

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

École Nationale Polytechnique d'Alger

Département De Génie Mécanique



Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en
« Génie mécanique »

Contribution à l'amélioration de la résistance à l'usure du matériau XC10 par le procédé de tribofinition avec l'utilisation des plans d'expériences

Présenté par

Khelifa OULADBRAHIM

Youghorta CHELABI

Sous la direction de

Mr. Djamel SAIDI MCB ENP

Mr. Brahim GUERGUEB MAA ENP

Mémoire présenté et soutenu le (21/09/2020)

Composition de jury :

Président	Mr. Said RECHAK	Prof	ENP
Examineur	Mr. Yacine BELKACEMI	MCA	ENP
Examineur	Mr. Mohamed LATRECHE	MAA	ENP

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

École Nationale Polytechnique d'Alger

Département De Génie Mécanique



Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en
« Génie mécanique »

Contribution à l'amélioration de la résistance à l'usure du matériau XC10 par le procédé de tribofinition avec l'utilisation des plans d'expériences

Présenté par

Khelifa OULADBRAHIM

Youghorta CHELABI

Sous la direction de

M. Djamel SAIDI

MCB

ENP

M. Brahim GUERGUEB

MAA

ENP

Mémoire présenté et soutenu le (21/09/2020)

Composition de jury :

Président	Mr. Said RECHAK	Prof	ENP
Examineur	Mr. Yacine BELKACEMI	MCA	ENP
Examineur	Mr. Mohamed LATRECHE	MAA	ENP

Dédicace

Je profite de cette occasion pour dédier ce modeste travail :

À celle qui m'est chère et qui m'a appris beaucoup. . .Ma mère ;

À celui qui m'a appris comment affronter la vie en souriant Mon père ;

À Mes sœurs et frères ;

À toute ma famille et mes proches ;

À tous mes amis chacun par son nom ;

À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

OULADBRAHIM Khelifa

Dédicace

Je profite de cette occasion pour dédier ce modeste travail :

À celle qui m'est chère et qui m'a appris beaucoup. . .Ma mère ;

À celui qui m'a appris comment affronter la vie en souriant Mon père ;

À Mes sœurs et frères ;

À toute ma famille et mes proches ;

À tous mes amis chacun par son nom ;

À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

CHELABI Youghorta

Remerciement

Avant tout, nous remercions **ALLAH** tout puissant de nous avoir donné la volonté et le courage de mener à bien ce travail.

Ce travail a été réalisé au niveau de l'atelier du département de Génie Mécanique à l'École National Polytechnique, sous l'encadrement de Monsieur **DJAMEL SAIDI** et Monsieur **BRAHIM GUERGUEB** que nous remercions pour nous avoir confiés ce sujet, aidés et encouragés, sans leurs aide nous n'aurions pu mener à bien ce travail.

Nous adressons également nos remerciements à **tous les membres du jury**, le professeur **Said RECHAK** qui a accepté de presider cette soutenance et les membres de jury **Mr. Yacine BELKACEMI** et **Mr. Mohamed LATRECHE** qui ont pris le soin de consulter notre document, et de juger notre travail.

Nous remercions également monsieur **Mohamed BOUAZIZ** qui a accepté de nous recevoir dans son laboratoire pour les mesures de rugosité.

Nous remercions également monsieur **ABDI** qui a accepté de nous recevoir dans son laboratoire pour la réalisation de test d'usure avant le traitement ar tribomètre, et également monsieur **KHERROUBA** pour l'aide à la réalisation des essais de la microdurete, et également monsieur **NAITBOUDA** pour l'aide à l'observation de la microstructure.

Nous adressons également nos remerciements à tous les enseignants du département de génie mécanique de l'école nationale polytechnique qui ont contribué à notre formation et qui nous ont aidés durant notre cursus.

ملخص

في هذه الدراسة ، من أجل تحسين مقاومة التآكل لمادة XC10 ولتحسين الخشونة والصلابة الدقيقة للسطح من خلال عملية تقنية علاج المساحات ، قمنا بنمذجة التجارب من خلال طريقة المستوى التجريبي ، اختار مستوي Box- Behnken لنمذجة الخشونة والصلابة الدقيقة كدالة لمدة العلاج والتردد والسعة ، وتم تنفيذ النمذجة بواسطة برنامج Minitab 2017. قمنا بتحليل تأثير العوامل المختلفة على الخشونة والصلابة الدقيقة. لقد ثبت أن طول العلاج له تأثير أكبر من العوامل الأخرى.

الكلمات المفتاحية : تحسين، التآكل، الخشونة، الصلابة الدقيقة، علاج المساحات، التصاميم التجريبية، سطح الاستجابة.

Abstract

In this study, for the purpose of improving the wear resistance of the XC10 material and optimizing the surface roughness and microhardness by the tribofinishing process we modeled the experiments by the experimental plane method, the box-Behnken plan was chosen to model the roughness and microhardness as a function of the duration of treatment, frequency and amplitude, the modeling was performed by the Minitab 2017 software. We analyzed the influence of various parameters on roughness and microhardness. It has been established that the duration of treatment has more influence than the other factors.

Key words : improvement, wear, roughness, microhardness, tribofinishing, experimental designs.

Résumé

Dans cette étude, pour le but d'améliorer la résistance à l'usure du matériau XC10 et d'optimisé la rugosité et la microdureté de surface par le procédé de tribofinition nous avons modélisé les expériences par la méthode des plans d'expériences, on a choisi le plan de box-Behnken pour modéliser la rugosité et la microdureté en fonction de la durée de traitement, la fréquence et l'amplitude, la modélisation a été effectuée par le logiciel Minitab 2017. Nous avons analysé l'influence des divers paramètres sur la rugosité et la microdureté. Il été établie que la durée de traitement a plus d'influence que les autres facteurs.

Mots clés : amélioration, usure, rugosité, microdureté, tribofinition, plans d'expériences, surface de réponse.

Table des matieres

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale 14

Chapitre 1	Surfaces solides.....	15
1.1	Inroduction :.....	16
1.2	Les Surfaces:.....	16
1.2.1	Définition des surfaces solides	16
1.2.2	Structure des surfaces	16
1.2.3	Différents types de surface	19
1.2.4	Topographie des surfaces	20
1.2.5	Paramètres d'états de surface (rugosité)	21
1.2.6	Direction de mesurage	26
1.2.7	Critères usuels	27
1.2.8	Choix de la rugosité en fonction de la tolérance	28
1.2.9	Valeurs du critère de rugosité en fonction du procédé d'usinage	28
1.2.10	Méthodes de mesure	29
1.3	Contraintes superficielles.....	31
1.3.2	Origine des contraintes résiduelles	34
1.3.3	Prévision des contraintes résiduelles	36
1.3.4	Conséquences des contraintes résiduelles	38
1.3.5	Conclusion	39
1.4	Dureté :	39
1.4.1	Estimation qualitative de la dureté : échelle de Mohs	39
1.4.2	Essais de dureté quantitatifs	40
1.4.3	Essais de microdureté quantitatifs	43
1.4.4	Essais spécifiques pour polymères et métaux mous	43
1.4.5	Tests de nanodureté :	44
1.4.6	Conclusion	45
1.5	Usure.....	46
1.5.1	Mécanisme d'usure	47
1.5.2	Mesure de l'usure	50
1.6	Usure en tribofinition.....	52
1.6.1	Contact d'hertz	52
1.6.2	Taux d'usure	54
1.6.3	Volume enlevé	55
1.6.4	Conclusion	55
Chapitre 2	Traitement par tribofinition.....	56
2.1	Introduction.....	57
2.2	Traitement par tribofinition.....	57
2.3	Paramètres du traitement par tribofinition	59
2.4	Les milieux actifs (abrasifs):.....	59
2.5	Equipements de tribofinition.....	60

2.5.1	Différents types de vibrateurs	60
2.5.2	Médias et abrasifs	70
2.5.3	Additifs chimiques	76
2.6	Conclusion.....	81
Chapitre 3	Plans d'expériences	82
3.1	Introduction.....	83
3.2	Terminologie	83
3.2.1	Types de facteurs	83
3.2.2	Espace expérimentale	84
3.2.3	Domaine d'un facteur	85
3.2.4	Points expérimentaux	86
3.3	Domaine d'étude	86
3.4	Surface de réponse.....	87
3.4.1	Matrice d'expériences	88
3.4.2	Les différents types de plans d'expériences	88
3.5	Choix du plan.....	90
3.5.1	Plan de Box-Behnken	91
3.6	Tests statistiques	94
3.6.1	Test de Fisher	94
3.6.2	Test de R^2	94
3.6.3	Test de Student	95
3.7	Algorithme de la méthode	95
3.8	Conclusion.....	96
Chapitre 4	Essais expérimentaux et discussions.....	97
4.1	Introduction.....	98
4.2	Techniques expérimentales et méthodologie d'expérience	99
4.2.1	Dispositif expérimental	99
4.2.2	Essais effectués sur les échantillons en XC10	100
4.2.3	Mesures de la rugosité (matériau XC10)	101
4.2.4	Essais de Microdureté (HV)	103
4.2.5	Variation masse	105
4.2.6	Tests d'usure	107
4.2.7	Plans d'expériences	109
4.2.8	Conclusion	126
	Conclusion générale.....	127
	Références	129

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Propriétés influencées par les phénomènes de surface [2]	19
Tableau 1.2 Valeurs de Ra en fonction de la tolérance [3]	28
Tableau 1.3 : Valeurs de Ra en fonction du procédé d'usinage [3]	28
Tableau 1.4 Les principales caractéristiques de ces techniques. [4]	34
Tableau 1.5. Principales origines des contraintes résiduelles de premier ordre [4]	36
Tableau 1.6 Dureté MOHS avec matériaux dentaires équivalents	40
Tableau 1.7. Valeurs indicatives de coefficients de coefficient d'usure K de matériaux usuels en frottement à sec.	52
Tableau.2.1. éléments d'un vibreur [10]	58
Tableau.2.2 Exemples des particules utilisées dans le milieu actif pour les différentes opérations	71
Tableau 2.3 Utilité des formes des médias utilisés en tribofinition	72
Tableau.2.4 Composition de l'additif chimique recommandé pour différentes opérations. [13]	78
Tableau.3.1. matrice d'expériences [14]	88
Tableau.4.1 Composition chimique de l'acier XC10	100
Tableau 4.2. Les résultats de mesure de la rugosité Ra et Rz avant le traitement	101
Tableau.4.3. Résultats de rugosités obtenues après les essais expérimentaux	102
Tableau. 4.4. La microdureté HV des échantillons avant (0) et après (de 1 à 15) le traitement	104
Tableau.4.5. Variation de masse des échantillons après le traitement	106
Tableau.4.6. Essais réalisés avant le traitement	109
Tableau.4.7 Domaine d'étude	111
Tableau.4.8 Matrice d'expériences	112
Tableau 4.9 Analyse de variance pour le Ra	113
Tableau 4.10 Analyse de variance pour le Rz	113
Tableau 4.11 Analyse de variance pour la microdureté HV	114
Tableau 4.12 Les coefficients du modèle pour le Ra	115

Tableau 4.13 Les coefficients du modèle pour le Rz	115
Tableau 4.14 Les coefficients du modèle pour la microdureté HV	116

Liste des figures

Fig.1.1. Quelques exemples de surfaces. [1]	16
Fig.1.2. Distribution des atomes au cœur du matériau et en surface. [1]	17
Fig.1.3. Les différentes couches observables en surface d'un solide (métallique). [1]	18
Fig.1.4. Couche d'alumine en surface d'un échantillon d'aluminium. [1]	18
Fig.1.5. Les quatre premiers ordres de défauts superficiels. [2]	21
Fig.1.6. Hauteur maximale du profil [3]	21
Fig.1.7. Hauteur maximale de saillie [3]	22
Fig.1.8. Ecart moyen arithmétique du profil [3]	22
Fig.1.9. Maximum de la hauteur des irrégularités du [3]	23
Fig.1.10. Hauteur des irrégularités sur 10 points [3]	23
Fig.1.11. Pas moyen des irrégularités du profil [3]	24
Fig.1.12. Paramètres de rugosité [3]	25
Fig.1.13. Paramètres d'ondulation [3]	26
Fig.1.14. Influence de la direction de mesure sur le résultat des paramètres de rugosité [3]	27
Fig.1.15. Principe de fonctionnement du palpeur mécanique. [1]	29
Fig.1.16. Principe de fonctionnement du microscope interférométrique. [1]	30
Fig.1.17. Principe de fonctionnement du microscope à force atomique. [1]	30
Fig.1.18. Superposition des contraintes de types I, II et III dans un domaine couvrant plusieurs grains. [4]	33
Fig.1.19. Schéma triangulaire d'interaction thermique - métallurgie - mécanique en genèse des contraintes résiduelles. [4]	35
Fig.1.20. Principe de l'essai de dureté BRINELL	41
Fig.1.21. Principe de l'essai de dureté VICKERS	41
Fig.1.22. Principe de l'essai de dureté ROCKWELL b et ROCKWELL c	42
Fig.1.23. La courbe de charge-décharge généralement obtenue à partir de tests de dureté ultra-micro et nanométrique [5]	45

Fig.1.24. Exemples de surfaces usées par différents mécanismes. [1]	46
Fig.1.25. frottement d'un pion sur un matériau de base	47
Fig.1.26. frottement d'un pion sur un matériau de base	48
Fig.1.27. Mécanisme de l'usure adhésive [1]	49
Fig.1.28. Exemple de grippage, manifestation sévère de l'usure adhésive [1]	49
Fig.1.29. Les quatre modes d'usure abrasive [6]	50
Fig.1.30. Exemples de piste d'usure a) Piste en acier après frottement avec un pion en acier. b) Piste d'une garniture mécanique après frottement [1]	51
Fig.1.31. Mesure du volume d'usure	51
Fig.1.32. Déformation locale	52
Fig.1.33. Modélisation des déformations	53
Fig.1.34. Zone de contact	53
Fig.1.35. Répartition de pression (ellipsoïde)	54
Fig.2.1. Schéma d'un vibreur du traitement par tribofinition [10]	58
Fig.2.2. Quelques médias abrasifs	60
Fig.2.3. Vibreur linéaire [9]	61
Fig.2.4. Principe de fonctionnement d'un vibreur linéaire [9]	62
Fig.2.5. Vibreur linéaire de type TU [10]	63
Fig.2.6. Vibreur linéaire de type TE [10]	63
Fig.2.7. Vibreur linéaire de type TS-D [10]	63
Fig.2.8. Vibreur linéaire de type TS [10]	64
Fig.2.9. Schéma d'un vibreur circulaire [10]	64
Fig.2.10. Principe de fonctionnement d'un vibreur circulaire [10]	66
Fig.2.11. Vibreur circulaire à grand rayon.	66
Fig.2.12. schéma d'une machine à force centrifuge	68
Fig.2.13. Machines à broches [9]	69
Fig.2.14. Fonctionnement d'une machines à broche [11]	69
Fig.2.15. Formes des médias utilisés pour tribofinition [9]	74
Fig.2.16. Médias naturels	74
Fig.2.17. Médias en céramique	75
Fig.2.18. Médias en plastique	75
Fig.2.19. Médias en porcelaine	76

Fig.2.20. Media métallique	76
Fig.2.21. additifs liquides	77
Fig.2.22 additifs en poudre	80
Fig.2.23. additifs en pates	81
Fig.3.1. Espace expérimentale constitué par deux axes gradués et orientés [14]	85
Fig.3.2. Domaine de variation d'un facteur [15]	85
Fig.3.3. Un point expérimentale [15]	86
Fig3.4. Schéma du domaine d'étude pour deux facteurs [15]	87
Fig.3.5. Schéma du domaine d'étude pour deux facteurs avec contraintes [15]	87
Fig.3.6. Surface de réponse [15]	88
Fig.4.1 Vibrateur linéaire VL10	99
Fig.4.2. Échantillon rectifié avant et après traitement	100
Fig.4.3 Media Cônes en bakélite	100
Fig.4.4. Rugosimètre de type TESA 10-G	101
Fig.4.5. Duromètre Wilson VH3300 Vickers/Knoop automatiques	103
Fig.4.6. Influence du traitement par tribofinition sur la microdureté du matériau XC10	104
Fig.4.7. Balance électronique de type KERNACJ/ACS AC6 2204	105
Fig.4.8. Variation de la masse avant et après traitement par tribofinition	106
Fig.4.9. Tribomètre (csm+instruments TRIBOMETER)	107
Fig.4.10. Schéma descriptif du tribomètre	108
Fig.4.11. Schéma des essais à trois facteurs	110
Fig.4.12. Graphique des effets principaux pour la rugosité (Ra et Rz)	117
Fig.4.13. Diagramme des interactions pour la rugosité	118
Fig.4.14. Diagramme des interactions pour la micro-dureté	119
Fig.4.15. Diagramme des interactions pour la microdureté	119
Fig.4.16. Graphiques du contour de la rugosité en fonction des différents facteurs	121
Fig.4.17. Diagrammes d'optimisation de la rugosité avec une fréquence de 75Hz	122
Fig.4.18. Graphiques du contour de la micro-dureté en fonction des différents facteurs	123

Fig.4.19. Diagrammes d'optimisation de la microdureté avec une fréquence de 75Hz	124
Fig.4.20. Surfaces de réponses pour la rugosité Ra	124
Fig.4.21. Surfaces de réponses pour la rugosité Rz	125
Fig.4.22. Surfaces de réponses pour la micro-dureté	125

Introduction générale

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

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

Notre étude a pour objectif d'analyser l'effet des trois facteurs : la fréquence, l'amplitude et la durée de traitement sur la résistance à l'usure, la rugosité et la microdureté du matériau XC10 par le procédé de tribofinition avec l'utilisation des plans d'expériences.

Ce travail est organisé de la manière suivante : Le chapitre I, contient des généralités sur l'état mécanique géométrique des surfaces. Dans le chapitre II, nous ferons une présentation du procédé de traitement par tribofinition. Le chapitre III sera consacré aux notions de plans d'expériences et de plan de Box-Behnken. Les résultats obtenus par Minitab seront présentés et discutés au chapitre IV

Chapitre 1

Surfaces solides

1.1 Introduction :

Nous commençons notre étude par la description de l'état mécanique et géométrique des surfaces en nous intéressant notamment aux définitions de la rugosité. Ce chapitre est aussi le début d'une exploration vers la profondeur du matériau sous-jacent car, outre la rugosité, nous prenons en compte les contraintes et la dureté superficielles.

1.2 Les Surfaces:

1.2.1 Définition des surfaces solides

Une surface solide est l'interface entre un solide et un deuxième milieu qui peut être un autre solide, un gaz (l'atmosphère par exemple) ou un liquide (un lubrifiant par exemple). La figure 1.1 présente quelques exemples de surfaces. [1]

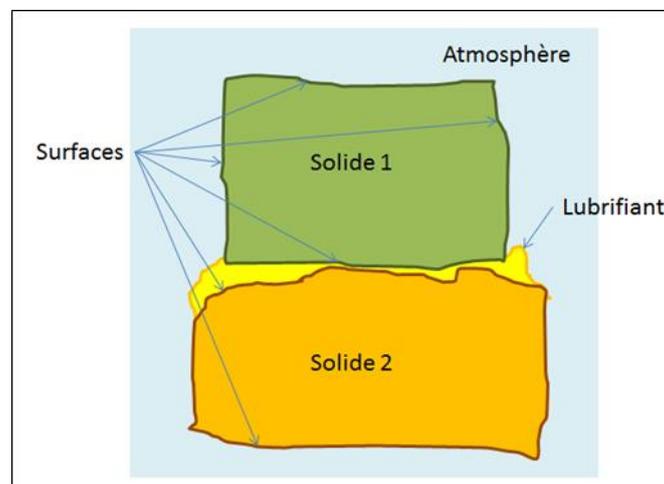


Fig.1.1. Quelques exemples de surfaces. [1]

1.2.2 Structure des surfaces

Les solides présentent généralement des propriétés physiques différentes en surface de ce qu'elles sont au cœur du matériau. Un atome situé à l'intérieur de la

matière est en équilibre sous l'action des forces exercées par ses voisins (figure 1.2). Lorsqu'un atome se situe en surface, il n'est plus soumis aux forces d'atomes qui seraient situés de l'autre côté de la surface. Ceci se traduit généralement par une réduction des distances interatomiques près de la surface. Par suite les propriétés mécaniques du matériau sont affectées en surface. D'autre part, les atomes en surface sont susceptibles d'interagir avec l'environnement. [1]

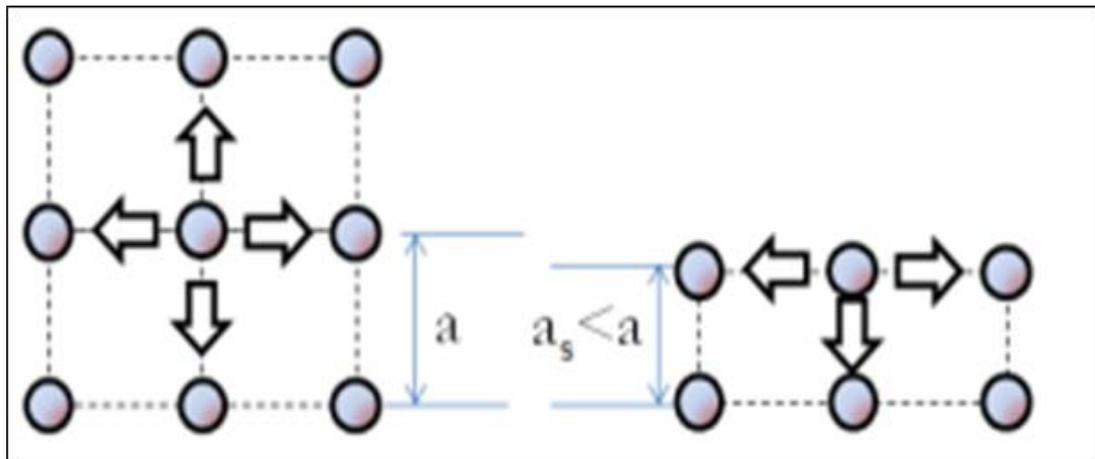


Fig.1.2. Distribution des atomes au cœur du matériau et en surface. [1]

En examinant les surfaces de matériaux métalliques, il est possible d'identifier différentes couches localisées plus ou moins profondément dans la matière. La figure 1.3 présente une description des couches usuellement observées en surface :

Gaz adsorbés (0.3 à 3 η m) : Cette couche de contient des molécules de gaz, vapeur d'eau, oxygène qui ont été adsorbées par le solide. Les molécules sont maintenues en surface par les interactions de Van der Waals.

Couche d'oxyde (10 à 100 η m) : La plupart des métaux réagissent avec l'oxygène pour former une couche d'oxyde.

Couche de Beilby (1 à 100 η m) : Dans cette couche, la structure cristalline est différente de celle présente au cœur matériau.

Couche déformée (1 à 100 μ m) : La couche est soumise à des contraintes résiduelles résultant du procédé de fabrication.

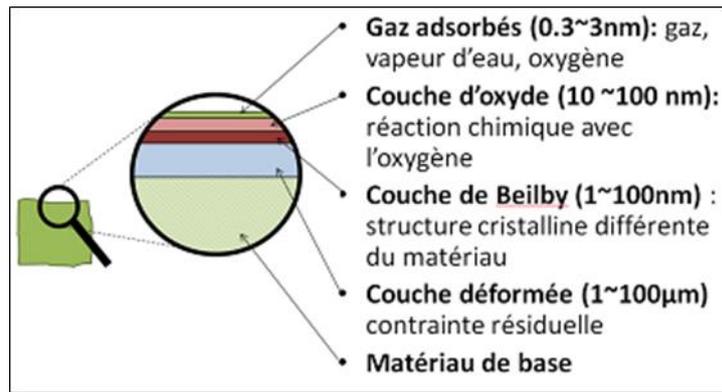


Fig.1.3. Les différentes couches observables en surface d'un solide (métallique). [1]

Ces couches ne sont pas un handicap mais constitue généralement une protection pour le solide (meilleure résistance mécanique, meilleure tenue à la corrosion). Un exemple typique est l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3 ou alumine) qui se forme naturellement sur l'aluminium. Cette couche de quelques nanomètres (figure 1.4) suffit à protéger l'aluminium contre la corrosion. Il est courant d'augmenter son épaisseur par un procédé d'anodisation.

Le but de cette partie n'est pas d'être exhaustif car des compétences en chimie, métallurgie seraient nécessaires. L'objectif est de mettre en évidence que le matériau en surface est différent du matériau de base. La description des couches données ici s'applique aux métaux mais elle serait différente pour les polymères ou les céramiques. [1]

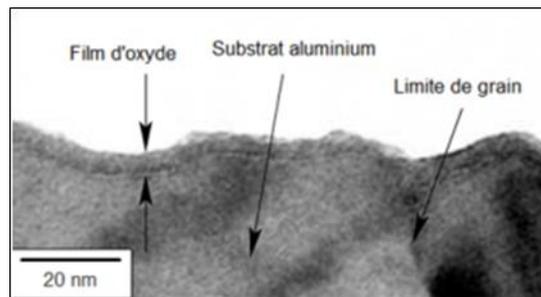


Fig.1.4. Couche d'alumine en surface d'un échantillon d'aluminium. [1]

Dans le tableau 1.1, sont répertoriées quelques propriétés physicochimiques observées dans les mêmes régions avec les domaines technologiques où elles interviennent de façon souvent spectaculaire.

Tableau 1.1 Propriétés influencées par les phénomènes de surface [2]			
Propriétés électriques	Propriétés mécaniques	Propriétés Cinétiques	Propriétés Magnétiques
Hétérojonctions Recombinaisons Diffusion et copage Structure * MIS, MOS * SOI	Fragilisation Fatigue Adhésion * verre-métal * métal/céramique * métal/polymère Soudure Couches dures * nitures * carbures	Absorption Ségrégation Catalyse * activation * poisons Corrosion Dépôts, modes de croissance	Magnétorésistance Anisotropie pèrpendiculaire

1.2.3 Différents types de surface

La surface se présente sous différents types qui sont:

- **Surface nominale** : Surface parfaite. Elle est définie géométriquement par des côtes nominales.
- **Surface spécifiée** : C'est la surface géométrique affectée des tolérances de fabrication.
- **Surface mesurée** : La surface mesurée est le résultat de l'exploitation, à l'aide des instruments de mesures, de la surface réelle
- **Surface réelle** : C'est la Surface qui résulte des procédés de fabrication, elle limite la pièce et la sépare du milieu environnant

1.2.4 Topographie des surfaces

En examinant la géométrie d'une surface usinée, on observe des écarts par rapport au profil théorique, ces écarts ou défauts géométriques, font l'objet d'une classification, fonction de leur nature et de leur ampleur :

- **Défauts du premier ordre**

Il s'agit de déformations d'ensemble (écarts de parallélisme, de circularité, de rectitude, de planéité, de sphéricité...) dues à un mauvais état et/ou à une mauvaise utilisation des machines (manque de rigidité de la machine et/ou de la pièce, mauvaise fixation, usure des outils, usure des machines, mauvais montages...).

- **Défauts du second ordre (ondulations de surface)**

Ce sont des défauts générés par le procédé d'usinage (avance cyclique des fraises, facettes sur pièces rectifiées) ou par la machine et/ou l'outil de coupe (vibrations basse fréquence). Ces défauts se manifestent sous forme d'ondulations dont le pas se situe entre 0,5 et 2.5 mm.

- **Défauts du troisième ordre**

Ce sont des stries et des sillons plus ou moins périodiques (de pas inférieur à 0,5 mm), ces défauts correspondent à l'avance des outils de coupe et/ou aux vibrations haute fréquence de la machine et de l'outil. Les défauts du second ordre sont visibles à l'œil nu, ceux du troisième ordre sont sensibles à l'ongle.

- **Défauts du quatrième ordre**

Ce sont des défauts dus à l'hétérogénéité de la matière, à des accidents divers, à des défauts de coupe : ils se manifestent par des arrachements, des fentes, des marques diverses non périodiques.

En descendant de plus en plus dans l'échelle de mesure, on peut définir des défauts du cinquième ordre, au niveau des grains du métal, et des défauts du sixième ordre correspondant à l'arrangement de la structure cristalline. [2]

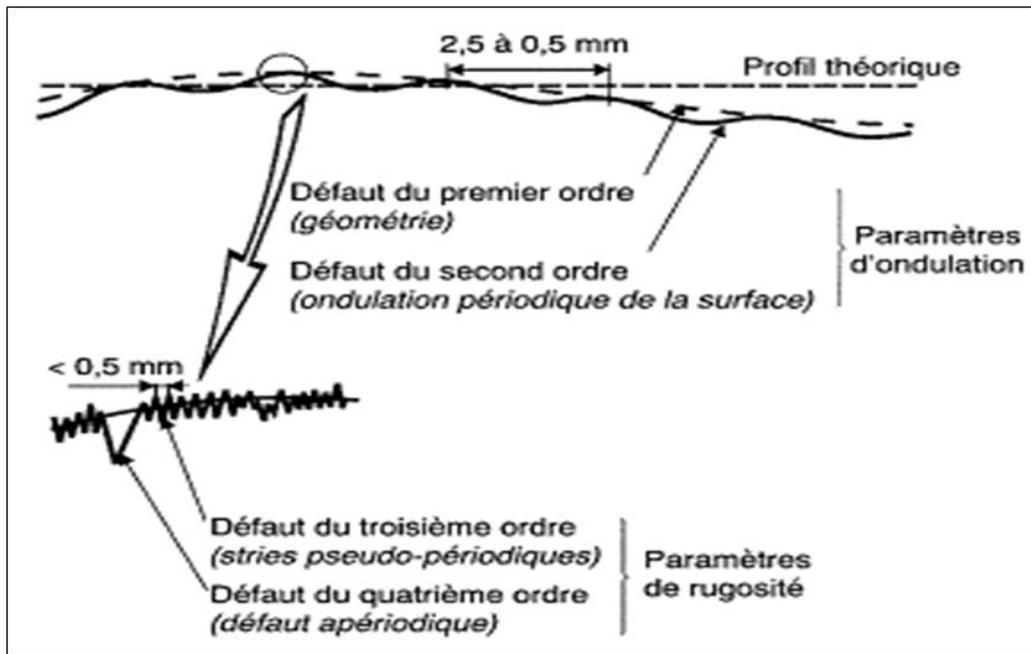


Fig.1.5. Les quatre premiers ordres de défauts superficiels. [2]

1.2.5 Paramètres d'états de surface (rugosité)

On distingue les paramètres liés à la ligne moyenne et ceux liés aux motifs. Nous en citerons quelques-uns seulement. [3]

1.2.5.1 Paramètres liés à la ligne moyenne sur les longueurs de base et dévaluation

1.2.5.1.1 Hauteur maximale du profil (Fig.1.6)

R_{yi} est la distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux sur la longueur de base. La hauteur totale R_t sur la longueur d'évaluation est la valeur maximale des R_{yi}

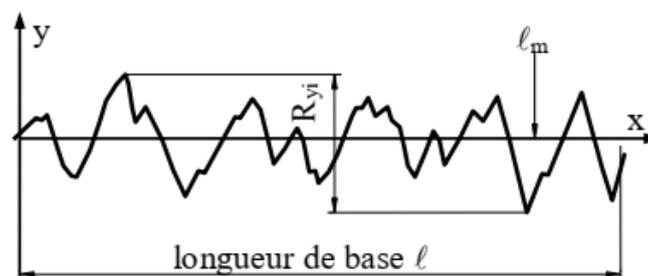


Fig.1.6. Hauteur maximale du profil [3]

1.2.5.1.2 Hauteur maximale de saillie (Fig.1.7)

R_{pi} est la distance du point le plus haut à la ligne moyenne ℓ_m . La hauteur maximale sur la longueur d'évaluation est :

$$R_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{p_i} \quad (1.1)$$

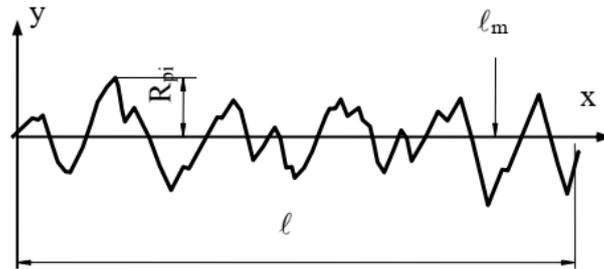


Fig.1.7. Hauteur maximale de saillie [3]

1.2.5.1.3 Ecart moyen arithmétique du profil (Fig.1.8)

$$R_{a_i} = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} |y(x)| dx \quad (1.2)$$

La rugosité arithmétique sur la longueur d'évaluation est :

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{a_i} \quad (1.3)$$

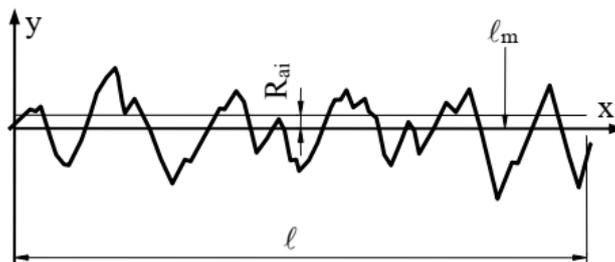


Fig.1.8. Ecart moyen arithmétique du profil [3]

1.2.5.1.4 Ecart moyen quadratique du profil

$$R_{q_i} = \sqrt{\frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} y^2(x) dx} \quad (1.4)$$

Sur la longueur d'évaluation L, on a :

$$R_q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{qi} \quad (1.5)$$

1.2.5.1.5 Maximum de la hauteur des irrégularités du profil (Fig.1.9)

On a : $R_{\max_i} = \max(y_p + y_v)$ (1.6)

Avec $(y_p + y_v)$ somme de la hauteur d'une saillie et de la profondeur d'un creux adjacent.

Sur la longueur d'évaluation, on a : $R_{\max} = \max$ des R_{\max_i}

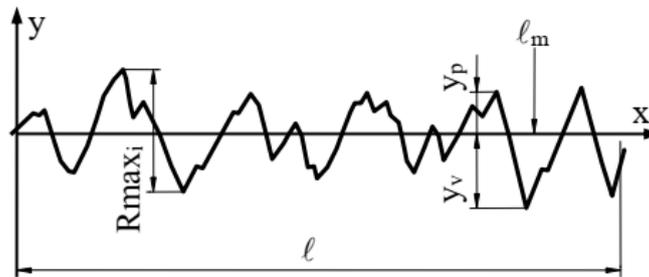


Fig.1.9. Maximum de la hauteur des irrégularités du [3]

1.2.5.1.6 Hauteur des irrégularités sur 10 points

$$R_{zi} = \frac{\sum_{i=1}^5 y_{pi} + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}|}{5} \quad (1.6)$$

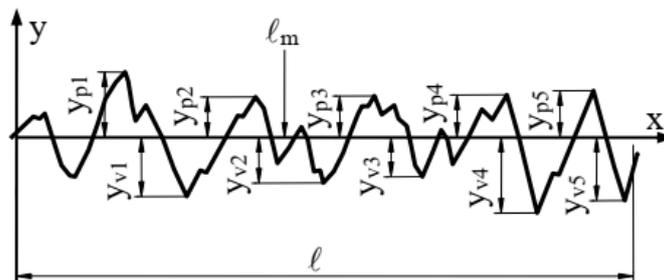


Fig.1.10. Hauteur des irrégularités sur 10 points [3]

R_{zi} est déterminé en prenant 5 saillies les plus hautes et 5 creux les plus bas.

Sur la longueur d'évaluation, on a :

$$R_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{zi} \quad (1.7)$$

1.2.5.1.7 Pas moyen des irrégularités du profil

$$\overline{S_{mj}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k S_{mi} \quad (1.8)$$

Sur la longueur d'évaluation, on a :

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \overline{S_{mj}} \quad (1.9)$$

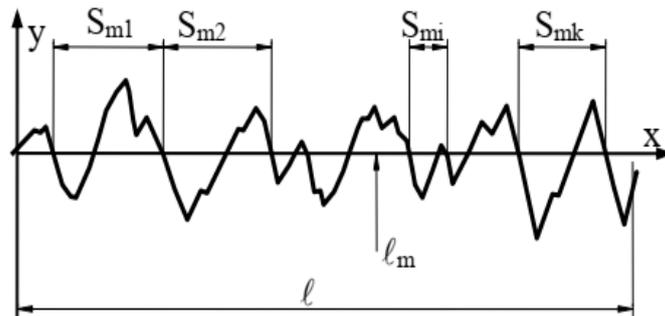


Fig.1.11. Pas moyen des irrégularités du profil [3]

1.2.5.1.8 Taux de longueur portante

$$(t_p)_c = \frac{\eta_p}{L} \quad (1.10)$$

Avec :

$$\eta_p = b_1 + b_2 + \dots + b_n \quad (1.11)$$

L : est la longueur d'évaluation

c : est le niveau de coupe (distance une ligne de saillie l_s et une ligne parallèle coupant le profil).

η_p : la longueur portante du profil.

1.2.5.2 Paramètres liés aux motifs

1.2.5.2.1 Paramètres de rugosité

- **Profondeur moyenne de rugosité**

A remarquer que pour un motif de profil donné, il y a deux fois plus de Ri que de AR_i, ce qui donne : $m = 2n$

Pour n motifs caractéristiques sur la longueur d'évaluation L, la profondeur moyenne de rugosité est définie par :

$$R = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_i \quad (1.12)$$

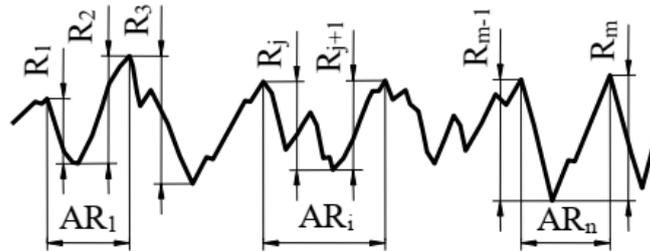


Fig.1.12. Paramètres de rugosité [3]

- **Pas moyen de rugosité**

Pour n motifs caractéristiques sur la longueur d'évaluation L, le pas moyen de rugosité est défini par :

$$AR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AR_i \quad (1.13)$$

- **Profondeur maximale de rugosité**

Elle est désignée par R'max : c'est la valeur maximale des Ri.

1.2.5.2.2 Paramètres d'ondulation

- **Profondeur moyenne d'ondulation (Fig.1.13)**

A remarquer, comme pour le motif de rugosité, il y a deux fois plus de W, que de AWi :

$$m = 2n.$$

Pour n motifs caractéristiques sur la longueur d'évaluation L, la profondeur moyenne d'ondulation est définie par :

$$W = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m W_i \quad (1.14)$$

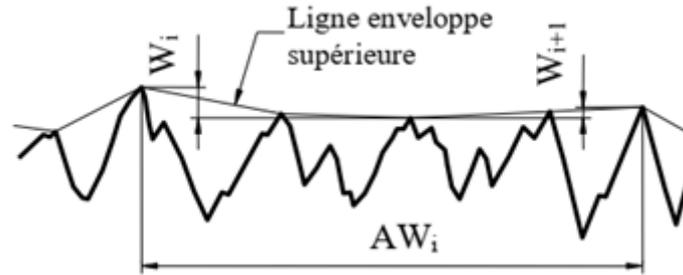


Fig.1.13. Paramètres d'ondulation [3]

- **Pas moyen d'ondulation**

Pour n motifs caractéristiques sur la longueur d'évaluation L , le pas moyen de rugosité est défini par :

$$AW = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AW_i \quad (1.15)$$

- **Profondeur maximale d'ondulation**

Elle est désignée par W'_{max} : c'est la plus grande valeur des W_i .

- **Profondeur totale d'ondulation**

Elle est désignée par W'_t : c'est la distance entre le point le plus haut et le point le plus bas de la ligne enveloppe supérieure.

1.2.6 Direction de mesurage

Habituellement, la rugosité est mesurée perpendiculairement (sauf indication contraire) à la direction prépondérante des stries (Fig.1.14), segment A ou vue F-F) qui donne le nombre maximal de crêtes couvertes par h longueur d'évaluation, par suite h valeur maximale des profondeurs des paramètres de rugosité. Si la direction de mesurage est différente (segments B, C, D), les crêtes de rugosité diminuent jusqu'à même où ils ne seront plus enregistrées (segment E : direction parallèle aux sillons). Dans ce dernier cas, le résultat de mesurage est minimal et correspond à la rugosité du 4ème ordre. Ce résultat peut être bien illustré en examinant une surface rabotée où les stries sont observées suivant la direction de coupe, les défauts de rugosité de 2^{ème} et 3^{ème} ordre sont obtenus suivant la direction du mouvement d'avance de l'outil. [3]

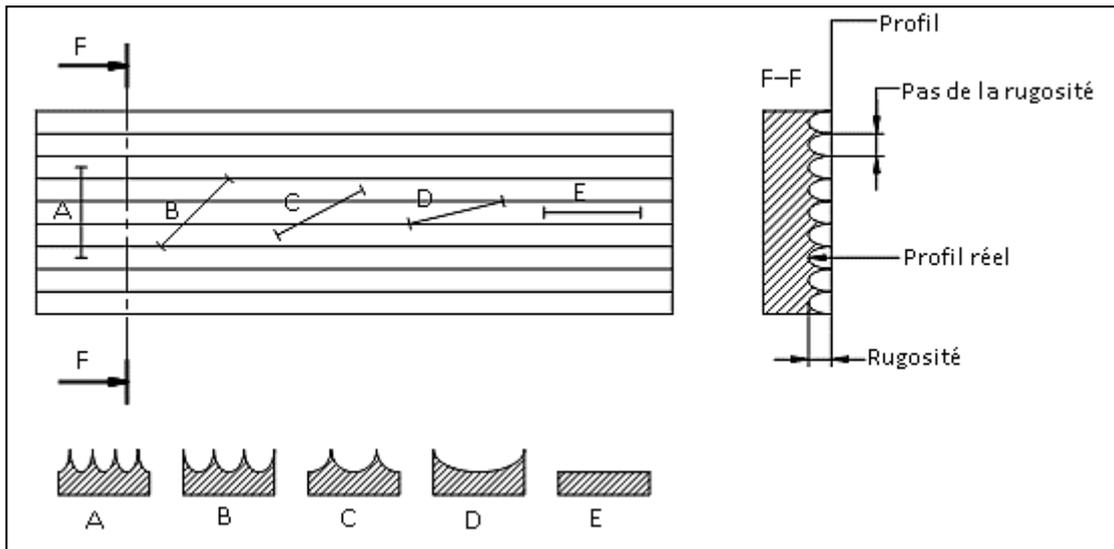


Fig.1.14. Influence de la direction de mesure sur le résultat des paramètres de rugosité [3]

1.2.7 Critères usuels

De tous les critères proposés, le paramètre de rugosité arithmétique R_a est le plus utilisé et est reconnu dans le monde entier, il permet une bonne estimation de la rugosité de surface déterminée à partir d'une mesure de profil.

Les valeurs normalisées de R_a exprimées en μm sont : 0,025 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,4 ; 0,8 ; 1,6 ; 3,2 ; 6,3 ; 12,5 ; 25 ; 50. Ces valeurs correspondent respectivement aux numéros de classes de rugosité N1 à N12.

A noter que critère R_{max} caractérisant la profondeur maximale des irrégularités du profil est particulièrement utilisé en mécanique de la rupture, le taux de longueur portante $(t_p)_c$ est surtout utilisé en tribologie. [3]

1.2.8 Choix de la rugosité en fonction de la tolérance

Tableau 1.2 Valeurs de Ra en fonction de la tolérance [3]									
Degré de tolérance		6	7	8	9	10	11	12	13
Surfaces cylindriques	≤ 3mm	0,2	0,3	0,5	0,5	1,2	2	3	5
	> 3 à ≤ 18	0,3	0,5	0,8	0,8	2	3	5	8
	> 18 à ≤ 80	0,5	0,8	1,2	1,2	3	5	8	12
	> 80 à ≤ 250	0,8	1,2	2	3	5	8	12	20
Surfaces planes		1,2	2	3	5	8	12	20	30

1.2.9 Valeurs du critère de rugosité en fonction du procédé d'usinage

Pour caractériser les différents défauts de surface, plusieurs critères ont été proposés. Néanmoins, aucun critère ne suffit à lui seul à caractériser un profil. On est donc souvent réduit à considérer le mode d'obtention comme facteur de choix prédominant. [3]

Tableau 1.3 : Valeurs de Ra en fonction du procédé d'usinage [3]			
Procédé d'usinage	Ra [μm]	Procédé d'usinage	Ra [μm]
Rabotage	25 – 6,3	Alésage outil diamant – carbure	1,2 – 0,2
Fraisage acier carbure	3,2 – 0,8	Brochage	3,2 – 0,4
Fraisage carbure	1,2 – 0,2	Rectification ébauche	25 – 16
Tournage ébauche	25 – 6,3	Rectification de précision	1,2 – 0,1
Tournage finition	3,2 – 0,8	Rodage	0,8 – 0,1
Tournage diamant – carbure	1,2 – 0,2	Polissage mécanique	0,4 – 0,05
Perçage	8 – 1,6	Polissage	0,1 – 0,025
Alésage à l'alésoir	3,2 – 0,4	Superfinition	

1.2.10 Méthodes de mesure

Il existe un grand nombre d'instruments de mesure de topographie. Nous ne verrons ici que trois systèmes de mesure qui permettent de balayer un large spectre de résolution.

Le palpeur mécanique dont le principe est illustré sur la figure 1.15 est l'appareil de mesure historique. Le principe consiste à promener un bras horizontal muni d'une pointe diamant suivant la direction du profil à mesurer puis d'enregistrer les mouvements verticaux du bras. Ce système offre une résolution verticale qui peut atteindre le nanomètre. Sa résolution latérale est limitée par le rayon de la pointe qui vaut généralement $2\mu\text{m}$. L'obtention d'une surface nécessite la réalisation de plusieurs profils.

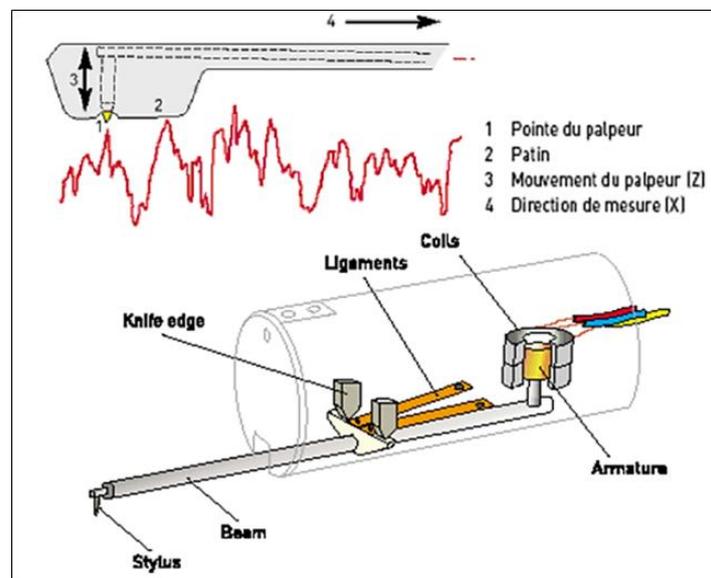


Fig.1.15. Principe de fonctionnement du palpeur mécanique. [1]

Le microscope interférométrique offre l'avantage de mesurer des surfaces sans contact et sans balayage horizontale. Le principe (figure 1.16) consiste à faire interférer le signal lumineux réfléchi par l'échantillon avec celui réfléchi par un miroir de référence. L'acquisition nécessite un mouvement horizontal qui est assuré par un actionneur piezo ou un système vis-écrou en boucle fermée. Les résolutions verticales sont très inférieures au nanomètre alors que la résolution latérale se limite à environ $0,5\mu\text{m}$.

Enfin, le microscope à force atomique (AFM) offre les meilleures résolutions actuellement disponibles. Elles sont inférieures au nanomètre dans les trois directions grâce à l'utilisation d'un actionneur piezo. Pour cela, une pointe dont le

rayon de courbure est de quelques nanomètres est mise en contact avec la surface. La pointe est montée sur un support extrêmement souple pour ne pas indenter la surface. Enfin l'échantillon est déplacé suivant z de manière à maintenir le faisceau laser réfléchi par la pointe au centre de la cible.

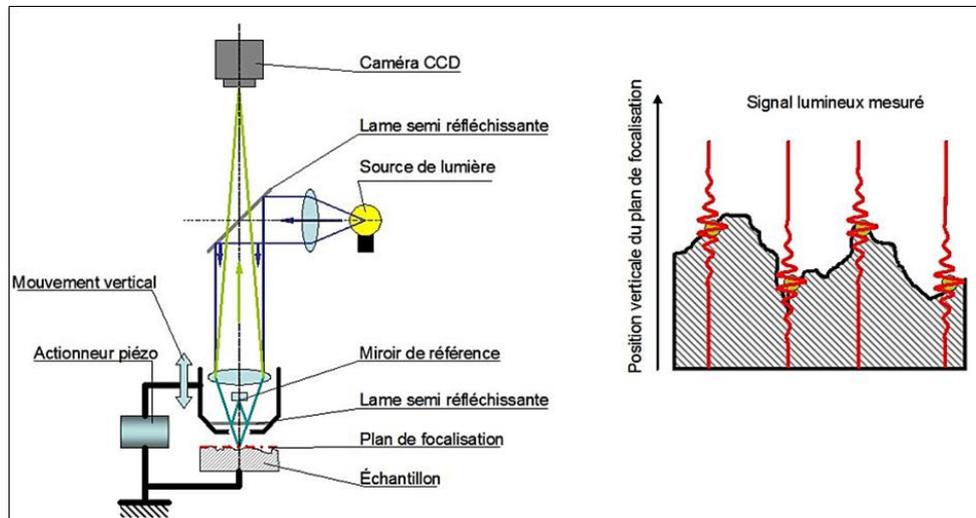


Fig.1.16. Principe de fonctionnement du microscope interférométrique. [1]

L'étendue latérale de mesure est généralement de l'ordre de 1000 fois la résolution latérale, ce qui limite l'AFM aux applications de recherche. En revanche, le microscope interférométrique est de plus en plus couramment utilisé dans l'industrie. [1]

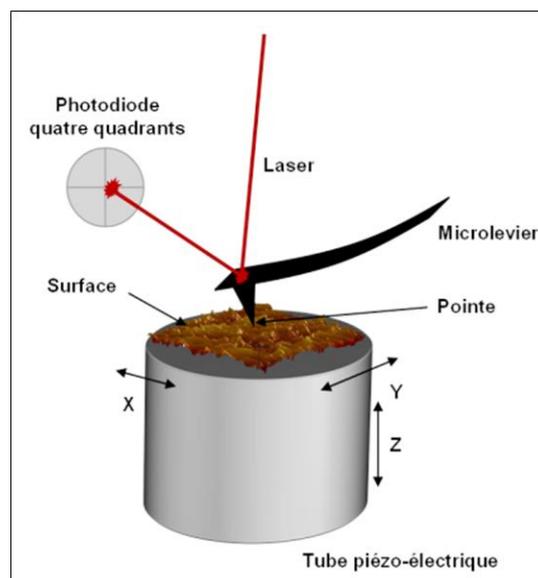


Fig.1.17. Principe de fonctionnement du microscope à force atomique. [1]

1.3 Contraintes superficielles

Les contraintes résiduelles sont des contraintes auto-équilibrées qui existent dans un matériau pris à température uniforme et qui n'est soumis à aucune sollicitation mécanique extérieure. Ces contraintes résiduelles apparaissent lorsqu'il existe dans le matériau des hétérogénéités de déformation permanentes qui conduisent à des incompatibilités de déformation.

C'est l'échelle à laquelle est traitée cette hétérogénéité de déformation qui a conduit à une classification des contraintes résiduelles. On définit classiquement trois ordres de contraintes appelées contraintes résiduelles du premier ordre (σ_I), du deuxième ordre (σ_{II}), du troisième ordre (σ_{III}).

L'échelle à laquelle ces contraintes sont définies est de l'ordre du mm pour les contraintes σ_I , de quelques μm pour les contraintes σ_{II} et de quelques dizaines de nm pour les contraintes σ_{III} .

- Les contraintes résiduelles du premier ordre (σ_I) sont homogènes dans de larges zones du matériau qui couvrent plusieurs grains. Ces contraintes sont équilibrées dans l'ensemble de la pièce et s'appellent également contraintes résiduelles macroscopiques.
- Les contraintes résiduelles du deuxième ordre (σ_{II}) sont homogènes à l'intérieur d'un grain ou d'une phase ; leur échelle est celle de la microstructure du matériau telle qu'elle peut être observée en microscopie optique. L'équilibre de ces contraintes est réalisé sur plusieurs grains.
- Les contraintes résiduelles du troisième ordre (σ_{III}) sont homogènes sur de très petits domaines du matériau, quelques distances interatomiques. Elles sont en équilibre dans une partie d'un grain et sont reliées à toutes les déformations qui existent au niveau du réseau cristallin. Ces contraintes résiduelles sont représentées à l'échelle des défauts de structure. C'est la microstructure telle qu'elle peut être observée en microscopie électronique en transmission.

Cette classification est souvent simplifiée du fait de la difficulté à séparer les contraintes résiduelles σ_{II} et σ_{III} et on parle de :

- macrocontraintes : contraintes σ_{II} .

- microcontraintes : contraintes $\sigma_{II} + \sigma_{III}$ - Les contraintes σ_{II} peuvent être également appelées microcontraintes homogènes et les contraintes σ_{III} , microcontraintes hétérogènes.

La contrainte résiduelle locale est la superposition de ces trois types de contraintes :

$$\sigma_r = \sigma_I + \sigma_{II} + \sigma_{III} \quad (1.16)$$

La figure 1.13 illustre schématiquement comment se superposent ces trois ordres de contrainte dans un matériau polycristallin. La courbe, qui représente la contrainte dans la direction Y en fonction de l'abscisse X, traverse plusieurs grains.

Les contraintes d'ordre I s'étendent sur plusieurs grains et correspondent à une valeur moyenne sur le matériau.

Les contraintes d'ordre II s'étendent sur un seul grain et traduisent une variation de contraintes dans chaque grain autour de la valeur moyenne représentée par σ_I .

Les contraintes d'ordre III fluctuent autour de la valeur moyenne des contraintes dans un grain.

Cette brève définition des contraintes résiduelles avec une classification en contraintes résiduelles d'ordre I, II, III demande dès maintenant à être commentée. Ce sont les contraintes résiduelles macroscopiques qui sont traitées dans la plupart des recherches qui concernent la mise en œuvre des matériaux. C'est le domaine de la mécanique des matériaux qui utilise des propriétés mécaniques moyennes pour décrire les contraintes mécaniques dans le matériau avec des relations contrainte-déformation bien formalisées. Lorsque l'échelle de description du matériau s'affine, contraintes résiduelles d'ordre II et III, les formulations des relations contrainte-déformation deviennent de plus en plus complexes. La mesure et la prise en compte de ce type de contrainte dans la mise en œuvre des matériaux est en plein développement. La cartographie de ces contraintes résiduelles fait partie de la description des microhétérogénéités des matériaux polyphasés. [4]

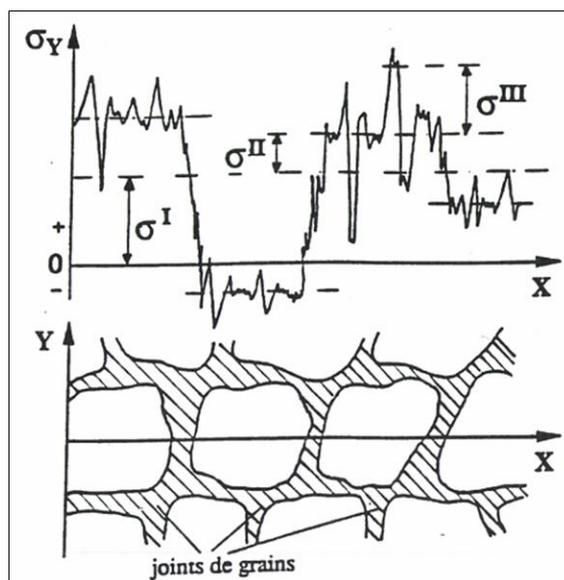


Fig.1.18. Superposition des contraintes de types I, II et III dans un domaine couvrant plusieurs grains. [4]

1.3.1.1 Mesure des contraintes résiduelles :

De nombreuses méthodes de mesure des contraintes résiduelles ont été développées. Ces méthodes sont basées soit sur des mesures de déformation qui permettent ensuite de calculer les contraintes, soit sur des mesures de propriétés physiques du matériau, propriétés qui sont sensibles aux contraintes résiduelles.

Ces méthodes sont, soit destructives soit non destructives ; d'autre part, elles sont adaptées plus spécialement aux contraintes σ_I , σ_{II} ou σ_{III} .

Nous pouvons classer les méthodes de mesure des contraintes résiduelles en trois grandes familles :

- les contraintes résiduelles qui sont obtenues à partir des mesures de déformation après enlèvement de matière. Les déformations sont mesurées en cours d'usinage ou après usinage, généralement avec une jauge de déformation collée sur l'éprouvette ou même plus simplement en mesurant la flèche qui apparaît sur un échantillon mince usiné dissymétriquement ou en utilisant un vernis craquelant qui image qualitativement les déformations qui apparaissent après usinage. Ce sont les contraintes du premier ordre qui sont mesurées.
- les contraintes résiduelles qui sont obtenues par mesure de la déformation homogène du réseau cristallin. Ce sont les méthodes de mesure par diffraction,

rayons X et neutrons. Ce sont les contraintes du premier et du deuxième ordre qui sont mesurées.

- les contraintes résiduelles qui sont obtenues à partir des mesures de propriétés physiques. Ce sont les méthodes de mesures par ultrasons et magnétiques. Les trois ordres de contraintes interviennent. [4]

Le tableau 1.4 résume les principales caractéristiques de ces techniques.

Tableau 1.4 Les principales caractéristiques de ces techniques. [4]			
Méthode	Type de mesure	Type de contraintes résiduelles	Caractère
Mécanique	Déformation macroscopique superficielle	1 ^{er} ordre	destructif ou semi-destructif (mesures en surface)
- Diffraction des rayons X	Déformation homogène de réseau	Principalement 1 ^{er} ordre, 2 ^e ordre, parfois 3 ^e ordre	Non destructif ou semi-destructif (mesures en surface)
- Diffraction de neutrons	Déformation homogène de réseau	1 ^{er} et 2 ^e ordres	Non destructif
- Ultrasons	Vitesse de propagation des ondes ultrasonore	1 ^{er} et 2 ^e et 3 ^e ordres	Non destructif
- Magnétique	Bruit Barkhausen	1 ^{er} et 2 ^e ordres	Non destructif

1.3.2 Origine des contraintes résiduelles

De nombreux procédés d'élaboration de traitements thermiques, thermo-chimiques, thermomécaniques et mécaniques génèrent des contraintes résiduelles d'ordre I. Ces contraintes résiduelles peuvent apparaître lorsque le matériau est sollicité thermiquement, lorsqu'il est soumis à des changements de composition et/ou des changements de structure et lorsqu'il est sollicité

mécaniquement. Ces différentes origines de contraintes résiduelles agissent seules dans de nombreux procédés ou interagissent entre elles.

La figure 1.19 reprend le diagramme triangulaire d'interaction thermique-métallurgie mécanique qui explique la complexité de la genèse des contraintes résiduelles lors du traitement des matériaux.

Ainsi, chaque traitement mécanique, thermique, chimique et toute combinaison de ces traitements provoque l'apparition de contraintes internes dans le matériau. Si ces contraintes provoquent des déformations plastiques non homogènes, qui subsistent à la fin du traitement, la pièce traitée présentera des contraintes résiduelles.

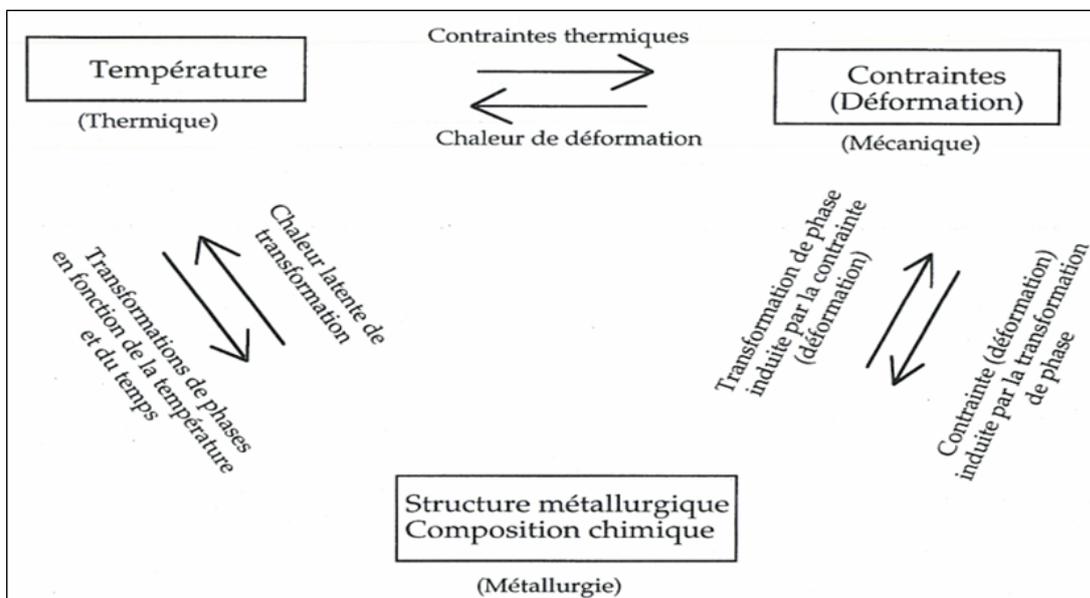


Fig.1.19. Schéma triangulaire d'interaction thermique - métallurgie - mécanique en genèse des contraintes résiduelles. [4]

Dans le tableau 1.5, nous avons porté les principaux procédés d'élaboration de traitement et de mise en œuvre des matériaux qui provoquent des contraintes résiduelles. Dans certains cas, ces procédés sont utilisés pour générer des contraintes résiduelles favorables aux propriétés d'emploi du matériau, par exemple le grenailage. Dans d'autres cas, le procédé génère des contraintes résiduelles bénéfiques ou non, par exemple dans le cas du traitement thermique. [4]

Tableau 1.5. Principales origines des contraintes résiduelles de premier ordre [4]
Chargement élastoplastique : flexion, torsion, traction, compression
Usinage : polissage, tournage, rectification, perçage
Assemblage et multimatériaux : soudage, brasage, collage, composites
Mise en forme : laminage, tréfilage, forgeage, galetage, martelage, grenailage
Traitement thermique et thermochimique superficiels : trempe, durcissement par transformation de phase, cémentation, nitruration
Revêtement : dépôts, glaçage, plaquage, galvanisation, PVD, CVD

1.3.3 Prévision des contraintes résiduelles

La prévision des contraintes résiduelles du premier ordre est une préoccupation de l'ingénieur qui met en œuvre des matériaux dans une pièce. Une prévision qualitative de la genèse des contraintes résiduelles peut déjà être menée à partir du moment où on est à même d'estimer l'ampleur et la chronologie des déformations plastiques qui se produisent en différents endroits d'une pièce.

Une bonne connaissance de ces déformations plastiques nécessite de décrire le comportement mécanique, chimique et thermique du matériau et les interactions entre ces différents phénomènes. Cette description précise est nécessaire si l'on veut aboutir à une prévision quantitative des contraintes résiduelles. Une prévision quantitative validée est une approche de choix pour optimiser les procédés de fabrication et aider au choix des matériaux.

Les paramètres à prendre en compte sont très complexes et concernent à la fois les diverses caractéristiques du matériau et les paramètres qui caractérisent le procédé mis en œuvre.

Cette prévision des contraintes résiduelles va naturellement dépendre des origines des contraintes comme nous venons de l'exposer. Chaque état de contrainte résiduelle d'origine mécanique, thermique ou chimique nécessite une connaissance particulière du comportement du matériau qui est utilisé pour décrire la genèse des contraintes résiduelles dans une pièce de géométrie donnée et soumise à un procédé de fabrication donné.

Avec cette spécificité des différentes genèses des contraintes résiduelles, il est cependant possible de donner quelques éléments communs aux différentes approches mises en œuvre pour prévoir les contraintes résiduelles par le calcul :

- une modélisation de l'évolution du comportement (mécanique, structural et chimique) du matériau tout au long du procédé de fabrication ou durant son utilisation (c'est-à-dire une modélisation fonction du temps et de la température). L'état actuel des connaissances nécessite encore très souvent une modélisation de type phénoménologique, c'est-à-dire une modélisation qui se nourrit de nombreuses données tirées d'expériences de caractérisation du matériau ;
- une modélisation de la sollicitation appliquée au matériau. Ici encore de nombreuses données doivent en général être tirées de l'expérience ;
- un code de calcul de structure, très souvent du type élément fini qui permet, sur un échantillon ou une pièce et avec une approche plus ou moins complexe de la géométrie (1 D, 2 D, 3 D), de prendre en compte l'évolution complexe et modélisée du comportement du matériau. Ce code de calcul doit également prendre en compte la sollicitation appliquée (mécanique, thermique, chimique) et utiliser des conditions aux limites réalistes. Enfin, des couplages entre comportement du matériau et sollicitation appliquée apparaissent très souvent.

La prévision des contraintes résiduelles avec une modélisation numérique de la genèse des contraintes résiduelles est maintenant développée pour la plupart des procédés de traitement qui conduisent à des contraintes résiduelles. Un point récent sur la simulation numérique des contraintes résiduelles induites par traitement thermique identifie l'ensemble des paramètres thermiques, chimiques et mécaniques qu'il faut traiter au travers de codes de calculs éléments finis pour prévoir la répartition des contraintes résiduelles du premier ordre dans une pièce après traitement.

Les modélisations et simulations numériques sont actuellement plus ou moins validées expérimentalement, ce qui implique pour l'instant d'utiliser les méthodes de simulations numériques avec des expérimentations de validation de la méthode et avec une analyse de l'ensemble de la genèse des contraintes résiduelles. [4]

1.3.4 Conséquences des contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles du premier ordre interviennent d'une part en altérant la géométrie de la pièce (ce sont les déformations et les défauts associés aux contraintes résiduelles et à toute l'histoire de la genèse des contraintes internes), d'autre part sur le comportement mécanique du matériau et de la pièce du fait que la sollicitation que subit localement le matériau est une « superposition » de la contrainte appliquée et de la contrainte résiduelle.

Le premier aspect, qui concerne la modification de la géométrie de la pièce en associant un état de contrainte résiduel à un état de déformation résiduel, n'est pas à proprement parler une conséquence des contraintes résiduelles, mais est plutôt à rattacher à l'apparition des déformations de traitement. Ces déformations peuvent conduire à des ruptures locales de pièces ou à l'apparition de fissures localisées. Une manifestation spectaculaire de ce dernier effet peut se rencontrer lors de la trempe des aciers avec l'apparition de tapures.

Le deuxième aspect se manifeste lors de la mise en œuvre de matériaux, pour deux types de sollicitation :

- la sollicitation mécanique qui produit une déformation plastique résultant d'une superposition de l'état de contrainte résiduelle et de la contrainte appliquée. La plastification progressive des pièces peut conduire à un état de contrainte résiduel totalement relaxé ;
- la sollicitation mécanique cyclique. Dans ce cas, les contraintes résiduelles ont un effet important sur la tenue en fatigue. Une augmentation importante de la tenue en fatigue peut être obtenue en optimisant le profil de contrainte résiduelle dans la pièce. Ainsi, ce sont des contraintes résiduelles de compression en surface des pièces et produites par traitements thermiques superficiels, traitements thermo-chimiques ou mécaniques qui augmentent de façon importante la durée de vie de nombreuses pièces mécaniques. Il arrive également que des profils de répartition de contraintes résiduelles soient défavorables et provoquent une détérioration des propriétés de tenue en fatigue qui conduisent à des ruptures prématurées de pièces. [4]

1.3.5 Conclusion

La prise en compte des contraintes résiduelles dans la mise en œuvre des matériaux est plus ou moins avancée dans les différentes filières de production et de traitement des matériaux. Les problèmes sont spécifiques d'un matériau à un autre et d'un procédé à un autre. Cependant, maintenant, la genèse des contraintes résiduelles dans les procédés de traitement des matériaux et les conséquences de ces contraintes résiduelles sur les propriétés des matériaux sont des paramètres qui participent de plus en plus à l'optimisation des traitements, des matériaux et des structures.

1.4 Dureté :

La dureté peut être définie comme une mesure de la résistance à la déformation plastique localisée. Les méthodes de mesure de la dureté sont basées sur la pénétration forcée d'un indenteur à la surface d'un matériau. Une valeur de dureté est déterminée par la mesure de la dimension ou de la profondeur de l'empreinte faite par l'indenteur soumis à des charges et des vitesses d'application contrôlées.

1.4.1 Estimation qualitative de la dureté : échelle de Mohs

C'est une mesure (encore très utilisée) de dureté par rayure, mise au point par Friedrich MOHS (1773-1839) un minéralogiste.

Un matériau A est dit plus dur qu'un matériau B si A raye B et n'est pas rayé par B. L'échelle de Mohs qui en résulte est constituée par une séquence de minéraux de plus en plus durs. L'indice (de 1 à 10) associé à chaque minéral est appelé dureté MOHS.

Tableau 1.6 Dureté MOHS avec matériaux dentaires équivalents

Talc	1	Plomb
Gypse	2	Or, Etain
Calcite	3	Cuivre, Argent
Fluorine	4	Fer, Nickel
Apatite	5	Cobalt, Aciers C
Feldspath	6	Titane, MgO
Quartz	7	Manganèse
Topaze	8	Acier
Corindon	9	Alumine
Diamant	10	Carbure de bore

Ongle H=2,5
 Penny en cuivre H=3,5
 Lame de couteau H=5,5

- Ce mode de détermination de la dureté demeure très qualitatif.

1.4.2 Essais de dureté quantitatifs

Les essais consistent à enfoncer un pénétrateur (indenteur) dans le matériau. La charge est constante pendant un temps donné et on mesure la dimension de l'empreinte. L'empreinte est d'autant plus grande que le métal est mou.

La dureté H (hardness) s'exprime par le rapport de la force sur la surface de l'empreinte. La dureté est un test empirique et ne correspond pas à une propriété du matériau. Mais ce test de dureté permet de caractériser les matériaux et de déterminer s'ils sont adaptés à leur utilisation clinique.

1.4.2.1 Essai BRINELL

Johan August BRINELL (1849–1925), ingénieur métallurgiste suédois, travaillait sur la transformation des aciers en fonction de la température. Il avait besoin d'un test rapide non destructif pour déterminer la dureté des différents aciers testés. Il met au point son test de dureté BRINELL basé sur un indenteur bille, pour alliages métalliques peu durs. L'essai consiste à imprimer dans la pièce une bille en acier ou en carbure de tungstène de diamètre D sous une charge F et à mesurer le diamètre d de l'empreinte.

Dureté Brinell HB = $F / \pi D^2 [D - \sqrt{D^2 - d^2}]$ (surface d'une calotte sphérique)

F = charge d'essai (fonction du matériau) de 500 à 3000 daN

D = diamètre de la bille (5 ou 10 mm)

d = diamètre de l'empreinte en mm

La charge est appliquée progressivement pendant 15 secondes et maintenue à sa valeur finale pendant 15 secondes.

L'essai BRINELL est très peu utilisé en Odontologie.

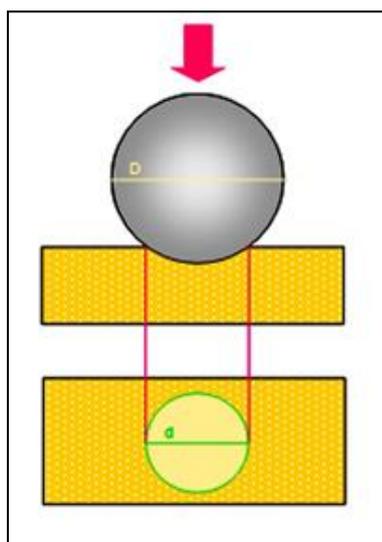


Fig.1.20. Principe de l'essai de dureté BRINELL

1.4.2.2 Essai VICKERS

SMITH et SANDLAND, ingénieurs chez VICKERS Ltd GB ont besoin de tester des matériaux trop durs pour le test BRINELL. En 1925, ils conçoivent une pyramide de diamant. Cette pyramide de diamant à base carrée a un angle au sommet de 136°. Après l'indentation, on mesure la moyenne des diagonales d1 et d2 de l'empreinte en microscopie optique.

Dureté Vickers HV = 1,854 F/d²

F = charge d'essai (de 1 à 120 daN)

d = diagonale (moyenne de d1 et d2) de l'empreinte en mm

L'essai VICKERS est adapté pour les alliages durs et les céramiques.

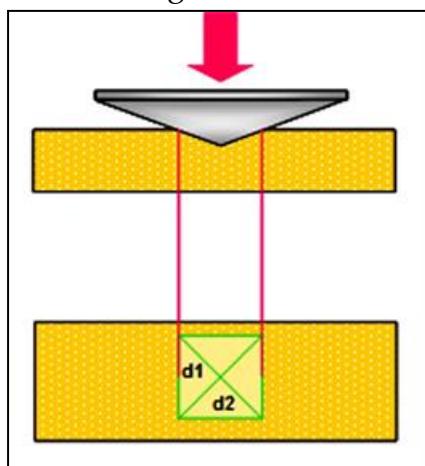


Fig1.21. Principe de l'essai de dureté VICKERS

1.4.2.3 Essais ROCKWELL

Stanley ROCKWELL travaille comme métallurgiste dans une usine de roulements à billes. Il vérifie les traitements thermiques par des tests de dureté. L'essai BRINNEL donne une indentation trop grosse. L'essai VICKERS est trop long. En 1922, ROCKWELL conçoit un nouveau système avec différents pénétrateurs, adapté aux métaux et aux plastiques avec une large gamme de matériaux testés.

Pénétrateur :

- Soit bille en acier de diamètre 1,59 mm = Rockwell b pour les matériaux mous comme les alliages de cuivre
 - Soit cône en diamant d'angle au sommet 120° et dont l'extrémité est une calotte sphérique de rayon 0,1mm = Rockwell c, pour les matériaux plus durs comme l'acier.
- ✓ Précharge F_0 faible de 10 daN = niveau de référence
 - ✓ Surcharge F_1 de 60 à 150 daN
 - ✓ Charge $F_2 = F_0$ à nouveau de 10 daN

On mesure la profondeur de l'empreinte = différence des 2 positions ($F_2 - F_1$)

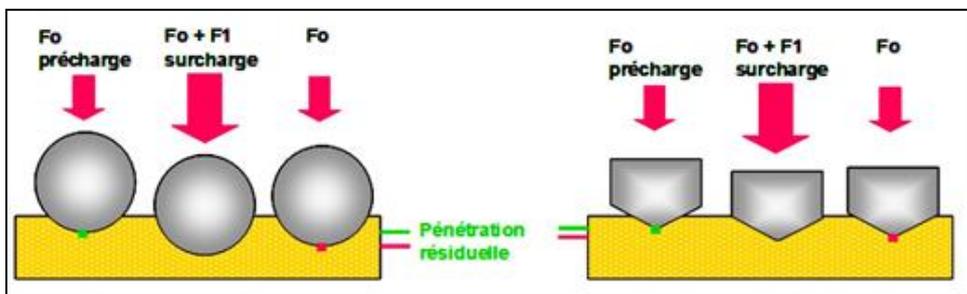


Fig.1.22. Principe de l'essai de dureté ROCKWELL b et ROCKWELL c

En fonction du type d'indenteur et de la valeur de la charge appliquée on détermine différents types de duretés ROCKWELL (échelle de A à H, de K à M, P, R, S, V) adaptées aux différents types de matériaux. Quand les pièces sont de faibles épaisseur ou diamètre, comme en Odontologie, les duretés Vickers et Rockwell donnent de trop grandes empreintes et on leur préfère les essais de microdureté.

1.4.3 Essais de microdureté quantitatifs

1.4.3.1 VICKERS micro

Essais sous très faibles charges inférieures à 0,2 daN avec une pyramide diamant Vickers. La mesure de la dimension se fait avec un microscope métallographique. Les empreintes font quelques microns.

1.4.3.2 Dureté KNOOP

Cet essai a été élaboré par Frederick KNOOP en 1939 au Bureau National des Standards aux Etats-Unis. L'indenteur est une pyramide de diamant asymétrique avec un angle de 170° pour un axe et de 130° pour l'autre. La charge est inférieure à 1 daN. On obtient des empreintes inférieures au 1/10 de mm.

L'essai KNOOP est utilisé pour des corps particulièrement fragiles comme les verres, les céramiques ou la dentine. Il existe également des applications spécifiques pour les plastiques.

Quelle que soit la méthode d'essai de dureté choisie, la réalisation de mesures de dureté exige certaines précautions :

- Opérer sur une surface plane et polie
- La charge doit être appliquée perpendiculairement à la surface et sans choc.

De plus, il existe des essais de dureté plus spécifiquement adaptés aux polymères ou aux métaux mous.

1.4.4 Essais spécifiques pour polymères et métaux mous

1.4.4.1 Dureté SHORE

Cet essai, utilisé depuis 1907, a été conçu pour les polymères. Il mesure la dureté en termes d'élasticité du matériau. Il utilise un indenteur sphérique ou conique en acier dont on enregistre le rebond. On distingue une dureté SHORE A pour les caoutchoucs mous et une dureté SHORE D pour les caoutchoucs plus durs.

1.4.4.2 Dureté BARCOL

Essai inventé par Walter COLMAN qui fonda la firme BARber-COLman. C'est un système portable qui utilise de faibles charges de l'ordre de 1 daN. Il est adapté pour les métaux mous comme l'aluminium et les plastiques. Il existe 3 modèles adaptés chacun à une gamme de matériaux.

1.4.5 Tests de nanodureté :

Les essais de nanodureté sont des essais de dureté dans lesquels la profondeur de l'indentation est généralement inférieure à environ $50\text{ }\mu\text{m}$ ou, de manière équivalente, la longueur du diamètre de l'indentation est inférieure à environ $150\text{ }\mu\text{m}$. Pour obtenir des profondeurs d'indentation aussi faibles, les charges appliquées sur le pénétrateur sont généralement comprises entre 0,1 et 100 mN. Les précisions des testeurs de nanodureté en ce qui concerne la charge et les mesures de déplacement (ou de profondeur) sont généralement de 11N et 0,2nm, respectivement. Le pénétrateur utilisé est invariablement un pénétrateur en diamant Berkovitz. Ce pénétrateur a une forme de pyramide triangulaire pointue et le profil de la pointe du pénétrateur est mesuré a priori (ou fourni par le fabricant d'indenteur), de sorte que les profondeurs d'indenteurs mesurées peuvent être converties en surface de contact (A) entre l'indenteur et le matériau du substrat.

Lors d'un test de nanodureté typique, la charge prédéterminée est appliquée lentement et régulièrement sur l'indenteur. Par conséquent, l'indenteur pénètre dans l'éprouvette, et AB sur la figure 1.16 représente la courbe correspondante de la charge (P) en fonction de la profondeur d'indentation (h). Au point B, la résistance offerte par l'éprouvette indentée est égale à la charge appliquée et aucune autre pénétration ne se produit. Ensuite, lorsque la charge appliquée est retirée, l'indentation déformée se rétablit élastiquement, ce qui donne la courbe de décharge BC (Fig. 1.20).

L'essai de nanodureté convient parfaitement pour mesurer la dureté des couches minces de revêtements (épaisseur des revêtements inférieur à $1\text{ }\mu\text{m}$), la dureté des micro-constituants comme les fibres et les particules dans les composites, et la dureté des poudres submicroniques. En outre, les essais de nanodureté sont largement utilisés pour caractériser et évaluer la qualité des différents composants des circuits intégrés modernes.

Il convient toutefois de noter que le système nano-indenteur est un équipement de haute technologie et de coût élevé. En outre, il doit être installé avec beaucoup de soin, car même des vibrations mineures influenceront les résultats des tests. Compte tenu de ce qui précède, il est peu probable que le nano-indenteur atteigne un jour le statut de testeur de micro ou d'ultra-microdureté, c'est-à-dire un équipement standard pour mesurer la dureté. Il est plus probable qu'il reste un outil de recherche qui peut également être utilisé pour mesurer la dureté des matériaux à des profondeurs d'indentation de l'ordre du nanomètre. [5]

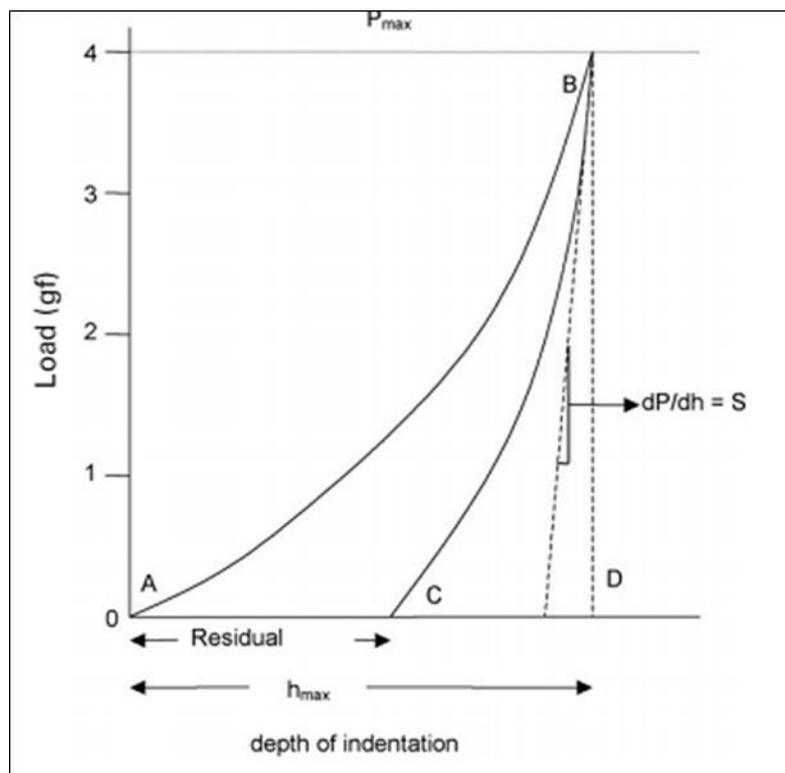


Fig.1.23. La courbe de charge-décharge généralement obtenue à partir de tests de dureté ultra-micro et nanométrique [5]

1.4.6 Conclusion

Ce chapitre comporte quelques descriptions sur les surfaces et leurs différents types et quelques notions fondamentales sur l'état de surface et ses paramètres, on a évoqué aussi différents ordres de défauts, on a aussi parlé sur les contraintes et la dureté superficielles et leurs propriétés et comportements mécaniques.

La connaissance des paramètres et des défauts de la rugosité et leurs améliorations est un facteur essentiel dans l'optimisation de l'aptitude d'une pièce, parfois un très simple paramètre tel que Ra ou Rz peut être suffisant pour contrôler le processus de fabrication d'une manière rapide et efficace.

1.5 Usure

L'usure d'un solide est généralement défini comme une perte de matière, un mouvement de matière ou une transformation de matière en surface du solide sous l'effet d'une interaction avec un autre milieu (solide dans notre cas, mais ça peut également être un fluide).

Nous même on s'use, les matériaux aussi, c'est-à-dire lorsqu'on frotte un matériau sur un autre, en principe, il va perdre un peu de masse. C'est aussi un mécanisme qui avec la corrosion va gentiment nous amener à devoir changer de pièces dans un dispositif. [6]

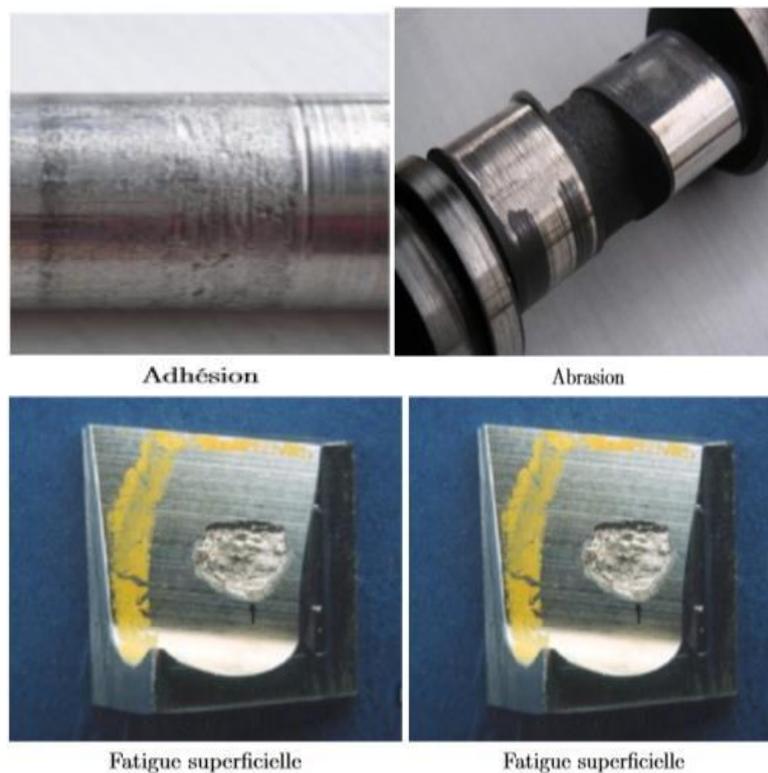


Fig.1.24. Exemples de surfaces usées par différents mécanismes. [1]

1.5.1 Mécanisme d'usure

Si nous avons un pion qu'on frotte sur une surface (matériau de base, figure 1.25) et qu'après une certaine distance L de propagation, la partie inférieure enlevée, avec un Δh , le taux d'usure est le volume enlevé divisé par la longueur L .

$$W = \frac{\Delta V}{L} = \frac{A \cdot \Delta h}{L} \quad (1.17)$$

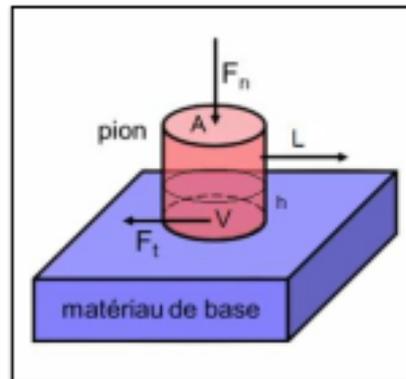


Fig.1.25. frottement d'un pion sur un matériau de base

Le taux d'usure normalisé par la surface A donne le taux d'usure spécifique

$$\Omega = \frac{w}{A} = \frac{\Delta V}{A \cdot L} = \frac{\Delta h}{L} \quad (1.18)$$

Ce taux spécifique est alors proportionnel à la pression appliquée

$$\Omega = \frac{\Delta h}{L} = k_a \cdot P = k_a \cdot \frac{F_n}{A} \quad (1.19)$$

k_a : Coefficient d'Archard,

Le Coefficient d'Archard facteur dépend de nombreux facteurs telle que l'état de surface (rugosité), lubrification, présence des débris entre les deux pièces, la nature de la contre pièce...etc.

En réalité les contacts ne sont pas de surface à surface mais d'aspérité à aspérité

L'usure entre deux surfaces se fait via des points de contact et donc dépend de leur rugosité (figure 1.26)

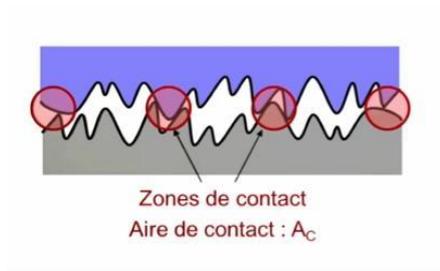


Fig.1.26. frottement d'un pion sur un matériau de base

En supposant que la limite élastique est atteinte aux points de contact, on a :

$$\sigma_{el} = \frac{F_n}{A_c} = P \frac{A}{A_c} \quad (1.20)$$

A : Aire appliquée (totale).

A_c : Aire de contact.

Le taux d'usure d'un matériau est proportionnel à la pression appliquée et à son coefficient d'Archard. Ce dernier est d'autant plus faible que la dureté du matériau est élevée, mais dépend fortement de l'autre corps, des états de surface et de lubrifiant.

1.5.1.1 Usure adhésive

Les forces d'adhésion se développent entre les surfaces mises en contact. La rupture de ces liaisons adhésives nécessite d'exercer une contrainte de cisaillement τ_a , à l'origine du frottement. Elle peut s'exprimer :

$$\tau_a = f_a p_m \quad (1.21)$$

Où

p_m : La pression moyenne de contact et

f_a : Contribution adhésive du coefficient de frottement.

L'usure adhésive se caractérise donc par des arrachements de matière irréguliers sur les surfaces. Les particules d'usure arrachées du matériau le plus tendre vont adhérer sur l'antagoniste. Le matériau le plus tendre va donc se retrouver à frotter contre lui-même. D'autre part, la topographie des surfaces et donc les pressions de contact vont changer.

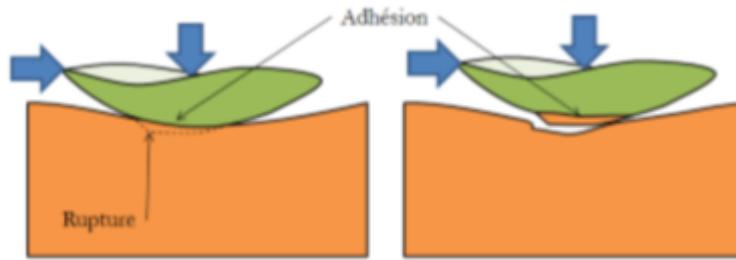


Fig.1.27. Mécanisme de l'usure adhésive [1]

Lorsque les pressions de contact sont élevées et que les matériaux ont un travail d'adhésion élevée, il possible d'atteindre un régime sévère d'adhésion où les surfaces sont soudées. Le mécanisme est alors complètement bloqué, on parle de grippage. La figure 1.28 présente un exemple de grippage qui s'est produit entre deux solides en acier inoxydable.

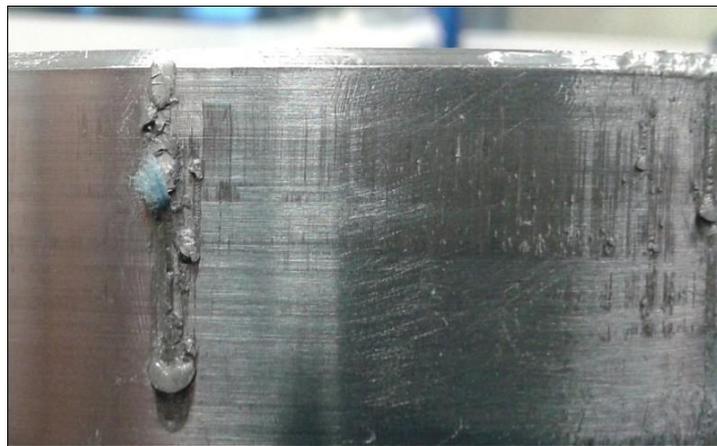


Fig.1.28. Exemple de grippage, manifestation sévère de l'usure adhésive [1]

1.5.1.2 Usure abrasive

L'usure abrasive est due au contact entre une particule et la surface d'un solide. Lors de son passage dans le contact, cette particule peut enlever de la matière selon quatre modes d'enlèvement de matières (Figure 1.29). Elle peut :

- couper, si elle est suffisamment aiguisée
- repousser la matière en surface.
- provoquer une fracture, si le solide est fragile.
- enlever des grains, si le matériau est suffisamment homogène.

Ces deux derniers modes se produisent plus rarement que les deux premiers. La nature de l'usure abrasive est aussi déterminée par le mode d'acheminement des

particules dans le contact. Si les particules sont fixées à l'une des deux surfaces, il s'agit d'abrasion à deux corps. Si les particules sont libres de rouler ou de glisser par rapport aux deux surfaces, on parle alors de l'abrasion à trois corps.

L'usure abrasive implique donc un déplacement de matière par labourage d'au moins une des surfaces en contact. Ce mécanisme est important, que ce soit lorsqu'un matériau rugueux et dur glisse sur un matériau mou, ou lorsque des poudres sont présentes dans le contact des deux solides. Les cicatrices d'usure sont, dans les deux cas, constituées de sillons longilignes dirigés dans le sens du glissement.

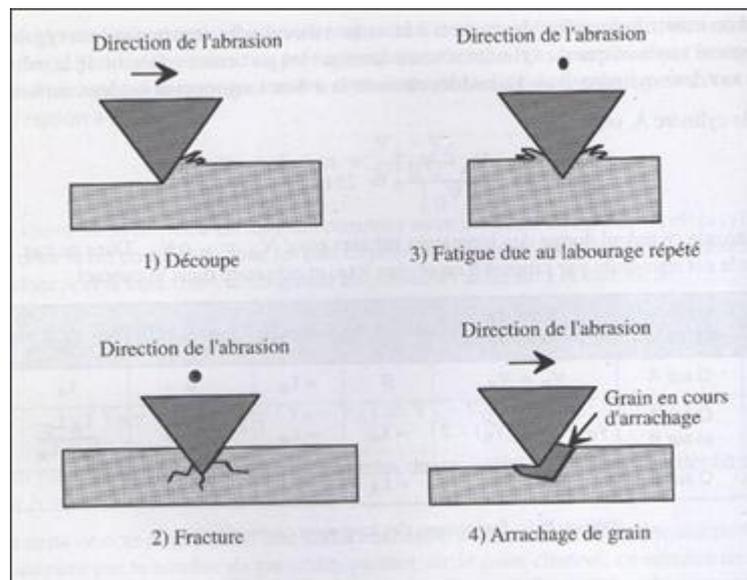


Fig.1.29. Les quatre modes d'usure abrasive [6]

1.5.2 Mesure de l'usure

L'usure est généralement mesurée au cours d'un test de frottement sur un tribomètre. Des techniques simples de mesure d'usure permettent d'évaluer la quantité de matière enlevée

- Pesée : pesée de l'échantillon avant et après le test de frottement au moyen d'une balance de précision.
- Mesure de cote : Mesure de la variation de longueur d'un échantillon avant et après le test de frottement, dans le cas d'une usure uniformément répartie.
- Mesure du volume usé : Mesure de topographie avant et après test pour évaluer le volume enlevé pour créer la piste d'usure.

Les outils de mesure de topographie de surface, permettent d'évaluer les hauteurs d'une surface après usure comme sur les exemples de la figure 1.31.

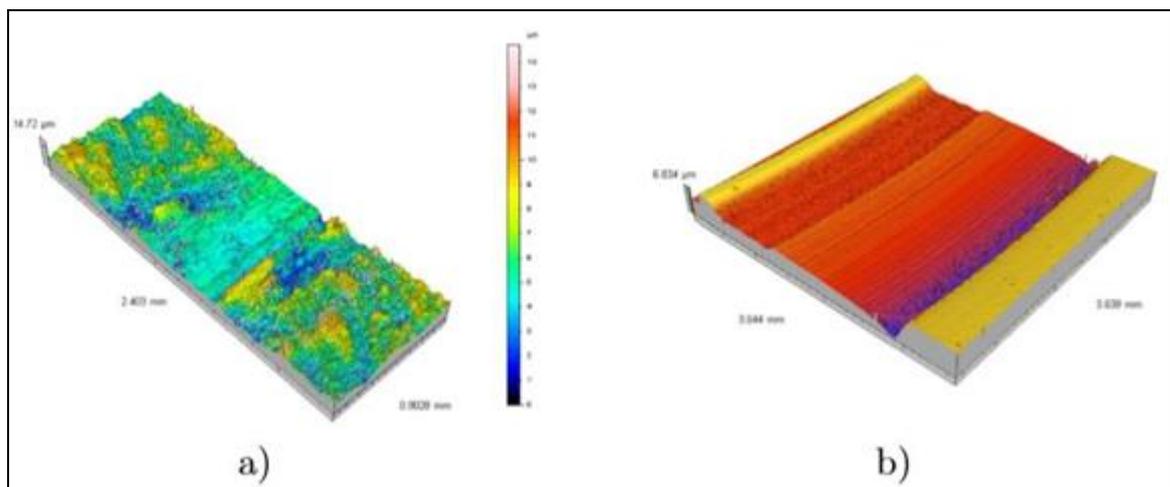


Fig.1.30. Exemples de piste d'usure a) Piste en acier après frottement avec un pion en acier. b) Piste d'une garniture mécanique après frottement [1]

Il est ensuite possible de tracer des profils à différents endroits pour mesurer l'aire de la piste d'usure puis le volume de matière enlevée (figure 1.31). Notons qu'on peut aussi observer une augmentation de volume ou de masse en raison des transferts de matière dus à l'adhésion. Il est alors difficile de mesurer effectivement l'usure.

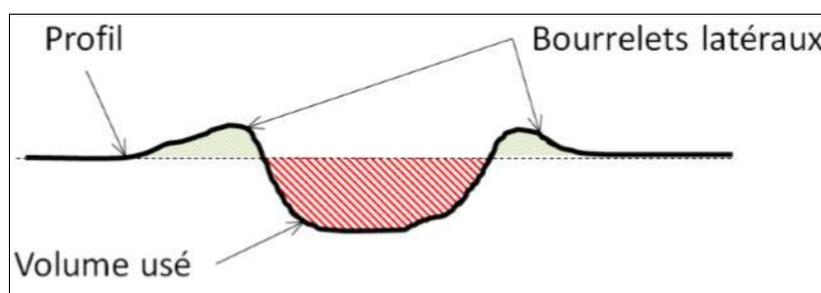


Fig.1.31. Mesure du volume d'usure

En mesurant le volume de matière usée à différents instants au cours d'un test tribologique, il est possible d'évaluer le coefficient d'usure K . Le tableau 1.9 donne des valeurs indicatives pour des couples de matériaux usuels. Ces valeurs sont à utiliser avec précaution car elles peuvent varier de façon notable suivant les conditions de fonctionnement.

Tableau 1.7. Valeurs indicatives de coefficients de coefficient d'usure K de matériaux usuels en frottement à sec.

Matériaux	K ($mm^3/N.m$)
Métal / Métal	$10^{-3} - 10^{-4}$
Polymère / Métal	$10^{-4} - 10^{-5}$
Composites+lubrifiant solides / Métal	$10^{-5} - 10^{-7}$
Garniture de frein / Métal	$10^{-4} - 10^{-5}$

1.6 Usure en tribofinition

1.6.1 Contact d'hertz

Lorsqu'on presse une sphère « dure » sur un plan constitué d'un matériau « mou », on constate une déformation localisée autour du point théorique de contact, ainsi qu'une augmentation de la surface réelle de contact (Figure 1.39).

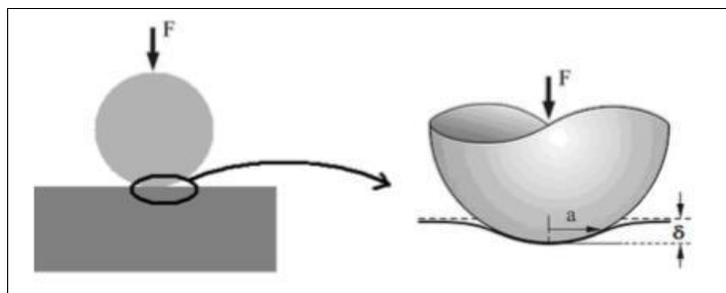


Fig.1.32. Déformation locale

- **Hypothèses du contact d'Hertz**

- Solides massifs : les déformations sont négligeables en dehors de la zone de contact.
- Déformations élastiques (réversibles).
- Pas de frottement au contact (pas d'effort tangentiel).
- Pas de mouvement relatif entre les deux solides.

- **Zone de contact**

- La Figure 1.32 indique le comportement observé pour un contact nominal ponctuel et convexe entre deux solides quelconques. Deux éléments sont observables et mesurables :

- Une surface de contact elliptique et orientée d'une façon particulière, nouvel élément géométrique définissant le contact sous charge (dans le plan π , définie par a , b et ϕ).
- Le rapprochement de deux points de référence (pris sur chacun des solides dans les zones de déformation négligeable) : $\delta = AB - A'B'$.

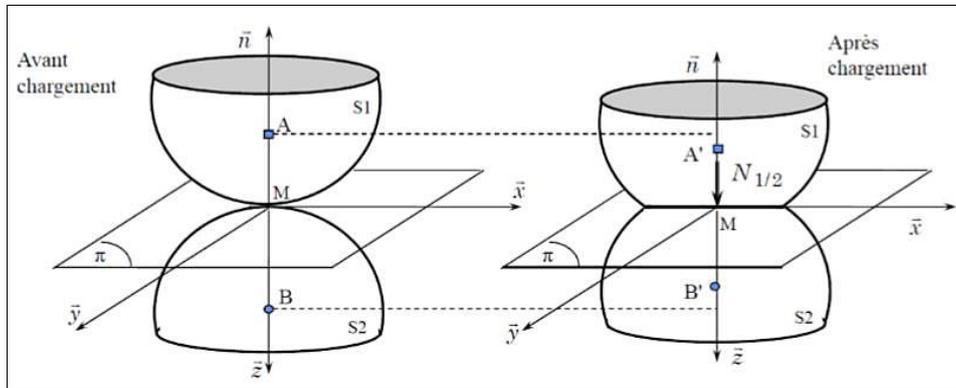


Fig.1.33. Modélisation des déformations

La nature et les dimensions géométriques du contact sous charge ayant été établi, il est facile de calculer une pression moyenne de contact. Si cette dernière peut paraître suffisante pour une approche des conditions de résistance mécanique elle ne le sera en réalité que si la pression varie peu sur la totalité de la surface de contact, le calcul de résistance de la matière devant être local pour être validé.

Des essais complémentaires permettent de mettre en évidence que la répartition de pression se fait suivant un ellipsoïde (voir Figures 1.41 et 1.42).

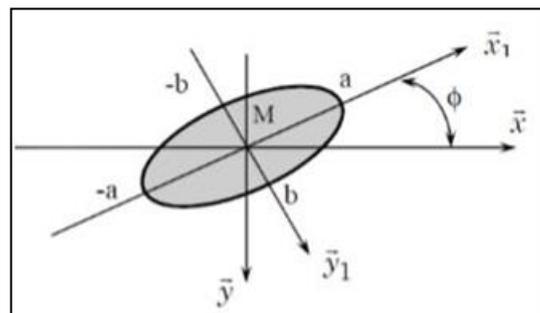


Fig.1.34. Zone de contact

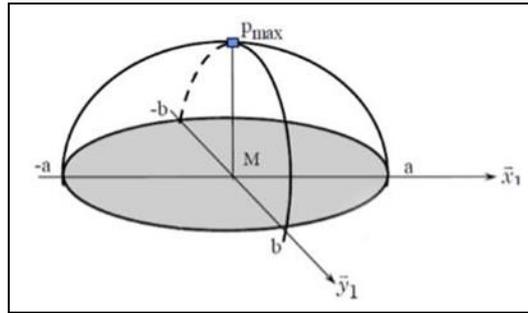


Fig.1.35. Répartition de pression (ellipsoïde)

On détermine alors la pression de contact moyenne :

$$p_{moy} = \frac{N_{1 \rightarrow 2}}{\pi ab} \quad (1.22)$$

Et la pression maximale:

$$p_{max} = \frac{3}{2} p_{moy} \quad (1.23)$$

1.6.2 Taux d'usure

Pour le traitement mécanique de surface par tribofinition et en particulier les centrifugeuses à fond tournant le taux d'usure de l'environnement de travail se calcul par la relation empirique suivante :

$$j_a = C_\omega^{b1} Q_p^{b2} d^3 K_v^{b4} K_w^{b5} G^{b6} HB^{b7} \quad (1.24)$$

Ou :

j_a : Taux d'usure en %/h,

C_ω : Vitesse de rotation en rad/s,

φ_p : Degré de remplissage de la chambre de travail,

d : Granulométrie de l'environnement de travail en mm,

K_v : Rapport entre le volume des pièces et la charge abrasive,

K_w : Rapport entre le volume du fluide et la charge abrasive,

G : Masse de la pièce à traiter,

HB : Dureté de la pièce,

$b_1 \dots b_7$: Coefficient constant, exposants déterminés expérimentalement.

1.6.3 Volume enlevé

L'enlèvement de matière est considéré comme un processus de glissement d'un matériau solide sur la surface d'un matériau tendre, avec frottement semi-liquide, ce qui signifie frottement des corps en présence d'un liquide qui ne sépare pas complètement les surfaces en contact. Dans ce cas, la formule de calcul du volume de matériau enlevé de la surface molle au cours de l'usure est la suivante :

$$V = k\alpha \frac{LF_n}{\sigma_T} \quad (1.25)$$

V: Volume de la matière enlevée de la surface molle pendant l'usure.

k: Coefficient d'usure (coefficient d'Archard).

α : Coefficient prenant en compte la présence de contact liquide.

L: Trajectoire de descente.

F_n : Force normale.

σ_T : Limite élastique du matériau.

1.6.4 Conclusion

L'usure est un phénomène qui est due principalement au frottement, ce dernier provoque l'altération dimensionnelle des pièces, augmentation des jeux de fonctionnement, dégradation des caractéristiques superficielles, ce qui nous oblige à changer régulièrement certain pièces dans l'industrie en générale, cependant dans le domaine de la tribofinition, l'usure est utilisé dans le bon sens, elle permet de traiter les pièces et de modifier leurs caractéristiques et d'obtenir des bon états de surfaces et améliore la résistance à l'usure. Nous avons vu dans ce chapitre le mécanisme de frottement, ses contributions adhésive et plastique, ses différents cas ainsi que la mesure de frottement. Nous avons vu également le mécanisme d'usure, l'usure adhésive et abrasive, la mesure de l'usure et finalement l'usure en tribofinition pour le cas des centrifugeuses à fond tournant

Chapitre 2

Traitement par tribofinition

2.1 Introduction

La tribofinition est un procédé de traitement mécano-chimique de finition qui a pour but d'enlever les petites particules du métal et ses oxydes, les pièces traitées reçoivent un grand nombre de micro-coups sous différents angles suite aux vibrations à basse fréquence qui contribue à l'amélioration de l'état de surface, l'élimination de la bavure, arrondissement des angles vifs et enlèvement de la calamine sur la couche superficielle des pièces ce qui engendre un changement des paramètres géométriques et physico-mécaniques.

Le résultat obtenu (par exemple. nettoyage, décapage, ébavurage, rayonnage, polissage, effet mat) est dû aux frottements entre les pièces et le mélange abrasif, et dépend du type d'équipement utilisé, de la composition du mélange abrasif, des paramètres de vitesse et de la durée de l'opération.

2.2 Traitement par tribofinition

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

L'additif chimique rajouté au fluide sert au traitement chimique de la surface ainsi il sert au refroidissement des pièces et à l'extraction des produits d'usure qui se

situent sur la surface des pièces et des particules du milieu actif, mais le rôle le plus important assuré par l'additif chimique est le réglage d'intensité du traitement surface par son niveau dans la chambre de travail.

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

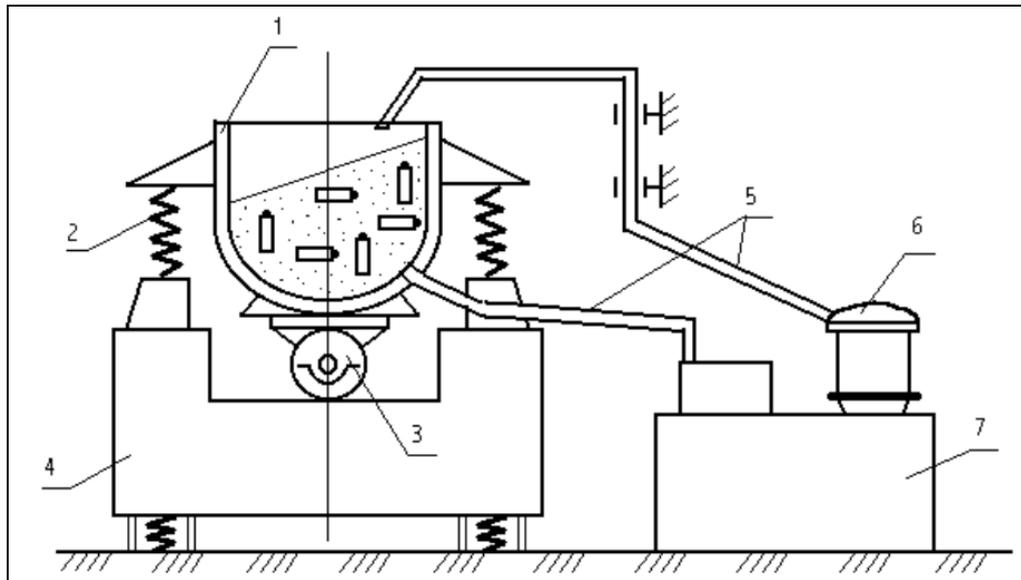


Fig.2.1. Schéma d'un vibreur du traitement par tribofinition [10]

Tableau.2.1. éléments d'un vibreur [10]	
1	Chambre de travail
2	Élément élastique (ressort spiral)
3	Vibreur
4	Base (fondation)
5	Tube pour le fluide (eau et l'additif chimique) et pour épanchement
6	Pompe
7	Réservoir de vidange

2.3 Paramètres du traitement par tribofinition

Plusieurs paramètres physicochimiques influent sur le traitement par tribofinition :

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

2.4 Les milieux actifs (abrasifs):

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



Fig.2.2. Quelques médias abrasifs

2.5 Equipements de tribofinition

Le choix des différents équipements de tribofinition dépend de plusieurs paramètres, par exemple on a :

- Dimensions des pièces à traiter,
- Forme géométrique des pièces à traiter,
- Matériaux des pièces à traiter,
- Rugosité demandée,
- Dureté demandé.

2.5.1 Différents types de vibrateurs

2.5.1.1 Vibrateurs linéaires

Les vibrateurs linéaires sont des machines de finition de surface conçus pour une utilisation particulière. Ils sont principalement adaptés à des traitements de pièces lourdes et de grandes dimensions.

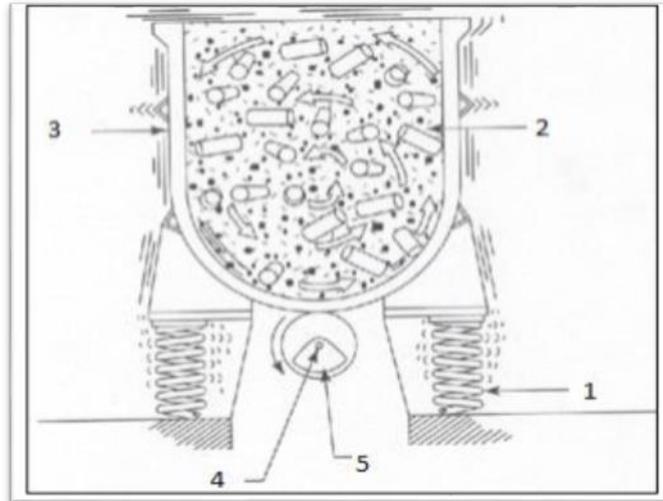


Fig.2.3.Vibreur linéaire [9]

Avec :

1-Ressorts ; 2-Médias et additifs chimiques ; 3-Chambre de travail ; 4-Moteur ; 5-Balourd.

- **Domaine d'application des vibreurs linéaires :**

- Les vibreurs linéaires sont principalement adaptés pour tous les types de traitement de Tribofinition, tels que l'ébavurage, le dégraissage, le rayonnage, le polissage, le lissage, le décapage et le brillantage de pièces moulées et forgées.
- Il y a une possibilité de séparer les pièces par des cloisons amovibles dans le cas où plusieurs types de médias et différents types de matériaux sont utilisés.
- Les vibreurs linéaires sont entraînés par un moteur balourdé en position horizontale, les médias et les pièces sont chargés dans la cuve de travail dans une action linéaire rotative, il y a une possibilité d'effectuer un traitement pièces contre pièces sans médias, ou pièces contre pièces avec médias, ou pièces contre pièces avec médias et additifs chimiques.

- **Les éléments d'un vibreur linéaire**

- **La chambre de travail :** est l'endroit où l'opération s'effectue (3 sur la figure II.1), elle est généralement en forme U. Elle est composée de cloisons séparatrices, Système de distribution des lubrifiants (eau + additifs), des plots amortisseurs pour éviter la transmission des vibrations aux autres éléments, porte de vidage des abrasifs et une bande en polyuréthane sur les parois qui sert à éviter d'abimer les pièces traitées.

- **Moteur** : Les vibreurs linéaires sont équipés de différents types de moteurs à balourd (4 et 5 sur la figure III.1) pour générer des vibrations, ces moteurs sont positionnés horizontalement.
- **Bâti de la machine** : Tous les bâtis des machines sont en construction mécano-soudés parfaitement rigide. Le Concept des ressorts spéciaux hélicoïdaux permet à la cuve de traitement d'être parfaitement Isolée du bâti de la machine, des trappes de visite larges et accessibles facilitent les réglages et la maintenance. Des Patins anti-vibratiles minimisent la transmission des vibrations.
- **Armoire Electrique** : L'armoire électrique est composée de :
 1. Bouton pour allumer et éteindre la machine
 2. Réglage de la variation de vitesse du moteur
 3. Réglage de la variation de fréquence

- **Principe de fonctionnement**

Pour les vibreurs linéaires, les pièces à traiter sont chargées dans la chambre de travail avec les médias et les additifs chimiques. Un moteur balourdé en position horizontale génère des vibrations transféré vers cette chambre ce qui agite les médias et les pièces à traiter dans le sens de rotation du moteur.

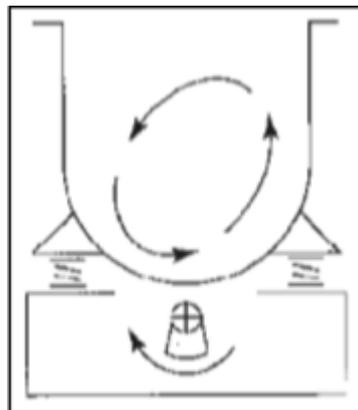


Fig.2.4. Principe de fonctionnement d'un vibreur linéaire [9]

- **Types de vibreur linéaire**

1. **Les vibreurs linéaires type TU**

Les vibreurs linéaires type TU sont conçus pour des traitements doux, une motorisation unique fixée sur le côté de la cuve transmet le mouvement sur la série de groupes balourdés espacés sur toute la longueur de la cuve de travail.

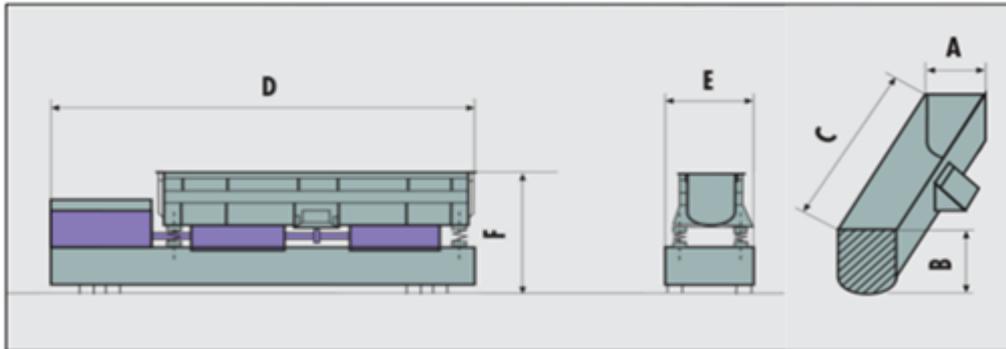


Fig.2.5. Vibreur linéaire de type TU [10]

2. Les vibreurs linéaires économiques type TE

Les vibreurs linéaires type TE, le moteur est fixé sous la cuve. Ce concept de motorisation permet une construction compacte et de faible encombrement.

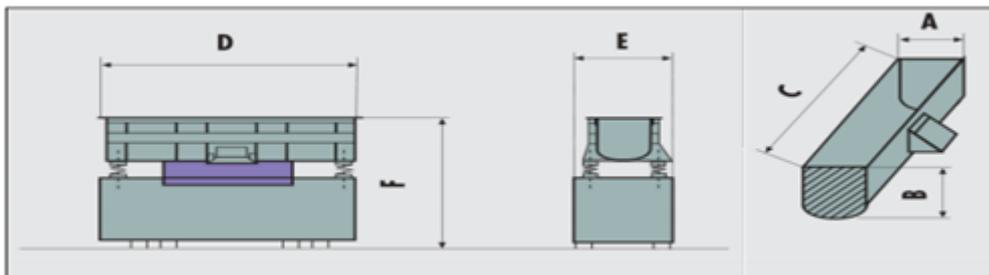


Fig.2.6. Vibreur linéaire de type TE [10]

3. Vibreurs linéaires type TS-D

Les vibreurs linéaires de type TS-D sont équipés de 2 moteurs qui exercent, montés sur les côtés de la cuve de travail.

Le concept est particulièrement puissant, de faible encombrement et très flexible.

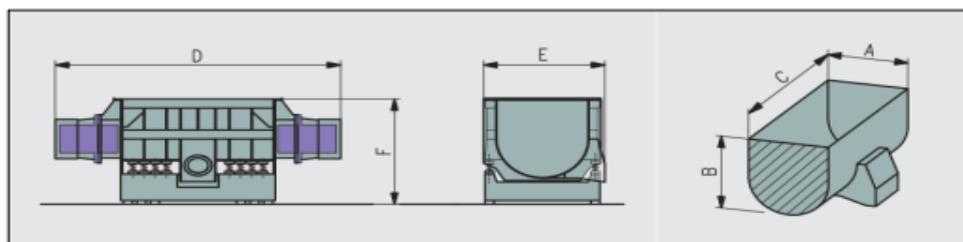


Fig.2.7. Vibreur linéaire de type TS-D [10]

4. Vibrateurs linéaires type TS

Les vibrateurs linéaires type TS sont entraînés par 2 groupes balourdés fixés sur le côté de la chambre de travail. Le moteur et le groupe balourdé sont assemblés par des accouplements particuliers adaptés aux vibrations, ce qui permet une alternance idéale et équilibrée de la charge dans la cuve de travail.

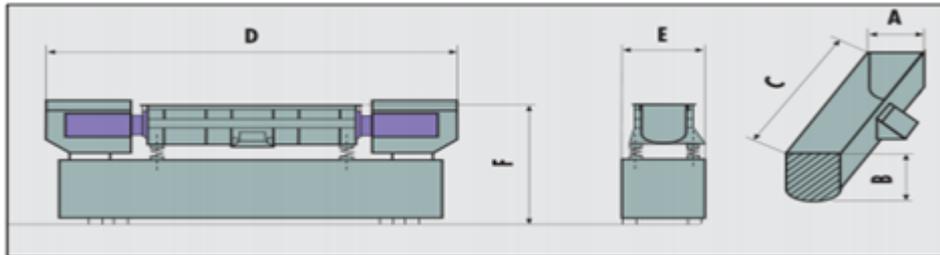


Fig.2.8. Vibrateur linéaire de type TS [10]

2.5.1.2 Vibrateurs circulaires

Les vibrateurs circulaires sont des machines de finition de surface conçus pour une utilisation particulière à titre d'exemple l'ébavurage, polissage et autres.

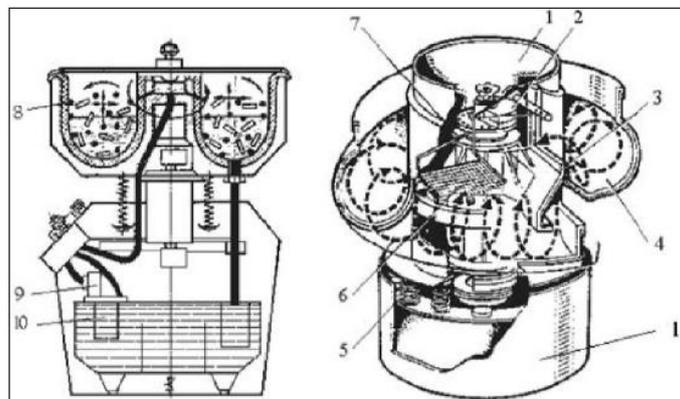


Fig.2.9. Schéma d'un vibrateur circulaire [10]

Avec :

1 : Suspension de la cuve de traitement, 2 : Vibrateur (les balourds), 3 : Porte de vidage des abrasifs, 4 : Cuve de traitement, 5 : Amortisseur, 6 : Tamis de séparation intégré, 7 : Moteur, 8 : Revêtement, 9 : Pompe, 10 : Porte de vidage.

- **Domaines d'application**

Les vibreurs circulaires sont des machines adaptées pour des traitements de surface de pièces provenant d'emboutissage, fonderie, formage, forge, usinage, pour de opérations de :

- Ébavurage.
- Ebarbage.
- Rayonnage.
- Nettoyage.
- Décalaminage.
- Polissage.

Plusieurs matières peuvent être traitées (métaux ferreux et non ferreux, plastique, céramique, caoutchouc, bois, pierre et verre) avec petite et grandes dimensions tout en obtenant des résultats satisfaisants.

- **Éléments du vibreur circulaire**

1. **Chambre de travail** : La chambre de travail est sous forme circulaire avec un fond plat pour une meilleure immersion de la charge abrasive.
Une pompe est installée afin d'arroser les éléments en contact (pièces médias) avec de l'eau et d'additif chimique.
La chambre de travail est recouverte d'un revêtement en polyuréthane pour une raison d'éviter la détérioration des pièces traitées.
2. **Séparateur** : Le vibreur circulaire est équipé d'un tamis de séparation pour lequel les médias et les pièces sont acheminés vers lui.
Les médias tombent à travers le tamis puis sont réacheminés dans la cuve de travail alors que les pièces sont dirigées vers la sortie.
3. **Moteur** : Contrairement aux vibreurs linéaires, les vibreurs circulaires sont équipés d'une motorisation positionnée verticalement
4. **Armoire électrique** : Une armoire électrique est installée dans le but contrôler les paramètres et le fonctionnement de la machine (mise en marche et arrêt, variation de la fréquence).

- **Principe de fonctionnement**

La Tribofinition s'effectue dans une cuve de traitement montée sur ressorts hélicoïdaux. Un moto-vibreur spécial monté au centre de la cuve fournit l'énergie nécessaire à la vibration. Les pièces et médias (abrasifs), auxquels sont ajoutés l'eau et un additif chimique (savon), sont brassés dans la cuve. Les vibreurs circulaires sont souvent équipés de tamis de séparation et de trappe pneumatique pour assurer la séparation des

pièces et médias. Tandis que les pièces sont transférées via le tamis de séparation à l'extérieur du vibreur pour être ensuite, par exemple, séchées dans un sécheur circulaire, les médias restants retournent dans la cuve de traitement.

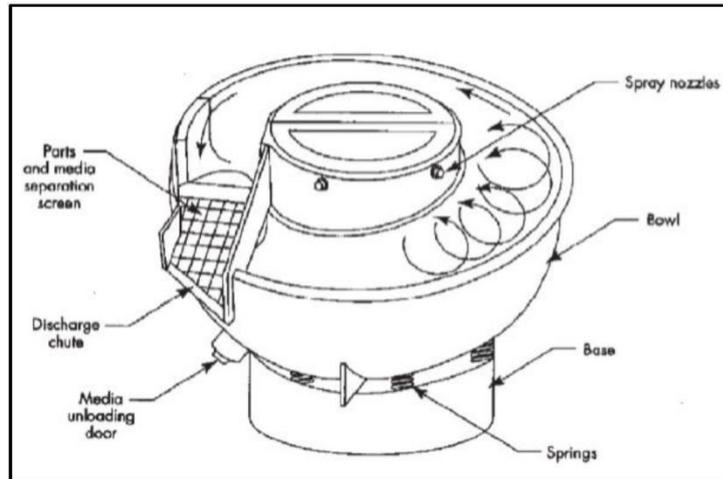


Fig.2.10. Principe de fonctionnement d'un vibreur circulaire [10]

- **Types de vibreurs circulaires**

1. **Les vibreurs circulaires à grand rayon**

Les vibreurs circulaires à grand rayon ont la possibilité d'être utilisés dans un système de production en continu ou par charge, leur degré de flexibilité élevé offre des avantages pour une planification de production, ainsi que la de réduction des temps de traitement avec un coût plus économique, par ailleurs, ils nécessitent un faible encombrement au sol.



Fig.2.11. Vibreur circulaire à grand rayon.

2. Vibrateurs circulaires hélicoïdaux

Le traitement est accompli dans une cuve sous forme hélicoïdale montée sur un ressort hélicoïdal, à l'aide d'une commande de mise en marche et d'arrêt. Un moteur électrique monté en bas de la base de la machine, le moteur fournit de l'énergie à l'arbre qui est fixé sur les balourds qui permet à la machine de vibrer. Ce type de machine est utilisé dans les machines à installation continue.

Il existe d'autres types :

- Les vibrateurs circulaires «EC » sont les plus proposés grâce à la conception spéciale de la cuve de travail qui a un fond incliné qui permet le traitement et la séparation des petites et grandes pièces. Ils sont idéalement adaptés pour la finition de pièces fragiles.
- Les vibrateurs circulaires « Euro » sont idéals pour les traitements de finition automatiques et ils sont caractérisés par une cuve torique spiralée avec une trappe de séparation automatique intégrée.
- Les vibrateurs circulaires « A » ont été spécialement conçus pour le traitement de pièces pouvant être séparées magnétiquement grâce à un séparateur magnétique et une cuve de travail, renforcée et spéciale.
- Les vibrateurs circulaires « R » sont des machines toriques à fond plat destinées au traitement des pièces lourdes et/ou fragiles. Leur fond plat assure une parfaite immersion des pièces dans les abrasifs.

Pour les pièces devant être traitées séparément, il est possible d'adapter des cloisons mobiles. Les pièces traitées sont généralement retirées manuellement. Une porte permet le vidage complet de la cuve de travail et une séparation externe des pièces et médias. [10]

2.5.1.3 Machine à force centrifuge

Les machines à force centrifuge prennent une importance de plus en plus dans la finition de surface car ces vibrateurs permettent d'atteindre des gains de temps dans un ratio de 3 à 10 par rapport à une application similaire dans un autre vibrateur.

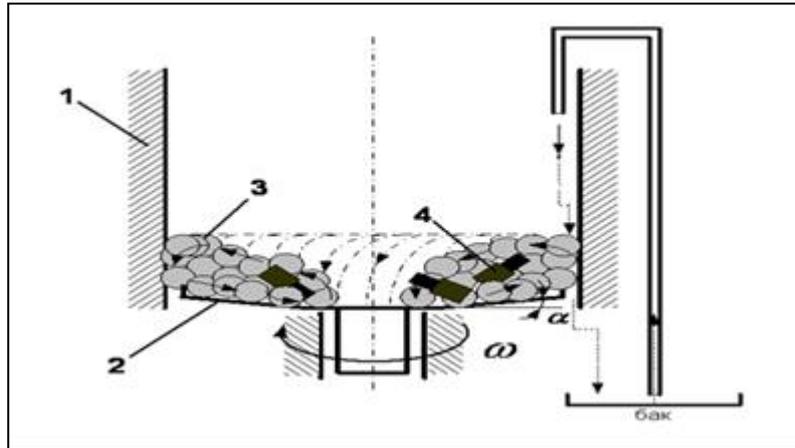


Fig.2.12. schéma d'une machine à force centrifuge

Avec :

1 : chambre de travail (partie supérieure fixe)

2 : fond incliné avec l'angle α (partie mobile) en rotation avec une vitesse ω

3 : les médias

4 : les pièces à traité

- **Domaine d'application**

Les techniques d'ébavurage, rayonnage, polissage de pièces en acier forgé, en fonte ou usinées, utilisent la vitesse de la force centrifuge, ce type de machine permet des temps de traitement très courts et un haut niveau d'automatisation.

Les possibilités d'utilisation de ce système sont très variées qu'il s'agisse du traitement de disques intercalaires légèrement déformables d'une épaisseur de 0,2 mm ou bien de pignons pouvant mesurer jusqu'à 150 mm de diamètre. [10]

- **Fonctionnement de la machine centrifugeuse**

Le spinner ou l'assiette tourne dans une cuve de travail cylindrique fixe et Grâce à la force centrifuge, les pièces et médias sont brassés dans un mouvement toroïdal de l'intérieur vers l'extérieur et vers le haut des parois de la cuve, les parois fixes de la cuve ralentissent cette charge jusqu'à ce que la force centrifuge la rapporte à nouveau vers le centre du spinner et ainsi de suite, la diversité des opérations de traitement possible dépend de la vitesse de rotation du spinner et du niveau d'eau réglable pour le polissage ou l'ébavurage intensif. [10]

2.5.1.4 Machine multibroches type Smuritropie

Les machines à broches (multi broches / mono broche) peuvent être utilisées pour la finition de pièces fragiles de valeur et qui ne doivent pas s'entrechoquer durant le traitement. Exemples de pièces:

- Disques de turbines
- Aubes
- Implants médicaux
- Poignées de portes de valeur

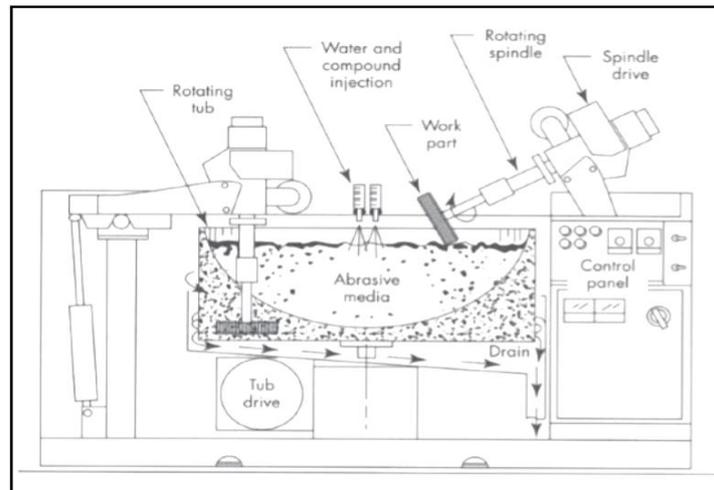


Fig.2.13. Machines à broches [9]

- **Principe de fonctionnement**

Dans les machines à broche (figure 2.14), les pièces sont fixées à une broche circulaire tournant à grande vitesse puis immergées dans la cuve de travail chargée de média de polissage. La broche n'est pas limitée à une action rotative. En complément, une oscillation verticale et un mouvement épicycloïdal peuvent être utilisés pour renforcer l'action de polissage.



Fig.2.14. Fonctionnement d'une machines à broche [11]

2.5.2 Médias et abrasifs

Le terme «médias» désigne les éléments abrasifs ou non abrasifs utilisés dans les processus de tribofinition. La fonction principale des médias est d'abraser ou de brunir les surfaces des pièces pour obtenir la finition souhaitée, ils permettent de réaliser des opérations d'ébavurage ou de polissage et d'apporter un traitement à la fois uniforme et constant. Ils peuvent aussi rendre des surfaces lisses et brillantes.

Il en existe plusieurs types, ils diffèrent par leurs compositions, leurs degrés d'abrasion, leurs formes et leurs dimensions, qui peuvent être choisis en fonction du travail à effectuer et du résultat souhaité.

2.5.2.1 Paramètres de choix des médias abrasifs

Le choix des médias abrasifs joue un rôle important pour l'obtention du résultat escompté, Les principaux facteurs de sélection sont :

- **Composition du media**

La composition de l'abrasif détermine son pouvoir de coupe ainsi que l'état de surface de la pièce, les médias avec des capacités de coupe agressives est généralement le meilleur pour le retrait des grandes bavures, les exigences pour les finitions de surface lisses nécessitent l'utilisation des médias de coupe plus lents avec des abrasifs fins ou sans abrasion, les médias plus durs peuvent généralement être utilisés dans les méthodes à haute énergie de tribofinition.

- **Forme du media**

La forme de la pièce à ébavurer détermine la forme de l'abrasif nécessaire. La parfaite adaptation entre l'abrasif et la pièce permet de s'assurer que toutes les surfaces sont traitées uniformément et que l'abrasif ne coince pas, la forme de l'abrasif influence également le pouvoir de coupe, les formes angulaires et à arêtes vives sont plus agressives que les formes arrondies.

- **Taille du media**

La taille des médias utilisés est importante pour plusieurs raisons. Une fonction de taille est d'aider à garder les pièces séparées pendant la finition, Les petits médias permettent de séparer les petites pièces. D'autre part, les médias importants coupent plus rapidement et produisent une finition plus rugueuse que les petits médias, pour le choix de la taille des particules, il est nécessaire de prendre en

compte les dimensions de la pièce à traiter (forme, rainure, trou,...). La taille des particules d'abrasif ne doit pas être supérieure aux trous de la pièce.

- Poids des médias

Le poids est un facteur clés du pouvoir de coupe et un ensemble donné de conditions de fonctionnement, un média lourd exerce plus de pression sur la partie qu'un média léger, ce poids permet une coupe plus rapide, mais il provoque également une déformation des parties minces ou ductiles, les médias lourds plus lisses fournissent un meilleur polissage que les médias légers.

Le tableau suivant présente quelques exemples des particules utilisées dans le milieu actif pour les différentes opérations :

Tableau.2.2 Exemples des particules utilisées dans le milieu actif pour les différentes opérations		
N°	La composition du matériau	Domaine d'utilisation
1	Granule d'abrasif	L'ébavurage, l'arrondissement des angles vifs, rectifications des surfaces
2	Granule d'abrasif en polymère	Le polissage, opération de finissage de surface
3	Granule d'abrasif en céramique	Ebavurage, lissage sur tous les alliages ferreux
4	Granule en résine	Nettoyage des pièces de la saleté
5	Les billes en porcelaine (Ø6- 10 mm)	L'ébavurage léger, l'arrondissement des angles vifs, polissage
6	Les billes en acier traité	Polissage, durcissement superficiel, opération des stabilisations
7	Les billes en verre (Ø2- 14 mm)	Polissage des matériaux ferriaux et non ferriaux, rectification des pièces en alliage à base de cuivre
8	Bakélite	Nettoyage des déchets, l'ébavurage, l'arrondissement des angles vifs

Les médias possèdent deux caractéristiques importantes :

- ✓ La dureté qui leur permet d'attaquer des matériaux plus tendres.
- ✓ La taille des grains qui engendre l'état de surface final (la rugosité).

La déformation superficielle de la surface sous l'action de la particule abrasive dépend de plusieurs variables :

- La nature des matériaux antagonistes (outil/pièce),
- La forme, la taille et l'orientation de l'outil (Media abrasif),
- Les forces agissant sur l'outil (abrasif, force centrifuge...),
- Les trajectoires et vitesses imposées,
- La nature de l'interface outil/pièce.

2.5.2.2 Différentes formes des médias

Tableau 2.3 Utilité des formes des médias utilisés en tribofinition		
Forme	Utilité	Présentation
Conique	Le média de forme conique est très polyvalent. Il permet de pénétrer partiellement dans des trous de différents diamètres sans problèmes de logement.	
Triangulaire	Les médias de forme triangulaire permettent une action uniforme et sont efficaces pour atteindre les coins, les fentes, les trous ou ouvertures.	

<p>Cylindrique</p>	<p>Avec ses extrémités coupées à des angles de 22 à 60 °, les médias de formes cylindriques atteignent plus facilement les renforcements et conviennent parfaitement à l'ébavurage de trous et des contours.</p>	
<p>Sphérique</p>	<p>Les médias de forme sphérique ont un bon écoulement et un bon contact avec la surface. Il est utile lisser uniformément les surfaces.</p>	
<p>Diamant</p>	<p>Les médias en forme de diamant possèdent des pointes acérées pouvant pénétrer dans les coins, les fentes et les renforcements sans problèmes de logement.</p>	

Il existe d'autres formes qui ne sont pas décrites dans le *Tableau III.2* et qui sont montré sur la figure qui suit :

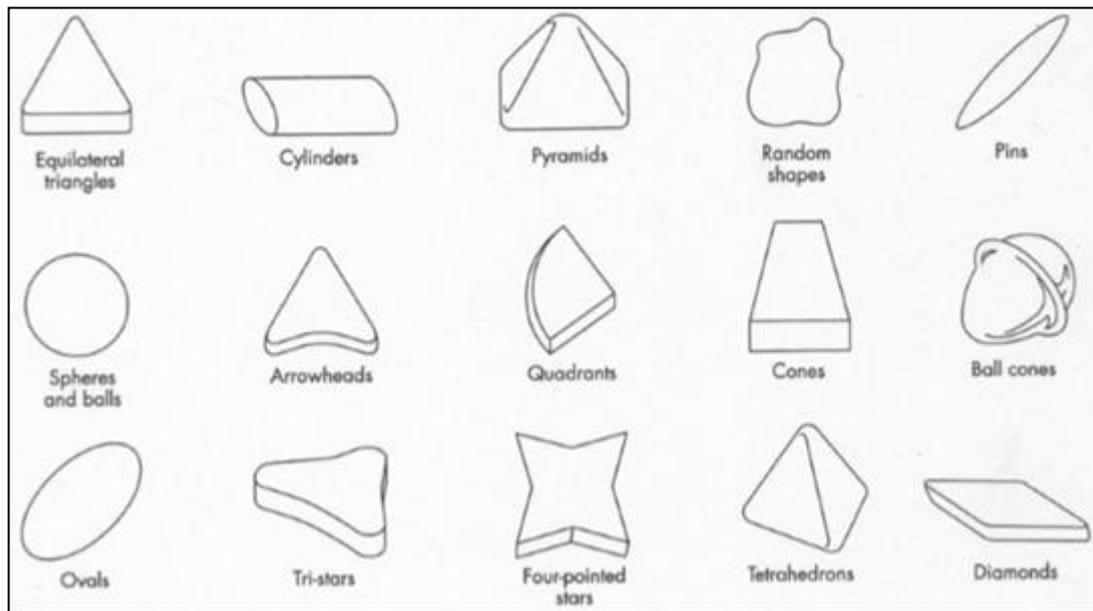


Fig.2.15. Formes des médias utilisés pour tribofinition [9]

2.5.2.3 Différents matériaux de media

- **Médias naturels**

Les pierres concassées, écrasées et classées étaient les premiers médias de tribofinition, Ils ont été remplacés parce que les pierres naturelles sont plus douces, user plus rapidement, Sont moins cohérent et ne se produisent que dans des formes aléatoires.



Fig.2.16. Médias naturels

- **Médias préformés**

Le développement de la forme, de la taille et des caractéristiques d'abrasion et de finition des médias contrôlés a été largement responsable de mettre la tribofinition un processus de précision. Les médias préformés sont disponibles en:

- **Céramiques** : Les médias céramiques ont une masse volumique de 1.6 g/cm^3 , ils ont une capacité de découpage plus haute que celle des médias équivalents en plastiques, largement utilisés dans l'ébavurage et le découpage, la céramique est

trop dure et peut endommager des métaux plus mous, leur rigidité, dureté et densité peuvent également s'humilier aux bavures causant des cycles plus longs sur quelques pièces.



Fig.2.17. Médias en céramique

- **Plastiques** : les médias en plastique ont un poids plus léger avec une densité volumique de 0.8 à 1.2 g/cm³, ils peuvent découper les bavures sans les lisser, et peuvent également développer des finitions exceptionnelles. Le media plastique peut être utilisé chaque fois que la géométrie, les cotes et l'état de surface des pièces ne doivent pas être modifiés. Le plastique nettoie, ne polit pas et il n'enlève ni la rouille, ni le tartre.



Fig.2.18. Médias en plastique

- **Porcelaines** : Les médias en porcelaine sont destinés à des opérations de polissage. Ils sont beaucoup plus durs que les céramiques conventionnelles utilisées pour l'ébavurage; leur durée de vie est également beaucoup plus longue. Ces médias de tribofinition en porcelaine peuvent être produits dans des dimensions très particulières



Fig.2.19. Médias en porcelaine

- **Médias métalliques**

Les media métalliques sont en acier, lourds de 4.8 g/cm^3 , préformé Sans abrasif, sont disponible dans une variété de formes et de tailles, ils ont utilisé principalement pour le polissage pour obtenir un lustre maximal à des fins décoratives, pour les applications d'ébavurage léger et pour le nettoyage lourd.

Les avantages incluent l'uniformité de la forme et de la taille, ils ne changent pas de dimensions, ils sont excellents dans les situations difficiles.



Fig.2.20. Media métallique

2.5.3 Additifs chimiques

Les additifs chimiques sont des produits chimiques qui se présentent sous trois formes, liquide, poudre et pâte. Ils sont utilisés dans le but d'améliorer la dureté et l'état de surface des pièces traités selon le besoin industriel.

Le choix de l'additif dépend des paramètres suivants :

- La qualité de surface souhaitée
- Le traitement de surface effectué

- Le matériau traité
- La température dans la chambre de travail
- La forme d'abrasif utilisé
- Le taux de pollution chimique de l'additif

2.5.3.1 Additifs chimiques liquides

Les additifs liquides sont utilisés dans la chambre du travail du vibreur d'une façon diluée, ils permettent d'améliorer le travail de la finition mécanique et de garder les propriétés des abrasifs sans les endommagés, il garde aussi les pièces propres ainsi le traitement de finition surfacique sera satisfaisant. [10]

C'est le type le moins polluant et le plus économique ce qui fait de lui le plus utilisé, il permet de :

- Refroidir les pièces traitées.
- Garder la surface des échantillons propres.
- Nettoyer les surfaces.
- Protection contre la corrosion.
- Le dérouillage des ferreux et le décapage.
- Brillantage des alliages cuivreux.



Fig.2.21. additifs liquides

Il existe trois types de fluides :

- Activateur chimique dans un milieu acide ($\text{PH} < 7$): il est destiné pour le nettoyage des pièces en acier, la destruction et l'enlèvement de la bavure et l'intensification du processus de traitement.

- Activateur chimique dans un milieu alcalin basic (PH>7): il est destiné pour l'enlèvement de la bavure, et aussi pour le polissage.
- Activateur chimique dans un milieu neutre (PH=7): il est destiné pour le nettoyage et le lavage et l'enlèvement des produits d'usure.

Dans ce tableau on introduit la composition de l'additif chimique recommandé pour différentes opérations :

Tableau.2.4 Composition de l'additif chimique recommandé pour différentes opérations. [13]				
N°	Composition des additifs chimiques	Symbole	Concentration	Domaine d'exploitation
1	Silicate de sodium	[Na ₂ SiO ₃]	20 - 30	Protéger les pièces de la corrosion, conservation de courte durée.
2	Hydroxyde de Sodium	[NaOH]	20	Protéger les pièces de la corrosion, conservation de courte durée
3	Carbonate de soude	[Na ₂ CO ₃]	20	Protéger les pièces de la corrosion, conservation de courte durée.
4	Nitrate de sodium	[NaNO ₃]	20 - 30	Nettoyage, décalaminage.
5	Hydrate d'oxyde de sodium	[Na ₂ O, H ₂ O]	15	Nettoyage des surfaces épaisses de la calamine.

6	Phosphate de Sodium	[Na ₂ PO ₄]	20 - 30	Nettoyage des surfaces épaisses de la calamine.
7	Soude à l'ammoniac	[NH ₃ , NaOH]	20 - 30	Nettoyage des surfaces épaisses de la calamine.
8	Perchlorure de fer	[FeCl ₃]	2 - 10	Assure une couleur éclatante pour l'état de surface
9	Polyacrylamides	$\left[\begin{array}{c} -CH_2 - CH - \\ \\ CONH_2 \end{array} \right]_n$	10	Assure la brillance du métal.
10	Silicate de sodium	[Na ₂ SiO ₃]	20 - 30	Protéger les pièces de la corrosion, Conservation de courte durée.

2.5.3.2 Additifs chimiques en poudre

Les additifs en poudres ont un rôle secondaire : on les utilise lorsque d'autres produits ne suffisent pas pour certaines opérations :

- Dégraissage massif.
- Procédés spéciaux de décapage et de décalaminage.
- Augmentation du pouvoir abrasif.
- Nettoyage des abrasifs.

Il existe aussi des poudres très fines dont la taille est de l'ordre de la dizaine de nanomètres, ces poudres permettent d'obtenir des résultats particulièrement intéressants lorsque l'on recherche un état de surface de très haute qualité.



Fig.2.22 additifs en poudre

2.5.3.3 Additifs chimiques en pâte

Les pâtes sont utilisées avec des médias en vibrateurs circulaires et machines à force centrifuge pour obtenir un état de surface lisse et très brillant (finition des surfaces sensibles).

Les produits en poudre sont la base de nos pâtes et en trouve plusieurs types qui se différencient avec le type de matériaux utilisés (Acier, Cuivre, Aluminium, Zinc...) et le travail à faire (Ébarbage, Ébavurage, Rayonnage, Superfinition, Brillantage, Polissage...).

Et parmi les différents types de pate on trouve :

- Pâte de polissage,
- Pâte d'ébavurage universelle,
- Pâte à effet légèrement abrasif,
- Pâte de polissage avec brillantage,
- Pâte de brillantage pour la finition de pièces pré-polies,
- Pâte légèrement abrasive ayant une bonne action de brillantage et de polissage,
- Pâte de polissage avec bonne capacité de brillantage,
- Produit spécial pour métaux non ferreux et précieux,
- Pâte d'ébavurage très et extrêmement mordante



Fig.2.23. additifs en pates

2.6 Conclusion

Dans la tribofinition, le choix de vibreur joue un rôle important pour l'obtention du résultat escompté et une finition attendue.

Ainsi, le choix des médias à un effet important sur la pièce, il est effectué en fonction de la taille, forme et matériaux des pièces à traiter.

Les additifs chimiques leurs choix se fait en fonction des objectifs fixes (Nettoyage, décalaminage, le brillantage) et l'environnement de travail (température, pollution, humidité, ...).

Chapitre 3

Plans d'expériences

3.1 Introduction

On nomme plan d'expériences la suite ordonnée d'essais d'une expérimentation, chacune permettant d'acquérir de nouvelles connaissances en contrôlant un ou plusieurs paramètres d'entrée pour obtenir des résultats validant un modèle avec une bonne économie (nombre d'essais le plus faible possible). Dans ce chapitre on va entamer la théorie et les fondements mathématiques derrière les plans d'expériences ainsi que les différents types des plans, nous allons expliquer et justifier notre choix du plan, et finalement présenter quelques outils statistiques pour évaluer notre modèle mathématique.

3.2 Terminologie

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

$$y = f(x_i)$$

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

3.2.1 Types de facteurs

Il existe plusieurs types de facteurs dont il faut les connaître pour bien interpréter les résultats. [14]

3.2.1.1 Facteurs continus

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

3.2.1.2 Facteurs discrets

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

3.2.1.3 Facteurs ordonnables

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

3.2.1.4 Facteurs booléens

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

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

3.2.2 Espace expérimentale

Pour bien présenter et expliquer un espace expérimental nous utiliserons un espace à deux dimensions, ce qui facilitera les représentations graphiques et peut nous introduire aux espaces multidimensionnels. Les facteurs continus sont représentés sur les axes gradués et orientés d'un repère orthogonale, soit alors un espace euclidien a deux dimensions, ce qu'on appelle un espace expérimental, dont chaque point du plan représente un essai ou une expérience dans l'espace expérimental. [14]

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

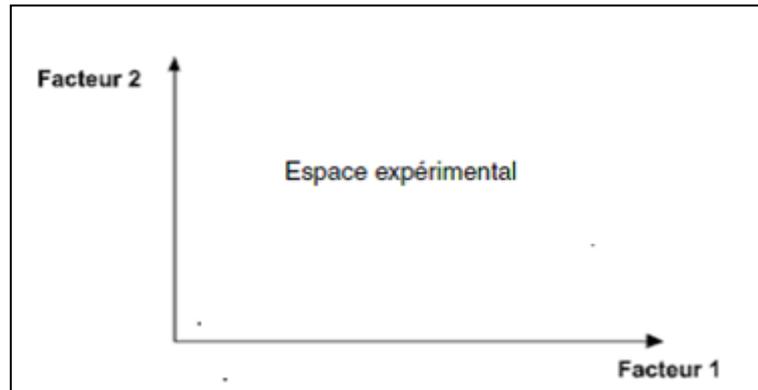


Fig.3.1. Espace expérimentale constitué par deux axes gradués et orientés [14]

3.2.3 Domaine d'un facteur

La valeur donnée à un facteur pour réaliser une expérience est appelée niveau, Les variations d'un facteur sont généralement limiter par une borne inférieure appelé niveau bas, et une borne supérieure appelée niveau haut. Ces niveaux sont définis de la part de l'expérimentateur en fonction des données de l'expérience, L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. [15]

Pour représenter les toutes les facteurs de la même façon, on indique le niveau haut par +1 et le niveau bas par -1, selon le degré du modèle on choisit le nombre des niveaux dans le domaine d'un facteur, soit deux niveaux pour un modèle linéaire, trois niveaux pour un modèle du second degré.

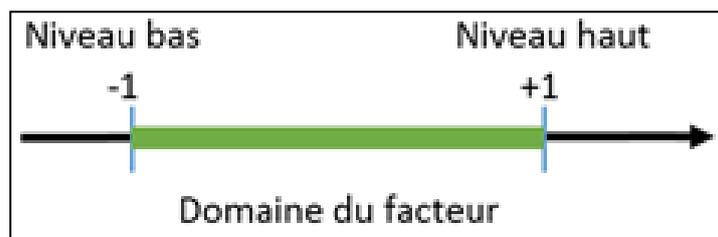


Fig.3.2. Domaine de variation d'un facteur [15]

3.2.4 Points expérimentaux

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

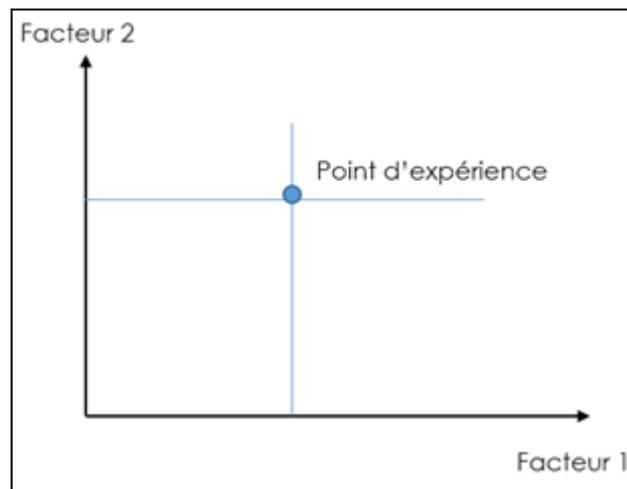


Fig.3.3. Un point expérimental [15]

3.3 Domaine d'étude

Dans la pratique, l'expérimentateur sélectionne une partie de l'espace expérimental pour réaliser son étude. Cette zone particulière de l'espace expérimental est le domaine d'étude. [15]

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

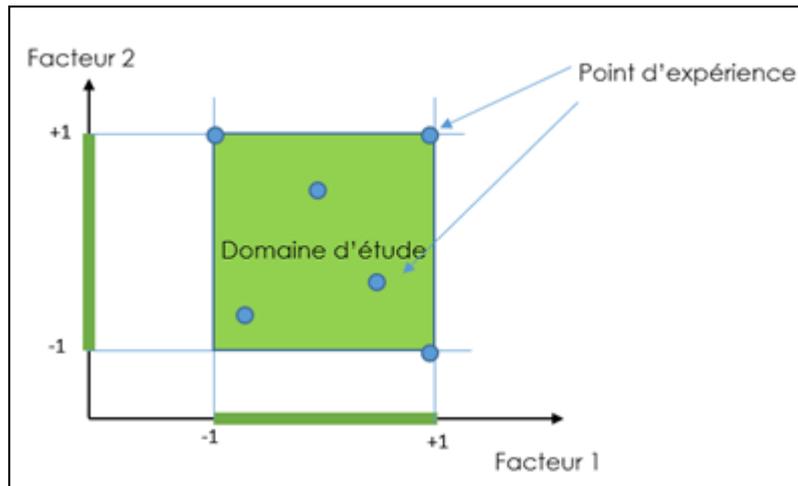


Fig3.4. Schéma du domaine d'étude pour deux facteurs [15]

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

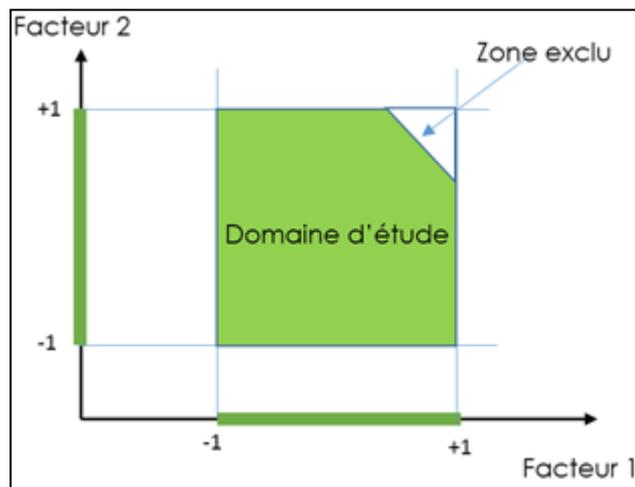


Fig.3.5. Schéma du domaine d'étude pour deux facteurs avec contraintes [15]

3.4 Surface de réponse

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses cette ensemble de réponse constitue la surface de réponse. La représentation géométrique est limitée par deux facteurs et une réponse. [15]

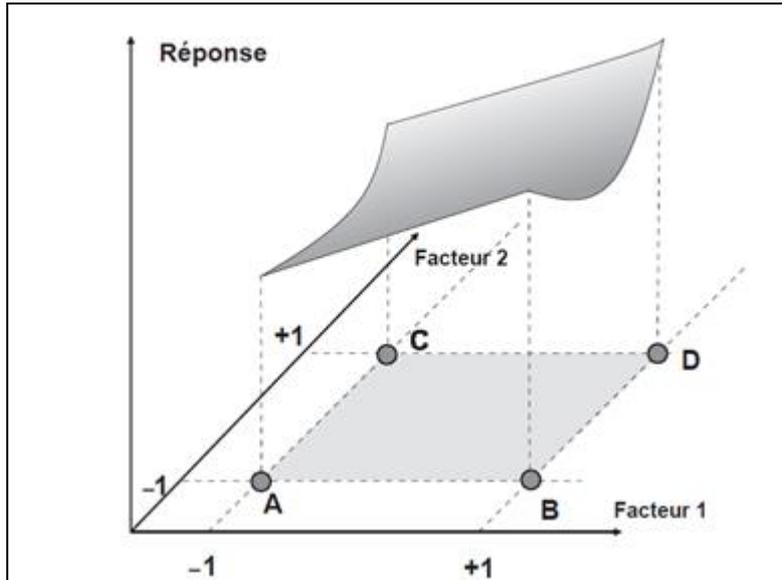


Fig.3.6. Surface de réponse [15]

3.4.1 Matrice d'expériences

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

Essais	Facteur 1	Facteur 2
A	-1	-1
B	+1	-1
C	-1	+1
D	+1	+1

3.4.2 Les différents types de plans d'expériences

Il existe plusieurs types des plans d'expériences. On cite ici les plans à l'usage le plus fréquent.

3.4.2.1 Plans de criblage

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

- **Plans factoriels fractionnaires**

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

- **Plans sursaturés**

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

- **Plans factoriels complets**

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

3.4.2.2 Plans de modélisation

- **Plans factoriels complets**

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

- **Plans non conventionnels**

Le plan non conventionnel représente tout plan qui s'écarte des plans classiques pour une raison ou une autre. Il se peut qu'au cours de l'expérimentation

les niveaux prévus n'ont pas été respectés et que les points d'expériences soient décalés par rapport aux sommets. Le plan réalisé est alors un plan non conventionnel. Un autre cas de plan non conventionnel concerne le nombre de points d'expériences. Un plan classique possède un nombre précis d'essais à réaliser. Pour certaines raisons, il se peut qu'il y ait soit plus, soit moins d'essais effectivement réalisés.

L'ensemble des essais réels est alors un plan non conventionnel. Il y'a donc plan non conventionnel dès que le nombre des points expérimentaux ou que leurs emplacements ne sont plus conformes au plan classique.

- **Plans D-optimaux**

Les contraintes expérimentales ne permettent pas toujours d'être dans les conditions idéales des plans d'expériences précédemment décrits. Il est extrêmement commode d'utiliser les plans D-optimaux. Le choix de l'emplacement des points expérimentaux nécessite alors un logiciel de plans d'expériences. Il suffit de préciser le nombre d'expériences que l'on désire effectuer et le modèle a priori.

Le logiciel calcule alors, grâce à un algorithme d'échange, le plan le mieux adapté à l'étude.

- **Plan de Box-Behnken**

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

3.5 Choix du plan

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

3.5.1 Plan de Box-Behnken

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

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

3.5.1.1 Propriétés du plan de Box-Behnken pour trois facteurs

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

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

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

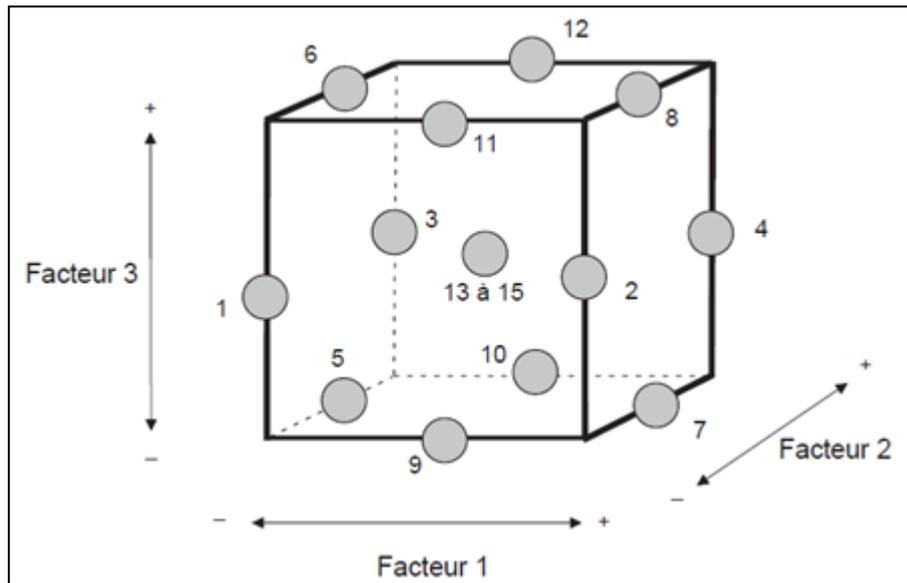


Fig.3.7. Illustration du plan de Box-Behnken pour trois facteurs [15]

3.5.1.2 Modèle mathématique

On utilise pour le plan de Box-Behnken Le modèle mathématique du second degré

$$y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3 + a_{11}X_{12} + a_{22}X_{12} + a_{33}X_{32} + e$$

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

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

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

Le vecteur des coefficients du modèle peut être obtenu alors :

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

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

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

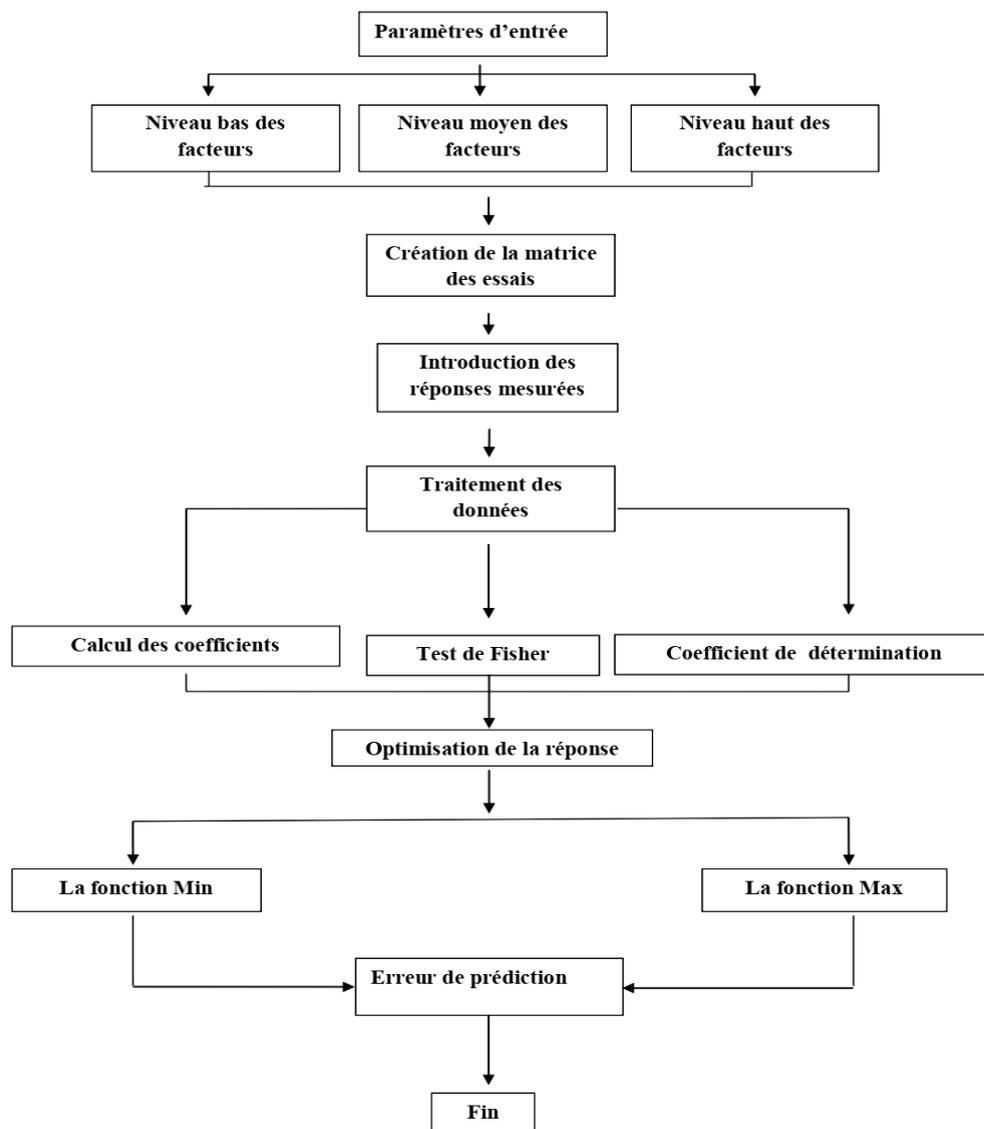
et $(X^t X)^{-1}$ et la matrice de dispersion.

3.6.3 Test de Student

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

3.7 Algorithme de la méthode

On représente ci- après un algorithme descriptif de traitement des données :



3.8 Conclusion

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

Chapitre 4

Essais expérimentaux et discussions

4.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les résultats d'une étude expérimentale concernant la variation de la résistance à l'usure du matériau, la rugosité et la microdureté superficielle au cours de traitement par tribofinition des surfaces des échantillons rectifiés de l'acier XC10. La planification des expériences a été basée sur les plans d'expériences par la méthode de Box-Behnken.

L'objectif de ce travail est d'améliorer la résistance à l'usure et d'optimiser la rugosité et la microdureté de la surface des échantillons par le procédé de tribofinition avec la variation des facteurs influents à savoir la durée de traitement, la fréquence et l'amplitude. La rugosité de surface et la microdureté superficielle ont été modélisées en utilisant la méthodologie de surface de réponse.

Les effets de chaque paramètre d'entrée sur la réponse de sortie ont été étudiés en utilisant une analyse statistique et graphique avec un modèle mathématique du second degré. Ce dernier traduit la relation entre les paramètres d'entrée étudiés suscités et le paramètre de sortie en l'occurrence la rugosité de surface Ra et Rz et de la microdureté superficielle.

En vue analyser l'état de surface en observant les caractéristiques mécaniques et métallurgiques (variation de la masse on fonction de types de surfaces, observation de la microstructure).

4.2 Techniques expérimentales et méthodologie d'expérience

4.2.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé pour cette étude est un vibreur linéaire ayant les caractéristiques suivantes :

- Nombre de chambres de travail : 1
- Volume de chambre dm^3 : 10.320
- Amplitude (mm) : 2.1 ; 3.15 ; 4.2
- Fréquence (Hz) : 60 ; 75 ; 90
- Puissance (kW) : 0.97

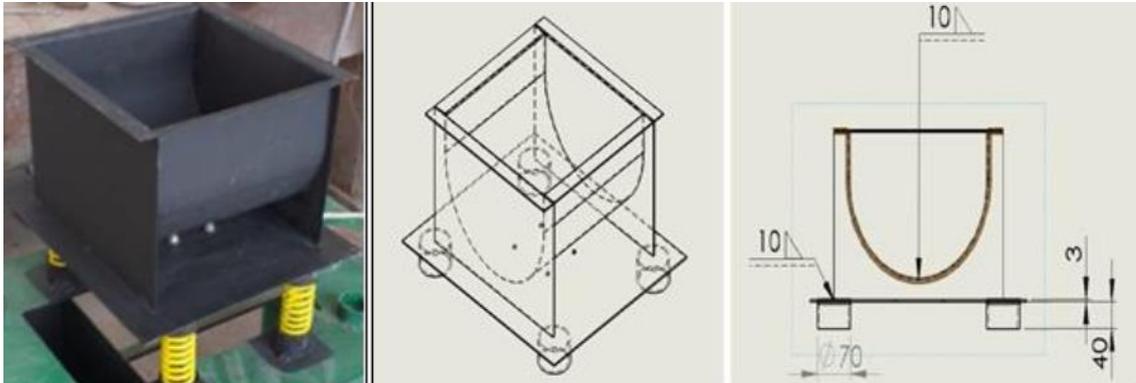


Fig.4.1 Vibreur linéaire VL10

4.2.2 Essais effectués sur les échantillons en XC10

4.2.2.1 Préparation des essais expérimentaux

Pour notre étude, le choix des échantillons a été porté sur l'acier doux en XC10 de composition chimique définie dans le tableau.4.1, ces échantillons sont représentés sur la figure 4.2.

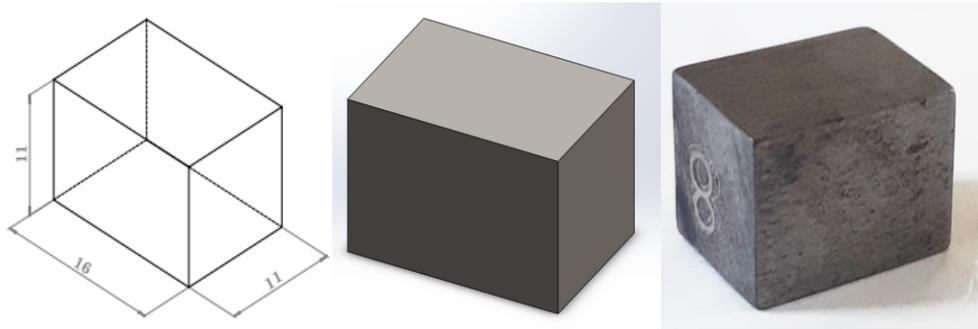


Fig.4.2. Échantillon rectifié avant et après traitement

- **Composition chimique de l'acier XC10**

Tableau.4.1 Composition chimique de l'acier XC10						
Composantes	Si	Ni	C	Mn	Cr	Autre
Pourcentage	0,18	<0,1	0,1318	0.79	<0,10	0,15

4.2.2.2 Media utilisé

Le media utilisé pour l'expérimentation sont illustrés dans la figure suivante :

- Cônes en bakélite de taille 30x30 mm (diamètre de base x hauteur).



Fig.4.3 Media Cônes en bakélite

4.2.3 Mesures de la rugosité (matériau XC10)

La rugosité est mesurée à l'aide d'un rugosimètre, type TESA 10-G. L'échantillon est monté sur un support pour assurer un bon positionnement de l'échantillon sous le palpeur de mesure qui se déplace sur une ligne de la surface de travail, 3 mesures sont effectuées dont la moyenne est retenue pour l'analyse.



Fig.4.4. Rugosimètre de type TESA 10-G

Le tableau 4.2 regroupe les résultats de mesure de la rugosité Ra et Rz avant le traitement en prenant trois mesures pour chaque échantillon :

Tableau 4.2. Les résultats de mesure de la rugosité Ra et Rz avant le traitement								
N°	1ère mesure Ra (μm)	2e mesure Ra (μm)	3e mesure Ra (μm)	Moyenne Ra (μm)	1ère mesure Rz (μm)	2e mesure Rz (μm)	3e mesure Rz (μm)	Moyenne Rz (μm)
0	0,4870	0,3940	0,4710	0,4507	2,9150	2,2150	2,3710	2,5003
1	0,4230	0,3250	0,5330	0,4270	2,2980	2,4731	2,5630	2,4447
2	0,3530	0,4400	0,4330	0,4087	3,1410	2,6550	2,8300	2,8753
3	0,4230	0,4030	0,4530	0,4263	2,4170	2,1370	2,3870	2,3137
4	0,3630	0,3700	0,4780	0,4037	2,2540	2,6050	2,4410	2,4333
5	0,3780	0,4960	0,3870	0,4203	2,1710	2,4210	2,4010	2,3310
6	0,3490	0,4230	0,4030	0,3917	3,0730	2,6250	2,1440	2,6140

7	0,3790	0,4590	0,3940	0,4107	2,1510	2,0550	2,5520	2,2527
8	0,4366	0,3630	0,4012	0,4003	2,8800	2,7060	2,7510	2,7790
9	0,3420	0,4880	0,4530	0,4277	2,1250	2,7050	3,1690	2,6663
10	0,4810	0,4070	0,3550	0,4143	1,8690	2,5270	2,7770	2,3910
11	0,4380	0,4580	0,4010	0,4323	2,1880	2,4450	2,6910	2,4413
12	0,4610	0,4750	0,3890	0,4417	1,9890	2,4850	2,6270	2,3670
13	0,5260	0,4790	0,2730	0,4260	2,6150	2,1460	2,9750	2,5787
14	0,4820	0,3890	0,4050	0,4253	1,9610	2,9520	2,7870	2,5667
15	0,5180	0,3470	0,4430	0,4360	2,3360	2,3410	2,9770	2,5513

Le tableau 4.3 regroupe les résultats de mesure de la rugosité Ra et Rz après le traitement en prenant trois mesures pour chaque échantillon :

Tableau.4.3. Résultats de rugosités obtenues après les essais expérimentaux								
N°	1ère mesure Ra (µm)	2e mesure Ra (µm)	3e mesure Ra (µm)	Moyenne Ra (µm)	1ère mesure Rz (µm)	2e mesure Rz (µm)	3e mesure Rz (µm)	Moyenne Rz (µm)
0	0,4870	0,3940	0,4710	0,4507	2,9150	2,2150	2,3710	2,5003
1	0,4300	0,4270	0,4110	0,4227	2,5010	2,4170	2,3970	2,4383
2	0,3390	0,3150	0,4130	0,3557	2,3140	2,3860	1,9100	1,7101
3	0,4170	0,3650	0,3900	0,3907	2,4450	2,0610	2,1550	2,2203
4	0,2400	0,2270	0,2800	0,2490	1,4770	1,5280	1,6210	1,3337
5	0,4050	0,4300	0,4200	0,4183	2,2030	2,4010	2,3000	2,3013
6	0,2900	0,2880	0,3300	0,3027	1,7030	2,3610	2,3070	1,6310
7	0,4020	0,4570	0,3600	0,4063	2,3800	2,0110	2,3110	2,2340
8	0,2770	0,2800	0,2750	0,2773	1,2000	1,1600	1,6410	1,5131
9	0,3870	0,4050	0,3440	0,3787	1,8680	2,3800	2,5490	2,0977
10	0,3270	0,3300	0,4010	0,3527	1,7770	1,7560	1,8740	1,8211
11	0,3170	0,3480	0,4220	0,3623	2,1550	1,9180	2,2200	1,9107
12	0,3200	0,3180	0,3050	0,3143	2,1020	1,5010	2,1290	1,8023

13	0,3710	0,3520	0,3320	0,3517	1,7990	1,9590	1,7950	1,8510
14	0,3530	0,3390	0,3620	0,3513	1,8030	2,0330	1,7240	1,8533
15	0,3650	0,3690	0,3410	0,3583	1,5920	2,1820	1,8140	1,8627

4.2.4 Essais de Microdureté (HV)

Les essais de microdureté ont été effectués au niveau du laboratoire de métallurgie physique et génie des matériaux du Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI) de Cheraga sur un duromètre Wilson VH3300 qui est un duromètres Vickers/Knoop automatiques. On a utilisé la microdureté Vickers applicable sur les alliages d'ACIER.

L'indenteur utilisé est un Cône de diamant de section circulaire à pointe arrondie sphérique avec une charge de 300N (0,5 kgf) appliqué pendant 15 secondes au moyenne pour l'ensemble des échantillons.

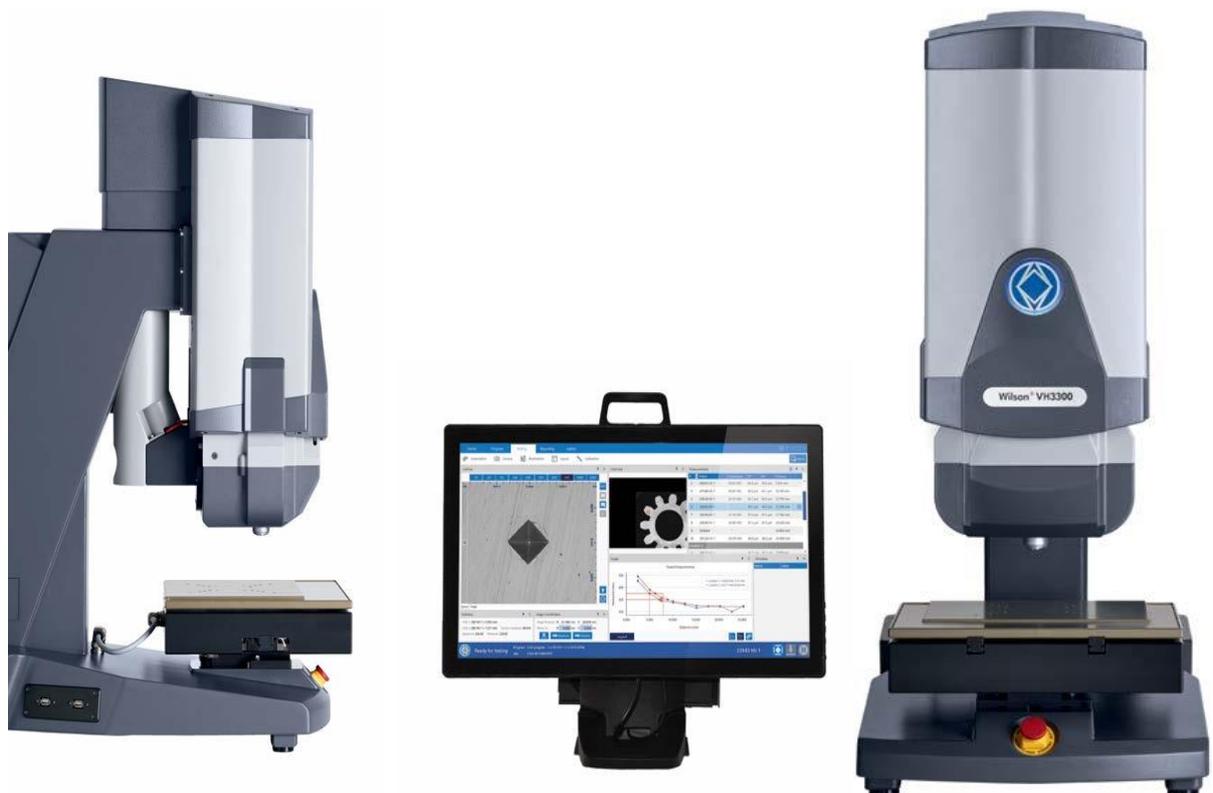


Fig.4.5. Duromètre Wilson VH3300 Vickers/Knoop automatiques

Le tableau ci-dessus regroupe les 3 mesures de microdureté HV et leur moyenne avant et après le traitement.

Tableau. 4.4. La microdureté HV des échantillons avant (0) et après (de 1 à 15) le traitement				
N°	1ère mesure [HV]	2e mesure [HV]	3e mesure [HV]	Moyenne [HV]
0	235	227	216	226
1	235	227	233	231
2	257	256	252	255
3	232	230	243	235
4	266	268	261	265
5	232	233	243	236
6	260	258	267	261
7	239	223	262	241
8	266	262	258	262
9	247	258	235	247
10	250	263	246	253
11	247	258	245	250
12	257	256	258	257
13	265	240	250	252
14	250	263	243	252
15	253	240	263	252

- **Interprétation :**

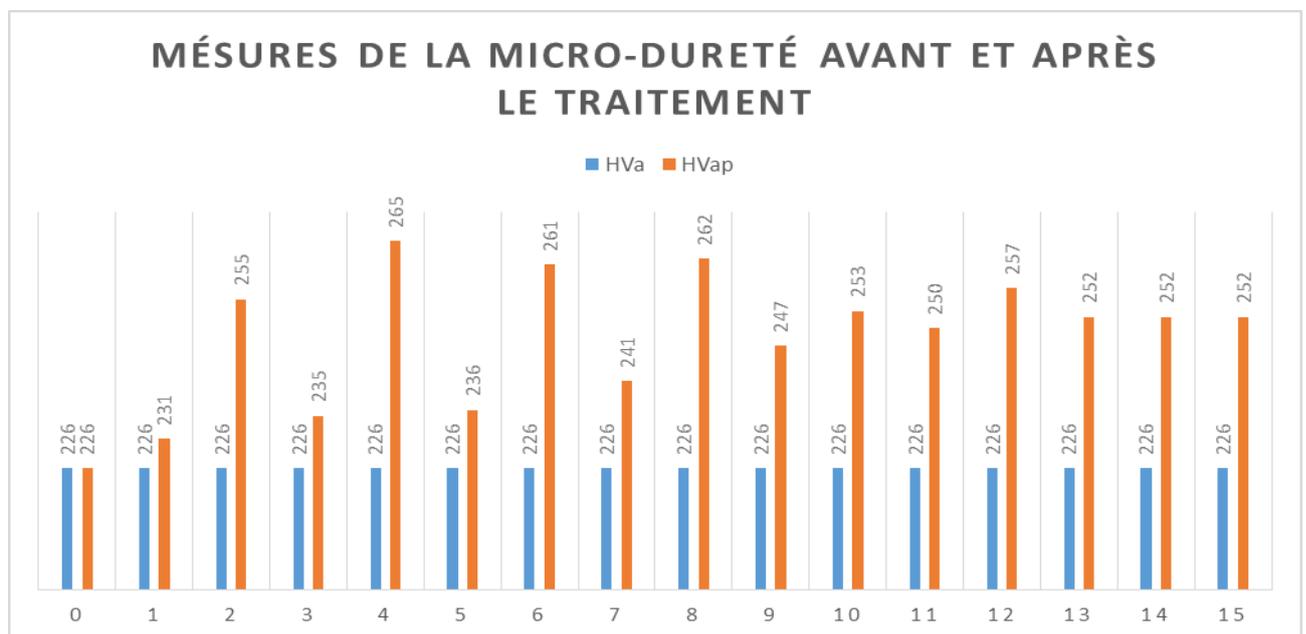


Fig.4.6. Influence du traitement par tribofinition sur la microdureté du matériau XC10

D'après l'histogramme ci-dessus, on constate une augmentation de la microdureté, ce durcissement superficiel s'explique par la quantité importante des micros coups que la surface a reçu et qui engendre une déformation plastique.

Lors de l'impact, la couche superficielle du matériau subit une déformation plastique qui se manifeste par la naissance et la mise en mouvement des dislocations.

4.2.5 Variation masse

La masse est mesurée à l'aide d'une balance digitale de type **KERNACJ/ACS AC6 2204**, ce type de balances donne des mesures avec une précision de 10^{-1} mg, une portée maximale de 220g et d'une charge minimale 0.01g.



Fig.4.7. Balance électronique de type KERNACJ/ACS AC6 2204

4.2.5.1 Mesure de la variation de la masse (Quantité de matière enlevée)

Le tableau 4.5 représente les résultats de la variation de la masse avant et après le traitement pour différents échantillons.

Tableau.4.5. Variation de masse des échantillons après le traitement			
N°. d'échantillon	m : Masse initial (g)	m' : Masse après traitement (g)	Variation de la masse Δm (g)
0	16,6597	16,6597	0
1	17,3480	17,3160	0,0320
2	16,6786	16,4173	0,2613
3	17,1151	17,0439	0,0712
4	17,5674	17,0950	0,4724
5	16,5183	16,5003	0,0180
6	17,2796	16,9493	0,3303
7	17,1041	17,0772	0,0269
8	17,9378	17,3624	0,5754
9	17,3827	17,1894	0,1933
10	17,5713	17,1687	0,4026
11	17,2719	16,9749	0,2970
12	17,3763	17,0747	0,3016
13	16,8031	16,5733	0,2298
14	17,2570	17,0623	0,1947
15	17,1042	16,9067	0,1975

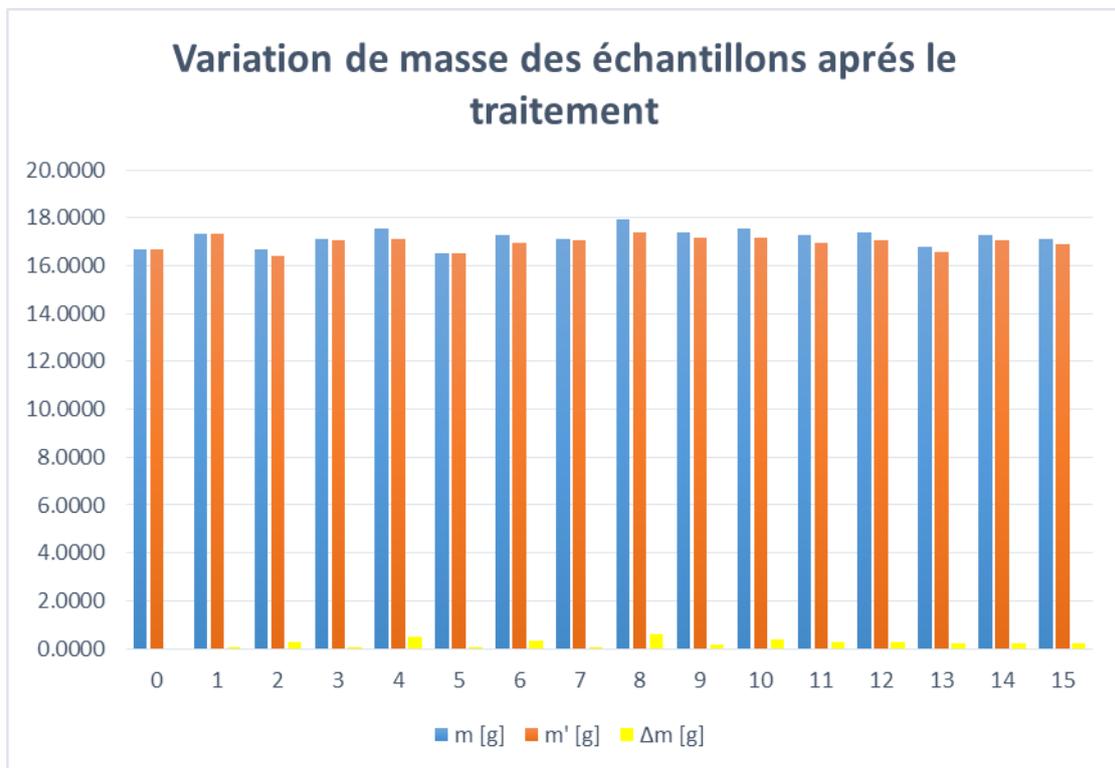


Fig.4.8. Variation de la masse avant et après traitement par tribofinition

D'après la figure, on remarque que la masse de chaque échantillon a diminué après traitement.

✓ Pour l'ensemble des échantillons, la masse varie de 0,0180g à 0,5754g.

Cela dépend des conditions de traitement (durée de traitement, fréquence, amplitude).

La masse enlevée diminue avec l'augmentation de la durée de traitement.

Cela s'explique par la résistance du matériau à la pénétration de medias puisqu'il devient de plus en plus dur.

4.2.6 Tests d'usure

Les tests ont été réalisés à l'aide d'un tribomètre pion-disque de type csm+instruments TRIBOMETER. La charge appliquée durant les tests est de 5N avec une vitesse linéaire de 7 cm/s. Le montage utilisé est un montage classique, l'échantillon est maintenu dans un mandrin par des mors de fixation en matériau isolant, qui assurent son isolation électrique par rapport au bâti de tribomètre, la surface de travail orientée vers le haut et le frottement est appliqué sur la surface à l'aide d'un pion qui contient une bille en acier inoxydable de 6 mm à son extrémité. La bille décrit une trajectoire circulaire unidirectionnelle sur la surface de l'échantillon de 3 mm de rayon qui représente la trace de frottement.



Fig.4.9. Tribomètre (csm+instruments TRIBOMETER)

4.2.6.1 Application de tests d'usure

La figure IV.17 représente le schéma descriptif du tribomètre et les paramètres de fonctionnement.

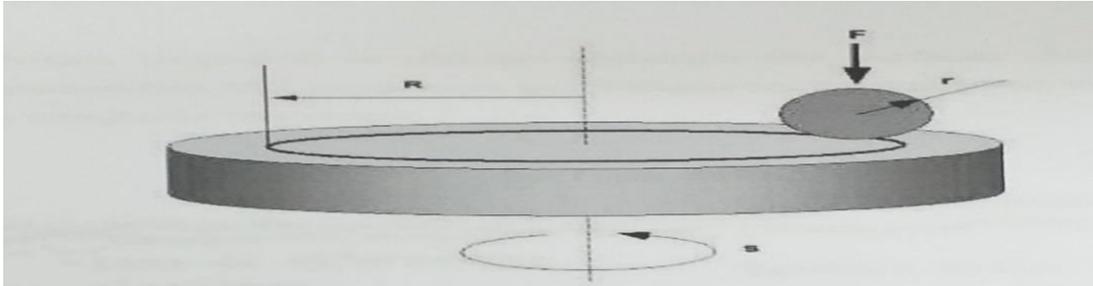


Fig.4.10. Schéma descriptif du tribomètre

Afin de calculer le taux d'usure, il faut déterminer au préalable la perte du volume du disque en mm^3 .

- **Volume du disque**

L'usure de la bille n'est pas considérable, la perte de volume du disque est donnée par :

$$V_{\text{disque}} = 2\pi R \left[\sin^{-1} \frac{d}{2r} - \left(\frac{d}{4} \right) \sqrt{(4r^2 - d^2)} \right]$$

Avec :

R : Rayon de la piste d'usure

d : Largeur de la piste d'usure

r : Rayon de la bille

- **Taux d'usure**

$$W_d = \frac{V}{F \cdot l}$$

F : Charge normale appliquée

L : Distance de glissement

Tableau.4.6. Tests d'usure réalisés avant le traitement							
	d [mm]	Durée [min]	Rayon [mm]	Charge [N]	Vitesse linéaire [cm/s]	Vitesse de rotation [tr/min]	Distance parcourue [m]
Echantillon non traité	6	20	3,00	5,00	7,00	5310	84,04

- **Remarque :**

On n'a pas pu faire les tests d'usure après traitement, à cause de la crise sanitaire l'accès à université des sciences et de la technologie Houari Boumediene - Bab Ezzouar était impossible.

4.2.7 Plans d'expériences

4.2.7.1 Logiciel Minitab

MINITAB est un logiciel statistique mis au point, à l'origine, par le département de Statistique de l'Université de Pennsylvanie (U.S.A.). Il est particulièrement bien adapté à l'analyse statistique de petits tableaux de données bien structurés : statistique descriptive, analyse de la variance, méthodes relatives à la corrélation et à la régression simple et multiple, séries chronologiques, tests d'indépendance, méthodes non paramétriques, analyse en composantes principales, analyse discriminante, contrôle statistique de la qualité, plans expérimentaux, etc.

4.2.7.2 Application de plans d'expériences de Box-Behnken

Dans le but d'optimisation de la résistance à l'usure, la rugosité et la microdureté HV de surface du matériau XC10 par le procédé de la tribofinition, l'objectif principal est de trouver une relation entre la rugosité Ra et Rz et la microdureté HV avec les paramètres variables de la machine (amplitude, fréquence, durée) pour avoir une meilleure réponse possible (rugosité minimale et microdureté HV maximale).

Sur la pratique, Le choix du plan de Box-Behnken a été adopté pour plusieurs raisons :

- Il permet d'attribuer trois niveaux à chaque facteur : -1, 0 et +1.
- Il possède la propriété de séquentialité.
- Modèle du second degré dont les résultats seront plus précis qu'un modèle linéaire.
- Possibilité d'étudier un très grand nombre de facteurs avec un nombre d'essais très réduit.

Pour ces raisons, le plan de box-Behnken est le plus convenable pour décrire les réponses de sortie.

La figure 4.13 illustre une représentation graphique des essais à trois facteurs à savoir la fréquence, l'amplitude et la durée de traitement comme paramètres d'entrée dans le système pièces-abrasifs et comme paramètre de sortie (rugosité Ra et Rz, et la micridureté HV).

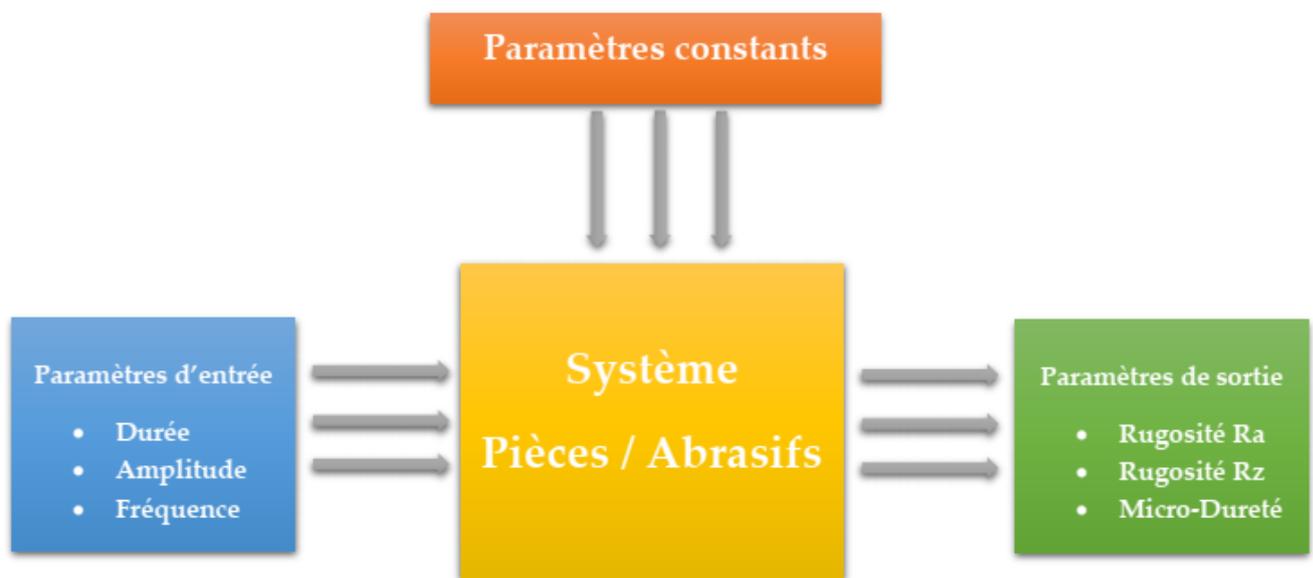


Fig.4.11. Schéma des essais à trois facteurs

4.2.7.3 Réponses

Pour avoir une surface lisse, l'état de surface doit avoir une rugosité minimale, la réponse ici doit être la valeur de la rugosité (R_a , R_z), plus la rugosité est faible plus l'état de surface est bonne. Et pour avoir une surface plus dure, la surface doit avoir

une microdureté superficielle maximale, la réponse ici doit être la valeur de la microdureté (HV), plus la microdureté est grande plus la surface est dure.

4.2.7.4 Facteurs étudiés

Les facteurs choisis dans l'expérience sont :

- La durée de traitement.
- L'amplitude d'oscillation.
- La fréquence de vibration.

4.2.7.5 Domaine d'études

Le domaine d'étude est défini par les domaines des facteurs : fréquence, amplitude et durée de traitement.

Tableau.4.7 Domaine d'étude			
Facteur	Niveau -1	Niveau 0	Niveau +1
Fréquence	60	75	90
Amplitude	2.1	3.15	4.2
Durée de traitement	30	255	480

4.2.7.6 Matrice d'expérience

Les données sont introduites sous forme d'un tableau en unités codées dans le logiciel de Mini tab version 17.

Récapitulatif du plan:

- Facteur : 3 Répliques : 1
- Essais de base : 15
- Blocs de base : 1

- **Matrice d'expérience des échantillons :**

(Les réponses : Y_1 = Rugosité Ra, Y_2 = Rugosité Rz, Y_3 = Micro-Dureté)

Le tableau.4.7.représente la matrice d'expériences :

Tableau.4.8 Matrice d'expériences

Essai	Bloc	Durée de traitement [min]	Fréquence [Hz]	Amplitude [mm]	Rugosité des Échantillons		Micro-Dureté [HV]
					Ra [µm]	Rz [µm]	
1	1	-1	-1	0	0,4227	2,4383	231
2	1	1	-1	0	0,3057	1,7101	255
3	1	-1	1	0	0,3907	2,2203	235
4	1	1	1	0	0,2490	1,3337	265
5	1	-1	0	-1	0,4183	2,3013	236
6	1	1	0	-1	0,2927	1,6310	261
7	1	-1	0	1	0,4063	2,2340	241
8	1	1	0	1	0,2773	1,5131	262
9	1	0	-1	-1	0,3787	2,0977	247
10	1	0	1	-1	0,3527	1,8211	253
11	1	0	-1	1	0,3623	1,9107	250
12	1	0	1	1	0,3143	1,8023	257
13	1	0	0	0	0,3417	1,8510	252
14	1	0	0	0	0,3413	1,8533	252
15	1	0	0	0	0,3483	1,8627	252

4.2.7.7 Résultats, Analyse et interprétation

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

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

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

4.2.7.7.1 Interprétation numérique

4.2.7.7.1.1 Analyse de la variance

A. La rugosité :

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

La valeur obtenue de R^2 est de 99,59% pour le Ra et de 99,09% pour le Rz, cela signifie que le modèle mathématique obtenu est très proche du modèle prévu, et l'erreur expérimentale est très faible, ceci montre aussi que les facteurs sont indépendants entre eux et les interactions sont très faibles.

Les valeurs obtenues pour Fischer sont aussi acceptables.

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

Tableau 4.9 Analyse de variance pour le Ra							
Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	9	1.29251	99.09%	1.29251	0.14361	60.49	0.000
Linéaires	3	1.26860	97.26%	1.26860	0.42287	178.12	0.000
Durée	1	1.12960	86.60%	1.12960	1.12960	475.81	0.000
Amplitude	1	0.11989	9.19%	0.11989	0.11989	50.50	0.001
Fréquence	1	0.01911	1.47%	0.01911	0.01911	8.05	0.036
Carré	3	0.00992	0.76%	0.00992	0.00331	1.39	0.347
Durée*Durée	1	0.00517	0.40%	0.00619	0.00619	2.61	0.167
Amplitude*Amplitude	1	0.00275	0.21%	0.00311	0.00311	1.31	0.304
Fréquence*Fréquence	1	0.00200	0.15%	0.00200	0.00200	0.84	0.401
Interaction à 2 facteurs	3	0.01399	1.07%	0.01399	0.00466	1.96	0.238
Durée*Amplitude	1	0.00628	0.48%	0.00628	0.00628	2.64	0.165
Durée*Fréquence	1	0.00064	0.05%	0.00064	0.00064	0.27	0.626
Amplitude*Fréquence	1	0.00708	0.54%	0.00708	0.00708	2.98	0.145
Erreur	5	0.01187	0.91%	0.01187	0.00237	-	-
Inadéquation de l'ajustement	3	0.01179	0.90%	0.01179	0.00393	103.16	0.010
Erreur pure	2	0.00008	0.01%	0.00008	0.00004	-	-
Total	14	1.30438	100.00%	-	-	-	-

Tableau 4.10 Analyse de variance pour le Rz							
Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	9	1.29251	99.09%	1.29251	0.14361	60.49	0.000
Linéaires	3	1.26860	97.26%	1.26860	0.42287	178.12	0.000

Durée	1	1.12960	86.60%	1.12960	1.12960	475.81	0.000
Amplitude	1	0.11989	9.19%	0.11989	0.11989	50.50	0.001
Fréquence	1	0.01911	1.47%	0.01911	0.01911	8.05	0.036
Carré	3	0.00992	0.76%	0.00992	0.00331	1.39	0.347
Durée*Durée	1	0.00517	0.40%	0.00619	0.00619	2.61	0.167
Amplitude*Amplitude	1	0.00275	0.21%	0.00311	0.00311	1.31	0.304
Fréquence*Fréquence	1	0.00200	0.15%	0.00200	0.00200	0.84	0.401
Interaction à 2 facteurs	3	0.01399	1.07%	0.01399	0.00466	1.96	0.238
Durée*Amplitude	1	0.00628	0.48%	0.00628	0.00628	2.64	0.165
Durée*Fréquence	1	0.00064	0.05%	0.00064	0.00064	0.27	0.626
Amplitude*Fréquence	1	0.00708	0.54%	0.00708	0.00708	2.98	0.145
Erreur	5	0.01187	0.91%	0.01187	0.00237	-	-
Inadéquation de l'ajustement	3	0.01179	0.90%	0.01179	0.00393	103.16	0.010
Erreur pure	2	0.00008	0.01%	0.00008	0.00004	-	-
Total	14	1.30438	100.00%	-	-	-	-

B. La microdureté :

La valeur obtenue de R^2 est de 99,43%, cela signifie que le modèle mathématique obtenu est très proche du modèle prévu, et l'erreur expérimentale est très faible, ceci montre aussi que les facteurs sont indépendants entre eux et les interactions sont très faibles.

Les valeurs obtenues pour Fischer sont aussi acceptables.

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

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	9	1448.68	99.43%	1448.68	160.96	97.55	0.000
Linéaires	3	1362.25	93.50%	1362.25	454.08	275.20	0.000
Durée	1	1250.00	85.80%	1250.00	1250.00	757.58	0.000
Amplitude	1	91.12	6.25%	91.12	91.12	55.23	0.001
Fréquence	1	21.13	1.45%	21.12	21.12	12.80	0.016
Carré	3	73.18	5.02%	73.18	24.39	14.78	0.006
Durée*Durée	1	48.58	3.33%	48.52	48.52	29.41	0.003
Amplitude*Amplitude	1	14.86	1.02%	12.98	12.98	7.87	0.038

Fréquence*Fréquence	1	9.75	0.67%	9.75	9.75	5.91	0.059
Interaction à 2 facteurs	3	13.25	0.91%	13.25	4.42	2.68	0.158
Durée*Amplitude	1	9.00	0.62%	9.00	9.00	5.45	0.067
Durée*Fréquence	1	4.00	0.27%	4.00	4.00	2.42	0.180
Amplitude*Fréquence	1	0.25	0.02%	0.25	0.25	0.15	0.713
Erreur	5	8.25	0.57%	8.25	1.65	-	-
Inadéquation de l'ajustement	3	8.25	0.57%	8.25	2.75	-	-
Erreur pure	2	0.00	0.00%	0.00	0.00	-	-
Total	14	1456.93	100.00%	-	-	-	-

4.2.7.7.1.2 Calcul des coefficients du modèle mathématique

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

Terme	Coeff	Coef ErT	IC à 95 %	Valeur de T	Valeur de p	FIV
Constante	0.34378	0.00320	(0.33556, 0.35200)	107.48	0.000	
Durée	-0.06417	0.00196	(-0.06920, -0.05913)	-32.76	0.000	1.00
Amplitude	-0.02033	0.00196	(-0.02537, -0.01530)	-10.38	0.000	1.00
Fréquence	-0.01025	0.00196	(-0.01529, -0.00521)	-5.23	0.003	1.00
Durée*Durée	-0.00256	0.00288	(-0.00997, 0.00486)	-0.89	0.416	1.01
Amplitude*Amplitude	0.00078	0.00288	(-0.00663, 0.00819)	0.27	0.798	1.01
Fréquence*Fréquence	0.00744	0.00288	(0.00003, 0.01486)	2.58	0.049	1.01
Durée*Amplitude	-0.00617	0.00277	(-0.01329, 0.00095)	-2.23	0.077	1.00
Durée*Fréquence	-0.00083	0.00277	(-0.00795, 0.00629)	-0.30	0.776	1.00
Amplitude*Fréquence	-0.00550	0.00277	(-0.01262, 0.00162)	-1.99	0.104	1.00

Terme	Coeff	Coef ErT	IC à 95 %	Valeur de T	Valeur de p	FIV
Constante	1.8557	0.0281	(1.7834, 1.9280)	65.97	0.000	
Durée	-0.3758	0.0172	(-0.4200, -0.3315)	-21.81	0.000	1.00
Amplitude	-0.1224	0.0172	(-0.1667, -0.0781)	-7.11	0.001	1.00
Fréquence	-0.0489	0.0172	(-0.0932, -0.0046)	-2.84	0.036	1.00
Durée*Durée	0.0409	0.0254	(-0.0243, 0.1061)	1.61	0.167	1.01
Amplitude*Amplitude	0.0290	0.0254	(-0.0362, 0.0942)	1.14	0.304	1.01

Fréquence*Fréquence	0.0233	0.0254	(-0.0419, 0.0884)	0.92	0.401	1.01
Durée*Amplitude	-0.0396	0.0244	(-0.1022, 0.0230)	-1.63	0.165	1.00
Durée*Fréquence	-0.0126	0.0244	(-0.0753, 0.0500)	-0.52	0.626	1.00
Amplitude*Fréquence	0.0421	0.0244	(-0.0206, 0.1047)	1.73	0.145	1.00

Tableau 4.14 Les coefficients du modèle pour la microdureté HV						
Terme	Coef	Coef ErT	IC à 95 %	Valeur de T	Valeur de p	FIV
Constante	252.000	0.742	(250.094, 253.906)	339.80	0.000	
Durée	12.500	0.454	(11.333, 13.667)	27.52	0.000	1.00
Amplitude	3.375	0.454	(2.208, 4.542)	7.43	0.001	1.00
Fréquence	1.625	0.454	(0.458, 2.792)	3.58	0.016	1.00
Durée*Durée	-3.625	0.668	(-5.343, -1.907)	-5.42	0.003	1.01
Amplitude*Amplitude	-1.875	0.668	(-3.593, -0.157)	-2.80	0.038	1.01
Fréquence*Fréquence	1.625	0.668	(-0.093, 3.343)	2.43	0.059	1.01
Durée*Amplitude	1.500	0.642	(-0.151, 3.151)	2.34	0.067	1.00
Durée*Fréquence	-1.000	0.642	(-2.651, 0.651)	-1.56	0.180	1.00
Amplitude*Fréquence	0.250	0.642	(-1.401, 1.901)	0.39	0.713	1.00

L'effet des différents termes est présenté en pourcentage, on remarque que l'effet de la durée du traitement est plus grand que celle de l'amplitude et de la fréquence.

4.2.7.7.1.3 Modèle mathématique

Les trois réponses pour les unités codées sont données sous forme des équations quadratiques en fonction des trois facteurs : la durée, l'amplitude et la fréquence.

A. $Y_1 =$ Rugosité R_a

$$Y_1 = 0.34378 - 0.06417 X_1 - 0.02033 X_2 - 0.01025 X_3 + 0.00078 X_1^2 + 0.00744 X_2^2 - 0.00617 X_3^2 - 0.00083 X_1 X_2 - 0.000000 X_1 X_3 - 0.00550 X_2 X_3$$

B. $Y_2 =$ Rugosité R_z

$$Y_2 = 1.8557 - 0.3758 X_1 - 0.1224 X_2 - 0.0489 X_3 + 0.0409 X_1^2 + 0.0290 X_2^2 + 0.0233 X_3^2 - 0.0396 X_1 X_2 - 0.0126 X_1 X_3 + 0.0421 X_2 X_3$$

C. Y_3 = Micro-Dureté HV

$$Y_3 = 252 + 12.500 X_1 + 3.375 X_2 + 1.625 X_3 - 3.625 X_1^2 - 1.875 X_2^2 + 1.625 X_3^2 + 1.500 X_1 X_2 - 1.000 X_1 X_3 + 0.250 X_2 X_3$$

4.2.7.7.2 Interprétation graphique

On représente ci-après le graphe des effets principaux pour la rugosité et pour la micro-dureté en fonction des différents facteurs (fréquence, amplitude et la durée) ainsi que leur influence.

A. La Rugosité :

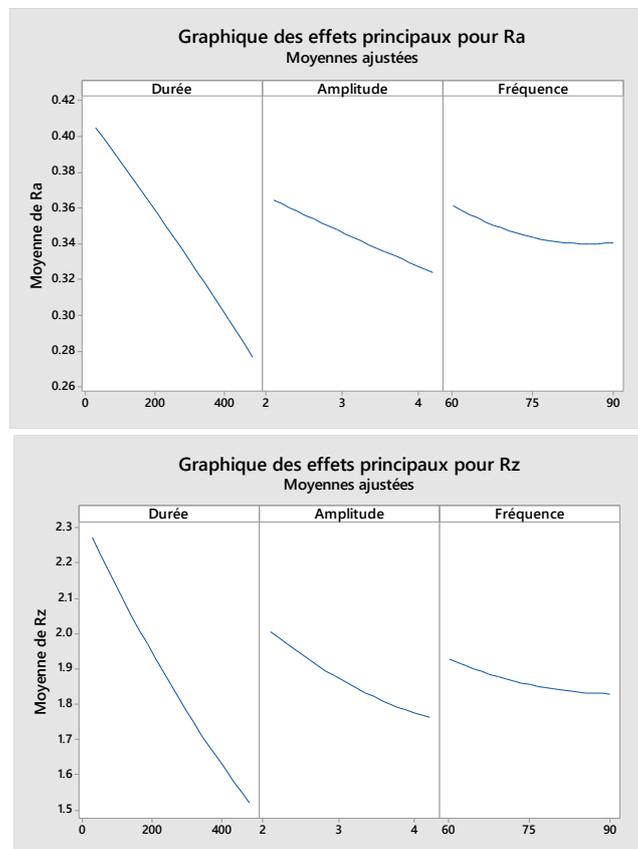


Fig.4.12. Graphique des effets principaux pour la rugosité (Ra et Rz)

D'après la figure (4.12) à chaque fois où la durée et la fréquence et l'amplitude augmentent, la rugosité diminue aussi de plus en plus jusqu'à atteindre la valeur de ($Ra = 0.2490$; $Rz = 1.3337$), ce phénomène s'explique par le fait que à chaque fois que la durée et fréquence augmentent, le nombre d'impact augmente. L'augmentation de l'amplitude dû à l'application de la force des médias sur la pièce fait augmenter la

pression dans la chambre de travail ce qui est favorable pour avoir un meilleur état de surface. On remarque aussi que la variation de la durée du traitement a plus d'effet sur la rugosité que celles de l'amplitude et de la fréquence du faite qu'elle a une pente plus forte. Les interactions entre les différents facteurs sont représentées dans le diagramme des interactions ci-après :

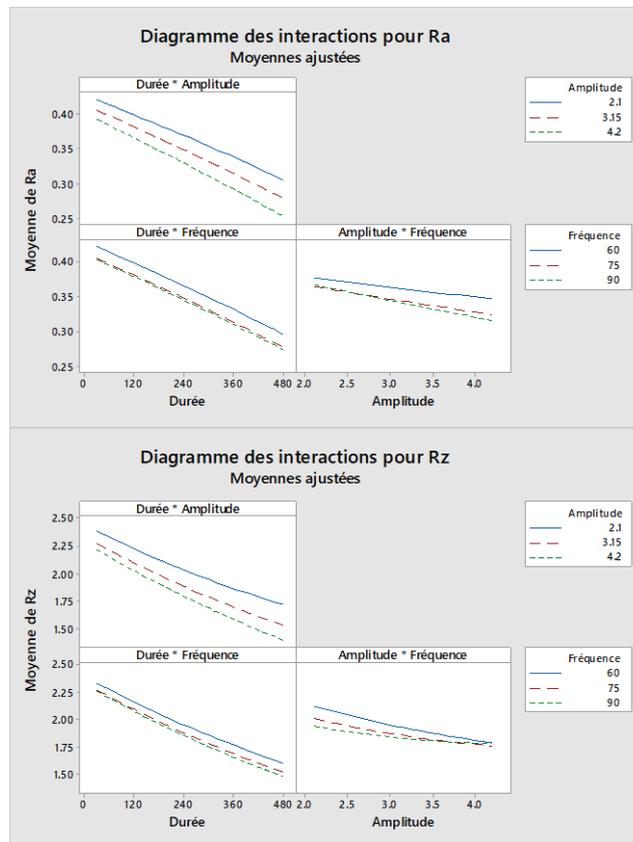


Fig.4.13. Diagramme des interactions pour la rugosité

On peut tirer comme conclusion de ces trois graphes que le facteur (fréquence) à moins d'effet par rapport aux autres facteurs (durée et amplitude), les graphes d'interactions montrent que l'augmentation des facteurs couplée sert toujours à diminuer la rugosité.

B. La microdureté :

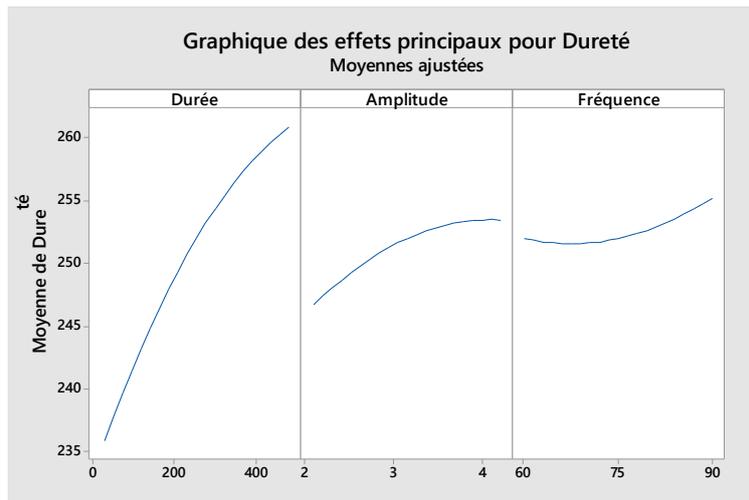


Fig.4.14. Diagramme des interactions pour la micro-dureté

D'après la figure (4.14) à chaque fois où la durée et la fréquence et l'amplitude augmentent, la microdureté augmente aussi de plus en plus jusqu'à atteindre la valeur de ($HV = 265$), ce phénomène s'explique par le fait que à chaque fois que la durée et fréquence augmentent, le nombre d'impact augmente. L'augmentation de l'amplitude dû à l'application de la force des médias sur la pièce fait augmenter la pression dans la chambre de travail ce qui est favorable pour avoir une surface plus dure. On remarque aussi que la variation de la durée du traitement a plus d'effet sur la microdureté que celles de l'amplitude et de la fréquence du fait qu'elle a une pente plus forte. Les interactions entre les différents facteurs sont représentées dans le diagramme des interactions ci-après :

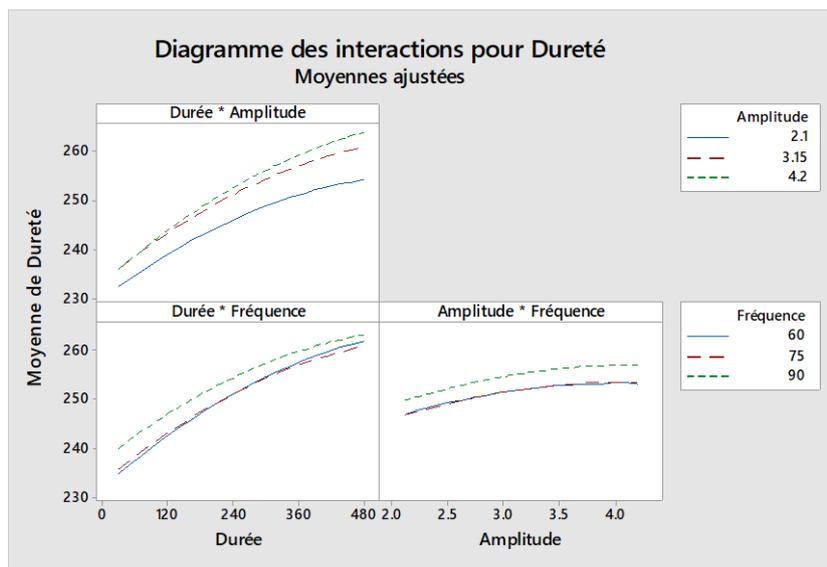


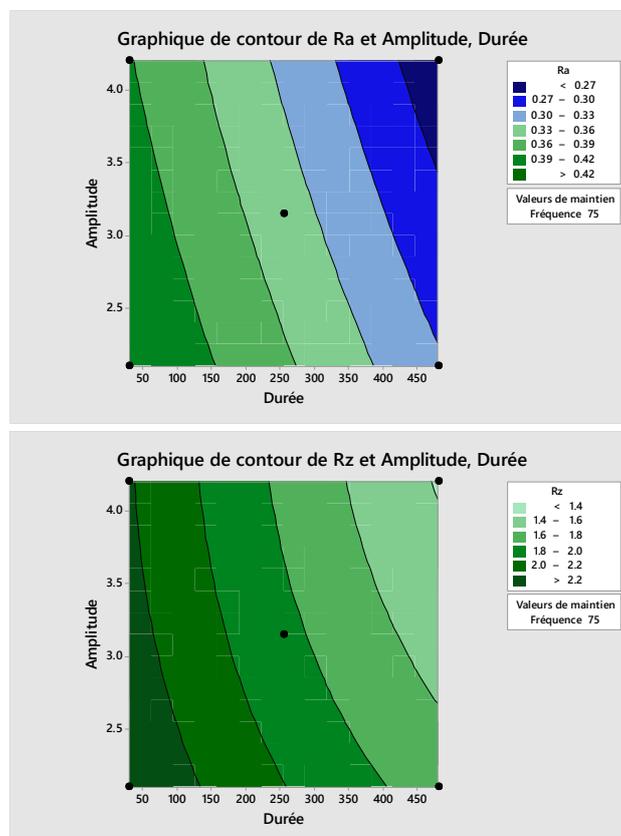
Fig.4.15. Diagramme des interactions pour la microdureté

On peut tirer comme conclusion de ces trois graphes que le facteur (fréquence) à moins d'effet par rapport aux autres facteurs (durée et amplitude), les graphes d'interactions montrent que l'augmentation des facteurs couplée sert toujours à augmenter la microdureté.

4.2.7.8 Graphiques des contours

A. La rugosité :

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



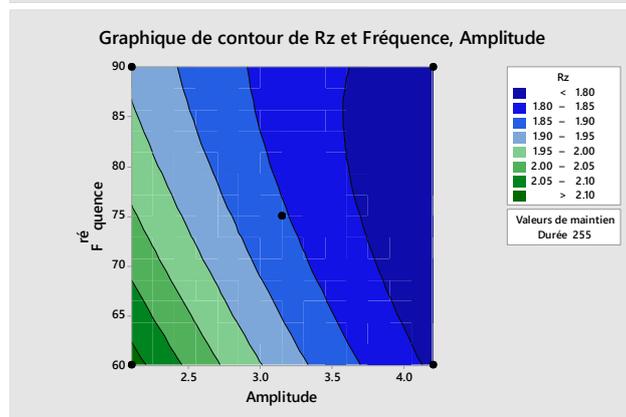
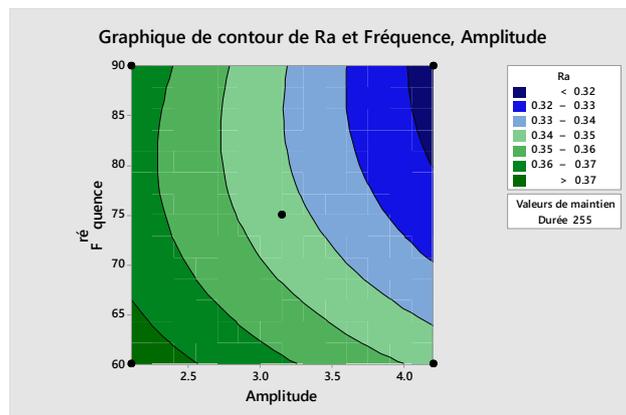
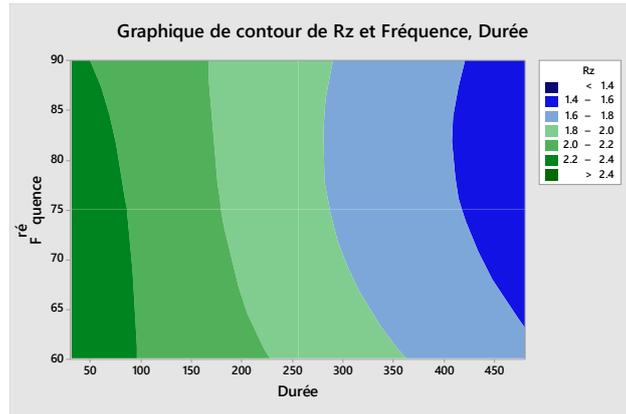
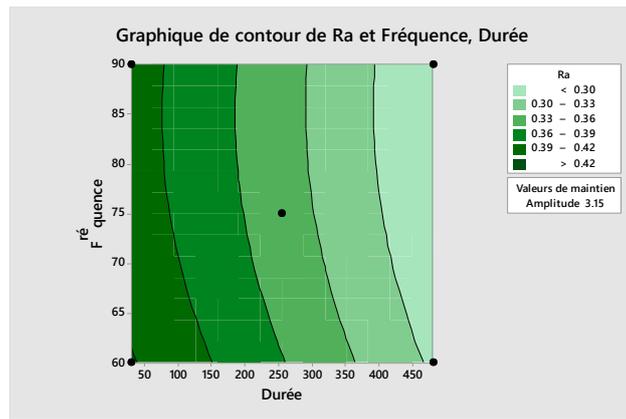


Fig.4.16. Graphiques du contour de la rugosité en fonction des différents facteurs

Prenons un exemple dans un cas pratique, où nous sommes limités par une fréquence de 75Hz, en utilisant notre modèle qui est valable pour des fréquences comprises dans le domaine [60-90] Hz, par la suite on obtient le graphique du contour, tout en cherchant la rugosité minimale, cette valeur est de 0,2513 pour le R_a et de 1,3878 pour le R_z .

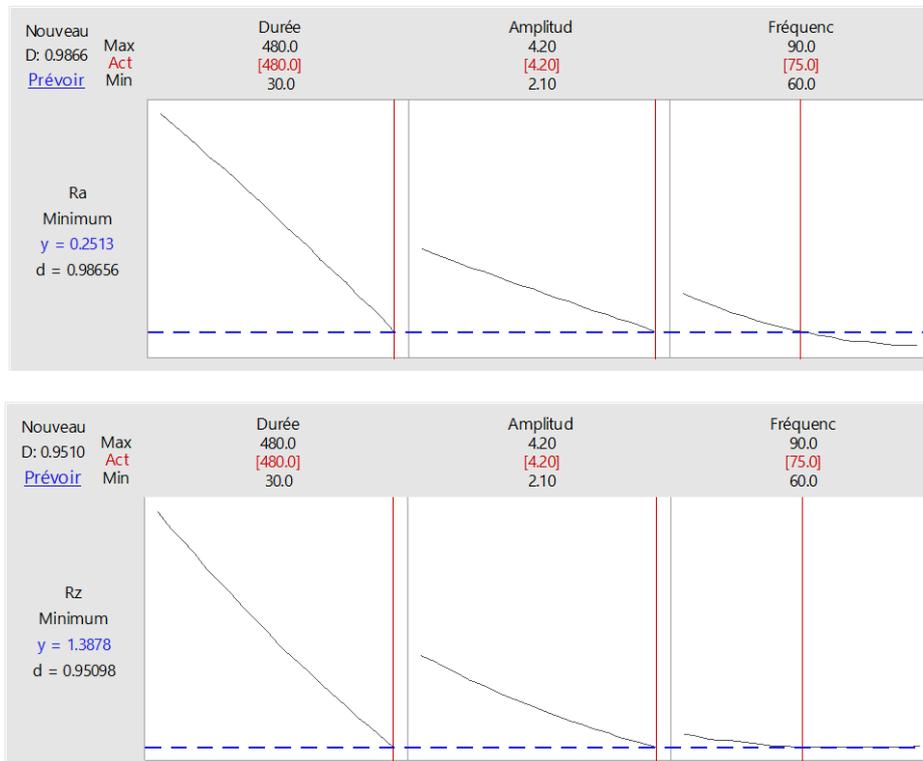


Fig.4.17. Diagrammes d'optimisation de la rugosité avec une fréquence de 75Hz

B. La microdureté :

La microdureté est présentée ici en fonction de deux facteurs et avec le maintien d'une valeur pour le troisième

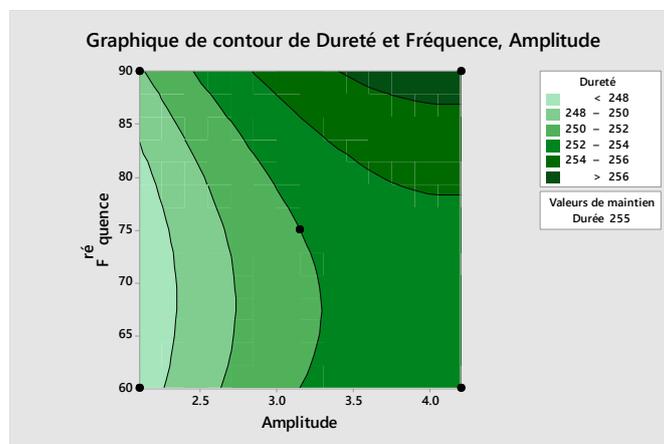
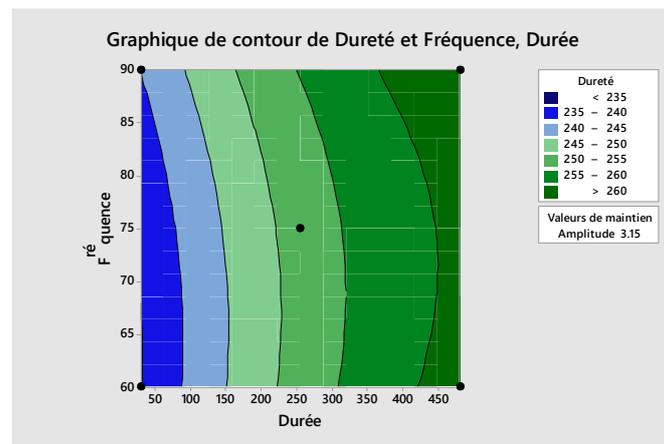
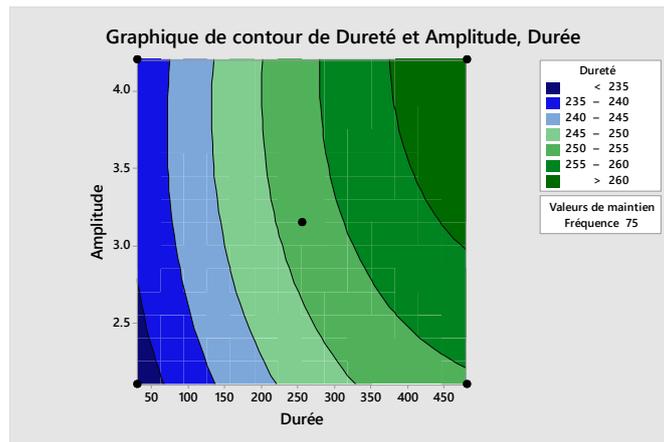


Fig.4.18. Graphiques du contour de la micro-dureté en fonction des différents facteurs

Prenons un exemple dans un cas pratique, où nous sommes limités par une fréquence de 75Hz, on utilise notre modèle qui est valable pour des fréquences comprises dans le domaine [60-90] Hz, par la suite on obtient le graphique du

contour, tout en cherchant la micro-dureté maximale, cette valeur est de 263,875 HV.

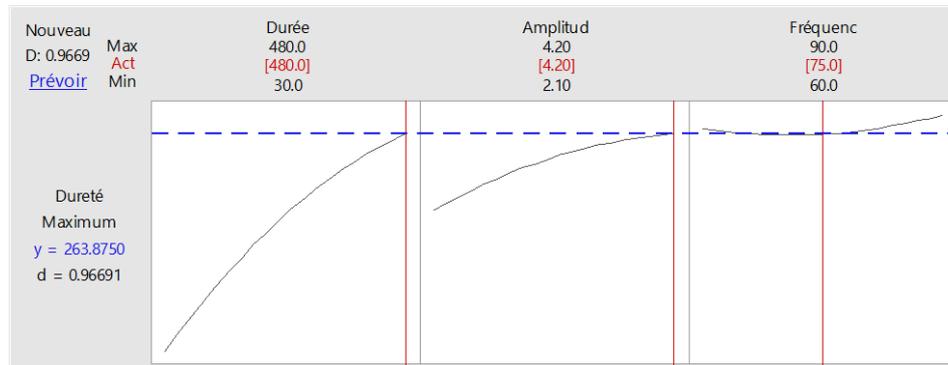


Fig.4.19. Diagrammes d'optimisation de la microdureté avec une fréquence de 75Hz

III.6.1 Surface de réponse

Les surfaces de réponse sont présentées dans les figures suivantes :

A. La rugosité :

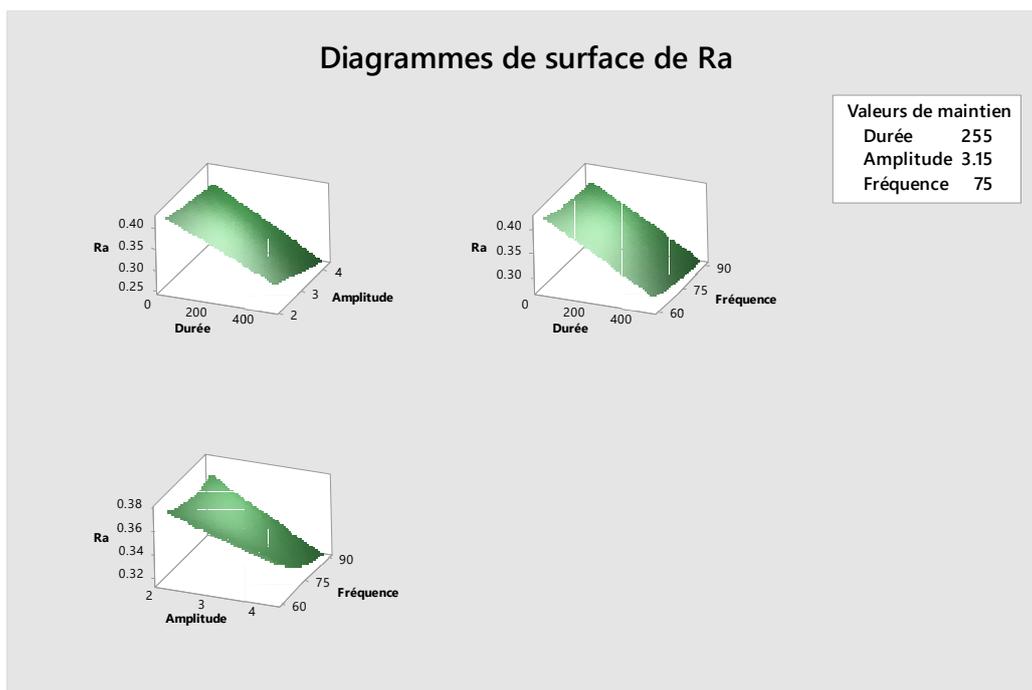


Fig.4.20. Surfaces de réponses pour la rugosité Ra

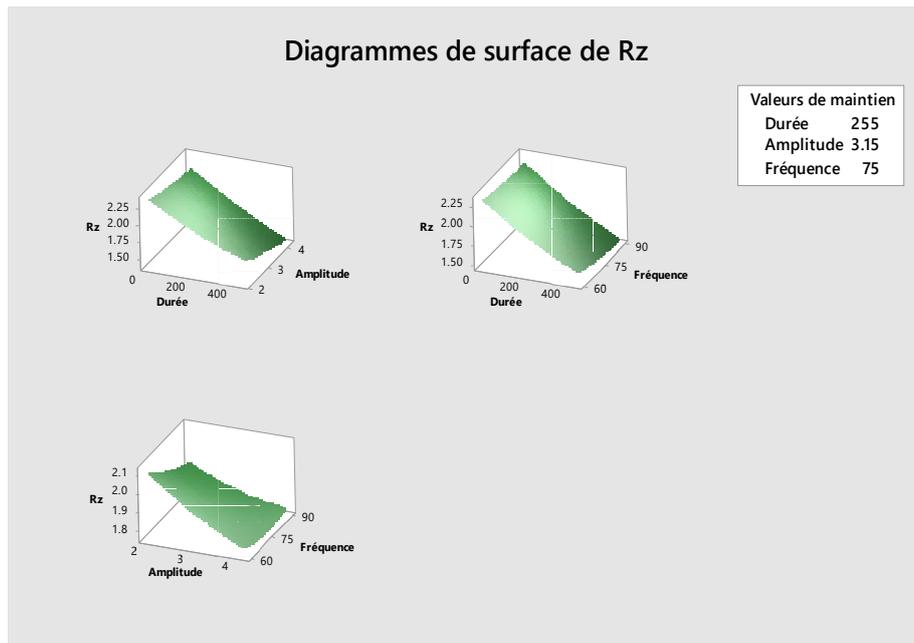


Fig.4.21. Surfaces de réponses pour la rugosité Rz

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

Les surfaces de réponse montrent que les valeurs les plus faibles de la rugosité correspondent à une fréquence et amplitude maximale.

B. La micro-dureté :

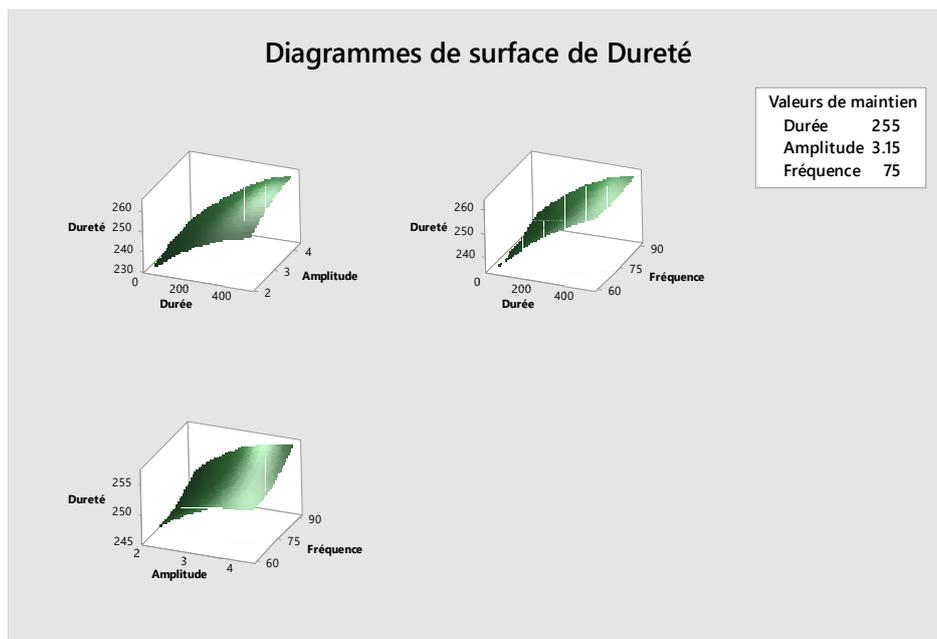


Fig.4.22. Surfaces de réponses pour la micro-dureté

4.2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude expérimentale portant sur l'analyse de la résistance à l'usure, de l'état de surface et la microdureté superficielle du matériau XC10.

L'analyse des paramètres porte sur la rugosité Ra et Rz et la microdureté superficielle en fonction de la durée du traitement de tribofinition (vibro-abrasion), la fréquence et l'amplitude. Elle montre que les 3 facteurs doit être élevée pour avoir un meilleur état de surface et une la microdureté superficielle plus élevée.

La modélisation mathématique de ces paramètres est réalisée en utilisant les plans d'expériences de Box-Behnken à trois facteurs (durée, fréquence, amplitude). Nous obtenons, un coefficient de détermination R^2 (ou de corrélation) de 0.9963 et 0,9909 pour la rugosité Ra et Rz respectivement, ce qui signifie que la valeur du modèle est statistiquement significative.

On n'a pas pu faire les tests d'usure après traitement, à cause de la crise sanitaire l'accès à université des sciences et de la technologie Houari Boumediene - Bab Ezzouar était impossible.

Pour ce qui concerne l'analyse des caractéristiques mécaniques et métallurgiques, La variation de la masse on fonction de types de surfaces montre qu'il y'a une quantité de matière enlevée entre l'état initiale et l'état finale de l'échantillon.

Conclusion générale

Le traitement par tribofinition sert à améliorer les propriétés mécaniques, métallurgiques et géométriques en l'occurrence la rugosité, la dureté, la résistance à l'usure, et la résistance à la corrosion ...etc.

Dans notre étude, pour optimiser la résistance à l'usure, la rugosité de surface et la microdureté superficielle du matériau XC10 par le procédé de tribofinition, il est nécessaire d'appliquer les plans d'expériences à cause de l'impossibilité de réalisation un grand nombre d'essais expérimentaux.

Les plans d'expériences servent à réaliser le minimum d'expériences pour avoir le maximum d'informations. Le choix est porté sur l'application de la méthode du plan de Box-Behnken qui s'adapte mieux à notre cas d'étude car elle permet de connaître l'influence des différents facteurs utilisés à savoir la durée de traitement, la fréquence et l'amplitude sur les réponses qui sont la rugosité de surface (R_a et R_z) et la microdureté superficielle. Le modèle mathématique offre la possibilité de déterminer ces réponses sur tous les points du domaine d'étude.

L'utilisation du logiciel Minitab en appliquant le plan de Box Behnken nous a facilité l'analyse statistique et nous a donné des résultats satisfaisants, à savoir l'analyse de la variance (coefficient de détermination R^2 et test de Fisher) et avec les résultats obtenus de traitement des échantillons nous a permis d'évaluer la qualité du modèle mathématique et dans notre cas les résultats sont satisfaisants.

D'après les résultats sous forme graphique, on note que les effets principaux pour la rugosité et la microdureté superficielle en fonction des différents facteurs selon leur influence sont classés par l'ordre suivant : durée de traitement, amplitude, fréquence.

Les interactions entre les différents facteurs nous montrent que la fréquence a moins d'effets par rapport aux autres facteurs.

Le rôle des graphes de contour était d'élargir les expériences en dehors des points retenus dans le domaine pour avoir plus d'informations avec un minimum d'expériences. Le graphe de surface de réponse nous a donné un résultat optimum pour le choix des facteurs à savoir prendre le maximum de fréquence et d'amplitude avec une durée maximale.

Lors de traitement par tribofinition, la variation de la masse dépend des conditions de traitement (durée de traitement, fréquence, amplitude).

On n'a pas pu appliquer les plans d'expériences sur la résistance à l'usure à cause du manque des résultats des tests d'usure après le traitement, car l'accès à l'université des sciences et de la technologie Houari Boumediene - Bab Ezzouar était impossible.

En fin, dans notre étude on a été limité par trois facteurs, une étude de plus de trois facteurs est recommandée pour avoir un modèle plus précis qui contient des facteurs influents comme la taille et le type des médias, la température de la chambre de travail...

Références

[1] BRUNETIERE, Noël. Introduction à la TRIBOLOGIE [en ligne]. France : Futuroscope, 2016.

[2] Physique et Ingénierie des Surfaces. A. CORNET et J.-P. DEVIL, ISBN : 2-86883 352-7.

[3] P. BOUAZIZ, "Etats de surface." cours de sciences et techniques de mesure.

[4] Introduction au thème « contraintes résiduelles ». A. Simon, Laboratoire de Science et Génie des Matériaux Métalliques, U.A. CNRS 159, I.N.P.L., École des Mines de Nancy.

[5] G. Sundararajan and M. Roy, Hardness Testing, Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition) 2001, Pages 3728-3736.

[6] GEORGES, Jean-Marie. Frottement, usure et lubrification : La tribologie ou science des surfaces. CRNS Editions. 2000. 424p. Sciences et techniques de l'ingénieur. ISBN 2-212- 05823-3.

[7] I.HUTCHINGS, P.SHIPWAY. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. 2nd Edition. Elsevier Science. 2017. 412p. Sciences et techniques de l'ingénieur. ISBN: 978- 0-08-100910-9.

[8] ASHEBY, M. SHERCLIFF, H. et CEBON, D. Matériaux : ingénierie, science, procédé et conception. PPUR. 2010. 700p. ISBN 2889150259.

[9] GILLESPIE, Laroux. Mass Finishing Handbook. New York: Industrial Press Inc. 2006. 494p. Sciences et techniques de l'ingénieur. ISBN 0-8311-3257 4.

- [10] ROSLER Oberflochentechnik GmbH, La technologie de la Tribofinition, Rosler, disponible en ligne sur :
https://be.rosler.com/fileadmin/Files/Prospekte/Gleitschlifftechnik/BE_FR_La_technologie_de_la_Tribofinition.pdf
- [11] FABRICANT D'EQUIPEMENTS DE TRIBOFINITION (ROSLER), disponible en ligne sur :
<https://fr.rosler.com/fr-fr/produits/tribofinition/>
- [12] Laroux K. Gillespie. Mass Finishing Handbook. First Edition 2006.
- [13] CHEMLI Mounir. HARKAS Malek, Amélioration de la qualité de surface Par le procédé de vibor abrasion, 2010.
- [14] J. Goupy and L. Creighton, Introduction aux plans d'expériences-3^{ème} édition Livre+ CD-Rom. Dunod, 2006.
- [15] J. Goupy, Plans d'expériences. Ed. Techniques Ingénieur, 2006.
- [16] B. JACQUOT, Propriétés mécaniques des Biomatériaux utilisés en Odontologie, Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, 2009-2010
- [17] Claudiu Constantin Ionescu. Caractérisation des mécanismes d'usure par tribocorrosion d'alliages modèles Ni-Cr. Autre. Ecole Centrale Paris, 2012. Français.