

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



Faculté de technologie

DEPARTEMENT : GENIE MECANIQUE

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Filière : GENIE MECANIQUE

Spécialité : FABRICATION MECANIQUE ET PRODUCTIQUE

جامعة باجي مختار – عنابة

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

### EVALUATION DE L'ETAT DE SANTE D'UNE MACHINE- OUTIL (TOUR). APPLICATION DES PLANS D'EXPERIENCES DE TAGUCHI

Présenté par : BOUMEDIRI WISSAL Encadrant : LAOUAR LAKHDAR  
Grade PROFESSEUR UBMA

### Jury de Soutenance :

BOUCHELAGHEM .A/AZIZ	Professeur	Université badji mokhtar annaba	Président
LAOUAR .LAKHDAR	Professeur	Université badji mokhtar annaba	Encadrant
MEKHILEF .SLIMANE	MCA	Université badji mokhtar annaba	Examineur

Année Universitaire : 2021/2022

## Résumé :

Dans le processus de fabrication d'une pièce mécanique, les résultats attendus sont attachés à la qualité de surface réalisée. Cependant, l'obtention de bons résultats est conditionné particulièrement par l'état de santé de la machine -outil. La vérification de la réponse de la machine-outil est alors nécessaire afin d'assurer le meilleur rapport qualité/prix des produits manufacturés. Donc il devient nécessaire de trouver les solutions technologiques de réalisation d'une fabrication robuste sur des machines-outils. Dans ce contexte, notre travail s'est concentré sur l'utilisation d'une approche scientifique basées sur les plans d'expériences, en l'occurrence, la méthode de Taguchi afin d'apporter un jugement sur l'état de santé du tour 16K20 utilisé aux ateliers AMM Sider el Hadjar et d'en déterminer les conditions appropriées pour obtenir des résultats optimaux. Les résultats obtenus ont confirmé que le tour demeure en bon état puisqu'il est conforme aux normes recommandées dans l'industrie.

## Abstract :

Results in the manufacturing process of a mechanical part, are attached to the quality of the surface achieved. However, obtaining good results is conditioned particularly by the state of health of machine tool. Verification of the response of machine tool is then necessary to ensure the best quality/price ratio of the manufactured products. Therefore, it becomes necessary to find technological solutions for achieving robust manufacturing on machine tools. In this context, our work has focused to use a scientific approach based on experimental plans, in this case, the Taguchi method in order to make a judgment on the state of lathe health 16K20 used at AMM Sider el Hadjar and to determine the appropriate conditions to obtain optimal results. The results obtained confirmed that the lathe remains in good condition since it complies with the standards recommended in the industry

## ملخص:

في عملية تصنيع الجزء الميكانيكي، يتم إرفاق النتائج المتوقعة بجودة السطح المحققة. ومع ذلك، فإن تحقيق نتائج جيدة مشروط بشكل خاص بالحالة الصحية للأداة الآلية. من الضروري بعد ذلك التحقق من استجابة أداة الماكينة لضمان أفضل نسبة جودة / سعر للمنتجات المصنعة. لذلك، يصبح من الضروري إيجاد حلول تكنولوجية لتنفيذ تصنيع قوي على الأدوات الآلية. في هذا السياق، ركز عملنا على استخدام نهج علمي قائم على التصاميم التجريبية، في هذه الحالة، تطرقنا إلى طريقة تاغوشي من أجل تقديم حكم على الحالة الصحية لجودة 20 k16 المستخدمة في ورشة Les AMM سيدار الحجار وتحديد الظروف المناسبة للحصول على أفضل النتائج. أكدت النتائج التي تم الحصول عليها أن المخرطة لا تزال في حالة جيدة لأنها تتوافق مع المعايير الموصى بها في الصناعة.

# Remerciement

"الحمد لله العلي العظيم الذي سخر لنا هذا وما كنا له مقرنين"

Je tiens à remercier mon encadreur Pr. LAKHDAR LAOUAR d'avoir accepté de diriger ce travail ainsi que pour son entière disponibilité et ses précieux conseils et son soutien durant toute la période de l'élaboration de ce travail.

Un grand merci à tous les enseignants de département Génie Mécanique université BAJDI MOKHTAR ANNABA, et particulièrement à ceux que j'ai eu le plaisir d'avoir en parcours de master qui n'ont ménagé aucun effort pour le bon déroulement de notre formation.

Je tiens à remercier également les responsables de département Génie Mécanique université BAJDI MOKHTAR ANNABA pour leur entière disponibilité.

Et enfin je Remercier mes collègues de notre promotion et chaque personne qui ont aidé à réaliser ce travail.

Mes remerciements les plus sincères au personnel de l'entreprise AMM EL-Hadjjar, en particulier à Mme

Belkhir Fatma Zohra, qui ont bien voulu m'accorder du temps afin d'apporter des réponses à toutes mes questions tant opérationnelles, que d'ordre plus général et qui m'ont apporté des éclaircissements dont j'en avais besoin tout le long de mon stage.

Enfin, je remercie tous ceux et celles qui de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Un grand merci à Ma chère mère et mon cher père mes sœur " AYA Soundous Nour el Houda et mon frère Imed Eddine" pour leur contribution, leurs soutiens et leurs patiences, je tiens à exprimer ma grande reconnaissance envers eux.

# Sommaire

## Table des matières

<b>Sommaire</b> .....	4
<b>I. Investigation bibliographique</b> .....	2
I.1 Qualité de la fabrication .....	2
I.1.1 Etat de surface .....	2
I.1.2 Précision d'usinage .....	9
I.1.3 Usure machine-outil .....	10
I.1.4 Introduction sur l'erreur d'usinage.....	11
I.1.5 MESURE EST INCERTITUDE .....	12
I.1.6 Erreur provenant de l'usure.....	13
I.2 Vibration.....	15
I.2.1 VIBRATIONS ET QUALITÉ DE SURFACE .....	16
I.2.2 VIBRATIONS EN USINAGE.....	17
I.2.3 Type de vibration .....	18
I.3 Inspection des machines-outils.....	19
I.3.1 Cartographie des capacités machines .....	20
I.4 Méthodologie de contrôle de l'usinage et de M.O .....	21
I.4.3 Principaux avantages des plans d'expériences.....	25
<b>II. Introduction</b> .....	27
II.1 Plans d'expérience .....	27
II.1.1 Petit historique des plans d'expériences.....	28
II.1.2 La démarche expérimentale .....	29
II.1.3 Notion de surface de réponse .....	31
II.1.4 Etude des interactions.....	32
II.1.5 La méthode des plans d'expériences.....	33

II.2	Méthode de Genichi Taguchi .....	34
II.2.1	Représentation des facteurs .....	34
II.2.2	Représentation des interactions .....	35
II.2.3	Définition de Taguchi aux plans d'expériences : .....	37
II.2.4	Utilisation de la table de Taguchi table .....	39
II.3	<i>Conclusion</i> .....	40
III.	CHAPITRE3 : MATERIELS ET METHODES .....	42
III.1	Introduction.....	42
III.2	Matériau de la pièce .....	42
III.3	Méthodologie et essais expérimentaux .....	43
III.4	Traitement des résultats .....	51
III.5	Interprétation des résultats .....	55
III.6	Conclusion .....	62

## Liste des figures

Figure I-1 : profilomètre.....	3
Figure I-2 : état de surface :a)interprétation des éléments d'un profil (adapté de Barlier et Girardin,1992) ;b)hauteur maximale du profil de rugosité ;c)maximum de la hauteur des irrégularités du profil de rugosité ;d)hauteur maximale de saillie de rugosité et écart moyen arithmétique du profil de rugosité ;e)hauteur des irrégularités de rugosité sur 10 points ;f)paramètre d'ondulation ; g) longueur portante du profil et niveau de coupe préétabli. ....	5
Figure I-3 erreurs des machines-outils .....	12
Figure I-4 les causes principales des vibrations en usinage .....	18
Figure I-5 :.....	19
Figure I-6 : schématisation du système .....	25
Figure II-1 l'environnement du système .....	27
Figure II-2 la méthodologie des plans d'expériences.....	29
Figure II-3 le niveau bas du facteur est noté par -1 et le niveau haut par +1.....	30
Figure II-4 :traitement des interactions .....	37
Figure III-1:Ebauche XC48 laminée à chaud.....	42
Figure III-2 .....	43
Figure III-3 éprouvette .....	44
Figure III-4 Tour à commande numérique 16K20, BOSCH CNV ALPHA2.....	44
Figure III-5 Outil à plaquette rapportée P20 .....	45
Figure III-6 Rugosimètre.....	49
Figure III-7 Graphique des effets principaux .....	51
Figure III-8 Diagramme de l'interaction des facteurs A et B .....	52
Figure III-9 Diagramme de l'interaction des facteurs A et C .....	53
Figure III-10 Diagramme de l'interaction des facteurs A et D .....	53
Figure III-11 Diagramme de l'interaction des facteurs B et C .....	53
Figure III-12 Diagramme de l'interaction des facteurs B et D .....	54
Figure III-13 Diagramme de l'interaction des facteurs C et D .....	54
Figure III-14 Diagramme de Pareto des effets normalisés.....	55
Figure III-15 Graphique des effets principaux pour rapports signal/bruit .....	56
Figure III-16 Diagramme des interactions pour rapport S/B des facteurs A et B.....	57
Figure III-17 Diagramme des interactions pour rapport S/B des facteurs A et C.....	57
Figure III-18 Diagramme des interactions pour rapport S/B des facteurs A et D.....	58
Figure III-19 Diagramme des interactions pour rapport S/B des facteurs B et C .....	58
Figure III-20 Diagramme des interactions pour rapport S/B des facteurs B et D .....	59
Figure III-21 Diagramme des interactions pour rapport S/B des facteurs C et D.....	59

## Liste des tableaux

Tableau II-1 : table taguchi L8 ( $2^7$ ) .....	38
Tableau II-2 : table d'interaction CD .....	39
Tableau II-3 .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Tableau III-1 Rangement et répartition des facteurs .....	47
Tableau III-2 Matrice d'expériences(table de taguchi L16.....	48
Tableau III-3 Matrice des essais et résultats .....	50
Tableau III-4 résultats des essais.....	61
Tableau III-5 Procédés et états de surface.....	66

## INTRODUCTION GENERALE

Dans un monde industriel hautement concurrentiel, il est nécessaire de dégager les outils d'expertise des moyens de production, afin d'améliorer la précision et la qualité des pièces manufacturées. Donc, il s'agit de trouver les solutions technologiques d'exécution d'une fabrication robuste sur des machines-outils. Les projets se concentrent sur l'utilisation d'une approche scientifique basée sur des stratégies expérimentales pour déterminer les systèmes et les méthodes les plus appropriés pour aboutir à des résultats optimaux et fournir des jugements sur l'état des machines de production.

Dans ce travail, nous utilisons une approche basée sur les plans d'expériences, en l'occurrence, le plan de Taguchi, pour vérifier l'état de santé de la machine-outil "Tour 16K20 modèle BOSCH CNV ALPHA2 Machine très sollicité aux ateliers AMM Sider El Hadjar.

Le mémoire s'articule sur les chapitres suivants :

- Le premier chapitre, regroupe une synthèse bibliographique où sont présentés, les caractéristiques d'une surface usinée, les paramètres influents sa qualité telles que les erreurs provoquées par l'état de la machine-outil (vibration, .....). Ont été aussi montrée, l'inspection et la réparation des machines-outils. Le chapitre s'achève par l'exposé des méthodes de contrôle de l'usinage.
- Dans le deuxième chapitre, sont formulées dans le détail les informations importantes et utiles avec des exemples, de l'approche de Taguchi qui nous permettra de la mettre en œuvre et l'appliquer dans ce présent travail.
- Le troisième chapitre, représente une partie expérimentale, réunis toutes les informations concernant la présentation des équipements et mettant en relief l'application de méthode et modèle de l'approche Taguchi, afin d'en déduire les régimes de coupe optimale permettant une rugosité de surface minimale possible et d'apprécier les performances et la santé de la machine-outil utilisée .



# CHAPITRE

## I

INVESTIGATION  
BIBLIOGRAPHIQU

## I. Investigation bibliographie

### Introduction

La fabrication mécanique consiste à façonner des pièces mécaniques à travers une variété de processus, y compris des processus qui enlèvent de la matière. Tout au long de l'histoire de la construction mécanique, l'homme a tenté d'améliorer la qualité des pièces fabriquées en optimisant la vitesse de coupe. L'amélioration de la qualité des pièces mécaniques passe par l'obtention d'un bon état de surface avec une grande précision dimensionnelle

Dans ce cas, l'état de surface et la précision dimensionnelle dépendent de plusieurs facteurs, des paramètres de coupe, de la nuance de la matière à usiner, de la nuance et de la géométrie de l'outil, et de l'état de la machine-outil.

### I.1 Qualité de la fabrication

Les matériaux d'ingénierie utilisés par les techniciens dans les opérations de machines sont caractérisés par les qualités et les mesures de chaque matériau, où chaque matériau se distingue des autres matériaux en termes de couleur, de densité, de fragilité et de flexibilité. Pour que les techniciens utilisent correctement, les propriétés des matériaux doivent être connues comme les propriétés correctes des matériaux

Les propriétés sont également utiles pour comparer différents échantillons du même matériau.

Ceci est le résultat de l'exposition des substances à une variété de facteurs au cours des processus industriels en raison des processus de formation, des facteurs temporels ou des changements de température ou d'humidité.

Donc La qualité de surface en termes de douceur joue un rôle important dans les applications impliquant le frottement, la lubrification, où la rugosité de surface doit être à sa valeur la plus basse pour assurer la précision des dimensions de la pièce ainsi que la précision de son chevauchement.

#### I.1.1 Etat de surface

##### *I.1.1.1 Introduction sur l'état de surface*

On appelle états de surface des irrégularités de surface dues à la méthode de préparation de la pièce (usinage, moulage, etc.). Ils sont le plus souvent mesurés à l'aide d'un équipement à

Palpeur à pointe de diamant, appelé profilomètre ou rugosimètre, qui enregistre le profil de surface (Figure 1). Ces dispositifs impriment un graphique déformé du contour réellement détecté (c'est-à-dire que l'augmentation vertical est supérieure au l'augmentation horizontal). La figure montre des formes irrégulières et estime leur profondeur et leur espacement.

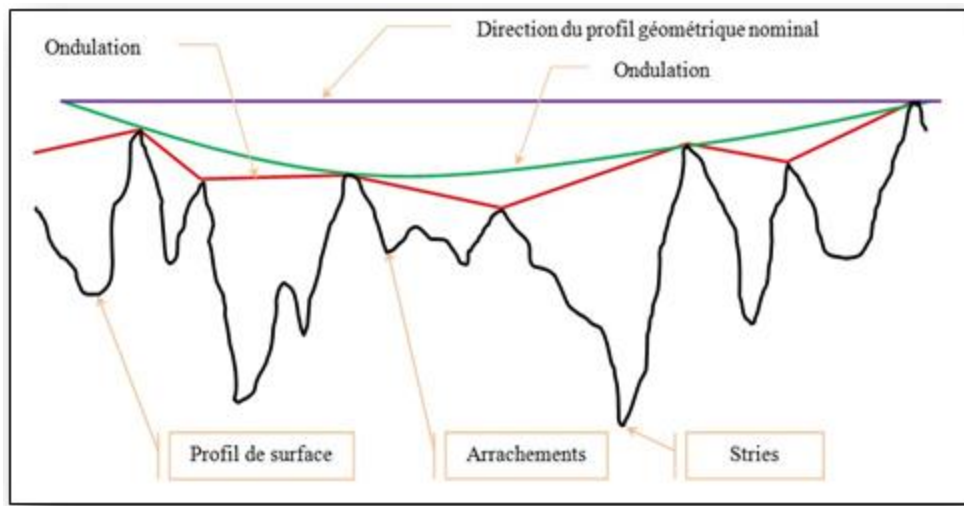


Figure 1-1 : profilomètre

Les états de surface disponibles d'une pièce après fabrication déterminent sa fonction après assemblage, pour le frottement, l'étanchéité ou le risque d'usure prématurée. La qualité de la finition de surface dépend d'un ensemble de conditions liées au processus, au calendrier de travail, aux étapes et sous-étapes, aux outils, aux machines et à d'autres facteurs.

### 1.1.1.2 Historique d'état de surface

Le terme "géométrie de surface" fait référence aux fines irrégularités (indentations et saillies) formées à la surface d'une pièce par le processus de fabrication (akamatsu, 1997).

Classification de la norme française NF E05-015 (Association française de normalisation, 1972) Défauts géométriques du quatrième ordre

- **Ordre 1** : distance de forme, causée par le positionnement de la pièce ou de l'outil (positionnement et serrage), déformation élastique ou thermique du système de procédé pendant le travail ;
- **Ordre 2** : ondulation, provoquée par des vibrations à basse fréquence de la pièce, de l'outil ou des deux ;

- 
- **Ordre 3** : Rugosité, qui peut consister en traces de géométrie d'outil, traces de particules de meule, grenailage ;
- **Ordre 4** : rugosité résiduelle, due à l'état de surface de l'outil, vibration à haute fréquence lors de l'usinage

### I.1.1.3 Etat de surface

Une propriété importante qu'un produit doit avoir est la rugosité de surface, les applications pratiques nécessitent des surfaces avec de petites valeurs de rugosité et une grande douceur pour travailler.

Les experts dans le domaine de la fabrication caractérisent avec précision les surfaces en exprimant les propriétés de ces surfaces avec des valeurs numériques qui reflètent leur rugosité ; la rugosité de surface est définie comme la grandeur naturelle du grain d'une surface par rapport à sa forme idéale, une surface est dite rugueuse, et si ceux-ci s'écartent beaucoup, le coefficient de frottement, et est appelé lisse ou doux et a un faible coefficient de frottement. Si ces écarts sont faibles, la rugosité est généralement liée à la fréquence et à la longueur d'onde de l'élément, il existe des conditions de coupe qui affectent grandement la qualité de la surface et la pièce peut perdre sa valeur après utilisation.

Ils sont donc progressivement supprimés ou redémarrés afin d'obtenir la rugosité souhaitée, c'est donc un coût d'effort, de temps et d'argent, et ces conditions (vitesse de coupe, stabilité de la machine de coupe, liquide de refroidissement ou de lubrification, outil de coupe, profondeur de coupe). [1]

La figure représente l'interprétation des défauts géométriques comme éléments d'un profil

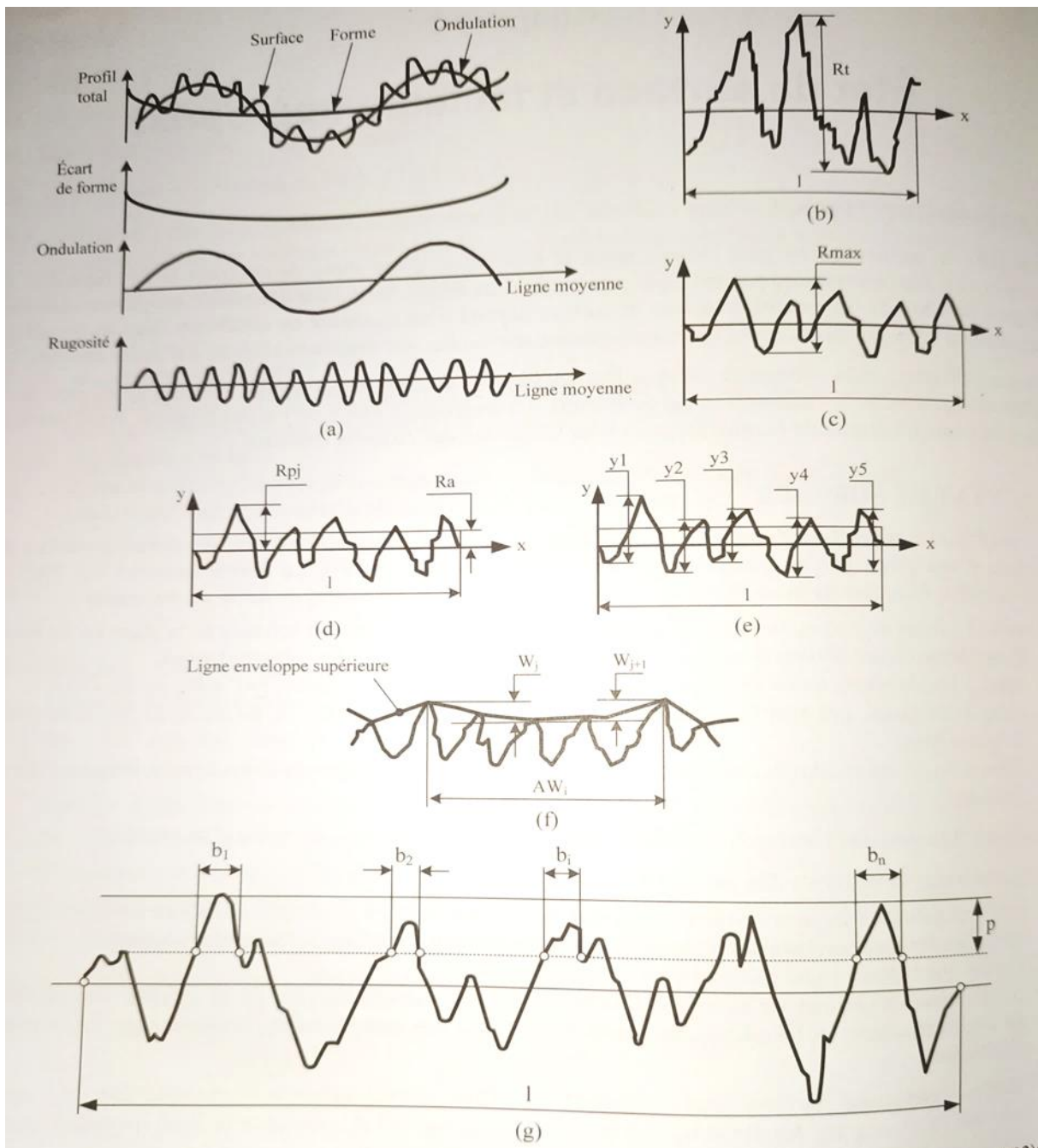


Figure I-2 : état de surface :a)interprétation des éléments d'un profil (adapté de Barlier et Girardin,1992) ;b)hauteur maximale du profil de rugosité ;c)maximum de la hauteur des irrégularités du profil de rugosité ;d)hauteur maximale de saillie de rugosité et écart moyen arithmétique du profil de rugosité ;e)hauteur des irrégularités de rugosité sur 10 points ;f)paramètre d'ondulation ; g) longueur portante du profil et niveau de coupe préétabli.

Passons maintenant brièvement en revue les informations couramment utilisées dans le domaine de la fabrication.

On a des paramètres :  $R_t$ ,  $R_{max}$ ,  $R_p$ ,  $R_a$ ,  $R_z$  et  $\eta_p$ , qui caractérisent la rugosité et sont associés à la ligne moyenne, et le paramètre  $W$  caractérise l'ondulation

-  $R_t$  : la distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux pour une longueur donnée (fig.1b)

-  $R_{max}$  : la hauteur maximum du profil qui est pris sur une saillie et un creux consécutif

-  $R_p$  : est la moyenne des  $R_{pj}$  où  $R_{pj}$  la distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne pour une longueur donné (fig.1d) et calculée à l'aide de l'équation suivante

*Équation I-1*

$$R_p = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{j=n} R_{pj}$$

*Équation I-2*

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{j=n} R_{aj}$$

*Équation I-3*

ou 
$$R_{aj} = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx$$

-  $R_z$  : est déterminé par cette équation (fig.1 e) :

*Équation I-4*

$$R_z = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{j=n} R_{zj}$$

- On trouve la profondeur moyenne d'ondulation  $W$  pour  $n$  motifs caractéristique sur la longueur d'évaluation  $l$  grâce à l'équation

Équation I-5

$$w = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{j=m} W_j$$

Et le pas moyen d'ondulation  $AW$  pour  $n$  motifs caractéristiques sur la longueur d'évaluation  $l$  à l'aide de l'équation

Équation I-6

$$AW = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} AW_i$$

- le paramètre  $\eta_p$  est la somme des longueurs des segments obtenue quand on coupe les saillies par une ligne moyenne à l'intérieur de la longueur de base à un niveau  $p$  de coupe préétabli en pourcentage de  $R_{max}$  (fig.I.2g) :

Équation I-7

$$\eta_p = b_1 + b_2 + \dots + b_n$$

On y utilise le taux de longueur portante  $t_p$  comme le rapport de la longueur portante à la longueur de base :

Équation I-8

$$t_p = \frac{\eta}{l}$$

Les figures 2.2a à 2.2e présentent d'autres exemples d'états de surface.

Les contraintes résiduelles  $\sigma_r$  occupent une place importante dans l'industrie moderne.

On appelle contraintes résiduelles les contraintes qui existent dans une pièce n'étant soumise à aucune action extérieure (Akamatsu, 1997). Dans un matériau poly cristallin, on distingue trois ordres de contraintes, selon l'échelle du volume concerné

- Les contraintes d'ordre I sont macroscopiques. Elles sont homogènes sur un volume constitué de plusieurs grains. Ces contraintes peuvent être causées par une

déformation plastique, une variation de température ou un changement de structure du matériau.

- Les contraintes d'ordre II varient à l'échelle d'un grain ou d'une phase. Ces contraintes macroscopiques sont causées par la différence d'orientation des cristaux et l'anisotropie, des propriétés élastiques et plastiques des cristaux (Balazinski, 2005).
- Les contraintes d'ordre III concernent l'échelle atomique. Elles résultent de la présence de défauts comme les lacunes et les dislocations.

La surface mécanique réelle n'est jamais parfaite elle contient toujours des défauts ces défauts peuvent être des vagues se produisent à la suite d'erreurs systématiques autorisées dans la fabrication [1]

#### I.1.1.4 Les différents types d'état de surface

- **Surface de référence :**

C'est une surface particulière qui permet de définir ou de contrôler d'autres surfaces.

- **Surface spécifiée :**

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

- **Surface associée :**

C'est la surface théorique représentant au mieux la surface réellement fabriquée. Elle est de même nature que la surface nominale ou spécifiée.

- **Surface mesurée :**

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

- **Surface réelle :**

Surface obtenu au cours de la fabrication



### I.1.2 Précision d'usinage

La précision d'usinage reflète la précision dimensionnelle et géométrique qui doit être atteinte et entièrement mesurée à toutes les étapes de la production de pièces. Les mesures effectuées sont estimées par des méthodes statiques.

La précision d'usinage est déterminée par les paramètres du processus de fabrication ; les erreurs qui en résultent sont appelées "erreurs primaires". L'identification et l'analyse de ces erreurs admettent d'établir une stratégie afin de les diminuer. Chaque paramètre de précision d'usinage (tolérance dimensionnelle, tolérance de forme géométrique ou tolérance de position relative géométrique) a sa propre méthode de calcul. Examinons de plus près les éléments de la précision d'usinage [2]

#### I.1.2.1 Précision dimensionnelle et géométrique

La précision dimensionnelle est caractérisée par la tolérance dimensionnelle TD.

La précision géométrique peut être exprimée par la tolérance de forme TG (F) et la tolérance de position relative TG (P).

La relation entre ces paramètres est la suivante

Équation I-9

$$TG(F) \leq TD$$

Plus précisément :

- Si la précision géométrique de forme est normale :  $TG(F)=0,3TD$
- En présence d'une haute précision géométrique de forme :  $TG(F)=0,2 TD$
- Pour une très haute précision géométrique de forme :  $TG(F)=0,12 TD$

Selon les conditions de fonctionnement de la pièce et les possibilités technologiques, la tolérance géométrique de position TG(P) s'exprime de la manière suivante :

Équation I-10

$$TG(P) > TD \text{ ou } TG(P) < TD$$

[3]

## Machine-outil et son impact

L'usinage par enlèvement de matière est l'un des procédés de fabrication les plus importants de l'industrie. L'usure des outils de coupe représente l'un des principaux facteurs limitant la productivité plus élevée associée à des produits fins de meilleure qualité. Pour maîtriser cela, il faut une compréhension approfondie du processus de coupe. La détérioration de l'état de l'outil au fil du temps affecte la qualité des surfaces usinées, les tolérances géométriques et le comportement de l'outil. Cette dégradation génère une force importante, qui augmente la puissance de coupe et l'énergie dissipée. La surveillance de l'état des outils de coupe permet aux opérateurs de maximiser la production et d'améliorer la qualité. Une technologie rapide et fiable pour le traitement des signaux de force de coupe et de vibration est essentielle pour le développement de systèmes de surveillance pour les processus d'usinage.

### I.1.3 Usure machine-outil

L'état et la durée de vie de l'outil sont des éléments clés des coûts d'usinage, nous devons donc être en mesure de développer des méthodes de détection de la corrosion et de prédiction de la durée de vie de l'outil pour gérer rationnellement le temps et les coûts de production. L'usure est incontestable et nous ne pourrions pas l'arrêter car c'est un phénomène inhérent à tout processus de coupe en raison des niveaux de contrainte, de frottement et de température auxquels l'outil est soumis. Cependant, le début de la détection et du développement de l'usure est le véritable besoin de s'assurer que la qualité de surface est bonne et utilisable.

#### I.1.3.1 Usure de broche

Trop souvent, on néglige l'importance des jeux de la broche. En effet, ce jeu altère toute la précision des usinages obtenus sur la machine, car les alésages ne sont plus situés avec exactitude par rapport à la poupée puisqu'ils peuvent être déplacés de la valeur du jeu de la broche.

Les conditions pour le maintien de la broche sans jeu sont multiples, mais nous avons observé que la qualité de surface des éléments qui composent le roulement, soit chemins de roulement externe et interne et galets, ainsi que l'exactitude géométrique de leurs formes, joue un rôle capital. En effet, les erreurs géométriques des formes, si minimes soient elles, engendrent de légers frottements de glissement qui, en se répétant à chaque rotation des galets, finissent par créer une usure rapide. D'autre part, par qualité de surface, nous entendons non seulement la forme micro géométrique de la surface, mais aussi le fait que la matière ne doit présenter aucun cristal ébranlé par l'usinage en surface. Lors du démontage des roulements de broche de

machines à pointer ayant de nombreuses années de service, nous avons toujours constaté que les roulements ne présentaient aucune usure si les conditions mentionnées plus haut avaient été remplies. Mais, pour être complet, il faut ajouter aussi qu'aucun roulement se trouvant actuellement dans le commerce ne remplit complètement les deux conditions mentionnées plus haut.[4]

#### **I.1.4 Introduction sur l'erreur d'usinage**

Il n'y a pas de mesures précises dans la science expérimentale. Selon le protocole choisi, la qualité de l'instrument de mesure ou le rôle de l'opérateur, cela ne peut être que compromis par des erreurs plus ou moins importantes. Il n'y a pas d'échelle parfaite. Quels que soient le soin apporté à la mise en œuvre, la précision de l'équipement, les compétences de l'opérateur, le respect des règles de traitement et le contrôle strict de tous les paramètres d'impact, il y aura toujours une incertitude dans la mesure. Malgré tous les efforts déployés dans ce domaine, l'outil est conçu pour faire pencher cette incertitude vers des valeurs de plus en plus basses, sachant qu'elle ne pourra jamais être éliminée. Par conséquent, toute mesure, pour être complète, doit inclure les limites d'erreur potentielle des valeurs et des données mesurées. Le résultat de la mesure est toujours affecté par bon nombre des erreurs les plus ou les moins importantes. C'est pourquoi il est nécessaire de pouvoir réduire et même éliminer l'impact de ces erreurs et d'évaluer la précision obtenue. [4]

##### **I.1.4.1 Erreur des machines-outils**

Les sources typiques d'erreurs volumétriques des machines-outils sont les erreurs de mouvement cinématique, les erreurs thermomécaniques, les forces de coupe, les forces dynamiques et les erreurs de contrôle. Les erreurs thermomécaniques sont causées par la déformation thermique des structures et des pièces de la machine. Ces déformations sont causées par des changements de température dans les composants de la machine, qui sont eux-mêmes causés par des sources de chaleur à la fois externes et internes à la machine. Ce problème est déjà connu [4]

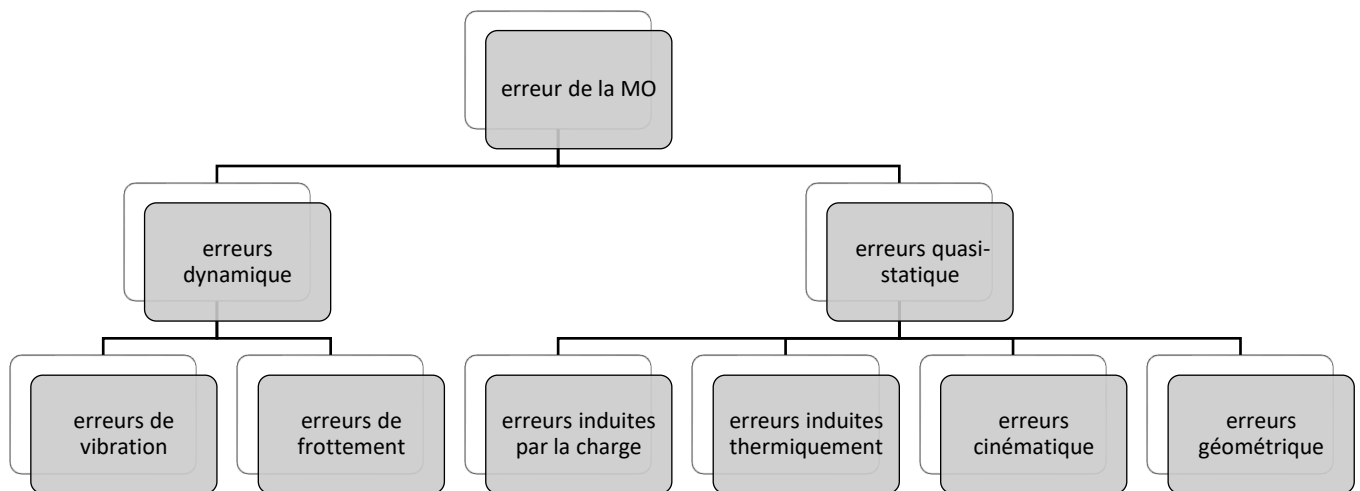


Figure I-3 erreurs des machines-outils

[4]

### I.1.5 MESURE EST INCERTITUDE

Mesurer une grandeur n'est pas simplement rechercher la valeur de cette grandeur mais aussi lui associer une incertitude afin de pouvoir qualifier la qualité de la mesure. Cette incertitude est associée aux erreurs de mesures qui peuvent être dues à l'instrument de mesure, à l'opérateur ou à la variabilité de la grandeur mesurée. L'incertitude de mesure est la valeur qui caractérise la dispersion des valeurs qui peuvent être attribuées à la grandeur mesurée. [5]

#### *I.1.5.1 Erreur de mesure sur machine-outil*

Comparaison des données d'inspection mesurées par la machine-outil avec les données nominalement fournies ne donne pas seulement les défauts de fabrication de la pièce, mais elle est également affectée par l'erreur de mesure, qui a fait l'objet de plusieurs études [6].

Les principaux facteurs d'erreur de détection sont

- La structure du palpeur : rigidité et longueur du stylet et le rayon de la touche du stylet ;

- Le mouvement de palpation : vitesse et direction d'approche et l'impact de l'effort de contact ;
- La pièce à palper incluant la forme et le matériau ;
- Le nombre et la répartition des points de mesures.

Par exemple, si la vitesse d'approche est grande, il en résulte un grand effort transmis et donc peut produire une déflexion importante de la pointe. Par conséquent, la précision de l'acquisition de la position peut être affectée [6]

### **I.1.6 Erreur provenant de l'usure**

Il est évidemment difficile pour nous, d'examiner ou vérifier toutes les erreurs qui proviennent de l'usure d'une machine à pointer. En effet, elles sont de nature très diverse et dépendent très souvent des conditions d'emploi et du soin que l'opérateur, comme les services d'entretien, ont pris de la machine. Toutefois, à condition d'emploi et d'entretien équivalents, certaines machines présentent des erreurs engendrées par l'usure, beaucoup plus rapidement que d'autres.

#### **I.1.6.1 Erreur provenant d'usure de la machine**

Évidemment, il est difficile, voire impossible, de vérifier toutes les erreurs causées par l'usure d'une machine. En fait, ils sont de nature très diverse et dépendent souvent des conditions d'utilisation et de l'entretien de la machine par l'opérateur, tels que les services de maintenance, ont pris certaines machines connaîtront une usure dans des conditions égales d'utilisation et d'entretien et les erreurs engendrées par l'usure, beaucoup plus rapides que les autres erreurs.

Afin de classer la cause de l'usure plutôt que son effet, nous avons considéré des éléments déterminant l'exactitude géométrique de la machine

- Erreurs engendrées par l'usure des organes de guidage
- Erreurs provenant de l'usure de la broche porte outil
- Erreurs provenant des éléments déterminant l'exactitude géométrique de la machine.

Le facteur et le climat en termes de température et d'humidité affectent l'augmentation des erreurs de machines-outils systématiques ou aléatoires, donc on peut exprimer le terme erreurs en une erreur systématique et erreurs aléatoire et pour minimiser les erreurs et approche ou vraie valeur il faut diminuer les erreurs systématiques et les erreurs aléatoires

Lorsque nous effectuons des mesures, le résultat de la mesure ne peut pas être si bon ou parfaite qu'il ne correspond pas à la « valeur réelle ».

L'incertitude découle d'un écart aléatoire de la valeur de mesure. Ceci est différent chaque fois que la même mesure est effectuée.

Pourquoi des erreurs s'introduisent-elles dans les processus de mesure

Tout résultat de mesure est totalement incorrect à cause d'une erreur.

Qu'on répète la même mesure deux ou trois fois, trouverons-nous la même valeur ? [6]

#### **I.1.6.2 Erreurs aléatoires**

- Lorsque la valeur que nous obtenons d'une mesure à l'autre est surestimée ou sous-estimée par rapport à la vraie valeur, on parle ici d'erreur aléatoire.

Exemple : mesurer le temps avec un chronomètre. L'erreur provient du temps de réaction de l'expérimentateur lors du démarrage et de l'arrêt du chronomètre. Ce temps de réaction n'étant pas toujours le même, les mesures peuvent être surestimées ou sous-estimées.

Voici quelques sources d'erreurs aléatoires :

- Instabilité des appareils : Si ces appareils fonctionnent à la tension actuelle, de légères fluctuations de celle-ci nous feront modifier les mesures.
- Fluctuations des conditions environnementales : de légères vibrations, même imperceptibles, peuvent affecter des équipements très sensibles.
- Erreur de lecture : il faut faire attention et concentrer lorsque vous lisez correctement les critères sur l'appareil ou l'outil.

Lorsqu'un même opérateur répète plusieurs fois, dans les mêmes conditions, le mesurage d'une même grandeur, les valeurs mesurées peuvent être différentes. On parle alors d'erreur de mesure aléatoire. L'incertitude associée est une incertitude de répétabilité dite de type A. Une incertitude de type A est évaluée par des méthodes statistiques qui mettent

en jeu la moyenne et l'écart-type. Elle est issue de l'exploitation d'un nombre important de valeurs mesurées.

- Tout ce que nous pouvons faire, c'est minimiser l'erreur, car l'incertitude de l'expérimentation ne peut jamais être éliminée. L'essentiel reste de bien l'évaluer afin qu'il soit correctement reflété dans les résultats et pris en compte dans leur interprétation. [7]

### I.1.6.3 Erreur systématique

Lorsqu'une erreur conduit toujours à surestimer (ou toujours à sous-estimer) la vraie valeur, on dit qu'elle est systématique. C'est l'écart par rapport à la valeur précise qui peut être mesurée.

Exemple : Une règle de mesure (pied à coulisse ou palmer, etc.) Lorsque le premier centimètre ou bien le centième est manquant ou qu'une erreur de lecture se produit. Toutes les mesures seront sous-estimées

Les erreurs systématiques comprennent les erreurs d'échantillonnage, les erreurs de préparation, les erreurs de lecture sur les appareils analogiques, etc. Ces problèmes peuvent entraîner un biais statistique ou fausser les résultats si les mêmes erreurs sont commises de manière cohérente.

L'amélioration de la qualité de la machine réside dans la réduction de l'influence des erreurs systématiques et aléatoires sur la mesure, la principale caractéristique des erreurs systématiques est leur répétabilité, il est donc possible d'effectuer certaines expériences sur celles-ci, de les déterminer par des moyens de mesure externes, ou auto-étalonnage et correction physique ou logicielle [7]

## I.2 Vibration

La vibration est produite principalement par le processus de coupe. La précision d'usinage obtenue avec les machines-outils est fréquemment compromise par les vibrations. Le mouvement relatif entre l'outil et la pièce résulte de la superposition des déplacements commandés par les mouvements de coupe et d'avance ainsi que les déplacements générés par la dynamique du procédé, La variation de ce mouvement relatif donne naissance à des erreurs qui affectent principalement l'état de surface de la pièce finie. La variation de la profondeur de passe provoque une variation des efforts de coupe ; ce qui génère une excitation de la

structure de la machine-outil et de la pièce elle-même. Cette excitation forcée de la structure génère une déflexion de l'outil de coupe. La modélisation du processus de coupe devient nécessaire afin de prédire les effets de la vibration pour des outils de coupe bien spécifiques.

Pour atténuer l'effet des vibrations, il est impératif de balancer dynamiquement toutes les composantes tournantes et d'isoler complètement la machine de la structure du local où elle est installée en utilisant des composantes mécaniques (ressort, masses et amortisseurs). [8]

### I.2.1 VIBRATIONS ET QUALITÉ DE SURFACE

Le domaine vibratoire des machines-outils est très large, et il existe trois sources principales :

- Vibrations externes,
- Vibrations causées par des pièces de machine en mouvement ou en rotation
- Vibration due au travail de l'outil.

Les vibrations extérieures sont transmises par le sol de l'atelier et peuvent provenir de machines voisines, de moteurs, d'un chemin de fer ou d'un trafic routier passant à proximité, etc. S'il est souvent difficile d'en déterminer la source, il est relativement aisé d'en préserver la machine en le montant par exemple sur des amortisseurs ou un statif isolant de forte masse. Ces perturbations sont des caractéristiques d'installation.

Les vibrations dues à la rotation ou au déplacement d'éléments de la machine sont, elles, à circonscrire dans le cadre de la construction. Il peut s'agir de vitesses critiques d'arbres, aussi bien que de balourds de moteurs, que de vibrations engendrées par des imperfections géométriques de pignons, de roulements, ou simplement de déformations partielles périodiques de pièces en charge.

Les vibrations du travail à l'outil sont les plus importantes et les plus difficiles à éviter. En fait, ils sont causés par le travail de coupe de l'outil, des efforts discontinus dus à la forme irrégulière de la pièce (comme sur un tour à table tournante), ou des efforts continuellement variables (comme avec des fraises, des scies, des broches, etc.). Ils peuvent également être causés par une erreur d'affûtage géométrique d'un outil qui le fait vibrer.

L'analyse des conséquences de ces vibrations montre des pertes indubitables dans la production de machines, soit dues à des pertes de puissance dues à l'énergie d'excitation



dissipée en vibrations, soit de façon plus générale dues à la perte de qualité de surface usinée et à la détérioration rapide de l'outil.

Ces deux derniers résultats proviennent du mouvement relatif de l'outil par rapport à la pièce, plutôt qu'une traduction du clip. L'étude de tels mouvements est à la base de l'analyse dynamique des machines, et si toutes les vibrations ne peuvent être éliminées, en revanche, les constructeurs peuvent souvent limiter leur amplitude, c'est-à-dire leurs effets. En considérant un outil qui enlève des copeaux de matière de la surface d'une pièce, on se rend compte que tous les axes de déplacement relatif entre l'outil et la pièce sont d'importance différente, et pour certains, la réduction d'amplitude est particulièrement importante.

Si l'on prend comme exemple le cas général des tours, il est facile de se rendre compte que la variation de diamètre de tournage due aux vibrations perpendiculaires à la surface usinée est beaucoup plus importante à amplitude constante que celle due aux vibrations tangentielles. Ce dernier provoque une usure rapide du burin, tandis que le premier provoque l'écaillage et la destruction du tranchant de l'outil. [8]

## I.2.2 VIBRATIONS EN USINAGE

Des vibrations du système POM peuvent se produire dans certaines conditions (Figure I.4), ce qui peut réduire la qualité des surfaces usinées, accélérer l'usure de l'outil et de la machine et entraîner une perte de contrôle de la machine et de l'outillage. Ceux-ci réduisent la productivité et rendent même parfois impossible de travailler sur la machine. Il existe deux types, les vibrations forcées et les vibrations auto-excitées (générées par le processus de formation des copeaux) [8]

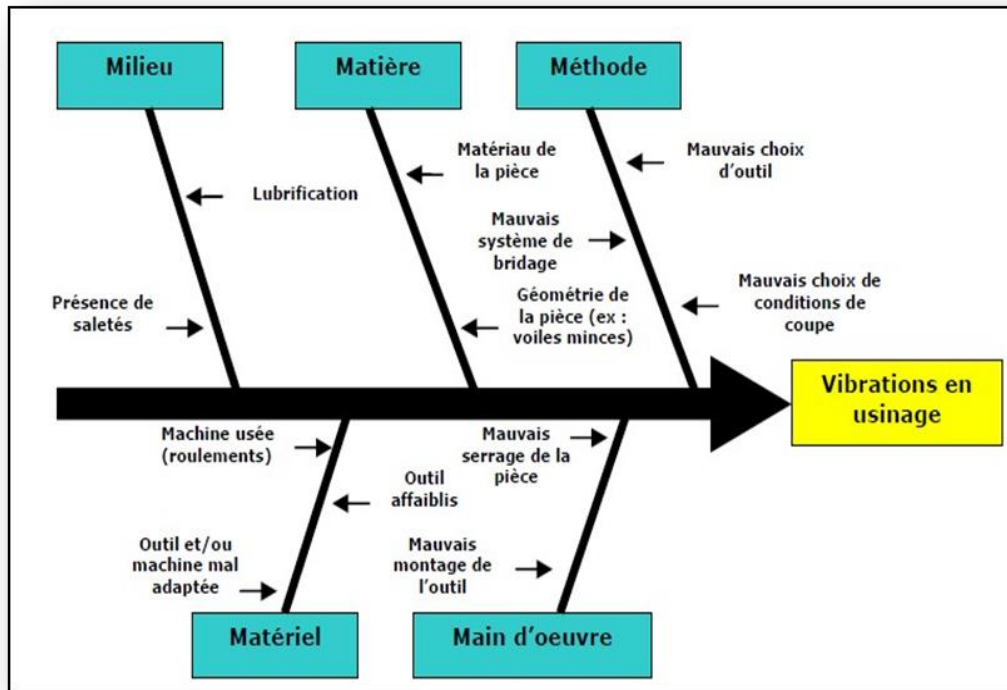


Figure I-4 les causes principales des vibrations en usinage

### I.2.3 Type de vibration

#### I.2.3.1 Vibrations forcées

Habituellement, les vibrations forcées ont peu d'effet sur la réduction de l'état de surface de la pièce. D'autre part, ils se caractérisent par des défauts d'emplacement de la surface usinée, ce qui peut conduire à des cotes imprécises. Le genre apparaît sous l'influence de perturbations périodiques causées par :

- Variations de la force appliquée au système, dues à des coupes intermittentes (ex. tournage d'un arbre avec des rainures longitudinales) ou à des surépaisseurs variables ;
- Chocs dus à des vibrations ou à une précision insuffisante des surfaces mobiles des pièces de transmission (usure des pièces du mécanisme, précision insuffisante des engrenages), changements brusques d'engrènement et de vitesse ;
- Force centrifuge d'inertie due au déséquilibre des masses en rotation (ébauches, mandrins, poulies, rotors de moteur, etc.).

#### I.2.3.2 VIBRATIONS AUTO-ENTRETENUES

Suppression des opérations d'usinage par matière. Ces vibrations entre l'outil et la pièce sont à l'origine de broutages. Ce phénomène est très préjudiciable à l'usinage car il

dégrade fortement l'état de surface en créant des stries sur la pièce. Les conséquences des vibrations auto-entretenues sur les surfaces usinées sont illustrées à la Figure I.5. Ce phénomène augmente également la dégradation de l'outil et de la broche, tout en produisant parfois beaucoup de bruit. [8]

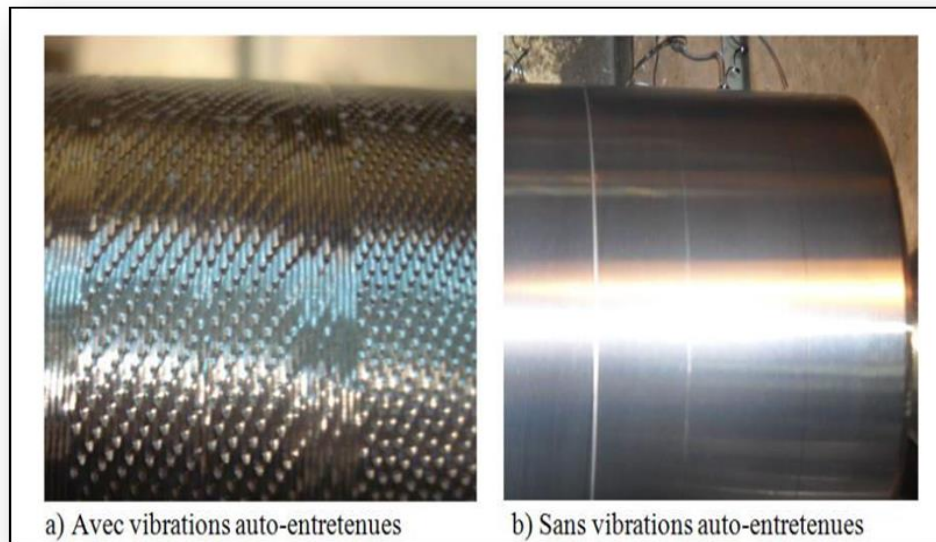


Figure I-5 : détail d'une surface usinée

Les vibrations auto-entretenues ne se limitent pas au fraisage. Ils sont également utilisés pour le tournage, le perçage, l'alésage et le meulage. La raison du bavardage a longtemps été insaisissable. Aujourd'hui, toujours en pratique, il est parfois difficile d'en déterminer la cause exacte. Les paragraphes suivants fournissent un bref indice historique qui nous permet de formuler l'interprétation la plus généralement acceptée. [8]

### I.3 Inspection des machines-outils

Le responsable qualité assure entre autres la planification, la réalisation et la gestion des études de capabilité machine et process ainsi que la gestion des plans d'actions d'amélioration des indices de capabilité machines et process.

- Les techniciens méthodes et maintenance sont impliqués dans la réalisation d'études de capabilité machine et de groupes de travail pour l'amélioration des indicateurs de capabilité machine. Lors de l'application de la norme, Une entreprise doit pouvoir vérifier l'aptitude d'un moyen de production à réaliser en série des pièces dans des limites de tolérances définies, en application des normes :

NF X 06-033 : aptitude des moyens de production et des processus de fabrication. Norme française NF X 06-033, Aptitude des moyens de production et des processus de fabrication - Généralités, AFNOR, Année 1995.[9]

NF E 60-181 : moyens de production, conditions de réception, méthode d'évaluation de l'aptitude à réaliser des pièces. Norme française NF E60-181, Moyens de production - Conditions de réception - Méthode d'évaluation de l'aptitude à réaliser des pièces, AFNOR, Année 2001.

Cela s'applique aux méthodes de production dont les propriétés contrôlées suivent une loi de distribution proche de la loi normale ou de la loi des défauts de forme dans différentes circonstances :

- À la demande du client,
- À la réception d'un nouveau moyen de production,
- À la réception d'un moyen de production rénové,
- Vérifier les modifications de la machine pouvant avoir un impact sur la qualité du produit,
- Dans le cadre du contrôle régulier des moyens de production, vérification des interventions de maintenance pouvant avoir un impact sur la qualité du produit.

### **I.3.1 Cartographie des capacités machines**

L'objectif de la cartographie capacité machine est de fournir une vision globale de l'état du parc machine et de permettre un suivi de l'évolution des capacités machine.

Cet indicateur présente, par secteur, l'indice de capacité pour chaque caractéristique de fabrication de machines qui fait l'objet d'un suivi régulier. Les codes couleurs utilisés sont :

- rouge : non conforme

- orange : limite d'acceptabilité

- vert : conforme

Il est mis à jour après chaque validation d'une étude de capacité, par le responsable qualité [9]

#### I.4 Méthodologie de contrôle de l'usinage et de M.O

Une conception expérimentale est une série pré-organisée de tests pour déterminer l'effet de plusieurs paramètres sur une ou plusieurs réponses avec la plus grande précision dans le moins de tests. Parmi les méthodes de simulation existantes, nous utilisons une approche de plan d'expérience pour simuler nos résultats expérimentaux.

Dans diverses études, la thèse est obligatoire. Cependant, ces tests sont souvent effectués sans méthodes, et les résultats obtenus sont souvent mal exploités.

Les méthodes de plans d'expériences permettent une meilleure organisation des essais qui accompagnent les résultats expérimentaux, qui seront applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries.

Les expériences sont conçues pour optimiser l'organisation des expériences afin d'obtenir le plus d'informations possible avec le moins d'expériences. Il permet également d'obtenir la meilleure précision possible sur la modélisation résultante.

La méthodologie des plans d'expériences s'articule selon les étapes suivantes :

- Formaliser le problème, si possible au moyen d'un modèle graphique ;
- Sélectionner les paramètres, fixer leurs modalités (niveau de variations des paramètres) et sélectionner leurs interactions ;
- Construire le plan en fonction des tables de Taguchi ;
- Réaliser les essais ;
- Analyser les résultats ;

Conclure après choix du réglage des paramètres qui peuvent être maîtrisés et essai de confirmation. [10]

##### **Étape 1 : Formaliser le problème**

Identifier le problème : est-ce un dysfonctionnement "produit" et/ou "processus", un taux de rebut important, une performance insuffisante, une mise au point à réaliser ?

Quantifier l'objectif à atteindre en définissant une ou plusieurs réponses. Les réponses étant définies, comment les mesurer ?

- Qui mesure ?

- Que mesure-t-on ? -

- Où le fait-on ?
- Quand le fait-on ?
- Comment le fait-on ?

Les différentes mesures peuvent être :

- Une grandeur quantitative (une longueur, un poids, une dureté, une force...);
- Un pourcentage (un taux de rebut ...);
- Un classement ;
- Une cotation (un démérite ...)

## **Étape 2 : SELECTIONNER LES PARAMETRES**

Fixer leurs modalités et sélectionner leurs interactions.

Le groupe doit identifier les paramètres, qualitatifs ou quantitatifs, à priori responsables des variations des réponses. La manière de procéder est la suivante :

- recenser tous les paramètres possibles (Remue-méninges, diagramme causes-effet

(Ishikawa), ADMEC, ...);

- sélectionner les paramètres à priori les plus influents pour l'étude, par élimination successive ;

- choisir le nombre de modalités et leurs valeurs pour chacun des paramètres retenus ;

- sélectionner les interactions à priori les plus influentes ;

- déterminer les conditions d'essais : les paramètres listés mais non retenus seront maintenus constants au cours des essais. La façon de réaliser les essais sera établie et figée.

C'est l'expérience acquise par chacun des membres du groupe qui est utilisée lors de cette étape.

A ce stade, il faut vérifier l'opportunité d'un plan d'expérience :

- l'influence des paramètres est-elle vraiment méconnue, mal quantifié (problème de type "boîte noire") ?

- est-il possible de maîtriser les paramètres au cours des essais ?

Si non, les informations issues de l'étape 1 et 2 permettent de s'orienter vers d'autres méthodes : méthode de résolution de problèmes, analyses de données...

### **Étape 3 : CONSTRUIRE LE PLAN**

Un plan d'expériences évite de combiner toutes les modalités de tous les paramètres. Les plans les plus courants sont répertoriés dans un ensemble de tables disponibles en standard.

Le nombre de paramètres, de modalités par paramètres et le nombre d'interactions permettent de trouver le plan le mieux adapté au problème à résoudre.

Les paramètres sont affectés aux colonnes en tenant compte des interactions et des paramètres difficiles à faire varier.

### **Étape 4 : REALISER LES ESSAIS**

Il s'agit de reproduire sur le produit et/ou le processus chaque combinaison du plan d'expériences et pour chacune d'entre elles de consigner la ou les réponses dans un tableau. Un soin particulier doit être apporté à la réalisation de ces essais (grande rigueur, respect de la gamme d'essais, relevé des conditions expérimentales.)

Il faut réaliser tous les essais prévus. Il est impossible de s'arrêter sous peine de perdre le bénéfice de l'étude.

### **Étape 5 : ANALYSER LES RESULTATS**

Il existe deux analyses complémentaires.

L'analyse graphique :

Elle donne une représentation simple des résultats. Elle permet de visualiser l'influence des paramètres et de leurs interactions

Analyses statistiques :

L'analyse de la variance vise à distinguer, dans les variations globales de la réponse, la part due à l'influence réelle des paramètres de la part due au hasard.

Cette analyse :

- complète l'analyse graphique ;
- donne un taux de confiance statistique aux résultats ;
- chiffre la contribution de chaque paramètre à la variation globale de la réponse ;
- quantifie la part du résidu, c'est-à-dire ce qui a varié à l'insu de l'expérimentateur.

## ÉTAPE 6 : *CONCLURE*

L'objectif de cette dernière étape est de faire la synthèse des résultats obtenus et de décider des actions à entreprendre (réglages des paramètres ou préconception).

L'essai de confirmation doit permettre la décision à entreprendre soit :

- Accepter le niveau de qualité obtenu après réglage,
- Mettre en œuvre un nouveau plan pour améliorer le résultat,

I.4.1 Changer de stratégie d'analyse où de conception du procédé. [11]

I.4.2 Définition des plans d'expérience

Les plans d'expériences permettent d'obtenir un maximum d'informations en réduisant à un minimum le nombre d'expériences à réaliser

Les avantages bien connus des plans d'expériences sont l'efficacité, l'exactitude et l'analyse des interactions. Par efficacité, on sous-entend que seules les expériences indispensables sont effectuées. Au moyen de plans d'expériences, la plus grande exactitude possible est atteinte pour un effet expérimental donné.

Ces applications font partie intégrante de la méthodologie moderne d'optimisation des procédés et des produits. Elles ont fait leur preuve dans plusieurs secteurs industriels comme la chimie, l'agroalimentaire, l'automobile, l'électronique et la mécanique. Il suffit de rechercher le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt ou bien la réponse ( $Y_0$ ) et les différentes variables, ou facteurs ( $x_0$ ) (Figure I.6). Donc la méthode consiste à établir la



relation entre une réponse (résultats) et les différents facteurs sous forme d'une fonction du type :

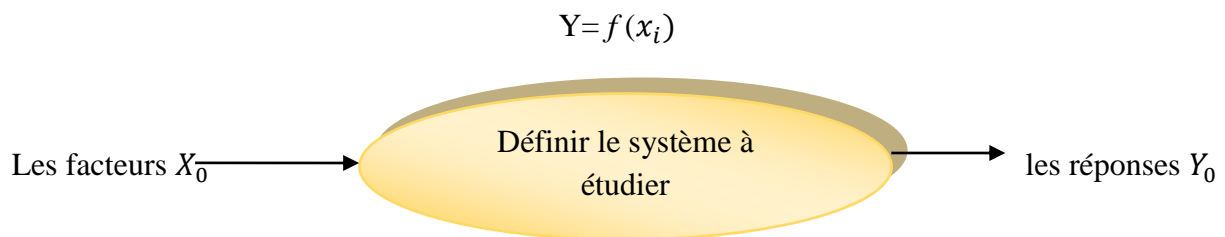


Figure I-6 : schématisation du système

### I.4.3 Principaux avantages des plans d'expériences

Les principaux avantages de cette méthode sont :

- Diminution du nombre d'essais.
- Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs.
- Détection des interactions entre facteurs.
- Modélisation des réponses étudiées. [11]

### Conclusion :

Dans ce chapitre, nous montrons une partie bibliographique, à travers laquelle nous retenons les interprétations sur l'état d'une machine-outil et ce qui peut l'affecter et réduire la possibilité de production et de qualité

Pour mettre en évidence et identifier les facteurs agissants qui affectent la qualité, nous envisageons de mener une étude basée sur le plan d'expériences selon la méthode de Taguchi, qui sera présentée dans le chapitre suivant

CHAPITRE

II

PLANS

D'EXPERIENCES

## II. Introduction

### II.1 Plans d'expérience

Un plan expérimental est un ensemble de différents tests à travers lesquels on peut comprendre comment le système interagit pour comprendre une solution en fonction de différents facteurs susceptibles de le modifier, et il est nécessaire d'établir une relation causale entre la réponse et les différents facteurs. La méthode du plan d'expériences (MPE) vise à déterminer la relation entre deux grandeurs :

- Réponse : correspond à la grandeur physique étudiée ;
- Facteurs : correspondent à des grandeurs physiques qui peuvent être modifiées par l'expérimentateur et dont on pense qu'elles affectent les changements de la réponse.

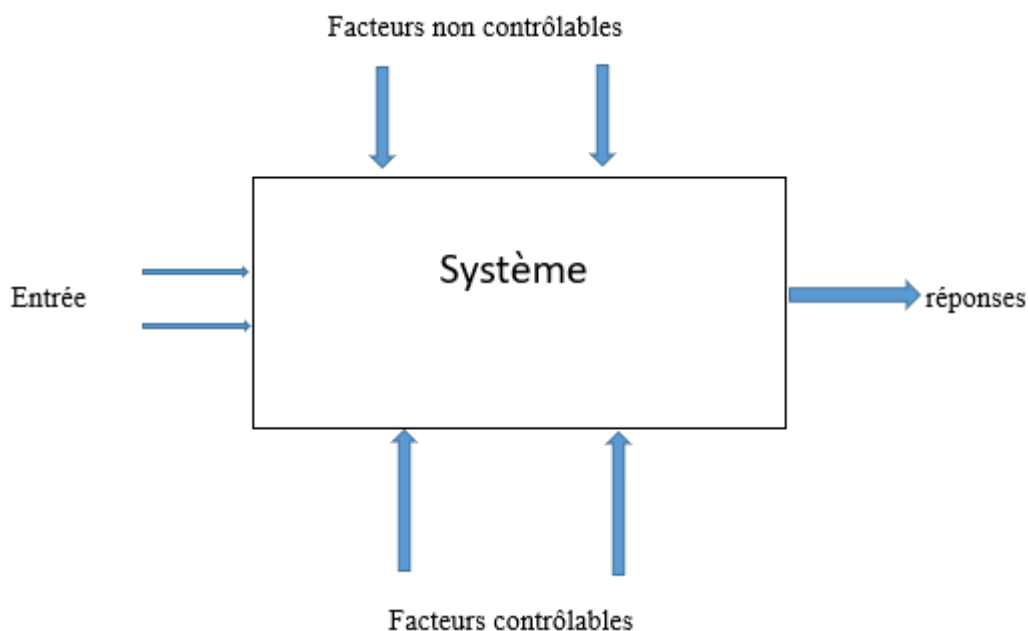


Figure II-1 l'environnement du système

Les facteurs suivants peuvent être calculés :

- Le choix du technicien (choix du matériau, de la pression, de la vitesse...) est un choix contrôlé par l'opérateur et facile à modifier
- Facteurs incontrôlables qui varient indépendamment du choix du technicien, tels que les conditions climatiques, l'environnement, etc.).
- Lorsque nous avons de nombreux plans expérimentaux qui permettent de réaliser la relation

Lorsque nous avons de nombreux plans expérimentaux qui permettent de réaliser la relation entre les réponses et les facteurs, la réduction du nombre d'expériences aboutit à maximiser la précision des résultats, nous pouvons donc atteindre cette relation

### II.1.1 Petit historique des plans d'expériences

La méthode de conception expérimentale n'est pas une technologie nouvelle. Elle remonte en fait aux travaux de Fisher (1925) au début du siècle. Les premiers utilisateurs de ces méthodes ont été les agronomes, qui ont rapidement compris l'intérêt du plan d'expériences, notamment en réduisant le nombre d'essais lorsque l'on étudie de nombreux paramètres. En fait, les essais agronomiques sont très paramétriques. La recherche sur le rendement du blé doit tenir compte de facteurs tels que le type de terrain, les différents traitements et l'ensoleillement. Aussi, dans ce type d'expérience, il faut attendre un an pour connaître les résultats. Il est donc impératif de réduire le nombre de tests sans perdre en précision et de pouvoir planifier formellement la campagne de tests. Mais la technologie était relativement secrète et n'a réussi à pénétrer l'industrie occidentale de manière significative que dans les années 1970.

Une des raisons du manque d'intérêt pour la méthode de la part de l'industrie peut être que la méthode proposée est trop théorique. Le travail du Dr Taguchi au Japon dans les années 1960 était un programme expérimental dans notre usine. Taguchi se caractérise par le pragmatisme japonais, capable de simplifier et de clarifier l'utilisation des plans expérimentaux. Sa contribution a été énorme et la diffusion massive de son travail aux États-Unis a commencé à la fin des années 1970. Aujourd'hui, le programme expérimental représente un outil important pour tout industriel, petit ou grand, soucieux d'améliorer la qualité de ses produits. [12]

Ces dernières années, les méthodes de conception expérimentale ont été appliquées à tous les fabricants. Il était auparavant classé et connaît aujourd'hui un développement étonnant. La précision des résultats obtenus, la pertinence des informations fournies par la méthode contribuent à son développement actuel dans tous les domaines d'activité.

La méthode, une fois comprise, constitue une étape irréversible dans la carrière des techniciens qui ne pourront plus envisager d'essais sans recours à un plan d'expérimentation.

Il a été constaté que la conception de la méthode expérimentale est basée sur les étapes suivantes :

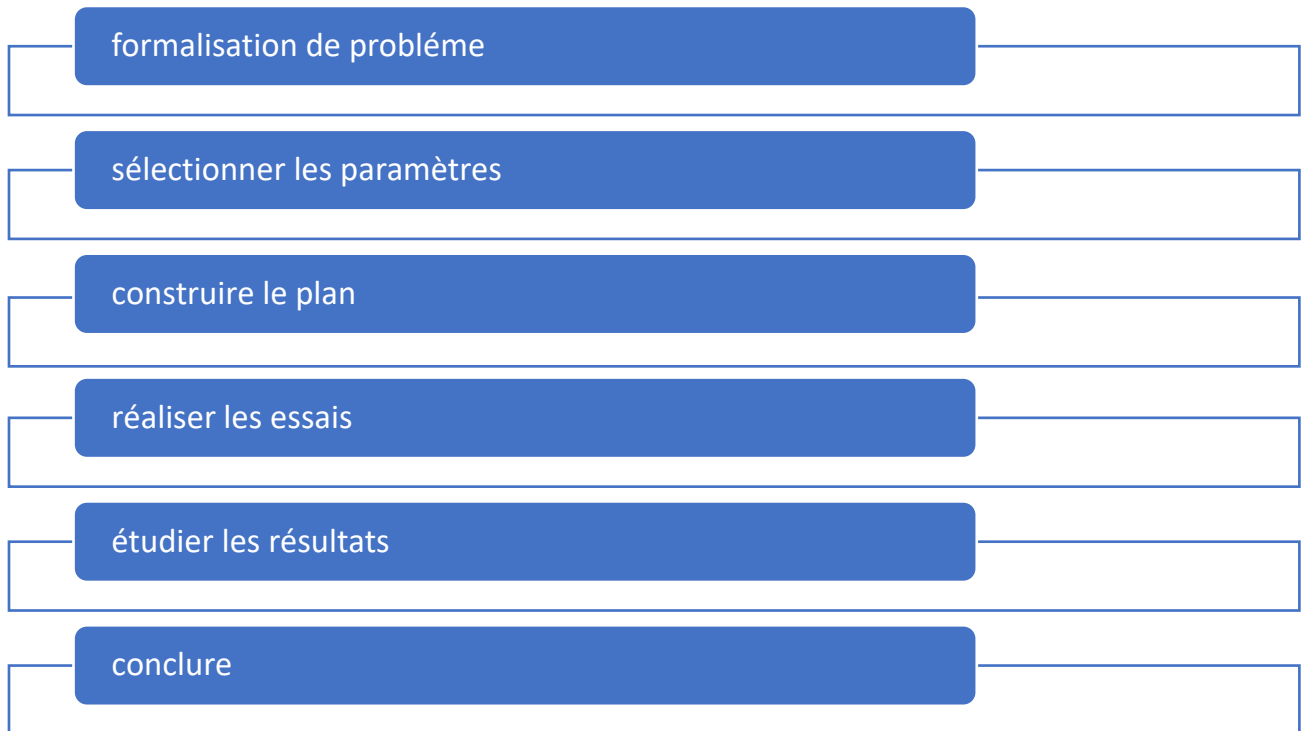


Figure II-2 la méthodologie des plans d'expériences

### II.1.2 La démarche expérimentale

La méthode expérimentale est généralement une méthode de recherche pour augmenter la productivité des tests. La méthode est la méthode royale d'acquisition de connaissances de manière naturelle dans l'industrie. Les ingénieurs construisent leur méthode d'acquisition de connaissances sur le test en avançant progressivement puis en se réorientant selon Expérimenter avec les résultats obtenus, pour lesquels il faut effectuer un minimum d'essais pour bien obtenir les résultats et atteindre un maximum de précision sur les résultats, et placer des phénomènes secondaires tels que des interactions entre facteurs.

La démarche expérimentale reste la méthode royale d'acquisition des connaissances dans le domaine industriel. De façon naturelle, l'ingénieur fonde sa démarche d'acquisition des connaissances sur des essais en avançant progressivement, puis, il réoriente ses expériences en fonction des résultats obtenus. Il recherche en général à augmenter la productivité de ses essais. Pour cela, il doit :

- faire un minimum d'essais ;
- obtenir un maximum de précision sur les résultats ;
- être capable de mettre en évidence des phénomènes secondaires comme des interactions entre facteurs.

Les difficultés de l'expérimentateur ne s'arrêtent pas à la planification des essais. Une fois ceux-ci réalisés, il faut interpréter les résultats. Il n'est pas rare de se retrouver devant une pléthore de mesures et de ne pouvoir en tirer un quelconque résultat. C'est à ce moment-là qu'on se dit souvent :

« Les essais que j'ai réalisés sont inutiles, par contre, j'aurais dû faire d'autres essais ! »

Nous, les ingénieurs, devons planifier le test, ce qui est difficile, mais une fois que c'est fait, nous devons interpréter les résultats. [13]

### ✚ Notion d'espace expérimental

Dans le diagramme, nous avons une limite inférieure et supérieure, un niveau bas et un niveau haut

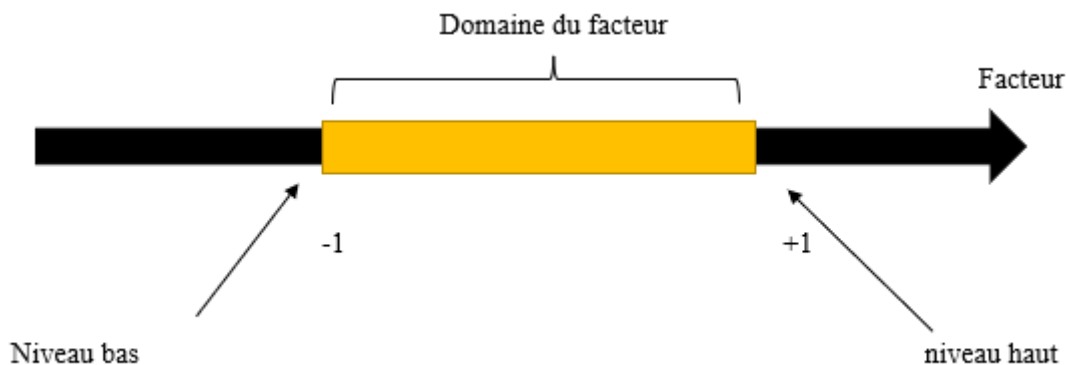


Figure II-3 le niveau bas du facteur est noté par -1 et le niveau haut par +1.

La grandeur mesurée à chaque essai s'appelle réponse, la valeur de cette réponse dépend de plusieurs variables appelés facteurs.

Le premier facteur est représenté par un axe orienté ; la valeur donnée au facteur pour réaliser un essai est appelé : niveau

Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut

Lorsqu'on étudie l'effet d'un facteur, on limite généralement l'écart entre deux bornes. On peut représenter le premier facteur par un axe gradué et un axe orienté, ainsi le terme facteur utilisé pour représenter la réponse dépend d'un ou plusieurs facteurs, et l'intérêt de l'expérimentateur pour la quantité qu'il mesure dans chaque expérience est également appelé pour la réponse.

Le domaine de variation d'un facteur ou plus facilement le domaine d'un facteur c'est l'ensemble de toutes les valeurs qu'un facteur peut prendre entre un niveau bas et un niveau haut, comme indiqué, le niveau bas a été noté le niveau haut de -1 et +1.

S'il existe un deuxième facteur, il est également représenté par un axe gradué et orienté.

Pour le premier facteur, on définit son niveau haut, son niveau bas et sa plage de variation. Le deuxième axe est disposé orthogonalement au premier axe. Notre résultat est un système de coordonnées cartésien qui définit l'espace euclidien à deux dimensions

### **II.1.3 Notion de surface de réponse**

Le niveau  $x_i$  représente les coordonnées du point expérimental et  $y$  est la valeur de réponse pour ce point. Définissez un axe orthogonal à l'espace expérimental et affectez-le à la réponse. La représentation géométrique des plans expérimentaux et des réponses nécessite une dimension de plus que l'espace expérimental. Les plans à deux facteurs sont représentés à l'aide d'un espace tridimensionnel : un pour la réponse et deux pour les facteurs.

Chaque point du domaine d'études correspond à une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se situent sur une surface appelée surface de réponse (Figure 7).

Le nombre et l'emplacement des points d'expérience sont des questions fondamentales de la conception expérimentale. Nous cherchons à obtenir la meilleure précision possible sur la surface de réponse tout en limitant le nombre d'expériences. [14]

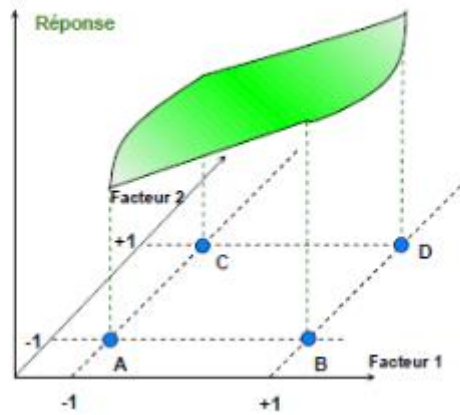


Figure II-4 les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse. Les quelques réponses mesurées aux points du plan d'expériences permettent de calculer l'équation de la surface de réponses.

### II.1.4 Etude des interactions

Une interaction existe lorsque le système ne réagit pas à un facteur de façon identique selon la configuration d'un autre facteur.

La figure représente le phénomène des interactions. Le premier schéma montre un phénomène sans interaction. On constate que l'effet sur la réponse lorsque le facteur A passé du mini au maxi est de -1 et ceci indépendamment de l'état du facteur B .le deuxième schéma montre un phénomène avec interaction .dans ce cas, l'effet du facteur A sur la réponse n'est pas le même selon que le facteur B est au mini ou au maxi.

En effet, lorsque A passé du mini au maxi alors que B est au mini, la variation de la réponse est de -2 par contre la même variation de A alors que B est au maxi ne provoque qu'une variation de réponse de -1 il y a interaction entre les facteurs A et B.[15]

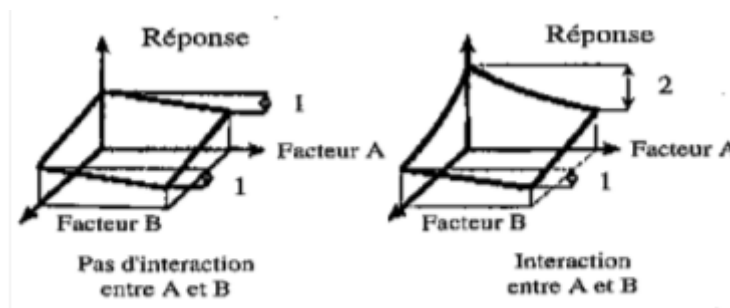


Figure II-5 notion d'interaction.



Dans ce plan, la stratégie classique est d'étudier un facteur à la fois, et le deuxième état est au niveau intermédiaire Figure 3 La stratégie du plan expérimental est de se placer aux quatre coins du champ de recherche.

Lors de la conception d'une stratégie expérimentale, l'effet du facteur A sera évalué en calculant la différence entre le résultat moyen à A=2 et le résultat moyen à A=1

Nous avons donc :

Équation II-1

$$E_A = 1/2 (Y3+Y4) - 1/2 (Y1+Y2)$$

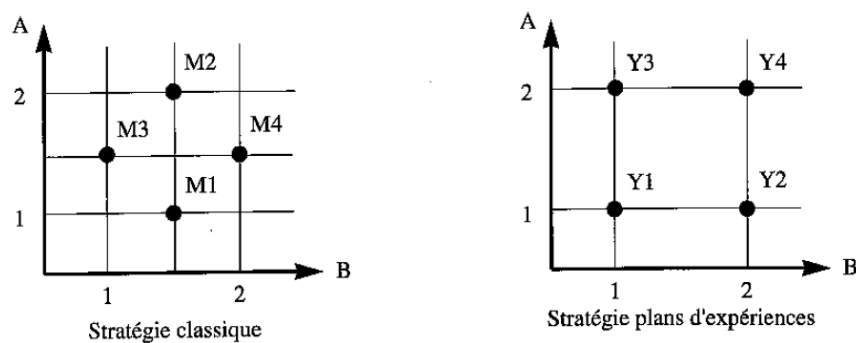


Figure II-6 :les deux stratégies

[15]

### II.1.5 La méthode des plans d'expériences

L'approche de conception expérimentale offre un moyen d'aborder notre problème ; elle permet

- Déterminer de manière optimale la liste des tests à effectuer ;
- Interpréter très rapidement les résultats expérimentaux ;
- Fournir des modèles prédictifs pour trouver la meilleure configuration ;
- Étudier les phénomènes de couplage d'effets ;

Par conséquent, pour minimiser le nombre d'expériences et modifier les paramètres de test, nous utilisons le plan expérimental

Les définitions déjà données s'appliquent bien aux variables continues. Mais il existe d'autres types de variables. Il existe des variables discrètes, telles que les personnes : Julien, Arthur, Louis, Simon et Nathan. On peut encore parler d'espace expérimental, mais il n'aura pas les

mêmes propriétés que l'espace variable continu. Il existe également des quantités commandables telles que des distances courtes, moyennes et longues. Ici, le concept d'espace expérimental existe toujours, mais cet espace a des propriétés différentes des deux précédents.

Nous avons vu quelques concepts et propriétés que nous avons écrits

Citons maintenant quelques plans :

- Plan factoriel complet à deux niveaux.
- Un plan factoriel fractionnaire à deux niveaux.
- Autres plans à deux niveaux.
- Plan à plusieurs niveaux.
- Plan de surface d'intervention.
- Régime mixte.
- Schéma booléen.
- Meilleur forfait.
- Programme de simulation numérique.

## II.2 Méthode de Genichi Taguchi

G. Taguchi a sélectionné une série de tables d'expérience standard permettent de faire à pratiquement toutes les situations

Les tables standard de Taguchi considèrent que les interactions entre deux facteurs sont négligeables sauf quelques-unes parfaitement identifiées les interactions d'ordre 2 non considérée sont supposées nulles. Les interactions d'ordre supérieur à 2 sont toujours considérées comme négligeables. [15]

### II.2.1 Représentation des facteurs

La méthode Taguchi est fondée sur une représentation graphique du modèle que l'on souhaite identifier. Dans cette représentation les facteurs sont représentés par des ronds classés entre quatre groupes

Tableau II.1: l'ordre de la difficulté de modification

	Très difficiles	Très facile	Facile	Difficiles
Groupe 1	○			
Groupe 2				◎
Groupe 3			◎	
Groupe 4		●		

### II.2.2 Représentation des interactions

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

Le premier Cas 1 : quand les droites sont parallèles il n'y a pas d'interaction. L'effet A indépendant des niveaux de B (figure II-7)

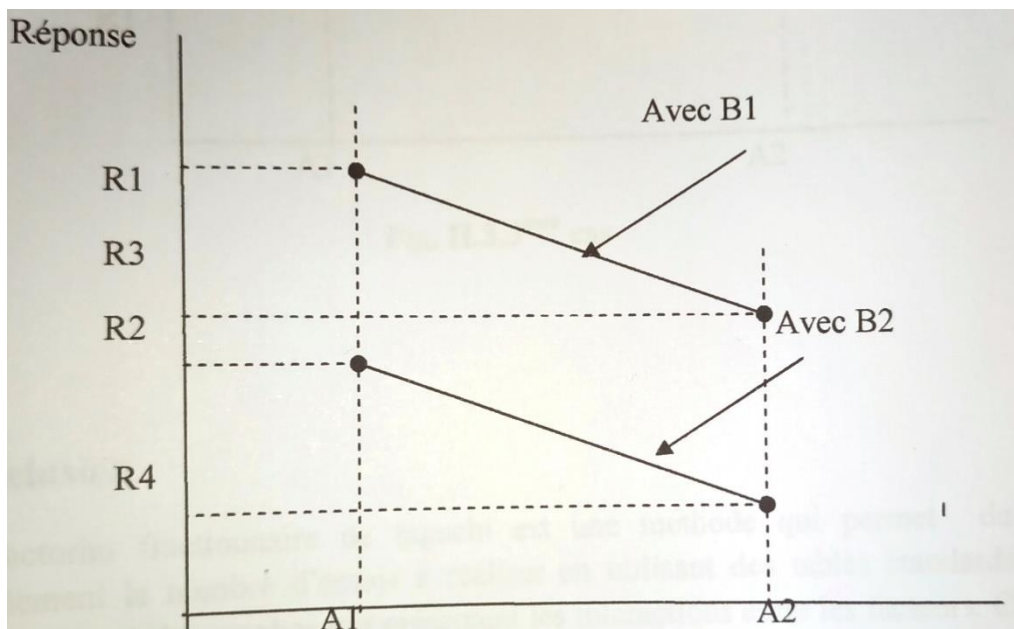


Figure II-7 : 1 er cas

2 cas : la figure représente qu'on les droites ne sont pas parallèles il y a interaction. L'effet de A n'est pas indépendant des niveaux de B (figure II-8).

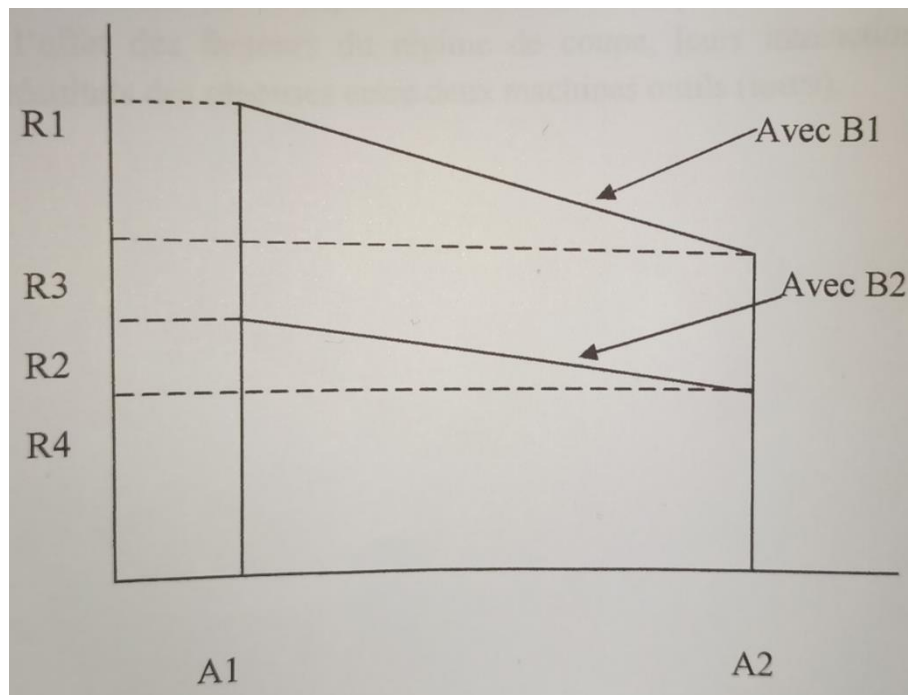


Figure II-8 : 2<sup>ème</sup> cas

Cas 3 : les droites se coupent il y a une très forte interaction. L'effet de A s'inverse selon le niveau de B figure II-9).

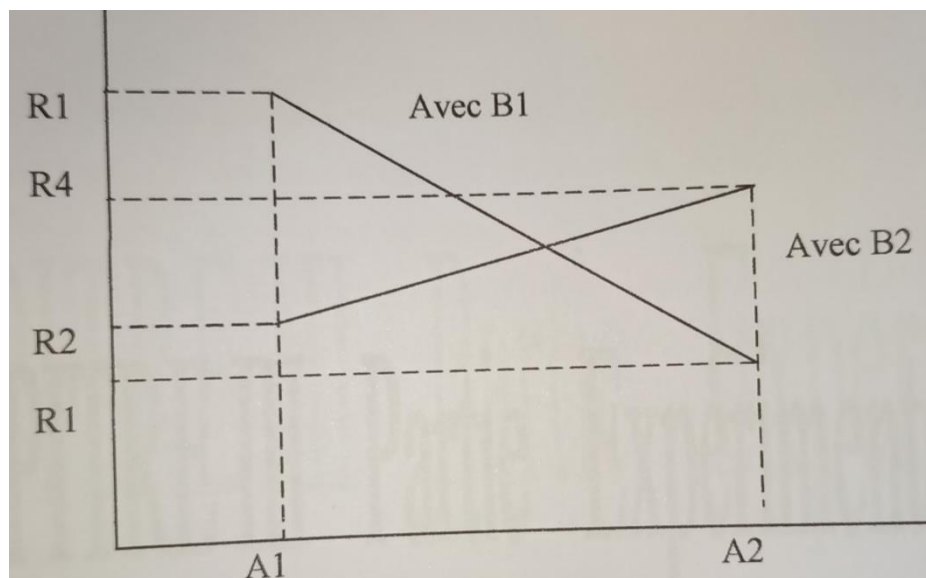


Figure II-9 : 3<sup>ème</sup> cas

### ✚ Les Tables de Taguchi

Le plan de Plackett et Burman, où +1 a été remplacé par 1 et -1 a été remplacé par 2. Le nom du programme a également été traduit. Il existe plusieurs plans, tels que le plan à 8 tests appelé L8, le plan à 12 tests L12 ; une conception de Plackett et Burman. Initialement, ces plans étaient utilisés avec des modèles sans interaction. Aujourd'hui, certaines personnes leur appliquent les résultats et les principes de la théorie classique.

Les plans expérimentaux basés sur les principes de Taguchi sont très populaires dans le domaine de la qualité. [15]

### II.2.3 Définition de Taguchi aux plans d'expériences :

- Modélisation avec des diagrammes de Taguchi

Le Dr Taguchi a suggéré que nous placions les problèmes dans des diagrammes en suivant certaines règles de représentation.

- Facteurs :

Ils sont représentés par des cercles différents selon la difficulté de modification d'un niveau à l'autre. Taguchi distingue quatre groupes de facteurs qui seront exprimés de différentes manières

- Interaction : L'interaction entre deux facteurs sera représentée par une ligne entre les deux facteurs. Donc, si nous voulions représenter l'interaction entre le facteur A dans le groupe 1 et le facteur B dans le groupe 4, nous tracerions :



Figure II-4 :traitement des interactions

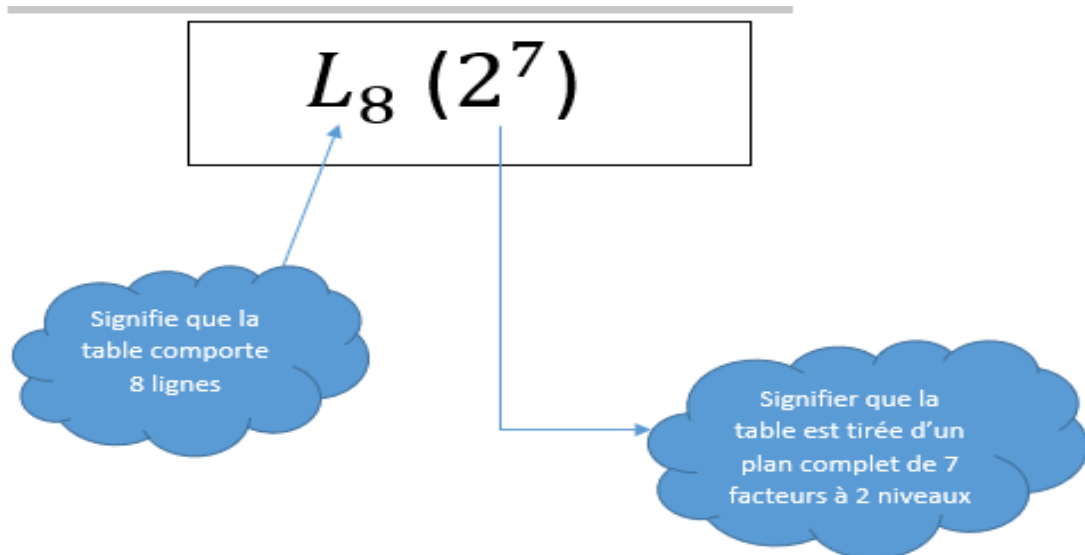


Figure II-11 : modèle de Taguchi

On a comme exemple la table  $L8 (2^7)$  Nous rappelons que

Chaque ligne du tableau représente une expérience, et chaque colonne vous permet de placer un facteur. Lorsqu'un facteur est de 1, il sera placé au minimum et lorsqu'il est de 2, il sera placé au maximum. Des facteurs qualitatifs peuvent également être étudiés, comme deux fournisseurs différents. Le niveau 1 représente le premier fournisseur et le niveau 2 représente le deuxième fournisseur. [15]

Tableau II-1 : table taguchi  $L8 (2^7)$ 

N°	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

### II.2.4 Utilisation de la table de Taguchi table

Pour pouvoir utiliser ce tableau, nous devons rapprocher le graphique de notre application du graphique de Taguchi, et si nous comparons le premier graphique de Taguchi avec le graphique de notre application, nous verrons une certaine similitude. [15]

Interprétation des résultats :

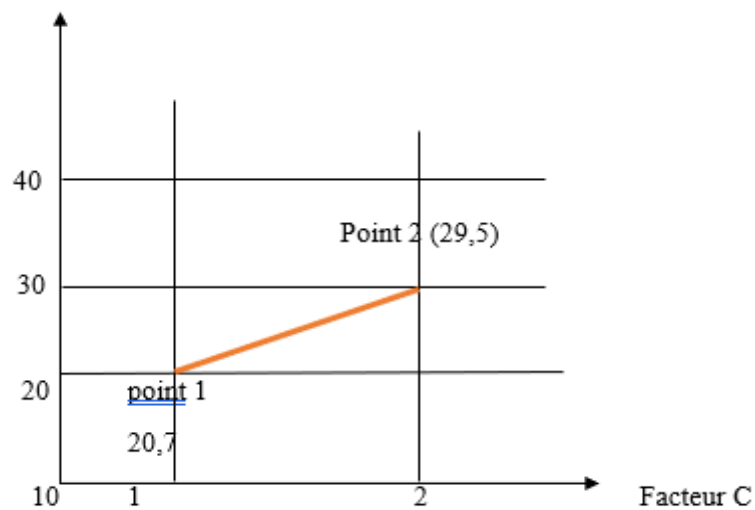


Figure II-12 : graphe des effets du facteur C

Tableau II-2 : table d'interaction CD

	1	2
1	C1D1 (point 1)  Essai 1et 5	C2D1 (point 3)  Essais 3 et 7
2	C1D2 (point 2)  Essais 2 et 6	C2D2 (point 4)  Essais 4 et 8

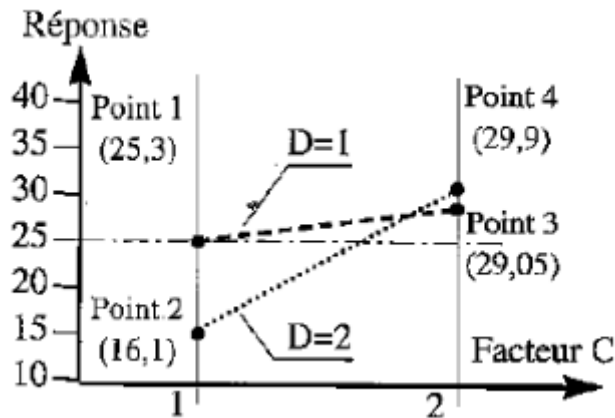


Figure II-13 : graphe de l'interaction CD

### II.3 Conclusion

La conception d'expériences offre un moyen simple et efficace de réduire les coûts et d'augmenter la robustesse des études expérimentales réalisées lors de la conception ou de la validation de produits industriels. Ils permettent d'utiliser toutes les connaissances produit que le concepteur peut avoir a priori, fournissent un cadre de modélisation rigoureux, et leur mise en œuvre ne nécessite que des connaissances mathématiques de base. Bien sûr, cette ressource ne fournit qu'un aperçu et des exemples des possibilités de cette approche.



CHAPITRE

III

PARTIE

EXPERIMENTALE

### III. CHAPITRE3 : MATERIELS ET METHODES

#### III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une partie expérimentale à travers laquelle, nous examinerons la réponse de la machine-outil (tour modèle 16K20) vis-à-vis de la variation des paramètres du régime de coupe. L'étude est orientée sur la rugosité de la surface réalisée du matériau (XC48) largement employé dans l'industrie mécanique. L'expérimentation est menée par la méthode des plans d'expériences de Taguchi.

#### III.2 Matériau de la pièce

##### ✚ Nuance :

Les analyses chimiques du matériau réalisées au Laboratoire centrale de SIDER, ont révélé la nuance suivante : (0,46-0,50) C ; (0,24) Si ; (0,50-0,80) Ma ; ( $\leq 0,025$ ) S ; ( $\leq 0,026$ ) P.

Cette nuance correspond à l'acier **XC48**

##### ✚ Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques du matériau sont :

$R_m=580 \text{ N/mm}^2$  ;  $R_e=295 \text{ N/mm}^2$  ;  $A= 15\%$  ;  $H_v=348,17 \text{ Kgf /mm}^2$  ;  $HB=330.76$ .

L'ébauche est fournie sous forme de barreau laminé (figureIII.1)



Figure III-1: Ebauche XC48 forgé

### III.3 Méthodologie et essais expérimentaux

L'ébauche est préalablement préparée sous forme d'échantillon (pièce d'essai) et utilisé pour effectuer les essais expérimentaux permettant d'atteindre l'objectif ciblé dans ce travail, en l'occurrence, l'examen du tour **16k20, modèle BOSCH CNV ALPHA2**. Le test a été réalisé conformément au schéma de la figure III.2.

#### Machine-outil

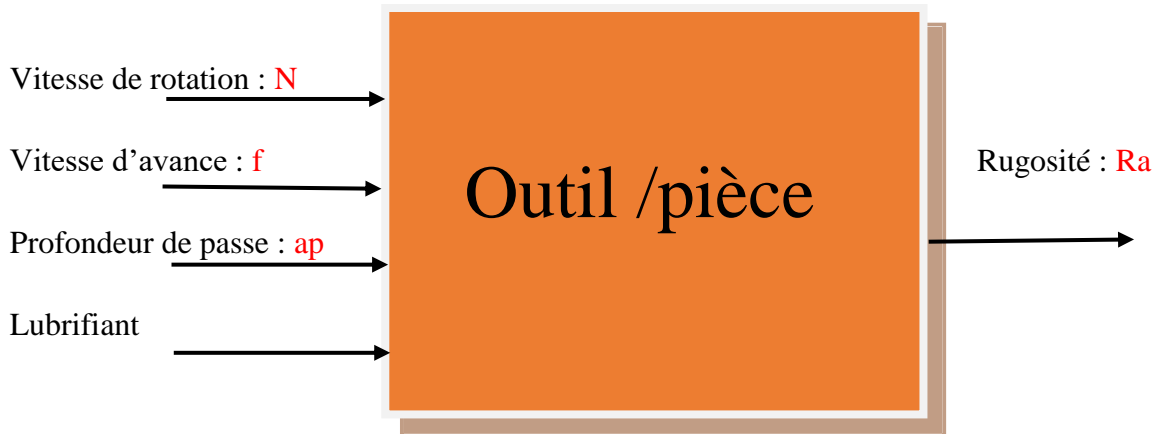


Figure III-2

#### 📌 Pièce (Echantillon d'essai)

La pièce a été subdivisée en 18 paliers avec un régime de coupe établie par des essais préliminaires. On a utilisé 16 paliers pour les essais avec le plan Taguchi  $2^4$ , les paliers restants sont considérés comme des témoins figure III.3

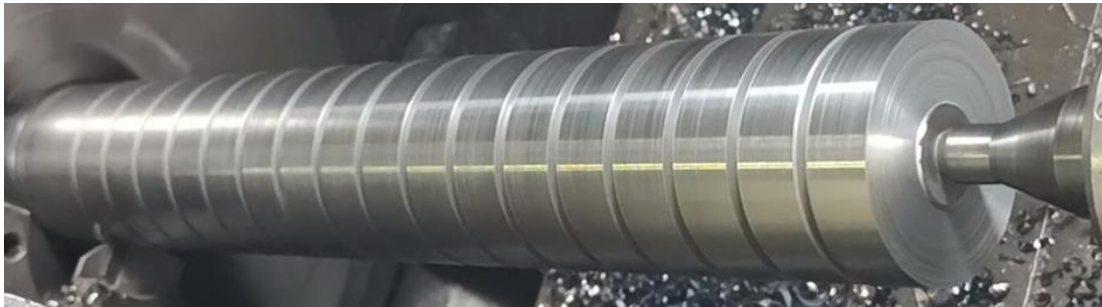
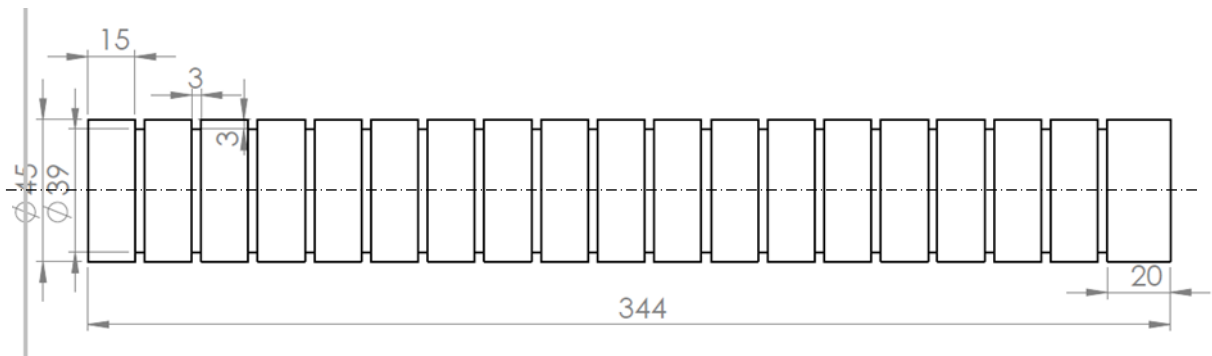


Figure III-3 éprouvette

## ✚ Machine-Outil

La machine-outil à examiner (Tour 16k20) est montrée sur la figure III.4.



Figure III-4 Tour à commande numérique 16K20, BOSCH CNV ALPHA2

- **Les caractéristiques du tour**

- Gamme des fréquences de rotation :

Gamme I : 20-345 tr/min

Gamme II : 60-1000 tr/min

Gamme III : 145-2500 tr/min

- Gamme des avances :

Longitudinale : 4800 mm/min

Transversale 2400 mm/tr

- Programmation on code G

- Puissance du moteur principal : 11 KW

### Outil de coupe

Pour l'exécution de ce travail on a choisi un outil à plaquette rapportée en carbure métallique de nuance P20, voir figure III.5.



*Figure III-5 Outil à plaquette rapportée P20*

### Démarche méthodologique

Le but de l'expérience est d'examiner la réponse de la machine-outil (tour), en l'occurrence, la qualité de la surface usinée représentée par sa rugosité "Ra", vis-à-vis des régimes de coupe adoptés, d'une part. D'autre part, d'analyser les effets des paramètres du régime et de déterminer les valeurs donnant la meilleure réponse "Ra". Ce qui permettra de porter un jugement sur l'état de santé de la Machine-outil.

### Méthode et expérimentation

La conduite de l'expérimentation est effectuée à l'aide du plan de Taguchi, en l'occurrence, la table L16 où sont considérés quatre facteurs à 2 niveaux (paramètres de coupe).

Les facteurs considérés sont :

- Profondeur de passe  $a_p$
- Fréquences de rotation  $N$
- Vitesse d'avance  $f$
- Lubrification de la zone de coupe

Les niveaux des paramètres sont choisis d'après A. Chevalier [16]

- Profondeur de passe " **$a_p$** " :

$A_1$  : niveau 1  $\rightarrow a = 0,5$  mm

$A_2$  : niveau 2  $\rightarrow a = 1,5$  mm

- Fréquence de rotation " **$N$** " :

$B_1$  : niveau 1  $\rightarrow N = 460$  m/min

$B_2$  : niveau 2  $\rightarrow N = 700$  m/min

- Vitesse d'avance " **$f$** " :

$C_1$  : niveau 1  $\rightarrow f = 0,2$  mm/tr

$C_2$  : niveau 2  $\rightarrow f = 1.14$  mm/tr

Lubrifiant "D" :

D<sub>1</sub> : avec lubrifiant

D<sub>2</sub> : sans lubrifiant

 **Construction du plan d'expérience :**

D'après les modèles des tables construites par Taguchi pour un modèle de quatre facteurs on adopte la table L16 ( $2^4$ ). L'ordre dans lequel on réalise les essais est présenté sur le tableau III.1.

D'après le tableau, on peut tracer le graphe linéaire de départ de la figure. Le premier graphe de la figure est le mieux adapté à cette étude d'où la répartition suivante des facteurs et leurs interactions

*Tableau III-1 Rangement et répartition des facteurs*

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Facteur	A	B	I <sub>AB</sub>	C	I <sub>AC</sub>	I <sub>BC</sub>	D	I <sub>AD</sub>	I <sub>BD</sub>	I <sub>CD</sub>

La matrice des essais est illustrée sur le tableau III.1, tableau qui illustre le niveau de résolution du plan selon Taguchi.

Tableau III-2 Matrice d'expériences (table de Taguchi L16)

	A	B	AB	C	AC	BC	D	AD	BD	CD
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1
5	1	2	2	1	1	2	1	1	2	1
6	1	2	2	1	1	2	2	2	1	2
7	1	2	2	2	2	1	1	1	2	2
8	1	2	2	2	2	1	2	2	1	1
9	2	1	2	1	2	1	1	2	1	1
10	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2
11	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2
12	2	1	2	2	1	2	2	1	2	1
13	2	2	1	1	2	2	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	1	2	2	2
16	2	2	1	2	1	1	2	1	1	1

### Mesure des rugosités

Les mesures de rugosité ont été opérées au laboratoire de complexe Sider El Hadjar à l'aide d'un rugosimètre à palpeur, modèle SJ210 surf test rugosité (figure III.6).

Caractéristique :

Unité d'avance :

Vitesse d'avance : 0,25 mm/s ; 0,5 mm/s ; 0,75 mm/s. Course totale 17,5 mm.



Détecteur standard : Plage de mesure 360  $\mu\text{m}$ . Stylet en diamant.

Rayon de patin : 40 mm.

Unité d'affichage : Paramètres de rugosité : Ra, Rc, Ry, Rz, Rt, Rmax, Rp, Rv, R3z ...

Normes de rugosité : JIS, DIN EN ISO, ANSI VDA, motifs et conditions libres.



*Figure III-6 Rugosimètre*

### Résultats expérimentaux

Les résultats des essais avec les différents régimes selon la table de Taguchi L16 ; sont illustrées dans le tableau III.3.

Tableau III-3 Matrice des essais et résultats

N° d'essais	Avances "f" (mm/tr)  C	Fréquence de rotation "N" (m/min)  B	Profondeur de passe "a" (mm)  A	Lubrification  D	Rugosité			
					Ra1	Ra2	Ra3	Ramoy
1	0.2	460	0.5	OUI	1.72	1.93	1.83	1,8266
2	0.2	460	0.5	NON	1.07	1.03	1.01	1,0366
3	1.14	460	0.5	OUI	0.96	0.97	0.96	0,9633
4	1.14	460	0.5	NON	0.94	0.92	0.92	0,9266
5	0.2	700	0.5	OUI	0.81	0.82	0.80	0,81
6	0.2	700	0.5	NON	0.67	0.66	0.71	0,68
7	1.14	700	0.5	OUI	0.98	0.96	0.96	0,9666
8	1.14	700	0.5	NON	0.94	0.94	0.94	0,94
9	0.2	460	1.5	OUI	0.55	0.55	0.55	0,55
10	0.2	460	1.5	NON	0.60	0.60	0.63	0,61
11	1.14	460	1.5	OUI	0.95	0.99	1.00	0,98
12	1.14	460	1.5	NON	1.06	1.01	1.03	1,033
13	0.2	700	1.5	OUI	0.70	0.69	0.68	0,69
14	0.2	700	1.5	NON	0.57	0.56	0.57	0,5666
15	1.14	700	1.5	OUI	0.98	0.97	0.98	0,9766
16	1.14	700	1.5	NON	0.95	0.96	0.97	0,96

### III.4 Traitement des résultats

Le traitement des données a été effectué à l'aide du logiciel Minitab, qui a fourni les résultats suivants :

#### Equation de régression

$$Ra = 1,634 - 0,263 A - 0,000865 B + 0,087 C + 0,086 D$$

#### Effets principaux pour la rugosité Ra

Le graphique des effets des paramètres du régime sur la rugosité Ra est représenté sur la figure III.7 :

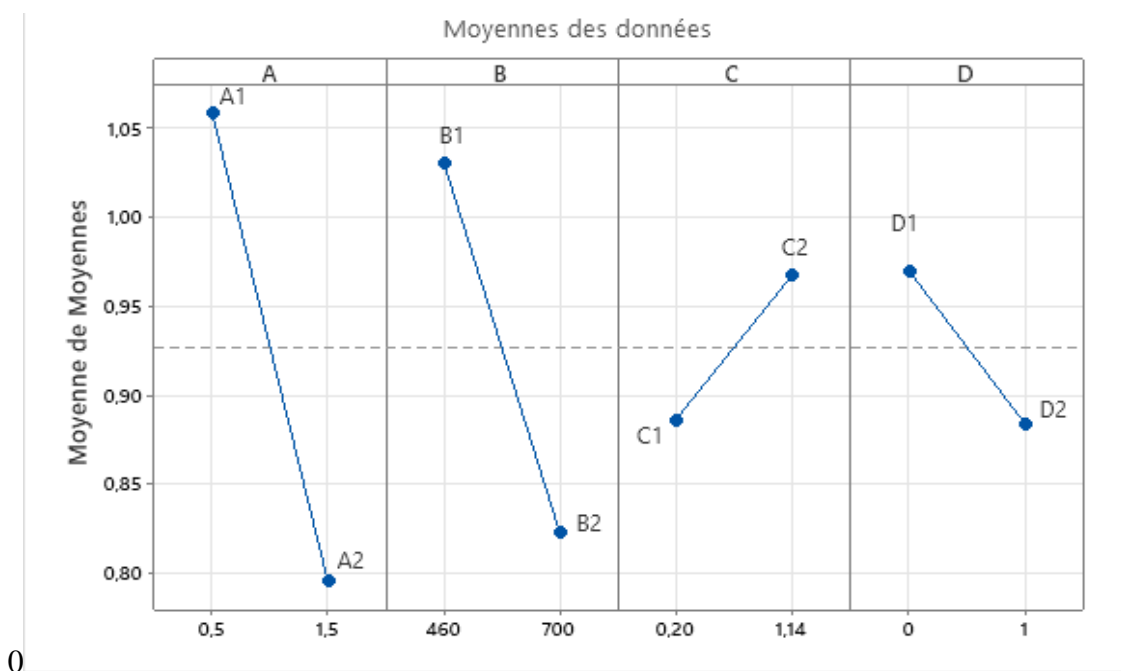


Figure III-7 Graphique des effets principaux

#### Diagramme des interactions pour Ra

Le graphique des effets des interactions des paramètres du régime sur la rugosité Ra est montré sur les figures suivantes :

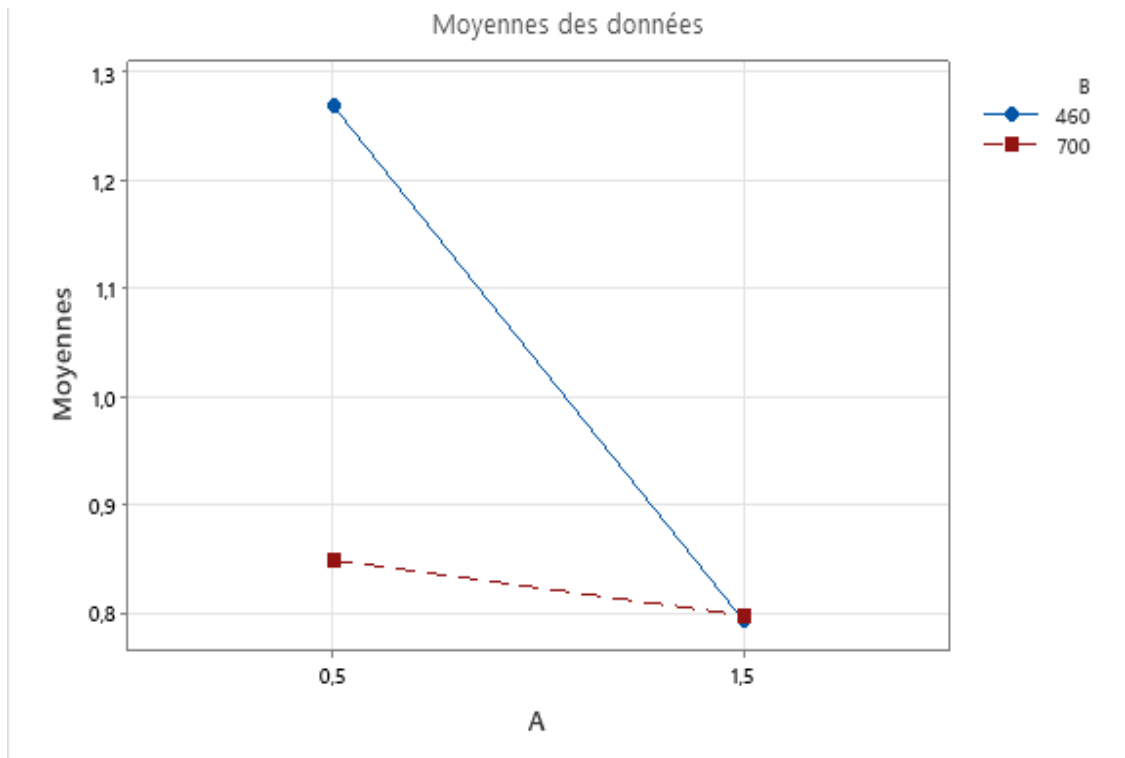


Figure III-8 Diagramme de l'interaction des facteurs A et B

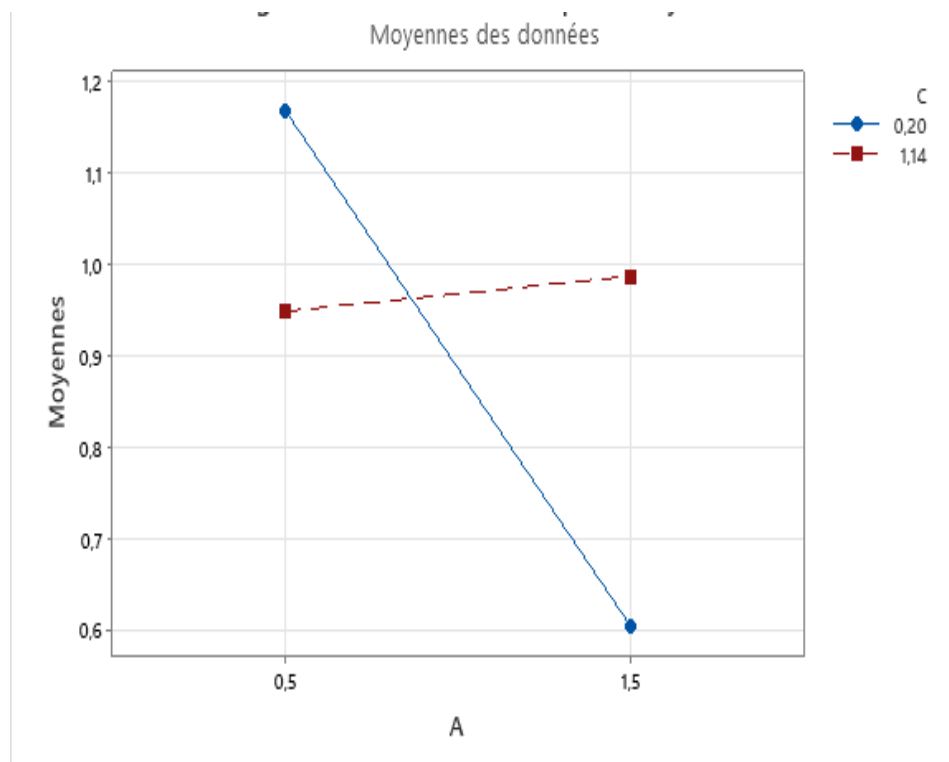


Figure III-9 Diagramme de l'interaction des facteurs A et C

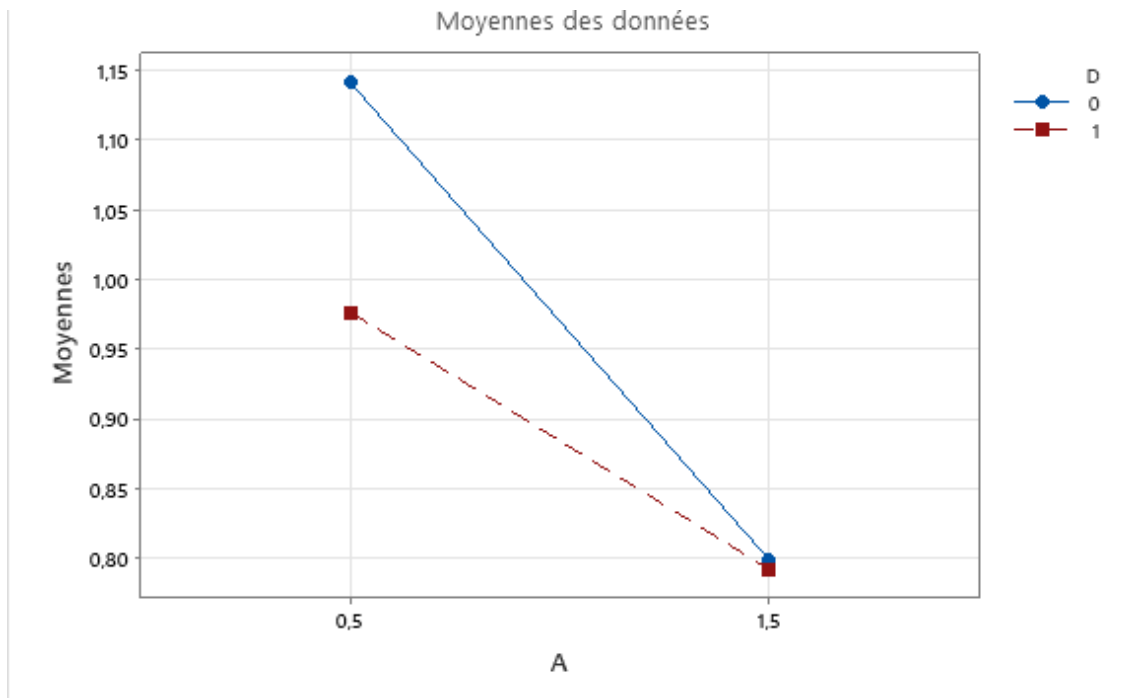


Figure III-10 Diagramme de l'interaction des facteurs A et D

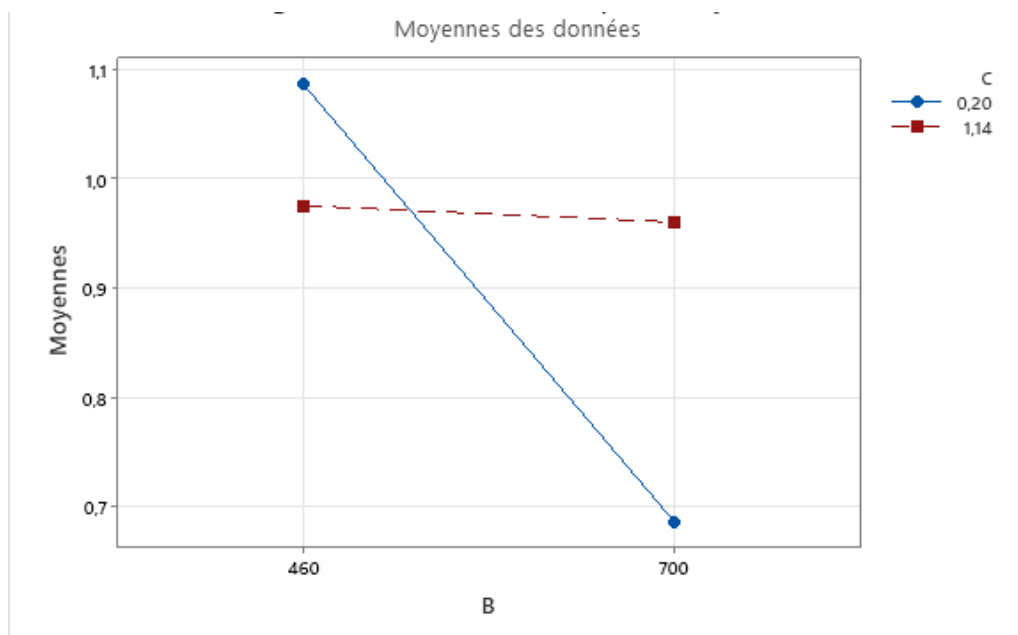


Figure III-11 Diagramme de l'interaction des facteurs B et C

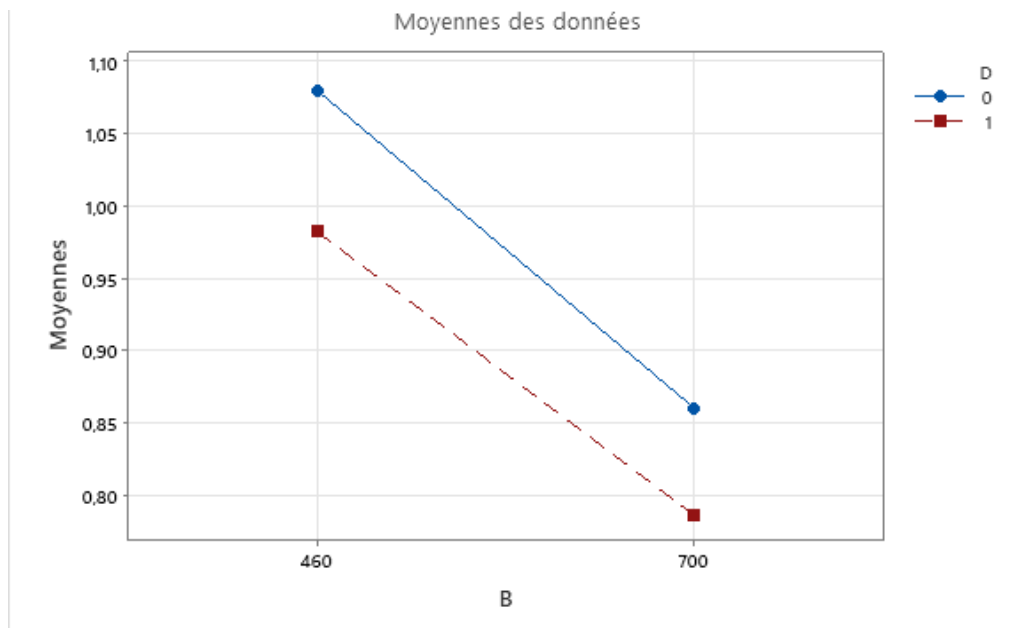


Figure III-12 Diagramme de l'interaction des facteurs B et D

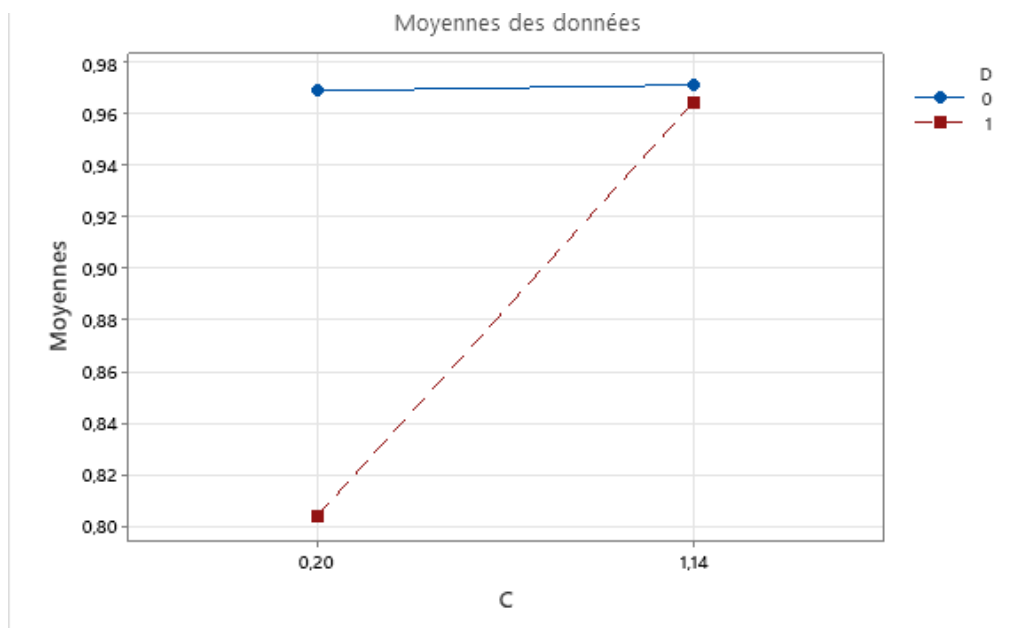


Figure III-13 Diagramme de l'interaction des facteurs C et D

### Diagramme de Pareto des effets normalisés

L'importance des effets des paramètres et de leurs interactions au niveau de confiance de 75% est montrée sur le graphique de la figure III.14.

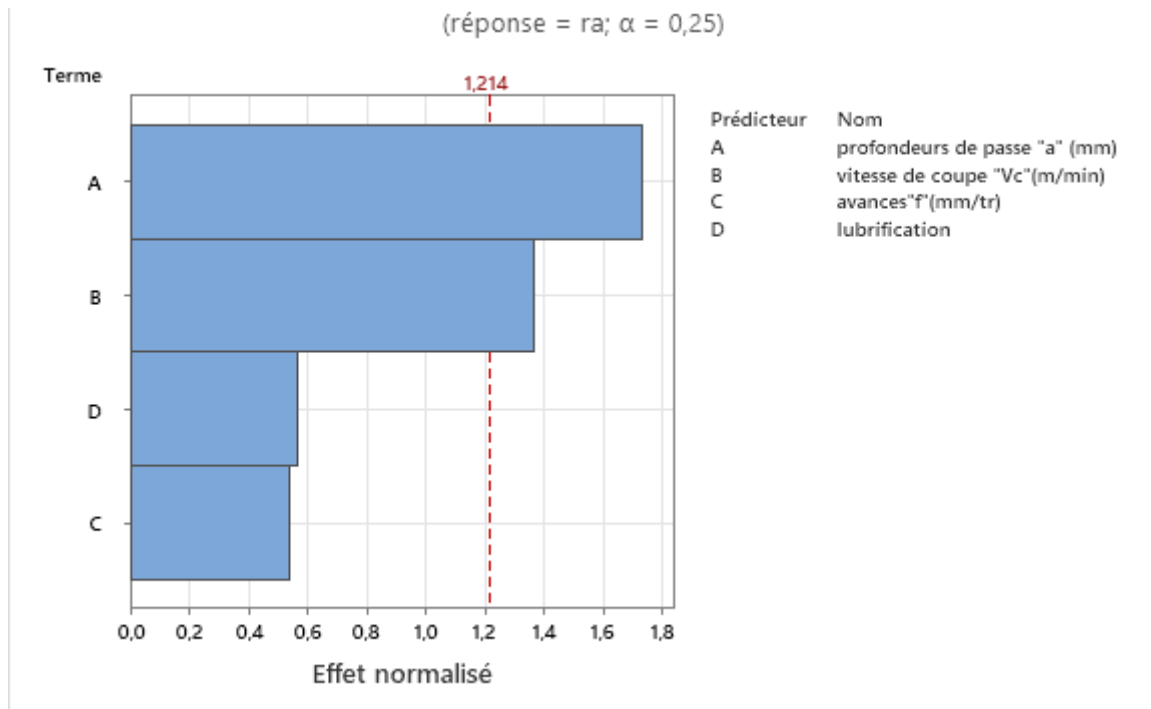


Figure III-14 Diagramme de Pareto des effets normalisés

### III.5 Interprétation des résultats

#### 🚦 Graphe des effets principaux

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

#### 🚦 Diagramme des interactions

- Interaction entre A et B, lorsque A augmente et B diminue, on enregistre une faible interaction entre la profondeur de passe et la fréquence de rotation où  $a_p$  ne dépend pas de N.
- Interaction entre A et C, lorsque A augmente et C diminue, présence d'une forte interaction, observée entre la profondeur de passe et l'avance où  $a_p$  dépend de f.

- Interaction entre A et D, lorsque A augmente et D diminue, on enregistre une faible interaction, manifestant entre la profondeur de passe et lubrification où  $a_p$  ne dépend pas de D.
- Interaction entre B et C, lorsque B augmente et C diminue, correspond d'une forte interaction, observée entre la fréquence de rotation et l'avance où N dépend de f.
- Interaction entre B et D, lorsque B augmente et D diminue, pas d'interaction entre la fréquence N et lubrification D où N ne dépend pas de D.
- Interaction entre C et D, lorsque C augmente et D diminue, pas d'interaction entre l'avance f et lubrification D où f ne dépend pas de D.

### 🚩 Diagramme de Pareto

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

### 🚩 Graphe des rapports Signal/Bruit

L'interprétation des résultats expérimentaux est effectuée à partir de l'analyse du graphe représentant le Ratio Signal/Bruit, illustré sur le graphique de la figure III.15

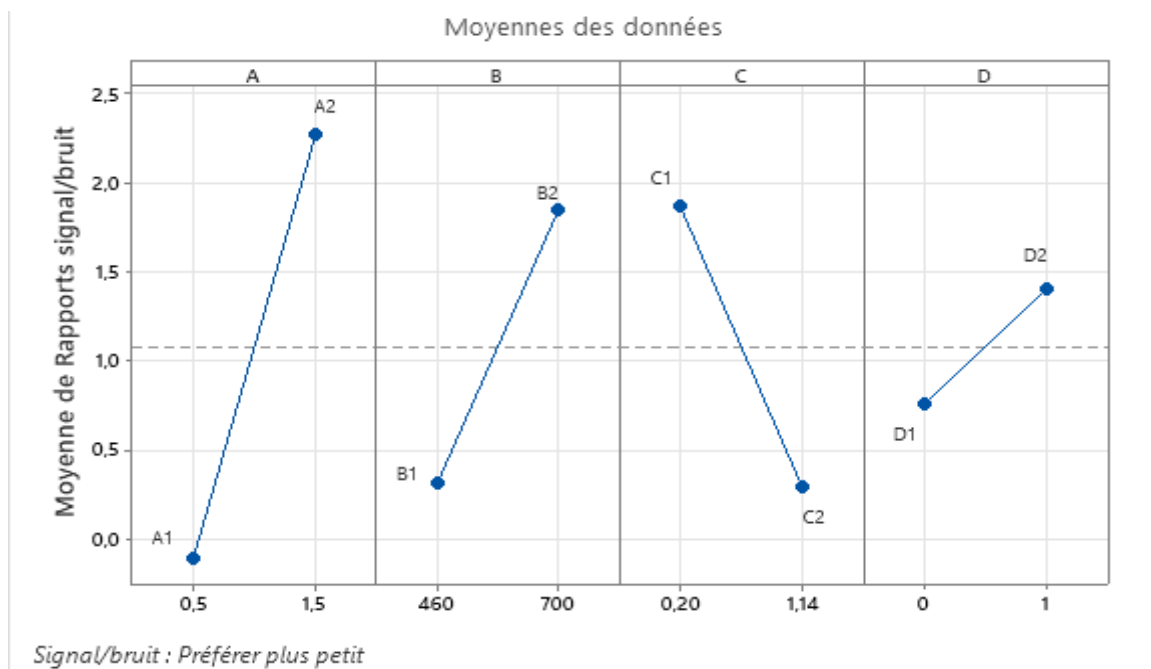


Figure III-15 Graphique des effets principaux pour rapports signal/bruit



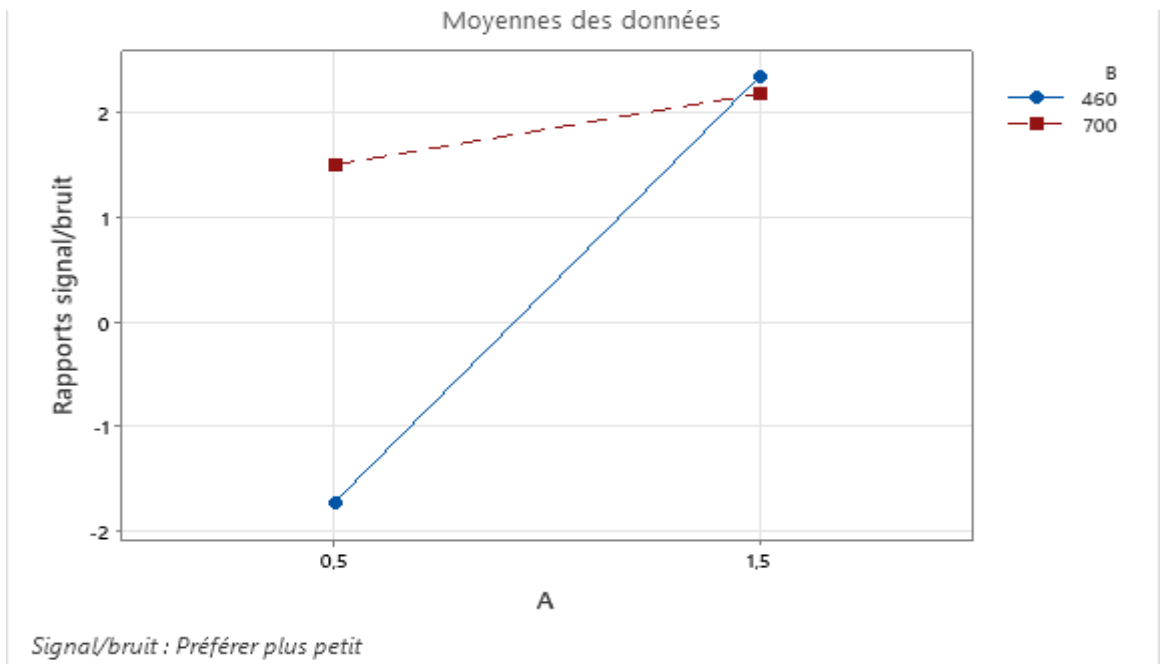


Figure III-16 Diagramme des interactions pour rapport S/B des facteurs A et B

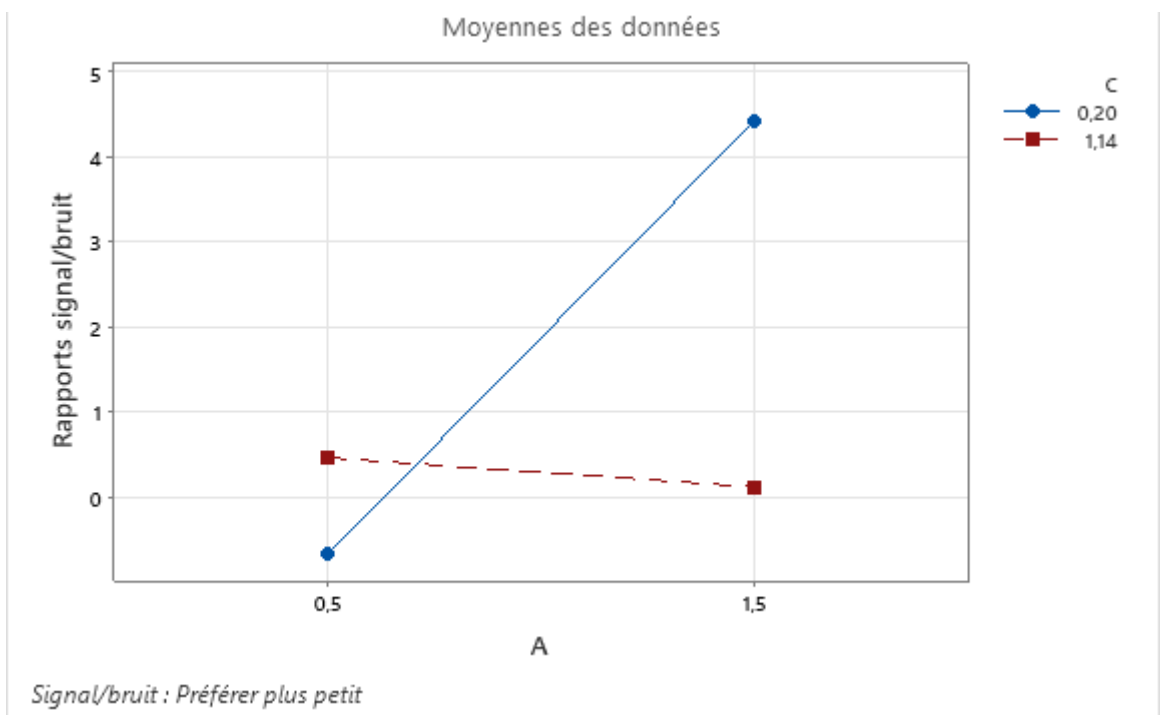


Figure III-17 Diagramme des interactions pour rapport S/B des facteurs A et C

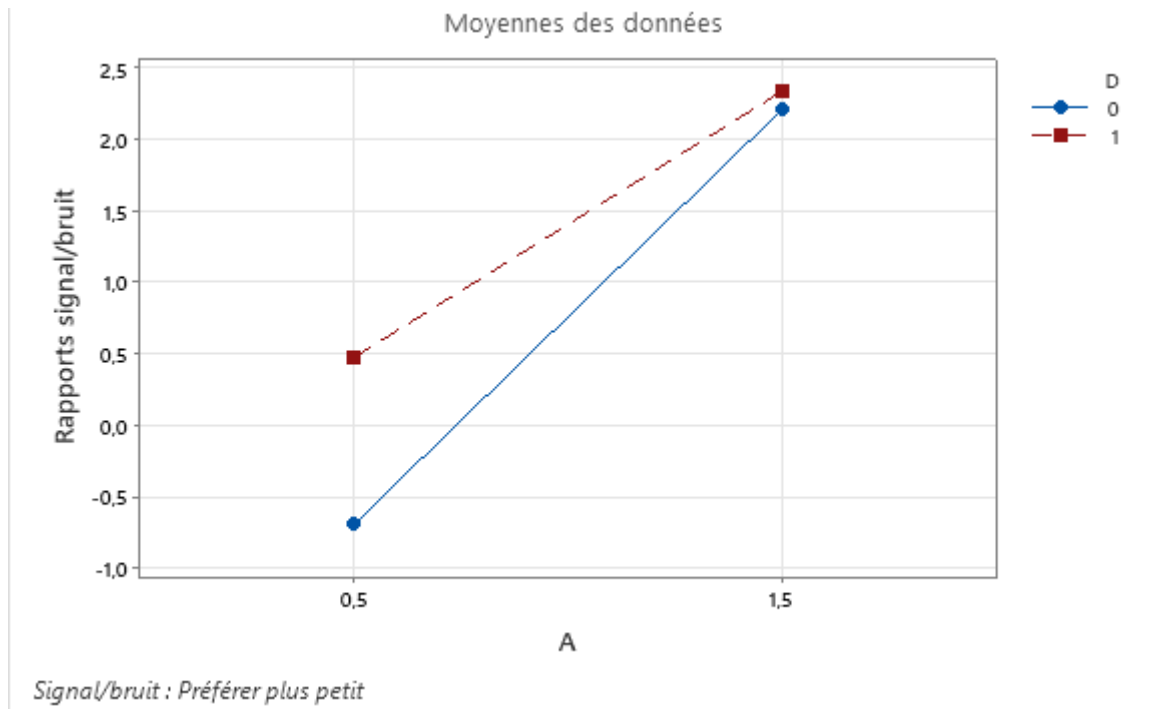


Figure III-18 Diagramme des interactions pour rapport S/B des facteurs A et D

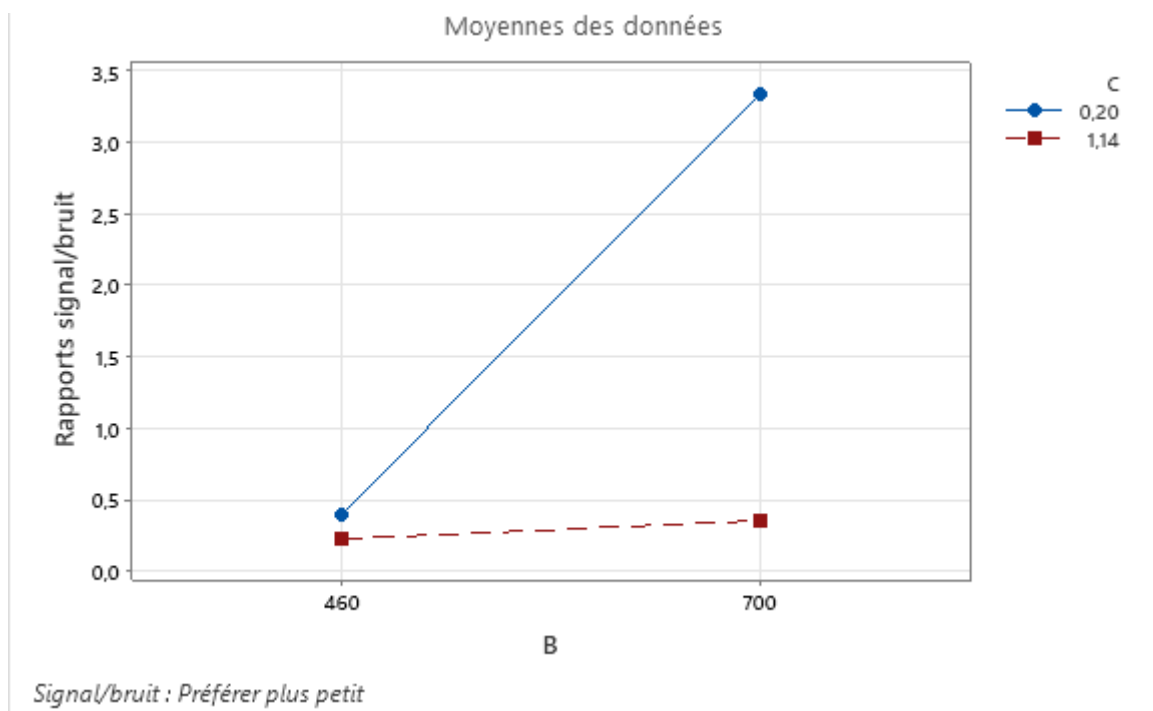


Figure III-19 Diagramme des interactions pour rapport S/B des facteurs B et C

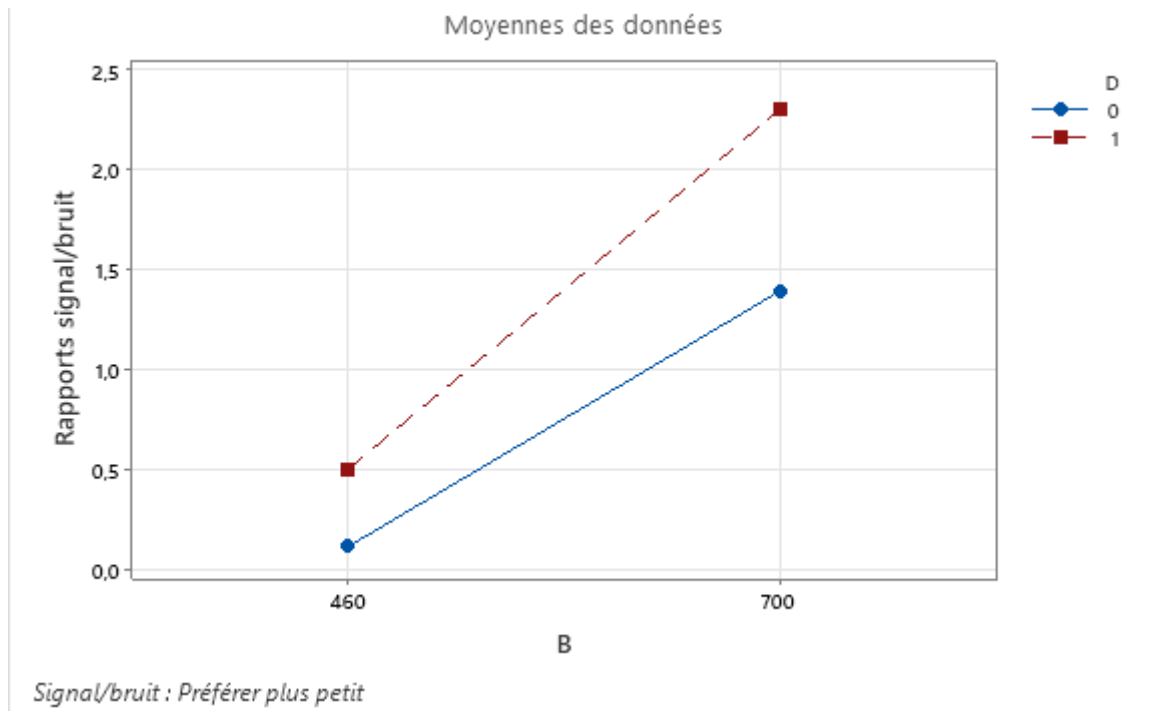


Figure III-20 Diagramme des interactions pour rapport S/B des facteurs B et D

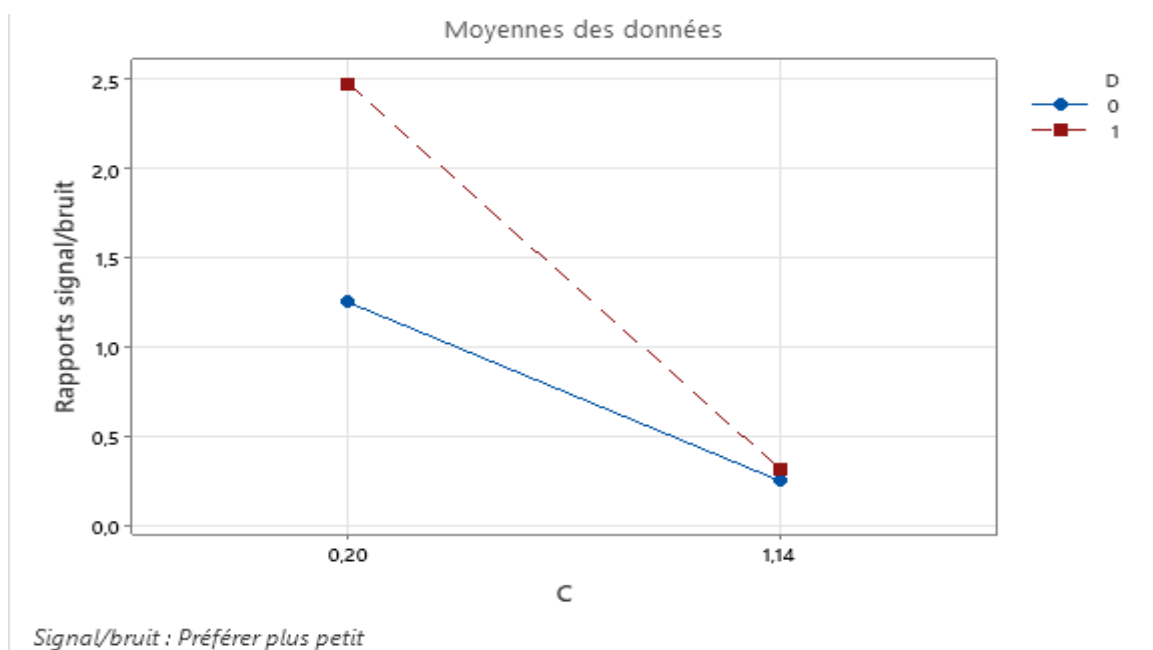


Figure III-21 Diagramme des interactions pour rapport S/B des facteurs C et D

**Interprétation des résultats**

◆ **Graphe des effets principaux**

- Lorsque le facteur A1 est au niveau 1, nous enregistrons un signal/bruit minimal, et lorsque le facteur A2 est au niveau 2, le signal/bruit est maximal.

- Le facteur B :

Lorsque B1 est niveau 2 nous enregistrons le rapport signal/ bruit maximal et B1 au niveau 1 le rapport signal/bruit est minimal.

- Le facteur C :

Quand le facteur C est au niveau 2 (C2) le rapport signal/bruit acquière une valeur minimale et au niveau 1 (C1) le rapport signal/bruit est maximal.

- Le facteur D :

Lorsque le facteur D est au niveau 2 (D2), nous enregistrons le rapport signal/bruit maximal, et lorsqu'il est au niveau 1 (D1), le rapport signal/bruit est minimal.

- **Diagramme des interactions**

- Interaction des paramètres A et B :

Forte interaction entre la profondeur de passe (facteur A) et la fréquence de rotation (facteur B).

- Interaction des paramètres A et C :

Forte interaction entre la profondeur de passe (facteur A) et l'avance (facteur C).

- Interaction des paramètres A et D :

Pas d'interaction entre la profondeur de passe (facteur A) et lubrification (facteur D).

- Interaction des paramètres B et C :

Pas d'interaction entre la fréquence de rotation (facteur B) et l'avance (facteur C).

- Interaction des paramètres B et D :

Pas d'interaction entre la fréquence de rotation (facteur B) et la lubrification (facteur D).

- Interaction des paramètres C et D :

Pas d'interaction entre l'avance (facteur C) et la lubrification (facteur D).

Les résultats de l'expérimentation et du traitement des données sont consignés dans le tableau III.4.

Tableau III-4 résultats des essais

	Profondeurs de passe "a" (mm)	Fréquence de rotation "N"(m/min)	Avances (mm/tr)	Lubrification	Ra	Rapport S/B
1	0,5	460	0,20	Avec	1,826	-5,23002
2	0,5	460	0,20	Sans	1,360	-2,67078
3	0,5	460	1,14	Avec	0,963	0,32747
4	0,5	460	1,14	Sans	0,926	0,66778
5	0,5	700	0,20	Avec	0,810	1,83030
6	0,5	700	0,20	Sans	0,680	3,34982
7	0,5	700	1,14	Avec	0,966	0,30046
8	0,5	700	1,14	Sans	0,940	0,53744
9	1,5	460	0,20	Avec	0,550	5,19275
10	1,5	460	0,20	Sans	0,610	4,29340
11	1,5	460	1,14	Avec	0,980	0,17548
12	1,5	460	1,14	Sans	1,033	-0,28201
13	1,5	700	0,20	Avec	0,690	3,22302
14	1,5	700	0,20	Sans	0,566	4,94367
15	1,5	700	1,14	Avec	0,976	0,21100
16	1,5	700	1,14	Sans	0,960	0,35458

D'après ces résultats, nous enregistrons que la valeur du rapport S/B la plus élevée est Ra 5,19  $\mu\text{m}$ , ce qui explique que le régime correspondant offre le meilleur résultat. En effet, ce régime permet d'obtenir la plus faible valeur de rugosité « voire tableau position 9 », où les paramètres de coupe sont :  $a_p = 1,5$  mm de coupe,  $V_c = 460$  tr/min,  $f = 0,2$  mm/tr avec lubrification.

De même, la valeur du rapport élevée ( $SB1 = 4,94$ ) « position 14 dans le tableau », permet une rugosité faible Ra 0,56  $\mu\text{m}$  pour les mêmes valeurs des paramètres d'avance et de profondeur de passe. Ce qui permet de confirmer que ces paramètres ont une grande influence, et que l'usinage peut se faire avec ou sans lubrifiant malgré une vitesse plus élevée.

### III.6 Conclusion

Les valeurs de rugosité obtenues lors des essais sur la machine-outil (tour 16K20) sont acceptables. En effet, elles se trouvent dans la marge (0.5-1.8  $\mu\text{m}$ ) pour les différents paramètres d'usinage adoptés. Ces résultats permettent d'affirmer que le tour demeure en bon état puisqu'il répond convenablement aux normes de l'usinage sur tour qui sont illustrées sur le tableau (voir annexe 1).

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail est de réaliser le contrôle d'une machine-outil (Tour 16K20, modèle Bosch CNV ALPHA 2), très sollicitée aux ateliers AMM Sider. L'expertise de la machine a été effectuée au moyen de l'exécution d'une expérimentation par l'emploi d'une méthodologie scientifique avec une approche par les plans d'expériences de Taguchi. Le travail présenté dans ce mémoire de fin d'études a été orienté vers l'analyse de la qualité de surface, en l'occurrence, la rugosité produite par usinage, considérée comme indicateur de l'état de santé de la machine-outil.

Les résultats obtenus dans ce travail relèvent des essais expérimentaux qui ont été réalisés sur un échantillon en acier XC 48, largement utilisé dans l'industrie. L'accomplissement des essais a été effectué au moyen de la méthode de Taguchi (table L16), ce qui a permis de juger l'influence des paramètres du régime de coupe (N, f, ap, lubrifiant) sur la réponse de sortie (Ra). Le traitement des données par Minitab a permis de porter un jugement sur l'état de la machine-outil (tour 16 K20), de formuler le diagramme de Pareto, de mettre en relief les interactions entre les paramètres et de déterminer les régimes de coupe les plus adéquats à travers le Ratio Signal/ Bruit (5,19275). La simulation numérique présentée par les courbes a permis d'analyser les effets des paramètres de traitement (facteurs d'entrée) sur les réponses étudiées (facteur de sortie). La méthode de Taguchi offre donc la possibilité de fournir des informations qui serviront pour le réglage adéquat de la machine-outil. Elle permet également de faire un diagnostic suffisamment riche lors de l'expertise et aider à la maintenance des machines. Le programme de traitement informatisé permet l'archivage des informations (sous formes de fichiers listing) servant d'historique.

## Références :

- [1] Christian Mascle, Walery Wygowski « fabrication avancée et méthodes industrielles » tome 1 ; presses internationales (page 337-338).
- [2] M Daniel; Analysis and modeling of angular errors in precision sliding motion with application to machine tools. cecil.1998.
- [3] Christian Mascle et Walery Wygowski Précision dimensionnelle et géométrie p.208 [livre Advanced Manufacturing and Industrial Methods, volume 1 de la documentation produit dans la documentation de fabrication]
- Article, Bulletin technique de la Suisse romande; Link: <http://doi.org/10.5169/seals-62786>]
- [4] M Daniel Analysis and modeling of angular errors in precision sliding motion with application to machine tools. cecil.1998
- [5] mesures et incertitudes [https://www.lycee-champollion.fr/IMG/pdf/mesures\\_et\\_incertitudes.pdf](https://www.lycee-champollion.fr/IMG/pdf/mesures_et_incertitudes.pdf)
- [6] Barka Noureddine, Développement un système de mesure en temps réel des erreurs dans les machines-outils à axes multiples pour une compensation active, thèse De Doctorat, Université du Québec, Janvier 2005
- [7] mesures et incertitudes [https://www.lycee-champollion.fr/IMG/pdf/mesures\\_et\\_incertitudes.pdf](https://www.lycee-champollion.fr/IMG/pdf/mesures_et_incertitudes.pdf)
- [8] Christian Mascle et Walery Wygowski Précision dimensionnelle et géométrie [livre fabrication avancée et méthodes industrielles, tome 1 du dossier produit au dossier fabrication page 208]
- [10] Jean-Claude CHAUVEAU Jean-Paul CHASSAING C.N.E.D Génie Electrotechnique COMPLÉMENTS AU COURS D'ASSERVISSEMENT INTRODUCTION À LA METHODE DES PLANS D'EXPÉRIENCES PAR LA MÉTHODE TAGUCHI
- [11] Introduction à la méthode des plans d'expériences par la méthode Taguchi Jean-Claude CHAUVEAU, Jean-Paul CHASSAING



[12] Mr Pillet est l'auteur des ouvrages : "introduction aux plans d'expériences par la méthode Taguchi "

"Appliquer la maîtrise statistique des procédés (MSP/SPC) ". Parus aux Editions d'organisation.

[13] Maurice Pillet les plans d'expériences par la méthode Taguchi, Edition 2011

Sites internet :

<http://web.qlio.univ-savoie.fr/pillet/> <http://www.iut-acy.univ-savoie.fr>

<http://www.symme.univ-savoie.fr/>

[14] Jacques Goupy Les plans d'expériences ; revue modulad, 2006 N° 34 page (75, 76, 77,78)

[15] (la technique moderne N°7-8-8 1995)

[16] A. Chevalier, J. Bohan GUIDE DU TECHNICIEN EN FABRICATIONS MECANIQUE,

HACHETTE 1979,79 ; F 75006 Paris.

