r ' est clairement plus dominant.

La **Figure 4.8** montre l'évolution de la rugosité finale en fonction du rayon de bec (r) et de l'avance (f).

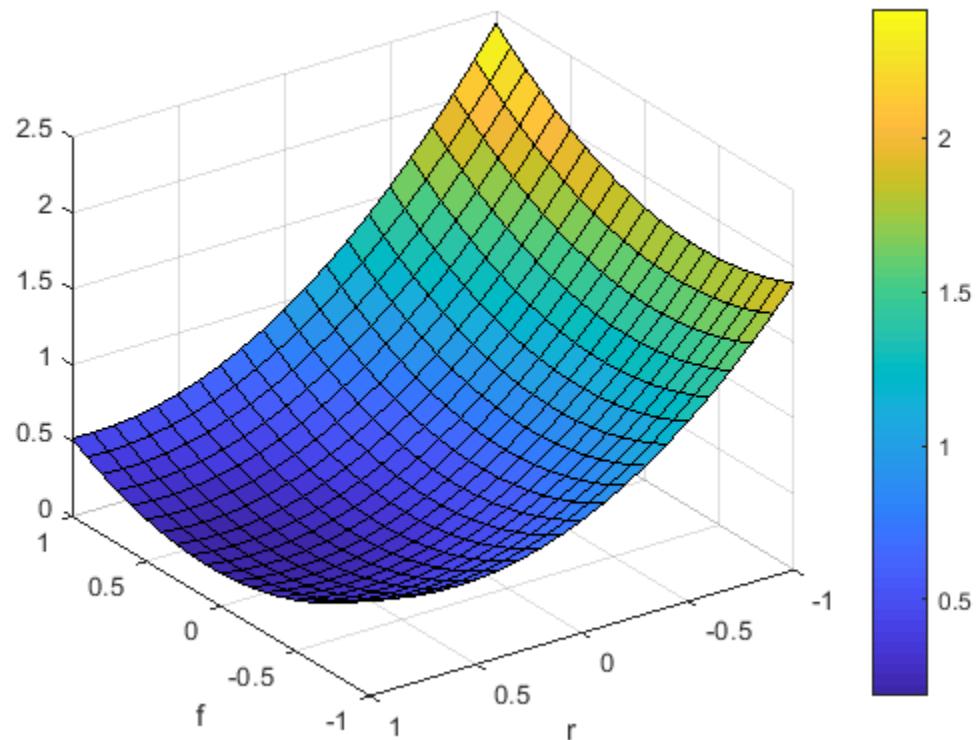


Figure 4.8 : Graphique entre le facteur F et r

Le graphique présente une forme en cuvette, similaire à la figure précédente, mais avec un minimum légèrement décalé. Le point le plus bas de Ra-finale se situe lorsque f est proche de 0 et que r atteint une valeur élevée (entre 0,8 et 1). La valeur minimale observée est d'environ 0,2 μm .

On observe une montée abrupte de la surface lorsque r diminue vers -1, indiquant une sensibilité importante à ce facteur.

Le graphique montre que :

- La rugosité finale diminue le plus efficacement lorsque r est réglé à son niveau élevé (0,8 à 1) et que 'f' est maintenu à son niveau intermédiaire (0).
- La rugosité finale augmente fortement lorsque r diminue vers -1, et également lorsque 'f' s'écarte de 0 (vers -1 ou 1). L'effet de r est à nouveau le plus prépondérant pour la diminution rapide.

4.3. Traitement de rendement η

L'équation de réponse pour le rendement η est donnée par :

$$\begin{aligned} n = 77,0 + 62,7 \text{ Ra }_{\text{initiale}} - 10,6 f + 69,9 * r - 48,9 \text{ Ra }_{\text{initiale}} \\ * \text{ Ra }_{\text{initiale}} + 1,4 f * f - 58,2 r * r + 16,4 \text{ Ra }_{\text{initiale}} * f \\ - 64,8 \text{ Ra }_{\text{initiale}} * r + 8,6 f * r \end{aligned}$$

Avec un coefficient de détermination $R^2 = 90,84 \%$, indiquant un bon ajustement du modèle.

L'optimisation du modèle, avec comme objectif la maximisation de η , a conduit aux valeurs suivantes :

- Ra-initiale = 0,19 (codée), soit $\approx 2,138 \mu\text{m}$
 - $f = -1$ (codée), soit $\approx 0,037 \text{ mm/tr}$
 - $r = 0,41$ (codée), soit $\approx 2,5 \text{ mm}$
- Pour ces conditions, η atteint $106,4 \% \pm 30,6$.

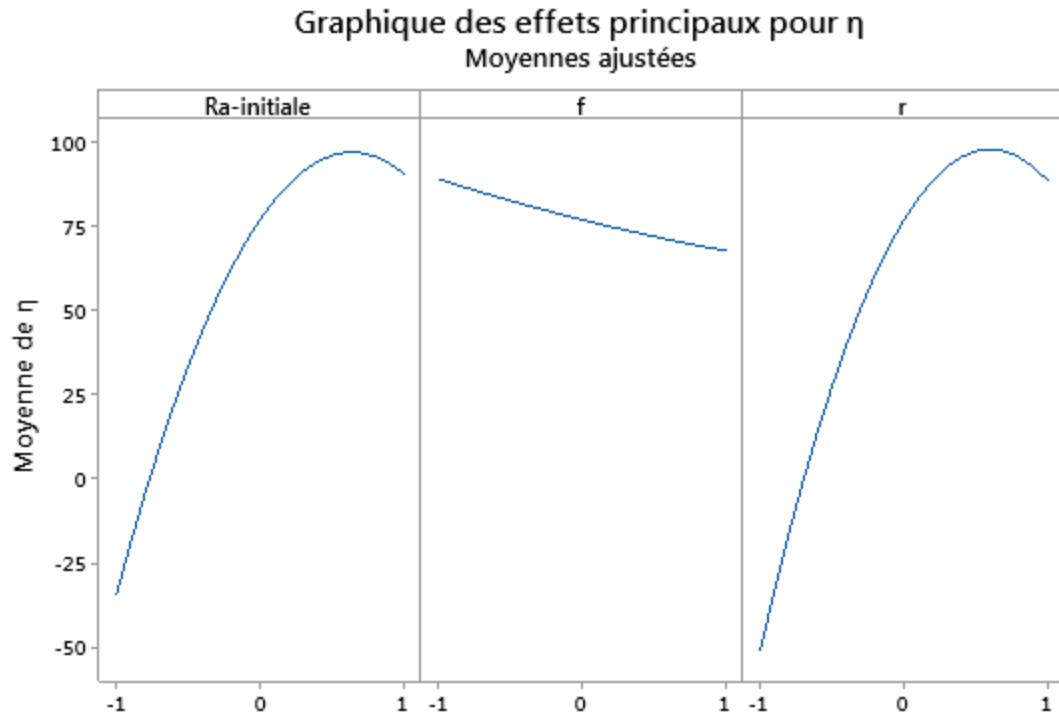


Figure 4.9 : Graphique des effets principaux pour η

4.3.1. Effet de 'Ra-initiale' sur la Moyenne de η

Lorsque la valeur de 'Ra-initiale' augmente de son niveau le plus bas (-1) vers des valeurs plus élevées (atteignant un maximum aux alentours de 0.8), la "Moyenne de η " augmente de manière significative et progressive. Elle passe d'environ -30 à près de 100. Cela suggère qu'une rugosité initiale plus élevée, dans cette plage, est favorable à l'amélioration de l'efficacité ou de la performance du processus.

Au-delà de 'Ra-initiale' d'environ 0.8 (jusqu'à 1), la "Moyenne de η " commence à diminuer légèrement.

La courbe présente une forme de "montagne" ou un profil quadratique avec un maximum. Cela indique qu'il existe une valeur optimale de 'Ra-initiale' (environ 0.8 sur l'échelle codée) pour maximiser ' η '. Des rugosités initiales trop faibles ou trop élevées ne sont pas optimales.

4.3.2. Effet de f sur la Moyenne de η

Lorsque la valeur de f augmente de son niveau le plus bas (-1) à son niveau le plus haut (1), la Moyenne de η diminue de manière quasi linéaire et constante. Elle passe d'environ 90 à environ 65.

La relation entre f et η est inversement proportionnelle. Pour maximiser η , f doit être réglé à son niveau le plus bas possible (codé à -1) dans la plage étudiée. Si ' f ' représente l'avance (par exemple en usinage), cela impliquerait qu'une avance plus faible est plus efficace ou améliore la performance.

4.3.3. Effet de r sur la Moyenne de η

Lorsque la valeur de r augmente de son niveau le plus bas (-1) vers des valeurs plus élevées (atteignant un maximum aux alentours de 0.7), la "Moyenne de η " augmente de manière extrêmement rapide et prononcée. Elle passe d'environ -50 à près de 100. Cet effet est le plus drastique parmi les trois facteurs.

Au-delà de r d'environ 0.7 (jusqu'à 1), la "Moyenne de η " commence à diminuer légèrement.

La courbe présente également un profil quadratique avec un maximum très marqué. Il existe une valeur optimale de ' r ' (environ 0.7 sur l'échelle codée) pour maximiser ' η '. L'impact de ' r ' est majeur : le processus est inefficace ou sous-performant (η négatif) à de faibles valeurs de ' r ', et devient très efficace à des valeurs plus élevées.

La **Figure 4.10** illustre l'effet combiné du facteur f (avance) et de la Ra-initiale (rugosité de départ) sur l'efficacité η du procédé.

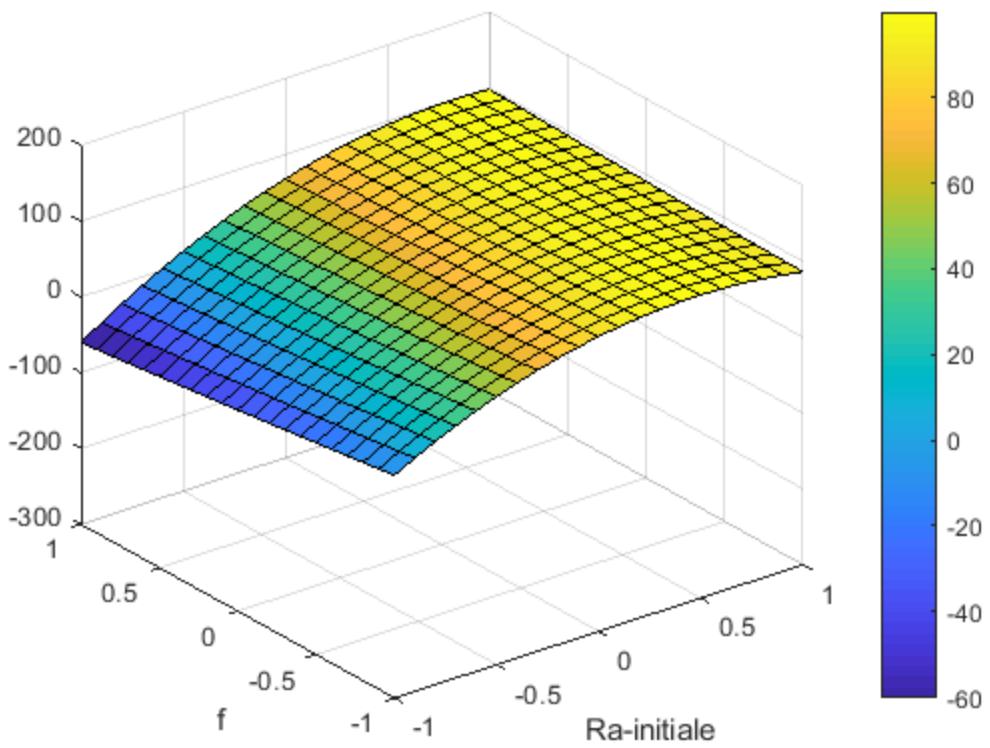


Figure 4.10 : Graphique entre le facteur F et Ra-initiale

L’analyse de la figure met en évidence une surface de type « selle de cheval », caractéristique d’une interaction marquée entre les deux variables. Ce comportement indique l’absence d’un maximum global unique, au profit d’un point de selle où les variations de η sont particulièrement sensibles aux changements simultanés des deux facteurs.

Les valeurs les plus élevées de l’efficacité η (zones en jaune/orange, avoisinant 80 %) sont observées lorsque l’un des facteurs est à son niveau minimal et l’autre à son niveau maximal, à savoir : une avance faible ($f = -1$) avec une Ra-initiale élevée ($Ra = 1$), ou inversement, une avance élevée ($f = 1$) avec une Ra-initiale faible ($Ra = -1$). En revanche, les valeurs les plus faibles de η (zones en bleu/violet, pouvant atteindre -60 %) sont observées lorsque les deux facteurs sont simultanément à leur niveau minimal ou maximal.

Sur le plan interprétatif, ces résultats suggèrent que l’efficacité η est maximisée lorsque les deux facteurs sont réglés à des niveaux opposés, traduisant ainsi une synergie favorable entre f et Ra-initiale dans ces configurations. À l’inverse, une combinaison de niveaux extrêmes identiques pour

les deux facteurs (tous deux faibles ou tous deux élevés) conduit à une diminution significative de η . Il en découle que l'effet de l'un des facteurs sur la réponse dépend étroitement du niveau de l'autre, mettant en évidence une interaction significative.

Par conséquent, pour optimiser l'efficacité du procédé, il est essentiel de prendre en compte cette interaction dans le réglage des paramètres, et non de les considérer de manière indépendante.

La **Figure 4.11** illustre la surface de réponse de l'efficacité η en fonction de la rugosité initiale (Ra-initiale) et du rayon de bec (r).

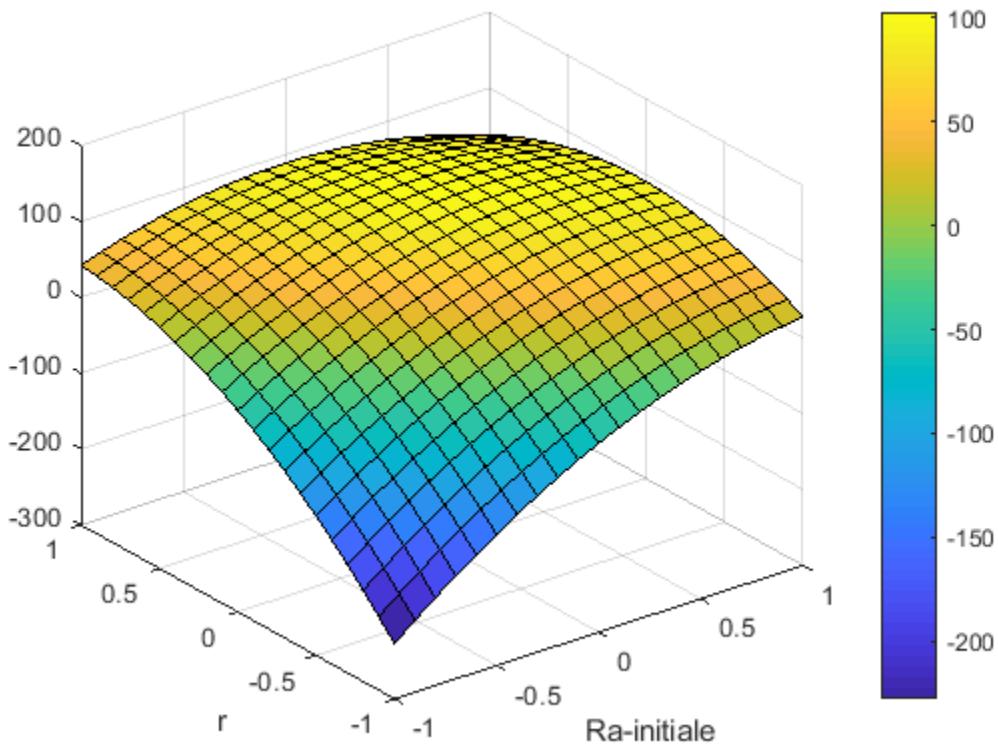


Figure 4.11 : Graphique entre le facteur R et Ra-initiale

La surface obtenue présente une forme de dôme, ce qui indique l'existence d'un maximum local de η à l'intérieur de la plage étudiée. Le sommet de ce dôme, où η atteint des valeurs proches de 100 %, correspond à des niveaux élevés des deux facteurs : environ 0.7–0.8 pour le rayon de bec (r) et 0.8–1 pour Ra-initiale. À l'inverse, η diminue fortement lorsque ces deux facteurs sont faibles. Les valeurs les plus basses de η (jusqu'à -200 %) sont observées lorsque r et Ra-initiale sont tous deux proches de -1

Ces résultats montrent que l'efficacité du procédé augmente significativement lorsque R -initiale et r sont simultanément élevés. En revanche, elle diminue de façon importante lorsque l'un ou l'autre, voire les deux, sont à leur niveau le plus bas. Cela confirme une interaction positive entre ces deux paramètres, suggérant que leur combinaison optimale permet d'améliorer considérablement la performance du procédé.

La **Figure 4.12** représente la surface de réponse de l'efficacité η en fonction du rayon de bec (r) et de l'avance (f).

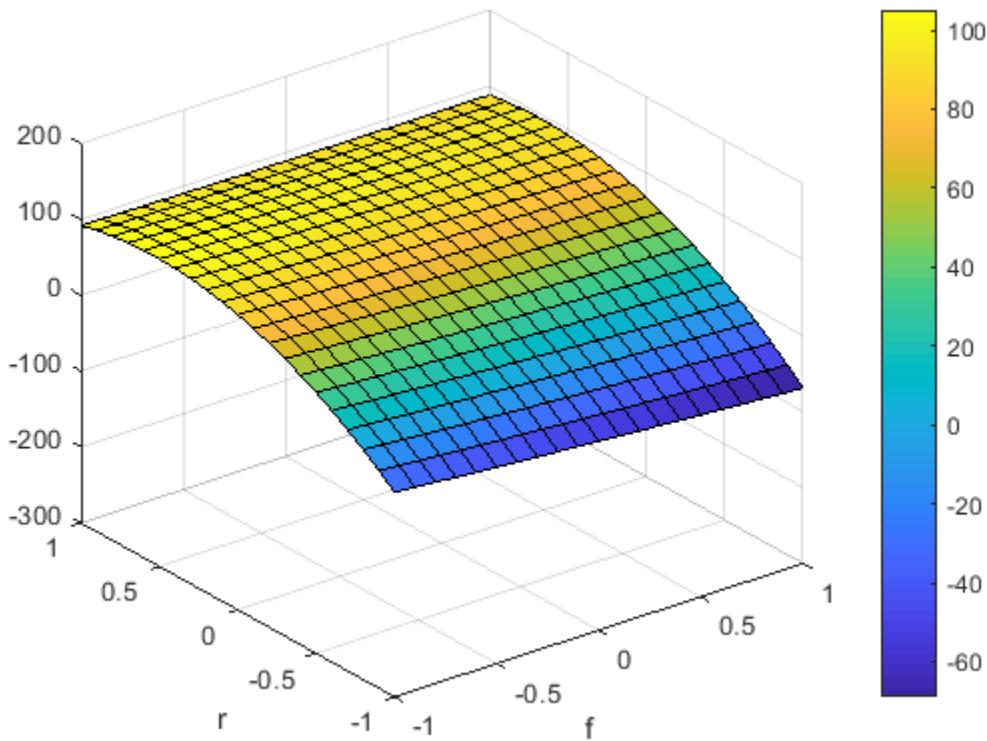


Figure 4.12 : Graphique entre le facteur R et F

La surface affichée adopte une forme de dôme, indiquant la présence d'un maximum local de η . Ce maximum, atteignant environ 100 %, est observé lorsque le rayon de bec est élevé (environ 0.7 à 0.8) tandis que l'avance est faible (autour de -1). À l'opposé, la surface chute considérablement lorsque r est bas et que f est élevé, avec des valeurs de η pouvant descendre jusqu'à -60 %.

Ces observations révèlent que l'efficacité augmente significativement lorsque le rayon de bec est important et l'avance réduite. Inversement, une combinaison de faible rayon de bec et d'avance élevée entraîne une nette diminution de η . Cela suggère que pour maximiser la performance du

procédé, il est essentiel de privilégier des conditions de coupe caractérisées par un rayon de bec élevé et une avance réduite.

L'interaction entre ces deux paramètres est donc déterminante pour optimiser le rendement du système.

4.3.4 Conclusion

L'analyse des effets principaux des paramètres d'usinage révèle que la rugosité de surface "Ra" est fortement influencée par l'avance par tour, modérément par le rayon du bec, et plus faiblement par la fréquence de rotation. Pour obtenir une finition optimale, la stratégie gagnante consiste à combiner une avance réduite, un rayon de bec élevé et une fréquence de rotation modérée. Ces conditions permettent de minimiser efficacement les irrégularités de surface et d'améliorer la qualité finale de la pièce usinée. Concernant, l'effet de la rugosité de départ lors du brunissage, s'avère très important et significatif, devant les paramètres (N, f et r) qui ont une influence sur la finition de la surface.

Conclusion générale

Ce projet de fin d'études s'inscrit dans le contexte d'une amélioration continue des procédés de fabrication mécanique, dans un environnement industriel de plus en plus exigeant en termes de qualité, de précision et de compétitivité.

L'objectif principal était d'optimiser la qualité de surface obtenue lors d'une opération de tournage, en s'appuyant sur une méthode rigoureuse basée sur les plans d'expériences. Pour ce faire, nous avons tout d'abord étudié les principes fondamentaux de l'usinage, en mettant en évidence l'influence des paramètres de coupe sur la rugosité de la surface. Ensuite, nous avons exploré les plans d'expériences, notamment les plans d'expériences factoriels complets et les plans de Box-Behnken, permettant une analyse structurée et efficace des effets des facteurs influents. Enfin, nous avons effectué une étude expérimentale portant sur l'usinage du matériau 30CDV12 8, très répandu dans l'industrie mécanique, afin d'identifier les conditions de coupe les plus favorables à une finition de surface optimale.

Les résultats obtenus ont permis de dégager des configurations de coupe pertinentes pour améliorer significativement la qualité de surface, tout en offrant une méthode fiable de prédiction et d'analyse des performances du procédé de TMS. Ce travail constitue une assise qu'il serait intéressant de poursuivre dans le cadre des futurs travaux.

Ce travail nous a permis de mobiliser et de renforcer nos compétences en fabrication mécanique, en statistique appliquée et en expérimentation. Il constitue une étape importante dans notre parcours scientifique, par l'emploi d'une approche méthodique avec un esprit d'analyse, en parfaite adéquation avec les attentes du monde industriel.

Références bibliographiques

- [1] W.S. Lin, B.Y. Lee, C.L. Wu, Modeling the surface roughness and cutting force for turning, J. Mater. Proc. Tech. 108 (2001) 286-293
- [2].<http://dspace.univsetif.dz:8888/jspui/bitstream/123456789/2107/1/Mémoire%20de%20Lakha%20Malika.pdf>
- St. Enache. "La qualité des surfaces usinées" édition Dunod 1972, 340 p.
- [3] M. Gaceb "An investigation of micro crack formation on machined surfaces" A PH-D Thesis, Department of Mechanical and Production engineering, Sheffield City polytechnic, July 1985.
- [4] F. Dupont "Aspects microstructural et mécanique des surfaces usinées en alliages d'Aluminium 2024 et 7075", Thèse de doctorat, Dept. des Matériaux, Ecole Polytechnique Federale De Lausanne, 1988.
- [5] M Remadna. Le comportement du système usinant en tournage dur. Application au cas d'un acier trempe usine avec des plaquettes CBN (nitrure de bore cubique). Thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Lyo
- [6] W.S. Lin, B.Y. Lee, C.L. Wu, Modeling the surface roughness and cutting force for turning, J. Mater. Proc. Tech. 108 (2001) 286-293
- [7] F. KLOCKE. J. LIERMANN. Roller burnishing of hard turned surfaces, international journal of machines tools and manufacture vol 38 P.P 419-423 (1998)
- [8] M. Tchadja Kagnaya, contribution a l'identification des mécanismes usure d'un WC-6%Co en usinage et par une approche tribologique et Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure des mines de paris.
- [9]<https://www.surfanet.org/qualitedesurface/#:~:text=Elle%20permet%20de%20mettre%20%C3%A0,%C2%AB%20histoire%20%C2%BB%20de%20la%20surface>
- [10] René Kamguem, inspection automatique et sans contact de la rugosité des pièces usinées. Thèse par articles présentée à l'école de technologie supérieure université de québec.
- [11] M. Benglia, Sélection Optimale des Conditions Coupe d'Opération de Tournage à Passe Multiple, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2014
- [12] G. Bellows, D. N. Tishler" Introduction to surface integrity" Material & Process Technology Laboratories Oct. 1970
- [13] Passeron, Tournage, Techniques de L'Ingénieur, BM7086, 1997
- [14] J.P. Cordebois, Coll, Fabrication Par Usinage, DUNOD, Paris 2003. ,

- [15] A. Toumine, Cours de Fabrication, Usinage par Enlèvement de Copeaux, 2007
- [16] [efaidnbmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/slimani-abdesselem/files/tournage.pdf?m=1588781944](https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/slimani-abdesselem/files/tournage.pdf?m=1588781944)
- [17] S. Benlahmidi, H. Aouici, Tournage, TP Production/ 2ème année GM&P, Ecole Nationale Supérieure de Technologie
- [18] Détermination Des Paramètres De Coupe, Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail-maroc-,
- [19] M. Rahou, F. Sebaa, Automatisation des Instruction d'Usinage Cas Paramètres de Coupe, Mémoire de Master Université, Abou Baker Belkaid, Tlemcen, 2007
- [20] ODINTSOV. L. G., Le durcissement et l'usinage de finition des pièces mécanique par déformation plastique des couches superficielles. M. MACHINOSTROENIE 1987, 311 p.
- [22] Hacini L, Lê VN, Bocher P. Traitement de surfaces par impacts : Évaluation des contraintes résiduelles induites par martelage. 18eme Congr Fr Mec 2007:27–31.
- [23] Y.G. SCHNEIDER, Technologie de traitement de finition sous pression, Guide de mémoire, Polytechnique édition, 12-1998
- [24] Kermouche G. Étude De Traitements Mécaniques Des Surfaces Reposant Sur Des Sollicitations De Rayure (Superfinition, Polissage, Galetage). Mater Tech 2013;101.
- [25] H. Hamadache, L. Laouar, N.E. Zeghib, K. Chaoui, characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing, journal of materials Technology 180- 2006,130-136.
- [26] S.Braham. Modélisation du galetage des vilebrequins, évolution des contraintes résiduelles sous chargement du service, 1991
- [27] N.H. Loh, S.C. Tam, S. Miyazawa. Statistical analyses of the effects of ball burnishing parameters on surface hardness. Wear ; 129 :235, 1989.
- L. Laouar, H. Hamadache, S.Mekhilef, Influence du traitement mécanique par brunissage sur la tenue à l'usure de l'acier (RB40) produit à SIDER, revue des sciences et technologie "synthèse" n° 14, Université Badji Mokhtar Annaba 2005, pp.
- [28] Yashcheritsyn, EI. Pyatosin, VV. Votchuga. Hereditary influence of pretreatment on roller-burnishing surface wear resistance. Sov J Friction Wear 1987 ;8(2) :87
- [29] Lee SSG, Tam SC, Loh NH, Miyazawa S. An investigation into the ball burnishing of an AISI 1045 freeform surface. J Mater Process Technol, 29 :203, 1992.
- D. Retraint & J. Lu. Study of residual stress distribution by the combination of three techniques in an aluminium based MMC. Materials science forum. p. 498-503. Trans Tech Publications, (2000).

T.Segawa, H. Sasahara & M. Tsutsumi. Development of a new tool to generate compressive residual stress within a machined surface. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 44, no 11, p. 1215-1221. (2004).

[32] G. Maeder, L. Castex & J. Barralis. Précontraintes et traitements superficiels. Techniques de l'ingénieur [M 1180]-1999, (1991

[33] chrome-extension://efaidnbmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://analyse-fabrication.univ-lille.fr/res/F2_Les_usinages.pdf

[34] Gaëtan Albert, identification et modélisation du torseur des actions en fraisage, Thèse de doctorat, école doctorale des sciences physique et l'ingénieur

[35] <https://www.bs-decolletage.com/post/differents-types-fraiseuses>

V. K. Yatsenko, V. F. Pritchenko, I. N. Komarchuk & al. Diamond burnishing of coatings. Strength of Materials, vol. 19, no 5, p. 725-726. (1987)

ERCHOV. A. A. SERGUEEV. U. A. KHMELNIKIR. V. L., L'efficacité et perspectives d'utilisation de l'usinage fini, augmentation de la résistance à l'usure de la construction des machines dans l'industrie de l'énergie M. NIIE-INFORMATION- ENERGOMAC1986, 34 p

ÉRIC FELDER, « Procédés d'usinage », Article B7000, Technique de l'ingénieur 1997.

[39] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/surfaces-42463210/etats-de-surface-r1230/#:~:text=R%C3%89SUM%C3%89,ou%20sa%20r%C3%A9sistance%20au%20matage>

[40] S. Mittal, C.R. Liu. A method of modeling residual stresses in superfinish hard turning. Wear ; 218 :21, 1998.

[41] P.W. Bridgman, Trans, ASM, Soc, Metals, 23, pp 553-574, 1944.

[42] M. Pillet, Les plans d'expériences par la méthode TAGUCHI, 2011.

[43]G. Jacques, Introduction aux Plans d'expériences, Paris: Dunod, 2001.