

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار عنابة

Faculté : de Technologie
Département : Génie Mécanique
Domaine : Sciences Et Technologies
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Fabrication Mécanique Et Productique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**APPLICATION DE LA METHODOLOGIE DES PLANS D'EXPERIENCES
- ETUDE COMPARATIVE ET OPTIMISATION DE LA RUGOSITE
(CAS DU PROCEDE DE TOURNAGE)**

Présenté par : *KIR Mouad*

Encadrant : *LAOUAR Lakhdar*

Professeur

Université Badji Mokhtar – Annaba

Jury de Soutenance :

BOUCHELAGHEM A/Aziz	Professeur	Université Badji Mokhtar - Annaba	Président
LAOUAR Lakhdar	Professeur	Université Badji Mokhtar - Annaba	Encadrant
MEKHILEF Slimane	MCA	Université Badji Mokhtar - Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2021/2022

Dédicace

J'ai le grand honneur de dédier

Ce modeste travail à :

A mes parents

A mes chères frères et sœurs

A toute ma famille Kir

A tous ceux qui me sont chers et proches

A toute personne m'ayant encouragé ou aidé au long de mes études.

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier ALLAH, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Je tiens aussi à remercier mon encadreur professeur **LAOUAR Lakhdar** d'avoir accepté de diriger ce mémoire, de m'avoir soutenu et encouragé pour le mener à terme, par ses orientations et sa disponibilité. Je lui présente ma profonde reconnaissance.

Je présente également mes remerciements à tous les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je voudrai également remercier Mr Mebarek Abderraouf Madjdi pour son aide dans la réalisation des essais, ainsi que le Docteur Boumediri Haithem pour ces pertinentes remarques et précieux conseils.

Je tiens aussi à remercier tous mes enseignants du département Génie mécanique, pour leur contribution à ma formation tout au long de mon cursus universitaire.

J'adresse mes sincères remerciements à toutes les personnes, qui m'ont fortement encouragés et soutenus, tout au long de la réalisation de ce travail.

Résumé

La qualité de surface d'une pièce de machine joue un rôle important lors du fonctionnement d'un mécanisme. Cependant, lors de la fabrication par le processus de coupe, il est important de fixer les conditions de coupe les plus favorables, voire optimales garantissant un meilleur fini de surface. Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans ce contexte et il admet un caractère expérimental. La méthodologie suivie dans ce cas est basée sur les plans d'expériences et surface de réponses. Le travail consiste à comparer les résultats de trois méthodes lors de l'usinage d'une pièce en XC48 par le procédé de tournage. Les résultats obtenus ont permis de mieux comprendre l'importance de l'emploi des méthodes des plans d'expériences, de montrer l'effet des conditions de coupe sur la qualité de la surface réalisée caractérisée par le critère de rugosité "Ra" et d'en déduire les valeurs optimales.

Abstract

The surface quality of a machine part plays an important role in the operation of a mechanism. However, during manufacturing by cutting process, it is important to set the most favourable or even optimal cutting conditions for guaranteeing a better surface finish. The work presented in this thesis fits into this context and it admits an experimental character. The methodology followed in this case is based on experimental designs and response surfaces. The work consists in comparing the results of three methods during the machining a part in XC48 by turning process. The results obtained permits to understand the importance of experimental design methods, to show the effect of cutting conditions on the quality of the surface produced characterized by the roughness criterion "Ra" and to deduce the optimal values.

ملخص

تلعب جودة سطح قطع الآليات الميكانيكية دورا مهما أثناء تشغيل الآلية. ولذلك، عند التصنيع من خلال عملية القطع، من المهم تعيين ظروف القطع الأكثر ملاءمة، وحتى المثلى التي تضمن تشطيبا أفضل للسطح. العمل المقدم في هذه الأطروحة هو جزء من هذا السياق ويكتسب طابع تجريبي. تعتمد المنهجية المتبعة في هذه الحالة على خطط التجارب. ويتكون العمل من مقارنة نتائج ثلاث طرق خلال قطع عينة من المادة XC 48 خلال عملية المخرطة. أبدت النتائج التي تم الحصول عليها أنه من الممكن فهم أهمية استخدام أساليب التصميم التجريبية بشكل أفضل، لإظهار تأثير ظروف القطع واستنتاج القيم المثلى. 'Ra على جودة السطح المنتج الذي يتميز بمعيار الخشونة'

Liste des figures

Figure 1.1 Caractéristiques du profil	5
Figure 1.2 Profil d'une surface usinée	6
Figure1.3 Classement des irrégularités de surface	6
Figure1.4 Influence de la topographie sur le comportement des surfaces et du milieu interfacial (troisième corps)	7
Figure1.5 Paramètres de rugosité	7
Figure 1.6 Schéma des principales zones de coupe	9
Figure1.7 Mouvements de coupe et d'avance en tournage	10
Figure1.8 Terminologie des organes principaux du tour	10
Figure 1.9 L'opération de chariotage	12
Figure 1.10 L'opération de dressage	13
Figure1.11 L'opération de percage	13
Figure 1.12 L'opération de alésage	13
Figure 1.13 L'opération de chanfreinage	13
Figure 1.14 L'opération de rainurage	14
Figure 1.15 L'opération de tronçonnage	14
Figure 1.16 L'opération de filetage	14
Figure 1.17 vitesse de coupe V_c	15
Figure 1.18 Vitesse d'avance V_F	15
Figure1.19 Les profondeurs de passe	16
Figure 1.20 Défauts de surface	17
Figure 1.21 Variation de la rugosité de surface sous différentes conditions de lubrification en fonction de la vitesse d'avance pour le 6061-T6	17

Figure 1.22 Variation de la rugosité de surface en fonction du mode de lubrification pour différentes vitesses de coupe	19
Figure 1.23 Variation de la rugosité de surface à usinage Sec, MQL et à lubrification abondante de l'AISI-4340	20
Figure 1.24 Effet de la vitesse de coupe et du mode de lubrification sur la rugosité de surface du 6061-T6	20
Figure 1.25 Variation de la rugosité de surface en fonction de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance pour l'acier C45	21
Figure 2.1 Domaine de variation d'un facteur	25
Figure 2.2 Domaine d'étude formé par deux facteurs	25
Figure 2.3 Les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse	27
Figure 2.4 1 ^{er} cas de plan de Taguchi	35
Figure 2.5 2 ^{eme} cas de plan de Taguchi	36
Figure 2.6 3 ^{eme} cas de plan de Taguchi	36
Figure 2.7 Illustration du plan de Box Behnken pour trois facteurs	37
Figure 3.1 Ébauche XC48 laminée à chaud	42
Figure 3.2 Epreuve d'essai	42
Figure 3.3 Schéma de l'expérimentation	43
Figure 3.4 Epreuve	43
Figure 3.5 Tour universel modèle AI616 fabriqué en URSS	44
Figure 3.6 Outils de coupe	45
Figure 3.7 Rugosimètre modèle, TR220	47
Figure 3.8 Graphique des effets principaux	48
Figure 3.9 Graphique des effets des interactions	48

Figure 3.10 Digramme de Pareto	49
Figure 3.11 Graphique des effets principaux	52
Figure 3.12 Graphique des effets des interactions	52
Figure 3.12 Graphique des effets des interactions	53
Figure 3.14 Digramme de Pareto.....	53
Figure 3.15 Schéma de l'expérimentation.....	56
Figure 3.16 Effet de la profondeur de passe et l'avance	59
Figure 3.17 Effet de l'avance (f)	59
Figure 3.18 Effet de la profondeur de passes	60
Figure 3.19 Effet de la profondeur de passe et la vitesse de rotation	60

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Les éléments de machine de tour	11
Tableau 2.1 Taille de différents plans factoriels.....	33
Tableau 2.2 Tableau de Box Behnken pour trois facteurs	38
Tableau 3.1 Matrice d'expériences	46
Tableau 3.2 Matrice des essais plan factoriels 2^4	47
Tableau 3.3 Table de Taguchi L12	50
Tableau 3.4 Matrice d'expériences plan Taguchi L12	51
Tableau 3.14 Matrice d'expériences	57
Tableau 3.15 Matrices des essais	57

Table des matières

Dédicace	ii
Remerciement	iii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	viii
Introduction générale	1
Chapitre 1: Etude bibliographique	3
1.1 Introduction	4
1.2 La surface des pièces mécanique	4
1.2.1 Généralités sur les états de surface	4
1.2.2 Définitions de l'état de surface des pièces mécaniques	4
1.2.3 État de surface en tournage.....	5
1.2.4 Topographie.....	6
1.3 L'usinage	9
1.3.1 Principes d'usinage	9
1.3.2 Processus de coupe.....	9
1.3.3 Tournage.....	10
1.3.3 Influence des paramètres de coupe sur l'état de surface :	16
1.3.4 Influence de la vitesse d'avance :	17
1.3.5 Influence du rayon du bec de l'outil :	18
1.3.6 Influence du mode de lubrification :	18
1.4 Conclusion.....	21
Chapitre 2: Les plans d'expériences	22
2.1 Introduction	23
2.2. Présentations des plans d'expériences	23
2.2.1. Aperçu historique.....	23

2.2.2 Principe.....	24
2.2.3 Terminologie	25
2.2.4 Notion de surface de réponse (Goupy, 2006)	28
2.2.5 Notion de modélisation mathématique.....	28
2.3 Types de plans d'expériences	29
2.3.1 Les plans de criblage	29
2.3.2 Plans factoriels complets	31
2.3.3 Les plans de Taguchi.....	34
2.3.4 Plans de Box Behnken[10].	36
2.4 Conclusion.....	39
Chapitre 3 : Matériels et méthodes.....	40
3.1 Introduction	41
3.2 Matériau	41
3.3 Méthodologie et essais expérimentaux	42
3.3.1 Machine-outil.....	43
3.3.2 Outils de coupe	44
3.3.3 Définitions des facteurs étudiés et des domaines expérimentaux.....	45
3.3.4 Analyse par le plan factoriel complet.....	46
3.3.5 Analyse par le plan de Taguchi	50
3.3.6 Analyse par le plan de box Behnken.....	55
3.4 Conclusion.....	61
Conclusion générale.....	62
Références bibliographiques	64

Introduction générale

Introduction générale

De nos jours, l'industrie est de plus en plus exigeante quant à la qualité, la précision et la finition des pièces usinées afin de garantir une meilleure performance en service. Dans le domaine de la fabrication qui ne cesse de se développer, plusieurs procédés d'usinage sont utilisés afin d'aboutir aux pièces escomptées par enlèvement de matière. Plusieurs études portent sur l'optimisation des paramètres et conditions d'usinage afin de garantir un meilleur fini de surface des pièces usinées.

Dans ce travail, nous utilisons une méthodologie scientifique, en l'occurrence, les méthodes des plans d'expériences et surface de réponse déférant méthodes des plans d'expériences pour l'analyse de la qualité de surface dans le cas de tournage, appuyée par une étude comparative entre les méthodes envisagées et l'optimisation des paramètres de régime permettant l'obtention de la qualité de surface la plus appréciable.

Le mémoire s'articule sur les chapitres suivants :

- Le premiers chapitre, regroupe une synthèse bibliographie où sont présenté, généralités sur les états de surface, paramètres de rugosité, principes d'usinage.
- Dans le deuxième chapitre, sont formulées dans le détaille les information importants et utiles avec des exemples, de plan factoriel complet et l'approche de Taguchi, le plan de Box Behnken et l'applique dans ce présent travail.
- Le troisième chapitre, représente une partie expérimentale où ont été réalisés des essais sur des échantillons en suivant la méthodologie considérée.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

1.1 Introduction

La fabrication mécanique consiste à la mise en forme des pièces mécaniques par plusieurs procédés, parmi lesquels ceux par enlèvement de matière. Tout au long de l'histoire de la fabrication mécanique l'homme a cherché à améliorer la qualité des pièces fabriquées par l'optimisation des régimes de coupe. Améliorer la qualité des pièces mécaniques implique l'obtention d'une bonne qualité de surface avec une grande précision des côtes.

L'état de la surface et la précision des côtes dépend de plusieurs facteurs en l'occurrence, les paramètres de coupe, la nuance de la matière à usiner, la nuance et la géométrie de l'outil de coupe, ainsi que l'état de la machine- outil.

1.2 La surface des pièces mécanique

1.2.1 Généralités sur les états de surface

La structure superficielle lors de l'usinage de métaux par enlèvement de copeaux est déterminée par les irrégularités résultant de la déformation de la face usinée. Elle varie essentiellement selon la méthode d'usinage, les conditions de coupe, la matière à usiner et la stabilité d'ensemble de l'opération [1]. Cette structure est définie par les critères suivants :

- La rugosité R : exprime les plus petites irrégularités, c'est le fin réseau d'écarts micro géométriques mesurés sur la plus petite longueur d'échantillonnage.
- L'ondulation W . est constituée d'irrégularités de plus grande dimension au niveau suivant de la longueur d'évaluation sur la surface de la pièce.
- La direction des traces d'usinage L . définit l'orientation du profil superficiel. Elle indique la direction dominante générée par la méthode d'usinage.

1.2.2 Définitions de l'état de surface des pièces mécaniques

C'est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, etc. Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.). Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication [1].

Surface géométrique

Surface parfaite sur le dessin, elle est définie géométriquement par le bureau d'études, à l'aide de cotes nominales.

Surface spécifiée

Surface résultant de la surface géométrique, transformée par le bureau des études qui prescrit les limites de réalisation de cette surface à l'aide de symboles et de valeurs numériques en Complément des cotes nominales du dessin.

Surface mesurée

Surface déterminée à l'aide des instruments de mesure à partir de la surface réelle. La surface mesurée, résultant de l'exploration de la surface réelle devra être l'image la plus rapprochée de celle-ci.

Surface réelle

Surface obtenue au cours de la fabrication (Figure 1.1).

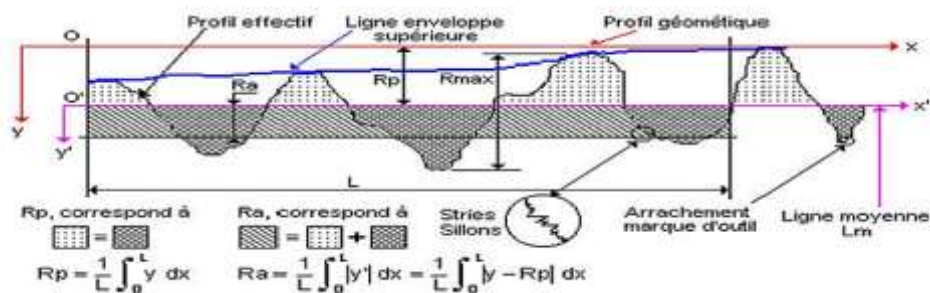


Figure 1.1 caractéristiques du profil

L : Longueur de base du profil moyen

R_p : Profondeur moyenne de rugosité ; Moyenne arithmétique des valeurs de l'ordonnée y de tous les points du profil sur la longueur de base **L**.

R_a : Écart moyen arithmétique ; Moyenne arithmétique des valeurs absolues de l'ordonnée y (entre chaque point de la courbe et l'axe '**Ox**').

1.2.3 État de surface en tournage

L'état de surface dépend principalement de l'avance et du rayon de bec de l'outil. Le choix de l'outil et des conditions de coupe doit donc tenir compte de ces influences. La rugosité théorique peut être déterminée à partir du profil géométrique idéal donné par la (figure 1.2). Si le rayon de la plaquette est grand devant l'avance, la hauteur maximale du profil de rugosité R_{max} et donné par :

$$R_{max} = \frac{f^2}{8 \times r}$$

R_{max} : La rugosité maximale en millimètre ;

f : l'avance en millimètre ;

r : le rayon de l'outil de coupe maximal en millimètre ;

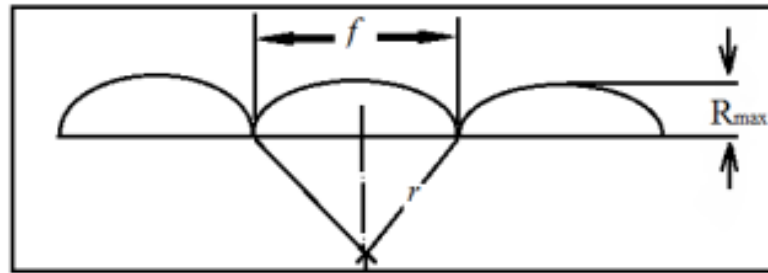


Figure 1.2 Profil d'une surface usinée

1.2.4 Topographie

1.2.4.1 Définition

Ce terme générique regroupe l'ensemble des facteurs caractérisant les irrégularités géométriques d'une surface, qui vont du domaine microscopique défini plus généralement par la rugosité, au domaine macroscopique correspondant à la géométrie de contact. Les irrégularités d'une surface peuvent être classées en trois niveaux (figure 1.3). Sont donc concernés tous les effets qui résultent de la mise en œuvre et du parachèvement d'une pièce mécanique (opérations de mise en forme, de mise à la côte, traitements thermiques, traitements de surfaces), et en particulier :

- La génération de sillons, aspérités, cavités, porosités...
- La génération de défauts de forme (linéarité, circularité...).

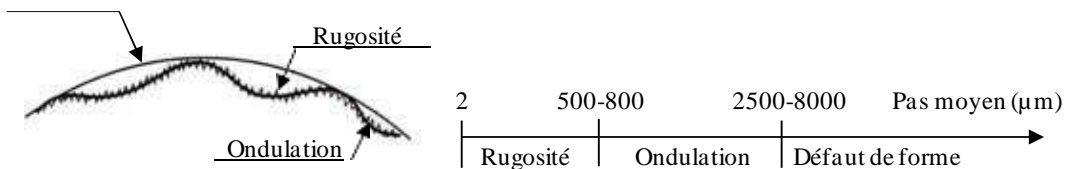


Figure 1.3 Classement des irrégularités de surface

1.2.4.2 Importance de la topographie

La rugosité est un paramètre important dont on connaît par ailleurs les effets sur la résistance à la corrosion et le comportement mécanique des matériaux.

La topographie agit sur la plupart des facteurs qui gouvernent le comportement au frottement et à l'usure, et notamment (figure 1.4):

- Le mode de contact ;
- Le comportement du milieu interfacial (troisième corps) ;

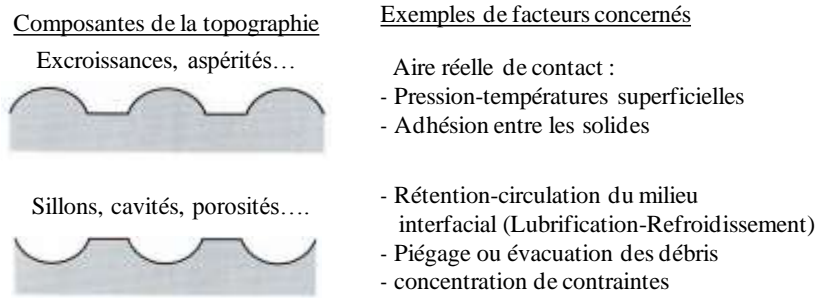


Figure1.4 Influence de la topographie sur le comportement des surfaces et du milieu interfacial (troisième corps...)

Lorsqu'elle concerne plus particulièrement le domaine des pièces d'outillage destinées à la mise en forme (coupe, déformation. Moulage ...), la rugosité constitue aussi un facteur déterminant pour la qualité des produits finis (propriétés d'aspect...). [2]

La rugosité intervient de manière prépondérante dans le processus de rodage, auquel est systématiquement liée une diminution des irrégularités de surface ; cette évolution correspond à une élimination des aspérités, se produisant ou bien par cisaillement - déchirement (avec émission de débris), ou bien par consommation chimique (action des additifs extrême pression des lubrifiants), ou bien encore par plastification.

La définition de la topographie prend en compte toutes les caractéristiques des irrégularités de surface : dimensionnelles (par exemple hauteur des « pics »), géométriques (par exemple forme, Acuité des aspérités ou des cavités), mais aussi la répartition et l'orientation (préférentielle ou Aléatoire...). Les caractéristiques topographiques des surfaces sont caractérisées par l'acuité, la Forme, l'orientation des rugosités.

1.2.4.3 Paramètres de rugosité

Les paramètres d'état de surface les plus couramment utilisés sont récapitulés dans la (figure1.5).

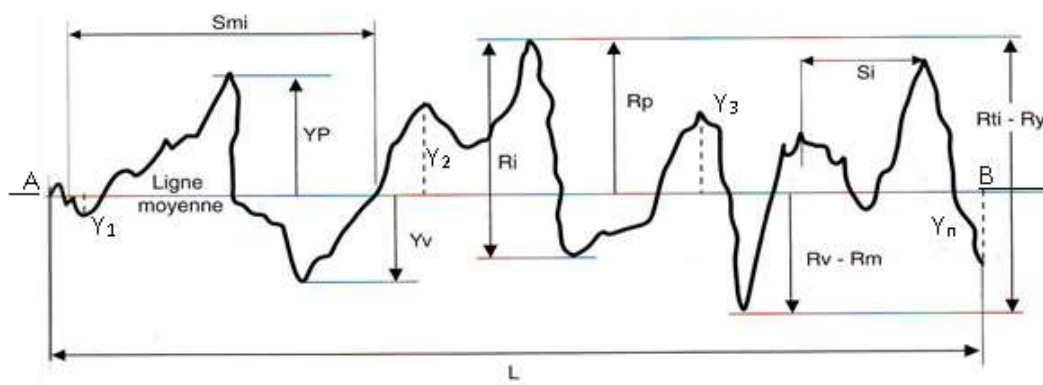


Figure1.5 Paramètres de rugosité

- 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 »
- 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 Rti sur la longueur totale d'évaluation
- Ri : Profondeur élémentaire de la rugosité
- R : Profondeur moyenne de la rugosité (moyenne Ri sur 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
- Smi : Pas des irrégularités du profil (moyenne des Smi sur la longueur de base)

1.2.4.4 Rugosité minimale :

Ramenée aux facteurs dimensionnels et de forme, cette notion sous-entend principalement : - hauteur minimale des rugosités ; - acuité (rayon de courbure) minimale des pics ; La première prescription s'adresse en particulier aux contacts travaillant en régime lubrifié, domaine pour lequel la hauteur des aspérités détermine l'épaisseur critique des films lubrifiants. La seconde prescription quant à elle est quasi universelle puisqu'elle vise, par l'amélioration de la portance (accroissement de la surface réelle de contact), à diminuer les pressions superficielles et les risques de vieillissement ou de dégradation qui lui sont associés. La diminution de l'acuité des aspérités va notamment dans le sens d'une amélioration de la tenue des films superficiels favorables, et plus particulièrement ceux sensibles aux effets de surcharge localisée (films minces et/ou fragiles à base d'oxydes...). Pour un grand nombre de situations, la recherche d'une rugosité optimale se substitue à celle d'un perfectionnement du « poli » des surfaces. L'un des critères de mesure de Rugosité largement employé est la rugosité (Ra). Elle se représente par les irrégularités relevées comme les écarts de profil effectif par rapport à la ligne de référence définie sur la longueur de base, et calculée par :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_A^B |Y(x)| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i|$$

n : nombre de pointes successive du profil ; $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ par rapport à la ligne « MM »

1.3 L'usinage

1.3.1 Principes d'usinage

L'usinage consiste en toute opération de mise en forme par enlèvement de matière dans le but d'aboutir à une forme voulue d'une pièce brute tout en respectant les dimensions et l'état de surface prédéfinis dans la marge de tolérance donnée dans le dessin de définition.

En industrie, les procédés d'usinage par enlèvement de matière des pièces métalliques à l'aide des machines-outils sont considérés comme les procédés de mise en forme les plus performants et les plus précis. Un mouvement de coupe et un mouvement d'avance sont combinés pour générer les formes escomptées. La surface voulue est générée grâce à un travail de forme dû à la forme de l'outil et un travail d'enveloppe causé par la trace de l'arête de l'outil.

1.3.2 Processus de coupe

Le processus de coupe consiste principalement en la création et l'évacuation des copeaux afin d'aboutir à une pièce qui répond aux exigences du concepteur. Ce processus met en jeu plusieurs phénomènes mécaniques et thermiques ayant lieu dans les zones de coupe schématisées dans la (figure 1.6).

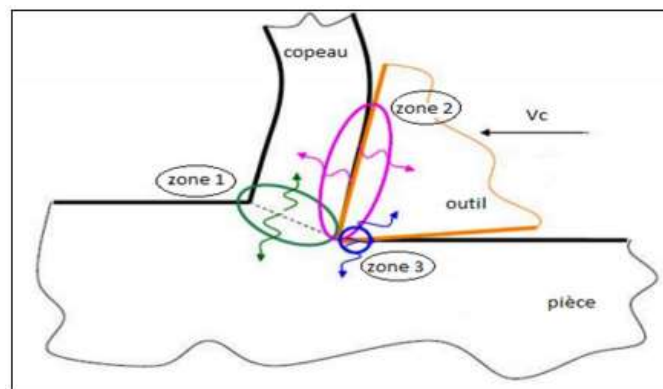


Figure 1.6 Schéma des principales zones de coupe

Les principales zones de coupe sont :

- Zone 1 : C'est la zone de cisaillement primaire qui est le siège d'une déformation plastique et d'une élévation importante de la température dues à la séparation du métal en deux.
- Zone 2 : C'est la zone de cisaillement secondaire qui subit de fortes déformations plastiques dues aux frottements entre le copeau et l'outil de coupe.
- Zone 3 : C'est la zone de cisaillement tertiaire entre la surface usinée et la face de dépouille. Cette zone est la moins énergétique des zones de coupe.

1.3.3 Tournage

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils à arête unique. La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principal du procédé (Figure 1.7) [3].

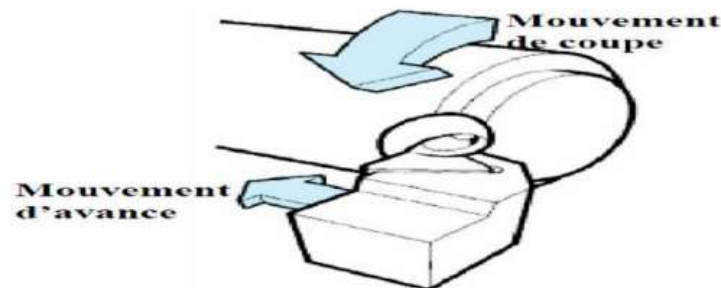


Figure1.7 : Mouvements de coupe et d'avance en tournage [3].

L'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce. La combinaison de ces deux mouvements, ainsi que la forme de la partie active de l'outil, permettent d'obtenir des usinages de formes de révolution (cylindres, plans, cônes ou formes de révolution complexes) [1].

1.3.3.1 Les machines de tournage

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

a- Les tours parallèles à charioter et à fileter

Ces machines sont utilisées pour les travaux unitaires ou de petites et moyennes séries sur des pièces très simples. Ces tours sont peu flexibles.

Seules les surfaces dont les génératrices sont parallèles ou perpendiculaires à l'axe de la broche sont réalisables en travail d'enveloppe.

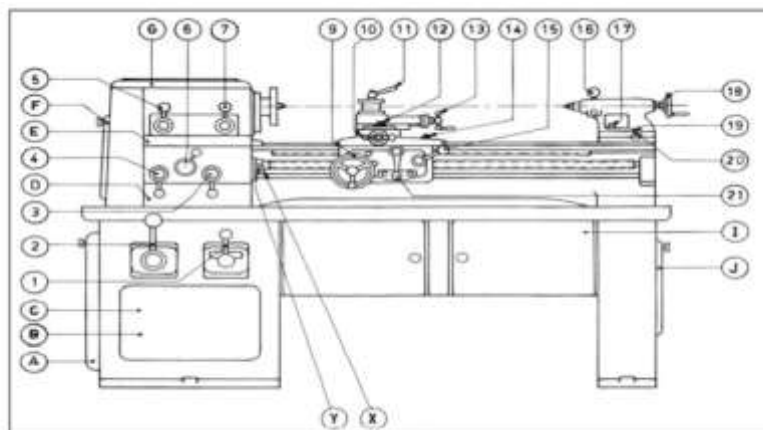


Figure1.8 : Terminologie des organes principaux du tour [4].

Tableau1.1 : Les éléments de machine de tour [4].

1	Levier de commande du moteur	17	Écrou de blocage de la contre-pointe sur le banc
2	Levier de commande de la boîte de vitesse	18	Volant de commande du canon de la contre-pointe
3	Levier d'inversion du sens de rotation (tringle-vis-mère)	19	Vis de désaxage de la contre-pointe
4	Levier de sélection des filetages et avances	20	Contre-avis de désaxage de la contre-pointe
5	Levier donnant (position harnais) les mouvements lent et rapide	21	Levier d'embrayage des mouvements automatiques longitudinal et transversal des chariots
6	Levier baladeur de sélection des filetages et avances	A	Couvercle d'accès à la poulie d'entrée de la boîte de vitesse
7	Levier donnant à la poupée les vitesses à la volée ou au harnais	C	Accès au moteur principal
9	Volant de commande à la main du chariot longitudinal	D	Couvercle d'accès à l'inverseur
10	Commande à la main du chariot transversal	E	Couvercle d'accès au graissage de la boîte « Norton »
11	Levier de blocage de la tourelle porte-outils	F	Porte d'accès à la tête de cheval
12	Vis (deux) de blocage de l'orientation du chariot porte-outils	G	Couvercle de la poupée fixe
13	Commande à la main du chariot porte-outils	I	Portes des armoires à outils
14	Vis de blocage du chariot longitudinal	J	Couvercle d'accès au dispositif de lubrification
15	Levier commandant les demi-écrous de la vis mère (filetage)	X	Manchon
16	Levier de blocage du fourreau de la contre-pointe	Y	Vis

b- Les tours à copier

Ils permettent l'usinage de pièces par reproduction, à partir d'un gabarit, grâce à un système de copiage hydraulique qui pilote le déplacement du chariot transversal. C'est une machine assez flexible qui peut convenir pour des travaux de petites à grandes séries. La génératrice des surfaces de révolution peut être quelconque [3].

c- Les tours semi-automatiques

Ce sont des tours équipés d'un traînard semblable à celui d'un tour parallèle avec une tourelle hexagonal munie de 6 postes d'outils animée d'un mouvement longitudinal contrôlé par des butées. Les outillages spécialement conçus pour la machine permettent des opérations simples et précises.

d- Les tours automatiques multibroches

Ce type de tour comporte par exemple huit broches. Huit outils soit un par broche travaillent en même temps et effectuent une opération différente. Ce sont les broches qui tournent d'un huitième de tour pour présenter la pièce devant l'outil suivant. Lorsque les broches ont effectué un tour complet la pièce est terminée, Il est possible de travailler dans la barre. Sur ce type de tour les réglages sont longs et le temps de passage d'une série à l'autre immobilise la machine. Ce tour sera réservé pour les grandes et très grandes séries à des pièces de dimensions réduites à cause de l'espacement entre les broches [3].

Les tours à commande numérique

Comme en copiage la génératrice de la pièce peut être quelconque mais ici la trajectoire de l'outil est obtenue par le déplacement simultané de deux axes dont les positions successives sont données par un calculateur travaillant à partir d'un programme propre à la pièce. Ces tours sont équipés d'un magasin d'outils et éventuellement d'un système de chargement des pièces

La flexibilité de ces machines est très grande et particulièrement bien adapté pour le travail unitaire ou les petites séries répétitives [3].

1.3.3.2 Les opérations de tournage

a- Chariotage

Le mouvement d'avance (mouvement de l'outil) est une translation rectiligne parallèle à l'axe de révolution de la pièce, et cet usinage aura pour effet de réduire le diamètre de la pièce.

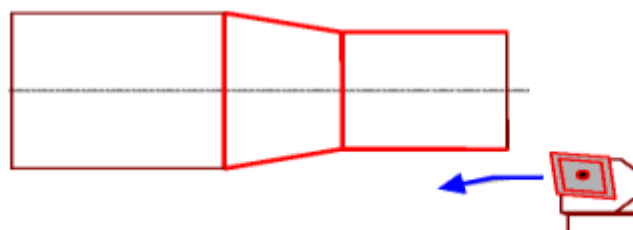


Figure 1.9 L'opération de chariotage [3].

b- Dressage

Opération qui consiste à usiner une surface plane perpendiculaire à l'axe de la broche extérieure ou intérieure, ce qui diminue la longueur.

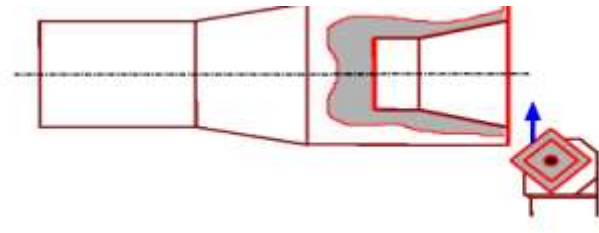


Figure 1.10 L'opération de dressage [3].

c- Perçage

Opération qui consiste à usiner un trou à l'aide d'un foret.

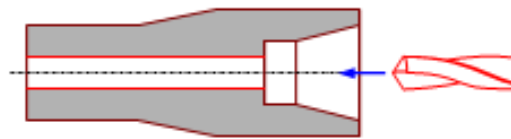


Figure 1.11 L'opération de perçage [3].

d- Alésage

Cette opération consiste à usiner une surface cylindrique ou conique intérieure. Le mouvement d'avance est similaire à celui en chariotage

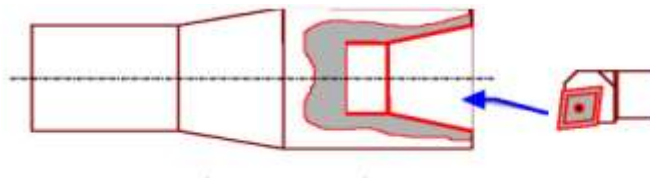


Figure 1.12 L'opération d'alésage [3].

e- Chanfreinage

Opération qui consiste à usiner un cône de petite dimension de façon à supprimer un **angle** vif.

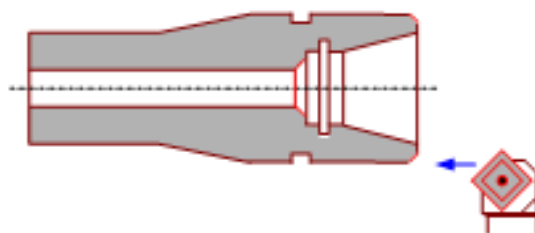


Figure 1.13 L'opération de chanfreinage [3].

f- Rainurage

On donnant à l'outil une trajectoire plane quelconque, on peut obtenir une forme de révolution quelconque.

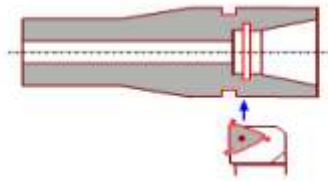


Figure 1.14 L'opération de rainurage [3].

g- Tronçonnage

Opération qui consiste à usiner une rainure jusqu'à l'axe de la pièce afin d'en détacher un tronçon.

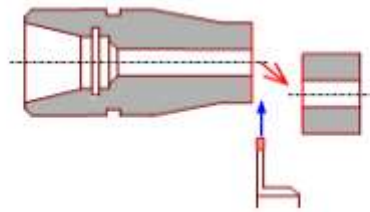


Figure 1.15 L'opération de tronçonnage [3].

h-Filetage

Opération qui consiste à réaliser un filetage extérieur ou intérieur, le mouvement d'avance est combiné avec le mouvement de coupe.

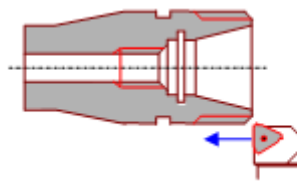


Figure 1.16 L'opération de filetage [3].

Les paramètres de coupe

- V_c : Vitesse de coupe en m/min ;
- f : Avance par tour en mm/tr (tournage) ;
- a_p : Profondeur de passe.

Vitesse de coupe V_c : La pièce est entraînée sur le tour à une certaine vitesse angulaire ω , cette vitesse étant communiquée par la broche de la machine vers la porte pièce. La vitesse relative de la pièce en ce point par rapport à l'outil est donnée par la formule suivante :

$$V_c \text{ (m/min)} = \frac{D}{2} \text{ (m)} \times \omega \text{ (red/min)} \dots\dots\dots \text{(I-1)}$$

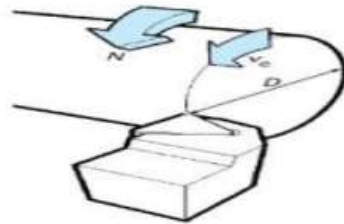


Figure 1.17 : vitesse de coupe V_c [5].

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

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

Vitesse d'avance V_f et avance par tour f : La vitesse d'avance (mm/min), que la figure (I. 18) montre, est la vitesse à laquelle la machine déplace l'outil par rapport au bâti. L'avance par tour (mm/tr) est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce a effectué une révolution. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée. L'avance influence non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent.

La vitesse d'avance V_f est donnée par la formule suivante

$$V_f \text{ (mm)} = f \text{ (mm/tr)} \times N \text{ (tr/min)}$$

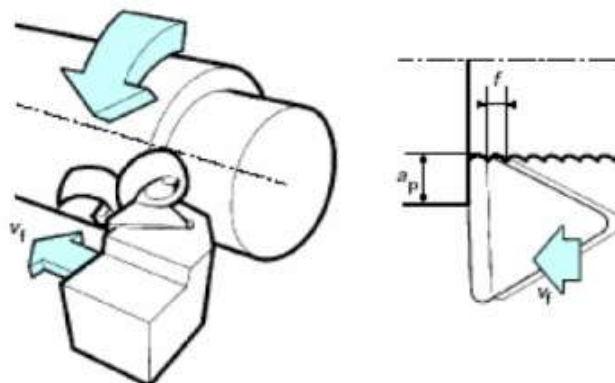


Figure 1.18 Vitesse d'avance V_f

Profondeur de passe a_p : La profondeur de passe notée a_p en (mm), correspond à la longueur de l'arête de coupe engagée dans la matière, dans le cas de la coupe orthogonale, et à la différence entre le rayon de la pièce avant et après usinage, dans le cas du tournage. La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arête de l'outil.

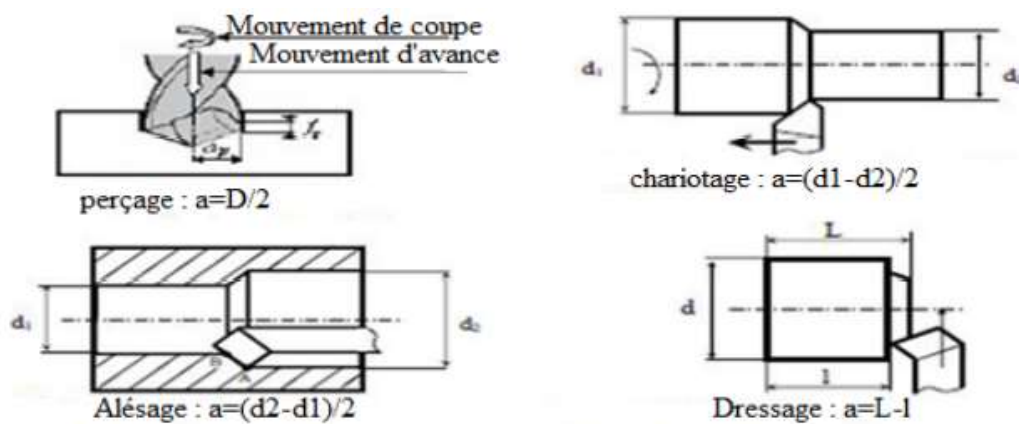


Figure1.19 les profondeurs de passe

1.3.3 Influence des paramètres de coupe sur l'état de surface :

Les surfaces usinées présentent, dans la plupart des cas, des défauts, des irrégularités et des écarts par rapport à une surface idéale. Ceux-ci sont dus aux matériaux, aux outils de coupe utilisés et leur degré d'usure, et aux conditions de coupe. Les défauts macro géométriques et ceux micros géométriques peuvent dériver des problèmes vibratoires liés au système technologique, tels que les balourds des pièces ou des outils, aux vibrations des machines ou aux phénomènes de coupe. Ces défauts peuvent être classés suivant 4 ordres (figure 1.20) :

Ordre 1 : écarts de forme et de position dus au procédé d'usinage tel que la déformation de la pièce, ou au matériau par libération des contraintes internes ou à des défauts au niveau de la machine d'usinage tels que les défauts de bridage et l'usure des organes entre autres ;

Ordre 2 : ondulations causées principalement par les problèmes vibratoires liés au système technologique tels que les balourds des pièces ou des outils et les vibrations des machines ;

Ordre 3 : stries et sillons dus aux phénomènes de coupe ;

Ordre 4 : arrachements dus aux phénomènes de coupe.

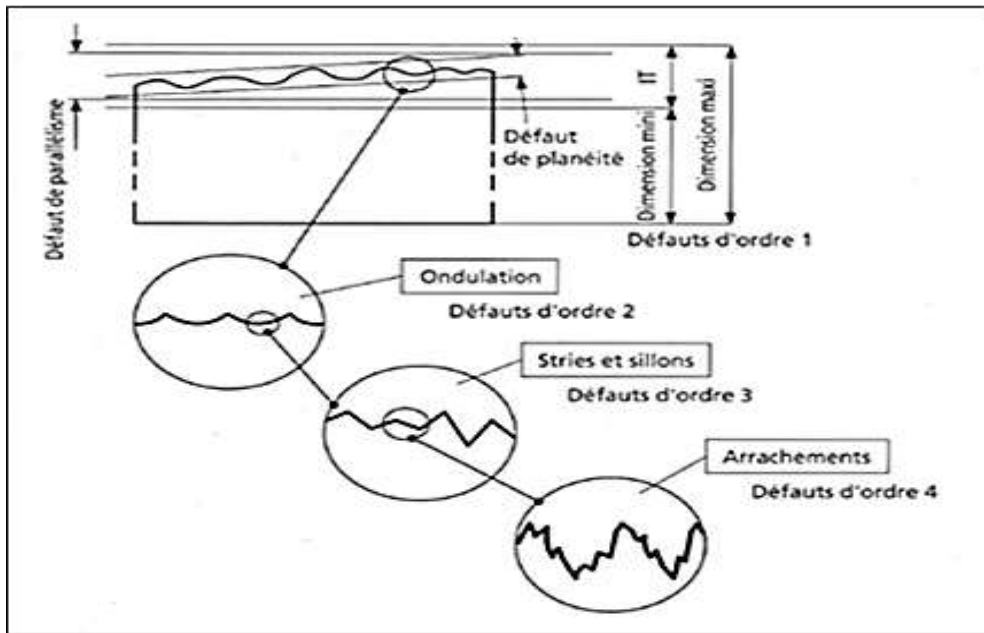


Figure 1.20 Défauts de surface (Tirée de Cordebois et Colombié, 2008)

La rugosité de surface est définie par les défauts d’ordres 3 et 4. Son origine est fortement liée aux conditions de coupe telles que l’avance ou la géométrie de l’outil, encore, à l’hétérogénéité du matériau et ses propriétés plastiques. Le mode de lubrification et les vibrations de l’outil ou de la pièce peuvent aussi avoir une influence sur la rugosité de surface, communément appelée fini de surface.

1.3.4 Influence de la vitesse d’avance :

Kouam et al. ont démontré que la rugosité de surface dépend de la vitesse d’avance sous différentes conditions de lubrification de l’usinage en tournage de l’alliage d’aluminium 6061-T6 (Kouam et al., 2012) (figure 1.21).

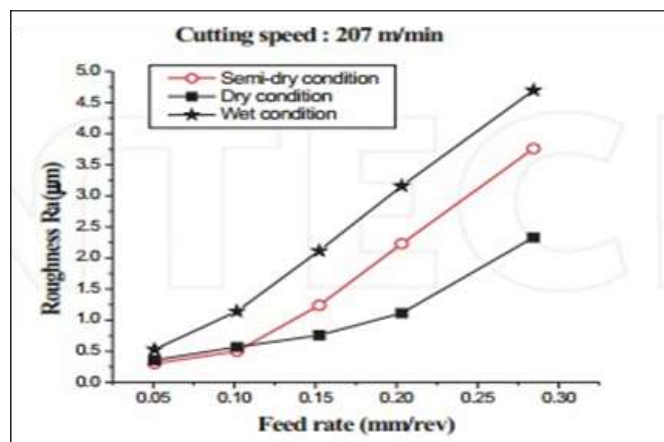


Figure 1.21 Variation de la rugosité de surface sous différentes conditions de lubrification en fonction de la vitesse d’avance pour le 6061-T6 (Tirée de Kouam et al., 2012)

Kamguem et al. ont démontré dans leur investigation du fini de surface de pièces usinées en Al2024-T351, 7075-T6 et 6061-T651 que la vitesse d'avance est le paramètre le plus influent sur la rugosité de surface (Kamguem et al., 2013). Davim a démontré, suite à son étude des conditions de coupe en tournage des composites à matrice métallique, que la vitesse d'avance est celle qui influence le plus la rugosité de surface suite à une analyse d'un plan d'expériences basée sur la méthode de Taguchi (Davim, 2003). Tomac et al. ont prouvé, suite à leurs expérimentations, l'existence d'une corrélation étroite entre les valeurs de la rugosité de surface des composites à matrice aluminium usinés en tournage et les vitesses d'avance (Tomac et al., 1992). Ils ont enregistré un meilleur état de surface pour les avances les plus faibles et ont expliqué que le fait d'utiliser un rayon de l'ordre de 0,4 mm n'ayant pas d'affinité avec le matériau de coupe grâce à son revêtement PCD et à son rayon pointu est optimal pour le fini de surface.

Boothroyd a proposé un modèle qui demeure communément utilisé pour estimer la valeur de rugosité de surface (Boothroyd, 1988).

$$Ra = \frac{f^2}{32R_c}$$

Avec : R_a : rugosité moyenne arithmétique (μm); f : vitesse d'avance (mm/tr); R_c : rayon du bec de l'outil de coupe (mm).

1.3.5 Influence du rayon du bec de l'outil :

Neşeli et al. ont étudié l'effet de la géométrie de l'outil sur la rugosité de surface dans l'opération de tournage en se basant sur la méthode de surface de réponse de l'acier AISI 1040 (Neşeli et al., 2011). Un modèle quadratique de la rugosité a été développé avec un intervalle de confiance de 96%. Ils ont démontré que le rayon du bec de l'outil est le plus significatif en comparaison avec l'angle d'approche et l'angle de coupe avec une contribution de plus que 50% dans la variabilité totale du modèle proposé.

Sung et al. ont exposé l'importance de l'effet de la tolérance du rayon du bec de l'outil sur la variation de la rugosité de surface à partir de simulations et d'expériences et ce en utilisant des rayons variables (Sung et al., 2014).

1.3.6 Influence du mode de lubrification :

Plusieurs études ont prouvé que la lubrification à quantité minimale présente un compromis entre l'usinage à sec et l'usinage à lubrification abondante amenant à de meilleurs

résultats du point de vue intégrité de surface. (Sreejith, 2008), (Dhar et al., 2006), (Kouam et al., 2012), (Ramana et al., 2014).

Plusieurs travaux se sont focalisés sur la réduction de la quantité des fluides de coupe comme solution aux divers problèmes économiques, environnementaux et juridiques liés à l'usinage conventionnel afin d'assurer un usage optimal de la lubrification afin d'aboutir à de meilleurs résultats du point de vue qualité de surface.

Sreejith a analysé les effets de l'usinage à sec, à quantité minimale de lubrification et à lubrification abondante sur la rugosité en tournage de l'alliage d'aluminium 6061-T6. Une étude comparative a mené au fait que la quantité minimale de lubrification peut remplacer la lubrification abondante. La MQL a donné des résultats semblables à ceux de la lubrification abondante (figure 1.4) et est la plus adéquate afin d'améliorer l'usinabilité et pour le respect de l'environnement et des raisons économiques (Sreejith, 2008) (figure 1.22).

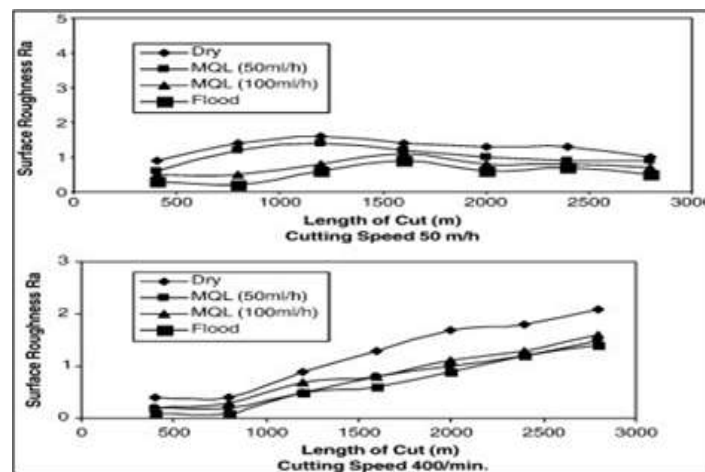


Figure 1.22 Variation de la rugosité de surface en fonction du mode de lubrification pour différentes vitesses de coupe (Tirée de Sreejith, 2008)

Dhar et al. Ont conclu, suite à une étude expérimentale sur l'acier AISI-4340, que l'usinage à quantité minimale de lubrification est meilleur que l'usinage à lubrification abondante et que l'usinage à sec en fournissant une rugosité de surface améliorée due à la réduction de l'usure et les dommages qui peuvent avoir lieu à la pointe de l'outil de coupe (Dhar et al., 2006) (figure 1.23).

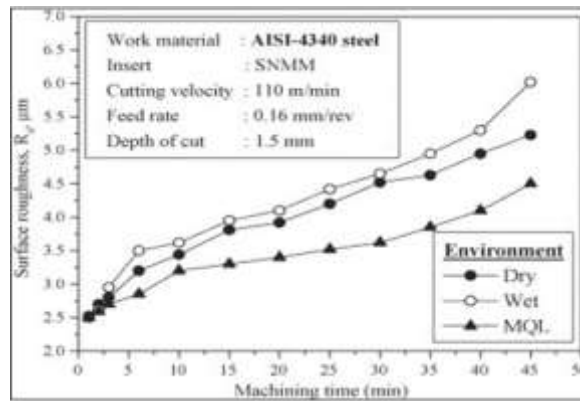


Figure 1.23 Variation de la rugosité de surface à usinage Sec, MQL et à lubrification abondante de l’AISI-4340 (Tirée de Dhar et al., 2006)

Les travaux de Kouam et al. (Kouam et al., 2012) ont montré qu’à différentes conditions de lubrification, la vitesse de coupe n’intervient pas sur la rugosité de surface en usinage en tournage de l’alliage d’aluminium 6061-T6. Cependant, ils ont montré qu’elle dépend essentiellement de la vitesse d’avance qui a présenté le meilleur état de surface pour une valeur minimale (figure 1.24).

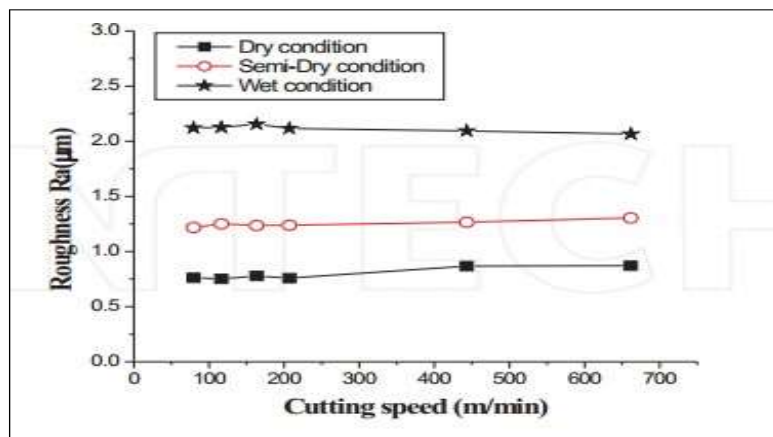


Figure 1.24 Effet de la vitesse de coupe et du mode de lubrification sur la rugosité de surface du 6061-T6 (Tirée de Kouam et al., 2012).

Leppert a analysé l’influence de la vitesse d’avance sous différentes conditions de lubrification sur la rugosité de surface. Il a constaté que l’augmentation de la vitesse d’avance entraîne une augmentation de la rugosité de surface et que la quantité minimale de lubrification garantit un meilleur état de surface permettant aussi d’améliorer les conditions écologiques d’usinage en évitant d’utiliser beaucoup de fluide de coupe ou d’user à sec (Leppert, 2011) (figure 1.25).

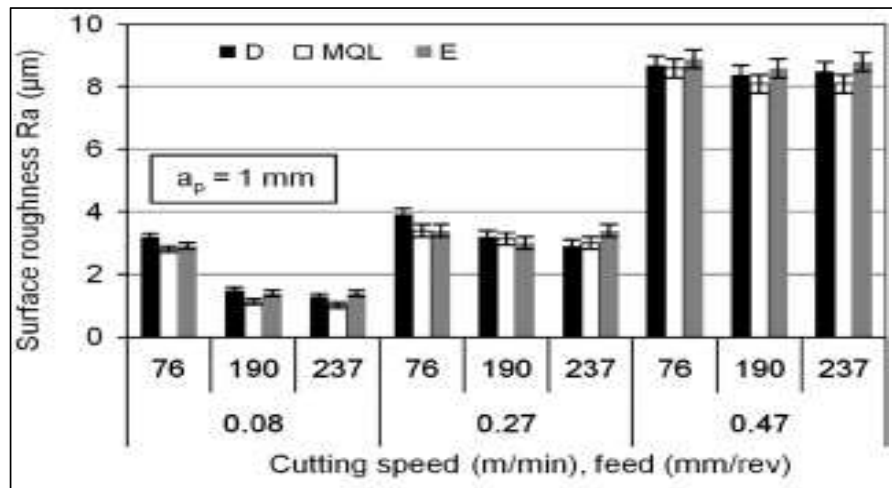


Figure 1.25 Variation de la rugosité de surface en fonction de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance pour l'acier C45 (Tirée de Leppert, 2011)

Ramana et al. ont constaté que la MQL d'un alliage de titane présente une meilleure qualité de surface par rapport à l'usinage sec (S) ou à lubrification abondante (L) (Ramana et al., 2014).

1.4 Conclusion

Nous retenons à la suite de cette présentation que la qualité de la surface usinée dépend du choix adéquat de plusieurs facteurs, en particulier :

- ❖ Le régime de coupe : la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe.
- ❖ Le rayon du bec de l'outil.
- ❖ La lubrification de la zone de coupe.
- ❖ L'état de la machine- outil.

Afin de mettre en relief l'influence de ces facteurs, nous envisageons une étude basée sur les plans d'expériences. Cette approche sera exposée dans le chapitre suivant.

Chapitre 2 : Les plans d'expériences

2.1 Introduction

Les améliorations de la qualité d'un produit par les principes de planification et l'expérimentation ont été initiées en 1919 par le mathématicien Sir Ronald Fisher dès 1935 F. Yates et R. A. Fisher ont développés les notions d'expériences en bloque aléatoires incomplets et les plans d'expériences factoriels fractionnaires

Après 4945 de nombreuses recherches et publications sont apparus telle que la notion de surface de réponse ; les statisticiens comme Yates ; Cochran ; Plackett et Burmann enrichissent la méthode des plans d'expériences.

Boxe et Hunter en s'appuyant sur les travaux de Yates développent des méthodes particulières de construction de plans d'expériences fractionnaire à deux niveaux.

A partir des années 50 le statisticien Taguchi élaborer des tables permettent de construire des plans d'expériences adaptés à la majorité des problèmes industriels (d). Taguchi a contribué à une méthodologie facile à appliquer en s'attaquant à l'amélioration de la qualité.

Pour conclure cette introduction on résume les principaux avantages de cette méthode par rapport aux méthodes traditionnelles d'expérimentation [6] :

- Diminution du nombre d'essais
- Possibilité d'étudier un très grand nombre de facteurs ;
- Détection des éventuelles interactions entre facteurs ;
- Modélisation très aisée des résultats ;
- Détermination des résultats avec bonne précision.

2.2. Présentations des plans d'expériences

2.2.1. Aperçu historique

Les plans d'expériences sont issus de méthodes mathématiques et statistiques appliquées à l'expérimentation. Les premiers scientifiques à s'être posé le problème de l'organisation des essais sont des agronomes. Ils avaient en effet beaucoup de paramètres à étudier et n'avaient pas la possibilité de multiplier le nombre d'expériences. De plus, la durée des expériences constituait une contrainte supplémentaire forte. C'est Fisher qui, pour la première fois en 1925, proposa une méthode avec laquelle on étudiait plusieurs facteurs à la fois. Cette méthode fut reprise puis développée par des statisticiens et des mathématiciens qui définirent des tables d'expériences permettant de réduire considérablement le nombre d'expériences à effectuer sans diminuer la pertinence de la campagne d'essais. Les grandes entreprises se sont ensuite

intéressées à cette méthodologie dans le cadre de l'approche qualité à la suite des travaux du Docteur Taguchi. Il a fortement contribué à l'expansion de

L'utilisation des plans d'expériences en milieu industriel au Japon dans les années 1960. Au cours de ces dernières années, cette méthodologie, du fait de la pertinence des informations apportées, c'est d'enveloppée dans la plupart des secteurs d'activités [7].

2.2.2 Principe

La technique des plans d'expériences va permettre de répondre à nos exigences. En effet, son principe consiste à faire varier simultanément les niveaux d'un ou plusieurs facteurs (qui sont les variables, discrètes ou continues) à chaque essai. Ceci va permettre de diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés, en détectant les interactions entre les facteurs et les optimaux par rapport à une réponse, c'est-à-dire une grandeur ; utilisée comme critère et en permettant de modéliser facilement les résultats. Le point délicat dans l'utilisation des plans d'expériences sera donc de minimiser le plus possible le nombre d'expériences à mener sans sacrifier la précision sur les résultats. De nombreux ouvrages traitent des plans d'expériences. Celui publié par l'association Expérimentiez présente de façon claire les plans d'expériences et propose une bibliographie commentée très riche permettant à l'expérimentateur de trouver les informations qui lui sont nécessaires [8].

Il existe actuellement un nombre important de plans différents. Chacun, par ses propriétés, permet de résoudre certains problèmes particuliers. On peut cependant diviser les plans d'expériences en deux grandes catégories :

- les plans pour étudier (estimer et comparer) les effets des paramètres.
- les plans pour régler les paramètres afin d'atteindre un optimum.

L'idée essentielle qui doit mener la démarche expérimentale de l'expérimentateur est que l'on met en œuvre un plan d'expériences afin de répondre à une problématique bien précise. Il faut donc choisir ou construire le plan qui donnera les informations recherchées. On ne pourra donc pas utiliser le même plan pour étudier efficacement les effets des paramètres tout en cherchant un optimum.

Afin d'obtenir des informations pertinentes, une démarche méthodologique doit être suivie :

- définitions des objectifs et critères.
- définition des facteurs étudiés et du domaine expérimental.
- construction du plan d'expériences.

- expérimentation.
- analyse des résultats.
- conduite éventuelle d'essais supplémentaires.
- validation des résultats.
- conclusion de l'étude.

A l'issue de cette procédure, on pourra conclure sur les résultats donnés par les plans. On détaillera ici chacun de ces points pour les deux types de plans précédemment cités [9].

2.2.3 Terminologie

2.2.3.1 Facteur

Les variables que l'on désire étudier sont appelées facteurs. En générale un facteur varie entre deux bornes : la borne inférieure et la borne supérieure. Dans le langage des plans d'expériences, on dit que le facteur varie entre le niveau bas (-1) et le niveau haut (+1). Un facteur peut prendre plusieurs niveaux à l'intérieur de son domaine de variation (figure 2.1).

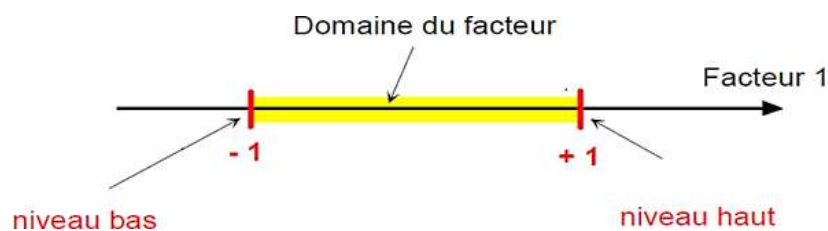


Figure 2.1 Domaine de variation d'un facteur (Goupy, 2006).

S'il y a deux facteurs, le second facteur est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. La réunion des domaines de variation de chaque facteur définit le domaine d'étude. Les facteurs étudiés peuvent être des variables continues ou des variables discrètes

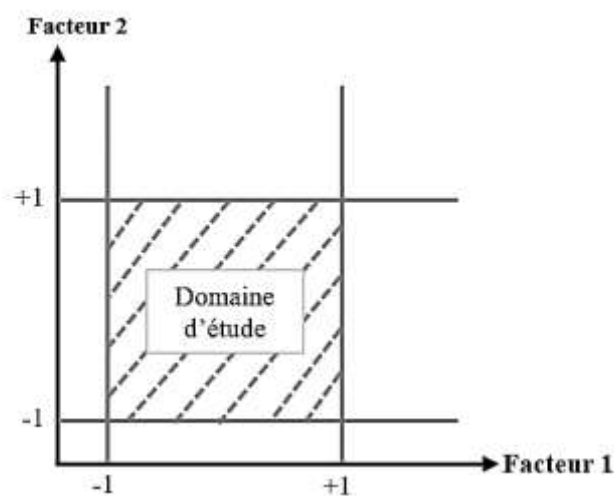


Figure 2.2 Domaine d'étude formé par deux facteurs.

2.2.3.2. Réponse

Les grandeurs qui intéressent l'expérimentateur et qui sont mesurées à chaque expérience sont appelées réponses. Le choix des bonnes réponses est un problème difficile qui ne relève pas de la théorie des plans d'expériences. Ce n'est qu'après une analyse minutieuse des phénomènes, des enjeux, des objectifs, de la faisabilité et des contraintes de l'étude que l'on peut définir la ou les bonnes réponses.

En l'absence de toute information sur la fonction qui lie la réponse aux facteurs, on suppose à priori une loi d'évolution. C'est le modèle mathématique dont la forme la plus générale est :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

A chaque point x du domaine d'étude correspond une réponse $Y(x)$. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui définissent une surface appelée surface de réponse.

L'influence moyenne du facteur x_i sur la réponse y est appelée contraste, est estimé par :

$$\text{contraste de } X_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\sum y(X_i = +1)}{\text{Nb d'essais à } X_i = +1} - \frac{\sum y(X_i = -1)}{\text{Nb d'essais à } X_i = -1} \right)$$

2.3.3 Surface de réponses

En l'absence de toute information sur la fonction qui lie la réponse aux facteurs, on se donne, à priori, une loi d'évolution. C'est le modèle mathématique à priori ou le modèle postulé, la relation la plus générale de ce modèle est :

$$y = f(x_1^*, x_2^*, x_3^*, \dots, x_i^*)$$

Où :

y : est la grandeur qui intéresse l'expérimentateur, c'est la réponse ou la grandeur d'intérêt.

x_i^* : représentent les niveaux des différents facteurs.

La représentation géométrique des résultats d'un plan de deux facteurs nécessite un espace à trois dimensions, une dimension pour la réponse, deux pour les facteurs. A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui définissent une surface appelée la surface de réponse (figure.2.3).

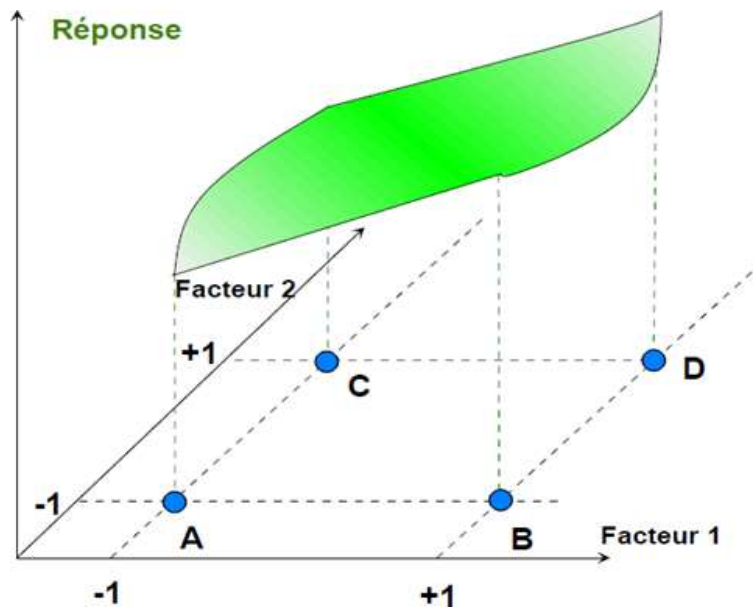


Figure 2.3 Les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse (Goupy, 2006).

II.2.3.4 Paramètre

Un paramètre est une variable qui n'est pas contrôlable par l'expérimentateur mais dont on doit tenir compte. Un exemple simple de paramètre est la valeur de la température et de la pression atmosphérique.

II.2.3.5 Contrainte

Les différents facteurs intervenant dans la constitution du plan ne sont pas toujours indépendants. Ils peuvent être liés par des contraintes. Celles-ci peuvent être d'ordre physique, matériel, budgétaire, ou encore faire intervenir une législation, comme le respect d'une norme de sécurité.

D'un point de vue mathématique ces contraintes se manifestent par des relations faisant intervenir des inégalités entre les facteurs. Du point de vue du plan, ces contraintes sont limitatives puisqu'elles réduisent considérablement l'étendue de l'espace expérimental et en modifie la forme (la forme idéale étant cubique). On a tout intérêt à choisir des facteurs les plus orthogonaux possibles.

II.2.3.6. Modèle

Comme nous l'avons vu, le comportement de la réponse, à jamais inconnu, peut être approché par une fonction mathématique sur le domaine de variation. Cette fonction est appelée modèle. Une bonne estimation de ce modèle consiste à prendre les premiers termes du développement de Taylor (jusqu'à l'ordre 2 : les interactions triples sont négligées) :

$$Y_j = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i X_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^k a_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k a_{ii} X_i^2$$

↙
↙
↓
↘

Valeur au centre Effet moyen Effet moyen de Effet moyen quadratique
 du domaine. de X_i . l'interaction de 2 facteurs. d'un facteur.

On peut ainsi déduire le nombre paramètres a_i à estimer : le dénombrement donne la formule suivante pour un nombre k de facteurs :

$$N = 1 + k + \frac{k(k-1)}{2} + k$$

Par exemple un plan à 5 facteurs, le modèle complet requiert donc l'estimation de 21 paramètres. Bien souvent, des facteurs ont une influence négligeable, ce qui allège la constitution du modèle.

2.2.4 Notion de surface de réponse (Goupy, 2006)

Les niveaux x_i représentent les coordonnées d'un point expérimental et y est la valeur de la réponse en ce point. On définit un axe orthogonal à l'espace expérimental et on l'attribue à la réponse. La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. Un plan à deux facteurs utilise un espace à trois dimensions pour être représenté : une dimension pour la réponse, deux dimensions pour les facteurs.

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse.

Les quelques réponses mesurées aux points du plan d'expériences permettent de calculer l'équation de la surface de réponses.

2.2.5 Notion de modélisation mathématique

On choisit a priori une fonction mathématique qui relie la réponse aux facteurs. On prend un développement limité de la série de Taylor-Mac Laurin. Les dérivées sont supposées constantes et le développement prend la forme d'un polynôme de degré plus ou moins élevé :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z$$

- y est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée.

• x_i représente le niveau attribué au facteur i par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On suppose même que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression).

• $a_0, a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}$ sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

L'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences.

Ce modèle est appelé "modèle postulé" ou "modèle a priori".

2.3 Types de plans d'expériences

La différenciation entre les différents types de plans d'expériences se fait souvent selon que les facteurs sont indépendants ou pas.

2.3.1 Les plans de criblage

Ces plans permettent de découvrir les facteurs les plus influents sur une réponse. On ne cherche pas à obtenir une relation précise entre les variations des facteurs et celles des réponses. On distingue :

Plans "un facteur à la fois" : seuls les effets principaux sont connus. On n'obtient aucune interaction. Plans factoriels fractionnaires :

2.3.1.1 Les plans de Plackett et Burmann

Les matrices de calcul des plans de Plackett et Burman sont des matrices d'Hadamard. C'est-à-dire des matrices ayant 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36 lignes, etc. Elles permettent donc des expérimentations ayant un nombre d'essais intermédiaire de celui des plans factoriels qui, eux, ont seulement 2^k lignes (4, 8, 16, 32, etc.).

Les plans de Plackett et Burman sont le plus souvent saturés. Le modèle mathématique est alors un modèle sans interaction analogue à celui des plans de Koshal :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i$$

2.3.1.2 Les plans sursaturés

Ce sont des plans qui prennent en compte un grand nombre de facteurs et qui ne demandent que quelques essais.

2.3.1.3 Les plans de modélisation

Plans factoriels complets : ces plans peuvent être utilisés pour la modélisation mais comme, il n'y a que deux niveaux par facteurs, on ne peut qu'employer des modèles du premier degré avec interactions.

Plans non conventionnels : tous plan qui s'écarte des plans classiques (niveaux ou emplacement décalés, manque de nombres d'expériences, ...)

2.3.1.4 Les plans composites centrés

Les plans composites centrés ont pour base un plan factoriel complet ou fractionnaire à 2 niveaux (les niveaux mini et maxi des facteurs pour le plan factoriel sont codés -1 et +1). A cette base, on ajoute des points axiaux (toutes les combinaisons de $+\alpha$ ou $-\alpha$ ($\alpha > 1$) pour un facteur et 0 pour tous les autres, soit $2p$ points pour p facteurs) et des points au centre du domaine expérimental dont le nombre est lié à la valeur de α . En raison de leur construction, ces plans sont bien adaptés à une démarche séquentielle. En effet, on peut étudier dans un premier temps les effets principaux et leurs interactions avec un plan factoriel complet ou fractionnaire, et, si les points au centre du domaine montrent une courbure significative, on poursuit l'étude avec les points axiaux. Dans ce cas, il faut avoir anticipé ces éventuels essais de sorte que les valeurs $+\alpha$ ou $-\alpha$ soient possible (Chagnon, 2005).

Par ailleurs, ces plans nécessitent 5 niveaux non régulièrement répartis pour chacun des facteurs, ce qui peut poser des problèmes car 2 niveaux peuvent être trop proches pour être techniquement vraiment différents. Ces plans d'expériences sont robustes à des écarts aux niveaux fixés.

Toutefois, il est tout à fait possible de construire un plan composite centré pour plus de 6 facteurs.

2.3.1.5 Les plans hybrides

Ce sont des structures très particulières qui ont pour intérêt principal leur faible nombre d'essais par rapport aux 2 catégories précédentes. Cette caractéristique a cependant un coût : les estimations sont de qualité médiocre et les plans hybrides sont peu robustes au non- respect des niveaux des facteurs (Chagnon, 2005).

2.3.1.6 Les plans de Doelert

Ces plans se singularisent par 2 spécificités :

-La possibilité, après un premier plan de Doelert, d'ajouter un ou plusieurs facteurs, si l'on a pris la précaution de fixer ce ou ces facteurs à un niveau intermédiaire au cours de la première étape ;

- La possibilité de se déplacer dans le domaine expérimental dans une direction donnée pour un coût expérimental limité (Chagnon, 2005).

2.3.1.7 Les plans de Roquemore

Ces plans nécessitent peu d'essais pour obtenir un modèle du second degré.

2.3.1.8 Les plans D-optimaux

Ces plans assurent une bonne précision sur les coefficients du modèle prédictif (Goupy, 2006).

2.3.2 Plans factoriels complets

L'objectif de cette partie est d'étudier un des dispositifs expérimentaux les plus simple à construire. Pour 2 facteurs (exprimés sous forme codée) il consiste à réaliser les 4 expériences associées aux sommets du carré $[-1, 1]^2$. Dans le cas de 3 facteurs il s'agit des 8 sommets du cube $[-1, 1]^3$. Ce procédé peut être étendu au cas de m facteurs à l'aide de la définition suivante :

Pour m facteurs, on appelle plan d'expérience factoriel complet toute configuration constituée des éléments suivants :

- 1) Tous les sommets du cube $[-1, 1]^m$.
- 2) n_0 répliques éventuelles du centre du domaine expérimental.

Les sommets du cube $[-1, 1]^m$ constituent la partie factorielle du plan alors que les (éventuelles) répliques du centre du domaine constituent la partie centrale. Du point de vue mathématique, la partie factorielle est donc l'ensemble des points obtenus à l'aide des produits cartésiens suivants

$$\{-1, 1\} \times \{-1, 1\} \times \dots \times \{-1, 1\} = \{-1, 1\}^m.$$

Le nombre d'expériences à réaliser avec un plan factoriel complet est alors :

$$n = 2^m + n_0.$$

Dans bon nombre d'ouvrages on désigne par plan d'expérience factoriel complet la seule partie factorielle présentée ici (c'est-à-dire que $n_0 = 0$). Cette définition est plus générale car réaliser des répliques centrales peut s'avérer d'un grand intérêt pratique (voir la suite). Un plan d'expérience factoriel complet est entièrement déterminé par la connaissance du nombre de facteurs et du nombre de répliques du centre du domaine, c'est pourquoi un tel plan sera désigné dans la suite par la notation suivante (FD venant de la terminologie anglaise Factoriel Design) :

$$FD(2^m, n_0).$$

Afin d'uniformiser l'écriture de la matrice de ces plans d'expérience il est possible de disposer leurs lignes suivant l'ordre standard (encore appelé ordre de Yates). Il s'agit de respecter les conventions suivantes pour la partie factorielle du plan :

1) la première ligne de D n'est constituée que des valeurs -1 (i.e. la première expérience est réalisée en fixant tous les facteurs à leur niveau bas)

2) la première colonne de D est obtenue en changeant de signe toutes les lignes. La seconde colonne est obtenue en changeant de signe toutes les 2 lignes, ..., la k-ième colonne de D est obtenue en changeant de signe toutes les 2^{k-1} lignes.

Voici deux exemples d'illustration de cette convention.

Exemple : La matrice du plan F D ($2^2, 3$) est : La matrice du plan F D ($2^3, 0$) est

$$D = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & -1 \\ -1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

2.3.2.1 Propriétés

Détaillons les principales propriétés des plans d'expérience factoriels complets. Remarquons tout d'abord qu'un des avantages de ce type de plans est d'une part leur facilité de construction et d'autre part, comme il sera démontré par la suite par la suite, leur facilité d'analyse. A contrario, le grand désavantage de ces configurations est leur taille qui, bien évidemment, devient rapidement beaucoup trop grande au vu du nombre de paramètres inconnus du modelé (voir la table 2.1). L'utilisation de tels plans d'expérience est envisageable pour un petit nombre de facteurs mais devient quasiment impossible lorsque ce nombre est grand (il faudrait, par exemple, réaliser au moins 1024 expériences pour 10 facteurs alors que le modèle considère n'a que 11 paramètres inconnus).

2.3.2.2 Taille des plans factoriels

Terminons cette étude des plans factoriels en proposant une comparaison du nombre d'expériences à réaliser pour les plans complets et les fractions régulières. Le tableau suivant présente pour m facteurs (avec $2 \leq m \leq 12$) le nombre de paramètres inconnus p du modèle d'ordre un, la taille du plan factoriel complet dans la colonne F D, la taille minimale possible pour une fraction régulière de résolution III dans la colonne F rac et enfin les générateurs utilisés afin de construire une telle fraction (ce choix n'étant pas, bien entendu, unique). Le symbole \times est utilisé dans les cas où la construction est impossible.

Table 2.1. Taille de différents plans factoriels.

	p	F D	Frac	Générateurs
2 facteurs	3	4	□	□
3 facteurs	4	8	4	123
4 facteurs	5	16	8	1234
5 facteurs	6	32	8	124,135
6 facteurs	7	64	8	124,135,236
7 facteurs	8	128	8	124,135,236,1237
8 facteurs	9	256	16	125,136,147,238
9 facteurs	10	512	16	125,136,147,238,249
10 facteurs	11	1024	16	125,136,147,238,249,3410
11 facteurs	12	2048	16	1235,137,1248,12349,1210,1311,2346
12 facteurs	13	4096	16	145,179,1310,1611,256,2411,2712,367

2.3.3 Les plans de Taguchi

2.3.3.1 L'apport de Taguchi aux plans d'expériences

Genichi Taguchi a travaillé dans le domaine de la qualité, il a notamment mis au point une méthode connue sous le nom de "méthode Taguchi" qui permet de maîtriser la qualité dès la conception des produits. Dans cet ouvrage, nous abordons principalement la partie "plans d'expériences" de l'apport de Taguchi. Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, l'utilisation de plans fractionnaires permet de diminuer considérablement le nombre d'essais à réaliser pour identifier les coefficients d'un modèle. Cependant, ce gain n'est pas sans conséquence. Dans le cas des plans fractionnaires, il y a confusion entre certaines actions, que l'on appelle alors des ALIAS. La mise au point de plans fractionnaires adaptés à un modèle est une procédure assez fastidieuse et parfois assez complexe. Le docteur Genichi Taguchi a mis au point une méthode originale permettant, à partir de quelques tables standard, de résoudre facilement la plupart des problèmes industriels en matière de plans d'expériences. Les tables standard de Taguchi considèrent que les interactions d'ordre 2, c'est-à-dire les interactions entre deux facteurs sont négligeables sauf quelques-unes parfaitement identifiées. Les interactions d'ordre 2 non considérées seront donc supposées comme nulles. Les interactions d'ordre supérieur à 2 seront toujours considérées comme négligeables.

2.3.3.2 Représentation des facteurs

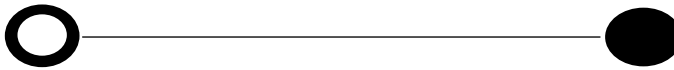
La méthode Taguchi est fondée sur une représentation graphique du modèle que l'on souhaite identifier. Dans cette représentation, les facteurs sont représentés par des ronds (Y). Lorsqu'on réalise une expérience, tous les facteurs ne sont pas aussi faciles à modifier. Certains ne nécessitent que la rotation d'un potentiomètre, alors que d'autres nécessitent une vidange complète de la machine. Il est évident que le premier type de facteur pourra être modifié à chaque expérience, par contre, le deuxième facteur ne devra être modifié qu'une seule fois si possible dans le plan. Pour répondre à cette préoccupation, Taguchi distingue parmi les facteurs, quatre groupes qui seront représentés de façons différentes

- Le groupe 1 sera le groupe des facteurs les plus difficiles à modifier. Ils seront notés par un cercle ○
- Le groupe 2 sera un peu plus facile à modifier. Il sera noté par deux cercles concentriques ◎
- Le groupe 3 sera encore un peu plus facile. Il sera noté par un cercle entourant un rond noir ●

- Le groupe 4 sera constitué des facteurs les plus faciles à modifier, ils seront notés par un rond noir ●

2.3.3.3 Représentation des interactions

Les interactions entre deux facteurs sont représentées par un trait entre deux facteurs



Traitement des interactions

1_cas :

Les droites sont parallèles il n'y a pas d'interaction. L'effet A indépendant des niveaux de B. fig. 2.4.

2_cas :

Les droites ne sont pas parallèles il y a interaction. L'effet de A n'est pas indépendant des niveaux de B fig. 2.5.

3_cas :

Les droites se coupent il y a une très forte interaction. L'effet de A s'inverse selon le niveau de B. fig.2.6.

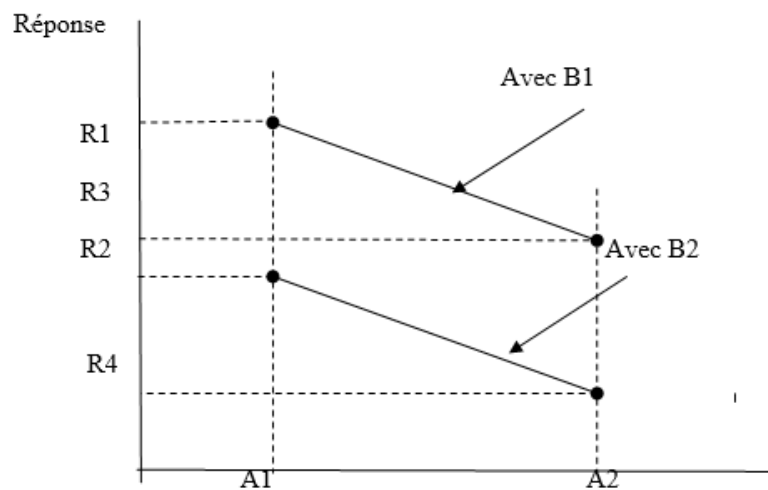


Figure 2.3 1^{er} cas

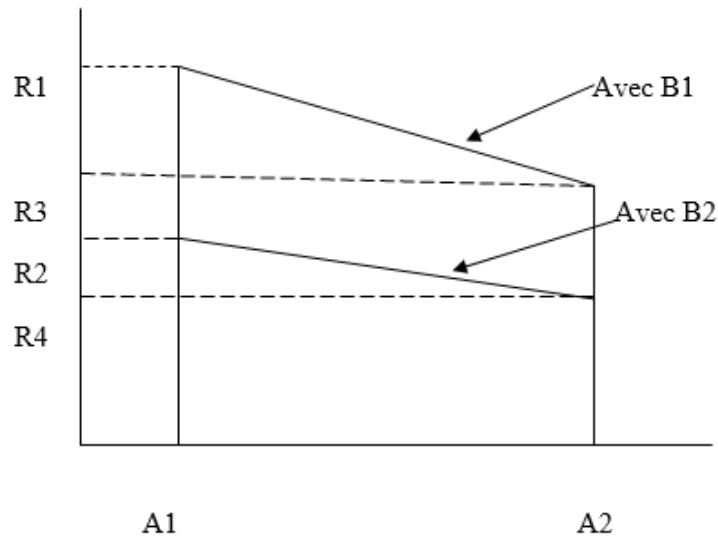


Figure 2.4 2eme cas

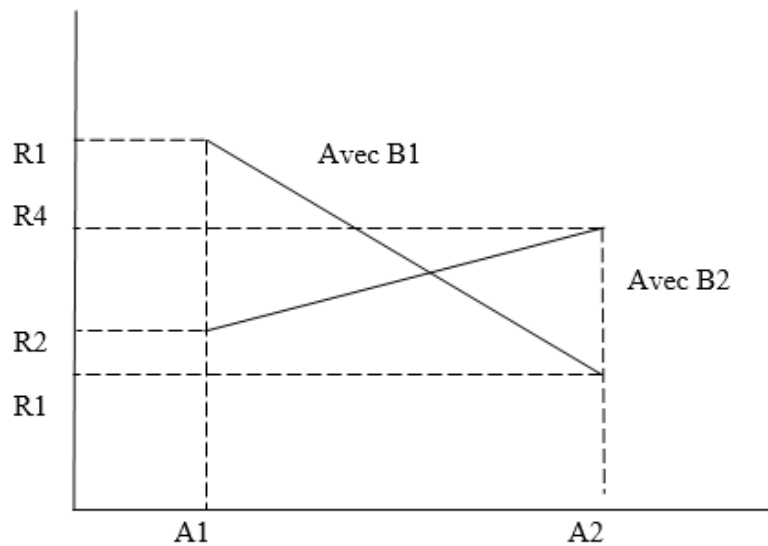


Figure 2.5 3eme cas

2.3.4 Plans de Box Behnken [10].

Box et Behnken ont proposé en 1960 ces plans qui permettent d'établir des modèles du second degré. En effet, tous les facteurs ont trois niveaux : -1 ; 0 ; +1. Ces plans sont faciles à mettre en œuvre et possèdent la propriété de séquentialité. On peut entreprendre l'étude des "k" premiers facteurs en se réservant la possibilité d'en ajouter sans perdre les résultats des essais déjà effectués.

3.5.2 Construction des plans de Box Behnken Le plan de Box Behnken pour

trois facteurs est construit sur un cube, les suivants, qui prennent en compte plus de trois facteurs, sont construits sur des hypers cubes à 4 et 5 dimensions. Lorsque les dimensions dépassent trois, nous parlerons de n cube, n'étant le nombre de dimensions. Par exemple l'hyper cube à 4 dimensions sera un 4-cube et l'hyper cube à cinq dimensions sera un 5-cube. On place les points expérimentaux non pas aux sommets du cube de l'hyper cube mais aux milieux des arêtes, au centre des faces (carrées) ou au centre des cubes. Cette disposition a pour conséquence de placer tous les points expérimentaux à égale distance du centre du domaine d'étude, donc sur une sphère dans un espace à trois dimensions et sur une hyper sphère lorsqu'il y en a plus de trois. On ajoute des points au centre du domaine d'étude pour réduire l'erreur de prévision en ce point [11].

3.5.3. Nombre d'éléments géométriques des cubes et des hypers cubes Le cube possède : -8 sommets (dimension zéro) -12 arêtes qui sont des segments (dimension un) -6 faces qui sont des carrés (dimension deux) -1 cube qui est le cube lui-même (dimension trois). Tous comme le cube, le hyper cube possède des éléments géométriques qui vont de zéro à n dimension.

49 63 3.5.4 Plan de Box Behnken pour trois facteurs C'est le premier plan de Box Behnken. Les points expérimentaux de ce plan sont situés aux milieux des arêtes du cube (Cf. figure 2.6). Le cube possède 12 arêtes. On a l'habitude d'ajouter les points d'expérience au centre du domaine d'étude, en général trois. Le plan de Box Behnken pour trois facteurs a donc : 12+3 essais, soit 15 essais, c'est le plan classique indiqué par Box et Behnken.

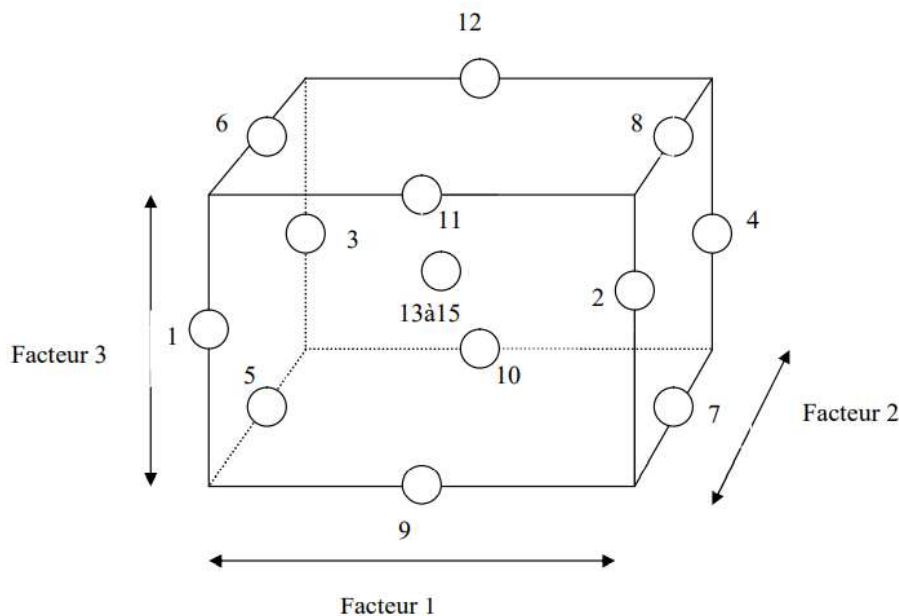


Figure 2.6 illustration du plan de Box Behnken pour trois facteurs [10]

Les points situés au centre d'une arête ont pour coordonnées ; 0 ; ±1 ; ±1. La construction du plan suit le principe suivant : deux facteurs décrivent un carré (4 essais d'un plan 2²) et les coordonnées correspondantes du troisième facteur valent zéro (tableau 2.2).

Tableau 2.2 tableau de Box Behnken pour trois facteurs [10]

Essai N°	Facteur N° 1	Facteur N° 2	Facteur N° 3
1	-1	-1	0
2	+1	-1	0
3	-1	+1	0
4	+1	+1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	+1
7	+1	0	-1
8	+1	0	+1
9	0	-1	-1
10	0	+1	-1
11	0	-1	+1
12	0	+1	+1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

2.3.4.1 Propriétés du plan de Box Behnken pour trois facteurs

Avant de réaliser les essais, il est possible de connaître un certain nombre de propriétés du plan d'expérience : -l'erreur sur les coefficients du modèle à une constante près ; -l'erreur sur les réponses prédites ; -la fonction de variance indiquant la répartition de l'erreur de prédiction dans le domaine d'étude. Les propriétés qui vont être établies ne sont valables que pour le modèle mathématique postulé choisi au paragraphe suivant. Si, pour certaines raisons, on est amené à changer le modèle, on doit établir les nouvelles propriétés de ce plan

2.3.4.2 Modèle mathématique postulé [10]

Le modèle mathématique postulé, que l'on utilise, en générale, avec le plan de Box Behnken est un modèle du second degré avec les interactions d'ordre deux :

$$\hat{Y} = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3 + a_{11}^2 X_1^2 + a_{22}^2 X_2^2 + a_{33}^2 X_3^2 + e$$
 où e : erreur de prédiction Ce modèle comporte 10 coefficients. Il faut donc au minimum 10

équations pour les estimer. Le plan classique de Box-Behnken pour trois facteurs comporte 15 points expérimentaux donnant chacun une équation.

2.3.4.3 Matrice de calcul

La matrice de calcul X est une matrice (15,10) puisqu'il y a 15 expériences et 10 coefficients. Cette matrice est construite à partir du plan d'expérience et du modèle postulé.

$$X = \begin{bmatrix} +1 & -1 & -1 & 0 & +1 & 0 & 0 & +1 & +1 & 0 \\ +1 & +1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & +1 & +1 & 0 \\ +1 & -1 & +1 & 0 & -1 & 0 & 0 & +1 & +1 & 0 \\ +1 & +1 & +1 & 0 & +1 & 0 & 0 & +1 & +1 & 0 \\ +1 & -1 & 0 & -1 & 0 & +1 & 0 & +1 & 0 & +1 \\ +1 & -1 & 0 & +1 & 0 & -1 & 0 & +1 & 0 & +1 \\ +1 & +1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & +1 & 0 & +1 \\ +1 & +1 & 0 & +1 & 0 & +1 & 0 & +1 & 0 & +1 \\ +1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & +1 & 0 & +1 & +1 \\ +1 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & +1 & +1 \\ +1 & 0 & -1 & +1 & 0 & 0 & -1 & 0 & +1 & +1 \\ +1 & 0 & +1 & +1 & 0 & 0 & +1 & 0 & +1 & +1 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Au moyen de cette matrice, il est possible de calculer les coefficients « \hat{a} » en utilisant la formule suivante :

$$\hat{a} = (X^t X)^{-1} X^t y$$

où y - grandeur de réponses mesurées lors de l'expérimentation

2.4 Conclusion

Il existe plusieurs méthodes d'expérimentation selon différents plans basés sur une planification complète, qui consiste à réduire le nombre d'expériences et à obtenir de bons résultats. En raison des avantages des expérimentaux, nous séparons une partie expérimentale dans le chapitre suivant, en examinant l'impact des facteurs du système de coupe et leurs interactions, ainsi qu'en comparant les résultats des réponses entre trois méthodes de plans d'expériences mentionné à la fin de ce chapitre (plan factoriel complet, méthode de Taguchi, plan de Box Behnken).

Chapitre 3 : Matériels et méthodes

3.1 Introduction

La réussite de la qualité de l'usinage est conditionnée par la maîtrise des régimes de coupe, par conséquent, il devient nécessaire d'examiner l'effet des facteurs et leurs interactions afin d'optimiser les valeurs appropriées. Dans ce travail expérimental réalisé sur le tour modèle 1A616, nous effectuerons des essais sur des éprouvettes (Barreau cylindrique 337x45) en acier XC48 (Figure III.1). L'expérimentation est menée au moyen de la méthodologie des plans d'expériences et surface de réponse, en l'occurrence, le plan factoriel complet, le plan de Taguchi et les plans de de Box Behnken. Une étude comparative est présentée afin de montrer l'effet des facteurs du régime de coupe et d'aboutir aux paramètres les plus performants.

3.2 Matériau

Le matériau étudié est l'acier doux XC48, selon la norme Afnor, acier de construction mécanique non allié apte aux traitements thermiques. Le choix de ce dernier est d'une part dû à sa bonne usinabilité et d'autre part à sa large utilisation dans le domaine industrielle (axes, engrenages, pignons, boulonnerie, ...). Cet acier a été livré par le complexe sidérurgique d'El Hadjar (Annaba, Algérie) sous forme barre laminé à chaud de $\varnothing = 70\text{mm}$ et de longueur $L = 380\text{mm}$. La nuance ainsi que les caractéristiques mécaniques fournies par le fabricant sont présentées en ce qui suit :

- Nuance

Tableau 2 : composition chimique de l'acier XC48

C	S	Mn	P	Si
0,52 - 0,50	$\leq 0,035$	0,50 - 0,80	$\leq 0,035$	0,40 maxi

- Caractéristiques mécaniques

$R_m = 580 \text{ N/mm}^2$; $R_e = 295 \text{ N/mm}^2$; $A = 15 \%$; $H_v = 348.17 \text{ Kgf/mm}^2$. ; $HB = 330.76$.

L'ébauche est fournie sous forme de barreau forgé (figure3.1) mm



Figure 3.1 Ébauche XC48 forgé

Par la suite ces barreaux ont été transformés sur le tour 16K20 a l'unité AMM Sider El Hadjar, en éprouvettes comme présentée sur la figure 3.2.



Figure 3.2 Eprouvette d'essai

3.3 Méthodologie et essais expérimentaux

Les éprouvettes préparées précédemment ont été utilisées pour la réalisation des essais expérimentaux ciblés dans ce travail. Les essais sont réalisés sur le tour 1A616 au niveau du département de génie mécanique, suivent la démarche présentée sur la figure 3.3.

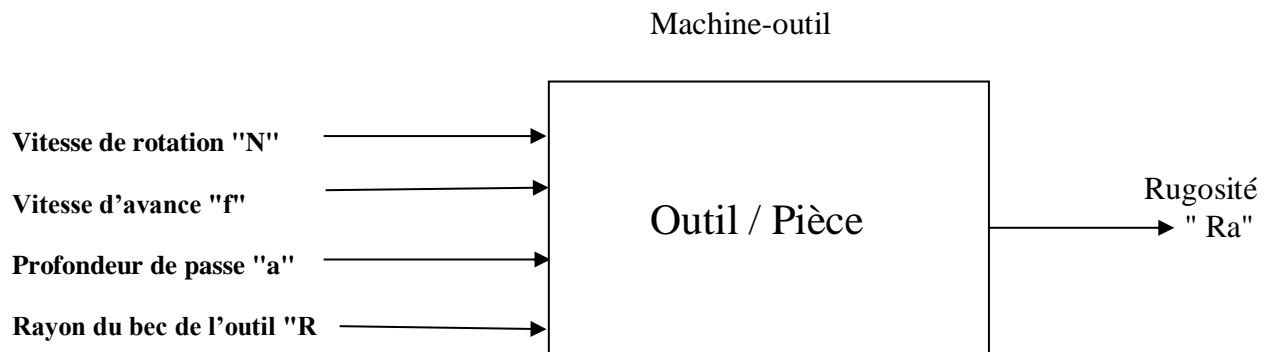


Figure 3.3 Schéma de l'expérimentation

La pièce est subdivisée en 18 étages au moyen d'un régime de coupe établie par des essais préliminaires ($N = 1400$ tr/min ; $f = 0,11$ mm/tr ; $a_p = 0,5$ mm). Par la suite 16 paliers ont été utilisées pour les essais avec le plan factoriel complet 2^4 , les paliers restants sont considérés comme témoins (figure 3.4).

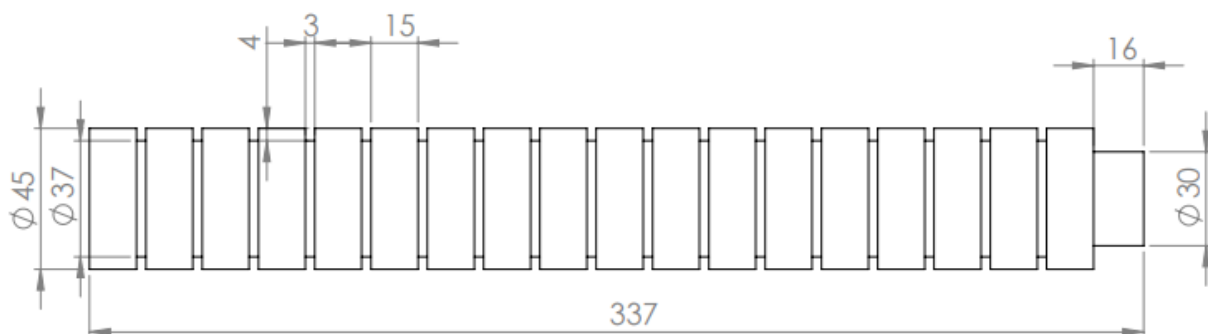


Figure 3.4 Eprouvette

3.3.1 Machine-outil

Machine-outil utilisée est un tour universel modèle AI616 (figure 3.5)



Figure 3.5 : Tour universel modèle AI616 fabriqué en URSS

Les caractéristiques du tour sont mentionnées en ce qui suit :

- Encombrement 2135x1225x1220 mm.
- Poids de la machine - 1500 kg.
- Alésage de broche : 35 mm.
- Diam. Admis dans le rompu 660 mm.
- Porte outils : 140 mm.
- Moteur d'entraînement principal : tension - 220/380 V, vitesse - 1430 tr / min, puissance 4 kW, type - A02-41-4.
- Diamètre Mandrin : 250.
- La fréquence de rotation (avant et arrière) de la broche - de 9 à 1800 tr / min, le nombre d'étages – 21.

3.3.2 Outils de coupe

Pour l'exécution de ce travail, nous avons choisi deux outils à plaquette brasée en carbure métallique de nuance P20 ; l'un avec un rayon du bec 0.2 mm et l'autre 1 mm (figure 3.6).

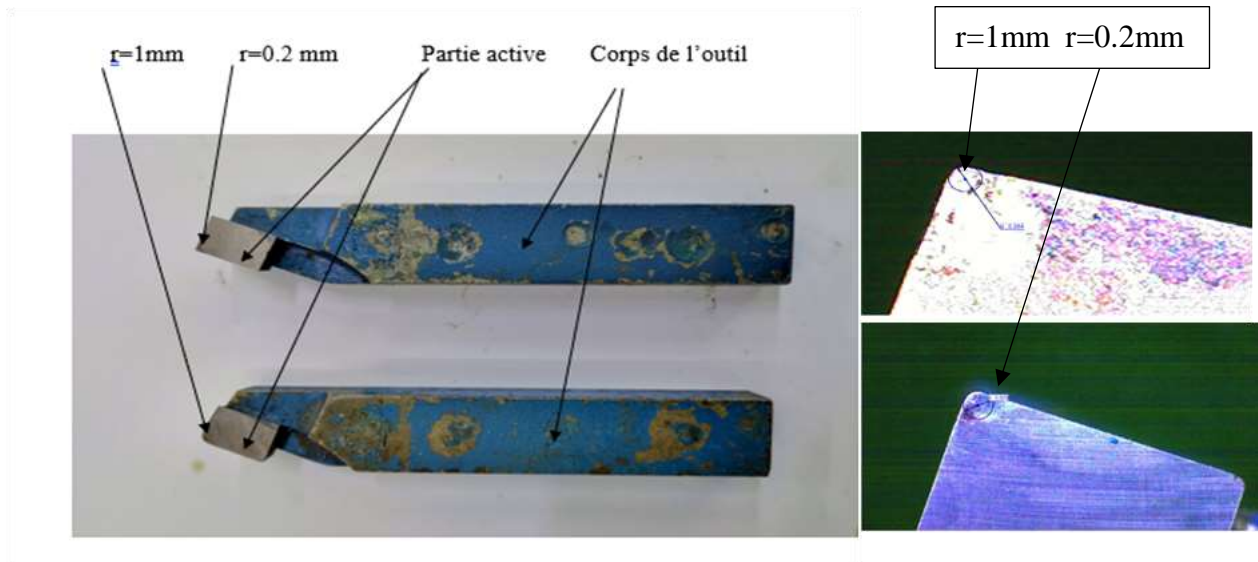


Figure 3.6 Outils de coupe

3.3.3 Définitions des facteurs étudiés et des domaines expérimentaux

Les facteurs considérés sont :

- Vitesse de rotation N ;
- Vitesse d'avance f ;
- Rayon du bec de l'outil R ;
- Profondeur de passe a_p .

Les niveaux des valeurs sont choisis d'après [12]

- Rayon du bec de l'outil R :
 - A1 : Niveau 1 $R = 0.2 \text{ mm}$
 - A2 : Niveau 2 $R = 1 \text{ mm}$
- Vitesse d'avance f :
 - B1 : Niveau 1 $f = 0.065 \text{ mm/tr}$
 - B2 : Niveau 2 $f = 0.180 \text{ m/mn}$
- Vitesse de rotation N
 - C1 : Niveau 1 $N = 710 \text{ m/min}$
 - C2 : Niveau 2 $N = 1400 \text{ m/min}$.
- Profondeur de passe a_p :
 - D1 : Niveau 1 $a = 0.5 \text{ mm}$
 - D2 : Niveau 2 $a = 1 \text{ mm}$

Les valeurs des paramètres des régime de coupe, ont été définies a partir de la documentation [12]

3.3.4 Analyse par le plan factoriel complet

La conduite de l'expérimentation est réalisée au moyen du plan factoriel 2^4 où sont prévues 16 essais à deux niveaux pour chaque facteur. La matrice d'expériences est illustrée dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 Matrice d'expériences

Facteurs \ Essais	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	-1	1	1	1
3	1	-1	1	1
4	-1	-1	1	1
5	1	1	-1	1
6	-1	1	-1	1
7	1	-1	-1	1
8	-1	-1	-1	1
9	1	1	1	-1
10	-1	1	1	-1
11	1	-1	1	-1
12	-1	-1	1	-1
13	1	1	-1	-1
14	-1	1	-1	-1
15	1	-1	-1	-1
16	-1	-1	-1	-1

3.3.4.1 Résultats expérimentaux

Tableau 3.2 Matrice des essais plan factoriels 2^4

Facteurs Essais	Ray de bec r A	Avances “f” (mm/tr) B	Vitesse de rotation “N” (tr/min) C	Profondeur de passe “a” (mm) D	Rugosité			
					R1	R2	R3	Rmoy
1	0.2	0,065	710	0,5	2,855	2,876	2,840	2,857
2	1	0,065	710	0,5	0,830	0,795	0,689	0,771
3	0.2	0,180	710	0,5	13,06	12,93	12,98	12,990
4	1	0,180	710	0,5	0,868	0,814	0,880	0,854
5	0.2	0,065	1400	0,5	2,756	2,829	2,753	2,779
6	1	0,065	1400	0,5	0,664	0,750	0,656	0,690
7	0.2	0,180	1400	0,5	13,02	13,00	13,00	13,006
8	1	0,180	1400	0,5	0,861	0,818	0,782	0,820
9	0.2	0,065	710	1,0	2,370	2,530	2,425	2,441
10	1	0,065	710	1,0	0,897	0,755	0,813	0,821
11	0.2	0,180	710	1,0	5,456	6,215	5,666	5,779
12	1	0,180	710	1,0	0,882	0,777	0,906	0,855
13	0.2	0,065	1400	1,0	2,416	2,356	2,499	2,423
14	1	0,065	1400	1,0	0,826	0,616	0,675	0,705
15	0.2	0,180	1400	1,0	12,96	12,86	12,63	12,816
16	1	0,180	1400	1,0	0,878	0,816	0,850	0,848

Les mesures de la rugosité ont été effectuées au moyen d’un rugosimètre à palpeur, modèle TR220 (figure 3.7), au laboratoire de l’école des Mines (ENSMM)-Annaba.



(Figure 3.7) Rugosimètre modèle, TR220.

Le traitement des données a été effectué au moyen du logiciel Minitab, ce qui a fourni les résultats suivants :

- **Equation de régression**

$$Ra = 1,95 + 3,17 A + 89,9 B - 0,00349 C - 6,98 D - 91,6 A*B - 0,00326 A*C + 5,17 A*D + 0,0230 B*C - 29,0 B*D + 0,00513 C*D$$

- **Effets principaux pour la rugosité Ra**

Le graphique des effets des paramètres du régime sur la rugosité Ra est illustré sur la figure 3.8

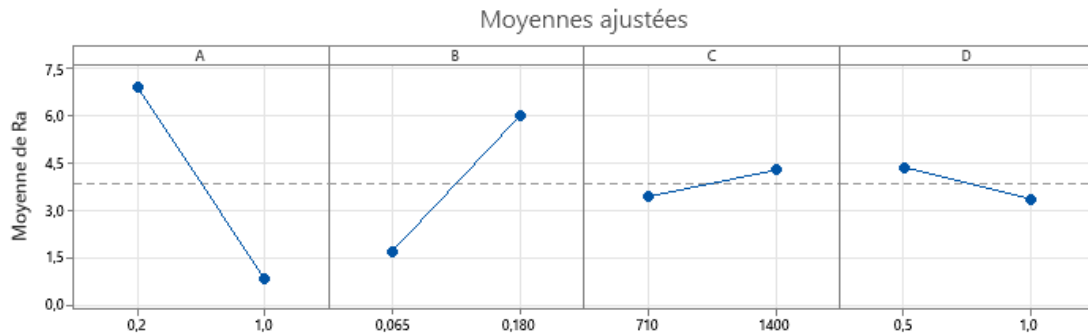


Figure 3.8 Graphique des effets principaux

▪ **Diagramme des interactions pour Ra**

Le graphique des effets des interactions des paramètres du régime sur la rugosité Ra est illustré sur la figure 3.9.

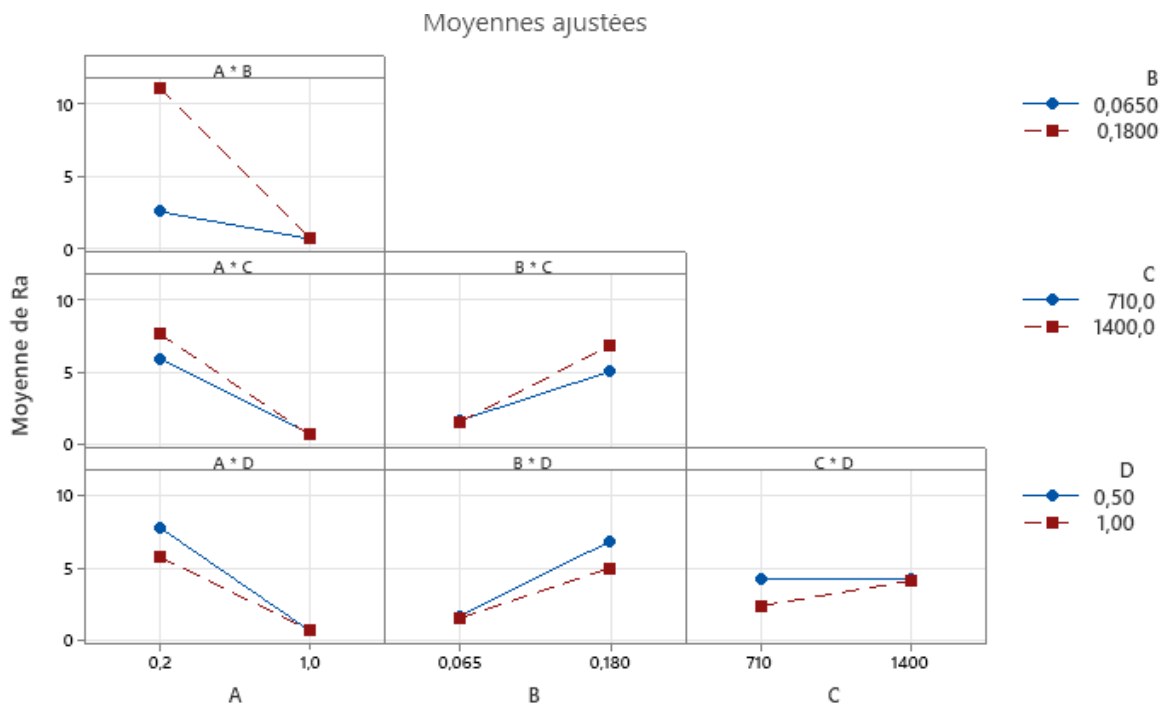


Figure 3.9 Graphique des effets des interactions

▪ **Diagramme de Pareto des effets normalisés**

L'importance des effets des paramètres et de leurs interactions au niveau de confiance de 95% est montrée sur le graphique de la figure 3.10.

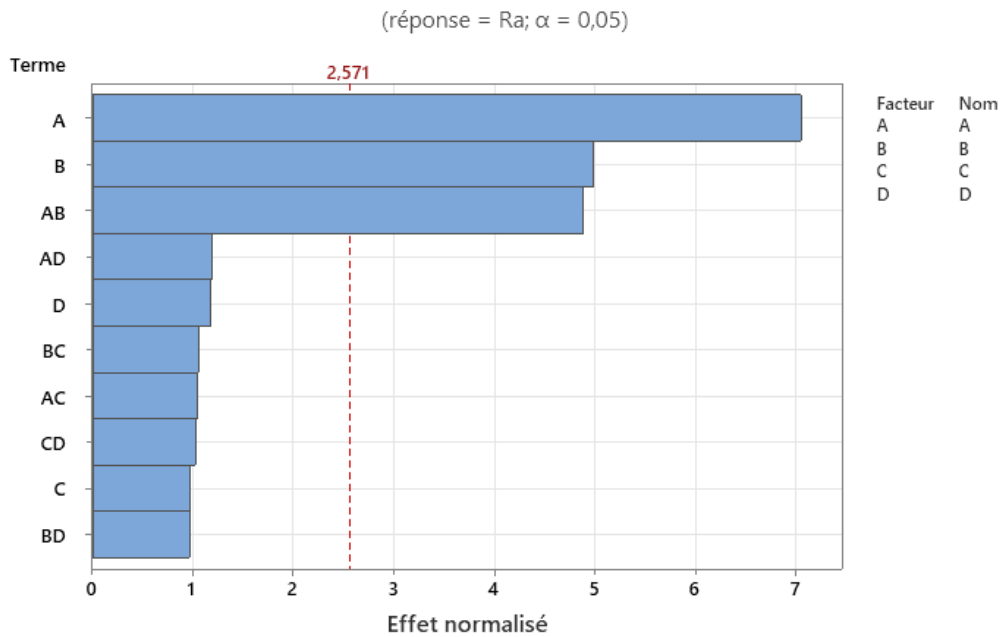


Figure 3.10 Digramme de Pareto

3.3.4.2 Interprétation des résultats

✚ Graphe des effets principaux :

- Lorsque le facteur A est au niveau 2, nous enregistrons une rugosité minimale et lorsqu'il est au niveau 1, la rugosité est maximale.
- Quand le facteur B est au niveau 1, la rugosité acquière une valeur minimale et au niveau 2 la rugosité est maximale.
- Les facteurs C et D qu'ils soient au niveau 1 et même au niveau 2, ont peu d'influence sur la rugosité.

✚ Diagramme des interactions :

- 1 -Interaction entre A et B lorsque A augmente et B diminue, faible interaction se manifestant entre le rayon du bec r et l'avance f ; r ne dépend pas de f .
- 2 -Interaction entre A et C lorsque A augmente et C diminue, faible interaction observée entre rayon du bec r et la vitesse de rotation N ; r ne dépend pas de N .
- 3 -Interaction entre A et D lorsque r augmente et ap diminue. Faible interaction observée entre rayon du bec r et la profondeur de passe ap ; r ne dépend pas de ap .
- 4 -Interaction entre B et C lorsque B diminue et C diminue, forte interaction observée entre l'avance f et la vitesse de rotation N où f dépend de N .

5 -Interaction entre B et D lorsque B diminue et D diminue. Faible interaction se manifestant entre l'avance f et la profondeur de passe ap ; f ne dépend pas de ap

6 -Interaction entre C et D lorsque C augmente et D quelle que soit. Faible interaction observée entre la vitesse de rotation N et la profondeur de passe ap ; N ne dépend pas de ap.

✚ Diagramme de Pareto :

D'après le diagramme de Pareto, les facteurs A et B ainsi que leurs interactions sont les plus influents.

✚ Optimisation des réponses : Ra

La valeur de réponse prédite (rugosité minimale Ra) par le modèle mathématique est :

$$\frac{\text{Réponse Objectif}}{\text{Ra}} = \frac{\text{Inférieur}}{\text{Minimum}} \frac{\text{Cible}}{0,69}$$

Les valeurs des paramètres du régime fournissant la rugosité Ra ainsi prédite sont :

Solution	A	B	C	D
1	1	0,065	1400	0,5

3.3.5 Analyse par le plan de Taguchi

Dans ce cas, nous avons utilisé la table de Taguchi L12 extraite à partir du plan Factoriel complet 2⁴ précédemment étudié. La matrice d'expériences est illustrée dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 Table de Taguchi L12

Essais \ Facteurs	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	1	1	2
3	1	1	2	1
4	1	2	1	2
5	1	2	2	1
6	1	2	2	2
7	2	1	2	1
8	2	1	2	2
9	2	1	1	1
10	2	2	2	2
11	2	2	1	1
12	2	2	1	2

3.3.5.1 Résultats expérimentaux

Après traitement des données de la matrice d'expériences par la méthode de Taguchi, les valeurs des ratios (Signal/Bruit) obtenus sont présentées dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4. Matrice d'expériences plan Taguchi L12

Facteurs Essai	Ray de bec "r" (mm) A	Avances "f" (mm/tr) B	Vitesse de coupe "Vc" (m/min) C	Profondeur de passe "a" (mm) D	Rugosité				RAPPORT SB1
					R1	R2	R3	R _{moy}	
1	0,2	0,065	710	0,5	2,855	2,876	2,840	2,857	-9,118
2	0,2	0,065	710	1	2,370	2,530	2,425	2,441	-7,754
3	0,2	0,065	1400	1,0	2,416	2,356	2,499	2,424	-7,6895
4	0,2	0,180	710	1,0	5,456	6,215	5,666	5,779	-15,237
5	0,2	0,180	1400	0,5	13,02	13,00	13,00	13,007	-22,283
6	0,2	0,180	1400	1,0	12,96	12,86	12,63	12,817	-22,155
7	1,0	0,065	1400	1,0	0,826	0,616	0,675	0,706	3,028
8	1,0	0,065	1400	0,5	0,664	0,750	0,656	0,690	3,223
9	1,0	0,065	710	1,0	0,897	0,755	0,813	0,822	1,706
10	1,0	0,180	1400	0,5	0,861	0,818	0,782	0,820	1,720
11	1,0	0,180	710	1,0	0,882	0,777	0,906	0,855	1,360
12	1,0	0,180	710	0,5	0,868	0,814	0,880	0,854	1,370

▪ **Graphique des effets principaux pour Ra**

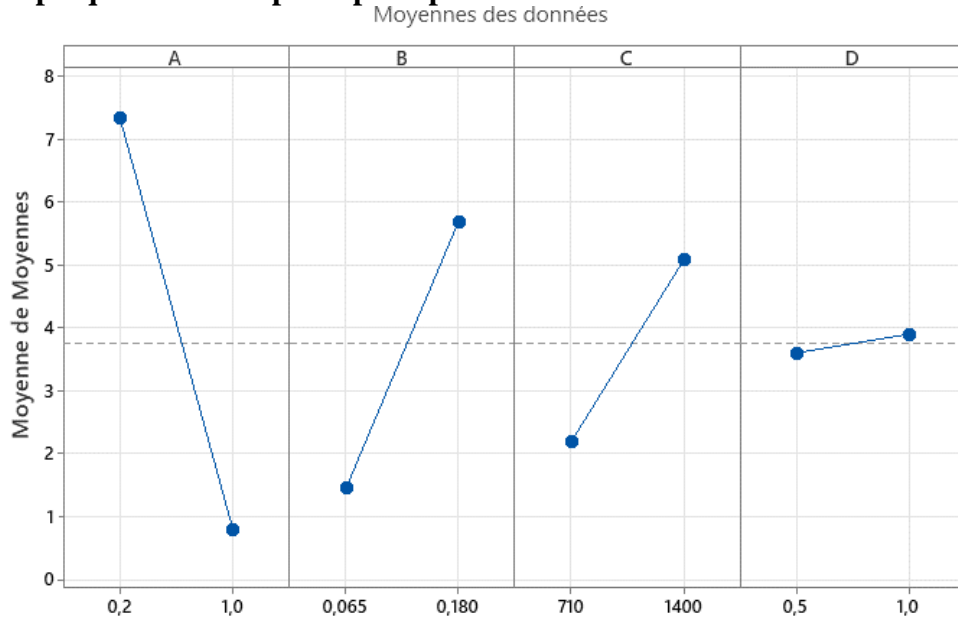


Figure 3.11 Graphique des effets principaux

▪ **Diagramme des interactions pour Ra**

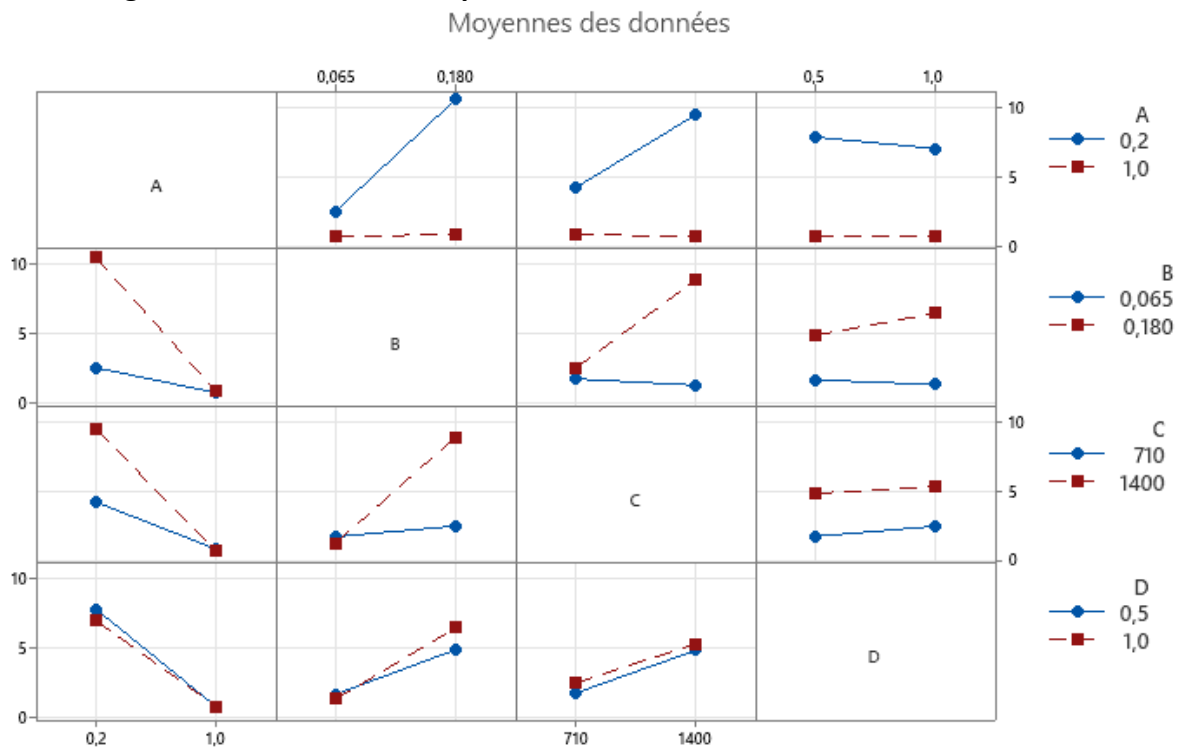


Figure 3.12 Graphique des effets des interactions

▪ **Graphique des effets principaux pour Rapports de signal/bruit**

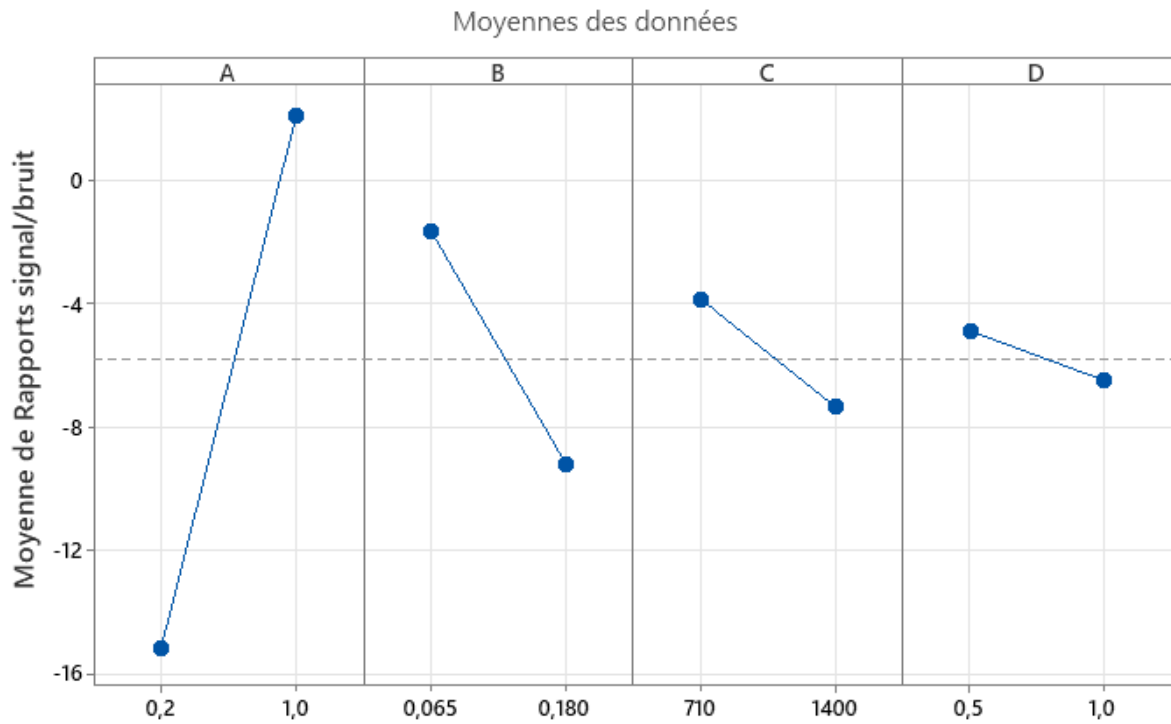


Figure 3.13 Graphique du rapport de signal/bruit

▪ Diagramme de Pareto des effets normalisés

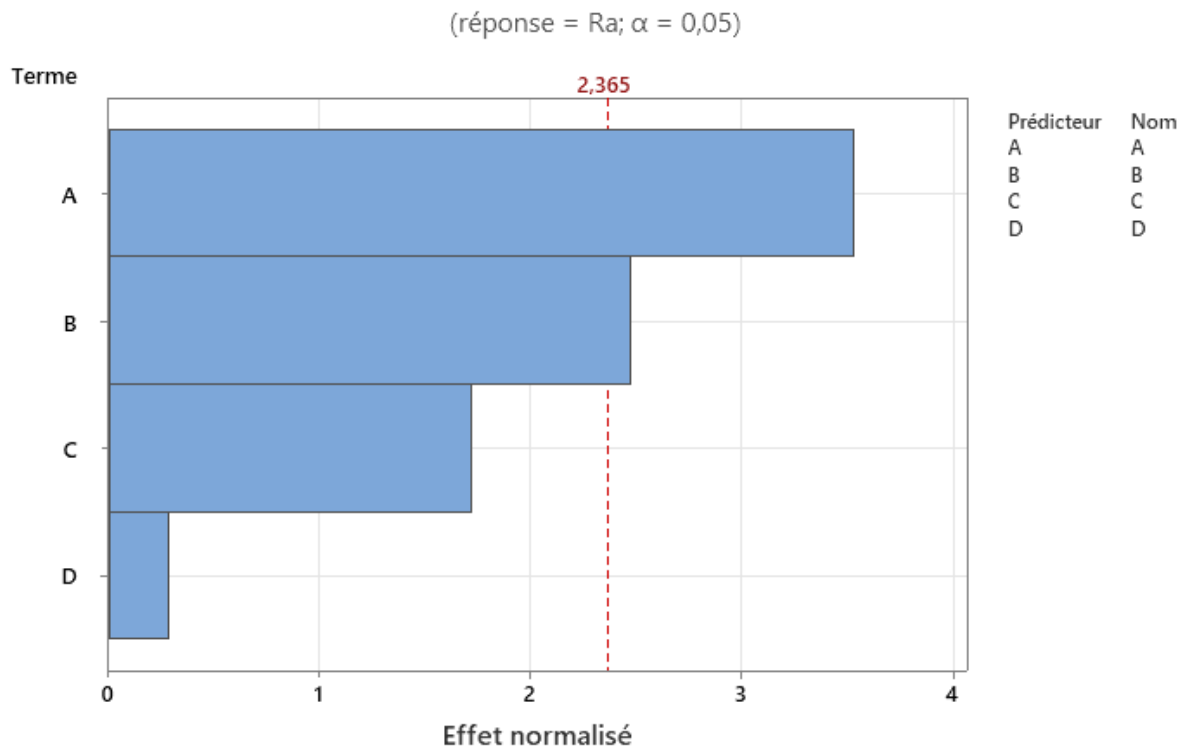


Figure 3.14 Diagramme de Pareto

3.3.5.2 Interprétation des résultats

✚ Graphe des effets principaux :

-Lorsque le facteur A est au niveau 2, nous enregistrons une rugosité minimale et lorsqu'il est au niveau 1, la rugosité est maximale.

-Quand le facteur B est au niveau 1, la rugosité acquière une valeur minimale et au niveau 2 la rugosité est maximale.

-Lorsque le facteur C est au niveau 1, nous enregistrons une rugosité minimale et lorsqu'il est au niveau 2, la rugosité est maximale.

-Le facteur D qu'ils soient au niveau 1 et même au niveau 2, ont peu d'influence sur la rugosité.

✚ Diagramme des interactions :

1 -Interaction entre A et B lorsque A augmente et B diminue, faible interaction se manifestant entre le rayon du bec r et l'avance f ; r ne dépend pas de f .

2 -Interaction entre A et C lorsque A augmente et C diminue, faible interaction observée entre rayon du bec r et la vitesse de rotation N ; r ne dépend pas de N .

3 -Interaction entre A et D lorsque r augmente et a_p diminue. Faible interaction observée entre rayon du bec r et la profondeur de passe a_p ; r ne dépend pas de a_p .

4 -Interaction entre B et C lorsque B diminue et C diminue, forte interaction observée entre l'avance f et la vitesse de rotation N où f dépend de N .

5 -Interaction entre B et D lorsque B diminue et D diminue. Forte interaction se manifestant entre l'avance f et la profondeur de passe a_p ; f dépend de a_p

6 -pas d'interaction lorsque C augmente et D diminue ; C ne dépend pas de D.

✚ Diagramme de Pareto :

D'après le diagramme de Pareto, les facteurs A et B sont les plus influents.

✚ Graphe du rapport signal/bruit

-Lorsque le facteur A est au niveau 1, nous enregistrons un rapport S/N minimale et lorsqu'il est au niveau 2, le rapport S/N est maximale.

- Quand le facteur B est au niveau 2, le rapport de signal/bruit acquière une valeur minimale et au niveau 1 le rapport S/N est maximale.

- Lorsque le facteur C est au niveau 1, nous enregistrons un rapport S/N minimale et lorsqu'il est au niveau 2, le rapport S/N est maximale.

- Lorsque le facteur D est au niveau 2, nous enregistrons un rapport S/N minimale et lorsqu'il est au niveau 1, le rapport S/N est maximale

Optimisation des réponses : Ra

D'après la valeur la plus élevée (position 8) SB=3.22 qui correspond à la rugosité minimale $Ra_{\min}=0.69 \mu\text{m}$ cette rugosité est obtenu avec le régime :

$$r=1 \text{ , } f=0.065 \text{ mm/tr , } N=1400 \text{ trs/min , } ap=0.5 \text{ mm}$$

Conclusion

A partir des résultats de traitement fournis par les plans factoriels complets et la table de Taguchi, nous retenons les conclusions suivantes :

- Les deux méthodes ont montré que les facteurs, rayon du bec de l'outil et l'avance sont les plus influents. A l'inverse, la vitesse de rotation et la profondeur de passe ont moins d'effet
- Globalement les interactions des facteurs enregistrées par le traitement par la table de Taguchi, correspondent à celles obtenues par les plans factoriels complets, sauf l'apparition d'une forte interaction entre l'avance f et la profondeur de passe ap (interaction B, D)
- De même, d'après les digrammes de Pareto établis, l'effets des interactions est beaucoup plus formulé par les plans factoriels complets qui permet de montrer l'effets des paramètres ainsi que de leurs interactions
- La valeur maximale (3.223) du ratio (Signal / Bruit), a permis de définir les paramètres de régime offrant la meilleure rugosité $Ra_{\min}=0.69 \mu\text{m}$, qui sont : $r=1\text{mm}$; $f=0.065 \text{ mm/tr}$; $N=1400 \text{ tr/min}$; $ap=0.5\text{mm}$. Ce résultat a été aussi fournis par le modèle mathématique de prédiction établie par le plan factoriel complet 2^4 .

A partir de ces observations, nous retenons que la méthode de Taguchi (au moyen d'une matrice de 12 essais), permet d'aboutir aux mêmes résultats que le plan factoriel complet qui exige 16 essais. Néanmoins, pour aboutir à des résultats plus précis, nous effectuons l'étude au moyen des plans d'expériences plus représentatifs, en l'occurrence, les modèles non linéaires (modèle du second degré) tel que les plans de Box Behnken à 3 facteurs qui ne nécessite que 15 essais.

3.3.6 Analyse par le plan de box Behnken

Dans cette deuxième série d'essais sur une pièce analogue à la précédente, nous expérimentons l'effet de trois facteurs (N, f et ap) en fixant le rayon du bec ($r=1\text{mm}$), vu que

l'étude précédente effectuée avec les modèles (du plan factoriel complet et le plan de Taguchi) a montré l'influence la plus importante du rayon du bec. Dans ce cas, nous utilisons le plan de box Behnken (3 facteurs 3 niveaux) qui demande 15 essais uniquement. La conduite de l'expérimentation est réalisée selon le schéma de la figure 3.15.

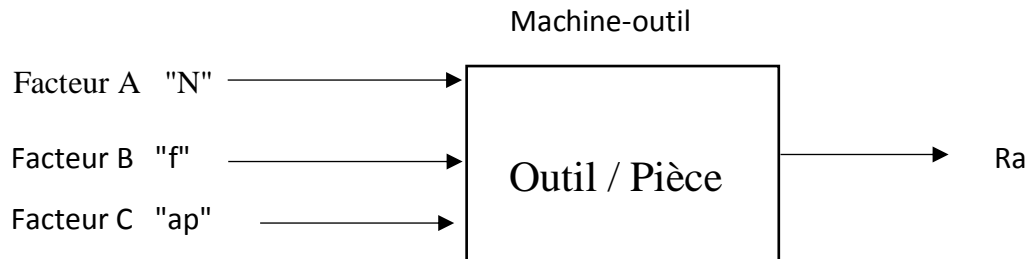


Figure 3.15 Schéma de l'expérimentation

3.3.6.1 Définitions des facteurs étudiés et des domaines expérimentaux

Les facteurs considérés sont :

- A -Vitesse de rotation N ;
- B -Vitesse d'avance f ;
- C -Profondeur de passe ap.

Les niveaux des valeurs sont choisis d'après [12]

- Vitesse de rotation N

A1 : Niveau 1 ; N = 710 m/min.

A2 : Niveau 2 ; N = 1120 m/min (valeur moyenne).

A3 : Niveau 3 ; N =1400 m/min.

- Vitesse d'avance f :

B1 : Niveau 1 ; f =0.045 mm/tr

B2 : Niveau 2 ; f=0.140 m/mn (valeur moyenne).

B3 : Niveau 3 ; f=0.220m/mn

- Profondeur de passe ap :

C1 : Niveau 1 ; ap=0.5mm

C2 : Niveau 2 ; ap=1mm (valeur moyenne).

C3 : Niveau 3 ; ap=1.5mm

La matrice d'expériences est illustrée dans le tableau 3.14.

Tableau 3.14 Matrice d'expériences

Facteurs Essais	A	B	C
1	-1	-1	0
2	1	-1	0
3	-1	1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	1
10	0	1	-1
11	0	-1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

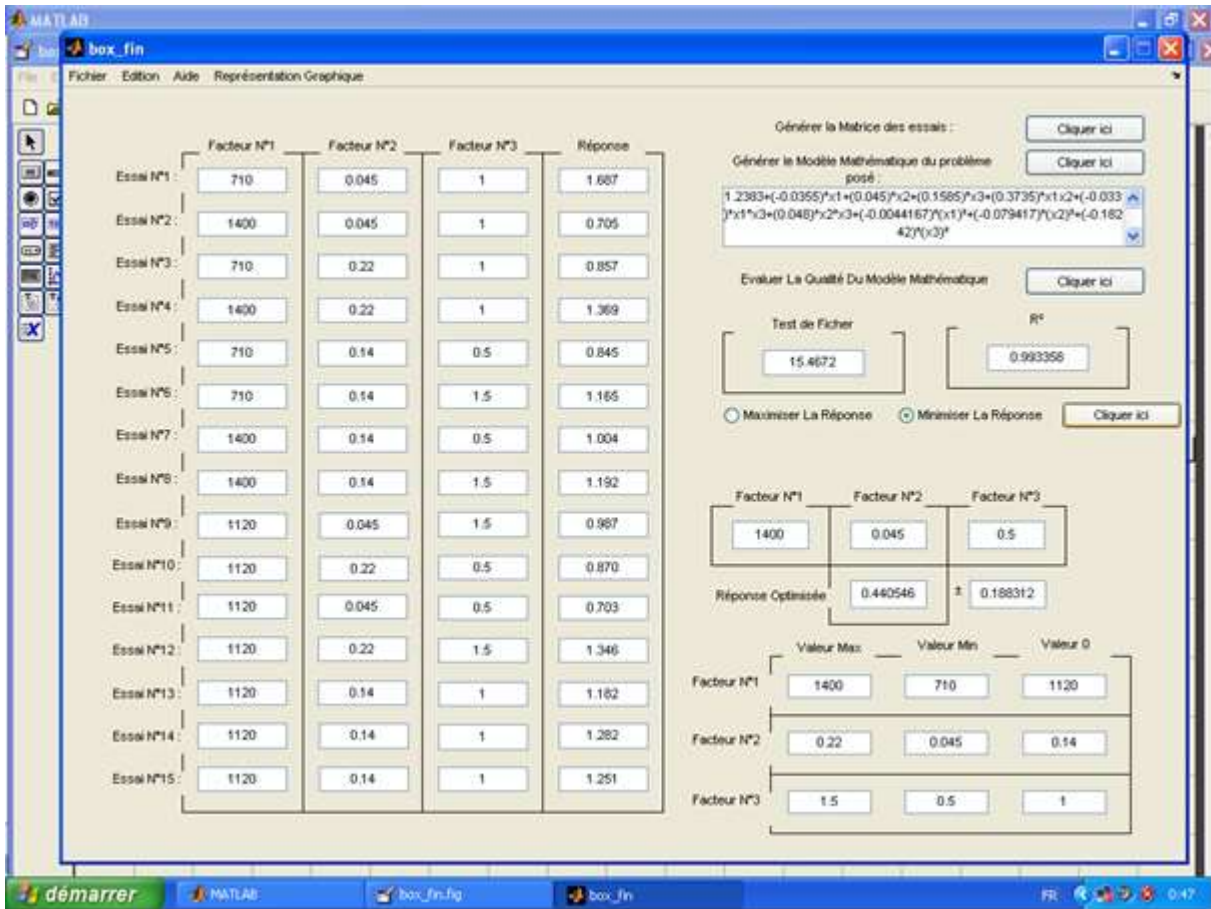
La réalisation des essais est effectuée dans les mêmes conditions que l'étude précédente (la même machine-outil, le même montage, le même appareil de mesure de rugosité). La matrice d'expériences est représentée sur le tableau 3.15.

Tableau 3.15 Matrices des essais

Facteurs Essais	Vitesse de rotation "N" (tr/min)	Avance "f" (mm/tr)	Profondeur de passe "ap" (mm)	Rugosité "Ra" (μm)			
				Ra1	Ra1	Ra1	Ra _{moy}
1	710	0,045	1	1,605	1,711	1,629	1,687
2	1400	0,045	1	0,676	0,724	0,716	0,705
3	710	0,22	1	0,942	0,839	0,792	0,857
4	1400	0,22	1	1,350	1,391	1,366	1,369
5	710	0,14	0.5	0,808	0,782	0,947	0,845
6	710	0,14	1.5	1,275	1,153	1,068	1,165
7	1400	0,14	0.5	1,068	0,988	0,957	1,004
8	1400	0,14	1.5	1,158	1,283	1,137	1,192
9	1120	0,045	1.5	1,133	0,974	0,856	0,987
10	1120	0,22	0.5	0,872	0,912	0,828	0,870
11	1120	0,045	0.5	0,768	0,604	0,738	0,703
12	1120	0,22	1.5	1,197	1,522	1,319	1,346
13	1120	0,14	1	1,299	1,052	1,197	1,182
14	1120	0,14	1	1,328	1,152	1,366	1,282
15	1120	0,14	1	1,422	1,227	1,106	1,251

3.3.6.2 Résultats expérimentaux

Le traitement des données est opéré par un programme [13.14] sous Matlab, ce qui a permis de fournir les résultats suivants :



Equation du modèle

$$Ra = 1.2383 + (-0.0355)X_1 + (0.045)X_2 + (0.1585)X_3 + (0.3735)X_1X_2 + (-0.033)X_1X_3 + (0.048)X_2X_3 + (-0.0044167)X_1^2 + (-0.079417)X_2^2 + (-0.18242)X_3^2 + e$$

Les valeurs optimales du régime offrant la rugosité minimale soit Ra=0.44±0.18µm, sont :

N=1400trs/min ; f=0.045mm/tr ; ap=0.5mm

Avec

Fisher=15.4672 ; R²=0.993358

Représentation graphique

L'effet de la profondeur de passe et de l'avance sur la rugosité "Ra", au niveau de la vitesse maximale, est illustré sur la figure 3.16.

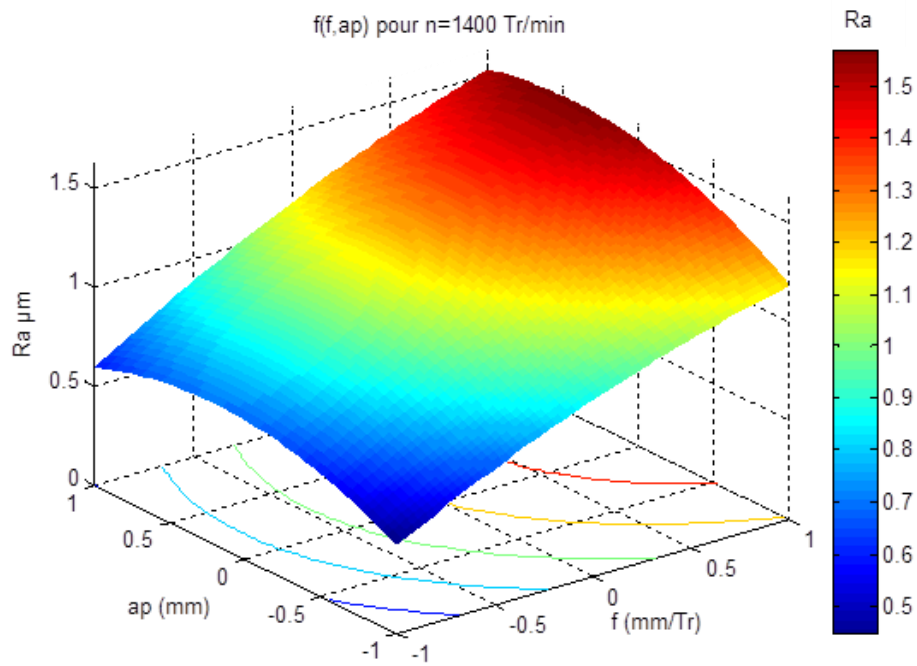


Figure 3.16 effet de la profondeur de passe et l'avance

- Effet de l'avance (f) :

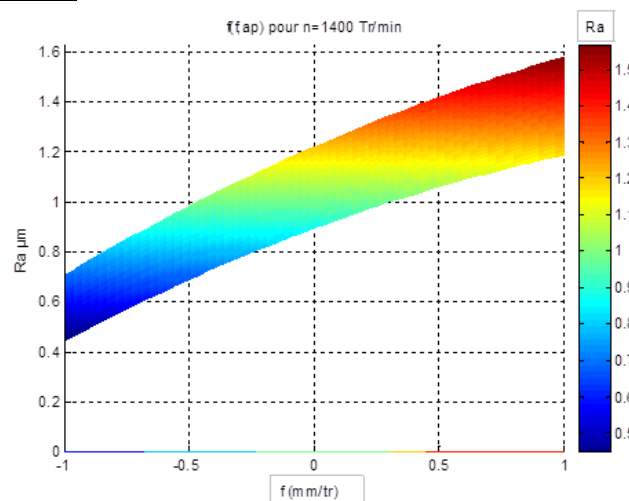


Figure 3.17 effet de l'avance (f)

- Effet de la profondeur de passes (ap)

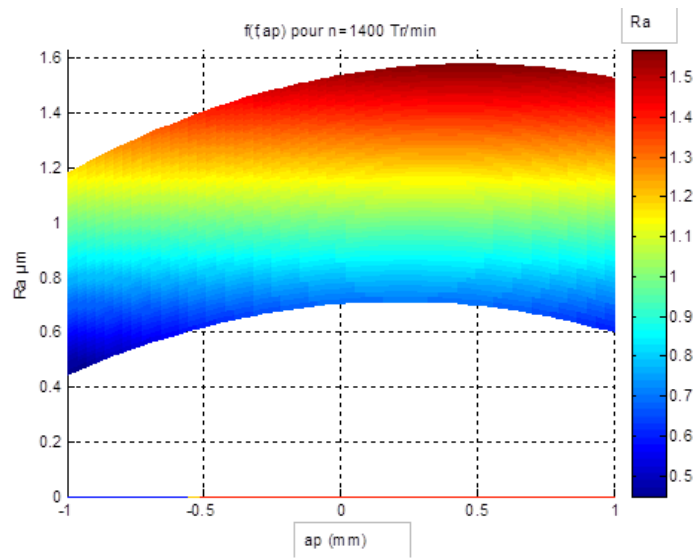


Figure 3.18 effet de la profondeur de passes

- Effet de la vitesse de rotation (N)

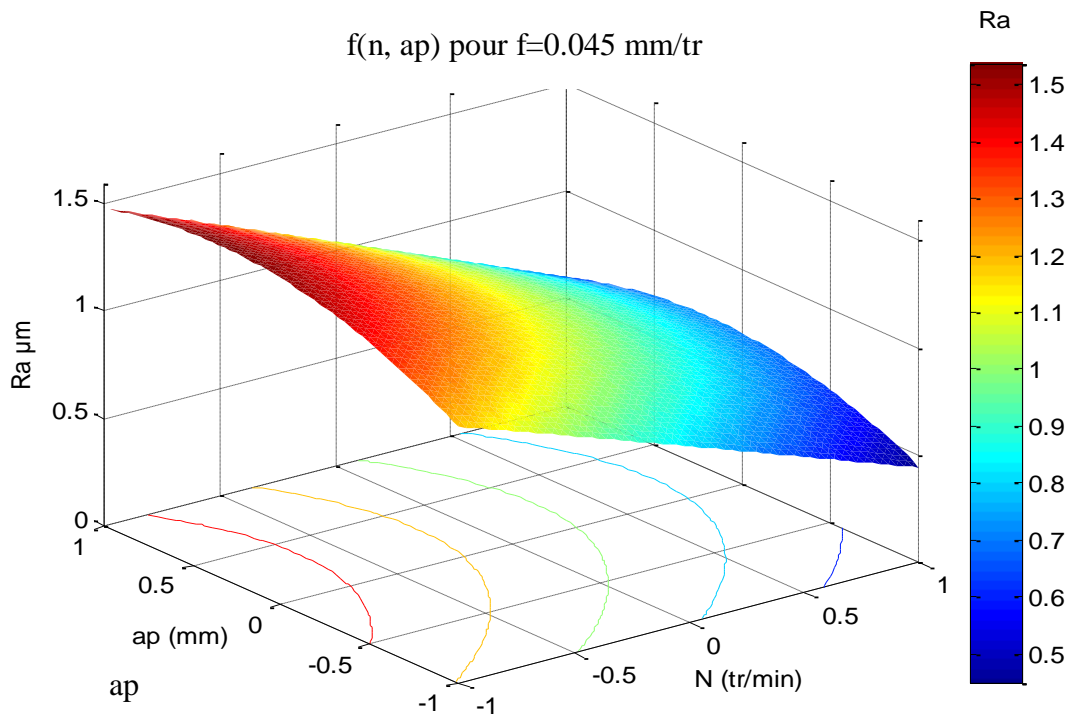


Figure 3.19 effet de la profondeur de passe et la vitesse de rotation

3.3.6.3 Interprétation des résultats

D'après les graphes présentes dans les figures :

-Lorsque l'avance "f" (facteur B) diminue, nous enregistrons une amélioration de la qualité de surface qui se manifeste par la diminution de la rugosité "Ra" (voir figure 3.17).

- L'influence de la profondeur de passe "ap" (facteur C), n'est pas très significatif. En effet, Quel que soit sa variation de, nous enregistrons une rugosité faible fluctuation de la rugosité "Ra", ce qui est montré dans la figure 3.18.

-L'augmentation de la vitesse de rotation "N" (facteur A) occasionne une amélioration de l'état de surface où la rugosité "Ra" peut atteindre des valeurs inférieures au seuil de 0.5 μm , ce qui est dévoilé sur la figure 3.19.

3.4 Conclusion

Après avoir mené plusieurs expériences au moyen des différentes méthodes, nous enregistrons que le plan factoriel complet et la méthode de Taguchi offrent pratiquement les résultats similaires. Néanmoins, l'appréciation par la méthode de Taguchi reste approximative, ce qui révélé par le diagramme de Pareto, mais son utilisation permet de diminuer le nombre d'expériences.

L'emploi de la méthode de Box Behnken, offre une évaluation plus affinée par le modèle mathématique et par une appréciation plus définie par les représentations graphiques. En effet, le régime de coupe peut être amélioré, ce qui permet d'atteindre des valeurs de rugosité "Ra" plus faibles que celles obtenus par les méthodes précédentes. Les résultats de la comparaison sont présentés :

-Plan factoriel complet 2^4 : Rayon du bec= 1mm ; l'avance $f=0.065\text{mm/tr}$; vitesse de rotation $N=1400\text{ tr/min}$; profondeurs de passe $a_p=0.5\text{mm}$; la rugosité $R_a=0.690\ \mu\text{m}$.

-Plan de Taguchi L12 : Rayon du bec= 1mm ; l'avance $f=0.065\text{mm/tr}$; vitesse de rotation $N=1400\text{ tr/min}$; profondeurs de passe $a_p=0.5\text{mm}$; la rugosité $R_a=0.690\ \mu\text{m}$.

-Plan de Box Behnken : Rayon du bec= 1mm ; l'avance $f=0.045\text{mm/tr}$; vitesse de rotation $N=1400\text{ tr/min}$; profondeurs de passe $a_p=0.5\text{mm}$; la rugosité $R_a=0.440\pm 0.18\ \mu\text{m}$.

Conclusion générale

Conclusion générale

Lors de la fabrication d'une pièce, la qualité de surface est évaluée par sa rugosité qui met en relief des irrégularités dues aux procédés de mise en œuvre. Le travail entrepris dans ce mémoire de fin d'études a été orienté sur l'analyse de la qualité de surface caractérisée par la rugosité. Le travail repose sur des essais expérimentaux qui ont été réalisés sur un échantillon en acier XC48, largement utilisé dans l'industrie. Le but de ce travail est d'aboutir à une modélisation de la rugosité de surface usinée "Ra" au moyen d'une étude comparative entre trois méthodes utilisant les plans d'expériences et à une optimisation des conditions de coupe. L'accomplissement des essais a été réalisée lors des opérations d'usinage (chariotage sur tour), ce qui a permis de juger l'influence des paramètres du régime de coupe (r , N , f et a_p) sur les réponses de sortie (Ra) de l'acier XC48.

Ces plans contribuent à l'élaboration des modèles mathématiques, permettant de déterminer les réponses convenables aux régimes de coupe les plus adéquats. La simulation numérique présentée par les courbes d'iso réponses de Box-Behnken a permis d'apprécier plus fermement les effets des paramètres de traitement (facteurs d'entrée) sur la réponses étudiée (facteur de sortie). Lors de l'application et la comparaison des régimes optimaux se rapportant à "Ra", le plan factoriel complet et la méthode de Taguchi ont permis de fournir une estimation sur l'influence des paramètres de coupe sur l'état de la surface réalisée.

Les résultats obtenus à partir par des modèles mathématiques des plans d'expériences de Box-Behnken sont plus représentatifs vu la complexité du phénomène de coupe. Les résultats obtenus dans ce travail ont permis de mieux comprendre l'effet des conditions de coupe sur l'état de surface à travers les méthodes envisagées et d'en déduire les conditions de coupe optimales.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] ZERTI, O. (2018). Investigation expérimentale et analyse multi-objective lors du tournage de l'acier AISI D3 en utilisant les méthodes RSM, ANN, Taguchi et GRA (Doctoral dissertation).
- [2] 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- ENERGO MAC1986, 34 p.
- [3] A. Belloufi, « Cours Procédés de Fabrication », Master Maintenance Industrielle, Université KasdiMerbah Ouargla.2010.
- [4] Atelier machines-outils livre le tournage I.S.B.A. - site Cobegge.
- [5] S. Benlahmidi, H. Aouici, Tournage, TP Production/ 2ème année GM&P, Ecole Nationale Supérieure de Technologie.
- [6] Maurice Pillet Les plans d'expériences par la méthode Taguchi 2001 Ed d'organisation.
- [7] R. Fisher «Statistical Methods for Research Workers » Oliver and Boyd,1925.
- [8] F. Louvet et L. Delplanque « Les Plans d'Expériences par la méthode Taguchi, Expérimentique » 2005.
- [9] Jérôme Faucher « Les plans d'expériences pour le réglage de commandes à base de logique floue » Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, spécialité électrique et automatique, 26, sept, 2006.
- [10] Goupy j., Plans d'expériences pour surfaces de réponse, Dunod Paris 1999
- [11] Goupy j., Erreur de dérive et choix de l'ordre des essais d'un plan d'expériences factoriel, Revue de statistique appliquée, vol.37, n°1 p.5-22,1989.
- [12] A. Chevalier – J. Bottan Guide de Technicien en fabrication mécanique Ed Hachette 1979.
- [13] André Casadevall, Introduction à MATLAB, Paris 2004.
- [14] Aide en ligne, MATLAB 6.