

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère De L'enseignement Supérieure Et de la Recherche Scientifique  
Université 08 Mai 1945 - Guelma  
Faculté des Science et de la Technologie  
Département de génie mécanique



**Mémoire présenté dans le cadre de l'arrêté ministériel 1275 en vue de l'obtention du diplôme de Master et de start-up**

Spécialité : Construction Mécanique

Intitulé du projet :

**Effet de traitement de surface par sablage sur les propriétés de l'acier inoxydable AISI 316L utilisé pour la fabrication des implants dentaires**

**Présenté par :**  
REDJIL Ayat Ellah

**Dirigé par :**  
Dr. ATTAABI Selma

**Membres de jury**

**Président :** Dr. Frioui Nadia

**Examineur :** Dr. Kaddeche Mounia

**Encadreur :** Dr. Attabi Selma

Incubateur :

Secteur économique :

**Année universitaire :** 2024/2025

## **REMERCIEMENTS**

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma reconnaissance et mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à madame **ATTABI** Selma, pour son encadrement rigoureux, ses conseils avisés, et ses remarques constructives qui ont contribué à enrichir cette étude.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury pour leur analyse attentive et leur intérêt porté à ce travail

À mes enseignants pour leur accompagnement pédagogique tout au long de mes études.

Je remercie le personnel de l'entreprise Sonatrach, plus précisément au site de SOMIK, pour l'accueil chaleureux et le cadre professionnel offert durant mon stage.

Un grand merci à mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, et leur soutien indéfectible tout au long de mes études.

À ma chère Tata Nora, pour ses encouragements constants et ses conseils avisés.

À mes deux grandes sœurs May et Mina, pour leur encouragement et leur présence bienveillante tout au long de mon parcours.

À mon petit frère Amin, mon neveu Adam et à mes chats, source de réconfort et de douceur.

À toutes mes amies qui m'ont toujours encouragé.

Enfin je dédie ce travail à la mémoire de ma chère grand-mère, qui nous a quittés récemment, dont la tendresse et les prières m'ont toujours accompagné, et qui aurait tant aimé voir ce jour arriver.

## Résumé

Ce travail porte sur l'étude de l'effet du sablage sur les propriétés de surface de l'acier inoxydable AISI 316L, notamment la microdureté et la résistance à l'usure. Un plan d'expériences de type Box-Behnken a été utilisé pour analyser l'influence de trois paramètres : la pression, le temps et la distance de projection. Les résultats ont montré une amélioration significative de la microdureté après sablage, atteignant jusqu'à 1006 HV, soit presque quatre fois plus que l'échantillon brut. Un modèle mathématique a été développé avec une excellente précision ( $R^2 = 99,37\%$ ). Les essais tribologiques ont également confirmé une meilleure résistance à l'usure après traitement. Ces résultats montrent que le sablage améliore les performances mécaniques et pourrait être utilisé efficacement dans les implants dentaires.

## Abstract

This work investigates the effect of sandblasting on the surface properties of AISI 316L stainless steel, particularly microhardness and wear resistance. A Box-Behnken experimental design was used to analyze the influence of three parameters: pressure, time, and distance. Results showed a significant increase in microhardness after sandblasting, reaching up to 1006 HV — nearly four times higher than the untreated sample. A mathematical model was developed with high accuracy ( $R^2 = 99.37\%$ ). Tribological tests also confirmed improved wear resistance after treatment. These findings suggest that sandblasting enhances mechanical performance and could be effectively applied in dental implant manufacturing.

## ملخص

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير عملية المعالجة الرملية على خصائص سطح الفولاذ المقاوم للصدأ من النوع AISI 316L ، وخاصة الصلابة السطحية ومقاومة التآكل. تم استخدام تصميم تجريبي من نوع Box-Behnken لدراسة تأثير ثلاث معايير رئيسية: الضغط، الزمن، والمسافة بين فوهة آلة التفجير و السطح. أظهرت النتائج أن المعالجة الرملية يؤدي إلى زيادة كبيرة في الصلابة السطحية، حيث بلغت القيمة القصوى حوالي 1006 Hv ، أي ما يعادل أربع مرات أكثر من السطح غير المعالج. كما تم بناء نموذج رياضي يمكن من التنبؤ بالصلابة بدلالة هذه المعايير، مع مؤشر جودة عالي ( $R^2 = 99.37\%$ ). بالإضافة إلى ذلك، أظهرت اختبارات البلى أن السطح المعالج يتمتع بمقاومة أفضل للتآكل مما يجعله مناسباً لتطبيقات مثل زراعة الأسنان

# Table des matières

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>I</b>
<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>II</b>
<b>TABLE DE MATIERE .....</b>	<b>III</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>IX</b>
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I</b>	
<b>I.1. Introduction.....</b>	<b>3</b>
I.2. Généralités sur les aciers inoxydables .....	3
I.2.1. Définition .....	3
I.2.2. Historique des aciers inoxydables .....	3
I.2.3. Classification des aciers inoxydables .....	3
I.2.4. Propriétés fondamentales des aciers inoxydables .....	4
I.2.5. Applications industrielles .....	5
I.3 Présentation de l'acier inoxydable AISI 316L .....	5
I.3.1. Composition chimique .....	6
I.3.2. Propriétés structurales .....	7
I.3.3. Propriétés mécaniques .....	7
I.3.4. Propriétés électrochimiques .....	7
I.3.5. Applications industrielles .....	8
I.4 Implants dentaires .....	8
I.4.1. Historique .....	8
I.4.2. Critères de choix des biomatériaux en dentisterie .....	9
I.5 Traitements mécaniques de surface .....	9
I.5.1. Définition .....	9

I.5.2. Types des traitements mécaniques de surface .....	10
I.4.3. Sablage .....	11
I.5.3.1. Concept .....	11
I.5.3.2. Propriétés améliorées par sablage.....	12
I.6. Importance de l'état de surface dans le contrôle des composants en mécanique .....	13
I.7. Conclusion.....	14

## **CHAPITRE II : LES PLANS D'EXPÉRIENCE**

II.1. Introduction .....	16
II.2. Principe .....	16
II.3. Terminologie .....	16
II.3.1. Facteur .....	16
II.3.2. Réponse .....	17
II.3.3. Surface de réponse .....	18
II.3.4. Paramètre .....	19
II.3.5. Contrainte .....	19
II.3.6. Modèle .....	20
II.3.7. Notion de surface de réponse .....	20
II.3.8. Notion de modélisation mathématique .....	21
II.4. Types des plans d'expériences.....	21
II.5. Plan d'expériences de Box-Behnken .....	21
II.5.1. Propriétés .....	21
II.5.2. Propriétés du plan de Box-Behnken pour trois facteurs .....	23
II.5.3. Modèle mathématique .....	23
II.6. Conclusion .....	25

## **CHAPITRE III : MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE**

III.1. Introduction .....	27
---------------------------	----

III.2. Matériau étudié .....	27
III.3. Traitement de surface mécanique par sablage .....	28
III.3.1. Préparation des surfaces .....	28
III.3.2. Le logiciel Minitab .....	28
III.3.3. Données d'expériences .....	30
III.3.4. Sablage .....	31
III.3.5. Domaines d'étude .....	31
III.3.6. Matrice d'expérience .....	32
III.3.7. Caractérisation des surfaces .....	33
III.3.7.1. Mesure de microdureté .....	33
III.3.7.2. Essais tribologiques .....	34
III.3.7.3. Observations microscopiques .....	35
III.3.7.4. Observations profilométriques .....	36
III.5. Conclusion du chapitre III .....	37

## **CHAPITRE IV : RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET DISCUSSION**

IV.1. Introduction .....	39
IV.2. Effets du traitement de sablage sur les propriétés de surface du 316L .....	39
IV.2.1. Effet du sablage sur la microdureté du 316L .....	40
IV.2.2. Modèle mathématique de prédiction de la microdureté .....	41
IV.2.3. Effets principaux pour la microdureté .....	42
IV.2.4. Effets des interactions des paramètres de sablage sur la microdureté .....	44
IV.2.5. Optimisation de la microdureté .....	48
IV.3. Propriétés tribologiques .....	50
IV.3.1. Coefficient de frottement .....	50
IV.4 Conclusion.....	32
CONCLUSION GENERALE .....	57

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I

Figure I. 1. Aciers inoxydables austénitiques dérivés de la nuance de base 304 [5] .....	6
Figure I. 2. Composition chimique typique du 316L et d'autres aciers inoxydables [7].....	7
Figure I. 3 Modèle bicouche de film passif [4]. .....	8
Figure I. 4 Concept de sablage.....	12

## Chapitre II

Figure II. 1. Domaine de variation d'un facteur [11] .....	17
Figure II. 2. Domaine d'étude formé par deux facteurs [11] .....	17
Figure II. 3. Les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse [11].....	19
Figure II. 4. Illustration du plan de Box-Behnken pour trois facteurs.....	22
Figure II. 5. Matrice des essais de plan de Box-Behnken [14] .....	23

## Chapitre III

Figure III. 1. Organigramme de calcul.....	29
Figure III. 2. Principe de l'expérimentation.....	30
Figure III. 3. Matériel de sablage utilisé.....	31
Figure III. 4. Microduromètre utilisé.....	34
Figure III. 5. Tribomètre CSM.....	34
Figure III. 6. Principe d'un test de frottement.....	35
Figure III. 7. Microscopiques Nikon ECLIPSE LV100 ND.....	36
Figure III. 8. Cyber technologies CT 100.....	37

## Chapitre IV

Figure IV. 1. Les surfaces sablées et l'échantillon non sablé.....	39
Figure IV. 2. Effet de sablage sur la microdureté Hv du 316L.....	41
Figure IV. 3. Diagramme des effets principaux sur Hv.....	43
Figure IV. 4. Diagramme de Pareto.....	44
Figures IV. 5. Effet de traitement de sablage sur la microdureté Hv: (a) D1= 5cm, (b) D2= 7.5cm et (c) D3=10cm. ....	45
Figure IV. 6. Effet de traitement de sablage sur la microdureté Hv: (A) t1= 5min, (B) t2= 7.5min et (C) t3= 10min. ....	45

Figure IV. 7. Graphiques des effets de traitement de sablage sur la microdureté Hv: (A) P1= 2 Bar, (B) P2= 4 Bar et (C) P3= 6 Bar. ....	46
Figure IV.8. Évolution des coefficients de frottement (COF) en fonction de la distance parcourue pour les différents échantillons brut (50m, 75m) et traité (50m, 75m). ....	50
Figure IV.9. Valeurs moyennes des coefficients de frottement (COF) en fonction de la distance parcourue pour les différents échantillons brut (50m, 75m) et traité (50m, 75m).....	51
Figure IV.10. Le taux d'usure spécifique en fonction de la distance de glissement pour les différents échantillons brut (50, 75) et traité (50, 75).....	51
Figure IV. 11. les traces d'usure observées au microscope optique.....	52
Figure IV. 12. les profils 3D des traces d'usure observé par profilomètre. ....	53

## **LISTE DES TABLEAUX**

### **Chapitre III**

Tableau III.1. Composition chimique de l'acier inoxydable AISI 316L.....	27
Tableau III.2. Domaine d'étude.....	31
Tableau III.3. Matrice des expériences en unité codé.....	32
Tableau III.4. Matrice des expériences.....	33

### **Chapitre IV**

Tableau IV.1. Résultats des mesures de microdureté Hv.....	40
Tableau IV.2. Intervalles de variation de la microdureté en fonction de la distance.....	47
Tableau IV.3. Résultats d'optimisation de la microdureté Hv.....	48
Tableau IV.4. Valeurs stimulés et valeurs calculés.....	49

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Lors de la fabrication ou de la mise en forme des matériaux métalliques, qu'il s'agisse de l'usinage, du polissage ou d'autres opérations, il est courant que la surface des pièces présente des propriétés insuffisantes tels qu'une rugosité élevée ou une dureté faible. Ces défauts de surface peuvent altérer les performances fonctionnelles, réduire la durée de vie en service et compromettre la fiabilité des composants, surtout dans des domaines sensibles comme celui de la santé.

En implantologie dentaire, où les exigences mécaniques, biologiques et esthétiques sont très élevées, le choix du matériau ainsi que l'état de sa surface jouent un rôle clé dans la réussite de l'implant. L'acier inoxydable 316L, connu pour ses bonnes propriétés mécaniques et sa résistance à la corrosion, reste encore utilisé dans certaines applications biomédicales. Cependant, pour améliorer davantage son intégration osseuse et ses performances en service, il est généralement recommandé de recourir à des traitements de surface adaptés.

Parmi ces traitements, le sablage est reconnue pour son efficacité pour créer une surface propre et parfaitement décapée. En effet, il permet de modifier la topographie de surface et sa dureté, ce qui engendrer un effet positif sur les propriétés mécaniques du matériau. Malgré son utilisation courante, les effets du sablage sur les propriétés spécifiques de l'acier 316L ne sont pas encore bien exploités, notamment en termes de dureté superficielle et de résistance à l'usure.

Dans ce contexte, notre travail de fin d'étude s'inscrit dans une démarche d'analyse et d'évaluation de l'impact du sablage sur les propriétés de l'acier inoxydable 316L, en mettant l'accent sur les paramètres du procédé et leurs influences via une approche expérimentale basée sur les plans d'expériences.

Le présent mémoire est organisé en quatre chapitres :

Le chapitre I présente une synthèse bibliographique portant sur les aciers inoxydables, leurs caractéristiques, leur utilisation, ainsi que les principes du sablage et son importance en implantologie dentaire.

Le chapitre II est dédié aux outils statistiques utilisés dans l'expérimentation, notamment les plans d'expériences, leurs avantages et leur application dans ce type d'étude.

Le chapitre III décrit les matériels utilisés, les méthodes expérimentales adoptées ainsi que les techniques de caractérisation employées pour analyser les effets du sablage.

Enfin, le chapitre IV est consacré à la présentation, à l'analyse et à la discussion des résultats obtenus suite aux différentes campagnes expérimentales.

**CHAPITRE I :**

**ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

# **I.1. Introduction**

Ce chapitre présente un aperçu des connaissances de base tirées de la littérature, essentielles pour comprendre le contexte général de notre étude. En présentant des notions théoriques sur les aciers inoxydables, sur le traitement de sablage et sur l'importance de l'état de surface dans la performance des pièces en mécanique.

## **I.2. Généralités sur les aciers inoxydables :**

### **I.2.1. Définition :**

« Les aciers inoxydables sont des alliages à base de fer et dont la teneur minimale en chrome est de l'ordre de 11,0 pour cent. Ils sont réputés résister à la corrosion. Cette propriété est basée sur le phénomène de passivité qui implique la formation d'une barrière très fine à la surface de l'alliage. » [1].

### **I.2.2. Historique des aciers inoxydables :**

La découverte des aciers inoxydables s'est inscrite dans le contexte d'innovations métallurgiques du début du XXe siècle. En 1913, Harry Brearley, à Sheffield, développa un alliage à 12,8 % de chrome résistant à la corrosion, marquant la naissance des aciers inoxydables martensitiques [2]. Toutefois, dès 1904, Léon Guillet en France avait étudié les alliages fer-chrome, posant les bases de leur classification moderne. En Allemagne, Eduard Maurer et Benno Strauss, travaillant chez Krupp, développèrent entre 1909 et 1912 les premiers aciers austénitiques, dont le fameux "V2A". La Première Guerre mondiale stimula leur industrialisation, et dès les années 1920, leur usage s'étendit à de nombreux domaines industriels grâce à leur grande polyvalence [3].

### **I.2.3. Classification des aciers inoxydables :**

Les aciers inoxydables peuvent être classés selon plusieurs critères, notamment leur teneur en chrome, leur procédé de fabrication, les caractéristiques physico-chimiques des environnements d'utilisation, ou encore leurs propriétés mécaniques. Toutefois, la classification la plus pertinente reste celle fondée sur leur structure cristallographique, qui permet de regrouper ces alliages en quatre grandes familles : austénitique, ferritique, martensitique et duplex.

a. Aciers inoxydables austénitiques:

- Structure cristalline : austénite (cubique à faces centrées).
- Propriétés : excellente résistance à la corrosion et à la chaleur, bonne formabilité et soudabilité.

b. Aciers inoxydables ferritiques:

- Structure cristalline : ferrite (cubique centré).
- Propriétés : bonne résistance à l'oxydation, mais moins ductiles que les austénitiques.

c. Aciers inoxydables martensitiques :

- Structure cristalline : martensite (tétraogonale centrée).
- Propriétés : haute résistance mécanique, mais moins résistants à la corrosion.

d. Aciers inoxydables duplex (austénitique-ferritique) :

- Structure cristalline : mélange de ferrite et d'austénite.
- Propriétés : combinaison de bonnes résistance mécanique et résistance à la corrosion.

#### **I.2.4. propriétés fondamentales des aciers inoxydables:**

##### **I.2.4.1. Résistance à la corrosion :**

La résistance à la corrosion des aciers inoxydables est principalement due à la formation d'une couche passive d'oxyde de chrome ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) à leur surface. Cette couche, fine et adhérente, protège le matériau sous-jacent des agents corrosifs. En cas de dommage mécanique ou chimique, elle se reforme spontanément en présence d'oxygène, assurant une protection continue [4].

##### **I.2.4.2. Propriétés mécaniques :**

Les aciers inoxydables présentent un bon équilibre entre résistance mécanique et ductilité, avec des propriétés variables selon leur structure. Les austénitiques se distinguent par une résistance modérée (500–750 MPa) et une excellente ductilité, tandis que les ferritiques offrent une résistance moyenne (400–600 MPa) . Les martensitiques, plus durs (jusqu'à 1000 MPa), sont moins ductiles.

La limite d'élasticité des aciers inoxydables varie de 200 à 500 MPa selon le type. En termes de dureté, les martensitiques sont les plus résistants (jusqu'à 500 HB après traitement thermique). La

résistance à la fatigue est acceptable pour les austénitiques, meilleure pour les martensitiques mais limitée par leur fragilité. Les austénitiques conservent aussi une bonne ténacité à basse température [5].

### **I.2.5. Applications industrielles :**

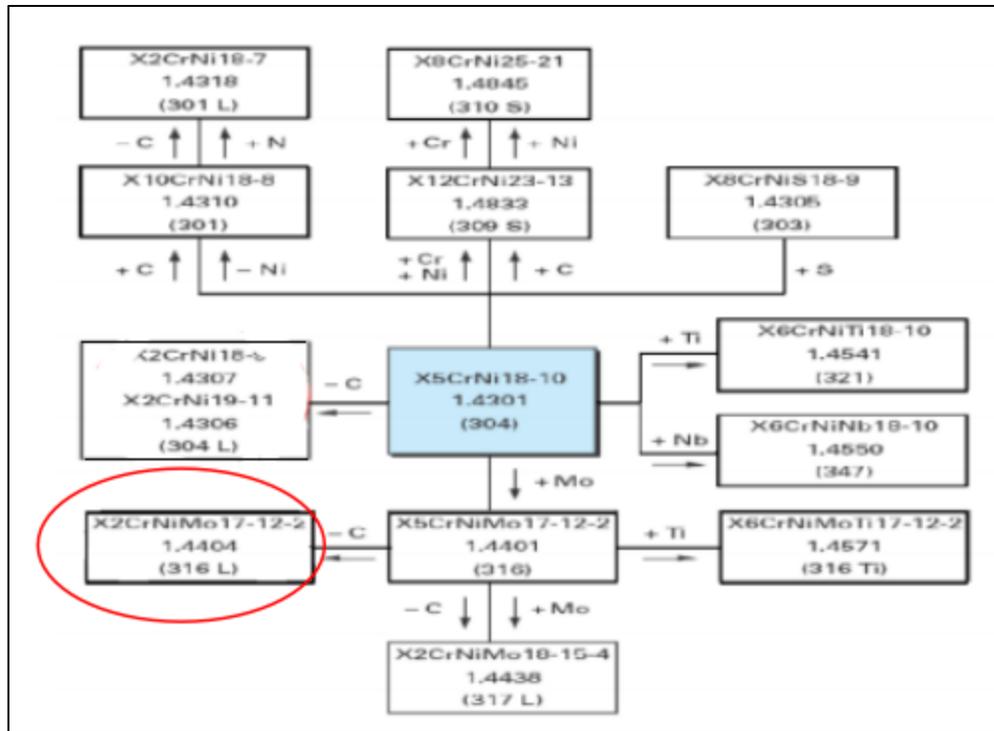
Les aciers inoxydables occupent une place incontournable dans une grande variété d'applications industrielles. Ces matériaux sont utilisés dans des secteurs allant de l'automobile à la médecine, en passant par la chimie, la construction et l'aéronautique. Ils sont choisis pour leur bonne résistance à la corrosion adaptée aux environnements acides et salins, haute résistance à la traction, à la rupture et à la fatigue et particulièrement leur excellente biocompatibilité.

L'acier inoxydable 316L est très largement utilisé dans la fabrication d'implants chirurgicaux et d'autres dispositifs médicaux. Ses propriétés de biocompatibilité, de résistance mécanique et de résistance à la corrosion en milieu biologique en font un matériau de choix pour des applications biomédicales, notamment en tant que des [6]:

- ✧ Implants chirurgicaux : utilisé pour les plaques, vis, et tiges dans les interventions orthopédiques et traumatologiques. Sa résistance mécanique lui permet de supporter des charges sans se dégrader.
- ✧ Prothèses : les prothèses dentaires et les implants cardiaques utilisent l'acier inoxydable AISI 316L pour ses propriétés de durabilité et de compatibilité avec les tissus humains.
- ✧ Dispositifs médicaux : l'acier inoxydable 316L est également utilisé dans les dispositifs médicaux comme les cathéters, les aiguilles et les instruments chirurgicaux grâce à sa facilité de stérilisation et sa résistance à la corrosion.

### **I.3. Présentation de l'acier inoxydable AISI 316L:**

L'acier inoxydable AISI 316L est un alliage austénitique à faible teneur en carbone, contenant typiquement au minimum 16 % de chrome et 10 % de nickel. Cette nuance est une dérivée de l'AISI 304 (figure I.1), enrichie en molybdène (environ 2–2,5 %) afin d'améliorer la résistance à divers types de corrosion, notamment la corrosion par piqûres, la corrosion en crevasse et la corrosion sous contrainte, particulièrement en environnements contenant des ions chlorure.



**Figure I. 1. Aciers inoxydables austénitiques dérivés de la nuance de base 304 [5]**

Comparé à la nuance AISI 316, l'AISI 316L se distingue par une teneur en carbone réduite à moins de 0,03 %, limitant ainsi la formation de carbures de chrome aux joints de grains lors des traitements thermiques ou du soudage. Cette précipitation, connue pour favoriser la corrosion intergranulaire, est ainsi efficacement supprimée.

Par ailleurs, cette réduction de la teneur en carbone contribue à améliorer les propriétés mécaniques, notamment la ductilité, la ténacité, la résistance à la traction et au fluage. Grâce à cet équilibre entre résistance à la corrosion et performances mécaniques, l'AISI 316L est aujourd'hui l'un des matériaux les plus recommandés pour une large gamme d'applications industrielles, notamment dans les domaines biomédical, chimique, naval et alimentaire.

### **I.3.1. Composition chimique:**

La composition chimique typique de l'acier 316L comprend 16 à 18 % de chrome, 10 à 14 % de nickel et 2 à 3 % de molybdène, éléments essentiels pour renforcer sa résistance à la corrosion, en particulier par piqûres. Il contient également des éléments en plus faibles proportions, comme le manganèse ( $\leq 2$  %), le silicium ( $\leq 1$  %), le phosphore ( $\leq 0,045$  %), le soufre ( $\leq 0,03$  %) et l'azote ( $\leq 0,10$  %). Sa teneur très réduite en carbone ( $\leq 0,03$  %) – d'où le « L » pour Low Carbon – limite

la formation de carbures de chrome lors du soudage, ce qui améliore sa résistance à la corrosion intergranulaire. Le reste de la composition est constitué de fer (Fe), en tant qu'élément principal de base. La figure I.2 montre la composition chimique de l'acier 316L.

max %	304	304L	316	316L	316LN	316H
Fe	balance	balance	balance	balance	balance	Balance
Cr	18-20	18-20	16-18	16-18	16-18	16-18
Ni	8.0-10.5	8.0-10.5	10.0-14.0	10.0-14.0	10.0-14.0	10.0-14.0
Mo	-	-	2-3	2-3	2-3	2-3
Mn	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Si	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
N	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10-0.30	-
P	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
C	max. 0.08	max. 0.03	max. 0.08	max. 0.03	max. 0.03	0.04-0.10

**Figure I. 2. Composition chimique typique du 316L et d'autres aciers inoxydables [7]**

### **I.3.2. Propriétés structurales :**

L'acier 316L possède une structure austénitique, caractérisée par un réseau cristallin cubique à faces centrées. Cette structure lui confère une excellente ductilité et ténacité, même à basses températures.

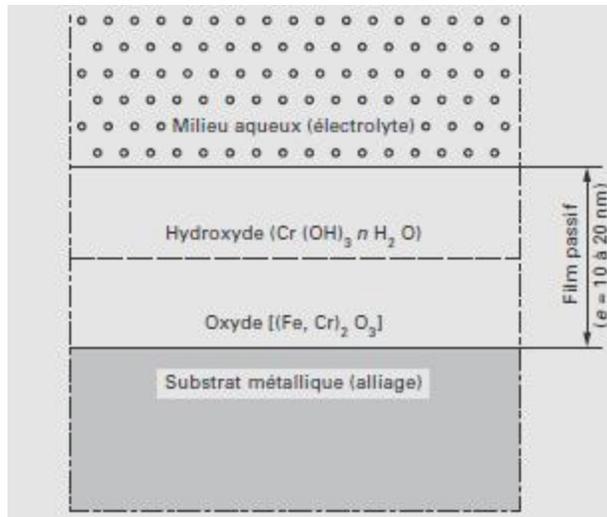
### **I.3.3. Propriétés mécaniques :**

L'acier AISI 316L possède de bonnes propriétés mécaniques de formabilité et soudabilité, qui sont essentielles pour les applications nécessitant des opérations de fabrication complexes. Toutefois, sa résistance à la fatigue est faible lorsque des contraintes répétitives et cycliques sont appliquées. En effet, cet acier est principalement sélectionné pour sa résistance à l'oxydation, au détriment de ses performances mécaniques.

### **I.3.4. Propriétés électrochimiques :**

La formation spontanée d'une couche passive d'oxyde de chrome en surface protège le 316L contre la corrosion. En effet, les aciers inoxydables développent un film passif protecteur, représenté par un modèle bicouche ( figure I.3). Ce film est composé de :

- ✓ Une couche interne adhérente au substrat métallique, constituée principalement d'oxydes mixtes de type  $(Fe, Cr)_2O_3$ .
- ✓ Une couche externe, plus diffuse, formée essentiellement d'hydroxydes de chrome, de type  $Cr(OH)_3nH_2O$ .



**Figure I. 3. Modèle bicouche de film passif [4].**

### **I.3.5. Applications industrielles:**

L'acier inoxydable 316L est largement utilisé dans la fabrication d'instruments médicaux et chirurgicaux, tels que les scalpels et les aiguilles, ainsi que dans de nombreux dispositifs implantables comme les valves cardiaques, pacemakers, stents (vasculaires et urétraux), systèmes de fixation osseuse (plaques, vis, broches), prothèses (articulaires et orthopédiques) et équipements orthodontiques (implants dentaires, appareils de contention, pinces). Ce matériau est particulièrement adapté aux outils médicaux en raison de ses nombreuses qualités : excellente résistance à la corrosion, facilité de nettoyage et de stérilisation, bonne usinabilité pour la fabrication de pièces de petite taille et de géométrie complexe, durabilité et coût modéré, avec en prime une possibilité de recyclage.

## **I.4. Implants dentaires :**

### **I.4.1. Historique :**

Les implants dentaires, utilisés pour remplacer des dents manquantes, trouvent leurs origines dans l'Antiquité, comme en témoignent des crânes mayas du VI<sup>e</sup> siècle comportant des coquillages intégrés à l'os. Toutefois, l'implantologie moderne débute en 1952 grâce au professeur Per-Ingvar Brånemark, qui découvre l'**ostéointégration** du titane, une avancée majeure aboutissant à la pose du premier implant en 1965 [2]. Depuis, les matériaux et techniques se sont perfectionnés, intégrant alliages de titane, céramiques, surfaces modifiées, ainsi que des technologies comme

l'imagerie 3D et la planification numérique, améliorant considérablement la précision et les taux de succès des traitements.

#### **I.4.2. Critères de choix des biomatériaux en dentisterie :**

La réussite des implants dentaires repose sur le choix rigoureux des biomatériaux, qui doivent répondre à des exigences techniques strictes pour assurer une intégration optimale et une durabilité à long terme. Les principaux critères de sélection sont les suivants [2] :

- a) **Biocompatibilité:** le biomatériau doit être compatible avec les tissus biologiques environnants, minimisant ainsi les risques de rejet, d'inflammation ou de réaction immunitaire.
- b) **Propriétés Mécaniques:** les propriétés mécaniques du biomatériau doivent être adaptées aux contraintes fonctionnelles auxquelles l'implant sera soumis. Une résistance mécanique adéquate est essentielle pour garantir la stabilité et la longévité de l'implant.
- c) **Inertie Chimique:** le matériau doit présenter une inertie chimique suffisante pour résister aux environnements biologiques sans se dégrader, évitant ainsi la libération de substances potentiellement nocives. Cette inertie est cruciale pour prévenir les réactions indésirables dans le corps.
- d) **Processabilité:** la capacité du biomatériau à être façonné et traité selon les exigences cliniques est primordiale. Une bonne processabilité permet de réaliser des implants personnalisés, adaptés à chaque situation clinique.
- e) **Durabilité:** le biomatériau doit maintenir ses propriétés fonctionnelles sur le long terme, résistant à l'usure, à la corrosion et aux sollicitations mécaniques. Cette durabilité est essentielle pour assurer la pérennité de l'implant et éviter des interventions correctives prématurées.

### **I.5. Traitements mécaniques de surface**

#### **I.5.1. Définition:**

Les traitements mécaniques de surface sont des procédés basés sur l'induction d'une déformation plastique hétérogène au niveau de la surface du matériau. Ces procédés consistent à appliquer une pression contrôlée à l'aide d'un outil de forme spécifique ou par l'intermédiaire d'une onde de

choc, entraînant ainsi une déformation plastique localisée [8]. En raison de l'incompatibilité de cette déformation le long de la profondeur affectée, des contraintes résiduelles de compression sont générées au sein de la zone traitée.

La déformation plastique induite peut également provoquer plusieurs effets métallurgiques notables [9]:

- ✓ Un écrouissage de la couche superficielle, entraînant un durcissement en profondeur limitée ;
- ✓ Un raffinement granulométrique par réduction de la taille des grains déformés ;
- ✓ Une éventuelle transformation de phase dans la zone écrouie.

Les modifications induites au niveau microstructural, telles que l'écrouissage, le raffinement granulaire, et la génération de contraintes résiduelles de compression, confèrent au matériau une amélioration notable de ses performances mécaniques en service. Ces évolutions structurales renforcent la résistance à la fatigue par inhibition de l'initiation et de la propagation des fissures, réduisent les taux d'usure grâce à l'augmentation de la dureté superficielle, et diminuent les coefficients de frottement par modification de la morphologie de surface et des mécanismes de contact tribologique.

### **I.5.2. Types des traitements mécaniques de surface :**

Le sablage est un procédé de traitement de surface largement utilisé dans l'industrie pour modifier les caractéristiques topographiques et mécaniques des matériaux. Plusieurs variantes peuvent être distinguées en fonction des objectifs techniques :

- Sablage classique (dry blasting) :

Utilise des abrasifs secs tels que le corindon, la grenat ou l'alumine, projetés sous pression d'air. Il permet principalement de nettoyer la surface, d'augmenter sa rugosité et d'améliorer localement les propriétés mécaniques telles que la microdureté et la résistance à l'usure.

- Sablage humide (wet blasting) :

Combine un abrasif fin avec de l'eau pour réduire la température de surface et minimiser la génération de poussière. Ce type de sablage produit une surface plus homogène et moins agressive, ce qui le rend particulièrement adapté aux applications exigeant une propreté élevée, notamment dans le domaine biomédical.

- Micro-sablage :

Technologie utilisée pour des traitements localisés sur des surfaces restreintes ou des composants miniatures. L'utilisation de buses très fines et d'abrasifs calibrés permet une grande précision, souvent employée dans les secteurs médical et électronique.

- Grenailage (shot peening) :

Bien qu'apparenté au sablage, cette méthode vise à induire des contraintes résiduelles compressives en surface afin d'augmenter la résistance à la fatigue. Les particules métalliques utilisées sont généralement sphériques et projetées avec une énergie contrôlée.

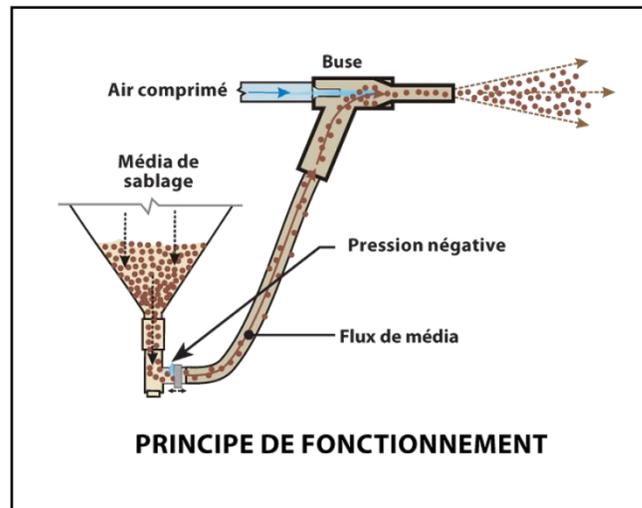
Chaque méthode présente des avantages spécifiques et s'adapte à différents besoins en termes de finition, d'intégrité mécanique ou de biocompatibilité. Dans le cadre de cette étude, le sablage sec a été retenu pour ses capacités à améliorer les propriétés mécaniques superficielles tout en étant facilement reproductible dans un contexte industriel.

Plusieurs techniques sont employées pour modifier la surface des implants :

### **I.5.3. Sablage :**

#### **I.5.3.1. Concept :**

Le sablage est un procédé industriel utilisé pour nettoyer et préparer les surfaces métalliques en projetant, à grande vitesse, des particules abrasives au moyen d'air comprimé. Cette technique permet non seulement d'éliminer efficacement la rouille, les résidus de peinture, les oxydes et autres impuretés, mais aussi de générer une rugosité maîtrisée, essentielle à l'adhérence des revêtements de protection. En plus de son rôle de nettoyage, le sablage sert à décaper, désoxyder, matifier, graver, satiner ou encore décorer diverses surfaces métalliques. La figure I.4 montre le principe de ce traitement mécanique de surface.



**Figure I. 4. Concept de sablage.**

### **I.5.3.2. Propriétés améliorées par sablage :**

Le sablage est un procédé qui permet d'améliorer plusieurs propriétés des matériaux, en particulier des métaux, en modifiant leur surface. Les principales modifications induites par ce traitement sont les suivantes:

#### **a) Nettoyage en profondeur :**

Le sablage élimine efficacement les impuretés, la rouille, les anciennes peintures et autres contaminants de la surface métallique. Cette action garantit une surface propre, essentielle pour les traitements ultérieurs tels que la peinture, la galvanisation ou l'application de revêtements protecteurs.

#### **b) Amélioration de l'adhérence des revêtements :**

En projetant des particules abrasives sur la surface, le sablage crée une rugosité contrôlée. Cette texture favorise une meilleure accroche des revêtements ultérieurs, tels que les peintures ou les traitements de surface, prolongeant ainsi la durabilité et l'efficacité de ces revêtements.

#### **c) Renforcement des propriétés mécaniques :**

Le processus de sablage induit des contraintes résiduelles de compression à la surface du matériau. Ces contraintes augmentent la résistance à la fatigue et à la corrosion sous contrainte, améliorant ainsi la durabilité des composants mécaniques soumis à des sollicitations répétées.

**d) Préparation pour d'autres traitements :**

Le sablage prépare efficacement les surfaces métalliques pour des traitements ultérieurs tels que la peinture, la galvanisation ou l'application de revêtements protecteurs. Une surface bien préparée assure une meilleure efficacité de ces processus, garantissant une protection optimale contre la corrosion et l'usure.

**e) Amélioration de l'apparence esthétique :**

Le sablage peut être utilisé pour créer des finitions décoratives sur les surfaces métalliques, donnant un aspect uniforme et soigné aux pièces traitées. Cette technique est particulièrement utile dans des applications où l'esthétique est primordiale, comme dans l'industrie du design ou de l'architecture.

## **I.6. Importance de l'état de surface dans le contrôle des composants en mécanique**

L'état de surface est un facteur essentiel pour la performance mécanique et biologique des implants médicaux, notamment les implants dentaires. Il influence la résistance à la fatigue, au frottement, à l'usure et à la corrosion.

Le sablage modifie cet état de surface en créant une rugosité contrôlée et en durcissant la couche superficielle du matériau. Cette amélioration est due à un phénomène appelé écrouissage, qui se produit quand la surface métallique subit une déformation plastique sous l'impact des particules abrasives.

**a) Influence de la microdureté**

La microdureté est une mesure de la résistance locale du matériau à la pénétration. Elle est très sensible aux traitements de surface comme le sablage. Une augmentation de la microdureté signifie que la surface est plus résistante à l'usure et à la déformation.

Dans le cas de l'acier inoxydable 316L utilisé pour les implants dentaires, cette augmentation de la microdureté améliore aussi la résistance à la corrosion par piqûres, ce qui est important dans l'environnement humide de la bouche.

#### **b) Rôle du sablage sur les implants dentaires**

Le sablage est souvent utilisé pour préparer les surfaces d'implants afin d'améliorer leur intégration osseuse (ostéo-intégration). Une surface légèrement rugueuse favorise l'adhésion des cellules osseuses (ostéoblastes) et accélère la guérison.

En même temps, le sablage renforce mécaniquement la surface, ce qui augmente la durée de vie de l'implant et sa résistance aux forces de mastication.

### **I.7. Conclusion**

Ce chapitre a permis de présenter les bases nécessaires à la compréhension du sujet étudié. L'acier inoxydable 316L a été choisi pour cette étude en raison de ses bonnes propriétés mécaniques, de sa résistance à la corrosion et de sa biocompatibilité, ce qui le rend très utilisé dans le domaine biomédical, notamment pour les implants dentaires.

Les traitements mécaniques de surface, comme le sablage, ont montré leur importance dans l'amélioration des performances des matériaux. Ce procédé permet d'augmenter la microdureté, de modifier la rugosité et d'induire des contraintes résiduelles compressives, ce qui améliore la résistance à la fatigue et à l'usure.

Enfin, l'état de surface joue un rôle essentiel dans l'intégration biologique des implants. Une surface bien traitée favorise l'adhérence des tissus osseux et réduit les risques de rejet. Le sablage s'impose donc comme une solution efficace pour optimiser ces propriétés, ce qui justifie son utilisation dans cette étude expérimentale présentée au chapitre suivant.

## **CHAPITRE II**

### **LES PLANS D'EXPERIENCES**

## II.1.Introduction

Les plans d'expérience sont une méthode utilisée pour organiser et planifier une série d'essais afin d'obtenir des informations utiles tout en réalisant le moins d'expériences possible. Ce chapitre, explique les principes théoriques et mathématiques derrière les plans d'expériences. Le modèle de Box-Behnken y est détaillé, ainsi que les raisons ayant motivé le choix de ce type de plan pour l'étude menée

Enfin, quelques outils statistiques simples utilisés sont introduits afin d'évaluer le modèle en termes d'ajustement et de fiabilité .

## II.2. Principe:

Les plans d'expériences constituent une méthode rigoureuse pour organiser et optimiser les essais expérimentaux qui accompagnent des recherches scientifiques ou d'études industrielles. Ils sont largement applicables à divers domaines, à partir du moment où l'on recherche d'analyser la relation entre une variable de réponse  $y$  et un ensemble de variables  $x_i$ .

L'approche consiste à utiliser les données issues des essais pour établir un modèle mathématique décrivant le comportement de la réponse en fonction des facteurs étudiés [10]. Ce modèle prend la forme d'une fonction empirique ou statistique, typiquement exprimée sous la forme :

$$y = f(x_i)$$

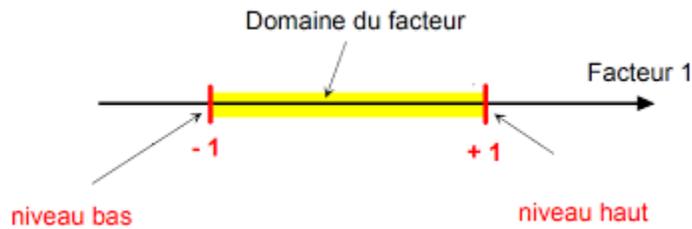
L'enjeu principal de ces plans est donc de trouver un bon équilibre : réaliser le moins d'expériences possible sans perdre la précision sur les résultats.

## II.3. Terminologie:

### II.3.1. Facteur:

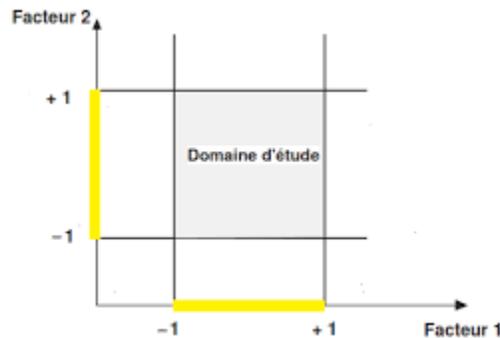
Les variables que l'on souhaite étudier dans une expérimentation sont appelées **facteurs**. En général, chaque facteur varie à l'intérieur d'un **intervalle défini**, délimité par une **borne inférieure** et une **borne supérieure**. Dans le cadre des plans d'expériences, il est courant de **coder ces bornes** : la borne inférieure correspond au **niveau bas** (noté  $-1$ ) et la borne supérieure au **niveau haut**

(noté +1). Un facteur peut également être étudié à travers **plusieurs niveaux intermédiaires**, répartis dans son domaine de variation (**figure II.1**).



**Figure II. 1. Domaine de variation d'un facteur [11].**

Lorsqu'il y a deux facteurs, chacun est représenté par un axe gradué et orienté, formant ainsi un espace à deux dimensions. Le produit cartésien des domaines de variation de ces deux facteurs définit le **domaine d'étude expérimental** (voir **figure II.2**). Ce domaine correspond à l'ensemble des combinaisons possibles entre les niveaux des facteurs. Les facteurs considérés peuvent être de nature continue ou discrète.



**Figure II. 2. Domaine d'étude formé par deux facteurs [11].**

### II.3.2. Réponse :

Les grandeurs mesurées lors de chaque essai expérimental, et qui représentent l'objet principal de l'étude, sont appelées **réponses**. Le choix pertinent des réponses constitue une étape cruciale mais complexe, qui ne relève pas directement de la théorie des plans d'expériences. Il dépend d'une analyse approfondie du système étudié, prenant en compte les objectifs scientifiques ou industriels,

les phénomènes physiques en jeu, ainsi que les contraintes techniques et pratiques de l'expérimentation.

Lorsque la relation fonctionnelle entre les facteurs et la réponse est inconnue, on suppose à priori une loi d'évolution. C'est le modèle mathématique dont la forme la plus générale est :

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

Où :

- ✧  $y$  est la réponse mesurée,
- ✧  $x_1, x_2, \dots, x_n$  sont les facteurs,
- ✧  $f$  est une fonction (souvent inconnue) représentant la tendance du phénomène.

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

### **II.3.3. Surface de réponse:**

En l'absence de toute information sur la fonction qui lie la réponse aux facteurs, une loi d'évolution est posé à priori. Il s'agit d'un modèle mathématique à priori ou le modèle postulé, la relation la plus générale de ce modèle est la suivante :

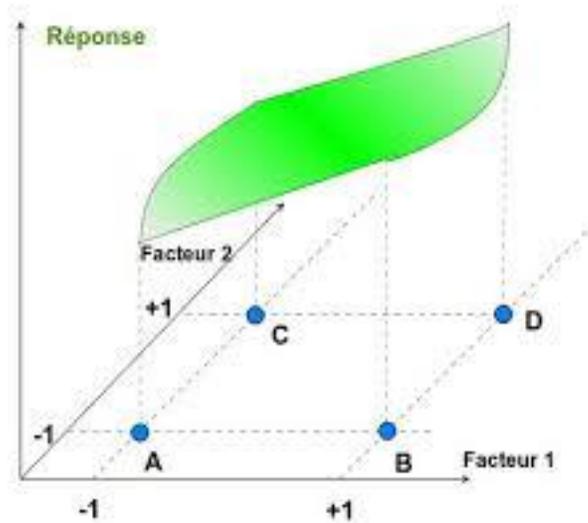
$$y = f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_i^*)$$

Où :

- ✧  $y$  : est la grandeur qui intéresse l'expérimentateur, c'est la réponse ou la grandeur d'intérêt.
- ✧  $x_i^*$  : représentent les niveaux des différents facteurs.

La représentation géométrique des résultats d'un plan d'expériences à deux facteurs nécessite un espace tridimensionnel : deux dimensions sont dédiées aux facteurs et la troisième à la réponse. À

chaque combinaison de niveaux des facteurs, correspondant à un point du domaine d'étude, est associée une valeur de la réponse. L'ensemble de ces points forme, dans l'espace, une surface continue représentant l'évolution de la réponse en fonction des facteurs. Cette surface est appelée surface de réponse (voir **figure II.3**), et elle permet de visualiser les effets individuels et combinés des facteurs sur la variable d'intérêt.



**Figure II. 3. Les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse [11].**

#### **II.3.4. Paramètre :**

Un paramètre est une variable dont la valeur ne peut pas être contrôlée directement par l'expérimentateur, mais dont il est nécessaire de tenir compte dans l'analyse. Bien qu'il n'intervienne pas dans le plan expérimental de manière active, il peut influencer les résultats. Des exemples typiques de paramètres incluent des conditions environnementales comme la température ambiante ou la pression atmosphérique, qui peuvent varier sans être maîtrisées.

#### **II.3.5. Contrainte :**

Dans la pratique, les facteurs utilisés dans un plan d'expériences ne sont pas toujours indépendants. Ils peuvent être liés entre eux par des contraintes, qui peuvent être de nature physique (limitations techniques), matérielle (capacité d'un appareil), budgétaire (coût des essais), ou réglementaire (normes de sécurité, législation).

### II.3.6. Modèle:

Le comportement de la réponse – bien que fondamentalement inconnu – peut être approché par une fonction mathématique définie sur le domaine de variation des facteurs. Cette fonction est appelée le modèle.

Pour obtenir une estimation raisonnable de ce modèle dans un voisinage donné, une approximation par développement de Taylor autour d'un point central (souvent le centre du plan) est généralement utilisé [12]. En pratique, le développement est souvent limité aux termes d'ordre 2, en négligeant les interactions d'ordre supérieur (telles que les interactions triples), ce qui donne un modèle quadratique de la forme :

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

The diagram illustrates the components of the quadratic model equation. Arrows point from each term in the equation to its corresponding label below:

- $a_0$  points to "Valeur au centre du domaine"
- $\sum_{i=1}^k a_i X_i$  points to "Effet moyen de  $X_i$ "
- $\sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^k a_{ij} X_i X_j$  points to "Effet moyen de interaction de 2 facteurs"
- $\sum_{i=1}^k a_{ii} X_i^2$  points to "Effet moyen quadratique d'un facteur"

### II.3.7. Notion de Surface de Réponse [11]

Dans un plan d'expériences, les niveaux des facteurs  $x_i$  représentent les coordonnées d'un point expérimental, tandis que  $y$  est la valeur de la réponse mesurée à ce point. Pour visualiser la relation entre les facteurs et la réponse, une dimension supplémentaire est ajoutée à l'espace expérimental : un axe orthogonal représentant la réponse  $y$ .

Ainsi, la représentation géométrique d'un plan à deux facteurs nécessite un espace à trois dimensions : deux pour les facteurs et une pour la réponse. Chaque point du domaine d'étude correspond à une combinaison spécifique de niveaux des facteurs et donne lieu à une valeur de réponse. L'ensemble des réponses obtenues forme une surface continue dans cet espace, appelée surface de réponse.

Cette surface n'est pas observée directement. Elle est estimée à partir des quelques valeurs de réponse mesurées aux points définis par le plan d'expériences. Ces données permettent de calculer une équation approchée de la surface de réponse à l'aide de méthodes de modélisation mathématique.

### II.3.8. Notion de Modélisation Mathématique

La modélisation consiste à relier la réponse  $y$  aux facteurs  $x_i$  à l'aide d'une fonction mathématique postulée a priori. Une approche classique consiste à utiliser un développement limité de type Taylor–Maclaurin, où les dérivées sont supposées constantes dans le voisinage du point central. Le modèle prend alors la forme d'un polynôme, généralement de degré 2 ou plus selon la complexité attendue du phénomène :

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

- ✧  $y$  : est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée.
- ✧  $x_i$  : représente le niveau attribué au facteur  $i$  par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue et considérée même que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression).
- ✧  $a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii}$  : sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

L'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences. Ce modèle est appelé "modèle postulé" ou "modèle a priori".

### II.4. Types des plans d'expériences :

Les plans d'expériences se déclinent en plusieurs types principaux. Les **plans factoriels complets** étudient toutes les combinaisons possibles des niveaux des facteurs, tandis que les **plans factoriels fractionnaires** utilisent une partie seulement pour réduire le nombre d'essais. Les **plans Plackett-Burman** sont conçus pour identifier rapidement les facteurs influents. Pour modéliser et optimiser une réponse, les **plans de surfaces de réponse** sont utilisés, comme les plans **central composite** ou **Box-Behnken**. D'autres types incluent les **carrés latins**, qui équilibrent l'étude de plusieurs facteurs, et les **plans de mélange**, adaptés aux proportions dans les formulations [13].

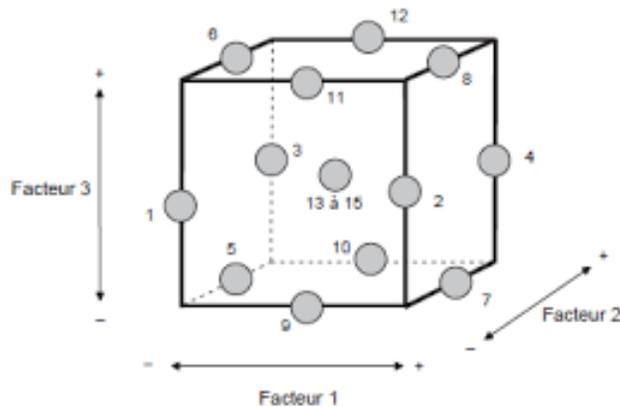
### II.5. Plan d'expériences de Box-Behnken:

#### II.5.1. Propriétés :

Box et Behnken ont introduit en 1960 des plans d'expériences permettant de construire directement des modèles de second ordre. Dans ces plans, chaque facteur est étudié sur trois niveaux codés :  $-1$ ,  $0$  et  $+1$ . Ces plans présentent l'avantage d'être simples à mettre en œuvre et offrent la propriété de **séquentialité**, c'est-à-dire qu'il est possible de commencer par étudier un nombre réduit  $k$  de facteurs, puis d'en ajouter ultérieurement sans compromettre les résultats des essais déjà réalisés [14].

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 [14]. Pour un plan de box-behnken a trois facteurs, les points expérimentaux sont au milieu des arêtes de chacun des côtés du cube (voir **figure II.4**).



**Figure II. 4. Illustration du plan de Box-Behnken pour trois facteurs.**

Alors le plan à trois facteurs comporte 12 essais auxquels peuvent s'ajouter un (ou plusieurs) points centraux, dans la pratique, 3 points au centre sont souvent réalisés. Le plan de Box Behnken pour trois facteurs a donc:  $12+3$  essais, soit 15 essais, c'est le plan classique indiqué par Box et Behnken.

Ces essais sont indiqués par une matrice de calcul (voir **figure II.5**).

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

**Figure II. 5. Matrice des essais de plan de Box-Behnken [14].**

### **II.5.2. Propriétés du plan de Box-Behnken pour trois facteurs:**

Avant la réalisation des essais, plusieurs propriétés du plan d'expériences peuvent être déterminées :

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

Il est important de noter que ces propriétés sont valides uniquement pour le modèle mathématique postulé présenté au paragraphe suivant. Si, pour une raison quelconque, le modèle venait à être modifié, il serait alors nécessaire de recalculer les propriétés correspondantes du plan.

### **II.5.3. Modèle mathématique:**

Ce plan permet d'établir un modèle mathématique du second degré:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + a_{33}X_3^2 + e \quad (\text{II.2})$$

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, 3 points centraux sont souvent choisis permettent d'obtenir un système composé de 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, en tenant compte de la nature aléatoire de la réponse. Implique que plusieurs mesures sur un même point expérimental ne donnent pas exactement le même résultat. Les résultats sont dispersés. Les dispersions ainsi constatées sont appelées erreurs expérimentales.

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

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

$$a = (X^tX)^{-1}X^ty$$

où,  $y$  : est une grandeur de réponses mesurées lors de l'expérimentation

## **II.6. Conclusion :**

La méthode des plans d'expériences permet d'obtenir un maximum d'informations à partir d'un nombre minimal d'essais. Le calcul du modèle mathématique associé permet de décrire le comportement de la réponse en fonction des facteurs étudiés et de construire la surface de réponse correspondante. Le matériel utilisé ainsi que l'approche expérimentale suivie sont présentés dans le chapitre suivant.

**CHAPITRE III :**

**MATERIELS ET METHODES  
EXPERIMENTALES**

### III.1. Introduction :

Ce chapitre présente les différentes étapes expérimentales suivies en vue de l'amélioration des propriétés de l'acier inoxydable 316L, en particulier son durcissement superficiel et sa résistance à l'usure, par sablage. Le but de cette amélioration est la fabrication des implants dentaires de qualité à base d'acier inoxydable 316L.

L'expérimentation est menée au moyen de la méthodologie des plans d'expériences, en l'occurrence le plan de Box Behnken. La démarche appliquée suivant ce plan sera présentée. Les techniques de caractérisation de surface, notamment les mesures de microdureté et le test de frottement sont aussi détaillées.

### III.2. Matériau étudié :

Les essais expérimentaux de ce travail ont été appliqués sur une barre d'acier inox 316L ( $\varnothing$  30 mm), découpée en 16 disques de dimensions ( $\varnothing$  30 mm, e=8mm).

La composition chimique de cet acier relevée par adsorption atomique est montrée dans le **tableau III.1.**

Elément	C	Cr	Ni	Mo	P	S	Si	Mn	Co	Ti	N	Cu	Fe
Pourcentage (%)	0,024	16,64	10,35	2,03	0,02	0,02	0,40	1,51	0,18	0,006	0,04	0,29	Reste

**Tableau III.1 Composition chimique de l'acier inoxydable 316L**

L'acier inoxydable 316L est un alliage de la famille des aciers austénitiques, connu pour sa grande résistance à la corrosion, notamment en milieu chloré ou acide. Le "L" signifie "Low Carbon" (faible teneur en carbone), ce qui améliore sa soudabilité et réduit le risque de corrosion intergranulaire. Les principaux éléments chimiques de cet aciers sont :

- ✧ Fer (Fe) : élément de base
- ✧ Chrome (Cr) : ~16–18 %, pour la résistance à la corrosion
- ✧ Nickel (Ni) : ~10–14 %, pour la stabilité de la structure austénitique
- ✧ Molybdène (Mo) : ~2–3 %, pour améliorer la résistance aux milieux agressifs (acides, chlorures)
- ✧ Carbone (C) :  $\leq 0,03$  %, pour limiter la corrosion intergranulaire
- ✧ Manganèse (Mn), Silicium (Si), Phosphore (P), Soufre (S) : en faibles quantités

### **III.3.Traitement de surface mécanique par sablage:**

#### **III.3.1. Préparation des surfaces**

Au préalable du traitement de sablage, la surface de tous les disque est polie sur une polisseuse **Minitech 233** disponible au niveau de laboratoire des science des matériaux de l'université 08 Mai 1945 Guelma. Le polissage est fait en utilisant un papier abrasif de granulométrie croissante jusqu'à 600.

#### **III.3.2 Le logiciel du Minitab :**

Minitab est un logiciel statistique propriétaire, développé par Minitab Inc., exclusivement pour le système d'exploitation Windows. Lancé en 1972, il est largement utilisé dans le milieu universitaire pour l'enseignement des statistiques, mais il est également orienté vers les entreprises, notamment dans le cadre de la démarche Six Sigma, visant à améliorer la performance et la qualité. Le logiciel intègre plusieurs fonctionnalités avancées, dont une section spécifique dédiée aux plans d'expériences.

Pour ce travail, un logiciel **Minitab** (version intégrée à **Matlab 6.5**) est utilisé afin de:

- déterminer la fonction de prédiction des réponses en fonction des paramètres d'entrée,
- calculer les coefficients **F** et **R<sup>2</sup>**,
- et optimiser les paramètres pour obtenir les meilleures performances.

Le programme en question se déroule suivant l'organigramme présenté sur la **figure II.1**.

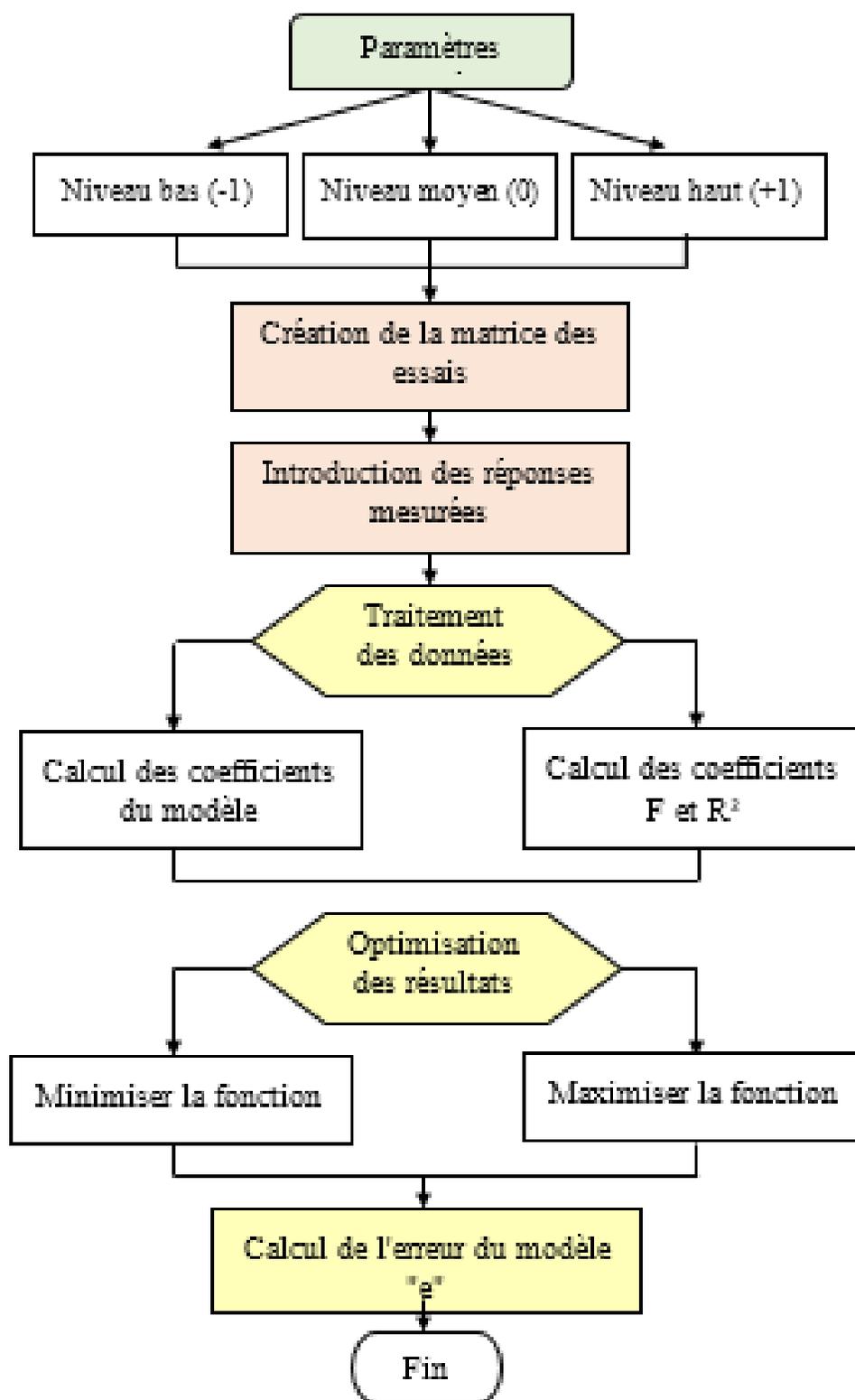


Figure III. 1. Organigramme de calcul.

Le choix du plan d'expériences revêt une importance déterminante pour maximiser la quantité d'informations exploitables et faciliter leur interprétation. Dans le cadre de l'étude menée, un plan de Box-Behnken a été retenu, en raison de plusieurs considérations pratiques :

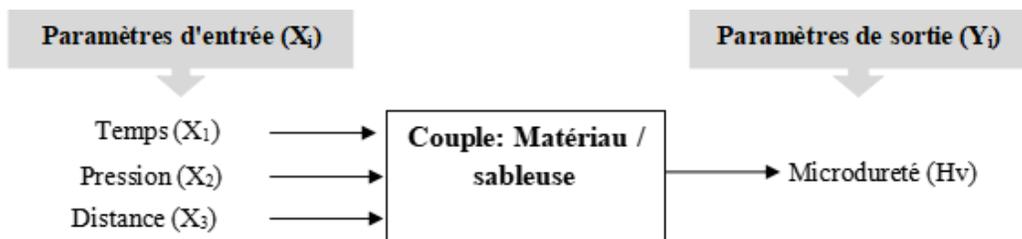
- ✧ Tous les facteurs étudiés peuvent être variés sur trois niveaux, ce qui correspond parfaitement à la structure du plan de Box-Behnken,
- ✧ Le nombre d'expériences est limité en raison des contraintes expérimentales durant le stage pratique,
- ✧ Le modèle mathématique retenu est de second ordre, ce qui permet d'obtenir des résultats plus précis.

### III.3.3. Données d'expériences :

Les essais expérimentaux sont réalisés au niveau du SOMIK spa sur les disques d'acier inoxydable 316L ayant une microdureté vickers initiale de 257 Hv.

- Facteurs variés : les facteurs choisis dans l'expérience sont:
  - Le temps de traitement  $t$  [min],
  - La pression de sablage  $P$  [bars],
  - La distance de projection  $D$  [cm].
- Réponse : pour avoir une consolidation de surface, la surface du 316L doit avoir une microdureté vickers maximale. La réponse ici doit être la valeur de la microdureté. Plus la microdureté est élevée, plus la surface est plus résistante à l'usure.
- Objectif: maximiser la microdureté, ce qui augmente la résistance à l'usure.

Le schéma suivant (figure II.1) montre la manière d'appliquer le plan de Box-Behnken sur cette étude.



**Figure III. 2. Principe de l'expérimentation.**

### III.3.4. Sablage:

Le traitement de surface par sablage est réalisé en utilisant une **Sableuse Jet libre CLEMCO 200 litres** liée avec un compresseur **Compresseur ENMTP, SOFARE, 13 Bar** et une buse de diamètre  $\varnothing$  6mm. L'ensemble de l'équipement de sablage est montré dans la figure II.2.



**Figure III. 1. Matériel de sablage utilisé.**

### III.3.5. Domaines d'étude:

Ce domaine d'étude est défini par les domaines des facteurs : temps, pression et distance.

Paramètres d'entrée	Niveau		
	-1	0	+1
<b>X1:</b> Temps t (min)	5	7,5	10
<b>X2:</b> Pression P (bar)	2	4	6
<b>X3:</b> Distance D (mm)	5	7,5	10

**Tableau III. 2. Domaine d'étude.**

### III.3.6. Matrice d'expérience :

Selon ces niveaux, le plan de Box-Behnken génère une matrice de 15 expériences à réaliser (tableau III.3 & tableau III.4).

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

**Tableau III. 3. Matrice des expériences en unité codé.**

Echantillon	Temps (min)	Pression (bar)	Distance (cm)
1	5	2	7.5
2	10	2	7.5
3	5	6	7.5
4	10	6	7.5
5	5	4	5
6	5	4	10
7	10	4	5
8	10	4	10
9	10	2	10
10	7.5	6	5
11	7.5	2	5
12	7.5	6	10
13	7.5	4	7.5
14	7.5	4	7.5
15	7.5	4	7.5

**Tableau II. 4. Matrice des expériences.**

### **III.3.7. Caractérisation des surfaces:**

#### **III.3.7.1. Mesure de microdureté:**

La microdureté a été mesurée à l'aide d'un microduromètre INNOVATEST (figure II.4), en appliquant une charge de 1 kgf pendant une durée de 15 secondes.

Le microduromètre fonctionne en appliquant une petite force sur un échantillon à l'aide d'un pénétrateur (souvent en forme de pyramide), puis il mesure la trace laissée. Puis, en mesurant trace laissée, Cette trace est ensuite observée au microscope afin d'en déterminer la dureté du matériau. Ce modèle permet aussi une observation claire et précise de la surface grâce à un bon éclairage et un système d'imagerie intégré.

Pour chaque échantillon, trois indentations sont effectuées à des emplacements différents sur la surface. La moyenne est ensuite retenue afin d'obtenir une mesure représentative.



**Figure III. 1. Microduromètre utilisé.**

### **III.3.7.2. Essais tribologiques :**

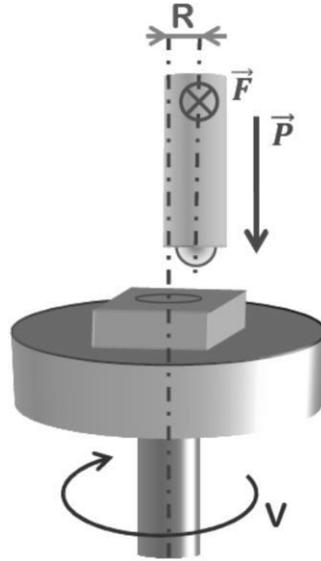
Pour évaluer la résistance à l'usure des échantillons, un tribomètre CSM un tribomètre CSM a été utilisé avec une configuration bille sur disque (voir **figure II.5**) pour effectuer des tests de frottement sur l'échantillon brut et l'échantillon traité (en appliquant les paramètres optimaux de sablage).



**Figure III. 2. Tribomètre CSM.**

Le principe de la mesure, schématisé sur la figure II.6, est basé sur l'application d'une charge sur une bille fixée sur un bras. L'échantillon, quand à lui, est fixé sur un support rotatif. La bille est excentrée du centre de rotation d'un rayon  $R$  et tourne à une vitesse  $V$  tandis que la force

tangentielle  $F$  est mesurée au niveau du bras. En connaissant la charge  $P$ , un logiciel en déduit par un calcul le coefficient de friction en fonction du temps.



**Figure III. 3. Principe d'un test de frottement.**

Les conditions de test sont fixés comme suivant:

- ✓ Charge appliquée : 5 N
- ✓ Bille: Alumine ( 6mm,  $H_v=2000$  Hv).
- ✓ Vitesse: 3cm/tours.
- ✓ Distance parcourue: 50m et 75 m
- ✓ Environnement : sec sans lubrification.

Les résultats des essais ont fourni des graphes des coefficients de frottement et une estimation du taux d'usure pour chaque parcours et ont permis de mieux comprendre l'influence du traitement de surface sur les propriétés tribologiques du 316L.

### **III.3.7.3. Observations microscopiques :**

Après le test tribologique, l'échantillon brut et sablé sont observées sous microscope optique Nikon ECLIPSE LV100 ND pour examiner les traces d'usure produites par la bille sur les surfaces.

Cette observation a permis de visualiser et d'analyser les caractéristiques des traces d'usure et la distribution du frottement sur la surface. (**Figure III.7**)



**Figure III.7. Microscopiques Nikon ECLIPSE LV100 ND**

#### **III.3.7.4. Observations profilométrique :**

Après le test tribologique, les surfaces de l'échantillon brut et de l'échantillon sablé ont été analysées au profilomètre de **Cyber technologies CT 100 (figure III.8)** pour évaluer la topographie des traces d'usure laissées par la bille d'alumine. Cette analyse a permis de mesurer avec précision la profondeur, la largeur et la rugosité des sillons formés sur les deux types de surface.



**Figure III.8. Cyber technologies CT 100**

### **III.4.Conclusion :**

Dans ce le matériel utilisé pour réaliser les essais de sablage sur l'acier 316L a été présenté. La planification des expériences menées à l'aide du plan de Box-Behnken a également été expliquée. Enfin, les techniques de caractérisation permettant d'évaluer l'effet du sablage sur les propriétés de surface du 316L ont été exposées. Le chapitre suivant sera consacré à la présentation de l'ensemble des résultats ainsi qu'à leur interprétation.

## **CHAPITRE IV:**

### **RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSIONS**



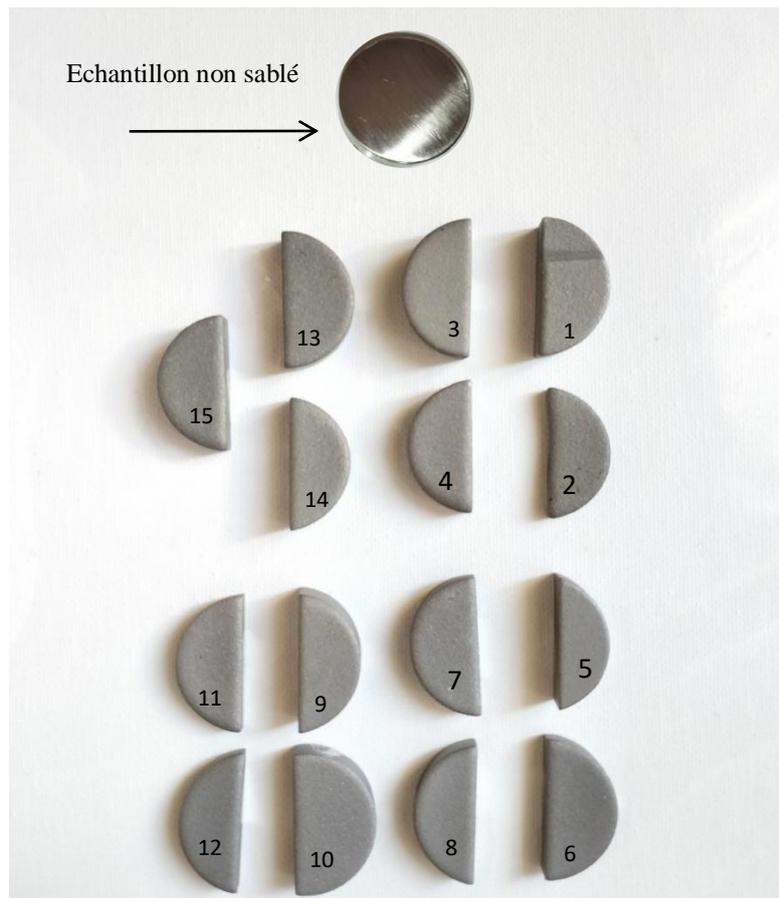
## IV.1.Introduction

Ce chapitre présente et discute les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de cette étude. L'objectif est d'étudier l'influence des paramètres de sablage sur les propriétés mécaniques de surface de l'acier inoxydable AISI 316L, à savoir sa microdureté et sa résistance à l'usure.

Les résultats des mesures de micro-dureté et de test tribologique sont analysés avant et après sablage, permettant ainsi de mettre en lumière les effets du traitement sur les propriétés citées. L'étude comprend également l'élaboration d'un modèle mathématique prédictif pour prédire la microdureté en fonction des paramètres de sablage, avec objectif de maximiser le durcissement de surface ce qui garantit une meilleure résistance à l'usure, critère essentiel dans les applications biomédicales.

## IV.2.Effets de traitement de sablage sur les propriétés de surface du 316 L

Selon la matrice d'expérience, (15) surfaces ont été traitées par sablage sous différents régimes (**Figure IV.1**). Des changements significatifs de l'aspect de surface des échantillons sablés par rapport à l'échantillon non sablé peuvent être observés observer visuellement



**Figure IV. 1.Les surfaces sablés et l'échantillon non sablé**

## IV.2.1.Effets de traitement de sablage sur la micro-durté du 316L

Les résultats de mesures de microdureté Hv après sablage sont illustrés dans le **tableau IV.1**

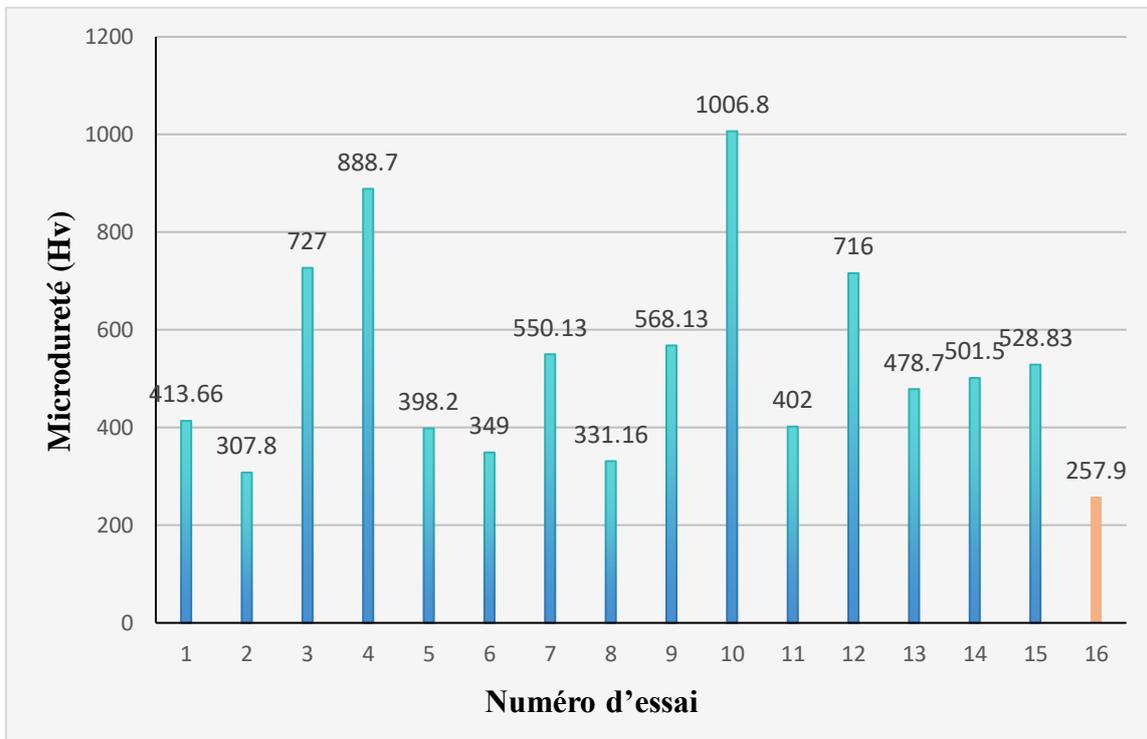
N° essai	Temps (min)	Pression (bar)	Distance (cm)	Hv (moyenne)
1	5	2	7.5	413.66
2	10	2	7.5	307.8
3	5	6	7.5	727
4	10	6	7.5	888.7
5	5	4	5	398.2
6	5	4	10	349.0
7	10	4	5	550.13
8	10	4	10	331.16
9	10	2	10	568.13
10	7.5	6	5	1006.8
11	7.5	2	5	402.0
12	7.5	6	10	716.0
13	7.5	4	7.5	478.7
14	7.5	4	7.5	501.5
15	7.5	4	7.5	528.83

**Tableau IV. 1. Résultats des mesures de microdureté Hv**

L'évolution de la microdureté Hv pour les quinze expériences en comparaison avec l'échantillon brut est montrée sur la figure IV.2. L'analyse de ces résultats expérimentaux montre que la microdureté mesurée est enregistrée dans l'intervalle [307,8 et 1006,8] Hv, ce qui indique son augmentation après tous les essais de sablage par comparaison à la surface non traitée (257,9 Hv) . La microdureté améliorée prend une valeur maximale de 1006,8 Hv suite à l'essai 10 (t=7,5 min , P= 6 bars, D= 5 cm) et ainsi, une augmentation de presque 4 fois est enregistrée. L'essai 04 permet également d'enregistrer une valeur élevée de microdureté (888,7 Hv). Ces deux essais permettent de mettre une hypothèse stipulant que la pression élevée provoquent une consolidation considérable de la surface. On peut remarquer également qu'un temps moyen et une distance courte permettent d'obtenir un durcissement efficace de la surface du 316L (essais de 09 à 15 & essais 7,10, 11 respectivement). Ces résultats illustrent bien l'apport du sablage dans la consolidation de la surface du AISI 316L.

Cet effet explique comme suit: sous l'effet de pression appliquée, les particules abrasives

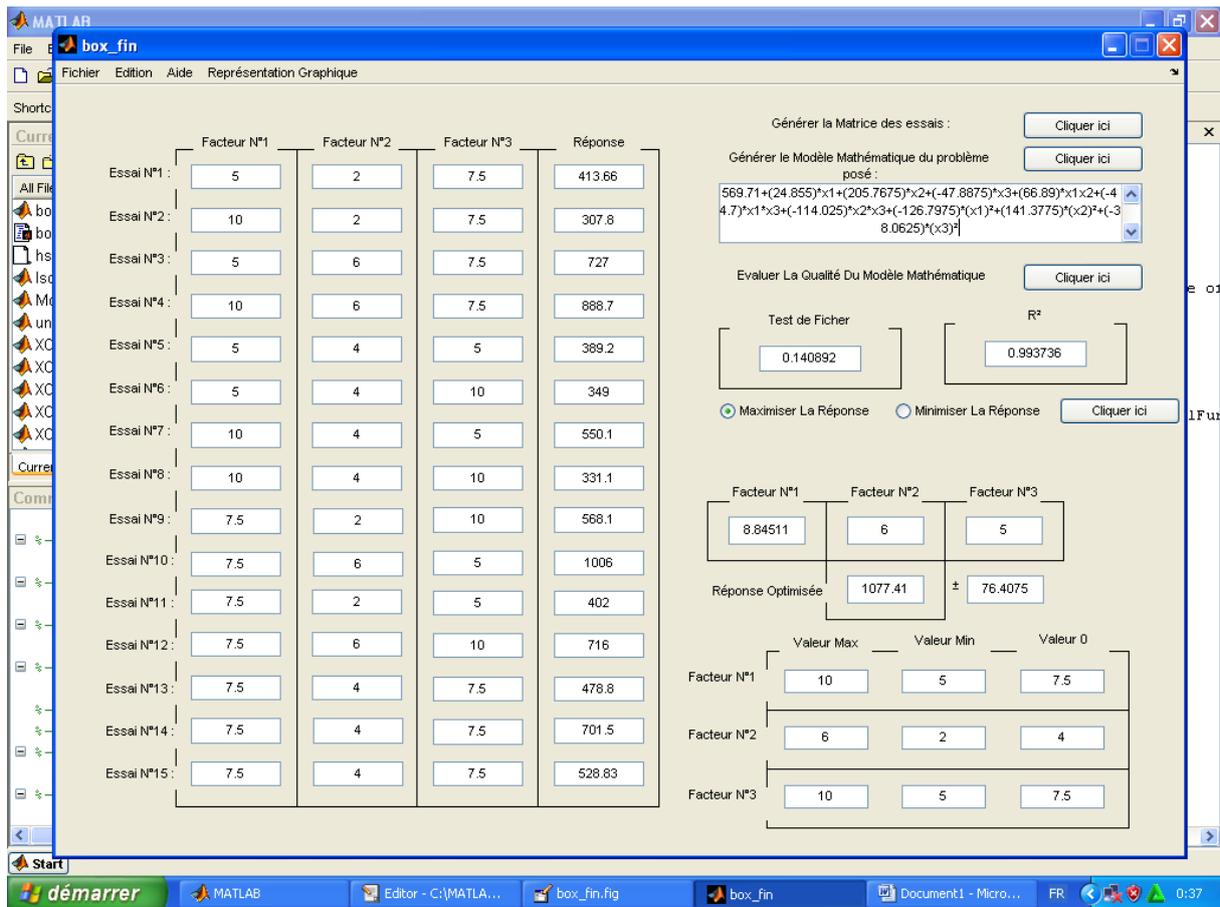
provoquent une déformation plastique de la surface du matériau. C'est le phénomène d'érouissage. En effet, la déformation provoque une accumulation des dislocations dans la structure cristalline du métal, rendant le mouvement ultérieur de ces dislocations plus difficile, ce qui augmente la résistance mécanique et la dureté du matériau, notamment en surface [1]. D'un autre part, un autre phénomène pourra être la cause de l'augmentation de la microdureté: c'est l'affinement des grains. Plusieurs travaux scientifiques ont trouvé que que l'augmentation de la dureté après sablage s'explique par la formation d'une couche superficielle affinée avec des grains recristallisés (réduction de la taille des grains et modification de leur forme) [2,3].



**Figure IV. 2. Effet de sablage sur la microdureté Hv du 316L**

#### **IV.1.2. Modèle mathématique de réponse de sortie :**

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



### Equation de regression:

La relation entre la microdureté Hv du 316L et les paramètres de sablage peut être exprimée par l'équation IV.1

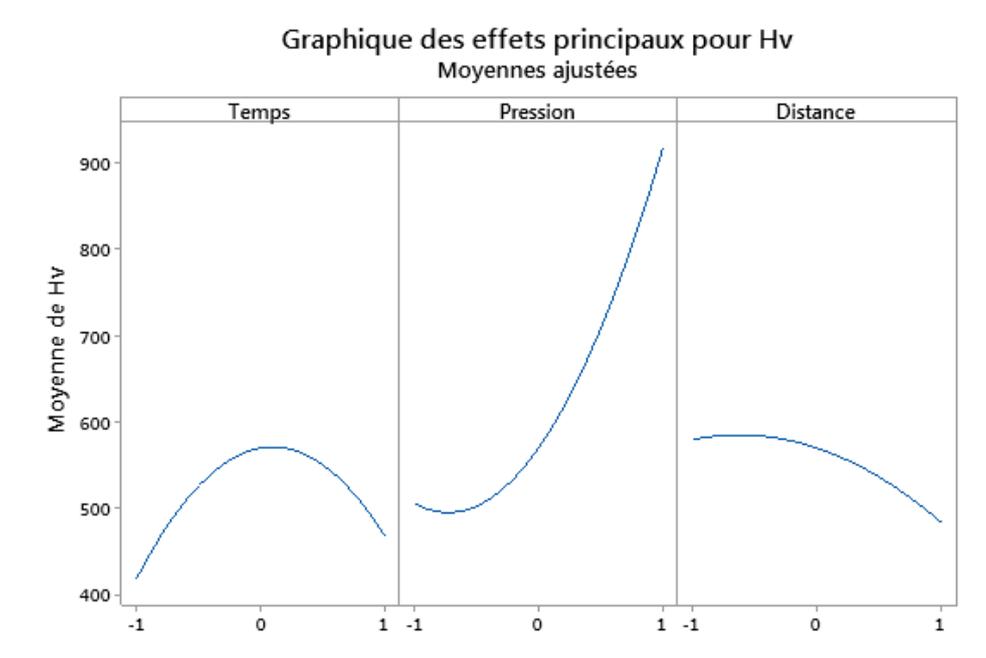
$$\widehat{Hv} = 569.71 + 24.855*Te + 205.7675*Pr + 47.8875*Di + 66.89*Te*Pr + 44.7*Te*Di - 114.025*Pr*Di - 126.7975*Te^2 + 141.3775*Pr^2 - 38.0625*Di^2 + e$$

Avec: Te = temps ; Pr = pression ; Di = distance.

La valeur de R<sup>2</sup> est de 99,37 , ce qui 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. La valeur de coefficient de Fisher est très faible ce qui indique un bon modèle généré.

### IV.2.3.Effets principaux pour la microdureté Hv

Le graphique des effets des paramètres du régime sur la microdureté Hv est illustré sur la **figure IV.3.**



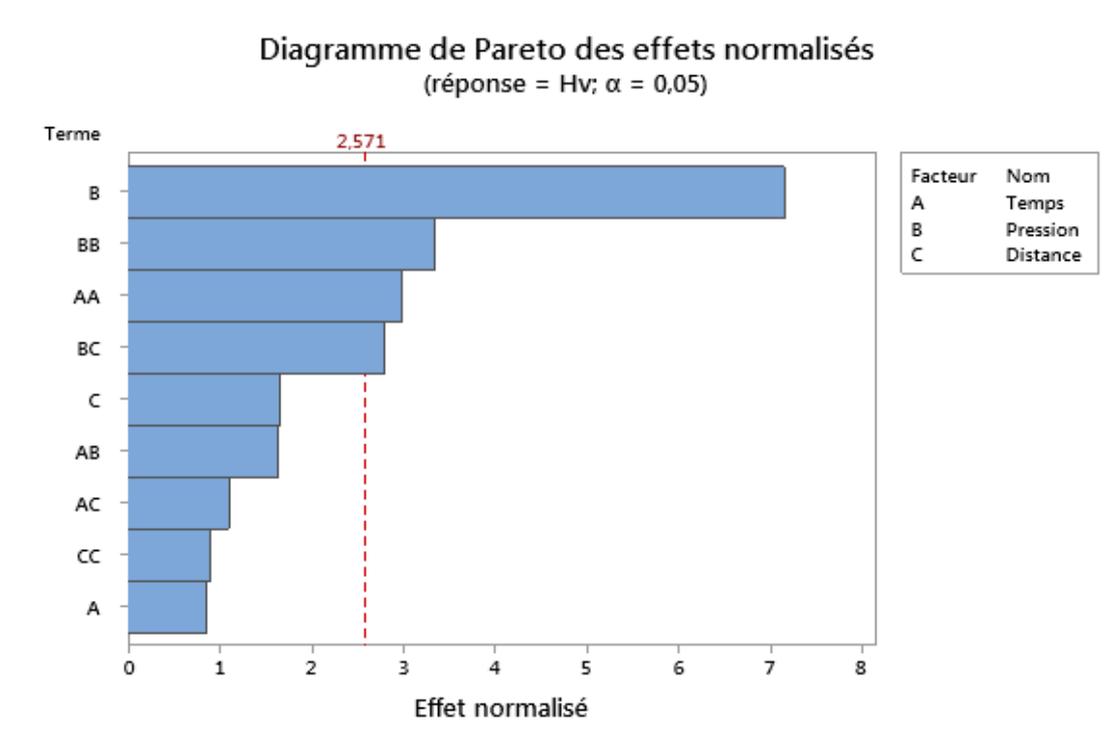
**Figure IV. 3. Diagramme des effets principaux sur Hv.**

D'après ce diagramme, on peut postuler que:

- ✓ Lorsque le facteur Te (temps) est au niveau 0, une microdureté maximale est enregistrée par contre lorsqu'il est au niveau -1, la microdureté est minimale.
- ✓ Quand le facteur Pr (pression) est au niveau -1, la microdureté acquiert une valeur minimale tandis qu'au niveau +1, elle est maximale.
- ✓ Lorsque le facteur Di (distance) est au niveau -1, la microdureté enregistrée est maximale, mais elle diminue lorsque ce facteur est au niveau +1.

Ces remarques confirment nos hypothèses que la pression élevée, le temps moyen et la distance courte sont favorables en vue de l'amélioration de la microdureté du 316L par sablage.

L'importance des effets des paramètres et de leurs interactions au niveau de confiance de 95% est montrée sur le graphique de la **figure IV.4.** D'après le diagramme de Pareto obtenu, on peut remarquer que le facteur B (pression) est le plus influent.



**Figure IV. 4. Diagramme de Pareto.**

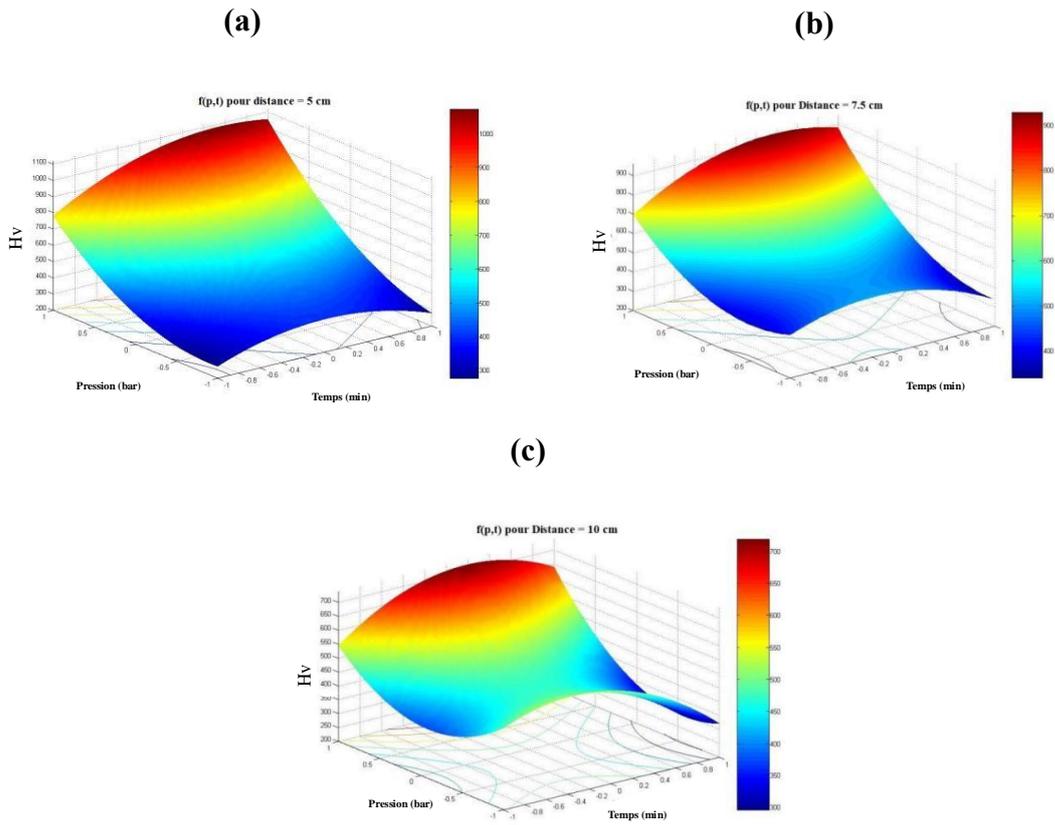
Dans la littérature, plusieurs travaux ont remarqué ces mêmes effets. **Peñuela Cruz et al [3]** ont trouvé que le seul effet significatif de la modification de la dureté d'un alliage de magnésium est l'effet de pression P avec un pourcentage de contribution à la modification de 72,8 %. Ils ont confirmé que la dureté augmente avec la pression, mais que la distance d'application n'a qu'une influence marginale. Les mêmes auteurs ont observé que des grains plus petits dans les échantillons traités avec la distance de projection la plus courte, en accord avec le transfert d'énergie plus élevé.

Une autre étude de **Kaczmarek et al [4]** stipule qu'une pression de sablage de 6 bars permet d'engendrer une déformation élevée et de créer des défauts qui entraînent un durcissement par écrouissage. Cette étude illustre comment le contrôle de la pression peut optimiser la résistance mécanique et la durabilité des surfaces traitées.

#### **IV.2.4. Effets des interactions des paramètres de sablage sur la microdureté**

Les courbes 3D-dimensionnelles correspondantes à la résolution graphique du modèle de microdureté, sont extraites et regroupées sur les **figure IV.5, IV.6 et IV.7.**

##### **a) Effet d'interaction de pression et de temps**



figures IV.5 : Effet de traitement de sablage sur la microdureté Hv: (a) D1= 5cm, (b) D2= 7.5cm et (c) D3= 10cm.

b) Effet d'interaction de pression et de distance

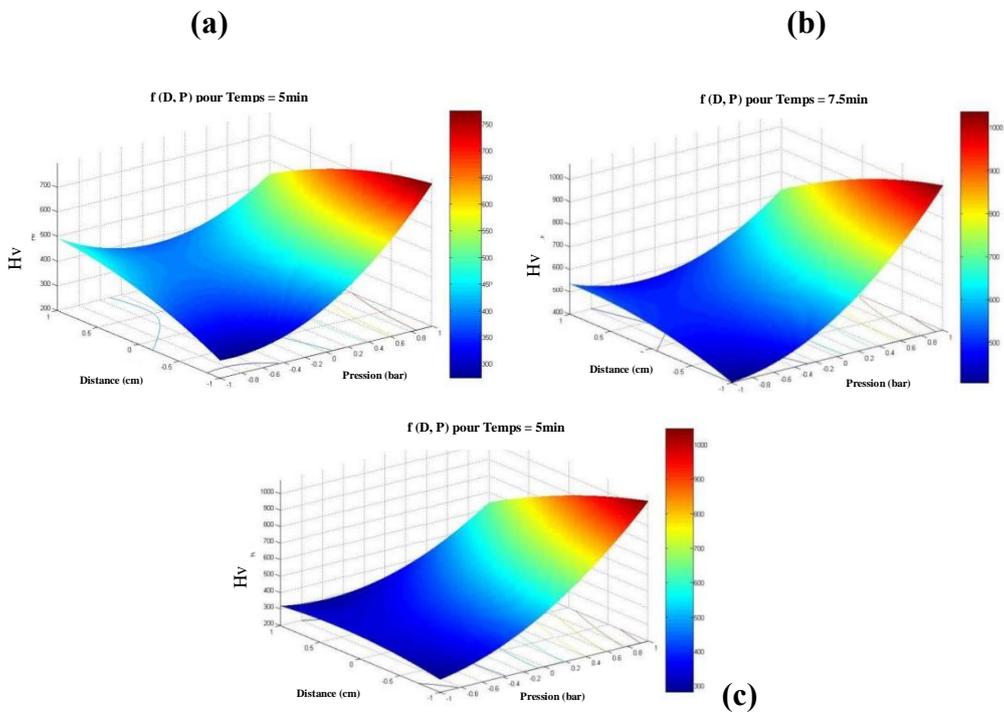


Figure IV. 5 : Effet de traitement de sablage sur la microdureté Hv: (A) t1= 5min, (B) t2= 7.5min et (C) t3= 10min.

### c) Effet d'interaction de temps et distance

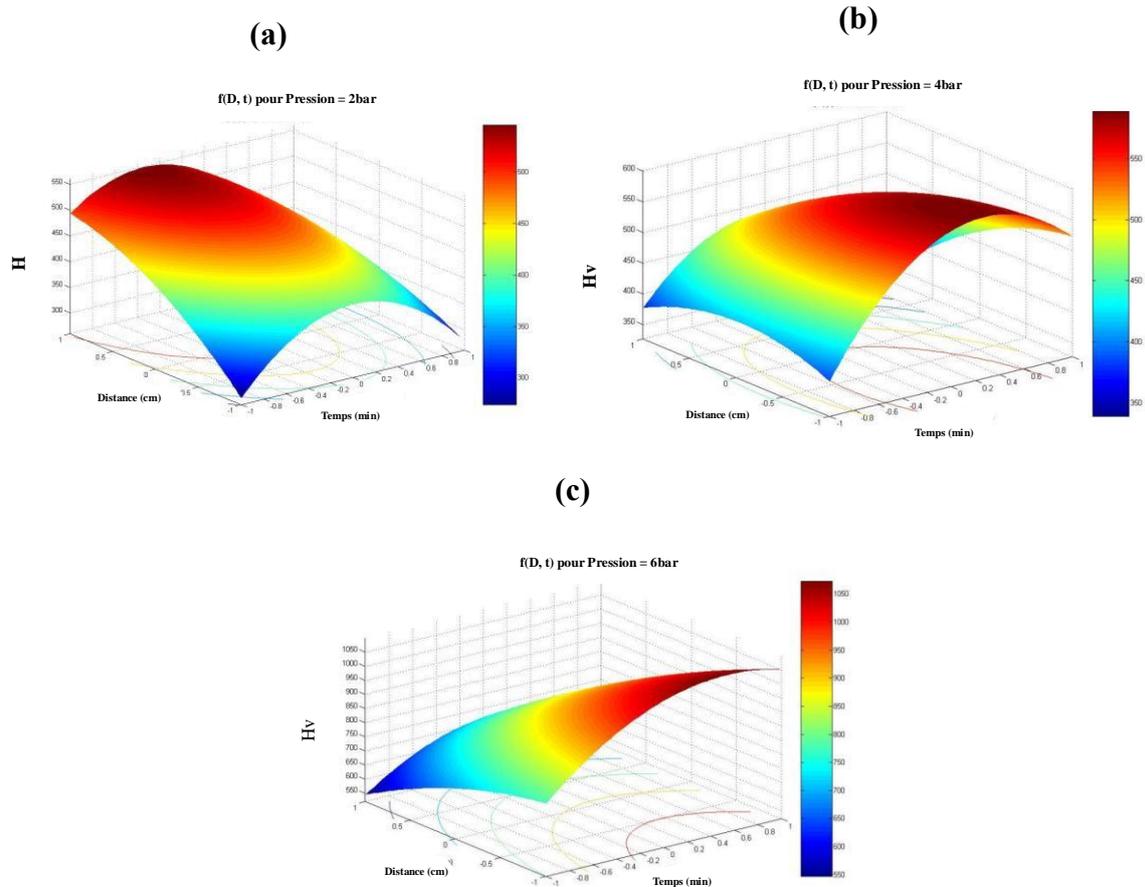


Figure IV. 6: Graphiques des effets de traitement de sablage sur la microdureté Hv: (A) P1= 2 Bar, (B) P2= 4 Bar et (C) P3= 6 Bar.

#### *Interprétation des graphes:*

I. - Les courbes 3D-dimensionnelles présentées dans la **figure IV.5**, sont obtenues en fixant la distance (5 cm, 7,5 cm et 10 cm) et en étudiant l'effet combiné de la pression et du temps sur la microdureté (Hv).

- On remarque que les trois surfaces ont une forme similaire : les tendances générales sont presque les mêmes quelle que soit la distance. Cela signifie que la manière dont la pression et le temps influencent la dureté suit un comportement comparable pour les trois cas.

- Les valeurs élevées de pression permettent d'augmenter la microdureté considérablement, tandis qu'une pression moyenne provoque une baisse significative de la Hv. Ça s'explique par le fait qu'une pression élevée produit une énergie élevée ce qui engendre une déformation plastique considérable.

Pour le temps, des valeurs faibles à moyennes permettent généralement d'atteindre une

microdureté élevée. En revanche, lorsque le temps d'exposition est trop long, la Hv diminue car cela pourrait être dû à une dégradation de la surface causée par une exposition prolongée aux particules abrasives, ce qui peut abîmer ou fatiguer la surface au lieu de l'améliorer.

Pour les différentes distances de projection D, le **tableau IV.2** regroupe les intervalles de variation de la microdureté.

<b>Distance «cm»</b>	<b>Hv max (±)</b>	<b>Hv moy (±)</b>	<b>Hv min (±)</b>
<b>5</b>	<b>1090</b>	<b>750</b>	<b>400</b>
<b>7.5</b>	<b>400</b>	<b>700</b>	<b>500</b>
<b>10</b>	<b>700</b>	<b>600</b>	<b>400</b>

**Tableau IV. 2. Intervalles de variation de la microdureté en fonction de la distance.**

**II.** Les courbes 3D-dimensionnelles présentées dans la **figure IV.6**, sont obtenues en fixant le temps (5 min, 7,5 min et 10 min) et en étudiant l'effet synergique de la pression et de la distance sur la microdureté (Hv). Les courbes indiquent que :

-La microdureté (Hv) varie significativement en fonction de la pression et de la distance. Pour un temps de **5 min**, les valeurs de Hv varient entre environ 250 et 750 Hv, avec une valeur maximale obtenue à haute pression (environ 6 bar) et grande distance (~10cm). La valeur minimale apparaît à basse pression et faible distance. La valeur moyenne se situe autour de 500 Hv.

- Pour un temps de **7.5 min**, la dureté augmente globalement. Elle varie entre environ 300 et 900 Hv, avec une valeur maximale également à haute pression et grande distance, tandis que la valeur minimale reste dans les zones de faibles pression et distance. La moyenne est autour de 620 Hv. Finalement pour un temps de **10 min**, les résultats montrent une légère baisse par rapport à t=7.5 min, ce qui peut être lié à une perte d'efficacité du traitement.

D'après ces résultats, le meilleur compromis pour maximiser la microdureté **Hv** semble être l'utiliser d'une pression élevée (~6 bar), une longue distance de projection (~10 cm), et un temps moyen (7.5 min).

**III.** Les courbes 3D-dimensionnelles présentées dans la **figure IV.7** sont obtenues en fixant la pression (2bar, 4 bar et 6bar) et en étudiant l'effet combiné de la distance et du temps sur la microdureté (Hv). En examinant les courbes, on remarque que :

- Pour une faible pression (2 bar), le fait d'appliquer une distance maximale et un temps minimal permet d'augmenter la microdureté jusqu'à presque 600 Hv. À faible distance (proche de 0 cm), le durcissement est toujours très faible, ce qui montre qu'il y a un seuil minimum de distance nécessaire pour avoir un bon résultat.
- Pour les pressions de 4 bars et 6 bars, l'évolution de la microdureté est similaire: elle augmente avec la combinaison des distances faible et des temps élevés.

En comparant les trois niveaux de pression, on remarque que :

- ✓ Avec **2 bar** , Hv reste globalement faible. Même en ajustant bien la distance et le temps, les valeurs obtenues ne sont pas très élevées
- ✓ Avec **4 bar**, une nette amélioration commence à apparaître. Des Hv moyens à bons sont obtenues, surtout lorsque la distance se rapproche de la valeur optimale et d'un temps moyen.
- ✓ Avec **6 bar**, c'est là où les meilleurs résultats sont obtenus. La combinaison d'une pression élevée, d'une distance optimale (autour de 7 cm) et d'un temps élevé (7,5 min) permet d'atteindre les valeurs maximales de Hv, estimées à environ 950 Hv.

L'effet des paramètres cités au-dessus sur la microdureté peut être expliqué par le degré de déformation plastique générée dans la couche supérieure traitée. En effet, plus la pression de sablage est élevée, plus la déformation plastique augmente. Donc l'épaisseur de la couche supérieure écrouie sera plus profonde et les contraintes résiduelles compressives seront plus intenses.

#### **IV.2.5. Optimisation de la microdureté:**

L'optimisation de la microdureté par ce modèle a généré les valeurs indiquées dans le **tableau IV.3.**

<b>Hv (opt)</b>	<b>Temps (min)</b>		<b>Pression (bar)</b>		<b>Distance (cm)</b>	
	<b>Unité codée</b>	<b>Unité non codée</b>	<b>Unité codée</b>	<b>Unité non codée</b>	<b>Unité codée</b>	<b>Unité non codée</b>
<b>1077.41 ± 76.4075</b>	<b>0.5353</b>	<b>8.84511</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>-1</b>	<b>5</b>

**Tableau IV. 3. Résultats d'optimisation de la microdureté Hv**

Cette optimisation montre que la meilleure microdureté pourra être obtenue avec une pression maximale, un temps de sablage moyen et une courte distance de projection.

Le régime optimale correspondants à « Hv (opt) » est testé pour évaluer le modèle adopté.

Les résultats sont regroupés dans le **tableau IV.4**.

Paramètres optimaux			Résultats	
Temps «min»	Pression «Bar»	Distance «cm»	Hv prédit	Hv trouvé
8.84511	6	5	1077.41 ± 76.4075	817,6

**Tableau IV. 4: Valeurs stimulés et valeurs calculés**

La valeur 817,6 Hv obtenue est très élevée par rapport à la surface non traitée, voir plus de trois fois plus élevée, ce qui confirment que ce régime donnera des résultats très positifs.

L'écart observé entre la valeur prédite ( $1077,41 \pm 76,40$  Hv) et la valeur mesurée (817,6 Hv) se trouve relativement élevé (193 Hv). Ceci peut être du à l'expérience de sablage qui est faite manuellement en portant la buse et essayant de la maintenir perpendiculaire sur la direction de la surface durant 8,8 min.

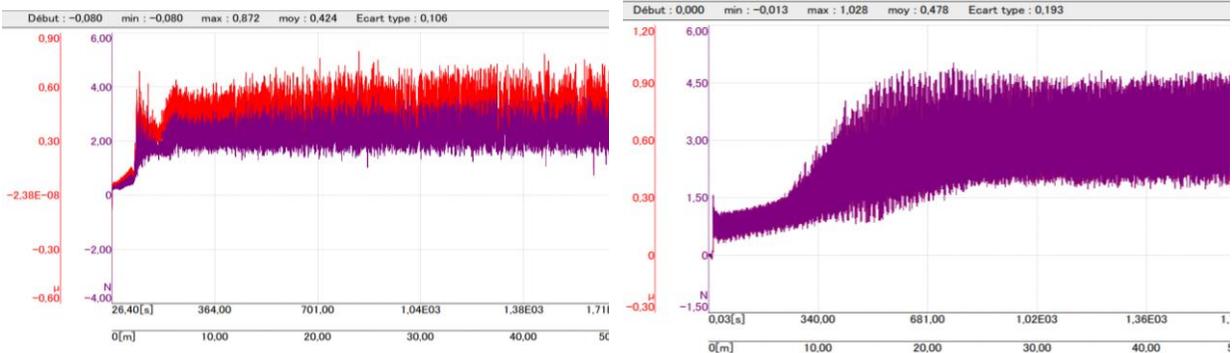
### IV.3.. Propriétés tribologiques:

Dans cette partie, on présente les résultats des essais tribologiques réalisés sur l'acier inoxydable AISI 316L avant et après sablage. Ces tests permettent d'évaluer la résistance à l'usure de la surface. Comparant l'échantillon non traité (brut) avec celui sablé en appliquant le régime optimal. Deux distances de tests sont appliquées : 50 m et 75 m.

#### IV.3.1. Coefficient de frottement

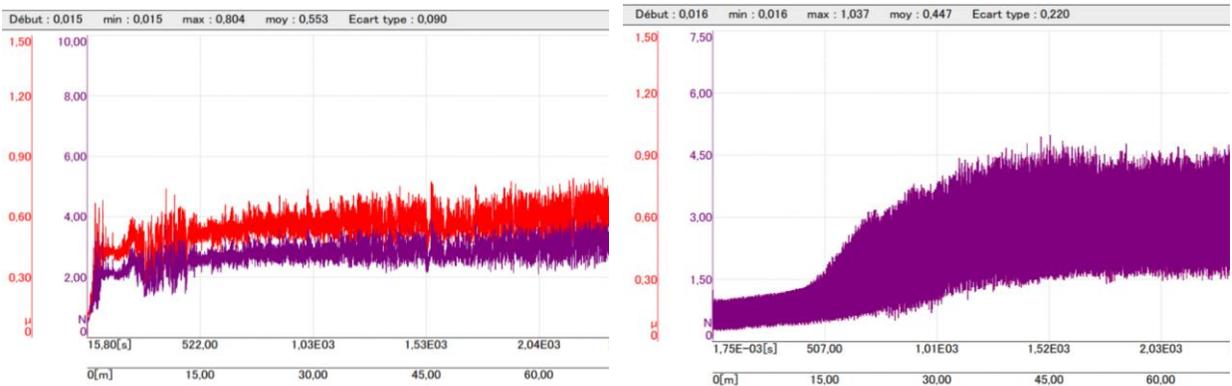
##### a) Évolution du COF:

La figure IV.8 montre les courbes d'évolution des coefficients de frottement en fonction de la distance de glissement pour les deux conditions ; brut ( 50m et 75 m), sablé ( 50m et 75m):



a) Échantillon brut ( 50m )

b) Échantillon sablé ( 50m )

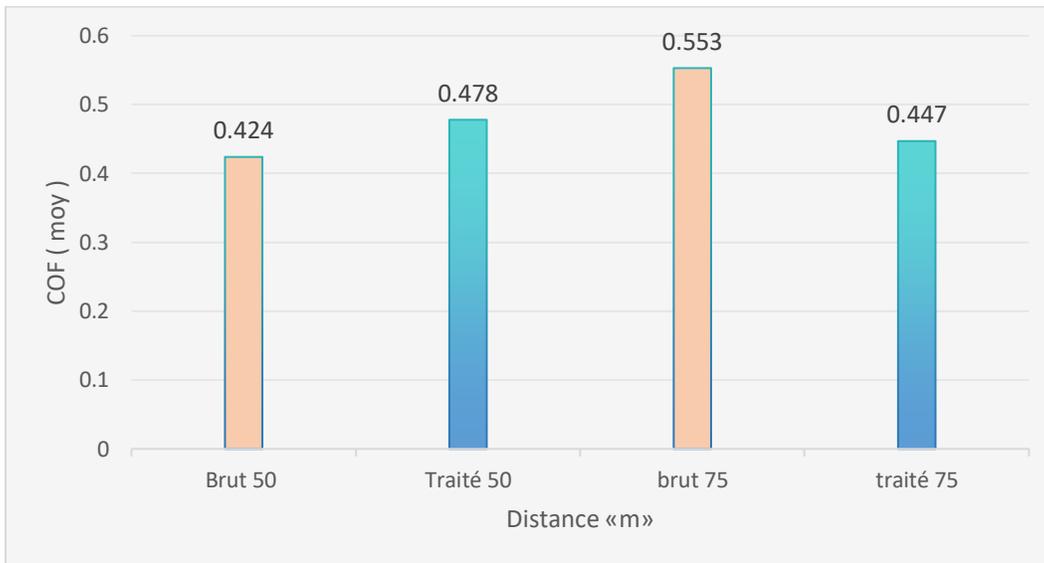


c) Échantillon brut ( 75m )

d) Échantillon sablé ( 75m )

**Figure IV. 7. Évolution des coefficients de frottement (COF) en fonction de la distance parcourue pour les différents échantillons brut (50m, 75m) et traité (50m, 75m)**

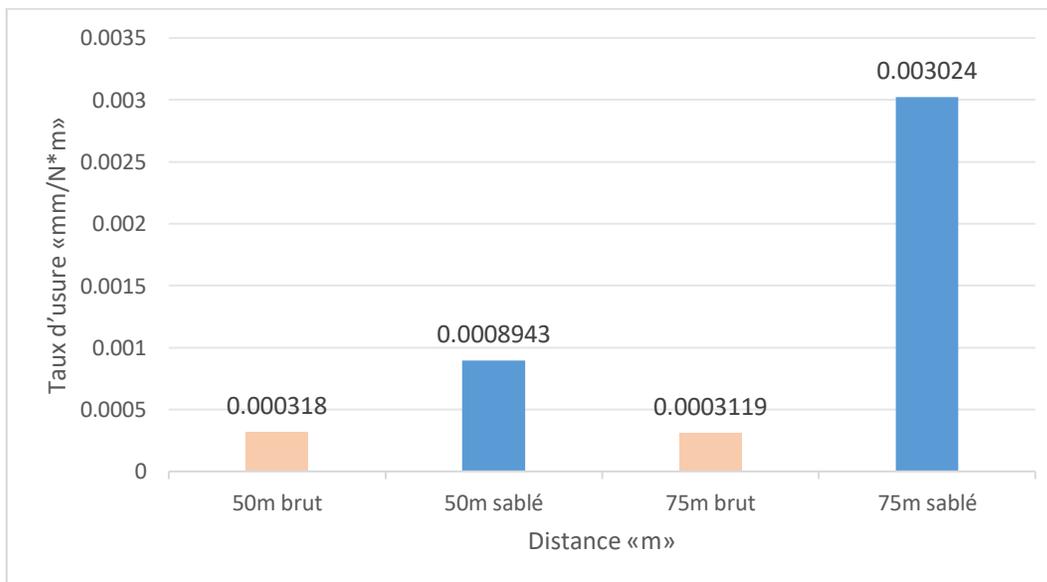
La **figure IV.9** montre l'évolution du coefficient de frottement en fonction de la distance parcourue pour les quatre conditions testées : brut 50 m, sablé 50 m, brut 75 m et sablé 75 m .



**Figure IV. 8. Valeurs moyennes des coefficients de frottement (COF) en fonction de la distance parcourue pour les différents échantillons brut (50m, 75m) et traité (50m, 75m)**

**b) Taux d'usure:**

Le taux d'usure spécifique varie en fonction la distance de glissement, comme illustré sur la **figure IV.10**.

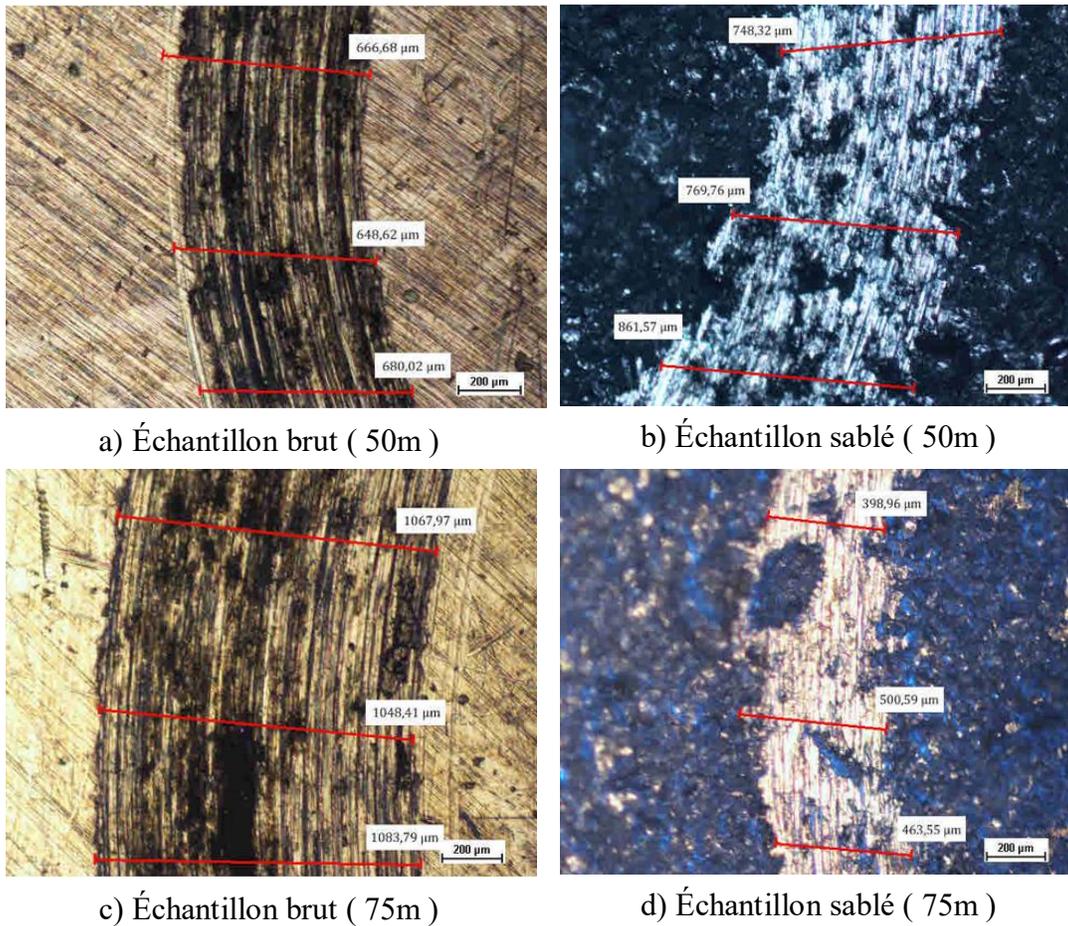


**Figure IV. 9. Le taux d'usure spécifique en fonction de la distance de glissement pour les différents échantillons brut (50, 75) et traité (50, 75).**

c) Traces d'usure:

*Observées par microscopie optique:*

La **figure IV.11** montre les traces d'usure observées au microscope optique pour les échantillons brut et sablé.



**Figure IV. 10. les traces d'usure observées au microscope optique.**

*Observées par profilomètre:*

La **figure IV.12** suivante montre les profils 3D des traces d'usure observées par le profilomètre pour les deux conditions ( brut 50 m et 75m, sablé 50m et 75m ):

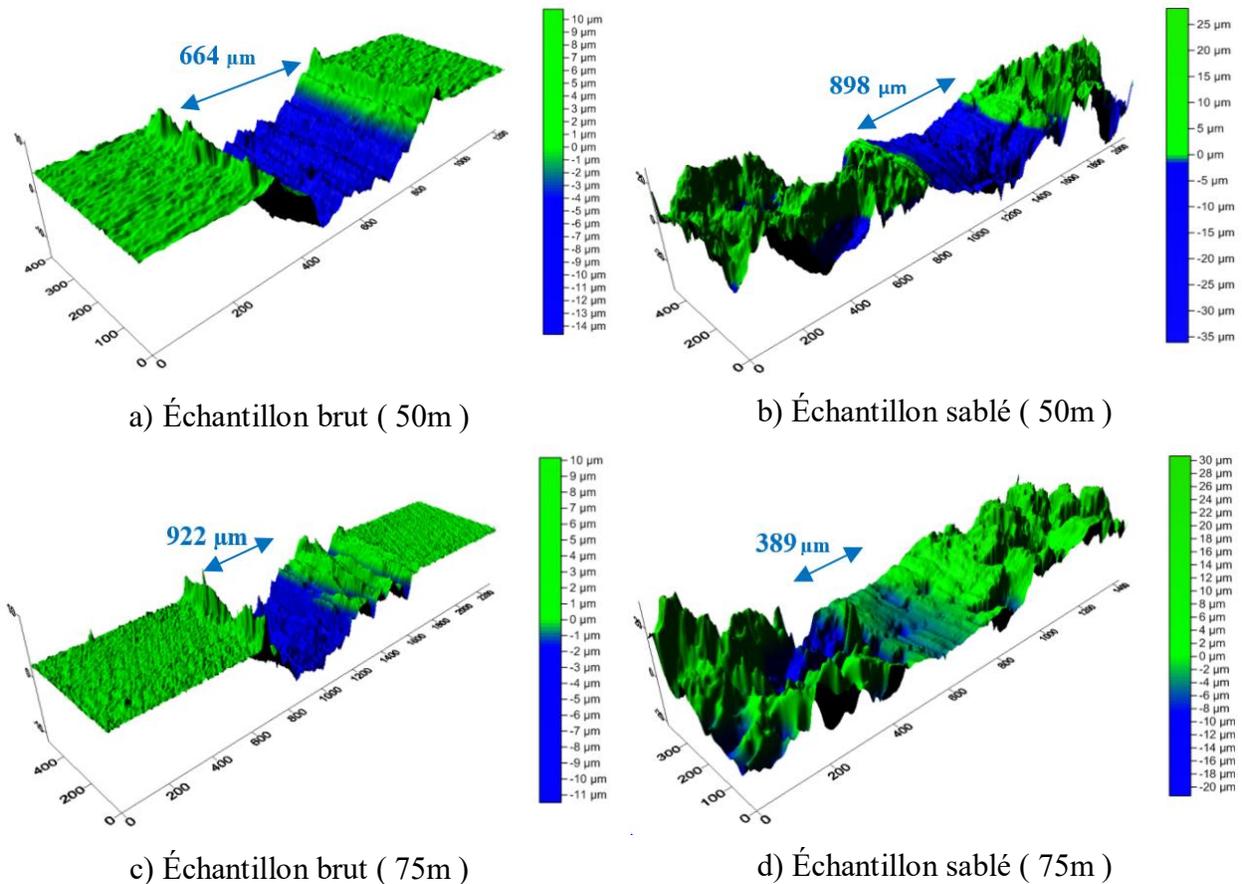


Figure IV. 11. les profils 3D des traces d'usure observé par profilomètre.

## Discussion :

### 1. Evolution du COF:

L'analyse de la figure IV.8 montre que le coefficient de frottement  $\mu$  de toutes les surfaces testées évolue de la même manière en fonction de la distance parcourue. En effet, au début du test, le coefficient de frottement croit rapidement pour atteindre sa valeur maximale, puis il se maintient stable jusqu'à la fin du test. La transition rapide du coefficient de frottement correspond à la période de rodage durant laquelle les aspérités sont déformées, tandis que sa stabilisation se réfère à la formation des débris d'usure [5,6]. Cela indique que:

- ✧ L'état de surface traitée montre une plus longue distance avant la stabilisation du COF en comparaison à la surface brute pour 50 m et 75m. Ceci prouve que la bille d'alumine (bille de test) a du prendre beaucoup de temps pour pouvoir déformer les aspérités de surface **à cause de leur dureté élevée.**
- ✧ L'échantillon brut montre une évolution instable du coefficient de frottement, particulièrement à 75 mètres, avec des pics fréquents. Cela peut être attribué à une usure non uniforme ou à l'exposition progressive de zones plus rugueuses ou endommagées. En revanche, pour

échantillon sablé, malgré une usure plus intense, le COF reste globalement stable, ce qui peut suggérer que des débris métalliques se sont accumulés entre la bille et l'échantillon, formant une zone intermédiaire qui facilite le glissement.

Selon la figure **figure IV.9**, les valeurs moyennes du COF montrent une distinction selon l'état de surface (brut ou sablé) et la distance de glissement:

- ✧ Pour une distance parcourue de 50 m : le COF des deux états de surface sont très proches (0,424 et 0,478 respectivement).
- ✧ Pour une distance de 75 m, le COF de l'échantillon brut augmente (0,553), tandis que celui de l'échantillon sablé diminue légèrement (0,447). Ceci réfère à un bon comportement au frottement de l'échantillon traité par sablage. En effet, après une plus longue distance de glissement, la surface sablée reste résistante à l'usure tandis que celle non traitée commence à s'user plus considérablement. Ceci est expliqué par **la dureté élevée de la surface traitée** qui a empêché le frottement à déformer plastiquement les irrégularités et les écraser.

## 2. Taux d'usure:

Les taux d'usure spécifiques (**figure IV.10**) montre une différence nette entre les deux états de surface :

- ✧ Pour 50 m: le taux d'usure est plus élevé pour l'échantillon sablé (0,0008943 mm/N·m) comparé au brut (0,000318 mm/N·m), ce qui indique une usure plus marquée. Ceci est probablement liée à une rugosité de surface élevée.
- ✧ Pour 75 m: l'échantillon brut présente un taux d'usure plus faible que l'échantillon traité. Une rugosité initiale élevée (due au traitement de sablage) semble également avoir favorisé un arrachement plus rapide des aspérités de surface.

## 3. Observation des traces d'usure :

Les observations au microscope optique (**figure IV.11**) révèlent des différences morphologiques visibles entre les échantillons brut et sablé :

Échantillons	Observations principale
a) Brut 50m	traces fines et régulières
b) Sablé 50m	traces moins profondes
c) Brut 75m	traces larges et plus marquées
d) Sablé 75m	Traces moins larges et moins profondes

- ✧ Les échantillons bruts (a, c) montrent des traces d'usure plus régulières, avec peu de déformation plastique apparente, ce type de trace correspond à une usure adhésive

modérée .

- ✧ Les surfaces sablées (b, d) présentent des traces moins profondes avec des zones de dégradation plus hétérogène, ce qui réfère à une usure abrasive dominante, particulièrement marquée à 75 m. Ce phénomène explique l'obtention d'un taux d'usure élevé pour ce cas.

L'observation des profils 3D des mêmes traces (**figure III.12**) indique que :

- ✧ Sur les échantillons bruts (a, c), la trace est plus étroites et moins profonde, indiquant une usure modérée.
- ✧ Sur les échantillons sablés (b, d), les traces sont plus larges et plus irrégulières, particulièrement à 75 m. On observe également une zone raclé autour de la trace, ce qui suggère un effet combiné d'abrasion et de déformation plastique.

### **Synthèse globale d'interprétation :**

les résultats présentés dans la section précédente permettent de conclure que le sablage modifie positivement les propriétés tribologiques de l'acier inoxydable AISI 316L par la diminution du coefficient de frottement et l'améliore de la stabilité tribologique à long terme. Les images microscopique et les profils 3D confirment que le frottement a laissé des traces moins profondes et moins large sur la surface traitée, ce qui témoigne d'une meilleure résistance à l'usure .

### **IV.4.Conclusion :**

Les résultats expérimentaux obtenus montrent clairement que le sablage améliore les propriétés de surface de l'acier inoxydable AISI 316L, en particulier la microdureté et la résistance à l'usure. Ces deux caractéristiques sont très importantes dans les applications biomédicales comme les implants dentaires, où la durée de vie et la fiabilité des matériaux sont nécessaire .

L'analyse des mesures de microdureté a montré une augmentation significative après le sablage. La valeur maximale atteinte est presque quatre fois plus élevée que celle de la surface non traitée. Cette amélioration s'explique par l'effet d'écrouissage et l'affinement des grains en surface, dus à l'impact des particules abrasives. Un modèle mathématique a été développé pour relier la microdureté aux paramètres du sablage (temps, pression et distance). Ce modèle a permis aussi d'optimiser les conditions de traitement pour obtenir une microdureté maximale.

En ce qui concerne les propriétés tribologiques, les tests d'usure ont montré que la surface sablée présente une meilleure stabilité du coefficient de frottement sur une longue distance, ainsi qu'une résistance accrue à l'usure. Les observations au microscope et au profilomètre ont confirmé que les traces d'usure sont moins profondes et moins larges sur la surface traitée, ce qui montre une

amélioration de la résistance à l'usure.

En résumé, le sablage s'avère être un traitement efficace pour renforcer les propriétés mécaniques de surface de l'acier 316L. Ces améliorations peuvent contribuer à prolonger la durée de vie des implants dentaires et à favoriser leur intégration biologique. Cela justifie son utilisation dans les applications médicales où la performance et la fiabilité sont des priorités.

## Conclusion générale

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'impact du sablage sur les propriétés mécaniques de surface de l'acier inoxydable AISI 316L, matériau utilisé dans le domaine biomédical, notamment en implantologie dentaire.

Les résultats obtenus montrent que le sablage influence de manière significative certaines caractéristiques critiques telles que la microdureté et la résistance à l'usure. Ces propriétés jouent un rôle essentiel dans la performance des implants soumis à des sollicitations mécaniques répétées.

Une augmentation notable de la microdureté a été observée après traitement, pouvant atteindre jusqu'à quatre fois la valeur initiale. Cette amélioration s'explique principalement par deux phénomènes : l'érouissage induit par la déformation plastique de surface, ainsi que l'affinement des grains suite au passage des particules abrasives.

Un modèle mathématique prédictif a été développé pour relier les paramètres du sablage (temps, pression et distance) à la microdureté Hv. Ce modèle a montré une très bonne précision avec un **coefficient de détermination  $R^2 = 99,37\%$** , confirmant sa fiabilité pour prédire les effets du traitement.

Parmi les paramètres étudiés, la pression de projection s'est avérée être le facteur le plus influant. **Le régime optimal identifié** - une pression de 6 bars, un temps de 8,8 minutes et une distance de 5 cm - a permis d'atteindre une microdureté élevée (817,6 Hv), confirmant l'efficacité du traitement.

En ce qui concerne les propriétés tribologiques, les tests d'usure ont mis en évidence une stabilité accrue de la surface traitée après un frottement prolongé (75 m), malgré une usure initiale plus marquée liée à une rugosité élevée. Les observations réalisées au microscope optique et par profilométrie 3D appuient ces conclusions, montrant des traces d'usure moins profondes sur les surfaces sablées.

En somme, le sablage se présente comme un traitement de surface simple, efficace et économiquement intéressant pour améliorer les propriétés mécaniques superficielles de l'acier 316L, contribuant ainsi à renforcer la durabilité et la performance des implants dentaires fabriqués à base de cet acier.

Cette étude pourrait être enrichie dans le futur par l'intégration de critères électrochimiques et biologiques tels que la résistance à la corrosion, la biocompatibilité, et l'osseointégration, afin d'évaluer globalement l'impact du sablage sur les performances des implants. Elle ouvre également des perspectives d'étude sur d'autres matériaux métalliques utilisés en implantologie, tels que les alliages de titane.

### Références bibliographiques:

- 1- Techniques de l'Ingénieur. (s.d.). *Aciers inoxydables*. Consulté sur <https://www.techniques-ingenieur.fr/glossaire/acier-inoxydable>
- 2- Y.V. Murty, Use of stainless steels in medical applications, in: Materials and processes for medical devices conference, Anaheim, Calif. USA. (2004), 289-293
- 3- K.D. Jandt, Evolutions, Revolutions and Trends in Biomaterials Science – A Perspective. *Advanced Engineering Materials* 9 (2007), 1035–1050.
- 4- M. Haïdopoulos, 'étude expérimentale d'optimisation de procédés de modifications de surface de l'acier inoxydable 316 pour application aux dispositifs endovasculaires', Thèse Université Laval, 2005.
- 5- Peckner, D., & Bernstein, I. M. (1977). "Handbook of stainless steels." McGraw-Hill Book Company, pp. 1-4. (Disponible sur Google Scholar)
- 6- Chai, G., & Kangas, P. (2021). "Recent developments in advanced stainless steels." *Metals*, 11(1), 29. <https://doi.org/10.3390/met11010029>
- 7- Alhazaa, A., & Haneklaus, N. (2020). Diffusion bonding and transient liquid phase (TLP) bonding of type 304 and 316 austenitic stainless steel—A review of similar and dissimilar material joints. *Metals*, 10(5), 613. <https://doi.org/10.3390/met10050613>
- 8- L. Laouar, Traitement mécanique de surface par brunissage des aciers XC48 et XC18—Optimisation et caractérisation, Thèse de l'université Badji Mokhtar Annaba.
- 9- M. Bourbia, Effet de la rugosité sur les performances d'un système mécanique -approche par fractale. Thèse de l'université Badji Mokhtar- annaba, 2017.
- 10- Maurice Pillet Les plans d'expériences par la méthode Taguchi 2001 Ed d'organisation.
- 11- Goupy j., Plans d'expériences pour surfaces de réponse, Dunod Paris 1999
- 12- Goupy j., Erreur de dérive et choix de l'ordre des essais d'un plan d'expériences factoriel, *Revue de statistique appliquée*, vol.37, n°1 p.5-22,1989
- 13- Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments* (9th edition). Wiley.).

- 14- Jérôme Faucher « Les plans d'expériences pour le réglage de commandes à base de logique floue » Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, spécialité électrique et automatique, 26, sept, 2006.
- 15- Hosford, W. F., & Caddell, R. M. (2007). Metal forming: Mechanics and metallurgy (3rd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511811111>
- 16- Vinogradov A, Serebryany VN, Dobatkin S v, Vinogradov A, Serebryany VN, Dobatkin Aa Baikov S v, et al. Tailoring microstructure and properties of fine grained magnesium alloys by severe plastic deformation. Adv Eng Mater 2018;20:1700785. <https://doi.org/10.1002/ADEM.201700785>.
- 17- Yoshihara K, Nagaoka N, Maruo Y, Nishigawa G, Irie M, Yoshida Y, et al. Sandblasting may damage the surface of composite CADeCAM blocks. Dent Mater 2017;33:e124e35. <https://doi.org/10.1016/J.DENTAL.2016.12.003>.
- 18- Geng S, Sun J, Guo L. Effect of sandblasting and subsequent acid pickling and passivation on the microstructure and corrosion behavior of 316L stainless steel. Mater Des 2015;88:1e7. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2015.08.113>.
- 19- Peñuela Cruz, C., Márquez-Herrera, A., Aguilera-Gómez, E., & Saldaña-Robles, A. (2023). The effects of sandblasting on the surface properties of magnesium (Mg) sheets: A statistical study. Journal of Materials Research and Technology, 23, 1321–1330. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.117>
- 20- Kaczmarek, K. M., Gierlotka, M., Kaczmarek, M. S., Kubiak, R., & Narkiewicz, U. (2018). Positron annihilation and complementary studies of copper sandblasted with alumina particles at different pressures. Materials, 11(11), 2266. <https://doi.org/10.3390/ma11112266>
- 21- Meddah S. , Étude électrochimique comparative d'un alliage (TiNi) élaboré, avec un implant dentaire en milieu simulé, Thèse de l'université Badji Mokhtar Annaba, 2018.
- 22- Avril L. , "Elaboration de revêtements sur acier inoxydable, simulation de la fusion par irradiation laser, caractérisation structurale, mécanique et tribologique ", thèse, ENSAM (N° d'ordre : 2003-16).