

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

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

## Mémoire de Master

en vue de l'obtention du diplôme de Master en  
« Génie mécanique »

présenté par

ZERZAR Abdessalam

---

## Optimisation de la rugosité par le procédé de tribofinition avec l'application de plan de Box Behnken

---

mémoire soutenu en octobre 2015 devant le jury composé de :

Mr. Dj.SAIDI	ENP d'Alger (Promoteur)
Mr. M.BOUAZIZ	ENP d'Alger (président)
Mr. I.BELHADEF	ENP d'Alger (Examineur)

*Je profite de cette occasion pour dédier ce modeste travail :*  
*À celle qui m'est chère et qui m'a appris beaucoup. . . . Ma mère ;*  
*À celui qui m'a appris comment affronter la vie en souriant Mon père ;*  
*À Mes sœurs et frères ;*  
*À toute ma famille et mes proches ;*  
*À tous mes amis chacun par son nom ;*  
*À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*

*ZERZAR Abdessalam*

## **Acknowledgements**

Avant tout, je remercie ALLAH tout puissant de m'avoir donné la volonté et le courage de mener à bien ce travail.

je tiens à remercier en premier lieu mon promoteur Mr. SAIDI pour la confiance qu'il a placé en moi, pour sa permanente disponibilité, son investissement et ses précieux conseils qui m'ont guidés dans l'élaboration de ce travail.

j'adresse également mes remerciements à tous les membres du jury qui ont pris le soin de consulter mon document, et de juger mon travail.

j'adresse également mes remerciements à tous les enseignants du département de génie mécanique de l'école nationale polytechnique qui ont contribué à ma formation et qui m'ont aidé durant mon cursus.

## ملخص

في هذه الدراسة قمنا بنمذجة تجارب المعالجة السطحية باستعمال تقنية علاج المساحات وطريقة تصميم التجارب، قمنا باختيار مستوي Box-Behnken لنمذجة الخشونة بدلالة التردد، السعة وحجم الوسائط، تمت النمذجة باستعمال برنامج Minitab، قمنا كذلك بتحليل تأثير مختلف العوامل على الخشونة، النتائج المتحصل عليها تؤكد أن السعة لها تأثير أكبر مقارنة بالعوامل الأخرى

كلمات مفتاحية: معالجة سطحية، تصميم التجارب، مساحة الاستجابة

### résumé :

Dans cette étude, nous avons modélisé les expériences du traitement de surface par tribofinition par la méthode des plans d'expériences, on a choisi le plan de Box-Behnken pour modéliser la rugosité en fonction de la fréquence, l'amplitude et la taille des médias, la modélisation a été effectuée par le logiciel Minitab. nous avons ainsi analysé l'influence des divers paramètres sur la rugosité. il été établie que l'amplitude a plus d'influence que les autres facteurs.

Mots clés : tribofinition, plans d'expériences, surface de réponse .

### abstract

In this study, we modeled the experiments of surface treatment by the tribofinishing method of design of experiments, we chose the Box-Behnken design to model the roughness as a function of the frequency, amplitude and size of media, modeling was conducted by Minitab. We have analyzed the influence of various parameters on the roughness. The results confirm that the .amplitude factor has more influence than other factors

Key words: tribofinishing, design of experiments, response surface

# Table des matières

Table des matières	iv
Table des figures	vii
Liste des tableaux	viii
Nomenclature	viii
Introduction générale	1
<b>I traitement par tribofinition</b>	<b>2</b>
I.1 introduction . . . . .	3
I.2 Notions fondamentales de l'état de surface . . . . .	3
I.2.1 La surface . . . . .	3
I.2.2 État de surface . . . . .	3
I.2.3 Influence de la rugosité : . . . . .	4
I.3 traitement par tribofinition . . . . .	5
I.3.1 Paramètres du traitement par tribofinition . . . . .	7
I.3.2 Les milieux actifs (abrasifs) : . . . . .	7
I.3.3 Types de machines : . . . . .	8
I.3.3.1 Les vibrateurs circulaires : . . . . .	8
I.3.3.2 Les vibrateurs circulaires à grand rayon . . . . .	9

I.3.3.3	Les machines à force centrifuge . . . . .	10
I.3.3.4	Machines mono-broche . . . . .	11
I.3.3.5	Les machines multibroches type Smuritropie . . . . .	11
I.4	conclusion . . . . .	13
<b>II</b>	<b>plans d'expériences</b>	<b>14</b>
II.1	Introduction . . . . .	15
II.2	Terminologie : . . . . .	15
II.2.1	Types de facteurs . . . . .	16
II.2.1.1	Facteurs continus . . . . .	16
II.2.1.2	Facteurs discrets . . . . .	16
II.2.1.3	Facteurs ordonnables . . . . .	16
II.2.1.4	Facteurs booléens . . . . .	16
II.2.2	Espace expérimentale . . . . .	17
II.2.3	Domaine d'un facteur . . . . .	17
II.2.4	Points expérimentaux . . . . .	18
II.2.5	Domaine d'étude . . . . .	18
II.3	Surface de réponse . . . . .	20
II.3.1	Matrice d'expériences . . . . .	20
II.3.2	Les différents types de plans d'expériences . . . . .	21
II.3.2.1	Plans de criblage . . . . .	21
II.3.2.2	Plans de modélisation . . . . .	22
II.4	Choix du plan . . . . .	23
II.4.1	Plan de Box-Behnken . . . . .	23
II.4.1.1	Propriétés du plan de Box Behnken pour trois facteurs	24
II.4.1.2	Modèle mathématique . . . . .	25
II.5	Tests statistiques . . . . .	27

II.5.1	Test de Fisher . . . . .	27
II.5.2	Test de $R^2$ . . . . .	27
II.5.3	test de Student . . . . .	28
II.6	conclusion . . . . .	28
<b>III</b>	<b>Résultats et discussion</b>	<b>29</b>
III.1	Introduction . . . . .	30
III.2	le logiciel Minitab : . . . . .	30
III.3	domaine d'études . . . . .	31
III.4	matrice d'expériences . . . . .	32
III.5	Résultats, Analyse et interprétation . . . . .	32
III.5.1	Interprétation numérique . . . . .	33
III.5.1.1	Analyse de la variance . . . . .	33
III.5.1.2	Calcul des coefficients du modèle mathématiques . . . . .	34
III.5.1.3	Modèle mathématique . . . . .	35
III.5.2	Interprétation graphique . . . . .	36
III.6	graphiques des contours . . . . .	38
III.6.1	Surface de réponse . . . . .	39
III.7	Conclusion . . . . .	41
	<b>References</b>	<b>44</b>
	<b>References</b>	<b>44</b>

# Table des figures

I.1	schéma d'un vibreur du traitement par tribofinition . . . . .	6
I.2	quelques médias abrasifs . . . . .	8
I.3	schéma d'un vibreur circulaire . . . . .	9
I.4	machine à force centrifuge . . . . .	10
I.5	Schéma et éléments d'une machine à force centrifuge . . . . .	11
I.6	schéma d'une machine multibroches . . . . .	12
II.1	espace expérimentale constitué par deux axes gradués et orientés . . . .	17
II.2	domaine de variation d'un facteur . . . . .	18
II.3	schéma du domaine d'étude pour deux facteurs . . . . .	19
II.4	schéma du domaine d'étude pour deux facteurs avec contraintes . . . .	19
II.5	surface de réponse . . . . .	20
II.6	Illustration du plan de Box-Behnken pour trois facteurs . . . . .	25
III.1	graphique des effets principaux pour la rugosité . . . . .	36
III.2	schéma montrant l'effet de la taille des médias . . . . .	37
III.3	diagramme des interactions pour la rugosité . . . . .	37
III.4	graphiques du contour du rugosité en fonction des différents facteurs . .	39
III.5	graphiques du contour du rugosité avec taille des médias de 9mm . . .	39
III.6	surfaces de réponses . . . . .	41

# Liste des tableaux

I.1	éléments d'un vibrateur . . . . .	6
I.2	éléments d'un vibrateur circulaire . . . . .	9
I.3	éléments d'une machine multibroches . . . . .	12
II.1	matrice d'expériences . . . . .	21
III.1	domaine d'étude . . . . .	31
III.2	matrice d'expériences en unités codées . . . . .	32
III.3	Analyse de variance . . . . .	34
III.4	tableau des coefficients du modèle . . . . .	35

# Introduction générale

lors de la fabrication mécanique des pièces plusieurs opérations sont effectués, ces opérations laisse des défauts de forme et de surface dans les pièces usinées, pour cela d'autres procédés qui servent à éliminer les défauts et améliorer l'état de surface et les caractéristiques et les propriétés de la pièce sont recommandés. la finition est exigée pour rendre les pièces acceptables et pour que ces pièces peuvent supporter les efforts thermiques et mécaniques des conditions du travail.

Le procédé de traitement par tribofinition ou la vibro-abrasion remplace souvent les procédures qui exigent la main d'œuvre et la manipulation étendue des pièces, il est simple, efficace et économique.

Notre étude a pour objectif d'analyser l'effet des trois facteurs : la fréquence, l'amplitude et la taille des médias sur la rugosité par la méthode des plans d'expériences. Ce travail est organisé de la manière suivante : Au chapitre I, nous ferons une présentation du procédé de traitement par tribofinition. Le chapitre II sera consacré aux notions des plans d'expériences et de plan de Box-Behnken. les résultats obtenus par Minitab seront présentés et commentés au chapitre III.

# Chapitre I

## traitement par tribofinition

## I.1 introduction

Un traitement de surface est une opération mécanique, chimique, électrochimique ou physique qui a pour conséquence de modifier l'aspect ou la fonction de la surface des matériaux afin de l'adapter à des conditions d'utilisation données. Les traitements de surface jouent un rôle éminent dans le domaine de la tribologie, dans ce chapitre en va entamer le traitement par tribofinition ainsi que les facteurs qui influent sur le procédé ainsi que les machines les plus courantes dans l'industrie de tribofinition.

## I.2 Notions fondamentales de l'état de surface

### I.2.1 La surface

En tribologie, la surface ne définit pas uniquement la zone de séparation des corps, mais concerne toutes les caractéristiques du contact qui jouent un rôle sur le frottement, c'est-à-dire sur les contraintes mécaniques, les températures, le comportement du troisième corps (lubrifiant, débris d'usure...). Par conséquent, on admettra que les paramètres définissant la surface correspondent à l'ensemble des propriétés mécaniques, physiques et chimiques des matériaux en présence, ainsi qu'aux caractéristiques géométriques du contact incluant, par extension, la forme des pièces.

### I.2.2 État de surface

Les divers procédés d'usinages (rabotage, tournage, fraisage, rectification, rodage, superfinition, etc.) laissent tous à des degrés plus ou moins importants subsister deux types de défauts sur les pièces :[1]

**a) défauts de forme (défauts macro-géométriques)** défauts affectant la forme géométrique, l'orientation ou la position relative des pièces usinées. Ces défauts sont

qualifiés de 1er ordre.

**b) défauts de rugosité (défauts micro-géométriques)** défauts caractérisant la qualité de surface des pièces. Ils sont qualifiés de 2ème, 3ème et 4ème ordre :

- **défauts de 2ème ordre** : défauts moyens d'ondulation périodiques provoqués par l'avance de l'outil de coupe.

- **défauts de 3ème ordre** : ce sont des petits défauts (stries, sillons) régulière de rugosité de hautes fréquence. Ils sont provoqués par un mauvais état de l'arête de coupe (géométrie et qualité d'affutage).

- **défauts de 4ème ordre** ce sont des petits défauts anormaux de rugosité (fentes, piqure, arrachement de matière par un outil exerçant un frottement intense sur la surface usinée), ils sont dus par exemple à l'hétérogénéité du matériau, aux conditions de lubrification (nature, filtrage), etc.

### I.2.3 Influence de la rugosité :

Si l'on veut avoir un jeu ou un serrage bien défini, il faut obtenir des rugosités telles que la somme des sillons des deux surfaces soit bien inférieure à la tolérance de ces ajustements. Une tolérance dimensionnelle impose donc un maximum à la tolérance de rugosité. Cependant, l'absence de sillons n'est pas toujours souhaitable. Ainsi :

a) l'état de surface des cylindres laminoirs ne doit pas être trop fin, sinon la tôle est mal entraînée.

b) la surface des paliers de vilebrequin doit comporter des fins sillons qui constituent une réserve d'huile pour la lubrification.

Par contre :

a) l'emploi de joints toriques dans les vérins nécessite un bon état de surface du cylindre.

b) un polissage soigné augmente l'endurance de certaines pièces soumises aux chocs répétés et à la corrosion. La rugosité a donc de nombreuses répercussions sur le comportement de la surface des pièces usinées : frottement mécanique, échauffement, résistance à la rupture et à la fatigue, étanchéité, etc.

### **I.3 traitement par tribofinition**

inspirée de la nature où l'écoulement constant de l'eau transforme les pierres brutes en cailloux parfaitement polis, La tribofinition intègre les techniques mécanisées de traitement de surfaces, ce traitement est basé principalement sur l'exploitation des phénomènes de friction et de vibro-impact avec des pièces et abrasif (média ou chips) dans un environnement chimique contrôlé. Le processus de tribofinition est utilisé dans l'industrie de précision (rugosité) et pour avoir des caractéristiques mécaniques bien précises (dureté) Les abrasifs, de l'eau, et l'additif chimique sont tout mis dans un cuve de travail d'un vibreur, ébavurent et polissent les pièces pour obtenir les propriétés mécaniques demandés. L'environnement ou la chambre du travail contient les pièces et les médias ainsi que l'eau et les additifs chimiques. les mouvements de rotation et de vibration de la chambre servent un à traitement uniformes de toutes les surfaces des pièces en recevant un grand nombre de micro-coup sur tous les sens, ce qui contribue à élimination d'endommagement sur la surface des pièces et la couche superficielle et (changement des paramètres géométriques et physico-mécaniques des couches superficielles) à l'aide des média.[2]

L'additif chimique rajouté au fluide sert au traitement chimique de la surface ainsi il sert au refroidissement des pièces et à l'extraction des produits d'usure qui se situent sur la surface des pièces et des particules du milieu actif, mais le rôle le plus important

assuré par l'additif chimique est le réglage d'intensité du traitement surface par son niveau dans la chambre de travail.[3]

La majorité des fonctionnements du traitement par vibro-impact est fait avec l'alimentation continue ou intermittente de l'additif chimique et les abrasifs.[4]

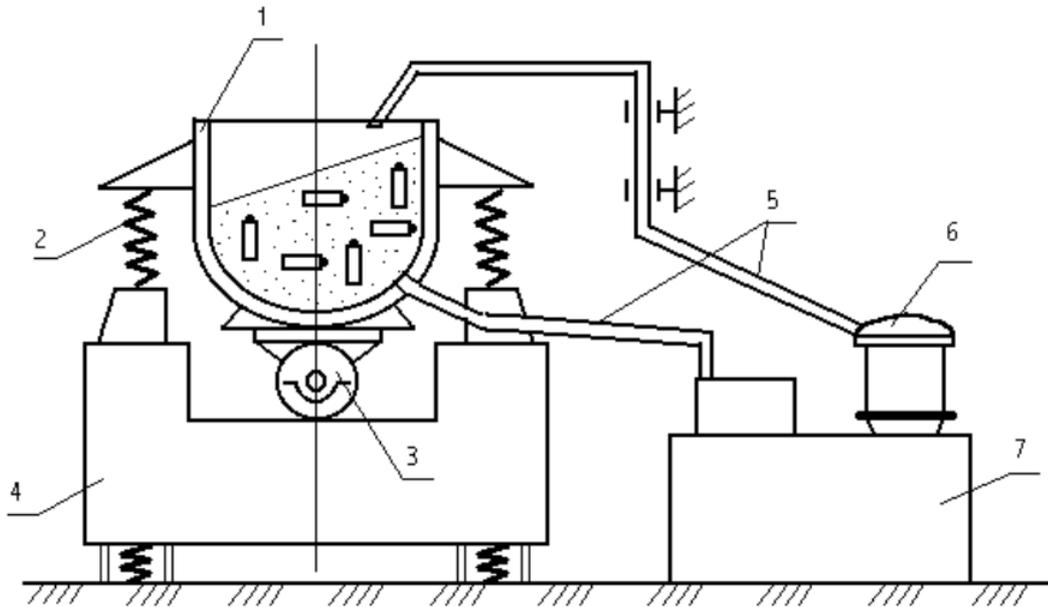


FIGURE I.1 – schéma d'un vibreur du traitement par tribofinition

1	Chambre de travail
2	Élément élastique (ressort spiral)
3	Vibreur
4	Base (fondation)
5	Tube pour le fluide (eau et l'additif chimique) et pour épanchement
6	Pompe
7	Réservoir de vidange

TABLE I.1 – éléments d'un vibreur

### I.3.1 Paramètres du traitement par tribofinition

Plusieurs paramètres physicochimiques influent sur le traitement par tribofinition :

- le régime du traitement : amplitude, fréquence et durée du traitement (A, f, t).
- les caractéristiques des médias, la géométrie et la tailles et matériaux.
- le volume de la chambre de travail et le degré de son remplissage.
- les propriétés mécaniques du matériau ( dureté, microdureté, résistance à la traction, la résilience, résistance à la fatigue etc...).
- la nature du mouvement de la chambre de travail (vitesse et accélération, force et l'énergie des micro-impacts, pressions de contact, températures dans la zone d'impact).

### I.3.2 Les milieux actifs (abrasifs) :

Les abrasifs ou médias abrasifs ou milieu actif sont considéré comme ingrédients du processus de la tribofinition ils sont appelé des chips ou aussi porteurs, il existe une large gamme des abrasifs à utiliser dans les machines. Le choix de l'abrasif dépend du type de traitement (polissage, ébavurage, etc...), les paramètres de fonctionnement de la machine (fréquence, amplitude et durée de traitement), la caractéristique qu'on veut l'améliorer ainsi que le type du matériau a traité. Une large gamme des médias est fourni par l'industrie de la tribofinition, les médias ce diffèrent entre eux selon plusieurs paramètres : la composition, le degré d'abrasion, la géométrie et la taille, les médias les plus utilisé dans l'industrie de la tribofinition sont souvent à base céramique, polyester, verre, plastique...etc.



FIGURE I.2 – quelques médias abrasifs

### I.3.3 Types de machines :

Le traitement par tribofinition peut effectuer plusieurs opérations telles que : polissage, lissage, ébavurage, décalaminage, rayonnage, désoxydation, dégraissage, nettoyage de surface, ces opérations sont effectuées par des machines multiples.

#### I.3.3.1 Les vibrateurs circulaires :

Les vibrateurs circulaires sont les plus communément utilisés en Tribofinition. Ils peuvent être utilisés dans une large gamme d'applications. Le traitement s'effectue dans une cuve de traitement montée sur ressorts hélicoïdaux. Un moto-vibrateur spécial monté au centre de la cuve fournit l'énergie nécessaire à la vibration. Les pièces et médias (abrasifs), auxquels sont ajoutés l'eau et un additif chimique (savon), sont brassés dans la cuve. Les vibrateurs circulaires sont souvent équipés de tamis de séparation et de trappe pneumatique pour assurer la séparation des pièces et médias.[2]

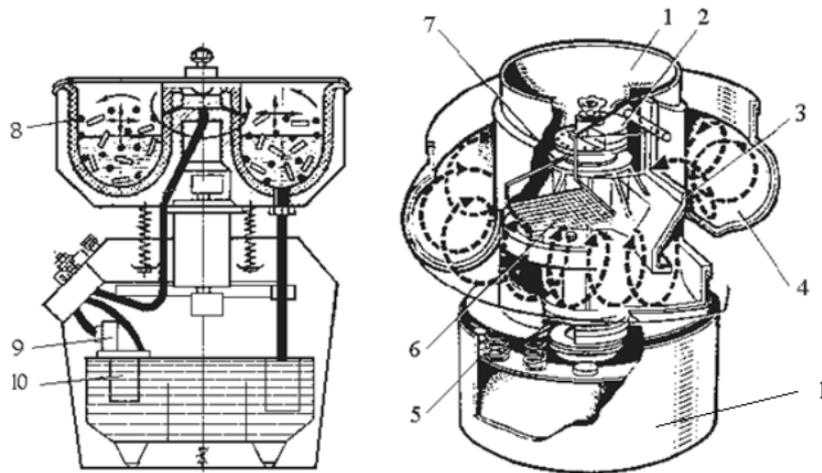


FIGURE I.3 – schéma d'un vibreur circulaire

1	Suspension de la cuve de traitement
2	Vibreur (les balourds)
3	Porte de vidage des abrasifs
4	Cuve de traitement
5	amortisseur
6	Tamis de séparation intégré
7	moteur
8	Revêtement
9	pompe
10	Porte de vidange

TABLE I.2 – éléments d'un vibreur circulaire

### I.3.3.2 Les vibreurs circulaires à grand rayon

Les vibreurs circulaires de «Grand Rayon» sont utilisés pour des productions par charge et en continu. Ils sont caractérisés par une cuve vibrante spiralée de grand rayon et un dispositif de séparation interne et nécessitent un faible encombrement.

Avec des temps de traitement allant jusqu'à 12 mn, ébavurage, nettoyage, ébarbage ou rayonnage léger d'arêtes vives peuvent être aisément réalisés en un tour. Pour un rayonnage plus approfondi, les vibrateurs à « grand rayon » peuvent également fonctionner par charge. [5]

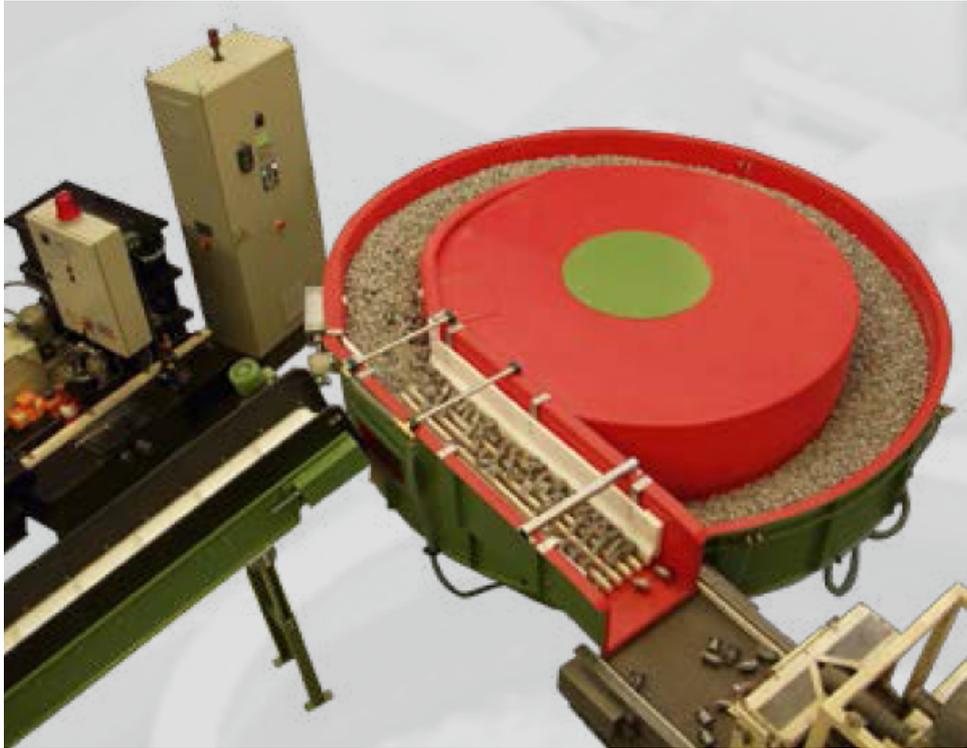


FIGURE I.4 – machine à force centrifuge

### I.3.3.3 Les machines à force centrifuge

Comparées à un traitement en machine vibrante, les installations à force centrifuge offrent 15 à 20 fois plus d'intensité en termes d'enlèvement de métal et de temps de traitement. Les installations automatiques à double charge ou semi-automatiques peuvent être étudiées sur mesure pour répondre à toute demande de finition.

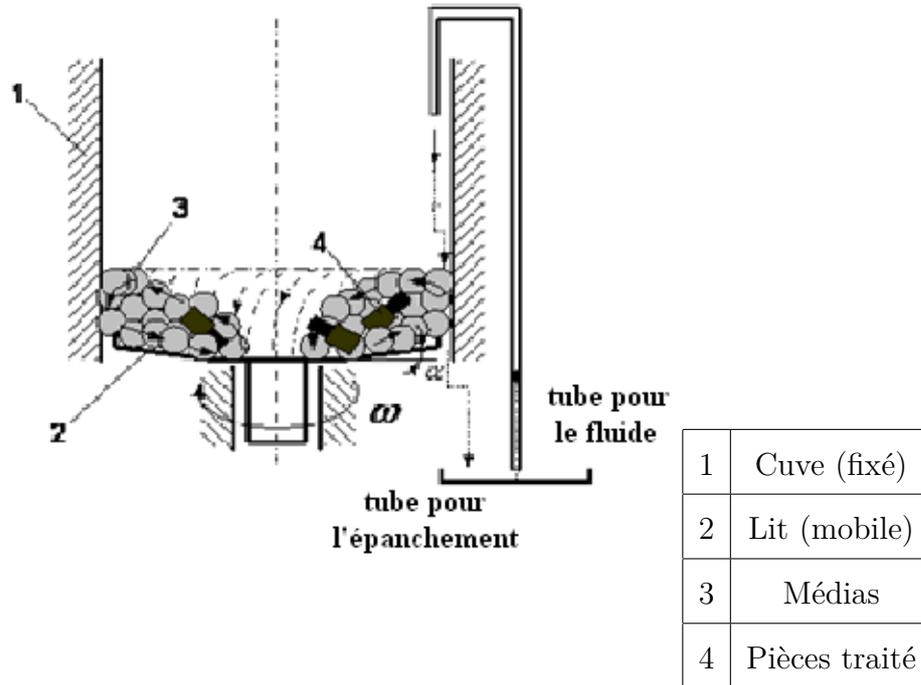


FIGURE I.5 – Schéma et éléments d'une machine à force centrifuge

## Les machines à broche

### I.3.3.4 Machines mono-broche

Une ou plusieurs pièces sont fixées à une broche circulaire et immergées dans la cuve de travail chargée de médias de polissage. De par tous les différents paramètres du Système et médias disponibles, des solutions peuvent être adaptées pour tout type de traitement, pouvant aller d'un polissage agressif au brillantage.

### I.3.3.5 Les machines multibroches type Smuritropie

La smuritropie est le procédé technologique le plus intensif en termes d'enlèvement de métal et de temps de traitement. Constituée d'un carrousel équipé de 12 broches pour la fixation des pièces, ces dernières sont immergées dans la charge abrasive statique. L'efficacité des machines multibroches, grâce à leur motorisation spéciale, per-

met de réduire les durées de traitement d'un facteur 50 par rapport aux machines vibrantes et d'un facteur 10 par rapport aux machines à force centrifuge. Les machines de smuritropie sont particulièrement adaptées pour le traitement de pièces fragiles, de grandes valeurs, telles que pignons, aubes de turbine, clubs de golf, hélices de bateau, etc... [2]

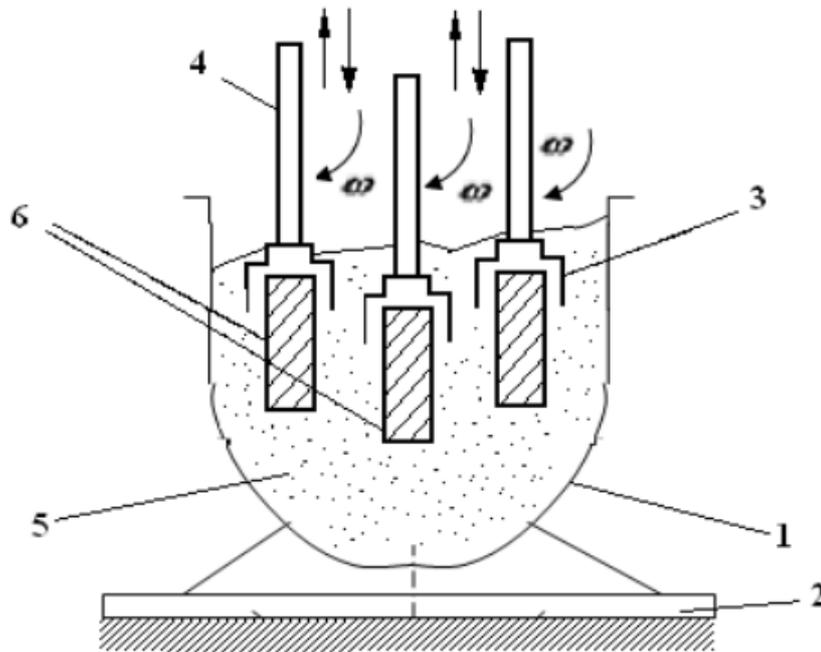


FIGURE I.6 – schéma d'une machine multibroches

1	Cuve (fixe)
2	Base de fixation
3	Intermédiaire de la broche
4	Broches (mobiles)
5	Milieu actifs
6	pièces

TABLE I.3 – éléments d'une machine multibroches

## **I.4 conclusion**

le traitement par tribofinition est très utile pour améliorer les propriétés géométriques, physico-mécaniques et métallurgiques d'un matériaux tout en choisissant l'équipement et ses accessoires (médias et additifs chimiques) adéquats, cette technique est recommandée pour l'utiliser dans divers industries à savoir l'industrie automobile, navale, aéronautique,etc...notamment dans l'industrie mécanique de précision.

# Chapitre II

## plans d'expériences

## II.1 Introduction

On nomme plan d'expériences la suite ordonnée d'essais d'une expérimentation, chacune permettant d'acquérir de nouvelles connaissances en contrôlant un ou plusieurs paramètres d'entrée pour obtenir des résultats validant un modèle avec une bonne économie (nombre d'essais le plus faible possible).

Dans ce chapitre on va entamer la théorie et les fondements mathématiques derrière les plans d'expériences ainsi que les différents types des plans, nous allons expliquer et justifier notre choix du plan, et finalement présenter quelques outils statistiques pour évaluer notre modèle mathématique.

## II.2 Terminologie :

Introduction :

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt  $y$ , et des variables,  $x_i$ . Les plans d'expériences utilisent des données expérimentales pour décrire le comportement d'une grandeur d'intérêt sous forme d'une fonction mathématique qui dépend des facteurs choisis, la fonction est de type :

$$y = f(x_i) \tag{II.1}$$

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Les plans d'expériences sont construits basant sur des théories mathématiques strictes et suivant une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur.

## II.2.1 Types de facteurs

Il existe plusieurs types de facteurs dont il faut les connaître pour bien interpréter les résultats.

### II.2.1.1 Facteurs continus

Sont des facteurs qui peuvent prendre des valeurs représentés par des nombres continus, la pression, la température et la vitesse sont des exemples des facteurs continus.

### II.2.1.2 Facteurs discrets

Un facteur discret ne peut prendre que des valeurs particulières, il peut être un nombre comme il peut être un nom ou une lettre ou une valeur non numérique, mais il doit être significatif.

### II.2.1.3 Facteurs ordonnables

Il s'agit de facteurs discrets que l'on peut mettre dans un ordre logique. Par exemple, grand, moyen, petit, ou encore premier, deuxième, troisième et quatrième.[6]

### II.2.1.4 Facteurs booléens

Sont des facteurs discrets qui ne peuvent prendre que deux niveaux, soit par exemple : allumé ou éteint, ouvert ou fermé, etc. . .

passant à la compréhension de la méthode des plans d'expériences qui s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique.[6]

## II.2.2 Espace expérimentale

Pour bien présenter et expliquer un espace expérimental nous utiliserons un espace à deux dimensions, ce qui facilitera les représentations graphiques et peut nous introduire aux espaces multidimensionnels. Les facteurs continus sont représentés sur les axes gradués et orientés d'un repère orthogonale, soit alors un espace euclidien a deux dimensions, ce qu'on appelle un espace expérimentale, dont chaque point du plan représente un essai ou une expérience dans l'espace expérimental.

La représentation graphique peut contenir jusqu'à trois axes, à partir du quatrième facteur on ne peut que représenter mathématiquement l'espace expérimentale, une représentation géométrique n'est pas possible dans ce cas.

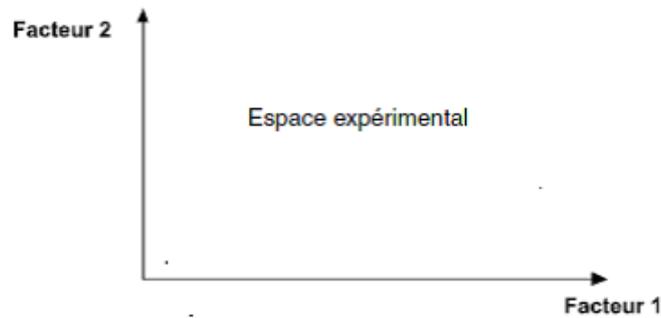


FIGURE II.1 – espace expérimentale constitué par deux axes gradués et orientés

## II.2.3 Domaine d'un facteur

La valeur donnée à un facteur pour réaliser une expérience est appelée niveau, Les variations d'un facteur sont généralement limiter par une borne inférieure appelé niveau bas, et une borne supérieure appelée niveau haut. Ces niveaux sont définis de la part de l'expérimentateur en fonction des données de l'expérience, L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur.[6]

Pour représenter les toutes les facteurs de la même façon, on indique le niveau

hauts par  $+1$  et le niveau bas par  $-1$ , selon le degré du modèle on choisit le nombre des niveaux dans le domaine d'un facteur, soit deux niveaux pour un modèle linéaire, trois niveaux pour un modèle du second degré.

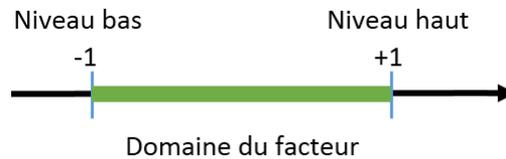
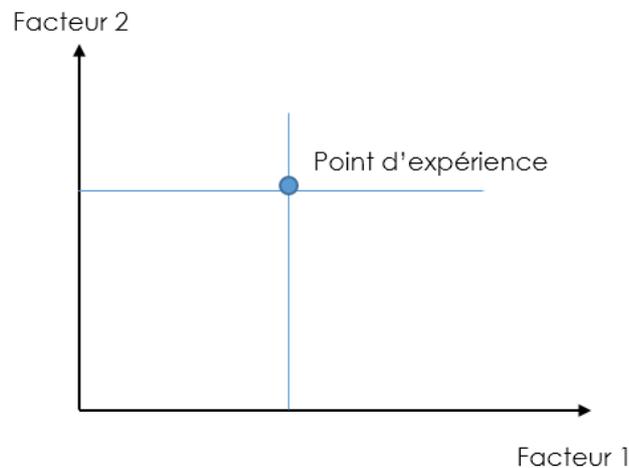


FIGURE II.2 – domaine de variation d'un facteur

## II.2.4 Points expérimentaux

Un point expérimentale est défini par l'intersection entre deux niveaux de deux facteurs différents, ces niveaux sont les coordonnées du point expérimentale, l'ensemble de toutes les points expérimentales ou les points d'expériences constituent le plan d'expériences.



## II.2.5 Domaine d'étude

Dans la pratique, l'expérimentateur sélectionne une partie de l'espace expérimental pour réaliser son étude. Cette zone particulière de l'espace expérimental est le domaine d'étude.[7]

Les niveaux de tous les facteurs et les contraintes entre eux définissent le domaine d'étude, S'il n'y a pas de contraintes, le domaine d'étude est représenté par tous les points dont les valeurs des facteurs sont comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

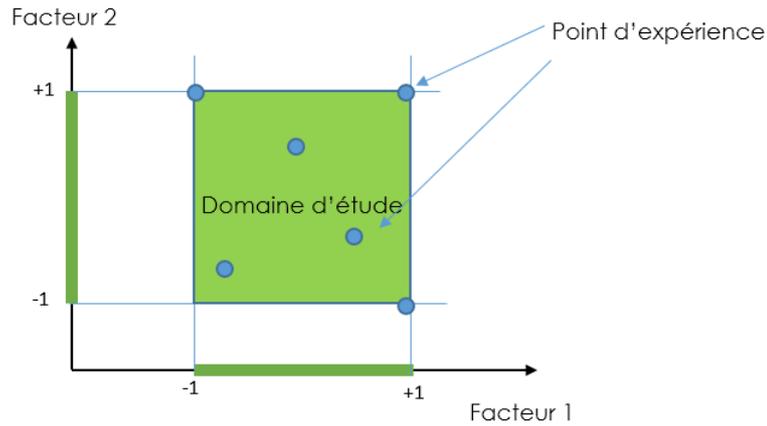


FIGURE II.3 – schéma du domaine d'étude pour deux facteurs

S'il y a des contraintes sur le domaine d'étude, la zone limitée par les contraintes doit être exclu du domaine d'étude, comme il est montré dans la figure suivante.

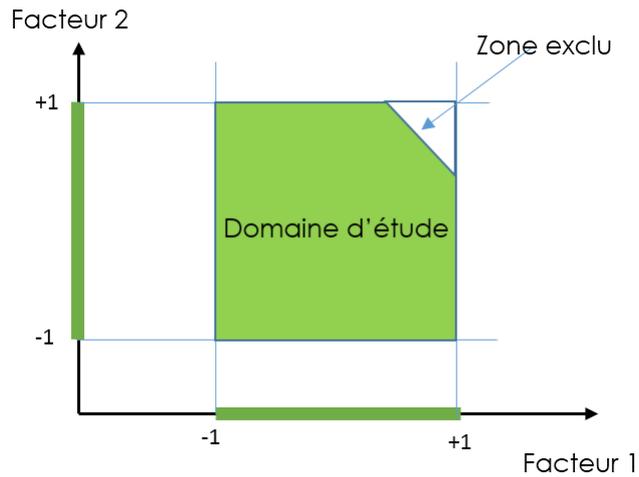


FIGURE II.4 – schéma du domaine d'étude pour deux facteurs avec contraintes

## II.3 Surface de réponse

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses cette ensemble de réponse constitue la surface de réponse. La représentation géométrique est limitée par deux facteurs et une réponse. [7]

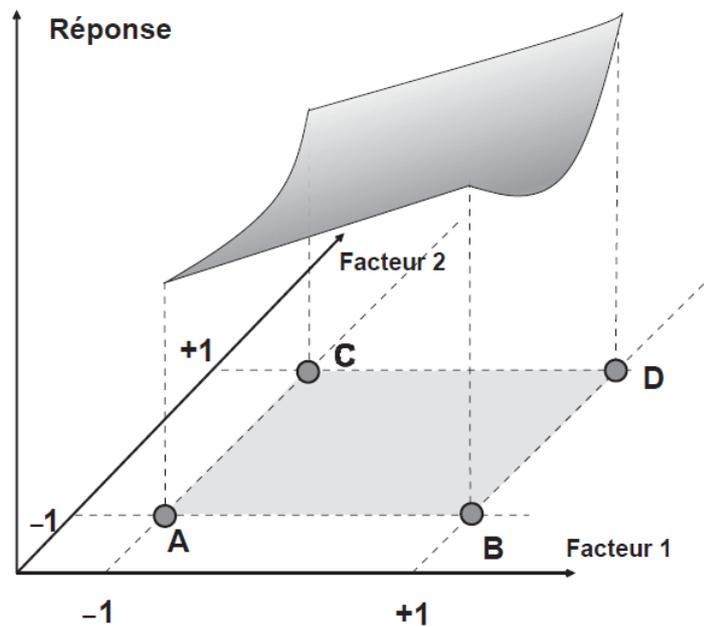


FIGURE II.5 – surface de réponse

[6]

### II.3.1 Matrice d'expériences

La matrice d'expérience constituée des essais à réaliser ou des points expérimentaux peut être représentée en tableau des plans d'expériences.

essais	facteur1	facteur2
A	-1	-1
B	+1	-1
C	-1	+1
D	+1	+1

TABLE II.1 – matrice d’expériences

## II.3.2 Les différents types de plans d’expériences

Il existe plusieurs types des plans d’expériences. On cite ici les plans à l’usage le plus fréquent.[6]

### II.3.2.1 Plans de criblage

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

**Plans factoriels fractionnaires** Ce type de plan permet d’étudier beaucoup de facteurs et, si l’on sait bien les interpréter on peut détecter les interactions entre les facteurs. Ces plans portent par fois des noms différents, plan de Plakett et Burman, table de Tagauchi, plans de pesées, etc. Ils sont très utilisés par rapport aux autres.

**Plans sursaturés** Ce sont des plans qui prennent en compte un grand nombre de facteurs et qui ne demandent que quelques essais. Par exemple, on peut étudier 66 facteurs en 12 essais. Il faut penser à ces plans s’il y a beaucoup de facteurs et que peu d’entre eux sont influents. L’interprétation de tels plans n’est pas aisée.

**Plans factoriels complets** Les plans complets sont gourmands en essais dès que l'on dépasse trois facteurs. Ils peuvent servir à faire du criblage mais aussi à faire de la modélisation. On les utilise surtout pour 2, 3, 4 facteurs.

### II.3.2.2 Plans de modélisation

**Plans factoriels complets** Ces plans peuvent être utilisés pour la modélisation, mais comme il n'y a que deux niveaux par facteurs, on ne peut qu'employer des modèles du premier degré avec interaction. L'intérêt de ces plans est de faciliter le développement séquentiel d'une étude. On commence par le plan factoriel et on poursuit l'expérimentation par un plan en étoile. On aboutit ainsi à un plan composite qui est interprétable à l'aide du modèle du second degré. Le plan en étoile n'est réalisé que si cela est nécessaire. Dans ce cas l'expérimentateur peut éviter de réaliser des essais si le modèle du premier degré est suffisant.

**Plans non conventionnels** Le plan non conventionnel représente tout plan qui s'écarte des plans classiques pour une raison ou une autre. Il se peut qu'au cours de l'expérimentation les niveaux prévus n'ont pas été respectés et que les points d'expériences soient décalés par rapport aux sommets. Le plan réalisé est alors un plan non conventionnel. Un autre cas de plan non conventionnel concerne le nombre de points d'expériences. Un plan classique possède un nombre précis d'essais à réaliser. Pour certaines raisons, il se peut qu'il y ait soit plus, soit moins d'essais effectivement réalisés. L'ensemble des essais réels est alors un plan non conventionnel. Il y'a donc plan non conventionnel dès que le nombre des points expérimentaux ou que leur emplacements ne sont plus conformes au plan classique.

**Plans D-optimaux**[7] Les contraintes expérimentales ne permettent pas toujours d'être dans les conditions idéales des plans d'expériences précédemment décrits. Il est

extrêmement commode d'utiliser les plans D-optimaux. Le choix de l'emplacement des points expérimentaux nécessite alors un logiciel de plans d'expériences. Il suffit de préciser le nombre d'expériences que l'on désire effectuer et le modèle a priori. Le logiciel calcule alors, grâce à un algorithme d'échange, le plan le mieux adapté à l'étude.

**Plan de Box-Behnken** Ces plans permettent de modéliser les réponses avec un modèle du second degré tout en respectant un critère d'optimalité particulier : le critère d'isovariance par rotation. C'est le plan choisi dans notre cas pour analyser nos expériences.

## II.4 Choix du plan

Le choix du plan est plus importante pour pouvoir extraire le maximum d'information et pouvoir les interpréter, nous avons choisi ce plan pour des raisons pratiques, les facteurs à varier sont tous à trois niveaux ce qui est confondu avec le plan de Box-Behnken, ainsi le nombre d'expérience est limité par des contraintes de l'expérience, le modèle mathématique est du second degré ce qui donne des résultats plus précis.

### II.4.1 Plan de Box-Behnken

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

Le plan de Box-Behnken pour trois facteurs est construit sur un cube. Pour quatre facteurs ce plan est construit sur un hypercube à quatre dimensions Les plans de Box-

Behnken répondent à un critère d'optimisation particulier : l'erreur de prévision des réponses est la même pour tous les points d'une sphère(ou une hyper sphère)centrée à l'origine du domaine expérimental. C'est le critère d'isovariance par rotation. Le plus connu des plans de Box-Behnken est celui à trois facteurs. Pour un plan de box behnken a trois facteurs, les points expérimentaux sont au milieu des arêtes de chacun des côtés du cube. Alors le plan à trois facteurs comporte douze essais auxquels on peut ajouter un(ou plusieurs)point centraux, dans la pratique on réalise souvent 3 ou 4 points au centre. Ces essais sont indiqués par une matrice de calcul. [4, 6]

#### II.4.1.1 Propriétés du plan de Box Behnken pour trois facteurs

Avant de réaliser les essais, il est possible de connaître un certain nombre de propriétés du plan d'expériences :

- l'erreur sur les coefficients du modèle à une constante près.
- l'erreur sur les réponses prédites.
- la fonction de variance indiquant la répartition de l'erreur de prédiction dans le domaine d'étude.

Les propriétés qui vont être établies ne sont valables que pour le modèle mathématique postulé choisi au paragraphe suivant. Si, pour certaines raisons, on est amené à changer le modèle, on doit établir les nouvelles propriétés de ce plan.

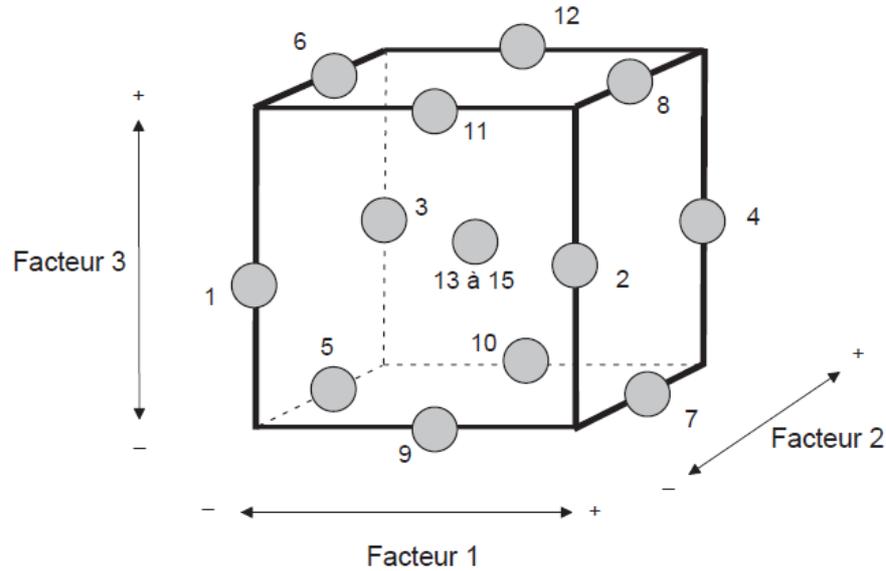


FIGURE II.6 – Illustration du plan de Box-Behnken pour trois facteurs

### II.4.1.2 Modèle mathématique

On utilise pour le plan de box behken Le modèle mathématique du second degré[7]

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + a_{33}X_3^2 + e$$

Ce modèle comporte 10 coefficients. Il faut donc au minimum 10 équations pour les estimer. La matrice d'expérience comporte 13 points au minimum, alors 13 équations au minimum, souvent en choisi 3 points centraux alors on obtient un système a 15 équations et 10 inconnus.

l'écart  $e$  est constitué des deux compléments :

- le manque d'ajustement qui traduit l'écart entre les deux modèles (modèle mathématique et modèle réel)
- l'erreur expérimentale, si en prend en compte de la nature aléatoire de la réponse. si l'on mesure plusieurs fois une réponse en un même point expérimental, on n'obtient pas exactement le même résultat. Les résultats sont dispersés. Les dispersions ainsi constatées sont appelées erreurs expérimentales.

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

Le vecteur des coefficients du modèle peut être obtenu alors :

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

Où la matrice  $(X^t X)$  est la matrice d'information donnée par :

$$X^t X = \begin{bmatrix} 15 & & & & & & & 8 & 8 & 8 \\ & 8 & & & & & & & & \\ & & 8 & & & & & & & \\ & & & 8 & & & & & & \\ & & & & 4 & & & & & \\ & & & & & 4 & & & & \\ & & & & & & 4 & & & \\ & 8 & & & & & & 8 & 4 & 4 \\ & 8 & & & & & & 4 & 8 & 4 \\ & 8 & & & & & & 4 & 4 & 8 \end{bmatrix}$$



mesure l'adéquation entre le modèle et les données observées. Certes, le  $R^2$  a ses imperfections, mais son utilité n'a d'égale que sa simplicité.

### II.5.3 test de Student

Un test de Student  $T$  peut être utilisé notamment pour tester statistiquement l'hypothèse d'égalité de l'espérance de deux variables aléatoires suivant une loi normale et de variance inconnue. Il est aussi très souvent utilisé pour tester la nullité d'un coefficient dans le cadre d'une régression linéaire.

## II.6 conclusion

la méthode des plans d'expériences permet d'extraire le maximum d'information avec le minimum d'essais, le calcul du modèle mathématique nous permet de savoir le comportement de la réponse et d'obtenir une surface de réponse, les résultats des essais expérimentaux sont représentés et discutés dans la partie pratique du chapitre suivant (chapitre III).

## Chapitre III

### Résultats et discussion

### III.1 Introduction

Pour la partie pratique (chapitre III), dans un premier temps, nous avons introduit les données des essais expérimentaux réalisés à savoir la rugosité arithmétique  $Ra$  dans le logiciel Minitab afin d'effectuer les calculs nécessaires dans le but d'obtenir les résultats, et enfin les interpréter .

dans un deuxième temps, on détermine les tests statistiques ( $R^2$ , Fischer et Student) qui nous permet d'évaluer notre modèle mathématique.

### III.2 le logiciel Minitab :

Minitab est un logiciel propriétaire commercial de statistiques. Il est développé par Minitab Inc. pour le système d'exploitation Windows uniquement. Il est largement utilisé par les universités pour enseigner les statistiques, et les développeurs le dirigent particulièrement aux entreprises en affichant leur intention de les rendre plus performantes selon la méthode « Six Sigma ». Logiciel développé depuis 1972, une partie du logiciel est consacrée aux plans d'expériences.

**données d'expériences** les essais expérimentaux réalisés sur un vibreur linéaire sur des échantillons en acier A60 avec une durée de traitement de 60 min et un rugosité arithmétique initiale  $Ra=3.83\mu m$  nous a conduits aux résultats suivants.

**Réponses** Pour avoir un surface lisse et brillante, l'état de surface doit avoir une rugosité minimale, la réponse ici doit être la valeur de la rugosité, plus la rugosité est faible plus l'état de surface est bon.

**Objectif** Minimiser la rugosité, on cherche une valeur ou une région où la plus faible du rugosité.

**Facteurs** les facteurs choisis dans l'expérience sont :

- la fréquence de vibration.
- l'amplitude de vibration.
- la taille des médias.

### III.3 domaine d'études

notre domaine d'étude est défini par les domaines des facteurs : fréquence, amplitude et taille des médias.

facteur	niveau -1	niveau 0	niveau +1
fréquence	15	33	50
amplitude	1.5	3	5
taille des médias	6	8	10

TABLE III.1 – domaine d'étude

### III.4 matrice d'expériences

Les données sont introduite sous forme d'un tableau en unités codées

ordre d'essai	f	A	M	Ra
1	+1	0	+1	1,85
2	0	+1	+1	1,84
3	0	0	0	1,88
4	+1	-1	0	1,86
5	0	-1	-1	1,85
6	-1	+1	0	1,83
7	-1	0	+1	2,17
8	+1	0	-1	1,51
9	0	0	0	1,88
10	0	+1	-1	1,52
11	+1	+1	0	1,5
12	-1	0	-1	1,86
13	0	-1	+1	2,14
14	-1	-1	0	2,15
15	0	0	0	1,88

TABLE III.2 – matrice d'expériences en unités codées

### III.5 Résultats, Analyse et interprétation

les résultats sont présentés sous forme de tableaux et de graphes.

Plan de Box-Behnken Facteurs : 3 Répliques : 1 Nombre total de blocs : 1

Essais de base : 15 Nombre total d'essais : 15 Points centraux : 3

### III.5.1 Interprétation numérique

#### III.5.1.1 Analyse de la variance

L'évaluation du modèle mathématique du plan de Box-Behnken a été fait par les tests statistiques suivants :  $R^2$ , Fischer et Student.

La valeur obtenue de  $R^2$  est de 99.85 , cela signifie que le modèle mathématique obtenu est très proche du modèle prévu, et l'erreur expérimentale est très faible, ceci montre aussi que les facteurs sont indépendants entre eux et les interactions sont très faibles.

les valeurs obtenues pour Fischer sont aussi acceptables.

le tableau suivant montre les valeurs de P, pour le modèle linéaire et le modèle carré.

Source	DL	SomCar ajusté	CM ajusté	valeur de F	valeur de P
Modèle	9	0,626015	0,069557	421,56	0,000
linéaire	3	0,620975	0,206992	1254,49	0,000
fréquence	1	0,208013	0,208013	1260,68	0,000
amplitude	1	0,214513	0,214513	1300,08	0,000
taille de médias	1	0,198450	0,198450	1202,73	0,000
carré	3	0,004190	0,001397	8,42	0,021
fréquence*fréquence	1	0,001131	0,001131	6,85	0,047
amplitude*amplitude	1	0,002792	0,002792	16,92	0,009
taille de médias*taille de médias	1	0,000831	0,000831	5,03	0,075
interactions à deux facteurs	3	0,000850	0,000283	1,72	0,278
fréquence*amplitude	1	0,000400	0,000400	2,42	0,180
fréquence*taille des médias	1	0,000225	0,000225	1,36	0,296
amplitude*taille des médias	1	0,000225	0,000225	1,36	0,296
erreur	5	0,000825	0,000165	/	/
Inadéquation de l'ajustement	3	0,000825	0,000275	/	/
erreur pure	2	0,000000	0,000000	/	/
total	14	0,626840	/	/	/

TABLE III.3 – Analyse de variance

avec DL : degré de liberté, SomCar ajusté : somme des carrées ajusté et CM ajusté : carrée moyen ajusté.

### III.5.1.2 Calcul des coefficients du modèle mathématiques

Les coefficients du modèle calculés en partant de la matrice de dispersion et du vecteur des réponses, sont données dans le tableau suivant :

terme	effet	coeff	coeff Er T	Valeur de T	Valeur de p
constante		1,88	0,00742	253,50	0,000
fréquence	-0,32250	-0,16125	0,00454	-35,51	0,000
amplitude	-0,32750	-0,16375	0,00454	-36,06	0,000
taille de médias	0,31500	0,15750	0,00454	34,68	0,000
fréquence*fréquence	-0,03500	-0,01750	0,00668	-2,62	0,047
amplitude*amplitude	-0,055	-0,02750	0,00668	-4,11	0,009
taille de médias*taille de médias	-0,03	-0,01500	0,00668	-2,24	0,075
fréquence*amplitude	-0,02	-0,01000	0,00642	-1,56	0,180
fréquence*taille des médias	0,015	0,00750	0,00642	1,17	0,296
amplitude*taille des médias	0,015	0,00750	0,00642	1,17	0,296

TABLE III.4 – tableau des coefficients du modèle

l'effet des différents termes est présenté en pourcentage, on remarque que l'effet de l'amplitude est plus grand que celle de la fréquence et de la taille des médias.

### III.5.1.3 Modèle mathématique

la réponse (rugosité) pour les unités codées est donnée sous forme d'une équation quadratique en fonction des trois facteurs : la fréquence, l'amplitude et la taille des médias.

$$Y = 1,88 - 0,16125X_1 - 0,16375X_2 + 0,1575X_3 - 0,01X_1X_2 + 0,0075X_1X_3 + 0,0075X_2X_3 - 0,0175X_1^2 - 0,0275X_1^2 - 0,015X_3^2$$

### III.5.2 Interprétation graphique

on représente ci-après le graphe des effets principaux pour la rugosité en fonction des différents facteurs (fréquence, amplitude et taille des médias) ainsi que leur influence.

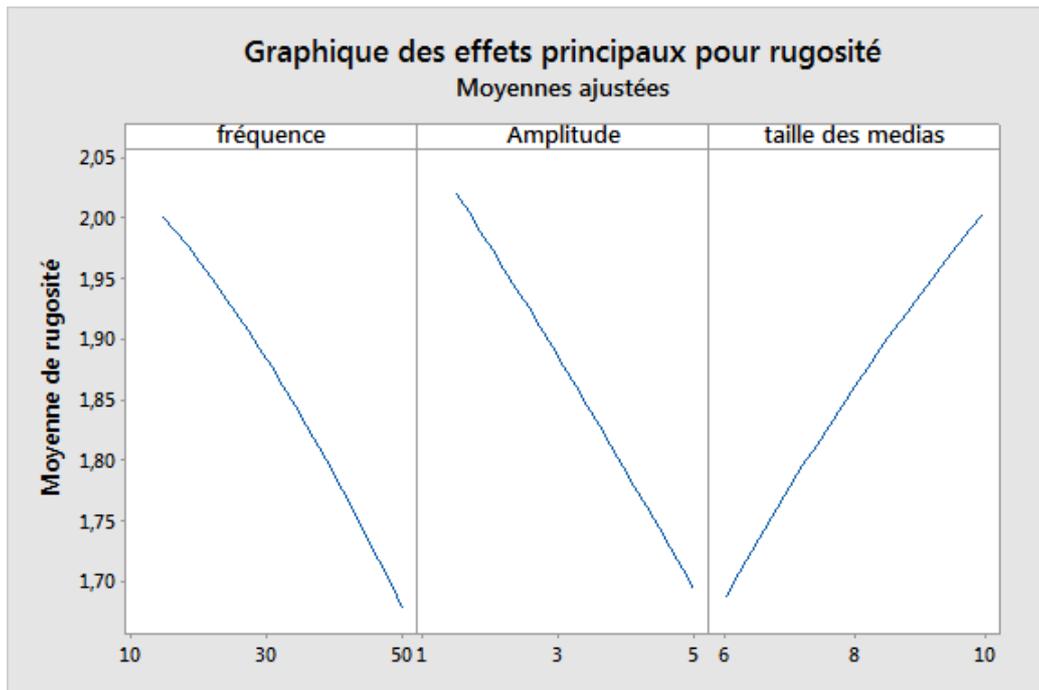


FIGURE III.1 – graphique des effets principaux pour la rugosité

D'après la figure (III.1) à chaque fois où la fréquence et l'amplitude augmentent, la rugosité diminue de plus en plus jusqu'à atteindre la valeur de  $Ra = 1,5$ , ce phénomène s'explique par le fait que à chaque fois que la fréquence augmente, le nombre d'impact augmente. l'augmentation de l'amplitude dû à l'application de la force des médias sur la pièce fait augmenter la pression dans la chambre de travail ce qui est favorable pour avoir un meilleur état de surface. on remarque aussi que la variation de l'amplitude a plus d'effet sur la rugosité que celle de la fréquence du fait qu'elle a une pente plus forte.

la taille des médias influent sur la rugosité, si on prend l'exemple d'une particule

de géométrie sphérique, la déformation de la surface est plus grande pour un rayon plus grand, le schéma suivant montre l'effet de la taille des médias.



FIGURE III.2 – schéma montrant l'effet de la taille des médias

les interactions entre les différents facteurs sont représentés dans le diagramme des interactions ci-après :

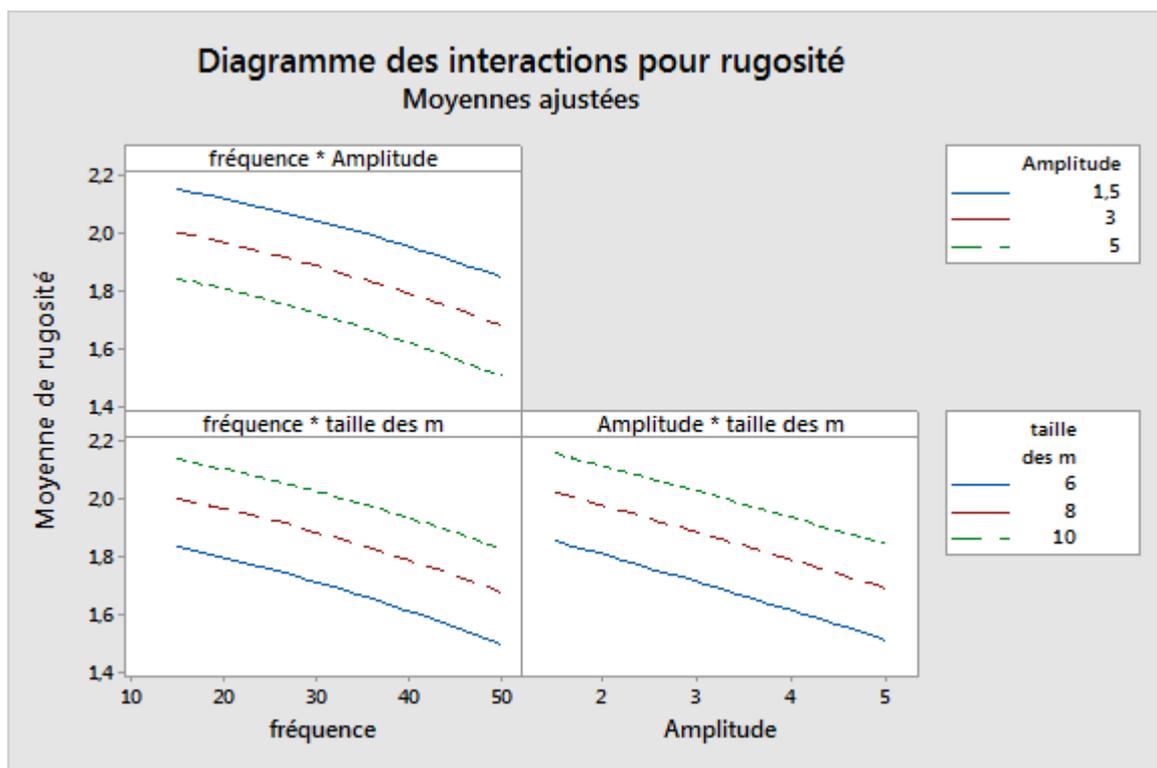


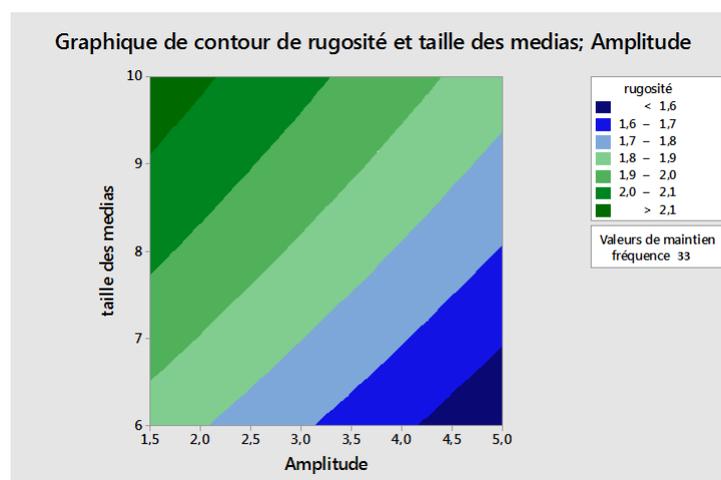
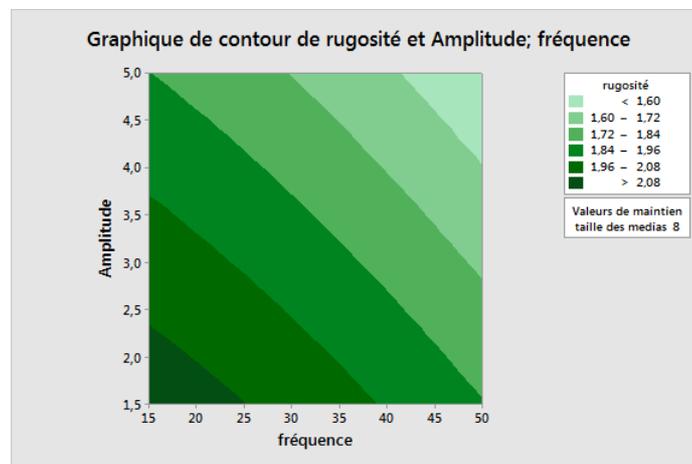
FIGURE III.3 – diagramme des interactions pour la rugosité

on peut tirer comme conclusion de ces trois graphes que le facteur (taille des médias) a moins d'effet par rapport aux autres facteurs (fréquence et amplitude), les

graphes d'interactions montrent que l'augmentation des facteurs couplée sert toujours à diminuer la rugosité.

### III.6 graphiques des contours

la rugosité est présenté ici en fonction de deux facteurs et avec le maintien d'une valeur pour le troisième



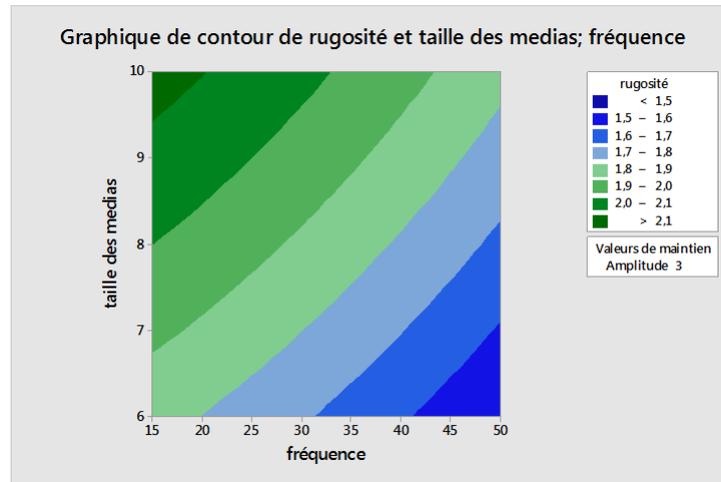


FIGURE III.4 – graphiques du contour du rugosité en fonction des différents facteurs

prenons un exemple dans un cas pratique, où nous sommes limitée par des médias de taille de 9mm, on utilisant notre modèle qui est valable pour des tailles de médias comprises dans le domaine [6-10], par la suite on obtient le graphique du contour, tout en cherchant la rugosité minimale, cette valeur est de 1,5829.

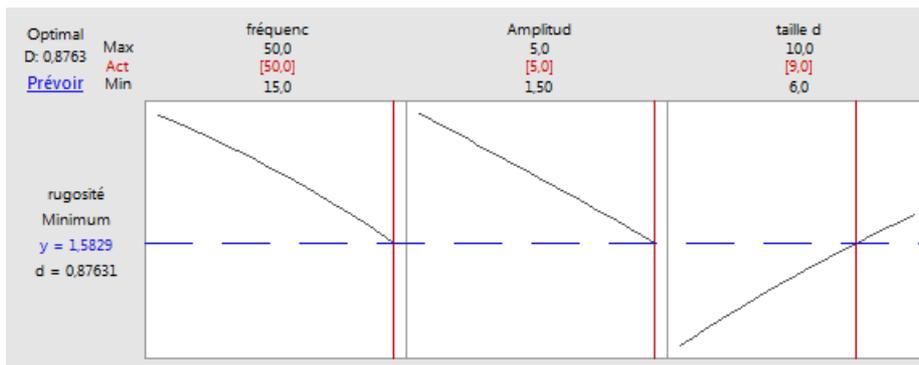
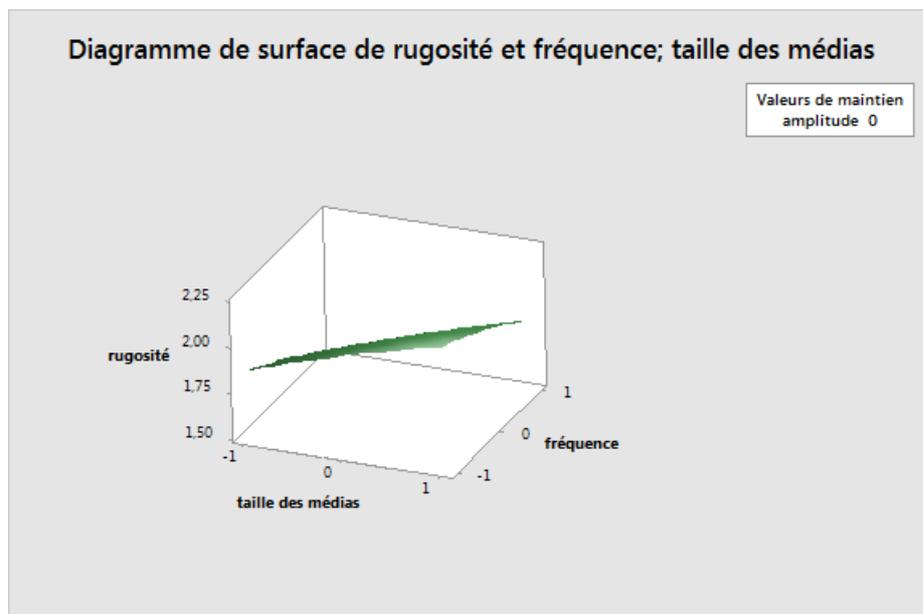
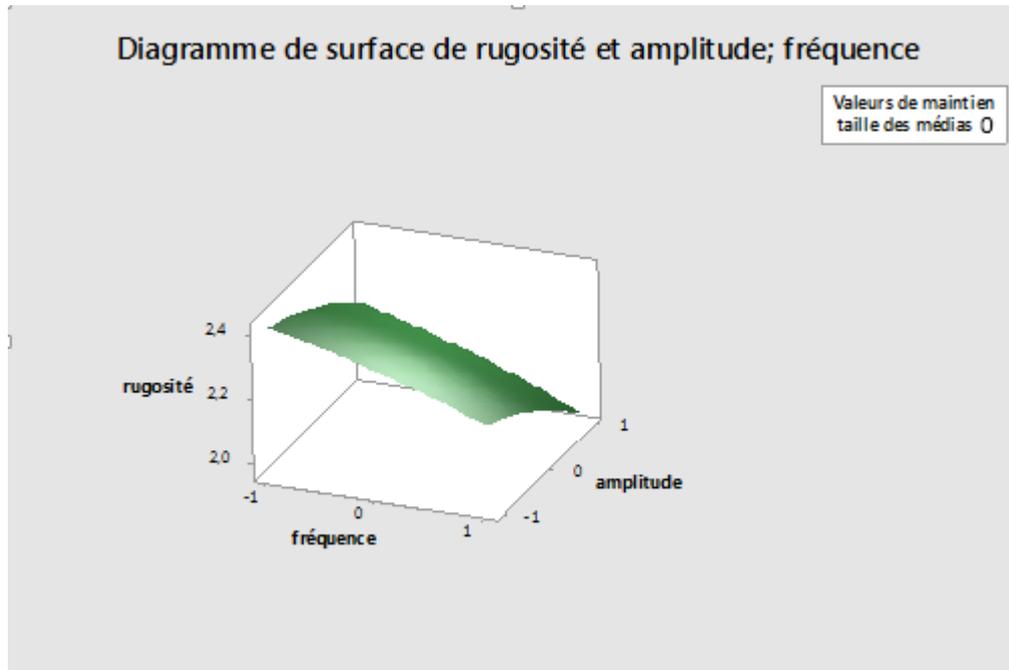


FIGURE III.5 – graphiques du contour du rugosité avec taille des médias de 9mm

### III.6.1 Surface de réponse

les surfaces de réponse sont présentés dans les figures suivants :



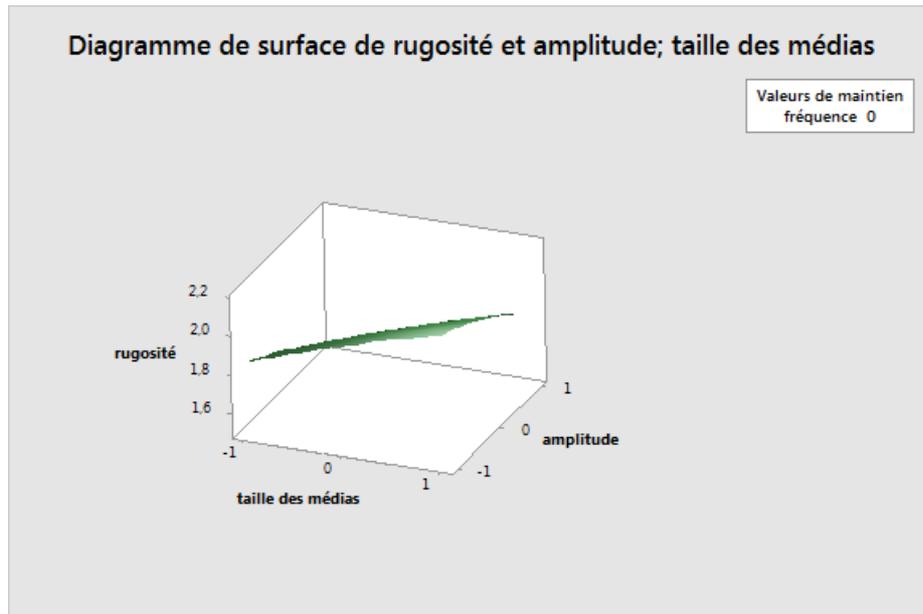


FIGURE III.6 – surfaces de réponses

pour chaque surface, la rugosité est représenté en fonction des deux autres paramètres avec le maintien du troisième au niveau 0.

les surfaces de réponse montrent que les valeurs les plus faible de la rugosité correspondent à une fréquence et amplitude maximale, et une taille des médias minimale.

### III.7 Conclusion

Les résultats obtenus dans ce chapitre(cas pratique) étaient satisfaisants, du point de vue numérique et graphique.

l'analyse de la variance(test  $R^2$ et Fischer), calcul des coefficients du modèle, les effets principaux de la rugosité, les interactions entre les différents facteurs, les graphiques de contour et la surface de réponse ont aboutit à une optimisation de la réponse en fonction du besoin.

# Conclusion générale

la tribofinition est une technique destinée au traitement des pièces après usinage, le traitement par tribofinition sert à améliorer les propriétés mécaniques : augmentation de la dureté, de la résilience, de la résistance à la fatigue, chimiques : résistance à la corrosion et géométrique liée à l'état de surface (rugosité), réaliser tout les essais expérimentaux pratiquement impossible par manque de moyens matériel et de temps à louer à ces essais, ce qui nous conduit à appliquer les plans d'expériences qui a pour but de réaliser un minimum d'expériences pour avoir un maximum d'information, l'application de la méthode du plan de Box-Behnken s'adapte mieux à notre cas d'étude, elle permet de connaître l'influence des différents facteurs (paramètres) sur la réponse (rugosité), le modèle mathématique offre la possibilité de déterminer la rugosité sur tout les points du domaine d'étude.

L'utilisation du logiciel Minitab en appliquant le plan de Box Behnken nous a donnée des résultats satisfaisants, à savoir l'analyse de la variance (test  $R^2$  et Fischer) avec les résultats suivants nous a permis d'évaluer la qualité du modèle mathématique  $R^2 = 99,87\%$  , et  $P = 0,0001$ .

pour le calcul des coefficients du modèle on commence tout d'abord par la matrice de calcul  $X$ , par la suite on obtient la matrice d'information, et en dernier lieu on calcul la matrice de dispersion qui est l'inverse de la matrice d'information.

les résultats sous forme graphique obtenus étaient aussi satisfaisants, les effets principaux pour la rugosité en fonction des différents facteurs suivant leur influence,

on les classe ainsi : amplitude, fréquence, taille des médias. les interactions entre les différents facteurs nous montre que la taille des médias a moins d'effets par rapport aux autres facteurs couplés.

le rôle du graphiques de contour était d'élargir les expériences en dehors des points retenus dans la domaine pour avoir plus d'informations avec un minimum d'expériences. le graphe de surface de réponse nous a donnée un résultat optimum pour le choix des facteurs à savoir prendre le maximum de fréquence et d'amplitude avec un minimum de taille des médias.

dans notre étude on été limité par trois facteurs, une étude de plus de trois facteurs est recommandé pour avoir une modèle plus précis qui contient des facteurs influents comme la durée de traitement et la température du chambre de travail.

# References

- [1] P. BOUAZIZ, “Etats de surface.” cour de sciences et techniques de mesure.
- [2] M. N. LOUASSAA, “Etude comparative d un durcissement superficiel entre le tth et la tribo-finition,” Master’s thesis, UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE, 2014.
- [3] O. LAKEHAL, “Expérimentation et analyse de différents matériaux par le procédé de tribofinition,” Master’s thesis, Ecole Nationale Polytechnique, 2014.
- [4] L. LAOUAR, *Traitement mécanique de surface par brunissage des aciers XC48 et XC18 Optimisation et caractérisation.* PhD thesis, BADJI MOKHTAR ANNABA UNIVERSITY, 2007.
- [5] ROSLER Oberflochentechnik GmbH, *La technologie de la Tribofinition, Rosler.*
- [6] J. Goupy and L. Creighton, *Introduction aux plans d expériences-3ème édition- Livre+ CD-Rom.* Dunod, 2006.
- [7] J. Goupy, *Plans d expériences.* Ed. Techniques Ingénieur, 2006.