

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITULE

**Contrôle et réglage d'une opération d'usinage par les plans
d'expériences (plans factoriels et plans de Taguchi)**

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : FABRICATION MECANIQUE ET PRODUCTIQUE

PRESENTE PAR : HADJI SAMIR

DIRECTEUR DU MEMOIRE : LAOUAR L. Pr Université Badji Mokhtar -ANNABA

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : LAOUAR L. Pr Université Badji Mokhtar -ANNABA

EXAMINATEURS :

LAGRED A.	MCA	Université Badji Mokhtar -ANNABA
MEKHILEF S.	MCA	Université Badji Mokhtar -ANNABA
CHELIA A.	MAA	Université Badji Mokhtar -ANNABA

Année : 2018/2019

Remerciements

Par l'occasion de ce travail, et avant tout, tous mes remerciements vont à ALLAH le tout puissant, qui m'a renforcé de volonté pour surmonter les difficultés, et m'a accordé succès après succès,

Aussi, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à ma formation depuis mon premier jour à l'école fondamentale chez Mr Djamel MEKIDECHE jusqu'au dernier enseignant chez qui j'ai pris mon dernier cours, l'impact était fort de mon encadreur Mr Lakhdar LAOUAR, et Mrs, Ahmed LAGRED, Lakhdar BOULANOUAR, Mohamed MANSOURI,

A tous je dis : vos efforts n'iront pas en vain, je serai à la hauteur de vos attentes,

A Mr le directeur technique de Sonatrach/DP-Hassi-Messaoud Toufik BELAMRI, ainsi qu'au chef du département Réseau de collecte et desserte Mr Abdelouahab KHELIFA et le chef du département Travaux neufs pétroliers Mr Ali Safi GHEZAL,

Des remerciements distingués à Mr Brahim TIFYECHE le chef du service Etudes et développement qui donne l'exemple d'un homme méthodique, sérieux et capable,

Votre aide était très précieuse,

A ceux qui on mis des obstacles dans mon chemin, grâce à vous j'ai appris comment les surpasser,

A mon groupe de Master II FMP qui ont bien accueilli leur « grand frère ».

Dédicaces

Je dédie ce travail en premier lieu à ma mère, le vrai ingénieur qui a su nous ramener sains et saufs dans le monde vaste après un long chemin plein de difficultés,

A ma femme, qui n'a cessé de me soutenir pour être toujours dynamique, et qui ne ménage aucun effort tant pour mon bonheur que pour me réunir des conditions d'étude favorables,

A mon fils, Ishak, rappelle-toi bien de ce moment, tu dois me le rendre, tu dois me rendre fière de toi quand tu passeras par là,

A mes frères et mes sœurs, leurs conjoints et leurs enfants, et à toi spécialement Chaïma,

A mes collègues au travail: Mohamed et Ayoub ZIANI, Abderrahmane GHERBI, Ala MAAMERI, Aziz KHENIFER, Nacer BRIEDJ, Cherif BOUDELAË, Talbi ABDI,

A mes amis Foued, Bilal, Halim, Salah, Aziz,

Vous m'êtes tous chers.

Sommaire

Sommaire	i
Liste des tableaux	iii
Liste des figures	iv
Introduction	1
Chapitre I : Usinage et qualité de surface usinée	
I.1 Introduction.....	5
I.2 Définition et importance	5
I.3 Types d'usinage	6
I.3.1 Usinage conventionnel	6
I.3.2 Usinage non conventionnel	6
I.4 Principaux procédés d'usinage conventionnel	9
I.4.1 Le tournage	9
I.4.2 Le fraisage	10
I.4.3 Le rabotage	10
I.4.4 La rectification	11
I.4.5 Le taillage des engrenages	11
I.5 Système MODOP	11
I.5.1 Machine-outil	12
I.5.1.1 Types des machines-outils selon leur degré d'automatisation	12
I.5.1.2 Constituants d'une machine-outil	13
I.5.2 Dispositifs et appareillage	18
I.5.3 Outil	19
I.5.3.1 Matériaux à outil	19
I.5.3.2 Géométrie des outils de coupe	20
I.5.3.3 Usure des outils de coupe	22
I.5.4 Pièce	23
I.6 Processus de coupe	24
I.7 La rugosité	25
I.7.1 Influence des paramètres de coupe sur la rugosité	26
I.7.2 Intérêt de l'étude de la rugosité	28
I.7.3 Paramètres d'un profil linéaire de rugosité	29

I.7.4	Représentation graphique de la rugosité sur les dessins techniques	36
I.7.5	Mesure de la rugosité	37
I.8	Conclusion	39
 Chapitre II : Les plans d'expériences		
II.1	Introduction.....	41
II.2	Généralités et notions	41
II.3	Plans d'expériences factoriels	45
II.4	Plans d'expériences de Taguchi	47
II.5	Conclusion.....	48
 Chapitre III : Expérimentation		
III.1	Introduction	51
III.2	But et structuration de l'expérimentation	51
III.3	Préparation de la pièce	52
III.4	Mesure du paramètre de sortie	54
III.5	Calcul par la méthode des plans factoriels	54
III.5.1	Calcul par la méthode des plans factoriels complets	54
III.5.2	Calcul par la méthode des plans factoriels fractionnaires	57
III.6	Estimation par la méthode des plans de criblage de Taguchi	59
III.7	Conclusion	62
 Conclusion et perspectives		64
Références bibliographiques		66

Liste des tableaux

Tableau I.1	Performances de divers procédés d'usinage	8
Tableau I.2	Valeurs usuelles de la rugosité en fonction du procédé d'usinage .	28
Tableau I.3	Principaux paramètres des irrégularités de surface selon JIS B0601	31
Tableau I.4	Symboles des stries et leurs directions	37
Tableau II.1	Exemple d'un plan d'expérience 2^3	44
Tableau III.1	Tableau d'expériences	55
Tableau III.2	Niveaux des facteurs	55
Tableau III.3	Paramètres de réglage et résultats des mesures de la rugosité	55
Tableau III.4	Matrice des effets	56
Tableau III.5	Matrice des effets	57
Tableau III.6	Matrice des effets	58
Tableau III.7	Table d'expériences de Taguchi	59
Tableau III.8	Effets moyens des facteurs	60
Tableau III.9	Interaction AB	60
Tableau III.10	Interaction AC	60
Tableau III.11	Interaction BC	60

Liste des figures

Figure I.1	Tour à charioter de Vaucanson	6
Figure I.2	Principaux procédés de mise en forme	9
Figure I.3	Composantes en interaction d'un système d'usinage	11
Figure I.4	Constituant d'un tour parallèle	13
Figure I.5	Guidage du chariot et de la table	15
Figure I.6	Opération de grattage manuel des glissières	15
Figure I.7	Système de transmission par vis-écrou	16
Figure I.8	Guidage en rotation de la broche	16
Figure I.9	Fraise deux tailles montée sur cône morse	17
Figure I.10	Plateau diviseur	18
Figure I.11	Géométrie-modèle de l'outil	20
Figure I.12	Principaux angles d'un outil de coupe	21
Figure I.13	Exemple d'un outil de coupe	21
Figure I.14	Exemple de désignation d'un outil de coupe	22
Figure I.15	Courbe d'usure de l'outil	22
Figure I.16	Usure en dépouille d'un outil de coupe	23
Figure I.17	Etapes de formation du copeau	25
Figure I.18	Zone de coupe	25
Figure I.19	Ressemblance d'une opération de chariotage à une opération de filetage.	26
Figure I.20	Influence de l'avance et de l'angle des arrêtes de l'outil sur la rugosité...	27
Figure I.21	Motif de rugosité selon l'opération d'usinage (signature du procédé d'usinage).....	27
Figure I.22	Décomposition d'un profil général d'une surface	29
Figure I.23	Longueurs d'ondes pour la séparation des défauts de forme, d'ondulation et de rugosité	30
Figure I.24	Plusieurs profils possibles avec la même valeur de Ra	34
Figure I.25	Profil de rugosité d'un cylindre d'un moteur à combustion d'une automobile	34
Figure I.26	Profil de rugosité d'un acier plat	35
Figure I.27	Pièce obtenue par tournage fin	35
Figure I.28	Symbole de base de l'état de surface	36

Figure 29	Symbole général de l'état de surface	29
Figure I.30	Principe de mesure de la rugosité par contact	38
Figure I.31	Dépendance du profil de rugosité tracé par le rayon de la pointe en diamant	38
Figure II.1	Schéma général d'un processus	42
Figure II.2	Domaine d'étude d'un facteur	42
Figure II.3	Espace expérimental	43
Figure II.4	Graphe des effets d'un facteur	47
Figure II.5	Graphe des interactions	48
Figure III.1	Schéma fonctionnel de l'opération	51
Figure III.2	Outil de coupe utilisé	52
Figure III.3	Pièce-éprouvette	53
Figure III.4	Usinage de l'éprouvette	53
Figure III.5	Rugosimètre Mitutoyo SJ-210	54
Figure III.6	Mesure de la rugosité	54
Figure III.7	Diagramme à barres des effets	56
Figure III.8	Graphes des effets des facteurs	61
Figure III.9	Graphe des effets des interactions	62

Introduction

Dans un monde marqué par une évolution rapide et constante à tous les niveaux et dans tous les domaines, la fabrication mécanique trouve bien sa place par les progrès qu'elle enregistre tel qu'une technologie ne se dit de pointe que pour peu avant qu'elle ne redevienne à son tour universelle puis obsolète (exemple de la machine-outil automatique ou à commande numérique à 3 axes, l'une est devenue obsolète, tandis que l'autre est devenue universelle).

Cette évolution dans le domaine de la fabrication mécanique est due aux évolutions dans les autres domaines comme l'électronique et l'informatique surtout depuis l'invention du transistor puis du processeur qui ont permis l'apparition de la commande numérique et de l'automatisation soft présentant l'avantage d'être extrêmement flexible, aussi bien dans les détails du domaine de la fabrication mécanique qui ont tendance à devenir des domaines à parts entières, l'état de surface en est un.

Avec les progrès dans les différents domaines et dans la fabrication mécanique, on s'intéresse de plus en plus dans des détails qui ont aussi de plus en plus d'importance à cause des changements des conditions d'exploitation des systèmes mécaniques (températures extrêmes, vitesse de mouvement très élevées -atteignant et dépassant les 60 000 tours par minute pour les machines-outils d'usinage à grande vitesse, les tailles des systèmes mécaniques envoyés dans le corp humain ou dans l'espace...). Garantir une fabrication de qualité revient à assurer une qualité du produit manufacturé. Cette qualité est caractérisée le plus souvent par la précision de l'état de surface.

L'état de surface est le résultat des influences de plusieurs facteurs, les principaux en sont : la machine-outil, l'outil de coupe, ainsi que le régime de coupe. Chaque combinaison de ces facteurs donnant un état de surface différent.

Parfois l'état de surface est facilement prédictible par des formules mathématiques et des représentations géométriques simples, mais parfois cette tâche devient extrêmement difficile surtout par manque des données d'entrée. Une machine-outil qui vieillit -par exemple- diverge des prescriptions initiales de son constructeur et donne des résultats totalement différents de ce qu'elle donnait dans sa période de jeunesse et de maturation, ce fait peut aussi être dû à des facteurs extérieures, dans ce cas-là on fait recours aux essais. Mais comment ? Doit-on faire plusieurs essais pour commencer la fabrication d'une série de pièces ? Qu'en est-il pour le coût ? Pire encore, quel serait le coût pour la fabrication unitaire ?

Introduction

Dans ce qui suit nous consacrerons un premier chapitre pour présenter l'usinage, les machines-outils sur lesquelles l'usinage est réalisé, comment se produit la rugosité et l'intérêt de l'étude de l'état de surface.

Le deuxième chapitre traitera la méthodologie de conduite des expériences scientifiques et la présentation des méthodes qui seront utilisées dans le dernier chapitre.

Le troisième et dernier chapitre sera une application de ces méthodes sur la rugosité produite suite à une opération d'usinage conventionnel.

Chapitre I

Usinage et qualité de surface usinée

I.1 Introduction

Dans l'industrie mécanique il y a plusieurs possibilités d'obtention d'une pièce avec une forme et des dimensions données. On cite par exemple le moulage, la déformation à chaud ou à froid, le soudage, l'ajout de la matière (comme l'impression 3D pour le plastique) et le rechargement. Mais ce qu'on trouve le plus souvent, surtout quand il s'agit de la précision dimensionnelle, est l'usinage par enlèvement de la matière. Les autres procédés listés plus haut constituent le plus souvent une étape préalable à la finition par usinage de la pièce projetée qui est l'obtention de l'ébauche : une forme rapprochée à la forme et aux dimensions de la pièce finie.

Dans ce chapitre nous allons examiner l'usinage et ces différents procédés, le processus de coupe et les traces que laisse un travail d'usinage sur la pièce ainsi obtenue : la rugosité.

I.2 Définition et importance

« On appelle usinage toute opération de mise en forme par enlèvement de matière destinée à conférer à une pièce des dimensions et un état de surface (écart de forme et rugosité) situés dans une fourchette de tolérance donnée » [1].

L'usinage joue un rôle central dans notre vie. La plupart des outils et objets métalliques dont on a usage tous les jours auraient subi des opérations d'usinage. Les avions, les bateaux, les voitures, les appareils électroménagers sont principalement des assemblages de pièces usinées. On y a recours pour la fabrication des appareils et des prothèses médicaux, jusqu'aux ustensiles de cuisine.

D'un point de vue économique, le secteur industriel de l'usinage a une importance non négligeable puisqu'il produit environ 2,5 % du produit national brut d'un pays développé [1]. Les ventes des machines-outils d'usinage ne cessent de progresser. Par exemple, en France, les ventes ont enregistré une croissance de +5.5% en volume en 2017 par rapport à l'année 2016 qui était déjà une année favorable à l'image des trois années qui l'ont précédé. Les tours en avaient la part du lion avec un volume d'environ 34%, haussant le volume des ventes de ces machines de 14.9%. Les centres d'usinage, eux, avec une hausse de +9.4% par rapport à la même année. On estime qu'environ 85 % des centres d'usinage vendus en France sont aujourd'hui des centres à 5 axes. En comparaison, les machines de formage n'ont connu qu'une croissance assez faible en volume, de l'ordre de 1.6%. L'avenir reste toutefois prometteur avec des niveaux de croissance des ventes des machines-outils toujours supérieurs à 4% [2].

On distingue en fonction de la méthode d'enlèvement de la matière deux grands types d'usinage.

I.3 Types d'usinage

I.3.1 Usinage conventionnel

Qui procède à l'enlèvement de la matière par sa compression puis cisaillement sur l'arrête tranchante d'un outil de coupe en mouvement par rapport à la pièce travaillée.

Le principe est évident et est usuel depuis l'antiquité par les outils à main, les couteaux en pierre puis en métal. L'usinage ne devrait qu'attendre l'apparition de la machine-outil pour apparaître avec le premier tour moderne (Figure I.1), qui est un grand tour de précision entièrement métallique dit : « Tour à chariotier de Vaucanson » apparu en 1751, conservé au musée des arts et métiers en France, et la guerre mondiale pour se développer plus rapidement et se répandre très largement.



Figure I.1 : Tour à chariotier de Vaucanson
Musée des arts et métiers, France.

I.3.2 Usinage non conventionnel

Cette catégorie, nouvelle, englobe tous les autres procédés d'enlèvement de la matière autre que ceux de l'usinage conventionnel.

Les principes d'enlèvement de la matière dans cette catégorie sont divers. Parmi eux on peut citer :

- Procédés à action mécanique :
 - Jet d'eau et jet d'eau abrasif ;
 - Usinage ultrasonique.
- Procédés électrochimiques :
 - Usinage électrochimique ;
 - Ébavurage et rectification électrochimiques.
- Procédés thermiques :
 - Electroérosion ;
 - Laser, plasma.

Nous nous limiterons dans notre étude à l'usinage conventionnel, simple de principe, qui remonte à des siècles dans l'histoire et qui est encore le plus répandu en industrie manufacturière.

Dans cette optique l'usinage à grande vitesse (UGV) est aussi considéré comme usinage conventionnel du fait du même principe d'enlèvement de la matière : la coupe par un outil de coupe. La divergence réside dans les vitesses de coupe beaucoup plus importantes en usinage à grande vitesse (de 4 à 10 fois) qu'en usinage non UGV.

L'usinage conventionnel présente les avantages suivants par rapport à l'usinage non-conventionnel :

- Souvent très économique (voir Tableau I.1) ;
- Productivité élevée (voir tableau I.1) ;
- Facile à mettre en œuvre ;
- Convient pour une large gamme de matériaux (métaux et plastiques, conducteurs et non conducteurs, ductile et relativement fragile...) ;
- Déchets (coupeau) facilement recyclables ;
- N'affecte que peu l'intégrité structurelle de la surface de la pièce.

Tableau I.1 : Performances de divers procédés d'usinage

Procédé	P/Q (GPa)	Puissance courante (kW)	Débit correspondant (cm ³ /s)	Précision (μ m)	
				La meilleure	A P _{max}
Tournage	2.5	25	10	2.5	125
Rectification	25	20	0.8	2.5	75
Plasma	50	150	3	250	2500
Electroérosion	100	12.5	0.125	12.5	125
Electrochimique	400	150	0.375	12.5	125
Ultrasons	500	12.5	0.025	5	25
Electro Beam	25000	7.5	0.0003	5	25
Laser	150000	15	0.0001	12.5	125
Chimique	-	-	0.5	12.5	50

Sur le tableau I.1 on constate l'avantage économique, qualitatif et productif de l'usinage conventionnel de façon à en résumer que l'usinage non conventionnel ne se justifierait que par l'impossibilité de l'usinage conventionnel.

Inconvénients :

- Perte importante de la matière (coupeau minimum, et surépaisseur d'usinage) ;
- Ne convient pas pour les matériaux très dur et les matériaux spéciaux comme les matériaux des moules et des outils de coupe. Cette limitation est toutefois partiellement franchie grâce l'usinage à grande vitesse ;
- Efforts de coupe importants le rendant impossible pour les matériaux tendres et les pièces minces. Cette limitation est aussi partiellement franchie grâce l'usinage à grande vitesse ;
- Pollution acoustique (bruit) ;
- Dangers de blessure, surtout sur les machines sous-équipées des dispositifs de sécurité (organes en mouvement à grande vitesse, projection de coupeau, dégagement de chaleur).

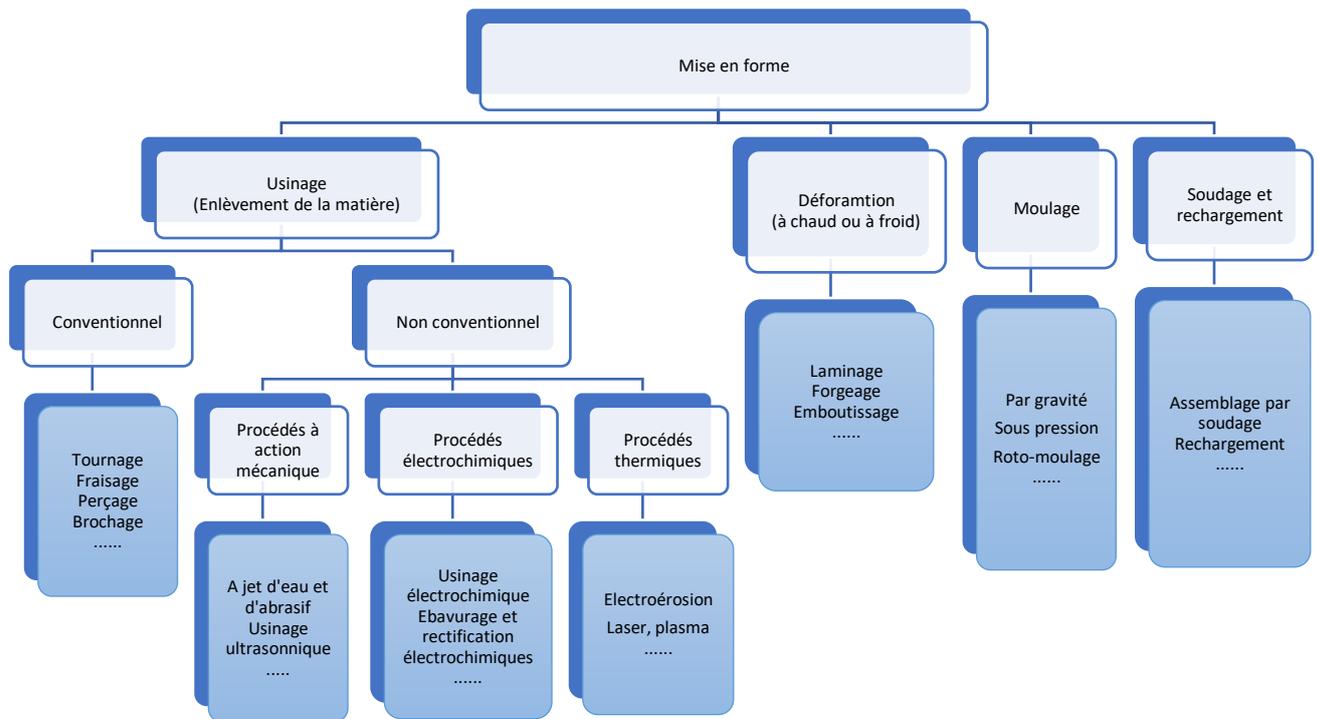


Figure I.2 : Principaux procédés de mise en forme

I.4 Principaux procédés d'usinage conventionnel

Les formes des pièces obtenues par usinage sont très diverses, c'est bien qu'il existe plusieurs procédés d'usinage chacun pouvant réaliser plusieurs opérations différentes. Une pièce pendant sa fabrication peut subir plusieurs opérations avec plusieurs procédés différents. Les principaux procédés d'usinage sont :

I.4.1 Le tournage

Pour l'usinage des formes de révolution. Dans sa forme la plus simple, le chariotage, une pièce est mise en rotation pendant que l'outil génère la forme cylindrique par un mouvement de translation selon un axe parallèle à son axe de rotation.

Le mouvement de rotation de la pièce occasionne l'arrachement de la matière par cisaillement sur l'arrête tranchante de l'outil, et est appelé par conséquent : « Mouvement de coupe ».

Le mouvement de translation de l'outil génère, en avançant, la forme, et est alors appelé : « Mouvement d'avance ».

L'épaisseur de la couche à enlever est dite « surépaisseur d'usinage ». Elle peut être enlevée en une ou plusieurs passes. L'épaisseur enlevée à chaque passe est appelée « Profondeur de passe ».

Des opérations qu'on peut réaliser sur le tour sont :

- Le chariotage, décrit ci-dessus ;
- Le dressage, génération d'une surface plane par l'avance transversale de l'outil selon un axe perpendiculaire à l'axe de rotation de la pièce ;
- Le gorgeage, création de gorge ;
- Le découpage,
- Le perçage, alésage...etc.

I.4.2 Le fraisage

Génération des formes prismatiques en donnant le mouvement de coupe à l'outil et les mouvements d'avance (longitudinal, transversal et vertical) à la pièce fixée sur la table coulissante.

Des opérations pouvant être réalisées sur une fraiseuse :

- Surfaçage ;
- Contournage ;
- Perçage ;
- Alésage.

I.4.3 Le rabotage

Un outil parcourt la pièce d'un mouvement rectiligne alternatif (mouvement de coupe lors de l'allée, et retour à vide par soulèvement de l'outil) tout en pénétrant dans la matière à chaque fin d'un cycle d'aller-retour (mouvement d'avance).

Le mouvement de coupe est donné à l'outil et le mouvement d'avance à la pièce fixée sur la table pour les petites pièces usinées sur un étau-limeur. Sur la raboteuse destinée à l'usinage des grosses pièces, c'est inversement : le mouvement de coupe est donné à la pièce fixée sur la table, et le mouvement d'avance est donné à l'outil.

C'est un procédé vieux qui se voit en voie de disparition du fait de la mauvaise précision et qualité de surface qu'il donne, et la perte en temps d'usinage engendrée par les retours à vide de l'outil. Ainsi, une machine de rabotage ne peut réaliser que peu d'opérations, alors que d'autres machines comme la fraiseuse peuvent remplir pleinement ce rôle avec de meilleurs résultats, tout en étant dans l'aptitude de réaliser d'autres opérations.

I.4.4 La rectification

La rectification est une opération de finition de surface. L'outil mis en action est appelé meule et la matière est enlevée par abrasion.

I.4.5 Le taillage des engrenages

Pour la réalisation des roues dentées. Un mouvement de rotation conjuguée de la pièce et de l'outil (fraise-mère) engendre le taillage progressif des dents tout en pénétrant dans la matière par une avance rectiligne. D'autres méthodes de taillage des engrenages sont aussi en application en utilisant par exemple des outils crémaillères ou des outils-pignon.

On peut citer encore comme procédé d'usinage conventionnel le brochage, le mortaisage, le sciage, le perçage, et bien beaucoup d'autres. L'usinage se fait sur une machine dite « machine-outil ».

I.5 Système M-O.D.O.P

Quand on parle d'usinage, on sous-entend systématiquement quatre composantes en interactions :

- M-O : Machine-outil ;
- D : Dispositif ;
- O : Outil ;
- P : Pièce.

On ne peut pas parler d'usinage au sens industriel si l'une de ces composantes est manquante.

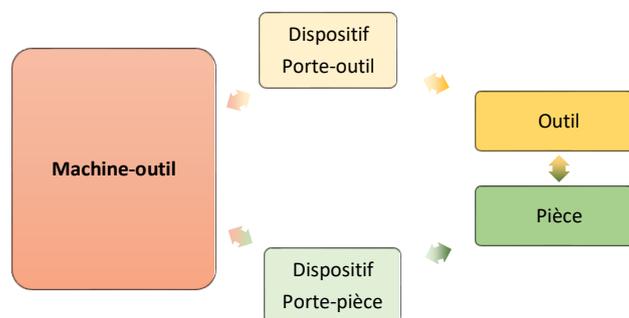


Figure I.3 : Composantes en interaction d'un système d'usinage

I.5.1 Machine-outil

Une machine-outil est une liaison entre une pièce et un outil assurant les positionnements et fixations, les mouvements et les énergies nécessaires à son usinage.

I.5.1.1 Types des machines-outils selon leur degré d'automatisation

Selon le degré d'automatisation des machines-outils on trouve :

a) Machines-outils universelles : ce sont des machines très flexibles capables de réaliser un grand nombre d'opérations diverses, les outillages et les dispositifs sont universelles, et les réglages sont manuels.

Elles nécessitent un opérateur hautement qualifié et des mises-au-point parfois longues et complexes. Elles sont rentables dans la fabrication unitaire et en petites séries et pour les travaux de réparation des pièces usées.

b) Machines-outils automatisées classiques

Ce sont des machines adaptées pour produire à grande cadence des pièces similaires. L'automatisation est mécanique, par cames et formes, le changement de produit nécessite un travail long et compliqué. Ces machines sont dépassées à cause de leur flexibilité nulle et par la tendance du marché à la production diversifiée en série moins importantes qu'auparavant.

c) Machine-outil à commande numérique (CNC)

Apparue aux USA vers les années 1950 comme des machines-outils à commande numérique (CN), puis rapidement convertie en machines-outils à commande numérique avec calculateur (CNC) vers l'année 1971 suite à l'invention du processeur, ce type de machine a pris le relais des machines automatisées classiques, elles présentent à la fois les avantages d'une machine universelle pouvant produire diverses pièces, et les avantages d'une machine automatisée par la production en série toutefois moins importantes que celles des machines automatisées [3].

d) Centre d'usinage

Ce sont des machines qui combinent plusieurs machines en une seule, le nombre d'opérations qu'elles effectuent est grand, les profils et les formes sont sans précédents sur une seule machine-outil.

La diversité des opérations et la complication des formes et des profils réalisables sur ces machines sont le fruit de la commande numérique (automatisation soft) dont elles jouissent.

Le nombre d'axes va de trois, comme pour les machines classiques, et atteint les dix-neuf axes. Elles dispensent l'opérateur de plusieurs des tâches qu'il réaliserait sur d'autres machines : la fixation de la pièce et son renversement, le contrôle et le changement des outils, le changement des vitesses et des régimes de coupe, la mise-au-point, ainsi que des fonctions de sécurité avancées.

Ces machines sont le noyau des ateliers flexibles modernes. Aidées par des robots industriels et organisées en cellules pilotées par un ordinateur central, elles peuvent commencer par du brut et finir par une variété de pièces sans la moindre intervention humaine.

Ces machines sont souvent capables à l'usinage à grande vitesse.

I.5.1.2 Constituants d'une machine-outil

Une machine-outil comporte généralement :

- Un bâti rigide ;
- Une table ou chariot coulissant selon plusieurs axes, guidé par des glissières ;
- Une (ou plusieurs) tête équipée de broche permettant de fixer l'outil ou la pièce ;
- Plusieurs moteurs (rotation outil, mouvements de table) ;
- Systèmes de transmission des mouvements ;
- Des éléments de manœuvre (manuels ou à CN) ;
- Dispositif de fixation de la pièce.

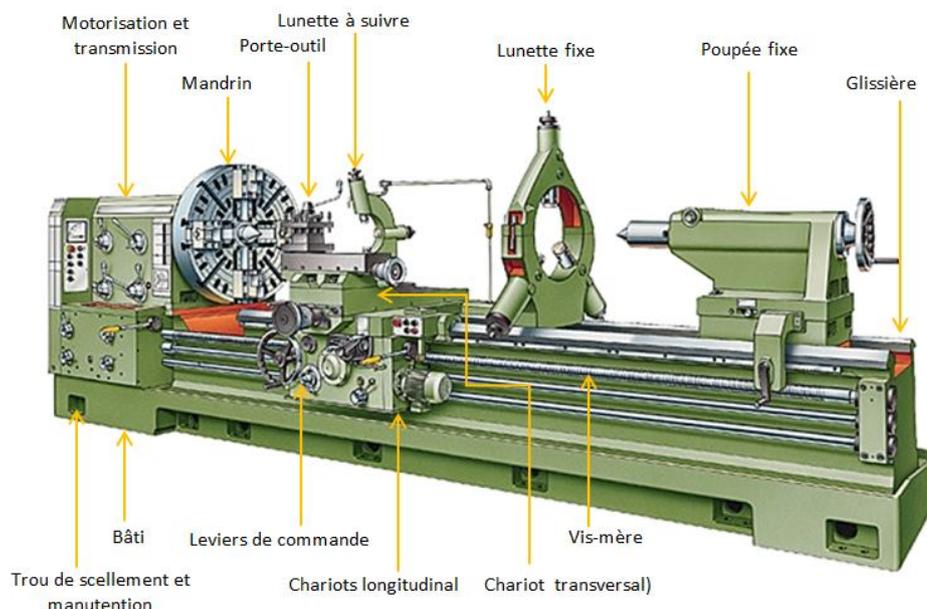


Figure I.4 : Constituants d'un tour parallèle

Une machine-outil est conçue pour atteindre une productivité maximum tout en possédant un bon degré de précision et de fini de surface le long de son cycle de vie. Pour cela une machine-outil doit avoir les qualités suivantes :

- Une bonne rigidité statique et dynamique pour pouvoir supporter les poids des composants et des pièces usinées, et les efforts dus à la coupe et à l'inertie des parties en mouvement ;
- Un niveau minimum de vibration pour ne pas affecter l'état de surface et limiter la fatigue des constituants de la machine ;
- Une bonne capacité d'amortissement des chocs induits par l'irrégularité des pièces usinées, et des facteurs divers ;
- Une haute résistance à l'usure des parties mobiles afin d'être toujours dans les tolérances ;
- Une bonne mobilité des éléments mobiles avec le minimum de frottement et d'inertie, et à des vitesses satisfaisantes pour l'usinage et les avances et retours rapides ;
- Un niveau minimum de déformation par chaleur pour avoir les mêmes résultats sous la chaleur comme sous le froid ;
- Un coût minimum des opérations de construction, maintenance et réparation pour être compétitif au marché et rentable en exploitation.

Pour cela les machines-outils sont fabriquées avec les meilleures technologies et les meilleurs matériaux.

Les bâtis sont fabriqués en fonte, ayant une bonne résistance à la compression avec une meilleure propriété lubrifiante grâce à la présence du graphite libre. Notons que la fonte est facilement coulée et que les opérations d'usinage d'un bâti de machine-outil concerne principalement les glissières, les surfaces de liaison, les sorties des broches et les surfaces de référence de la machine.

Les guidages des glissières sont conçus de façon à compenser l'usure par leurs formes en V ou en queue d'aronde avec des inserts (lardon) en alliage de cuivre et matériaux tendres avec des vis de rattrapage de jeu.

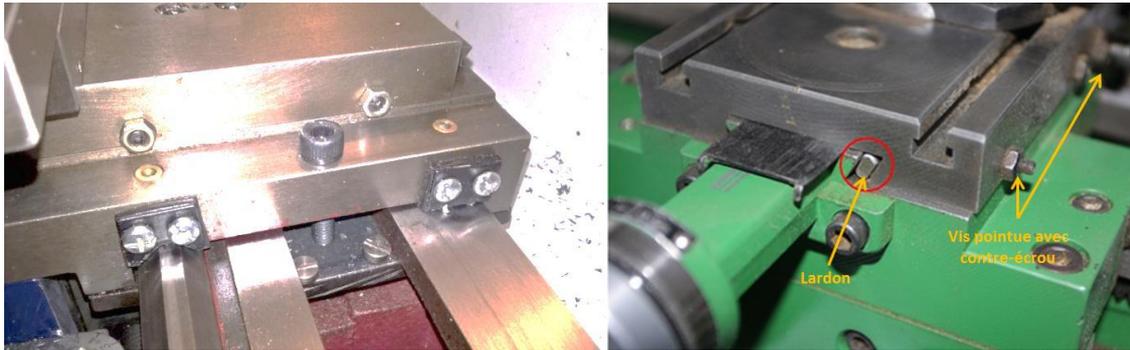


Figure I.5 : Guidage du chariot et de la table

Sur glissière en V d'un côté, et glissière plate de l'autre côté (à gauche), sur glissière en queue d'aronde (à droite).

Sur la figure précédente (Figure I.5), le serrage des vis pointues pousse le lardon contre la glissière pour minimiser le jeu. Un serrage excessif engendre l'adhérence entre les surfaces en contact et par conséquent le blocage du chariot ou la table sur la glissière. Seulement un serrage juste suffisant est nécessaire.

Pour assurer un bon ajustage et une bonne lubrification, des opérations de grattage sont réalisées sur les tables et les glissières pour retenir le lubrifiant dans les micros-poches ainsi créées.



Figure I.6 : Opération de grattage manuel des glissières

La transformation du mouvement de rotation de la vis-mère en un mouvement linéaire pour l'entraînement des chariots et de la table est obtenue par des vis à billes précontraints ou des vis à rouleaux dit aussi vis à rouleaux satellites ou vis à rouleaux planétaires. Ces systèmes présentent les avantages suivants :

- Transmission sans jeu ;
- Rendement élevé dépassant les 90% ;
- Puissance transmise élevée ;
- Pas de frottement, d'où une durée de vie longue ;
- Entretien minimum avec une lubrification à la graisse toutes les 500 à 1000 heures de travail.

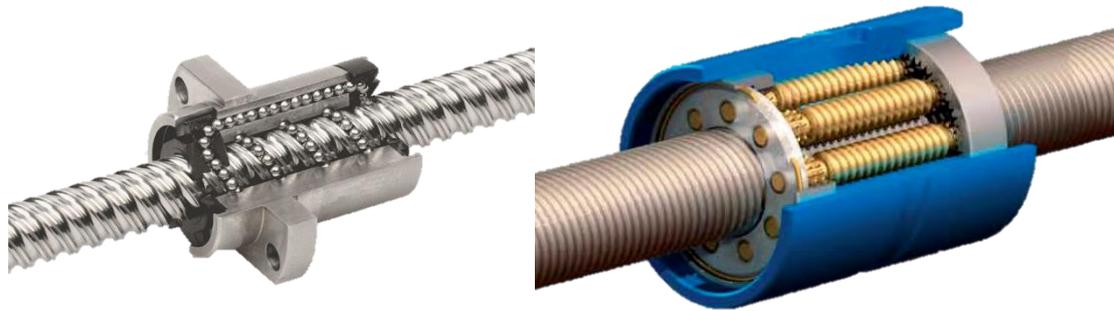


Figure I.7 : Système de transmission par vis-écrou
Vis à bille (à gauche), et vis à rouleau (à droite).

Les jeux axiaux et radiaux des éléments tournants sont éliminés par l'utilisation soit des roulements à billes à contact oblique, soit des roulements coniques, ou bien des roulements à rouleaux cylindriques avec des butées axiales. Le serrage en bout de ces éléments diminue le jeu axial mais tend à bloquer le mouvement, d'où un serrage juste suffisant est requis.

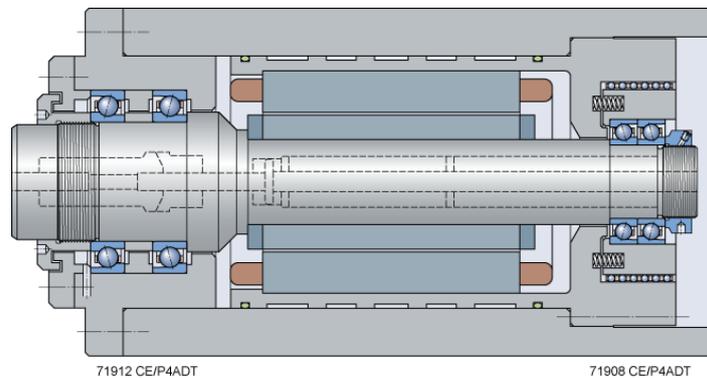


Figure I.8 : Guidage en rotation de la broche

L'intérieur des broches est réalisé en forme conique. Cette conicité permet l'auto-centrage du porte-outil, et en même temps offre l'adhérence nécessaire à l'entraînement en rotation de l'outil. Néanmoins un système d'appui de l'encoche du porte-outil contre l'ergot de la broche est prévu comme garantie ultime de l'entraînement en rotation de l'outil sous de grands efforts de coupe. Ces cônes sont souvent des cônes morses d'une conicité allant de 5.205 à 5.214% [4].



Figure I.9 : Fraise deux tailles montée sur cône-morse

En usinage à grande vitesse, les technologies sont encore bien plus poussées. Les bâtis sont fabriqués en béton de synthèse précontraint et renforcés en fibre et en matériaux spéciaux afin de supporter les efforts résultants des accélérations importantes des masses, ainsi que l'absorption des vibrations. Les boîtes de vitesse sont éliminées grâce à l'utilisation des électrobroches avec des variateurs électriques de vitesse. On peut alors régler (ou programmer) la vitesse de rotation exacte de la broche calculée à partir de la vitesse de coupe au lieu de la rapprocher à l'une des vitesses disponibles dans le cas de l'usinage sur une machine avec boîte de vitesse étagée. Les moteurs sont de type pas à pas ou servomoteurs. Et les actions (rotation ou déplacement à une vitesse ou une distance donnée) sont commandées en boucles fermées, la commande est envoyée à l'actionneur puis son exécution est contrôlée par un capteur pour déceler et corriger les éventuels écarts, ou à défaut, signaler l'erreur.

Les rouleaux des paliers à roulements sont fabriqués en céramique, et gardent alors leur précision et supportent des vitesses atteignant et dépassant les 50000 tours par minute ainsi que l'utilisation des paliers magnétiques [5].

Malgré toutes ces technologies, une machine-outil, en fonction de la charge qui lui est attribuée, arrive tôt ou tard à s'écarter de ses prescriptions initiales, et tend à avoir une dispersion de plus en plus importante.

Les jeux engendrent des déplacements imperceptibles des chariots ou d'autres organes mobiles conduisant à des écarts par rapport aux cotes réglées, ou plus simplement la perte de précision. Ils engendrent aussi, nourri par les défauts structurels croissants, des mouvements oscillatoires de haute fréquence et de faible amplitude qui sont « les vibrations » et par conséquent la création de traces microscopiques sur les pièces usinées. Ces traces sont dites « la rugosité ».

Des opérations de maintenance périodiques sont nécessaires sur les machines-outils pour rationaliser leur utilisation et assurer leur bon fonctionnement, et des remises-au-point sont réalisées pour les remettre en état suite aux éventuels écarts constatés. Ces opérations de maintenance et de contrôle sont parfois exigées par la réglementation, la législation ou par les normes. Quand les réparations ne deviennent plus économiques, la machine est déclassée et est remplacée pour une nouvelle.

Cette partie n'a pas pour but de d'examiner exhaustivement les technologies utilisées sur les machines-outils, mais de donner un aperçu sur les efforts consentis afin de produire des machines-outils de qualité afin de produire des pièces également de qualité.

I.5.2 Dispositifs et appareillage

Les dispositifs et les appareillages nécessaires à l'usinage sont fabriqués par les mêmes technologies et spécifications que la machine-outil, et subissent de ce fait les mêmes dégradations décrites plus haut dans ce chapitre.

Les dispositifs et appareils servent à :

- Fixer la pièce : Mise en position et maintien en position ;
- Procurer à la pièce ou à l'outil des mouvements supplémentaires ou spéciaux, sachant que sur une machine conventionnelle, un seul mouvement d'avance peut être automatisé et pas deux à la fois ;
- Faciliter le montage et le démontage de la pièce ou de l'outil ;
- Permettre de monter plusieurs pièces ou plusieurs outils à la fois ;
- Ajouter des fonctionnalités de sécurité et de commodité (réglage et prise de cotes) ...etc.

On peut citer comme exemples des dispositifs l'étau, le mandrin, le plateau-diviseur, la contre-pointe, la tourelle-porte-outil...etc.



Figure I.10 : Plateau-diviseur

I.5.3 Outil

Apparus et utilisés avant la machine-outil et l'industrialisation de la coupe des matériaux, les outils de coupe disponibles sur le marché sont de nos jours très divers. Cette diversité revient à la diversité des machines sur lesquelles ils sont montés, des opérations à réaliser, des matières usinées, des vitesses de coupe...etc. pour cela on trouve à la base un outil à charioter et à dresser, un foret à percer, une fraise, une broche, les uns appropriés pour l'usinage des matériaux tendres, les autres pour les matériaux durs.

I.5.3.1 Matériaux à outil

Comme discuté dans le paragraphe précédent, le choix de l'outil se fait selon la machine-outil, l'opération à réaliser et la matière à couper. Puis chaque couple outil/matière a une gamme de vitesse de coupe.

A travers l'histoire de l'usinage, les matériaux de coupe ont évolué en périodes. Chaque période ouvrant une aire nouvelle en productivité et en possibilité d'usinage des matériaux difficiles à usiner.

La caractéristique principale d'un matériau de coupe étant la dureté. Lorsque deux matériaux sont mis en frottement, le moins dur d'entre eux s'affecte grandement, tandis que l'autre ne subit que peu de dégradation, d'autant moins que sa dureté est plus élevée. Cette dureté doit être gardée à ses plus hauts niveaux sous l'effet de la chaleur de coupe. Les matériaux à outils les plus utilisés sont :

a) Acier trempé

Ce sont les premiers matériaux de coupe. La vitesse de coupe était très faible. En effet, quand la température de coupe atteint un niveau haut à cause de la vitesse de coupe, le métal reçoit un phénomène semblant à un revenu. Le matériau redevient tendre, et s'use rapidement.

b) Acier rapide supérieurs

Ce sont des aciers fortement alliés enrichis en tungstène, chrome, molybdène ou vanadium. L'enrichissement en matériaux réfractaires augmente la dureté à haute température, d'où une vitesse de coupe plus importante. Ces outils, économiques, sont encore en usage sur les matériaux tendres.

c) Carbure métallique

Ce sont obtenu par frittage à partir de poudres de carbures tel que le titane, le bore ou le tungstène et du cobalt. Ils sont fragiles et sensibles aux vibrations, pour cela ils se présentent comme des plaquettes à monter ou à braser sur des porte-outils en matériaux ductiles. Ils conservent leur dureté, qui est proche de celle du diamant, à des températures atteignant les 1000°C [6]. Ils sont les plus couramment utilisés en usinage maintenant.

d) Les céramiques

Les céramiques sont composées d'oxydes d'aluminium et de chrome, leur dureté est comparable à celle des carbures métalliques. Ces matériaux conservent leurs qualités jusqu'à des températures voisines de 1200°C [6]. Ces plaquettes sont utilisées pour des opérations de superfinition ou pour l'usinage de fontes en ébauche lourde à vitesse de coupe élevée (les céramiques nitrures).

e) Les diamants

Le diamant polycristallin ou PCD est un matériau composé à partir de particules de diamant liées avec un liant métallique. C'est le plus dur de tous les matériaux, de ce fait il possède des caractéristiques inégalées en terme de résistance à l'usure et à l'abrasion, mais il souffre de l'inconvénient majeur qu'à haute température il dissous facilement dans le fer, d'où son usage est réservé aux matériaux non ferreux [7].

I.5.3.2 Géométrie des outils de coupe

Les outils de coupe sont fabriqués selon une géométrie-modèle procurant à l'outil la meilleure solidité, le meilleur rendement, et le minimum d'usure et d'échauffement. D'autres détails sont également pris en considération tel que la forme du coupeau.

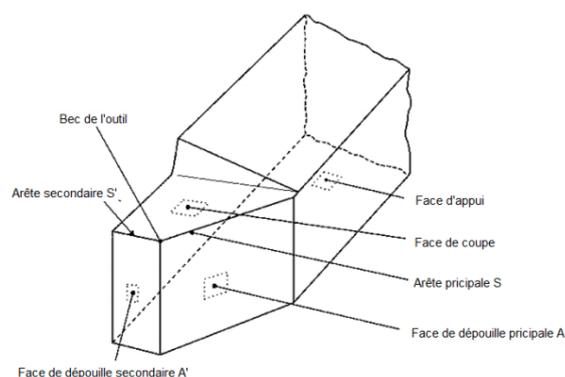


Figure I.11 : Géométrie-modèle de l'outil

Tous les outils respectent ces géométries chacun selon ses particularités. Le foret à percer par exemple possède deux arrêtes tranchantes principales en son bout avec deux surfaces de dépouille principales, et deux arrêtes tranchantes secondaires et deux surfaces de dépouille secondaires longues et de forme hélicoïdale sur sa génératrice.

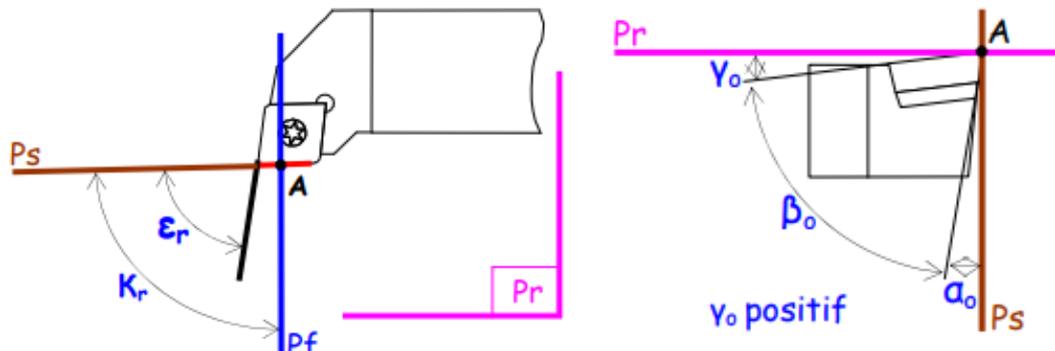


Figure I.12 : Principaux angles d'un outil de coupe

- K_r : angle de direction de l'arrête.
- ϵ_r : angle de pointe.
- γ_0 : angle d'inclinaison de l'arrête.
- β_0 : angle du taillant.
- α_0 : angle de dépouille.

Les outils modernes sont quasiment tous présents sous forme d'un porte-plaquette en acier résistant aux chocs et aux vibrations sur lequel est brasée ou montée une plaquette en carbure métallique ou en céramique. Cette conception permet une standardisation de la codification des outils coupe comme celle prévu par la norme ISO 1832:1991 « Plaquettes amovibles pour outils coupants – Désignation » à laquelle se conforment les fabricants des outils de coupe et selon laquelle ils établissent leurs catalogues de produit.



Figure I.13 : Exemple d'un outil de coupe

Fraise deux tailles composée d'un porte-plaquette, et de cinq plaquettes montées à visses.

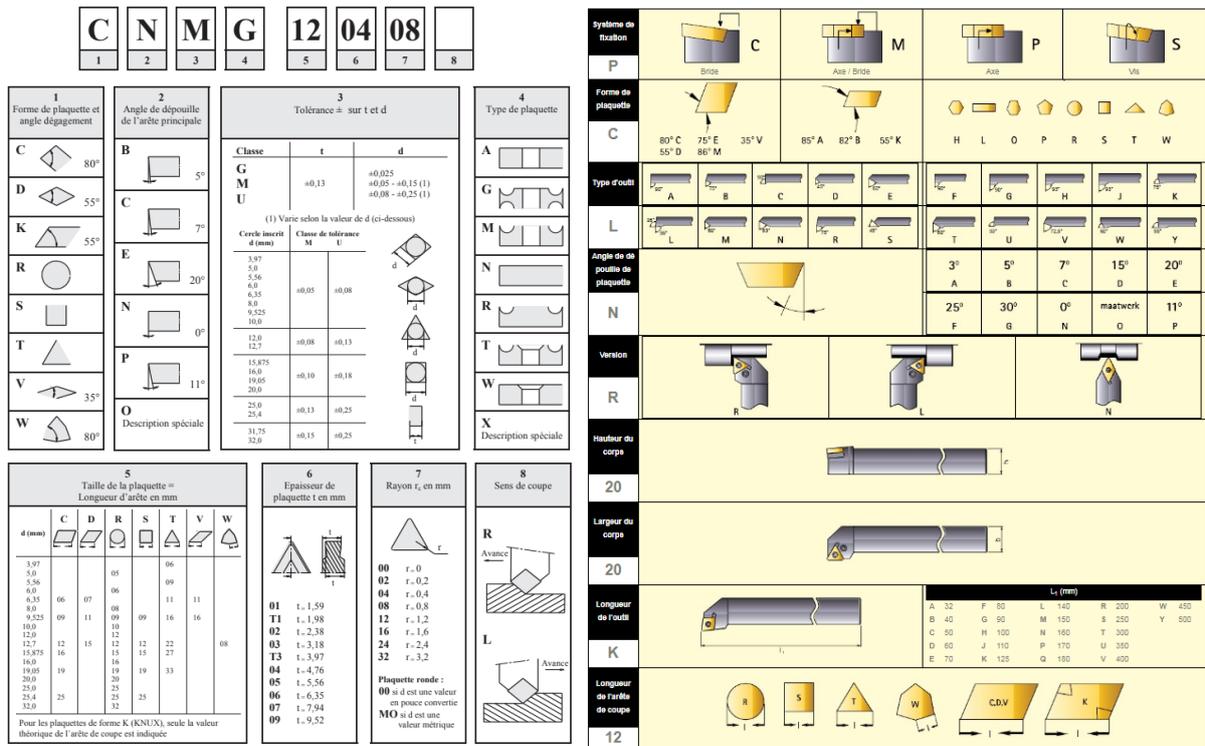


Figure I.14 : Exemple de désignation d'un outil de coupe
Désignation de plaquettes (à gauche), et de porte-plaquette (à droite) d'un outil de tournage.

I.5.3.3 Usure des outils de coupe

Lors du travail de coupe, l'outil coupe le matériau de la pièce, et il subit une usure d'autant plus que sa dureté soit proche de celle de la pièce.

On distingue trois périodes de vie pour l'outil comme représenté par la courbe de la figure I.15. C'est généralement la courbe de dégradation de toute machine, et même de quelques êtres vivants.

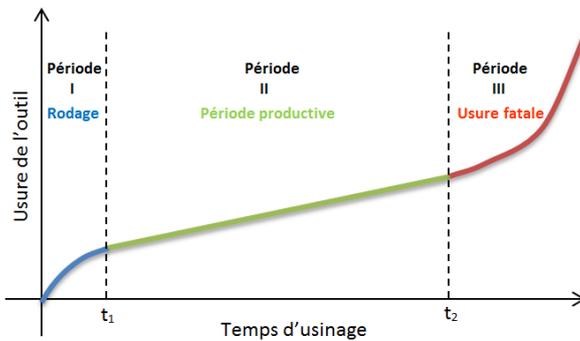


Figure I.15 : Courbe d'usure de l'outil

- La phase I est constituée de l'abrasion des principales aspérités : c'est la période de rodage affectant les ondulations et la rugosité liées au mode d'obtention.
- La phase II est constituée d'une usure stable, linéaire dans le temps. L'usure est reportée principalement sur l'une des surfaces de contact. C'est la période la plus longue, et c'est la période productive.
- La phase III, dite usure catastrophique, consiste en émissions particulières de débris engendrant un labourage de la surface et une dégradation rapide de l'outil.

Un outil est déclaré usé quand la valeur V_B de l'usure dans la zone B de la surface de dépouille atteint une valeur de 0.3 mm (figure I.16). La durée de vie peut aussi être estimée pour des fins de changement automatique ou de prévision de consommation des outils par des modèles tel que le modèle de Gilbert (1950) (ou Taylor généralisé), Kronenberg (1968) ou Köning – Depiereux (1969).

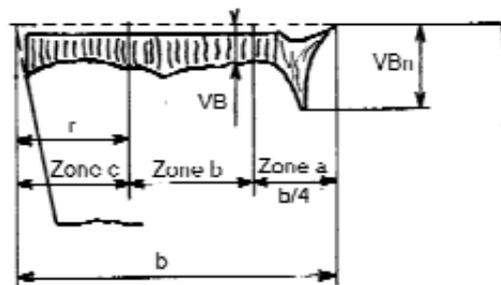


Figure I.16 : Usure en dépouille d'un outil de coupe

L'usure de l'outil est conditionnée par les paramètres suivants :

- Vitesse de coupe
- Matériau de l'outil
- Matériau usiné
- Lubrification
- Avance
- Profondeur de passe

I.5.4 Pièce

La quatrième composante du système d'usinage est le fruit de sa présence. C'est la pièce. Le produit qui sera commercialisé soit seul ou au sein d'un système plus complet.

La pièce brute peut être obtenue par plusieurs procédés : Moulage, forgeage, ou laminage (barre laminée). Chaque procédé est mieux approprié pour un matériau qu'un autre ou pour un type de production qu'un autre. La surépaisseur et les caractéristiques mécaniques s'en trouvent très affectées. L'homogénéité de la matière surtout en surface ou proche de la surface (présence de soufflures et des impuretés) affecte grandement le système d'usinage.

Afin de limiter les défauts relatifs aux chocs et aux vibrations causés par les défauts du brut, notamment l'irrégularité de la surépaisseur enlevée, on procède généralement à l'usinage selon trois niveaux :

- **Ebauche** : Enlèvement du maximum de la matière tout en assurant une charge constante sur l'outil.
- **Semi-finition** : Rapprochement de la pièce à sa forme et à ses dimensions finales. La charge sur l'outil est alors très variable.
- **Finition** : Enlèvement du minimum de la matière pour favoriser le rassemblement des meilleures conditions de coupe : stabilité de l'usinage, effort de coupe faible, afin d'avoir les dimensions et l'état de surface requis de la pièce.

I.6 Processus de coupe

La coupe de la matière passe par trois étapes (figure I.17) :

- Compression de la matière devant l'outil : Déformation élastique puis plastification de la matière.
- Coupe de la matière : Quand la contrainte est plus grande que ce que supporte la couche du métal à enlever (la surépaisseur) la matière s'arrache sous forme de copeau (zone rouge dans la figure I.18).
- Soulagement de la matière du fait de l'enlèvement d'une quantité de matière qui s'était intercalée entre l'outil et la partie non coupée de la matière

Puis le processus se répète donnant lieu à son évidence sur la surface de la pièce avec une surface écrouie et rayée, et sur la forme du copeau qui quitte la zone de coupe sous forme de lamelles.

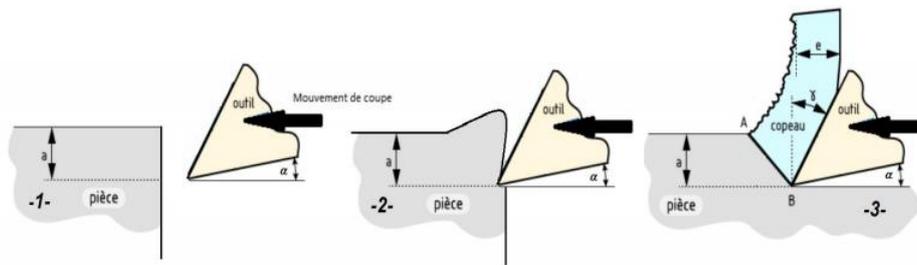


Figure I.17 : Etapes de formation du copeau

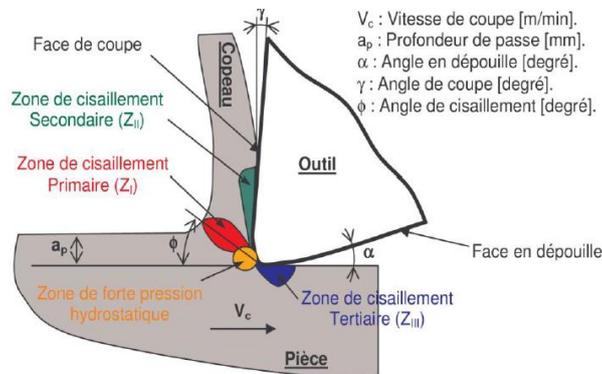


Figure I.18 : Zone de coupe

I.7 La rugosité

Sur toute pièce, quel que soit son procédé d'obtention, on observe des imperfections et des irrégularités de différentes échelles. De la plus grande échelle à la plus petite on trouve : les défauts de formes, les ondulations, et enfin à l'échelle microscopique on trouve la rugosité.

Même si l'aspect visuel de la pièce semble parfait, les défauts peuvent être mis en clair par la mesure au comparateur pour le cas de défauts de forme, ou par un agrandissement à la loupe pour les défauts microscopiques tel qu'un poli miroir figure sous la loupe sous forme d'une topographie avec des saillies et des sillons, des crêtes et des creux, des lignes et des arcs.

D'après ce qu'on vu dans ce chapitre, le système MODOP par sa nature est générateur de rugosité.

En résumé, la rugosité finale est alors la superposition des rugosités dues :

- Aux vibrations de la machine ;
- Au procédé d'usinage ;
- A l'usure de l'outil ;
- A l'inhomogénéité de la pièce ;
- Au processus de coupe.

Il s'y ajoute d'éventuels facteurs extérieurs comme les vibrations extérieures qui devront être évités par exemple en éloignant leurs sources (marteau-pilon et machines de forge) des machines-outils d'usinage.

I.7.1 Influence des paramètres de coupe sur la rugosité

Prenons l'exemple d'une opération de chariotage sur tour.

Les paramètres de coupe sont :

- Vitesse de rotation de la broche $N=1000V_c/\pi D$.
- Avance par tour.
- Profondeur de passe.

La lubrification intervient comme condition de coupe, et modifie l'état de surface en fonction du couple outil/pièce, soit en l'améliorant ou en la dégradant à l'image des expériences menées sur les régimes de coupe [8].

Une opération de chariotage est très semblable à une opération de filetage. En effet, en filetage l'outil imprime son empreinte sur la pièce à des intervalles espacés du pas de filetage. Il se crée alors des creux et des crêtes semblables aux fonds et aux sommets d'un filetage.

De ce fait on peut rapidement prédire que la composante de rugosité liée au procédé d'usinage est directement proportionnelle à la vitesse d'avance, et est inversement proportionnelle à la vitesse de rotation, à l'angle du tranchant et au rayon du bec de l'outil.

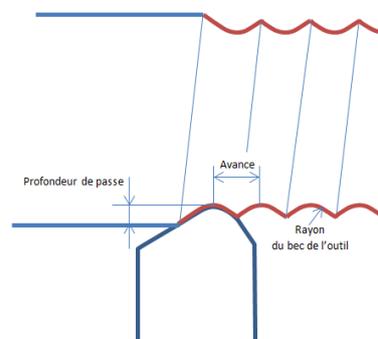


Figure I.19 : Ressemblance d'une opération de chariotage à une opération de filetage

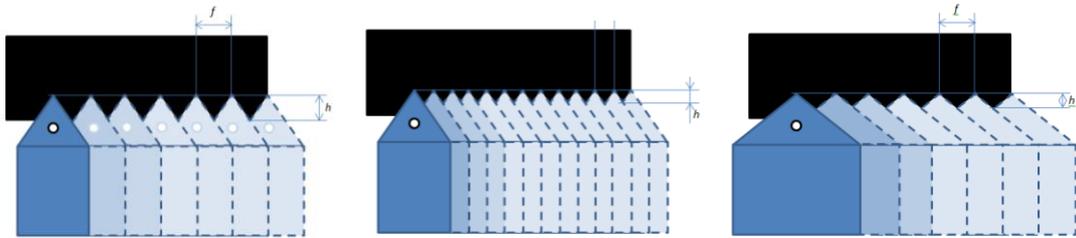


Figure I.20 : Influence de l'avance et de l'angle des arrêtes de l'outil sur la rugosité

Sur la figure I.20 on peut voir clair la différence entre l'image de gauche et du milieu (avance diminuée) que la rugosité diminue. De même entre l'image de gauche et de droite (angle de l'arrête tranchante augmenté).

Chaque opération d'usinage laisse un motif différent de la rugosité qui reflète les mouvements et les formes des outils, ceci est dit « signature du procédé d'usinage ».

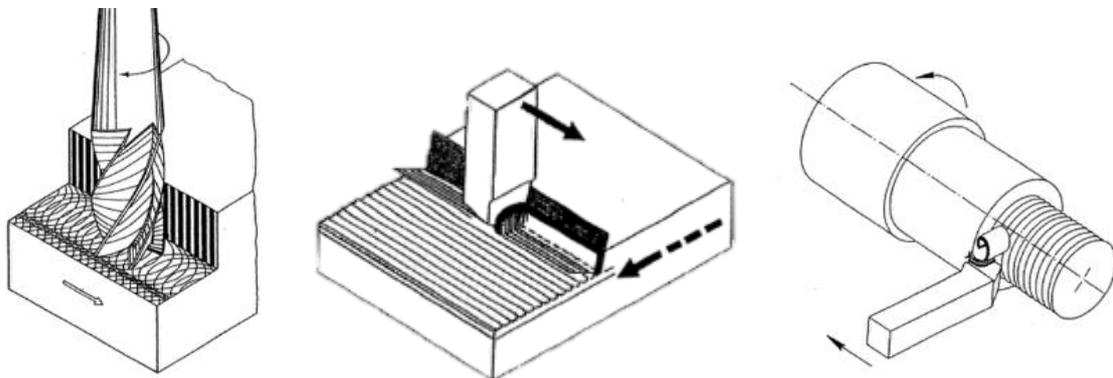


Figure I.21 : Motif de rugosité selon l'opération d'usinage (signature du procédé d'usinage)

Les autres composantes de la rugosité sont plus difficiles ou impossibles à prédire par manque des données d'entrée et du modèle de calcul. Les valeurs usuelles de la rugosité sont données à partir de l'expérience dans des tableaux de référence pour constituer un guide à l'usineur.

Tableau I.2 : Valeurs usuelles de la rugosité en fonction du procédé d'usinage

Procédé d'obtention	Rugosité moyenne Arithmétique : Ra											
	50	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.8	0.4	0.2	0.1	0.05	0.025
Moulage en sable	■	■	■	■								
Moulage en cire perdue				■	■	■	■	■				
Moulage en moule métallique				■	■	■	■	■				
Moulage sous pression				■	■	■	■	■	■			
Matricage à chaud		■	■	■	■	■	■	■				
Fraisage carbure					■	■	■	■	■	■		
Tournage ébauche	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
Tournage finition				■	■	■	■	■	■	■		
Tournage outil diamant carbure					■	■	■	■	■	■		
Perçage au foret			■	■	■	■	■	■	■	■		
Alésage à l'outil				■	■	■	■	■	■	■		
Alésage à l'alésoir				■	■	■	■	■	■	■		
Alésage outil diamant carbure					■	■	■	■	■	■		
Brochage				■	■	■	■	■	■	■		
Rectification de production					■	■	■	■	■	■		
Rectification de précision						■	■	■	■	■	■	
Rodage au rodoir							■	■	■	■	■	■
Polissage mécanique							■	■	■	■	■	■
Superfinition								■	■	■	■	■
Galetage							■	■	■	■	■	■

I.7.2 Intérêt de l'étude de la rugosité

La rugosité rentre dans plusieurs études :

La rupture par fatigue des pièces mécaniques s'amorce à l'échelle de la rugosité, puis il se crée une fissure qui grandit à chaque cycle de fonctionnement de la pièce. Quand cette fissure aurait suffisamment affaibli la pièce, la rupture brutale ait lieu.

De même que pour la corrosion, il a été constaté que plus la pièce est rugueuse plus elle montre une résistance moindre à la corrosion, cela se justifie par la rétention dans les micro-poches de la moisissure qui favorise l'oxydation et de par-là la corrosion de la surface.

En mécanique de fluide, une rugosité élevée implique une perte de charge élevée.

La conductibilité électrique et thermique est favorisée par le contact de surfaces polies que par des surfaces rugueuses.

Ces applications font venir à la tête la conviction de la nécessité de lutter contre le phénomène "désastreux" de la rugosité, or, et en dehors des causes économiques, d'autres applications font usage des effets bénéfiques de la rugosité :

Pour la protection de la corrosion, la peinture s'accroche mieux sur une surface rugueuse que sur une surface polie.

Une surface rugueuse a une tendance moindre au soudage par adhésion. Le contact ne se faisant que sur les crêtes, les vides aux creux permettent le refroidissement et constituent des micro-poches retenant du lubrifiant. C'est le même principe que pour l'opération de grattage illustrée en figure I.6.

La rugosité trouve application notamment dans le domaine de la tribologie et de la mécanique de contact.

I.7.3 Paramètres d'un profil linéaire de rugosité

Plusieurs paramètres sont adoptés pour la description et la quantification de la rugosité. Chaque application fait usage des paramètres qui lui sont les plus significatifs. Les paramètres les plus communs font référence aux profils linéaires, simples et suffisamment descriptifs. D'autres paramètres liés à des mesures 3D existent également.

Avant de pouvoir entamer les paramètres de la rugosité, il y a lieu de la séparer des autres irrégularités auxquelles elle est superposée.

Un profil général d'une surface est représenté par la figure I.22 :

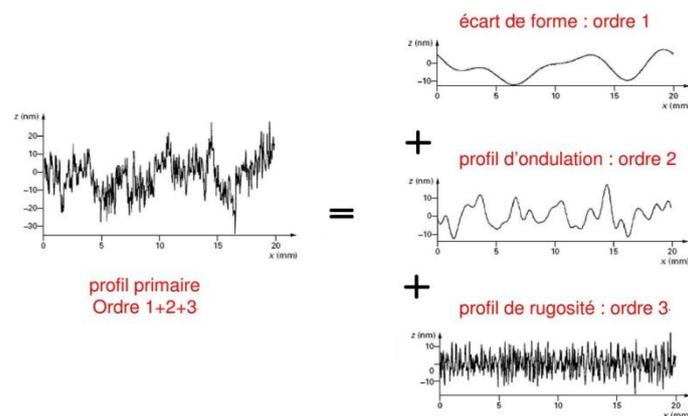


Figure I.22 : Décomposition d'un profil général d'une surface

Sur cette figure (Figure I.22) on note trois niveaux d'irrégularités :

- Un défaut de forme ;
- Un défaut d'ondulation ;
- Un défaut de rugosité.

Le critère selon lequel sont différenciés ces trois niveaux de défauts est la longueur d'onde : les défauts de forme sont d'une longueur d'onde très grande (supérieure à λ_f), les ondulations d'une longueur d'onde moyenne située entre λ_f et λ_c , et finalement la rugosité a les ondes les plus courtes comprise entre λ_c et λ_s . Les irrégularités de longueur d'onde inférieure à λ_s sont dites microrugosités.

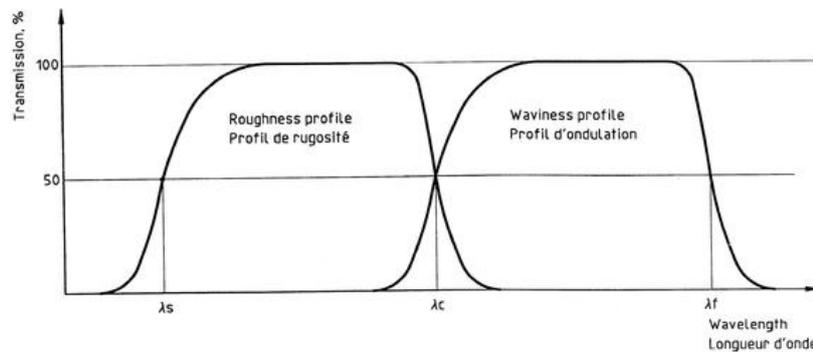


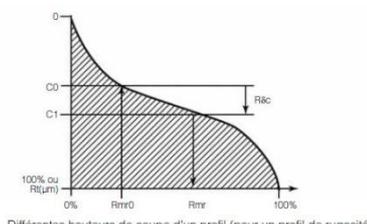
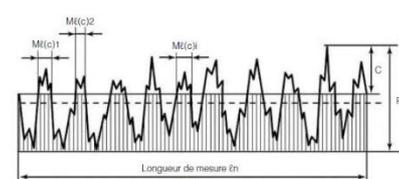
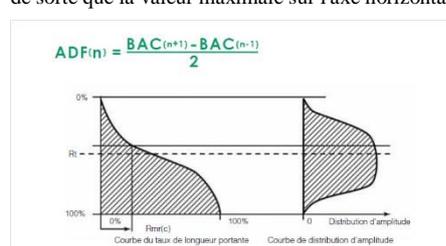
Figure I.23 : Longueurs d'ondes pour la séparation des défauts de forme, d'ondulation et de rugosité

Le choix de la longueur d'onde pour la séparation de la rugosité influence fortement les résultats de mesure. Une longueur d'onde plus grande qu'il faut fait inclure l'ondulation dans la rugosité qui sera alors très grande. Et inversement, une longueur d'onde petite, atténue la valeur mesurée de la rugosité en transmettant les valeurs coupées au profil d'ondulation. La longueur d'onde dite de coupe λ_c doit alors faire objet de convention entre les industriels. C'est ce qui fait par la norme ISO 11562 « Spécification géométrique des produits (GPS) -- Filtrage -- Partie 21: Filtres de profil linéaires: Filtres gaussiens » et ISO 4288 « Spécification géométrique des produits (GPS) -- État de surface: Méthode du profil -- Règles et procédures pour l'évaluation de l'état de surface » et autres normes. La longueur d'onde, comme l'on verra après, est une caractéristique de l'appareil de mesure qui doit y être mentionnée ainsi que sur le profil de rugosité obtenu.

Tableau I.3 : Principaux paramètres des irrégularités de surface selon JIS B 0601 :

Paramètres d'amplitude - pics et vallées	Hauteur maximale du profil (R_z, P_z, W_z)	$R_c, P_c, W_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{ti}$ <p>Hauteur moyenne des éléments du profil (pour un profil de rugosité)</p>
	Hauteur maximale des pics (R_p, P_p, W_p)	$R_p = \max(Z(x))$ <p>* Les paramètres P_p et W_p sont utilisés pour le profil primaire et/ou le profil d'onduation.</p> <p>Hauteur maximale des pics (pour un profil de rugosité)</p>
	Profondeur maximale des vallées (R_v, P_v, W_v)	$R_v = \min(Z(x)) $ <p>* Les paramètres P_v et W_v sont utilisés pour le profil primaire et/ou le profil d'onduation.</p> <p>Profondeur maximale des vallées (pour un profil de rugosité)</p>
	Hauteur totale du profil (R_t, P_t, W_t)	$R_t, P_t, W_t = \max(R_{pi}) + \max(R_{vi})$ <p>Longueur de mesure l_r</p>
Paramètres d'amplitude - moyenne	Ecart moyenne arithmétique (R_a, P_a, W_a)	$R_a, P_a, W_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z(x) dx$ <p>Hauteur moyenne arithmétique (pour un profil de rugosité)</p>
	Ecart moyen quadratique (RMS) de la surface (R_q, P_q, W_q)	$R_q, P_q, W_q = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^2(x) dx}$ <p>Valeur moyenne quadratique (pour un profil de rugosité)</p>
	Hauteur moyenne des éléments du profil (R_c, P_c, W_c)	$R_c, P_c, W_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{ti}$ <p>Hauteur moyenne des éléments du profil (pour un profil de rugosité)</p>

Paramètres d'amplitude - courbes moyennes	Asymétrie (Rsk, Psk, Wsk)	$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left[\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} Z^3(x) dx \right]$ <p>* Les paramètres Psk et Wsk sont utilisés pour le profil primaire et/ou le profil d'ondulation.</p>
	Aplatissement (Rku, Pku, Wku)	$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left[\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} Z^4(x) dx \right]$ <p>* Les paramètres Pku et Wku sont utilisés pour le profil primaire et/ou le profil d'ondulation.</p>
	Paramètres spatiaux	<p>Largeur moyenne des éléments du profil (RSm, PSm, WSm)</p> $RSm, PSm, WSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xsi$ <p>Largeur moyenne des éléments du profil (pour un profil de rugosité)</p>
Paramètres hybrides	<p>Pente moyenne du profil (RΔq, PΔq, WΔq)</p> $R\Delta q, P\Delta q, W\Delta q = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \left[\frac{dZ(x)}{dx} \right]^2 dx}$ $\frac{dZi}{dXi} = \frac{(Zi+3 - 9Zi+2 + 45Zi+1 - 45Zi-1 + 9Zi-2 - Zi-3)}{60X}$	
Paramètres fonctionnels - courbe du taux de longueur portante et distribution d'amplitude	Taux de longueur portante (Rmr (c), Pmr (c), Wmr (c))	<p>Le taux de longueur portante (Zmr (c)) indique le rapport entre la somme des longueurs portantes Mr (c) des éléments du profil et la longueur de mesure, à la hauteur de coupe c (hauteur en % ou μm).</p> $Zmr(c) = \frac{100}{l_n} \sum_{i=1}^m Ml(c)(\%)$ <p>* Zmr (c) se réfère à Rmr (c), Pmr (c) et Wmr (c).</p> <p>La hauteur de coupe c (hauteur en % ou en μm) doit être spécifiée.</p>
	Différence de hauteur de coupe du profil (Rδc, Pδc, Wδc)	<p>La différence de hauteur de coupe du profil (Zδc) indique la différence verticale entre les deux hauteurs de coupe c correspondant aux deux taux de longueur portante spécifiés.</p> <p>Deux taux de longueur portante, Zmr1 et Zmr2 (portance en %), doivent être spécifiés.</p> $Z\delta c = c (Zmr1) - c (Zmr2); Zmr1 < Zmr2$ <p>* Zδc se réfère à Rδc, Pδc et Wδc. Zmr se réfère à Rmr, Pmr et Wmr.</p> <p>Courbe du taux de longueur portante d'un profil (pour un profil de rugosité)</p>

	<p>Taux de longueur portante relatif (Rmr, Pmr, Wmr)</p>	<p>Le taux de longueur portante relatif (Zmr) correspond au taux de longueur portante obtenu par soustraction de la différence de hauteur de coupe (Zδc) établie pour un taux de longueur portante de référence audit taux de longueur portante de référence (Zmr0).</p> <p>Le taux de longueur portante de référence Zmr0 (portance en %) et la différence de hauteur de coupe ZΔc (hauteur en % ou μm) doivent être spécifiés.</p> <p style="text-align: center;">Zmr = Zmr (c1) c1 = c0 - Zδc, c0 = c (Zmr0)</p> <p style="text-align: center;"><small>* ZΔc se réfère à Rδc, Pδc et Wδc; Zmr0 se réfère à Rmr0, Pmr0 et Wmr0.</small></p>  <p style="text-align: center;"><small>Différentes hauteurs de coupe d'un profil (pour un profil de rugosité)</small></p>
	<p>Courbe du taux de longueur portante (BAC)</p>	<p>La courbe du taux de longueur portante est la représentation du taux de longueur portante à la hauteur de coupe (c). Le taux de longueur portante correspond au taux (%) résultant de la division de la somme totale des longueurs de la courbe dépassant la hauteur de coupe par la longueur totale (rn).</p>  <p>Le nombre de points de données N est le minimum entre 4096 et (hauteur maximale / étalonnage Z). La hauteur maximale est divisée par (N-1) pour obtenir la distance utilisée pour la hauteur de coupe. BAC (n) est assigné à chaque hauteur en tant que taux de longueur portante. n = N est la hauteur minimale. BAC (N) = 100,0, cependant BAC (0) n'est pas nécessairement égal à 0,0. Le taux de longueur portante est indiqué en pourcentages sur l'axe des abscisses et la hauteur de coupe en μm sur l'axe des ordonnées. (La hauteur de coupe est dans la même plage que la courbe du profil.)</p>
	<p>Courbe de distribution d'amplitude (ADF)</p>	<p>La courbe de distribution d'amplitude indique la probabilité d'obtenir la hauteur Z(x) sur la longueur d'évaluation. La dérivée de la courbe BAC est déterminée. La formule à trois points ci-contre est utilisée pour calculer la dérivée. Si n = 0 ou N, les calculs sont réalisés à l'aide de BAC (-1) = 0,0 et BAC (N+1) = 100,0. La plage verticale étant la même que pour la courbe BAC, elle est représentée sur le même graphique. Cependant, le graphique est automatiquement ajusté de sorte que la valeur maximale sur l'axe horizontal soit de 80%.</p> <p style="text-align: center;">ADF(n) = $\frac{BAC(n+1) - BAC(n-1)}{2}$</p>  <p style="text-align: center;"><small>Courbe du taux de longueur portante Courbe de distribution d'amplitude</small></p>

Dans ce tableau (Tableau I.3) la lettre P (exemple Pa, Pz...etc.) fait référence au profil, c'est-à-dire aux défauts de forme, la lettre W fait référence à l'ondulation (Waviness en Anglais), et la lettre R pour la rugosité.

Plusieurs profils peuvent avoir une même valeur d'un paramètre de rugosité. Pour cela une caractérisation ou une comparaison de surfaces est mieux représentative quand les valeurs de plusieurs paramètres de la rugosité sont précisées.

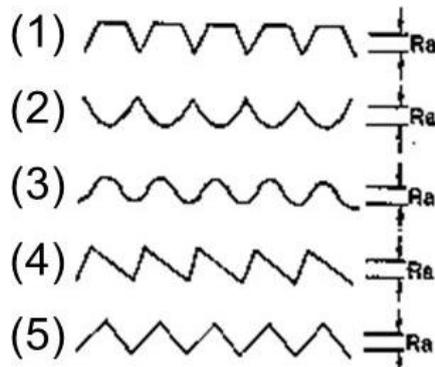


Figure I.24 : Plusieurs profils possibles avec la même valeur de Ra

Exemples :

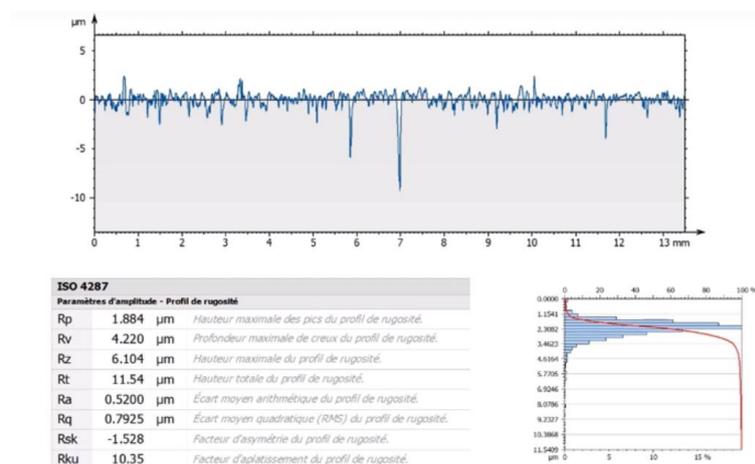


Figure I.25 : Profil de rugosité d'un cylindre d'un moteur à combustion d'une automobile

La rugosité Ra fine de 0.5µm signifie que la plupart des hauteurs des pics et des profondeurs de vallées ne sont pas importants. Il s'y ajoute le facteur d'aplatissement Rku relativement grand voulant dire que la plupart de la texture est concentrée autour de la moyenne. Tandis que la rugosité totale Rt de l'ordre de 11µm révèle la présence de saillies ou stries locales. Le facteur d'asymétrie Rsk négatif précise qu'il s'agit plutôt de stries.

Dans cette application, la surface est très polie pour diminuer le coefficient de frottement entre le cylindre et le piston, mais avec la présence de stries favorisant la lubrification.

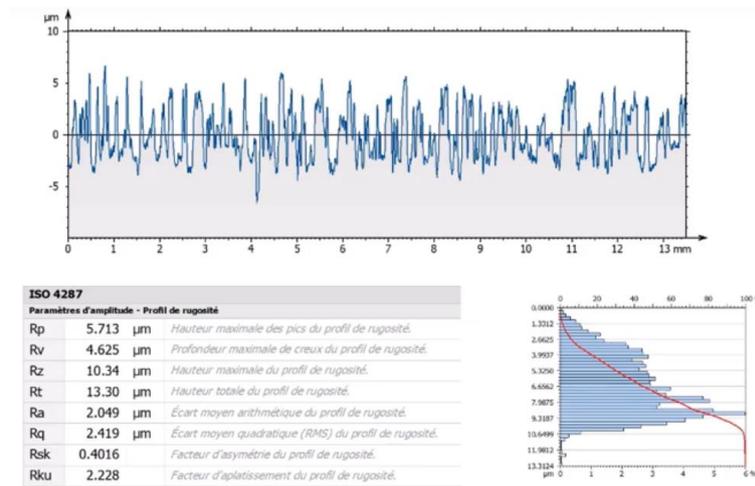


Figure I.26 : Profil de rugosité d'un acier plat

La texture est relativement bien concentrée autour de la moyenne sans points extrêmes, ce qui est vérifié par un Rsk faible et un Rku inférieur à 3.

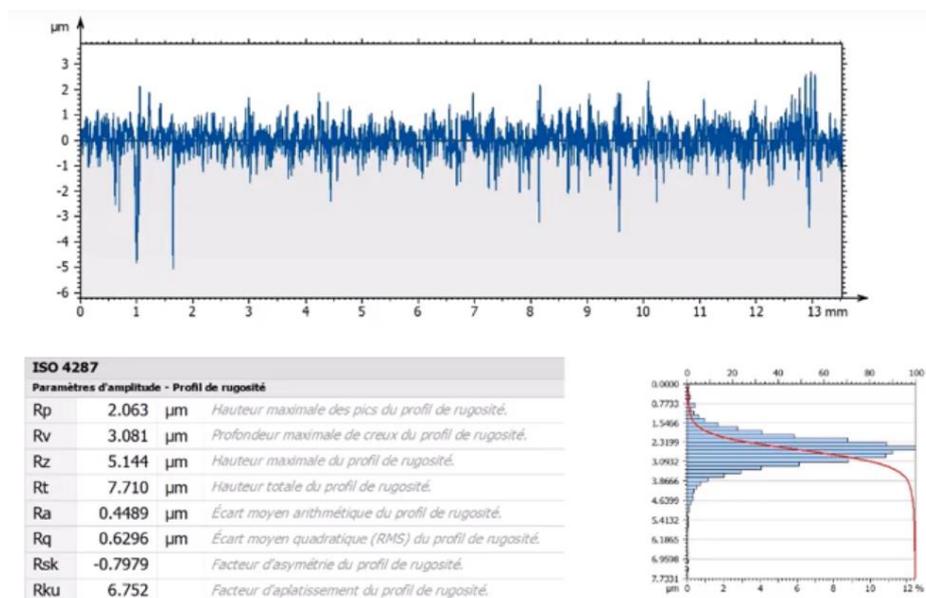


Figure I.27 : Pièce obtenue par tournage fin

Ici aussi, on note une valeur très petite de la rugosité moyenne Ra, d'est- à-dire que les amplitudes des irrégularités ne sont grossièrement pas grands. La valeur légèrement négative de Rsk met en évidence la présence de quelques stries en dessous de la surface. La valeur de Rku relativement grande fait état d'une distribution assez étroite.

I.7.4 Représentation graphique de la rugosité sur les dessins techniques

Sur les dessins et les schémas techniques, l'état de surface des pièces est représenté à l'aide de symboles tel que définie par des normes parmi lesquelles la norme ISO 1302:2002 qui procède comme suit :

Le symbole de base de la représentation graphique de l'état de la surface est composé de deux branches de longueur inégale écartées à un angle de 60°.

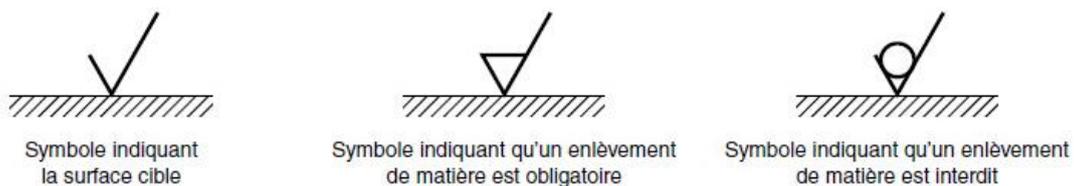


Figure I.28 : Symbole de base de l'état de surface

Ce symbole n'est pas utilisé seul, mais toujours complété comme suit :

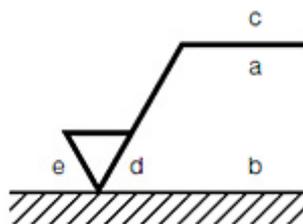
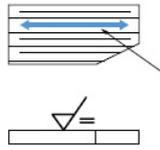
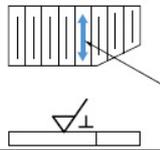
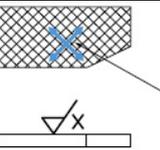
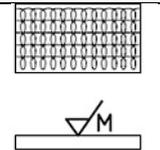
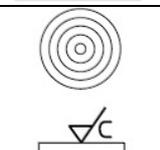
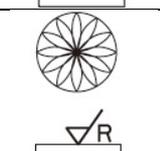


Figure 29 : Symbole général de l'état de surface

Dans lequel :

- a : Bande de transmission ou longueur de base et symbole et valeur du paramètre d'état de surface ;
- b : Indication du deuxième paramètre. Si encore d'autres paramètres sont à préciser, ils prendront place verticalement sous b, et la ligne longue sera allongée en conséquence ;
- c : Procédé de fabrication : Tournage, fraisage, rectification...etc. ;
- d : Stries et direction : Voir le tableau suivant (Tableau I.4) ;
- e : Surépaisseur d'usinage.

Tableau I.4 : Symboles des stries et leurs directions

Symbole	Signification	Schéma explicatif
	Stries parallèles à la surface sur laquelle le symbole est inscrit. Exemple : Surface rabotée.	
	Stries perpendiculaires à la surface sur laquelle le symbole est inscrit, Exemple : surface rabotée ou meulée de façon cylindrique	
	Stries croisées dans deux directions obliques par rapport à la surface sur laquelle le symbole est inscrit. Exemple : Honing, Surface aiguisée.	
	Stries multidirectionnelles. Exemple : Surface rodée, surface superfinie.	
	Stries formant approximativement des cercles concentriques par rapport au centre de la surface sur laquelle le symbole est inscrit. Exemple : Surface fraisée en face.	
	Stries approximativement radiales par rapport au centre de la surface sur laquelle le symbole est inscrit.	

I.7.5 Mesure de la rugosité

Dans le passé, la rugosité a été estimée par un expert qui la juge par l'œil ou par palpation à l'ongle en comparaison avec des surfaces de références numérotées, il s'agit d'une comparaison Viso-tactile.

Les méthodes sont maintenant très évoluées. On peut d'abord les classer par le principe de mesure.

- Par contact : Une pointe en diamant parcourt à vitesse constante la surface le long de la direction voulue du profil de rugosité. Les oscillations verticales dus aux irrégularités créent par un transducteur (à bobine, capacitif, piézoélectrique) des signaux électriques qui seront amplifiés, filtrés et mesurés pour en extraire le profil de la surface.

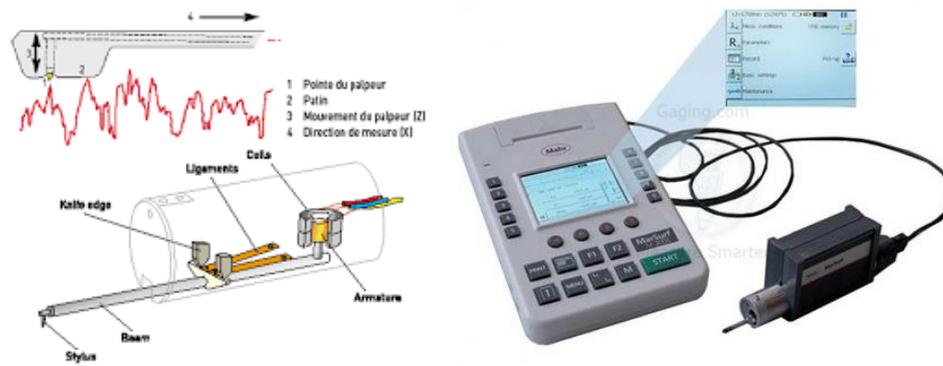


Figure I.30 - Principe de mesure de la rugosité par contact

Dans la figure suivante (figure I.31) on peut voir comment s'affecte le profil obtenu par mesure à contact par le rayon de la pointe de diamant. Les éléments de la rugosité peuvent aussi être déformés (microusinage ou microdéformation) par la pointe si une pression excessif lui est appliquée.

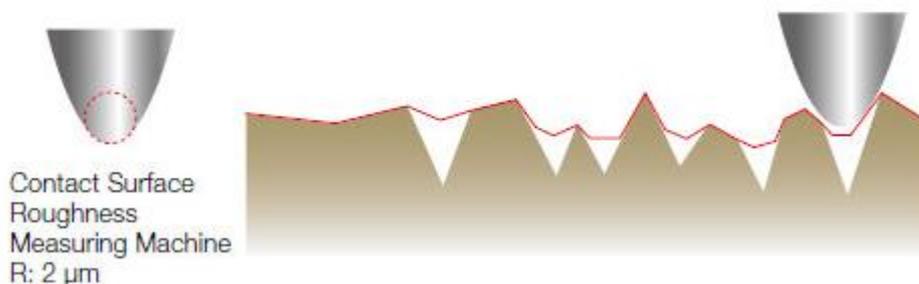


Figure I.31 - Dépendance du profil de rugosité tracé par le rayon de la pointe en diamant

- Sans contact :

- Méthode optique :

Utilisant des méthodes basées sur la réflexion de la lumière sur une surface. Cette réflexion est fortement dépendante de l'état de surface.

- Méthode ultrasonique :

Les ondes cette fois-ci sont des ondes sonores inaudibles. Leur réflexion sur la surface s'affecte par la rugosité. Une mesure des ondes reflétées donne le profil de la surface.

- Méthode utilisant la pression d'air :

De l'air sous pression sort de l'orifice de l'instrument de mesure. En fonction de la rugosité, la pression interne change par ce que les éléments de la rugosité constituent des obstructions plus ou moins restreintes. La mesure la variation de la pression de l'air constitue une mesure indirecte de la rugosité de la surface.

Les méthodes sans contact ne sont encore pas normalisées, c'est pourquoi elles ne peuvent pas remplacer la méthode avec contact. Elles ne peuvent être utilisées qu'informellement ou dans le cadre des recherche et développement.

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appris que le but n'est pas toujours d'avoir la rugosité minimum, mais une rugosité optimum alliant économie et qualité.

Comme référence, nous avons les tables donnant la rugosité attendue pour chacun des procédés fréquents d'usinage, mais ces tables donnent une étendue et non pas une valeur précise. En effet la valeur précise dépend des paramètres que nous avons vu dans ce chapitre (rigidité et état de la machine, géométrie de l'outil, effort de coupe, lubrification...) les effets de ces paramètres ne sont pas tous quantifiables.

Alors on doit tracer ses propres tables référence et les actualiser en fonction de l'évolution de la machine. D'où la nécessité de conduire des essais et de tirer profit des résultats

Le chapitre suivant est une aide au technicien ou au scientifique pour l'élaboration d'une expérience aboutissant à un maximum d'efficacité et d'économie dans la prospection des résultats fiables et pertinentes.

Chapitre II

Les plans d'expériences

II.1 Introduction

L'expérimentation consiste à mettre en œuvre des moyens physiques afin de vérifier, confirmer et ajuster les résultats obtenus par la théorie, ou construire un modèle ou en conclure des formules et règles théoriques à partir des résultats de l'expérimentation. Ou simplement de faciliter la résolution d'un problème qui serait très difficile à résoudre mathématiquement.

Il s'agit d'un ensemble de conceptions de recherche qui utilise des traitements et des tests sous contrôle pour comprendre les processus causaux. En général, une ou plusieurs variables sont manipulées pour déterminer leur effet sur une variable subordonnée.

Une expérience, en fonction des considérations prises en considération, peut être simple et facile, mais peut aussi être longue et compliquée mettant en jeu du temps et des coûts qui peuvent être considérables d'où la nécessité de conduire les expériences scientifiques méthodiquement et d'une manière bien étudiée. On doit alors construire un plan d'expérience et partir des résultats duquel on construit un modèle qui sert pour référence pour toute étude similaire.

Dans le but fixé pour ce mémoire, nous nous intéressons à deux méthodes des plans d'expériences :

- Les plans d'expériences factoriels (complets et fractionnaires) ;
- Les plans d'expérience de Taguchi.

II.2 Généralités et notions [9]

Les plans d'expériences ont pour but d'organiser les essais à faire afin de mettre en évidence et à quantifier l'influence des paramètres d'entrée pris en compte sur la sortie du système considéré. Son principe consiste à faire varier simultanément et d'une façon étudiée les niveaux d'un ou de plusieurs paramètres d'entrée pour en construire avec la réponse un modèle la résolution duquel permet une optimisation du processus étudié.

On fait appel aux plans d'expériences à chaque fois qu'on a un problème de type :

$$Y = f(X_i) \dots \text{(II.1)}$$

Le schéma général d'un processus auquel s'applique un tel type de problème est représenté par la figure II.1.

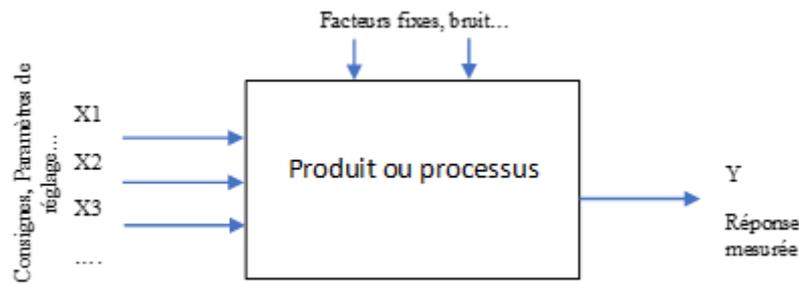


Figure II.1 : Schéma général d'un processus

La façon étudiée de conduite des essais et de variation des paramètres permet de dégager le maximum d'informations et déceler toutes les dépendances entre les paramètres d'entrée avec le nombre minimum d'essais, ce qui représente des économies considérables en temps et en coût.

a) Facteur

Grandeur physique quantifiable, continue ou discrète, consignée ou mesurée en entrée du système pour laquelle un effet est attendu en sortie du système (notés X1, X2, X3 dans la figure II.1).

b) Réponse

Grandeur physique quantifiable, continue ou discrète, mesurée en sortie du système constituant l'effet des facteurs sur le produit ou le but du système comme l'état de surface d'une pièce usinée, l'état de santé d'un être vivant... (notée Y dans la figure II.1).

c) Domaine d'étude d'un facteur

Ensemble des valeurs que peut prendre un facteur entre une borne inférieure dite niveau bas et une borne supérieure dite niveau haut. Ces bornes sont choisies à l'intérieur du domaine de variation réelle du facteur qui peut prendre plusieurs niveaux entre son niveau bas et son niveau haut.

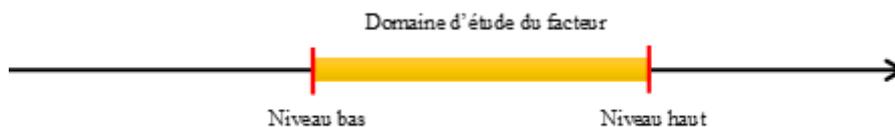


Figure II.2 : Domaine d'étude d'un facteur

d) Espace expérimental

L'espace où chaque facteur est représenté par un axe. Les niveaux des facteurs définissent alors un point expérimental.

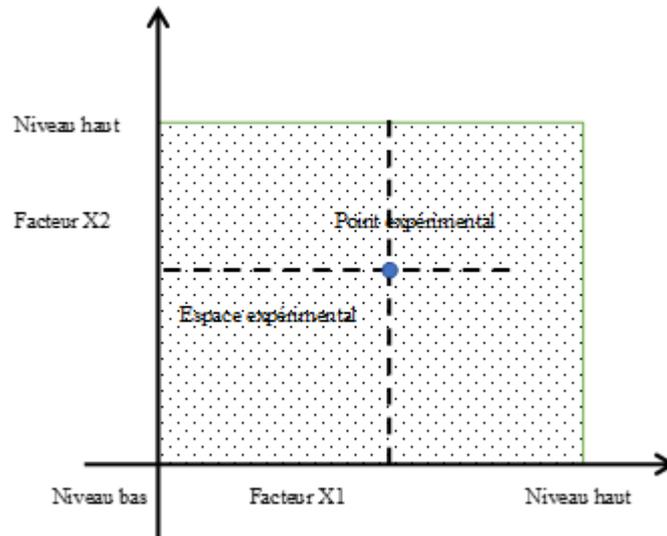


Figure II.3 : Espace expérimental

e) Coordonnées réduites

L'étude à l'aide des plans d'expérience fait appel à un changement de variable afin de simplifier la résolution du problème. En effet, deux modifications majeures sont effectuées :

- On change l'unité de mesure ;
- On déplace l'origine de mesure.

Il en résulte que le niveau bas est substitué par la coordonnée réduite -1 et le niveau haut par la coordonnée réduite +1.

Les variables d'origines « A » et les variables réduites X sont rassemblées par la relation :

$$X = \frac{A - A_{(-1)}}{A_{(+1)} - A_{(-1)}} \dots \text{(II.2)}$$

Où A la valeur du facteur au niveau considéré.

$A_{(-1)}$ et $A_{(+1)}$ respectivement la valeur du facteur au niveau -1 et au niveau +1.

L'intérêt des variables réduites est de pouvoir présenter les plans d'expérience de la même manière quelque soient les domaines d'études retenus et les grandeurs des facteurs et leurs unités.

f) Matrice d'expériences

La matrice d'expériences est une table à deux dimensions ayant pour première colonne le numéro d'essai suivie d'une colonne pour chaque facteur puis de la colonne de réponse. Les lignes représentent les essais.

Sur une matrice d'expérience les facteurs sont notés sous leur forme réduite en niveau.

Le nombre total d'expériences dicté par les plans d'expériences est :

$$\text{Nombre d'expériences} = N^P \dots (\text{II.3})$$

Où N est le nombre des niveaux des facteurs ;

P le nombre des facteurs.

Ainsi, un plan d'expériences de trois facteurs à deux niveaux est composé de $2^3=8$ expériences (voir Tableau II.1), et un plan d'expériences de trois facteurs à trois niveaux de $3^3=27$ expériences.

On verra par la suite que ce nombre peut être réduit grâce au plans factoriels fractionnaires, et à la méthode de Taguchi.

Tableau II.1 : Exemple d'un plan d'expérience 2^3

N° Essai	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Réponse
1	-1	-1	-1	Y ₁
2	+1	-1	-1	Y ₂
3	-1	+1	-1	Y ₃
4	+1	+1	-1	Y ₄
5	-1	-1	+1	Y ₅
6	+1	-1	+1	Y ₆
7	-1	+1	+1	Y ₇
8	+1	+1	+1	Y ₈

g) Construction d'un plan d'expériences

La construction d'un plan d'expériences passe par les étapes suivantes :

- Définition des objectifs ;
- Définition des facteurs étudiés et leurs domaines ;
- Construction de la matrice d'expérience ;
- Expérimentation ;
- Interprétation des résultats et établissement du modèle ;
- Essai supplémentaire de confirmation.

II.3 Plans d'expériences factoriels [10]

Apparus vers l'année 1945, les plans d'expériences factoriels procèdent par des calculs matriciels pour aboutir à un modèle mathématique descriptif du problème étudié. Ce modèle mathématique prédit la réponse en fonction des valeurs des facteurs pris en compte.

On distingue : les plans d'expériences factoriels complets, qui effectuent toutes les expériences possibles pour tous les niveaux considérés des facteurs afin d'établir le modèle mathématique ; et les plans d'expérience factoriels fractionnaires qui réduisent considérablement le nombre d'expériences en choisissant d'une façon très soignée quelques expériences pour arriver aux mêmes résultats.

Le modèle mathématique recherché par les plans d'expériences factoriels est de la forme :

$$y = a_0 + \sum a_i X_i + \sum a_{ij} X_i X_j + \dots + \sum a_{ii} X_i^2 + a_{ij\dots z} X_i X_j \dots X_z + e \dots \text{ (II.3)}$$

Où y est la réponse ou la grandeur d'intérêt ;

X_i représente le niveau attribué au facteur i .

$a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} \dots$ sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ces coefficients sont à calculer à partir des résultats de l'expérimentation.

e est un complément qui prend en compte la nature aléatoire de la réponse et le manque d'ajustement (écart).

a) Calcul des coefficients du modèle a priori

a_0 étant la réponse moyenne du modèle, elle est obtenue par la formule :

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Y_j \dots \text{(II.4)}$$

Où N le nombre d'essais,

j le numéro d'essai, et

Y_j la valeur de la réponse de cet essai.

Les autres coefficients des facteurs par la formule :

$$a_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ij} Y_j \dots \text{(II.5)}$$

Où N le nombre d'essais ;

j le numéro d'essai ;

X_{ij} le niveau du facteur X_i lors de l'essai numéro j ;

Y_j la réponse lors de l'essai numéro j.

Les coefficients avec plus d'un indice sont les coefficients des interactions entre les facteurs.

Ils sont donnés par la formule :

$$a_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_i X_j Y_k \dots \text{(II.6)}$$

Les interactions d'ordre plus de deux sont souvent négligés afin de faciliter les calculs, mais leur négligence peut conduire en des erreurs.

b) Plans d'expériences factoriels fractionnaires

Dans un plan factoriel complet les informations données par chaque essai n'ont pas tous la même utilité pratique. Certains essais peuvent satisfaire aux autres. Taguchi a choisi les plus significatifs d'entre eux pour permettre de construire des plans plus petits, plus économiques qui donnent des résultats pertinents. Ce sont appelés « Les plans d'expériences factoriels fractionnaires ». Un plan factoriel complet de $2^7 = 128$ essais peut ainsi être réduit en un plan factoriel fractionnaire de 8 essais qui aboutira, sous des conditions, au même résultat.

II.4 Plans d'expériences de Taguchi [11]

Gen'ichi Taguchi (1924-2012), un ingénieur et statisticien japonais a développé vers l'année 1950 une méthode -qui porte son nom- utilisant les statistiques pour construire un modèle facile à utiliser même par les techniciens. Il associe à chaque type de problème en fonction du nombre des facteurs mis en jeu une table et ses graphiques associés permettant l'aboutissement facile à la résolution de problèmes de l'amélioration de la qualité.

Appliquée dans l'industrie, cette méthode se concentre avant tout à minimiser les variations autour de la valeur de consigne. L'objectif est d'obtenir des produits, processus et systèmes aussi robustes et insensibles aux perturbations externes que possible.

Dans la méthode de Taguchi, les coordonnées réduites sont les niveaux 1 et 2 au lieu de -1 et +1 des plans factoriels.

La formule recherchée par la méthode de Taguchi est du type :

$$Y=M+A+B+C+\dots+AB+AC+BC+\dots \dots \text{ (II.7)}$$

Dans laquelle : M est la moyenne des réponses ;

A, B, C... les effets des facteurs 1, 2, 3... ;

AB, AC, BC...etc. les effets des interactions des facteurs.

Pour chaque facteur, l'effet moyen est calculé pour chaque niveau de ce facteur. Puis les réponses pour chaque facteur sont représentées sur un graphique comme celui de la figure II.4.

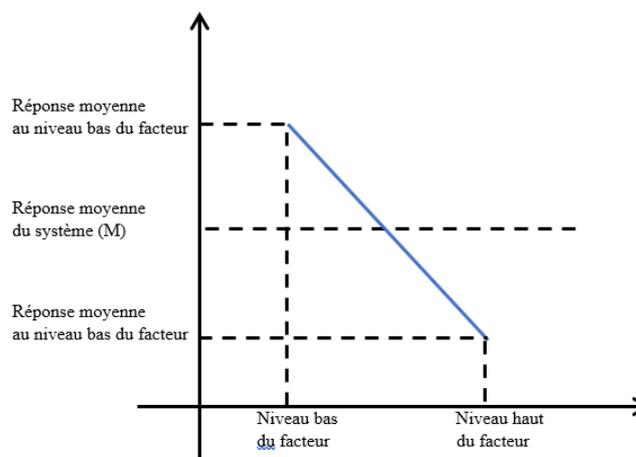


Figure II.4 : Graphe des effets d'un facteur

Pour les interactions, une table est tracée sur laquelle sont portées les moyennes des réponses du système pour chaque combinaison des niveaux des facteurs.

Après calcul des effets des interactions, elles seront tracées de la même façon que pour les facteurs (figure II.).

Interprétation des résultats

Pour la résolution du problème d'optimisation, soit la maximisation ou la minimisation de la réponse, on prend les valeurs minimisant ou maximisant la réponse dans les graphiques des facteurs.

Les éventuelles interactions entre les facteurs sont décelées sur les graphiques des interactions :

- Des graphiques croisés signifient une interaction et une indépendance forte entre les facteurs ;
- Deux graphiques parallèles signifient l'absence d'interaction, les facteurs sont alors dits « indépendants ».

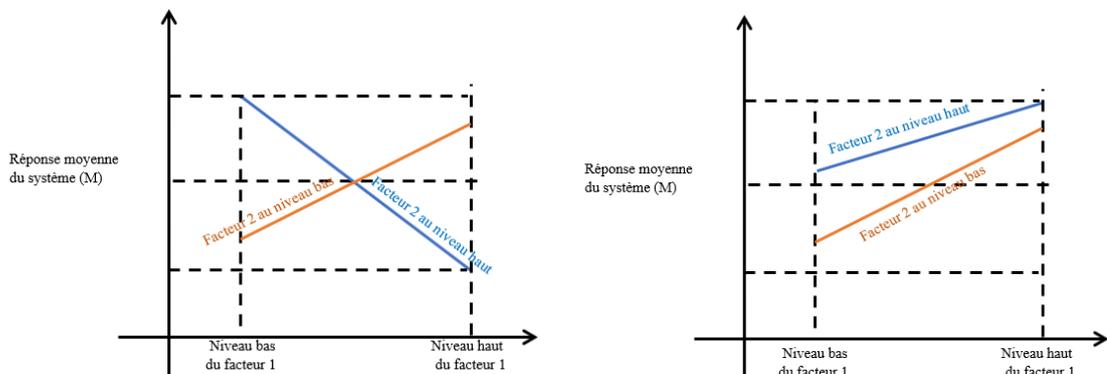


Figure II.5 : Graphe des interactions
Interaction forte (à gauche), et interaction faible (à droite).

II.5 Conclusion

Les plans d'expériences appliqués dans plusieurs domaines permettent la conduite scientifique des expériences et l'unification du travail expérimental ont prouvés leur utilité pratique par la résolution d'une multitude de problèmes divers. L'industrie est l'un des domaines qui ont profité le plus de ces méthodes pour l'optimisation des processus de production et l'amélioration des produits manufacturés.

Dans le chapitre suivant on se propose d'appliquer les deux méthodes des plans d'expériences ainsi présentées à savoir les plans d'expériences factoriels et les plans d'expériences de

Taguchi, afin d'estimer l'effet des paramètres du régime du procédé d'usinage sur l'état de surface produite.

L'application des deux méthodes permettra de porter un jugement sur leur emploi pour une opération d'usinage d'une part, et d'autre part de choisir la méthode la plus appropriée selon le problème posé.

Chapitre III

Expérimentation

III.1 Introduction

Après avoir passé en revue la littérature et la théorie discutant de l'état de surface et son importance dans le premier chapitre, et la méthodologie de conduite des expérimentations pour l'examen du déroulement d'une opération de fabrication dans le deuxième chapitre, dans le présent chapitre, on effectue des essais sur un couple (outil/matière) afin de découvrir les relations entre les paramètres d'entrée (régime de coupe) et le paramètre de sortie matérialisé par la rugosité de surface réalisée (R_a). Nous nous sommes proposés d'utiliser les deux méthodes de plans d'expériences, en l'occurrence, les plans factoriels complets et les plans de criblage (ou plans de Taguchi).

III.2 But et structuration de l'expérimentation

Le but ciblé à travers ces essais est de comparer les deux méthodes sur le plan : facilité, exactitude, et pertinence des résultats afin d'arriver au meilleur réglage de la machine-outil permettant un état de surface satisfaisant. L'opération fixée est le chariotage d'un barreau en acier XC38, trois paramètres d'entrée ont été pris en considération (figure III.1) :

- La vitesse de rotation " N " ;
- La vitesse d'avance " f " ;
- La profondeur de passe " a ".

Les autres facteurs sont considérés constants, notamment :

- Usinage sans lubrification ;
- Usage du même outil de coupe ;
- Usinage sur la même machine-outil.

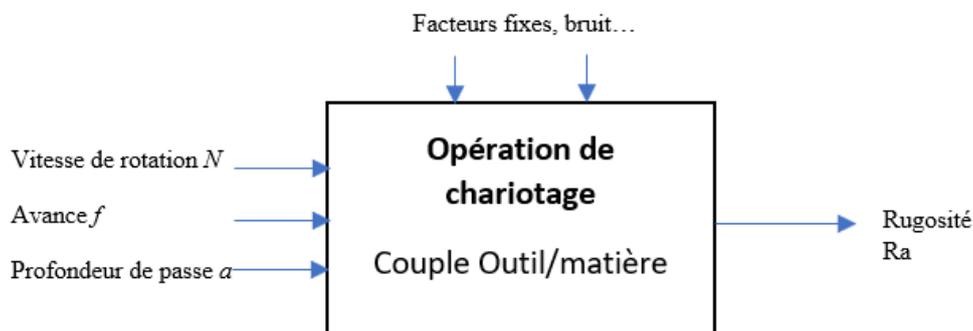


Figure III.1 : Schéma fonctionnel de l'opération

III.3 Préparation de la pièce

L'opération est réalisée dans les ateliers du département de génie mécanique de l'université Badji Mokhtar – Annaba.

a) **Machine-outil** : Tour universel modèle 1A616 de puissance 5.5 KW.

b) **Outil** : Outil à charioter et à dresser avec plaquette en carbure métallique de nuance P20.



Figure III.2 : Outil de coupe utilisé

c) **Pièce** :

Nuance : Acier XC38.

Composition chimique en % : 0.38 ± 0.03 C, ≤ 0.035 S, 0.50-0.80 Mn, ≤ 0.035 P, 0.40 maxi Si.

Caractéristiques mécaniques : Rm 500-550 N/mm², Re 245-300 N/mm², A 18-19 %.

Dimensions : Ø35, L=320 mm.

Montage : Mixte, mandrin et contre-pointe.

Vérification de la rigidité du montage :

$$R = \frac{L^3}{D} \begin{cases} \text{si } R < 2 \text{ le montage est dit rigide} \\ \text{si } 2 < R < 3 \text{ le montage est dit semi-rigide} \\ \text{si } R > 3 \text{ le montage est non rigide} \end{cases} \dots \text{(III.1) [12]}$$

$$R = \frac{320^3}{35} = 2.16 \dots \text{(III.2)}$$

A partir de III.1 et III.2 le montage est jugé semi-rigide.

Le brut pour l'expérimentation est préparé par une opération de chariotage avec le régime suivant :

$N=710$ tr/min, $f=0.054$ mm/tr, $a=0.1$ mm. La rugosité R_a moyenne mesurée est de 1.935 μm .



Figure III.3 : Pièce-éprouvette

d) Régimes de coupe :

Le régime de coupe est choisi d'après le guide Chevalier [13] :

Vitesse de coupe $V_c = 100$ à 155 m/min où $N=900$ à 210 tr/min respectivement.

Avance $f=0.054$ à 0.18 mm/tr.

Profondeur de passe $a= 0.5$ à 1 mm.



Figure III.4 : Usinage de l'éprouvette

III.4 Mesure du paramètre de sortie

Le paramètre de sortie, en l'occurrence la rugosité Ra, est mesuré avec l'appareil Mitutoyo SJ-210 ayant les caractéristiques suivantes :

$\lambda_c=0.8\text{mm}$, $\lambda_s=2.5\mu\text{m}$, $N=5$, Vitesse de mesure 0.5mm/s.



Figure III.5 : Rugosimètre Mitutoyo SJ-210

L'appareil est monté sur une colonne et la pièce est posée sur un V (figure III.6).



Figure III.6 : Mesure de la rugosité

III.5 Calcul par la méthode des plans factoriels

III.5.1 Calcul par la méthode des plans factoriels complets

La réalisation des essais est représentée sur le schéma de la figure III.1.

Les plans d'expériences seront construits en utilisant les trois facteurs à deux niveaux. La matrice d'expérience à suivre correspond à 2^3 essais, et est consignée dans le tableau III.1

Tableau III.1 : Tableau d'expériences

N°Essai	Niveaux des facteurs (Paramètres de réglage)			Réponses mesurées
	V _c (m/min)	f (mm/tour)	P (mm)	
1	-	-	-	Y ₁
2	+	-	-	Y ₂
3	-	+	-	Y ₃
4	+	+	-	Y ₄
5	-	-	+	Y ₅
6	+	-	+	Y ₆
7	-	+	+	Y ₇
8	+	+	+	Y ₈

Tableau III.2 : Niveaux des facteurs

Facteurs	N	f	a
Niveau -	900	0.045	0.5
Niveau +	1400	0.18	1

Tableau III.3 : Paramètres de réglage et résultats des mesures de la rugosité

N° Palier	N (tr/min)	f (mm/tr)	a (mm)	Ra (μm)	Ra _{Moy} (μm)	Rq (μm)	Rq _{Moy} (μm)	Rz (μm)	Rz _{Moy} (μm)
1	900	0.054	0.5	2.063	2.341	2.495	2.869	10.843	12.325
				2.728		3.372		14.343	
				2.231		2.741		11.789	
2	1400	0.054	0.5	2.004	2.157	2.449	2.614	11.116	11.785
				2.325		2.769		12.173	
				2.141		2.624		12.066	
3	900	0.18	0.5	3.01	2.549	3.659	3.162	14.066	12.573
				2.546		3.292		13.75	
				2.091		2.535		9.904	
4	1400	0.18	0.5	2.084	2.226	2.486	2.665	10.949	10.930
				2.522		3.043		12.007	
				2.072		2.466		9.835	
5	900	0.054	1	1.848	2.045	2.247	2.483	7.821	9.440
				2.212		2.685		10.425	
				2.075		2.516		10.073	
6	1400	0.054	1	1.96	1.936	2.438	2.364	10.695	10.372
				1.753		2.17		10.482	
				2.095		2.483		9.938	
7	900	0.18	1	1.34	1.335	2.281	1.855	6.888	6.513
				1.259		1.285		6.335	
				1.405		1.999		6.317	
8	1400	0.18	1	1.325	1.368	1.642	1.674	7.138	6.992
				1.401		1.729		7.301	
				1.378		1.652		6.538	

L'équation du modèle complet est formulée à partir de l'expression suivante :

$$\hat{Y} = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3 + a_{123}X_1X_2X_3 \dots \text{(III.3)}$$

Avec : a_1, a_2, a_3 respectivement les coefficients des facteurs X_1, X_2, X_3 ,

et $a_{12}, a_{13}, a_{23}, a_{123}$ respectivement les coefficients des interactions $X_1X_2, X_1X_3, X_2X_3, X_1X_2X_3$.

Le calcul des coefficients des facteurs est estimé à partir du tableau III.3.

$$a_i = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 A_j \cdot Y_j \dots \text{(III.4)}$$

Où $i = 1,2,3,12,13,23,123$ et j est le numéro d'essai variant de 1 à 8. Et :

$$Y_c = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 Y_j \dots \text{(III.5)}$$

Tableau III.4 : Matrice des effets

N° d'essai	Paramètres d'entrée			Interactions				M	Réponse Y
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC		
1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	2.341
2	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	2.157
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	2.549
4	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	2.226
5	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	2.045
6	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1.936
7	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1.335
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1.368
Résultats									
Facteur	a_1	a_2	a_3	a_{12}	a_{13}	a_{23}	a_{123}	Y_c	
Valeur	-0.073	-0.125	-0.324	0.000	0.054	-0.194	0.035	1.995	

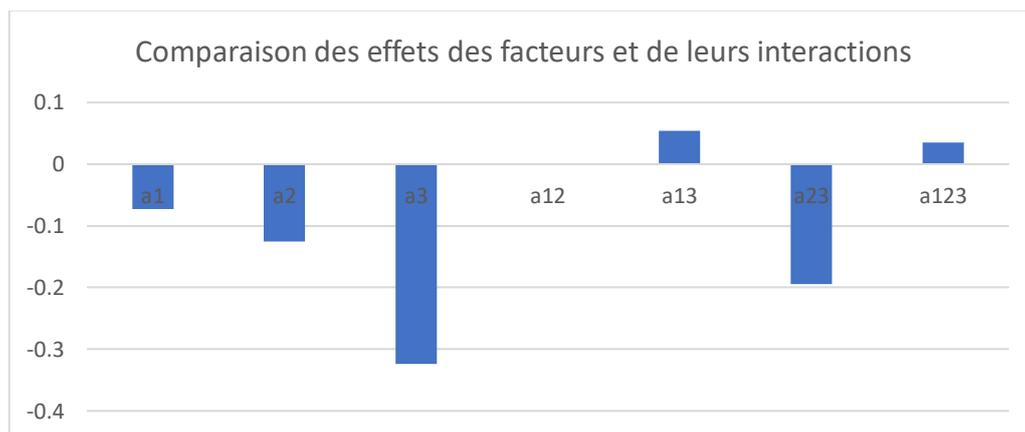


Figure III.7 : Diagramme à barres des effets

Interprétation des résultats :

- L'interaction AB (entre la vitesse de rotation et l'avance) est quasiment nulle.
- L'interaction d'ordre trois est très faible (les interactions de cet ordre sont souvent négligées).
- L'effet le plus grand est celui du facteur a_3 qui est la profondeur de passe.

D'où l'expression de la réponse prédite :

$$\hat{Y} = 1.995 - 0.073X_1 - 0.125X_2 - 0.324X_3 + 0.054X_1X_3 - 0.194X_2X_3 + 0.035X_1X_2X_3 \dots \text{(III.6)}$$

Ce modèle donne une réponse pour toute combinaison des paramètres d'entrée.

Si on a les paramètres x_1 x_2 x_3 leur remplacement dans la formule (III.3) se fait après avoir calculé leurs niveaux comme suit :

$$\hat{x}_i = \frac{x_i - X_{i\text{Niv}-1}}{X_{i\text{Niv}+1} - X_{i\text{Niv}-1}} \dots \text{(III.7)}$$

Où $i=1, 2$ ou 3 .

$$\hat{Y} = 1.995 - 0.073\hat{x}_1 - 0.125\hat{x}_2 - 0.324\hat{x}_3 + 0.054\hat{x}_1\hat{x}_3 - 0.194\hat{x}_2\hat{x}_3 + 0.035\hat{x}_1\hat{x}_2\hat{x}_3 \dots \text{(III.8)}$$

La rugosité minimale correspond au minimum de la fonction \hat{Y} dans la formule (III.8).

Le niveau le plus bas étant déjà proposé par l'essai numéro 7, soit niveau bas pour le facteur 1, et niveau haut pour les facteurs 2 et 3. Le niveau de la rugosité sera alors de 1.335 μm .

III.5.2 Calcul par la méthode des plans factoriels fractionnaires

Pour le calcul par la méthode des plans factoriels fractionnaires, deux variantes sont possibles : on peut choisir les lignes (numéro d'essai) 2,3,5,8 ou 1,4,6,7.

a) Première variante

Tableau III.5 : Matrice des effets

N° d'essai	Paramètres d'entrée			Réponse	
	A	B	C	M	Y
1	1	-1	-1	1	2.16
2	-1	1	-1	1	2.55
3	-1	-1	1	1	2.05
4	1	1	1	1	1.37
Résultats					
Facteur	a_1	a_2	a_3	Y_c	
Valeur	-0.267	-0.071	-0.323	2.030	

Pour lequel le modèle est :

$$\hat{Y} = 2.030 - 0.267X_1 - 0.071X_2 - 0.323X_3 \dots \text{(III.9)}$$

Contrairement à ce que propose le plan factoriel complet, ce plan factoriel fractionnaire propose de mettre les trois facteurs au niveau haut pour **prédire** à partir de l'expression III.9 une rugosité minimale, soit 1.37µm.

b) Deuxième variante

Tableau III.6 : Matrice des effets

	Paramètres d'entrée				Réponse
N° d'essai	A	B	C	M	Y
1	-1	-1	-1	1	2.34
2	1	1	-1	1	2.23
3	1	-1	1	1	1.94
4	-1	1	1	1	1.34
Résultats					
Facteur	a ₁	a ₂	a ₃	Y _c	
Valeur	0.122	-0.179	-0.324	1.960	

$$\hat{Y} = 1.960 + 0.122X_1 - 0.179X_2 - 0.324X_3 \dots \text{(III.10)}$$

La minimisation de la valeur de la réponse (la rugosité Ra) s'obtient selon cette deuxième variante par la mise au niveau bas du premier facteur, et au niveau haut les deux autres. La valeur de la rugosité prédite par l'expression III.10 est de 1.34 µm.

Ce plan donne le même résultat que le plan factoriel complet.

III.6 Estimation par la méthode des plans de criblage de Taguchi

La table de Taguchi correspondant à ce modèle est la table L4 (3²) correspondant à 8 essais :

Tableau III.7 : Table d'expériences de Taguchi

N° d'essai	N° Palier	N (tr/min)	f (mm/tr)	a (mm)	Ra	Ra Moy
1	1	900	0.054	0.5	2.063	2.341
					2.728	
					2.231	
2	4	1400	0.18	0.5	2.084	2.226
					2.522	
					2.072	
3	6	1400	0.054	1	1.96	1.936
					1.753	
					2.095	
4	7	900	0.18	1	1.34	1.335
					1.259	
					1.405	

Cette table correspond exactement à la table utilisée dans la deuxième variante des plans factoriels fractionnaires, c'est-à-dire les lignes 1,4,6,7 d'un plan factoriel complet.

a) Tableaux des effets moyens et des interactions

Le modèle s'écrit comme suit :

$$Y=M+A+B+C+AB+AC+BC \dots \text{(III.11)}$$

Pour lequel on doit calculer les membres par la relation :

$$I_{AIBJ}=M_{AIBJ}+EAI+EBJ-M \dots \text{(III.12)}$$

Où :

M_{AIBJ} : La moyenne des Y lors ce que A est au niveau I et B est au niveau J ;

EAI, EBJ : Respectivement l'effet de A au niveau I, et l'effet de B au niveau J ;

M : La moyenne de toutes les réponses du tableau d'essai.

Tableau III.8 : Effets moyens des facteurs

N° Essai	Ra Moy	A1	A2	B1	B2	C1	C2
1	2.341	2.341	0	2.341	0	2.341	0
2	2.226	0	2.226	0	2.226	2.226	0
3	1.936	0	1.936	1.936	0	0	1.936
4	1.335	1.335	0	0	1.335	0	1.335
Moyenne	1.959	1.838	2.081	2.138	1.780	2.283	1.635
Effet	/	0.122	-0.122	-0.179	0.179	-0.324	0.324

Tableau III.9 : Interaction AB

AB	B1	B2
A1	2.341	1.335
A2	1.936	2.226

$$I_{A_1B_1}=2.341+0.122-0.179-1.959=0.324$$

$$I_{A_1B_2}=1.335+0.122+0.179-1.959=-0.324$$

$$I_{A_2B_1}=1.936-0.122-0.179-1.959=-0.324$$

$$I_{A_2B_2}=2.226-0.122+0.179-1.959=0.324$$

Tableau III.10 : Interaction AC.

AC	C1	C2
A1	2.341	1.335
A2	2.226	1.936

$$I_{A_1C_1}=2.341+0.122-0.324-1.959=0.179$$

$$I_{A_1C_2}=1.335+0.122+0.324-1.959=-0.179$$

$$I_{A_2C_1}=2.226-0.122-0.324-1.959=-0.179$$

$$I_{A_2C_2}=1.936-0.122+0.324-1.959=0.179$$

Tableau III.11 : Interaction BC

BC	C1	C2
B1	2.341	1.936
B2	2.226	1.335

$$I_{B_1C_1} = 2.341 - 0.179 - 0.324 - 1.959 = -0.122$$

$$I_{B_1C_2} = 1.936 - 0.179 + 0.324 - 1.959 = 0.122$$

$$I_{B_2C_1} = 2.226 + 0.179 - 0.324 - 1.959 = 0.122$$

$$I_{B_2C_2} = 1.335 + 0.179 + 0.324 - 1.959 = -0.122$$

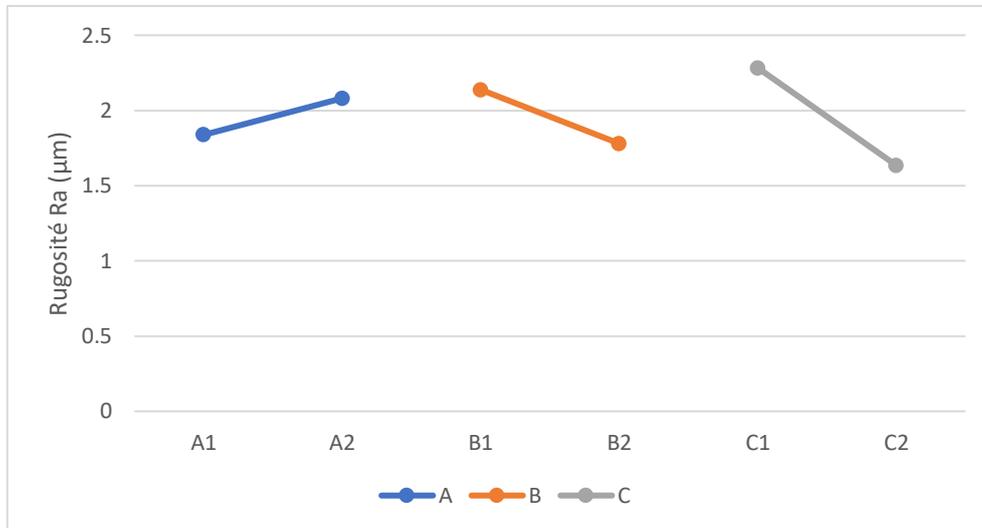


Figure III.8 : Graphes des effets des facteurs

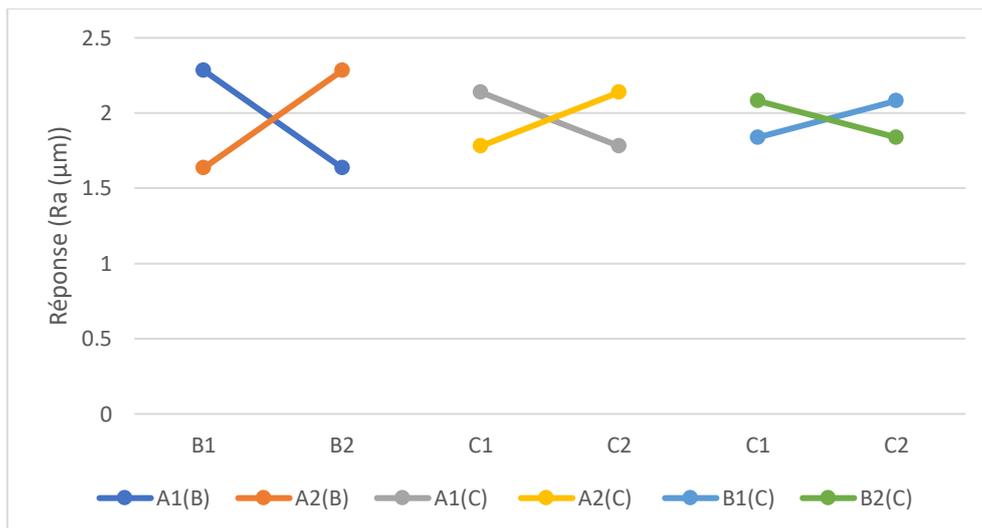


Figure III.9 : Graphe des effets des interactions

b) Interprétation des résultats

D'après les graphes des facteurs, pour avoir la valeur minimale de rugosité les niveaux des paramètres de régimes de coupe à choisir sont :

- Niveau bas pour le facteur A (vitesse de rotation de la broche) ;
- Niveau haut pour les facteurs B (avance) et C (profondeur de passe).

Les interactions entre les facteurs sont clairement mises en évidence dans le graphe des interactions, elles sont toutes croisées, les trois facteurs ont tous alors des interactions fortes :

- L'effet néfaste d'une avance élevée sur la rugosité peut être diminué en grande partie par une vitesse de rotation plus grande.
- La rugosité causée par une grande profondeur de passe est diminuée par la vitesse de rotation comme illustré en chapitre I.
- L'avance faible diminue quant à elle l'effet d'une grande profondeur de passe qui tend à augmenter la rugosité.

Ces résultats sont en accord avec les résultats obtenus par le plan factoriel complet, et la deuxième variante du plan factoriel fractionnaire.

III.7 Conclusion

Les résultats obtenus ne confirment pas totalement ce que dit la littérature. Il est connu que l'amélioration de l'état de surface s'obtient par l'augmentation de la vitesse de rotation de la broche et la diminution de l'avance et de la profondeur de passe (voir chapitre I).

L'utilisation des trois méthodes des plans d'expériences (les plans factoriels complets, les deux variantes des plans factoriels fractionnaires, et les plans de criblage de Taguchi) a permis de déceler les incohérences et les désaccords entre les résultats obtenus sans passer par un essai de confirmation. En effet le système d'usinage utilisé ne semble pas donner des résultats fiables, au contraire, il montre de l'instabilité qui ne peut qu'être le symptôme de la dégradation de la machine-outil que nous considérons comme élément principal du système. D'ailleurs la machine utilisée présente des jeux importants parmi lesquels on peut citer le recul remarquable du chariot transversal sous l'effet de l'effort de coupe, le vernier de ce même chariot présente un jeu important. Avec l'augmentation de la vitesse de rotation de la broche, les vibrations se font sentir clairement sur la machine. Une analyse par les réseaux de neurones artificiels (RNA) datant de 2008 [14] sur cette même machine a montré qu'elle était capable à la production d'une surface avec une rugosité $Ra < 2\mu m$, mais montre tout de même le degré de dégradation de ses performances au-delà de certaines limites d'utilisation de l'avance et de la profondeur de passe (forte interaction de ces deux paramètres).

D'autre part, on peut conclure que la méthode de Taguchi permet des économies en matière du nombre d'essais à réaliser, et permet aussi une optimisation facile et directe d'après les tables et les graphiques associés qu'il propose pour chaque type de problème par le choix de maximisation ou de minimisation du paramètre de sortie. Toutefois la méthode des plans

factoriels complets présente l'avantage de donner un modèle mathématique descriptif du comportement du système étudié d'après lequel on peut chercher par les méthodes mathématiques de calcul de polynôme les paramètres d'entrée pour avoir la valeur qu'on désire en sortie du système étudié que cette valeur soit un maximum, un minimum ou une valeur intermédiaire.

Conclusion et perspectives

Le travail présenté dans ce mémoire de fin d'étude a été orienté sur l'analyse de la réponse d'un système MODOP, matérialisée par la rugosité Ra de la surface usinée sur tour. Le mémoire est morcelé en deux parties essentielles, où la première partie met en relief le domaine de l'usinage mécanique et son importance, à travers laquelle nous avons passé en revue les procédés les plus courants et la qualité de surface produite. Dans la deuxième partie ont été introduits et développés les plans d'expériences comme outil scientifique permettant l'analyse du procédé d'usinage.

Le but de ce travail s'articule sur la conduite d'une opération d'usinage menée sur un tour en vue d'améliorer la réalisation de la surface et de porter un jugement sur le système de fabrication (système MODOP).

La méthodologie employée repose sur les plans d'expériences reconnus comme outil pertinents et très utile dans les process manufacturiers. Les plans factoriels de modélisation ainsi que les plans de Taguchi nous ont permis d'analyser le comportement de l'usinage d'une pièce et de relever les effets des paramètres des régimes de coupe ainsi que leur réglage pour atteindre des réponses satisfaisantes. L'application des plans d'expériences lors de l'opération d'usinage a fait ressortir les paramètres des régimes de coupe les plus influents qui est la profondeur de passe et la forte interaction entre les paramètres. Ceci est montré par les graphes, l'analyse statistique et la comparaison entre les méthodes employées.

Par ailleurs, les résultats expérimentaux ont permis de déceler l'état de la machine-outil. En effet, nous avons enregistré l'instabilité de la réponse due à certains facteurs non étudiés dans ce travail. Au moyen de ces plans d'expériences, il était possible de réaliser un diagnostic de la machine-outil.

Nous espérons que ce modeste travail puisse apporter un plus aux industriels dans le domaine de l'usinage mécanique. En perspective, nous proposons d'effectuer des investigations plus approfondies pour détecter les anomalies de la machine-outil afin d'améliorer ses performances. La planification des essais et le traitement et l'interprétation des résultats peut aussi être automatisé au moyen des logiciels informatiques et de feuil de calcul dans Excel.

Références bibliographiques

- [1] Éric FELDER, 2008, Procédés d'usinage, Technique de l'ingénieur, [en ligne] réf : BM7000, Disponible sur <http://www.techniques-ingenieur.fr>
- [2] SYMOP, Communiqué de presse du 24 octobre 2018, Disponible sur <https://www.symop.com>
- [3] Horst Kern & Michael Schumann, La fin de la division du travail?, Traduit par Armand Dupont, Editions de la maison des sciences de l'homme Paris (1989).
- [4] ISO 296:1991 Machines-outils — Cônes pour emmanchements d'outils à faible conicité.
- [5] François Pruvo, Conception et calcul des machines-outils, Volume 2 - Les Broches. Etudes cinématique et statique, Presses polytechnique et universitaires romandes, Lausanne (1993).
- [6] Dietrich, R., Garsaud, D., Gentillon, S., Nicolas, M. "Précis de méthodes d'usinage : méthodologie, production et normalisation, 5ème édition", Ed. NATHAN - AFNOR, (2004).
- [7] Pacquet, G., Marche, L. "Guide de la productique", Ed. Delagrave, Paris, (2004).
- [8] Kir Ahmed, Mémoire de fin d'étude « Effets des régimes de coupe sur la qualité de surface, détermination des performances des machines-outils – Approche par Taguchi », Université d'Annaba, 2015.
- [9] GOUPY Jacques, Introduction aux Plans d'expériences, Edition Dunod, Paris, (2001).
- [10] Richard Linder, Les plans d'expériences un outil indispensable à l'expérimentateur, Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, France, 2005.
- [11] Jacques Alexis, Pratique industrielle de la méthode de Taguchi, Les plans d'expériences, Afnor, France, 1995.
- [12] R.Dietrich & al, Précis de méthodes d'usinage: méthodologie, production et normalisation, Edition AFNOR, 1981.
- [13] A.Chevalier et J.Bohan,, Guide du technicien en productique: pour maîtriser la production industrielle, Hachette Technique, 1998.
- [14] L.LAOUAR & al, Analyse d'un système d'usinage par les réseaux de neurones artificiels (RNA), Communiqué, Université d'Annaba, 2008.

