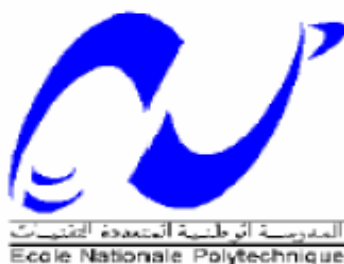


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique
Laboratoire de recherche Génie Mécanique et Développement
Thèse de doctorat en Sciences

Contribution à l'amélioration de la qualité de surface et de la longévité des pièces mécaniques par le procédé de vibro-abrasion

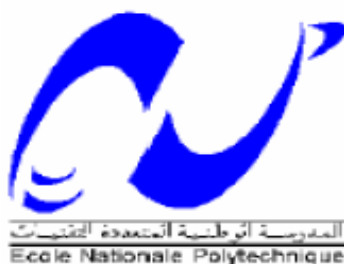
Présentée par SAIDI Djamel

Le 13/12/2018 devant le jury composé de :

Président : Said RECHAK, Professeur, ENP
Directeur : Mohamed BOUAZIZ, Professeur, ENP
Co-directeur : Anatoli Prokofievich BABICHEV, Professeur Emérite,
Université d'Etat Technique du Don, Rostov sur le Don, Russie
Examineurs : Mohamed Amine DJAGHLAL, Professeur, ENP
Djaffar DAHMOUN, Professeur, USTHB
Krimo AZOUAOU, Professeur, USTHB
Boudjema BEZZAZI, Professeur, UMBB
Invités : Brahim GUERGUEB, MAA, ENP
Khaled HAMOUDA, Professeur, USTHB

ENP 2018

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique
Laboratoire de recherche Génie Mécanique et Développement
Thèse de doctorat en Sciences

Contribution à l'amélioration de la qualité de surface et de la longévité des pièces mécaniques par le procédé de vibro-abrasion

Présentée par SAIDI Djamel

Le 13/12/2018 devant le jury composé de :

Président : Said RECHAK, Professeur, ENP
Directeur : Mohamed BOUAZIZ, Professeur, ENP
Co-directeur : Anatoli Prokofievich BABICHEV, Professeur Emérite,
Université d'Etat Technique du Don, Rostov sur le Don, Russie
Examineurs : Mohamed Amine DJAGHLAL, Professeur, ENP
Djaffar DAHMOUN, Professeur, USTHB
Krimo AZOUAOU, Professeur, USTHB
Boudjema BEZZAZI, Professeur, UMBB
Invités : Brahim GUERGUEB, MAA, ENP
Khaled HAMOUDA, Professeur, USTHB

ENP 2018

Remerciements

Louange à ALLAH le Tout Puissant, le Tout-Miséricordieux, le Très-Miséricordieux pour le bien être qu'il m'a prodigué et la volonté et le courage qu'il m'a donné pour l'achèvement de ce travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma très haute reconnaissance au Professeur Mohamed BOUAZIZ de l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP), pour sa disponibilité, ses observations, ses conseils et sa patience.

Je remercie chaleureusement le Professeur Anatoli Prokofievich BABICHEV, de l'Université d'Etat Technique du Don, (Russie), pour l'accueil chaleureux qu'il m'a réservé dans son laboratoire VIBROTECH et pour ses ouvrages qui m'ont été très utiles pour mon travail de thèse. Sans cet accueil, la thèse ne serait probablement pas terminée.

Je remercie également le Professeur Said RECHAK, ENP, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Mes remerciements vont aussi aux examinateurs, le Professeur Mohamed Amine DJAGHLAL, ENP, le Professeur Djaffar DAHMOUN, USTHB, le Professeur Krimo AZOUAOUI, USTHB et le Professeur Boudjema BEZZAZI, UMBB, qui m'ont fait l'honneur d'accepter de faire partie du jury de soutenance. Qu'ils trouvent ici, eux aussi, l'expression de ma sincère reconnaissance.

Je tiens à exprimer ma gratitude à tous mes amis, mes collègues et tous ceux qui m'ont aidé de prêt ou de loin à la réalisation de ce travail et, en particulier, les invités, le Professeur Khaled HAMOUDA, USTHB et Monsieur Brahim GUERGUEB, ENP.

Un grand merci pour Monsieur PHILIPPE le laborantin et tous les membres du laboratoire VIBROTECH.

Mes vifs remerciements s'adressent aussi à Monsieur ELHADJ, Directeur Général de la société ACCESS INDUSTRIE, pour sa courtoisie et l'accueil dans son entreprise.

DÉDICACES

Je dédie cette thèse de doctorat

- à la mémoire de mes très chers défunts parents qui m'ont été une source inépuisable de tendresse, de patience et de sacrifice,
- à ma femme pour sa patience, ses encouragements et son soutien moral,
- à mes très chers enfants,
- à mes frères et sœurs et à toute la grande famille sans aucune exception.
- à mes amis, camarades et collègues.

Table des matières

Nomenclatures

Introduction générale.....	10
-----------------------------------	-----------

Chapitre I :

Fondements théoriques de la technologie de vibro-abrasion.....	13
---	-----------

I.1 Introduction.....	13
I.2 Généralités sur les vibrations mécaniques et les phénomènes ondulatoires	14
I.2.1 Paramètres des systèmes vibratoires	14
I.2.2 Classification et caractéristique des processus vibratoires.....	17
I.2.3 Simulation des milieux granulaires, soumis à l'effet des vibrations.....	19
I.3 Nature et lois du procédé de vibro-abrasion (VA).....	20
I.3.1 Nature du procédé de vibro-abrasion.....	20
I.3.2 Procédé de vibro-abrasion.....	21
I.3.2.1 Description du procédé de vibro-abrasion.....	21
I.3.3 Effets du procédé de vibro-abrasion.....	23
I.3.3.1 Effets de l'impact.....	23
I.3.3.2 Effets de l'abrasion.....	23
I.3.3.3 Effets du martelage.....	23
I.3.4 Phénomènes Caractérisant le procédé de vibro-abrasion.....	24
I.3.5 Principales lois du procédé de vibro-abrasion.....	25
✓ Vitesse d'impact.....	25
✓ Accélération de l'impact.....	26
✓ Force d'impact des médias.....	26
✓ Energie de l'impact.....	27
✓ Pression de contact dans la zone d'impact.....	27
✓ Température dans la zone d'impact.....	28

Conclusion

Chapitre II :

Amélioration de la qualité de l'état de surface et de la longévité des pièces mécaniques.....	30
--	-----------

II.1 Introduction.....	30
II.2 Différents types de traitement mécanique de surface.....	31
II.2.1 Traitement par rotation émergé dans des médias.....	31
II.2.2 Traitement par pistolet pneumatique conventionnel ou à haute fréquence (galetage et martelage).....	32
II.2.3 Traitement par le procédé de brunissage.....	32
II.2.4 Traitement par le procédé de vibro-abrasion.....	33
II.3 Influence du procédé de vibro-abrasion sur l'état de surface.....	34
II.3.1 Description d'une Surface réelle d'un matériau.....	34
II.3.2 Paramètres des surfaces.....	35
II.3.3 Profilométrie 2D.....	36
II.3.3.1 Paramètres classiques.....	36
II.3.4 Analyse d'une surface.....	38

II.3.5 Cas pratiques de l'amélioration de l'état de surface par le procédé de vibro-abrasion...	39
II.4 Influence du traitement de vibro-abrasion sur la tenue en fatigue.....	40
II.4.1 fatigue des matériaux.....	40
II.4.2 Courbe de Wöhler.....	41
II.4.3 Cas pratiques de l'amélioration de la tenue à la fatigue par le procédé de vibro-abrasion.....	42
II.4.4 Amélioration de la tenue à la fatigue par le procédé de vibro-impact.....	43
II.5 Dureté et micro dureté.....	43
II.5.1 Différents essais de dureté	44
II.5.1.1 Essai de dureté Brinell HB.....	44
II.5.1.2 Essai de dureté Vickers HV.....	45
II.5.1.3 Essai de dureté Rockwell HRC.....	46
II.5.2 Cas pratiques de l'augmentation de la dureté et de la micro dureté par le procédé de Vibro-abrasion.....	48
II.6 Contraintes résiduelles.....	49
II.6.1 Niveaux des contraintes résiduelles.....	50
II.6.2 Origines des contraintes résiduelles.....	50
II.6.3 Méthodes de détermination des contraintes résiduelles.....	52
II.6.3.1 Méthode destructive.....	52
II.6.3.2 Méthode non destructive ou méthode d'excitation.....	53
II.6.4 Cas pratiques de la distribution des contraintes résiduelles en profondeur de la couche superficielles après le traitement de vibro-abrasion.....	53
Conclusion	

Chapitre III :

Équipements et accessoires de la technologie de la vibro-abrasion.....56

III.1 Introduction.....	56
III.2 Différents équipements de vibro-abrasion.....	56
III.3 Différents types de vibrateurs	57
III.3.1 Vibrateurs en continu (circulaire, spirale ou linéaire).....	57
III.3.1.1 Vibrateurs linéaires.....	57
III.3.2 Vibrateurs circulaires.....	58
III.3.3 Machines à force centrifuge (centrifugeuses)	62
III.3.4 Machines multibroches type Smuritropie.....	63
III.4 Milieu actif (medias et additifs chimiques).....	65
III.4.1 Medias (abrasifs).....	65
III.4.2 Additifs chimiques.....	67
Conclusion	

Chapitre IV :

Plans d'expériences de Box-Behnken et modélisation mathématique.....72

IV.1 Introduction.....	72
IV.2 Terminologie.....	72
IV.2.1 Différents types de facteurs.....	73
IV.2.1.1 Facteurs continus.....	73
IV.2.1.2 Facteurs discrets.....	73
IV.2.1.3 Facteurs ordonnables.....	73
IV.2.1.4 Facteurs booléens.....	73

IV.2.2 Espace expérimental.....	73
IV.2.3 Domaine d'un facteur.....	74
IV.2.4 Domaine d'étude.....	75
IV.2.5 Points expérimentaux.....	76
IV.2.6 Surfaces de réponse.....	76
IV.2.7 Variables centrées réduites.....	77
IV.2.8 Matrice d'expériences.....	77
IV.2.9 Différents types de plans d'expériences.....	78
IV.2.9.1 Plans de criblage.....	78
IV.2.9.2 Plans de modélisation.....	79
IV.2.9.3 Plans de mélanges.....	80
IV.2.10 Choix du plan.....	81
IV.2.11 Plan de Box-Behnken.....	81
IV.2.11.2 Construction des plans de Box-Behnken.....	81
IV.2.11.3 Nombre des éléments géométriques des cubes et des hyper cubes.....	81
IV.2.11.4 Plan de Box-Behnken pour trois facteurs.....	82
IV.2.11.5 Propriétés du plan de Box-Behnken pour trois facteurs.....	83
IV.2.11.6 Modèle mathématique.....	83
IV.2.11.7 Matrice de calcul.....	84
IV.2.11.8 Matrice d'information.....	84
IV.2.11.9 Matrice de dispersion.....	85
IV.2.11.10 Ecart type des coefficients du modèle prédictif.....	85
IV.2.11.11 Erreur de prédiction.....	86
IV.3 Tests statistiques.....	86
IV.3.1 Test de Fisher.....	86
IV.3.2 Coefficient de détermination R^2	86
IV.3.3 Algorithme.....	87
Conclusion	

Chapitre V :

Procédure expérimentale, résultats et interprétations.....89

V.1 Introduction.....	89
1 ^{ère} partie des essais expérimentaux.....	89
V.2 Description de la méthode expérimentale.....	89
V.2.1 Dispositif expérimental (Vibrateur linéaire).....	89
V.2.2 Essais effectués sur échantillons en XC48.....	90
V.2.2.1 Préparation des essais expérimentaux.....	90
V.2.2.2 Différents types de medias utilisés.....	91
V.2.2.3 Additifs chimiques.....	91
V.3 Mesures de la rugosité (matériau XC 48).....	91
V.4 Tests de dureté HB et de micro-dureté HV.....	96
V.4.1 Tests de dureté HB.....	96
V.4.2 Tests de micro-dureté HV.....	101
V.5 Variation de la masse (Quantité de la matière à enlever).....	102
V.6 Microscopie.....	105
V.6.1 Observation de la microstructure.....	105
V.6.2 Couche durcie.....	106
V.7 Application de plans d'expériences de Box-Behnken.....	107
V.7.1 Préparation de l'expérimentation.....	107

V.8 Construction du plan de Box-Behnken avec le logiciel Mini tab (La réponse Y= Rugosité Ra).....	110
V.8.1 Résultats numériques (statistiques) de la réponse (rugosité) et interprétations.....	111
V.8.2 Résultats graphiques de la réponse (rugosité) et interprétations.....	113
V.8.2.1 Diagramme des valeurs résiduelles.....	113
V.8.2.2 Diagrammes factoriels individuels.....	114
V.8.2.3 Diagrammes factoriels avec l'interaction des facteurs.....	115
V.8.2.4 Graphique de contour.....	116
V.8.2.5 Diagrammes de surface.....	117
V.8.2.6 Diagrammes d'optimisation.....	117
V.9 Construction du plan de Box-Behnken avec le logiciel de Mini tab (La réponse Y= Dureté HB).....	119
V.9.1 Résultats numériques et interprétations.....	120
V.9.2 Résultats graphiques et interprétations.....	122
V.9.2.1 Diagramme des valeurs résiduelles.....	122
V.9.2.2 Diagrammes factoriels individuels.....	123
V.9.2.3 Diagrammes factoriels avec l'interaction des facteurs.....	124
V.9.2.4 Graphique de contour.....	125
V.9.2.5 Diagrammes de surface.....	126
V.9.2.6 Diagrammes d'optimisation.....	127
2 ^{ème} Partie des essais expérimentaux.....	128
V.10 Description de la méthode expérimentale.....	128
V.10.1 Dispositif expérimental (Vibrateur circulaire).....	128
V.10.2 Identification du matériau utilisé (AlCu4MgSi).....	129
V.10.3 Eprouvette d'essai.....	129
V. 10.4 Mesure de la rugosité.....	129
V.10.5 Tests de micro dureté.....	130
V.10.6 Medias.....	131
V.10.7 Additifs chimiques.....	131
V.10.8 Régime de travail.....	131
V.11 Essais de traction simple.....	133
V.12 Essais de fatigue.....	135
V.13 Facies de rupture.....	138
Conclusion	

Conclusion générale et perspectives

Références Bibliographiques

Nomenclatures

Notation	Désignation	U.S.I	Notation	Désignation	U.S.I
F	Fréquence	Hz	F _c	Force centrifuge	N
A	Amplitude	mm	F _v	Force verticale	N
Ω	Pulsation	rad/sec	α	Angle de la masse	degré
T	Durée du traitement	min	ù	Vitesse	m/s
V _p	Vitesse de la particule	m/s	F _{fr}	Force de frottement	N
A	Coefficient empirique	-	ω ₀	Pulsation propre	Rad/sec
M	masse	g	K _v	Coefficient de perte de vitesse	-
R _b	Rayon de la bille	mm	L	Distance	mm
F	Force d'impact	N	K ₂	Coefficient	-
P _{gmax}	Pression de contact	MPa	D _b	Diamètre de la bille	mm
d _b	Diamètre de la bille	mm	Σρ	Somme des rayons de courbure	mm
T	Température	K	C	Capacité thermique	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Γ	Densité	-	K _m	coefficient	-
R	Rayon de l'empreinte	mm	S	surface	mm ²
Ra	Rugosité arithmétique	μm	σ _D	Limite d'endurance	MPa
B	Coefficient	-	A	Allongement à rupture	mm ou %
P	puissance	KW	R _m	Résistance maximale	MPa
σ _e	Limite élastique	MPa	σ _a	Amplitude de contrainte	MPa
K	Coefficient	-	σ _m	Contrainte moyenne	MPa
D	Taille des medias	mm	σ _{max}	Contrainte maximale	MPa
N	Coefficient de poisson	-	ε	déformation	mm ou %
f ₀	Fréquence propre	s ⁻¹	φ	phase initiale	rad
A	Accélération	m/s ²	F _r	Force résultante	N
K	Raideur	N/m	E	Module de Young	MPa
σ _{res}	Contrainte résiduelle	Pa	N	Nombre de cycle	entités
U	Déplacement	m	K _g	Coefficient	-
K	Coefficient	-	V _{ch}	Volume de la chambre	dm ³
E _i	Energie de l'impact	J	V _i	Vitesse de l'impact	m/s

ملخص

الهدف من هذا العمل هو تحسين نوعية حالة السطح ومدة استعمال القطع الميكانيكية من خلال عملية معالجة السطح « Vibro- abrasion » وهي معالجة الحالة السطحية للقطع الميكانيكية الجزء التجريبي الأول مخصص لمعالجة حالة السطح لعينة مكونة من مجموعة قطع من الصلب XC48 و ذلك من أجل تحسين خصائصها الهندسية مع الأخذ بعين الاعتبار الخصائص الميكانيكية والمعدنية. (الاختلاف في الكتلة، الصلابة، الصلابة الجزئية، مراقبة الهيكل)، ويشمل هذا الجزء أيضا تطبيق الخطط التجريبية الثلاثية العوامل Box–Behnken (التردد، السعة، حجم الوسائط) من أجل تحسين الصلابة و حالة السطح الجزء الثاني يتمثل في تنفيذ الاختبارات التجريبية على سلسلة من معيار سبائك الألومنيوم العينات (2017A) (AlCu4MgSi) من أجل تحسين مقاومة التعب

الكلمات المفتاحية: حالة السطح، خشونة، صلابة، صلابة صغيرة، خطط تجريبية

Abstract

The objective of this work is to improve surface finish and longevity of mechanical parts by the tribofinishing process, which is a mechanical surface treatment.

The first experimental part is dedicated to the treatment by tribofinishing process on a set of XC48 steel samples in order to improve the geometrical characteristics taking into account the mechanical and metallurgical characteristics (variation of the mass, hardness, micro-hardness, observation of the structure). This part also involves the application of design of experiment of Box-Behnken to three factors (frequency, amplitude, media size) in order to optimize the response to namely roughness and hardness.

The second part consists of carrying out experimental tests on a series of standardized Aluminum Alloy (AlCu4MgSi) 2017A specimens in order to improve their fatigue strength.

Keywords: Surface condition, Roughness, Hardness, Micro hardness, Design of experiments.

Résumé

L'objectif de ce travail consiste à contribuer à l'amélioration de la qualité de l'état de surface et de la longévité des pièces mécaniques par le procédé de vibro-abrasion, qui est un traitement mécanique de surface.

La première partie expérimentale est dédiée au traitement par le procédé de vibro-abrasion sur un ensemble d'échantillons en acier XC48, afin d'améliorer les caractéristiques géométriques en l'occurrence l'état de surface tout en tenant compte des caractéristiques mécaniques et métallurgiques (variation de la masse, dureté, micro-dureté, observation de la structure). Cette partie comporte aussi l'application des plans d'expériences de Box-Behnken à 3 facteurs (fréquence, amplitude, taille des medias) afin d'optimiser la réponse à savoir la rugosité Ra et la dureté HB.

La seconde partie consiste à réaliser des essais expérimentaux sur une série d'éprouvettes normalisées en alliage d'aluminium (AlCu4MgSi) 2017A dans le but d'améliorer leur tenue en fatigue.

Mots clés : Etat de surface, rugosité, Dureté, micro dureté, Plans d'expériences.

Introduction générale

Actuellement, le développement des techniques dans le domaine de la construction mécanique se caractérise, en grande partie, par la recherche et l'optimisation des méthodes pratiques de modification de la matière première afin d'obtenir des pièces finies avec de meilleures caractéristiques mécaniques, géométriques et métallurgiques.

Réaliser un tel objectif nécessite de chercher et d'intégrer de nouveaux procédés de traitement de surface assurant des résultats performants à savoir, une qualité supérieure de l'état de surface et une meilleure longévité.

Dans l'industrie mécanique, on cherche à allier la partie technique à la partie économique tout en faisant une étude technico-économique afin de choisir la méthode la plus appropriée du point de vue technique en assurant un rendement élevé [20].

La pratique montre que dans l'industrie moderne, il n'existe pas de méthode universelle pour traiter des pièces mécaniques de différents matériaux et de formes géométriques diverses. Chaque méthode a son domaine spécifique d'utilisation rationnelle [103].

Un grand nombre d'accidents catastrophiques dans le domaine de l'aviation, de l'aérospatial et d'une manière générale du génie industriel, a pour origine la rupture due à la fatigue des structures des matériaux. Ce phénomène de fatigue est l'un des problèmes qui a toujours préoccupé les spécialistes en génie mécanique et génie des matériaux. Pour résoudre ce genre de problème, il est nécessaire d'améliorer la qualité de l'état de surface car les fissures issues de la fatigue naissent généralement à la surface, commencent par l'amorçage de fissures, puis se propagent et enfin conduisent à la rupture brutale [40].

En mécanique, la notion de fatigue désigne une rupture des matériaux soumis à une sollicitation cyclique. Ce terme fait intervenir la notion de durée de vie d'un matériau sous un type de sollicitation cyclique donnée.

La destruction des pièces lors de leur fonctionnement commence habituellement par leurs couches superficielles. Ceci s'explique par le fait que les couches superficielles sont les plus sollicitées. D'où la nécessité d'améliorer la qualité de l'état de surface. Evidemment, il est aussi nécessaire d'améliorer les caractéristiques physiques et mécaniques du matériau pour assurer une longévité accrue des pièces travaillant sous contraintes mécaniques [19].

La rupture en fatigue se produit par l'apparition d'une ou de plusieurs petites fissures de taille plus ou moins importante sous l'influence des forces externes qui conduisent à la destruction éventuelle du matériau. Par conséquent, la fatigue des métaux est une évolution dans le temps de

l'affaiblissement progressif de la matière, en raison de l'apparition et la croissance de fissures, sous l'influence des contraintes répétées.

L'endurance des matériaux soumis à une sollicitation cyclique est généralement décrite à l'aide des diagrammes de Wöhler qui présentent l'évolution de la durée de vie d'une pièce en fonction de l'amplitude de la variation de la contrainte [1].

Pour accroître la longévité et la fiabilité des pièces mécaniques, on recourt généralement à des opérations de durcissement des couches superficielles. La vibro-abrasion est un procédé qui permet d'aboutir à ce résultat [52].

De nombreuses études et expériences dans l'industrie ont montré l'efficacité de la méthode de vibro-abrasion en tant que procédé pour améliorer la qualité de l'état de surface, l'arrondissement des angles vifs, la durabilité et la fiabilité des pièces et des systèmes [47].

Le procédé de vibro-abrasion est un procédé mécano-chimique qui a pour but d'enlever les particules infimes du métal et ses oxydes par des milliers de micros coups que reçoit la surface, ce qui engendre une déformation plastique tout en provoquant un durcissement superficiel. Cette méthode a été inspirée de la nature où l'écoulement constant de l'eau transforme les pierres brutes en galets parfaitement polis.

La technique consiste à mettre les échantillons dans la chambre de travail d'un vibreur, mélangés avec des abrasifs (médias) de différents matériaux (acier traité, porcelaine, céramique, plastique, verre etc....), de tailles (petite, moyenne, et grande), et de formes (pyramide, sphère, cône, prisme etc....), dans un environnement chimique contrôlé (ajout d'eau et d'additifs chimiques). Le tout est mis en mouvement vibratoire à basse fréquence [0-50] Hz.

Cette méthode est caractérisée par une grande polyvalence à savoir, une productivité élevée, une assurance d'une meilleure qualité de l'état de surface, une meilleure longévité des pièces mécaniques. Elle est favorable non seulement pour les pièces avec une configuration géométriques simple mais aussi pour les pièces de configuration géométrique très complexes.

L'objectif de notre travail de recherche consiste à améliorer la qualité de l'état de surface et la longévité des pièces mécaniques par le procédé de vibro-abrasion. Dans ce but, on s'intéresse à l'état de surface, aux caractéristiques mécaniques et à la tenue à la fatigue des pièces traitées.

La première partie de mes travaux de recherche consiste à effectuer des traitements de vibro-abrasion sur l'acier XC48, avec différents médias et avec la variation des paramètres influents à savoir, l'amplitude, la fréquence et la durée de traitement, dans le but d'étudier et d'analyser l'influence du traitement sur l'état de surface et les caractéristiques mécaniques.

La deuxième partie porte sur le traitement des éprouvettes cylindriques en alliage d'aluminium (AlCu4MgSi) afin de vérifier leur tenue en fatigue.

Dans cette thèse, on s'intéresse aux points suivants :

1. Lois fondamentales qui régissent le processus de vibro-abrasion
2. Choix de plans d'expériences et élaboration d'un model mathématique.
3. Choix des paramètres et des conditions d'exploitation pour l'amélioration de la qualité de l'état de surface de la couche superficielle.
4. Mise en application des plans d'expériences de modélisation de Box-Behnken.
5. Choix des paramètres (Amplitude, fréquence, durée du traitement) et des abrasifs adéquats pour atteindre une meilleure tenue en fatigue du matériau afin d'accroître la longévité.

Elle est composée de 5 chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux fondements théoriques de la technologie de vibration et de vibro-abrasion. On définit les différents paramètres d'une vibration (fréquence, amplitude, période), types de vibration (harmonique, périodique, aléatoire), et les différents systèmes vibratoires (système à un degré de liberté, système à n degré de liberté), ainsi que les différents procédés de vibro-abrasion (procédés par force centrifuge, par brunissage, par martelage, par galetage etc...) utilisés et leurs paramètres.

Dans **le second chapitre**, on a introduit les caractéristiques mécaniques et géométriques (état de surface, dureté, micro dureté, contraintes résiduelles, tenue en fatigue etc....) ainsi que leurs paramètres.

Le troisième chapitre est réservé à la description des équipements et accessoires de vibro-abrasion (vibrateurs, médias, additifs chimiques) les plus répandus.

Le quatrième chapitre porte sur la modélisation mathématique et les plans d'expériences de Box-Behnken.

Le cinquième chapitre est dédié aux essais expérimentaux et à l'interprétation des résultats obtenus à savoir (rugosité, dureté, micro-dureté, essais à la traction et essais de fatigue etc..., avec l'application des plans d'expériences).

La conclusion générale fait une synthèse des travaux de recherche réalisés.

Chapitre I

Fondements théoriques de la technologie de vibro-abrasion (V-A)

I.1 Introduction

La notion de " la technologie vibratoire " est apparue dans les années 60, comme une conséquence du développement des techniques exploitant les phénomènes d'impact dans le domaine de la construction mécanique, du bâtiment, l'exploitation minière et autres secteurs industriels.

Dans l'ensemble, les vibrations en général sont classées en 4 grands groupes :

- La plage des très basses fréquences (infrasons) f jusqu'à 10 Hz.
- Les vibrations à basse fréquence : $f = 15-100$ Hz.
- Les vibrations de moyennes fréquences : $f = 150-1000$ Hz.
- Les vibrations de hautes fréquences (ultrasons) au-delà de 1000 Hz.

La technologie vibratoire est utilisée dans divers domaines :

- La construction d'appareillage,
- Les constructions navales, aéronautiques, automobiles, etc..,
- Les procédés de revêtement métallique et chimique,
- Les essais de fatigue,
- La métallurgie et la fonderie,
- Le moulage par régénération,
- Le nettoyage des pièces brutes et leur transport (convoyeurs),
- L'estampage et le forgeage,
- La production agricole,
- L'exploitation minière et géologique.

L'utilisation des vibrations à basse fréquence dans la coupe des métaux est une technique peu connue et pas encore maîtrisée.

La technologie vibratoire apporte une solution aux problèmes de la formation et l'évacuation de copeaux dans les procédés d'usinage conventionnel (classique).

Parmi ces procédés, on peut citer la rectification vibratoire qui est une technique de vibro-abrasion et qui se caractérise par une augmentation de la productivité par rapport aux procédés classiques avec de meilleures conditions de travail et garantissant une meilleure qualité de l'état de surface [1].

I.2 Généralités sur les vibrations mécaniques et les phénomènes ondulatoires

Les oscillations mécaniques (souvent appelé vibrations) et les processus ondulatoires sont bien présents en physique et en technologie de vibrations.

Les processus vibratoires et les phénomènes ondulatoires sont caractérisés par beaucoup de processus physiques et technologiques.

Les fondements des phénomènes liés au traitement par vibration sont associés aux lois de mouvements et interaction des particules du milieu actif avec les pièces à traiter modélisé en un point matériel. Ces lois s'appliquent aux phénomènes complexes.

Les modèles mathématiques et physiques sont régis par des équations différentielles du 2nd ordre [1].

I.2.1 Paramètres des systèmes vibratoires

En général, les processus oscillatoires sont caractérisés par les variations finies de l'état de tout système par rapport à une position (ou état) moyenne.

Les vibrations sont par conséquent, des oscillations de tout système mécanique (fluctuation des paramètres de déplacement, vitesse, accélération, pression, etc...).

Dans le domaine de la technologie (y compris la technologie de traitement des métaux) on utilise largement le terme vibration qui reflète en grande partie le concept de vibrations mécaniques, ou des oscillations des systèmes mécaniques.

Le terme de vibration est le plus souvent utilisé dans les cas où les oscillations ont une amplitude relativement faible et une fréquence basse.

Les vibrations sont dites périodiques, si ses paramètres se répètent à des intervalles réguliers [93].

Les caractéristiques les plus importantes du processus d'oscillation (vibrations) sont la fréquence f et l'amplitude A . La première (fréquence) est caractérisée par un nombre d'oscillations par unité de temps, voir Figure I.1.

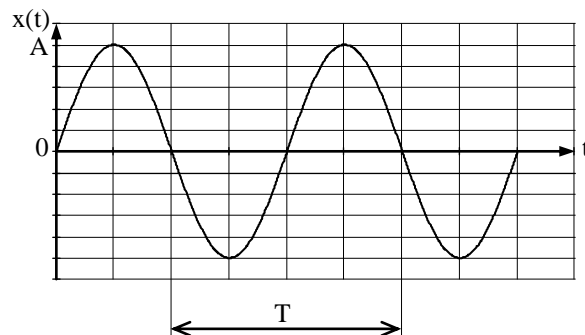


Figure I.1 Caractéristiques fondamentales d'un processus vibratoire

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{I.1})$$

La fréquence est exprimée en Hz (s^{-1}), (1 Hz = 1 une oscillation par seconde).

Les oscillations harmoniques (sinusoïdales), sont définies par l'équation suivante :

$$U(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (I.2)$$

Où :

$U(t)$: paramètre oscillant (déplacement, vitesse, accélération).

A, ω, φ : Paramètres constants.

A : Amplitude (mm).

ω : Fréquence angulaire (pulsation) (rad/s).

φ : Phase initiale d'oscillation (rad).

La période d'oscillations est exprimée par la formule suivante :

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (I.3)$$

La fréquence angulaire (pulsation) est donnée par cette relation :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (I.4)$$

La seconde (amplitude) est décrite comme le plus grand écart par rapport à la valeur moyenne des valeurs variables [1].

La figure I.2 illustre les deux masselottes indépendantes l'une et l'autre montées sur le même axe.

Le réglage angulaire de l'une par rapport à l'autre modifie la masse totale en balourd : d'une intensité maxi quand les deux masselottes sont sur la même position et un équilibre (sans vibration) quand les masselottes sont diamétralement opposées [Int1].

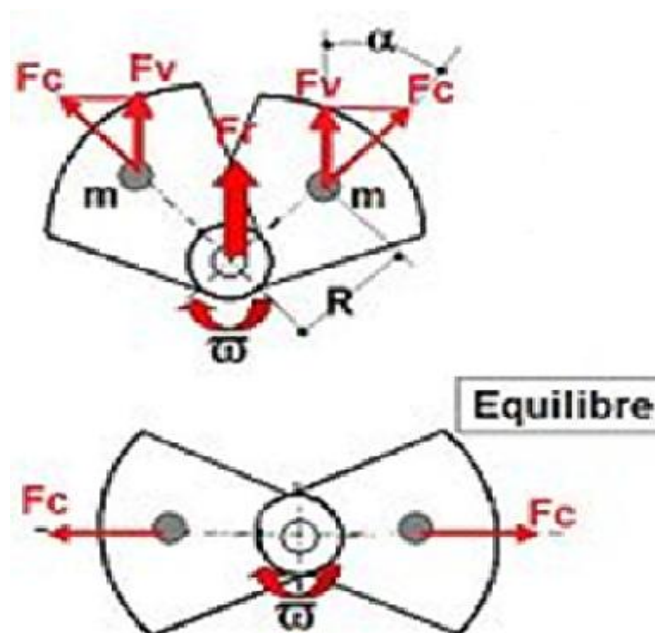


Figure I.2 Différentes positions des masselottes [Int1]

- La force centrifuge :

$$F_c = m \cdot \omega^2 \cdot R \quad (I.5)$$

- la résultante verticale :

$$F_v = F_c \cdot \sin \alpha \quad (I.6)$$

- la force résultante totale sur l'axe :

$$F_r = 2 \cdot F_v ; F_r = 2 \cdot m \cdot \omega^2 \cdot R \cdot \sin \alpha \quad (I.7)$$

Où :

- m est la masse de l'objet étudié ;
- ω est la vitesse de rotation ;
- R est la distance du centre de rotation au centre de gravité de l'objet ;
- α est l'angle de la masse par rapport à l'axe principal.

Pour une représentation visuelle des vibrations harmoniques, on peut utiliser un graphique à secteurs, figure I.3.

La figure I.4 illustre le mouvement de projection d'une bille animée d'une rotation ω uniforme autour de son axe.

Les oscillations de même fréquence mais avec des phases initiales différentes sont déphasées dans le temps.

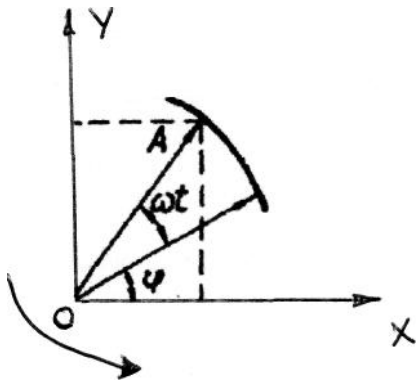


Figure I.3 Graphe circulaire d'une vibration harmonique simple [1]

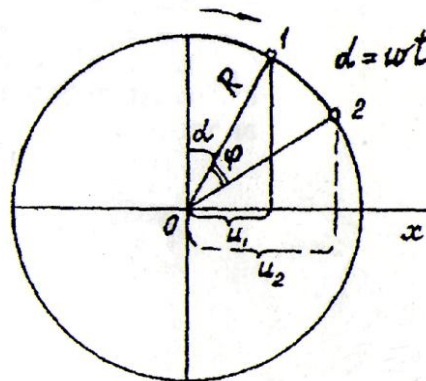


Figure I.4 Rotation d'un point autour d'un axe [1]

Lorsque la vitesse de vibration harmonique $V(t)$ et l'accélération $\gamma(t)$ change aussi avec le temps de manière sinusoïdale avec la même fréquence que celle du mouvement de $U(t)$ (déplacement). Les amplitudes de la vitesse et de l'accélération sont respectivement, $A\omega$ et $A\omega^2$.

La somme des deux oscillations harmoniques avec la même fréquence est :

$$A_1 \cos \omega t + A_2 \cos (\omega t + \phi) = A \cos (\omega t + \gamma) \quad (I.8)$$

L'amplitude A et la phase γ des oscillations résultantes sont données par :

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos\varphi} \quad (\text{I.9})$$

$$\text{tg}\gamma = \frac{A_2\sin\varphi}{A_1 + A_2\sin\varphi} \quad (\text{I.10})$$

I.2.2 Classification et caractéristiques des processus vibratoires

I.2.2.1 Vibrations libres

Les vibrations mécaniques qui se produisent sous l'influence des forces, surviennent dans des systèmes vibratoires, appelé oscillations libres. Les oscillations libres ont lieu en l'absence de forces extérieures.

Suite à l'étude des processus oscillatoires, on rencontre le concept de forces quasi-élastiques. Il est à noter que les oscillations harmoniques d'un corps surviennent lorsqu'elles ont soumises à des forces quasi-élastiques [1, 95, 96, 97].

Les forces quasi-élastiques (de rappel), par leur nature, ne sont pas élastiques, mais leur amplitude est proportionnelle au déplacement du corps de sa position d'équilibre. Les forces quasi-élastiques sont toujours dirigées vers la position d'équilibre. L'expression de la force quasi-élastique prend la forme suivante :

$$F = -k \cdot u \quad (\text{I.11})$$

D'où :

k - raideur,

u – déplacement, le signe moins indique le sens inverse du vecteur de force et de déplacement.

La force quasi-élastique et la force de frottement sont proportionnelles à la vitesse \dot{u} :

$$F_{\text{fr}} = -r\dot{u} \quad (\text{I.12})$$

Lorsque les oscillations sont amorties :

$$u = Ae^{\delta t} \sin(\omega t + \varphi) \quad (\text{I.13})$$

Où : δ - Facteur d'amortissement ; $Ae^{\delta t}$ - Amplitude instantanée, e - base du logarithme naturel;

$$\delta = \frac{r}{2m} ; \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad (\text{I.14})$$

Où r - coefficient de résistance, m - masse du corps vibrant, k - raideur;

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{I.15})$$

Où : ω_0 - pulsation propre ;

Les oscillations sont dites poly harmonique si elles peuvent être présentées sous la forme de deux ou de plusieurs oscillations harmoniques avec des fréquences qui se trouvent ensemble dans un rapport rationnel.

I.2.2.2 Vibrations forcées

Contrairement aux vibrations libres, les vibrations forcées sont des oscillations qui sont engendrées par l'action de forces extérieures.

Elles sont caractérisées pour des systèmes non autonomes.

Le phénomène de résonance se produit lorsque la fréquence de la force excitatrice coïncide avec la fréquence propre du système mécanique.

Parfois le phénomène de résonance est recherché pour l'augmentation d'un signal sonore, visuel ou au contraire on veut l'éviter dans le cas des vibrations mécaniques.

Il existe des méthodes de création de vibrations de résonance ou, à défaut, de les éteindre.

Il existe différents modes d'oscillations de résonance: technologique, de la fabrication, de la machinerie, de l'équipement des transports, et des mécanismes, etc...

Les oscillations auto-entretenues ne sont possibles que dans des systèmes non conservatifs.

L'origine des vibrations auto-excitées est la non-linéarité des forces dissipatifs en particulier le frottement de Colomb.

Si les non-linéarités sont faibles, les vibrations sont quasi-harmoniques [1, 98, 99].

Le système est dit linéaire s'il satisfait le principe de superposition:

$$L(\alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2) = \alpha_1 L u_1 + \alpha_2 L u_2 \quad (\text{I.16})$$

D'où:

- L : operateur différentiel
- α_1, α_2 : constantes
- u_1, u_2 : variables (déplacement)

Lorsque le système ne satisfait pas la condition est appelé non linéaire.

Si les propriétés du système ne changent pas durant la période de temps considérée de temps, le système est appelé stationnaire, et par conséquent les oscillations sont dites stationnaire.

Lorsque les propriétés du système varient dans le temps, il est appelé système non-stationnaires, les processus qui se produisent dans les systèmes stationnaires sont décrits par des équations différentielles à coefficients constants, les processus non stationnaires dans les systèmes sont décrits par des équations différentielles à coefficients variables.

Dans les systèmes autonomes, le processus oscillatoire se produit sans l'apport de l'énergie extérieure ou par l'énergie apportée au système par une excitation initiale.

Le système est dit conservatif si son énergie mécanique totale reste constante, dans le cas contraire (non conservatif), le système est dit dissipatif (amortie).

I.2.3 Simulation des milieux granulaires, soumis à l'effet des vibrations

Au cœur de nombreux processus liés à la technologie des vibrations, l'interaction des particules (médiats) et des pièces à traiter, représentés comme un système de solides soumis à un effet d'oscillation.

Les Medias sont caractérisés par le type de matériaux (acier traité, plastiques, porcelaine, céramiques), par la formes géométriques (sphériques, cylindriques, pyramidales, coniques, prismatiques), par la taille (petite, moyenne, grande) et par la densité.

Dans ce cas, les phénomènes associés à la technologie vibratoire sont modélisés par le comportement du milieu granulaire.

La cohésion entre les éléments en contact dans le milieu granulaire change en fonction de l'intensité vibratoire, le milieu tend à se condenser, ou au contraire vers expansion.

La description mathématique du comportement des particules dans les milieux granulaires est régie par les équations différentielles le plus souvent à coefficients constants.

La modélisation du traitement par vibrations se base sur les hypothèses suivantes :

- le traitement des pièces se fait dans la chambre de travail de forme rectangulaire, toroïdale ou spirale de section ronde ou en V.
- La chambre de travail remplie de pièces à traiter et de medias nécessaires est soumise à des vibrations.
- L'intensité de ces dernières doit être telles quelles garantissent un mouvement circulaire de la masse du milieu et un mouvement vibratoire des particules avec la variation de la densité de toute la masse vibrante.

L'indicateur le plus important est la force d'impact des particules du milieu avec les pièces à traiter.

Les fondements des processus de la technologie des vibrations reposent sur l'interaction des particules du milieu actif avec les pièces à traiter modélisés comme des solides soumis à des excitations cinématiques.

La particularité du mouvement du milieu granulaire sous l'action des vibrations est la dépendance de la vitesse des particules en fonction de leur position par rapport aux parois vibrantes [1, 46].

On a déterminé expérimentalement qu'en régime de travail avec répercussion des medias, la variation des vitesses des particules en fonction de la distance par rapport aux parois de la chambre de travail est donnée par la formule empirique suivante :

$$V_i = V_{ch} \times k_v; k_v = a^L \approx 0,9877^L \quad (I.17)$$

Où :

V_{ch} : Vitesse de la chambre de travail

K_v : Facteur de perte de vitesse

a : Valeur constante

L : Distance de la paroi de la chambre de travail jusqu'au point de la particule.

Suite aux effets de vibrations, le milieu granulaire peut se présenter en deux états:

- Élastiques
- Plastiques

À l'état élastique le milieu se déforme suite aux déformations des particules.

La déformation plastique est caractérisée par le cisaillement des couches (surface de glissement). Dans cette zone on peut admettre que les médias sont incompressibles.

Par hypothèse simplificatrice, le milieu granulaire est supposé formé par un ensemble de corps absolument rigides, homogènes et de même diamètre.

Sous l'action des vibrations sur le milieu on suppose aussi que l'impact entre les particules est quasi élastique.

La figure I.5 représente un modèle utilisé pour la description du comportement des particules du milieu et des pièces traitées dans la chambre de travail de forme rectangulaire et de section en V.

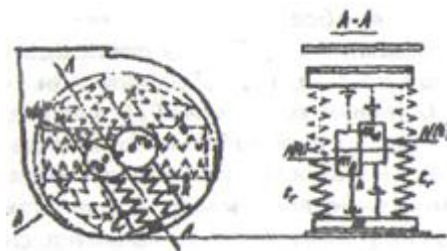


Figure I.5 Modèle du mouvement des particules et des pièces dans la chambre de travail

[1]

I.3 Nature et lois du procédé de vibro-abrasion

I.3.1 Nature du procédé de vibro-abrasion

Le traitement par vibro-abrasion (VA) est un procédé mécano-chimique qui a pour but d'enlever les petites particules de métal de la couche superficielle tout en provoquant des déformations plastiques des aspérités due à la collision mutuelle des particules avec la surface des pièces traitées sous l'effet des vibrations de la chambre de travail.

Les forces d'interaction entre les médias et la surface traitée sont réalisées sous des angles compris entre (0° - 90°).

Si dans le cas où on injecte dans la composition de l'eau industrielle et d'additifs chimiques, on la considère comme une méthode combinée (mixte), qui appartient à un groupe de méthodes de traitement mécano-chimique. La (VA) fait partie des méthodes dynamiques de traitement.

En général, la (VA) est caractérisée par les phénomènes physico-chimiques suivants:

1. L'action dynamique des medias (impacts multiples des particules avec la surface des pièces à traiter).
2. L'interaction mécano-chimiques du milieu des matériaux des pièces.
3. Acoustiques des ondes de choc.

Les deux premiers phénomènes génèrent des variations principalement dans la surface et dans la couche superficielle. Le processus d'interaction et de glissement des particules du milieu actif est accompagné d'une déformation élasto-plastique dans la couche superficielle, et de phénomènes thermiques, d'adhésions et de diffusions, et qui dépend de la composition des medias et des caractéristiques du matériau et de l'interaction chimique [1].

Les ondes acoustiques quant à elles ont une influence surtout sur la structure du matériau et le niveau de contraintes résiduelles.

La nature des phénomènes mécaniques, et physico-chimiques du procédé (VA) dépend des points suivants :

- 1) Propriétés physiques des particules;
- 2) Caractéristiques des matériaux des pièces à traiter ;
- 3) Paramètres dynamiques du processus de traitement;
- 4) Composition, propriétés et volume du fluide dans la chambre de travail;
- 5) autres facteurs tels que : rapport des quantités d'abrasifs et pièces, le taux de charge et degré de remplissage du fluide dans la chambre de travail, etc....

I.3.2 Procédé de vibro-abrasion

I.3.2.1 Description du procédé de vibro-abrasion

La vibro-abrasion intègre les techniques mécaniques de traitement de surfaces, en particulier le polissage et l'ébavurage, les ingrédients sont les médias abrasifs (céramique, porcelaine, plastique, métaux), les additifs chimiques ainsi que les équipements qui génèrent les mouvements (vibrateurs, centrifugeuses...).

Ce traitement est l'exploitation industrielle des phénomènes de friction ou vibro-abrasion avec des pièces et abrasif (media) dans un environnement chimique contrôlé.

Les pièces et les média sont mis en vibration dans une chambre de travail qui fait partie du vibrateur sous l'action de deux mouvements (mouvement rotative lents et un mouvement vibratoire) avec ajout d'eau et d'additifs chimiques pour l'obtention de la finition demandée.

Sous l'effet des vibrations, le traitement se produit dans toutes les zones de la chambre de travail, ce qui assure un traitement uniforme de toutes les surfaces en recevant un grand nombre de micro-coups dans différents sens qui contribue à éliminer les endommagements sur la surface des pièces et la couche superficielle (changement des paramètres géométriques et physico-mécaniques des couches superficielles) à l'aide des medias.

Dans la majorité cas, le déroulement du traitement par vibro-abrasion est obtenu avec une alimentation continue ou intermittente de l'additif chimique et des abrasifs.

L'additif chimique assure l'extraction des produits d'usure qui se situent sur la surface des pièces et des particules du milieu actif. L'arrosage des pièces, contribue à la séparation et à la distribution d'uniforme dans le milieu actif. Il est aussi possible de régler l'intensité du traitement en changeant le niveau du liquide (additif+eau) dans la chambre de travail.

La composition de l'additif chimique permet également de régler l'intensité du procédé et la qualité de la surface usinée.

L'intensité du traitement par vibro-abrasion dépend des paramètres suivants :

- le régime et la durée du traitement (A, f, t).
- les caractéristiques et les tailles des particules du milieu actif.
- le volume de la chambre de travail et le degré de son remplissage.
- les propriétés mécaniques du matériau.
- La nature du mouvement de la chambre de travail (vitesse et accélération, force et l'énergie des micro-impacts, pressions de contact, températures qui apparaissent sur la zone de l'action des micro-coups).

Le procédé de vibro-abrasion est un procédé mécano-chimique qui a pour but d'enlever les petites particules du métal et ses oxydes sur la surface à traiter, il provoque ainsi une déformation plastique de la couche superficielle des éléments en contact, voir figure I.6 [1, 88].

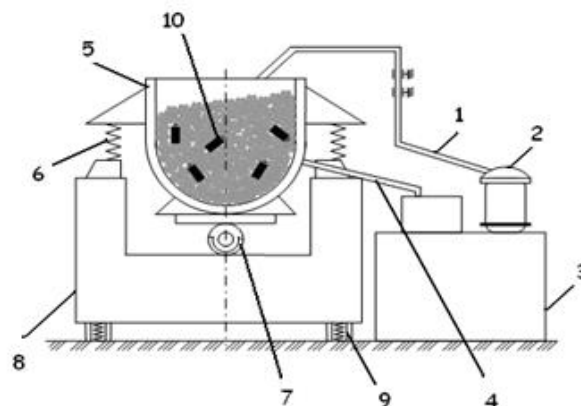


Figure I.6 Schéma du vibreur

- 1: Tube pour le fluide (eau et additif chimique).
- 2 : Pompe.
- 3 : Réservoir.
- 4 : Tube pour épanchement.
- 5 : Chambre de travail.
- 6 : Ressort.
- 7 : Moteur.
- 8 : bâti.
- 9 : Amortisseur.
- 10 : Pièces à traiter.

I.3.3 Effets du procédé de vibro-abrasion [42, 61]

Il existe 3 effets principaux :

A. Effets de l'impact

Dans les traitements de surfaces par impacts, le choix du type de projectile est prépondérant dans le résultat obtenu, en effet, c'est le grain projeté qui joue le rôle primordial. C'est l'outil majeur auquel on doit s'intéresser en priorité. Sa forme et sa masse sont déterminantes.

Autant avec un abrasif dur et angulaire on agresse la surface de la pièce à chaque impact à l'image d'un coup de pic, c'est l'abrasion.

Autant avec un abrasif dur et sphérique, on martèle la surface de la pièce à chaque impact à l'image d'un coup de marteau, c'est le martelage.

Dans le premier cas, le résultat obtenu sur la surface est un accroissement de la rugosité par ouverture de la structure superficielle donnant un aspect plus ou moins tourmenté et terne.

Dans le second cas, le résultat obtenu est un écrasement de la structure superficielle, ayant pour conséquence directe de refermer les micropores, en modifiant la rugosité de la surface, lui donnant un aspect satiné brillant. On constate que suivant la forme du grain d'abrasif utilisé, des résultats différents peuvent être obtenus et ainsi orienter le traitement par impacts soit:

- vers la préparation de surface,
- vers le nettoyage et la finition de surface,
- vers le traitement mécanique de surface.

L'effet induit par l'impact de l'abrasif, engendre ainsi des techniques très différentes.

B. Effets de l'abrasion

L'abrasion peut avoir, suivant la dureté du projectile utilisé, deux effets principaux sur une surface, qui sont:

- L'attaque en profondeur du projectile pour retirer un contaminant très adhérent et qui présente une certaine plasticité (non cassant). C'est le décapage.
- La création d'une rugosité plus ou moins importante, afin d'augmenter la surface de contact, par un profil micro-géométrique favorable à une meilleure adhérence du futur revêtement. C'est la préparation de surface.
- Outre l'utilisation des abrasifs durs qui modifient sensiblement la surface des pièces traitées, on peut utiliser des abrasifs angulaires mais très doux (végétaux ou plastiques). Ces derniers, permettent de nettoyer les pièces sans agresser leur surface, pour des opérations de retrait de colle, de vernis ou résidus divers. C'est le nettoyage.

C. Effets du martelage

Le martelage est recherché pour ses actions nombreuses qui sont:

- L'enlèvement des contaminants dans certains cas bien précis comme en fonderie ou en forge par exemple, où ce procédé est utilisé:
 - pour éliminer le sable qui recouvre après démoulage certains produits. C'est le dessablage.
 - pour casser des plaques de calamine résistantes avant un traitement par grenailage traditionnel. C'est le décalaminage.

- La modification du profil micro-géométrique de la surface, par compactage (déformation superficielle de la matière) de la part du subjectile. A faible intensité, le résultat obtenu sera essentiellement esthétique. C'est le satinage.
- La modification de la géométrie d'une pièce, par fluage de la matière, pour obtenir un renforcement de ses parties fragiles (angles vifs ou filets), l'élimination des traces d'outils ou l'écrasement des bavures. C'est le matage.
- La suppression d'excédents de matière, laissés par les opérations d'usinage ou de moulage, à condition qu'ils soient cassants. C'est l'ébavurage.
- La création en surface, de contraintes résiduelles de compression, provoquées par la déformation plastique du matériau constituant le substrat. Cette action, obtenue avec une plus forte intensité, a pour but d'augmenter la qualité d'une pièce, notamment sa résistance à la fatigue, et par voie de conséquence, sa durée de vie. C'est la précontrainte.
- La déformation de la pièce, par la libération partielle des forces prisonnières de précontrainte. Cette déformation contrôlée, ne sera possible, que si le matériau impliqué est ductile et que le produit traité est de faible section, comme les tôles ou les lames. C'est le formage.

I.3.4 Phénomènes Caractérisant le procédé de vibro-abrasion

En général la méthode de V.A est caractérisée par les phénomènes suivants :

- L'impact dynamique du milieu actif est sous forme de plusieurs collisions des particules sur la surface des pièces à traiter.
- L'interaction mécanique du milieu actif et du matériau.
- Le choc acoustique sous l'explosion des ondes.

Les deux premiers phénomènes causent principalement des changements à la surface et surtout sur la surface des couches minces, à la différence des chocs acoustiques, ce phénomène est caractérisé par l'influence des ondes sur la structure du matériau, ainsi qu'un changement de niveau des contraintes résiduelles.

Le traitement par VA représente un ensemble complexe des phénomènes mécano-physico-chimique, la nature de ces phénomènes caractérise :

- Les propriétés physiques du milieu actif (abrasifs, granulations...).
- Les caractéristiques du matériau de la pièce à traiter.
- Les paramètres dynamiques du processus qui reflètent le régime du traitement.
- La composition, les propriétés et la qualité de l'additif chimique.

Il existe deux types de mouvement, un mouvement de vibration a basse fréquence et mouvement de rotation lent.

Dans ce processus, l'échantillon prend plusieurs positions dans le milieu actif dans le but de lui assurer un traitement uniforme sur toute la surface. L'échantillon reçoit un grand nombre de micro coups dans plusieurs directions.

L'additif chimique rajouté a pour but d'améliorer l'intensité du traitement et la qualité de surface. Le fluide joue aussi le rôle de refroidisseur.

Intensité du traitement dépend aussi du régime, de la durée du traitement, des caractéristiques et des dimensions des medias, du volume de la chambre de travail, du degré de remplissage et des caractéristiques mécaniques des matériaux à traiter.

Les phénomènes physiques du procédé de VA sont composés de plusieurs caractéristiques :

- L'ensemble de micro impact que les particules reçoivent dans des différentes directions à pour but d'assurer un effet uniforme et complet sur les surfaces des pièces, et ce en dépendance des caractéristiques des medias et de leurs compositions.
- Provoquent des accélérations variables au cours du processus.
- L'action chimique et les substances actives causent le processus physico-chimique.
- Le micro usinage et la déformation plastique superficielle sont des éléments de base des nombreuses méthodes et des procédés mécaniques pour le traitement des métaux [1].

I.3.5 Principales lois du procédé de vibro-abrasion [1]

L'intensité du traitement par vibro-abrasion dépend du régime du traitement à savoir l'amplitude, la fréquence, la durée du traitement, la taille et la forme des particules, et de plusieurs autres paramètres. Les pièces sont caractérisées par leur milieu d'utilisation, les conditions de travail, et le lieu d'exploitation.

Ces paramètres sont caractérisés par :

- La force de l'impact
- La vitesse et l'accélération des particules.
- La pression de contact.
- La température dans la zone de l'impact.

❖ Analyse des caractéristiques quantitatives de ces paramètres

Nous savons que l'amplitude des oscillations dans la plupart des cas varie entre 0,5 – 5 mm, avec une fréquence entre 15 - 50 Hz.

➤ Vitesse d'impact des particules et des pièces traitées

La vitesse d'impact varie entre 0,5 – 1 m/s, elle peut être déterminée par la formule empirique suivante:

$$V_p = V_{ch} \times K_v \quad (I.18)$$

Où

$$K_v = a^L \approx 0.9877^L$$

$$V_{ch} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (I.19)$$

$$V_x = A_x \cdot \omega \cdot \sin \omega t \quad (I.20)$$

$$V_y = A_y \cdot \omega \cdot \cos \omega t \quad (I.21)$$

$$V_{ch} = A. \omega; \quad \omega \approx 2\pi f = \frac{2\pi N}{60} \approx \frac{N}{10};$$

$$V_{ch} \approx A. N/10 \quad (I.22)$$

Où :

- V_{ch} : Vitesse du déplacement de la chambre du travail. (m/s)
- K_v : Coefficient de perte de vitesse.
- A : Amplitude. (mm)
- ω : Vitesse angulaire d'oscillation. (rd/s)
- t : Temps. (s)
- A_x et A_y : Valeurs de l'amplitude d'oscillation selon les coordonnées x et y. (mm)
- a : Coefficient empirique.
- L : Distance de la paroi de la chambre de travail jusqu'au point de la particule. (mm)

➤ Accélération des particules

En général, l'accélération des particules dans le traitement des métaux par vibro-abrasion varie entre 15 - 150 m/s².

Elle peut être calculée par la formule suivante:

$$a_x = A_x. \omega^2 \quad (I.23)$$

$$a = A. \omega^2. \sin(\omega t + \varphi) \quad (I.24)$$

➤ Force d'impact des particules et des pièces à traiter

La force de l'impact des particules et des pièces à traiter d'après la méthode du traitement des métaux par vibro-abrasion dépend du régime vibratoire et des caractéristiques des particules, généralement elle varie entre 5 – 50 N.

- **Pour le traitement des pièces fixées :**

$$F_f = 6 \sqrt{\frac{m V^2 \sigma_s R_b K_m K_g}{K_2 (1 - \frac{3}{8} K^2)}} \quad (I.25)$$

- **Pour le traitement des pièces libres :**

$$F_l = 6 \sqrt{\frac{m V^2 \sigma_s R_b K_m K_g}{K_2}} \cdot B \quad (I.26)$$

Avec :

m : Masse des particules. (g)

V : Vitesse de l'impact. (m/s)

R_b : Rayon de la bille. (mm)

σ_s : La limite d'élasticité des matériaux des pièces à traiter. (daN/mm²)

K_2 : Coefficient caractérisant l'impact répétitif des particules dans un seul endroit.

K_m : Coefficient caractérisant la simultanéité d'action des particules.

K_g : Coefficient caractérisant les propriétés d'amortissement du milieu actif pendant l'impact dissipatif.

K : Coefficient de régénération (récupération).

B : Coefficient qui détermine le niveau énergétique de l'impact et du déplacement des pièces chargées librement.

➤ **Energie de l'impact**

Pour déterminer l'énergie de l'impact qui est exprimée en (J), on utilise la formule suivante :

$$Ei = \frac{HB d^4}{6 D_b} \quad (I.27)$$

Avec :

HB : Dureté du matériau des pièces à traiter.

d : Diamètre de l'empreinte. (mm)

D_b : Diamètre de la bille. (mm)

➤ **Pression de contact d'Hertz dans la zone de l'impact**

La pression dans la zone de l'impact est donnée par l'équation suivante :

$$P_{gmax} = \sigma \max = \frac{3 F}{2 \pi a b} \quad (I.28)$$

Avec :

F : Force de l'impact. (N)

a, b : Dimension de demi-axe de la surface de contact.

P_{gmax} : Pression de contact. (MPa)

a et b peuvent être déterminés par la formule suivante :

$$a = v_1 \cdot \left[\frac{3 F}{8 \sum \rho (v_1 + v_2)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (I.29)$$

$$b = v_2 \cdot \left[\frac{3 F}{8 \cdot \sum \rho (v_1 + v_2)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (I.30)$$

Avec :

ν_1 et ν_2 : Coefficients de (Poisson) d'élasticité qui caractérisent les propriétés d'élasticité du matériau des objets de l'impact.

$\Sigma\rho$: Somme des valeurs des rayons de la courbure principale des surfaces en contact.
(mm)

Le traitement par vibro-abrasion est modélisé par le contact de surface qui peut être sphérique dans le cas où l'impact est perpendiculaire $a=b$, si l'impact est sous un angle α , le contact sera sous forme elliptique:

$$a = 0,677 (F \cdot d_b)^{\frac{1}{3}} \quad (I.31)$$

d_b : Diamètre de la bille (particule du milieu actif). (mm)

➤ **Température dans la zone de l'impact**

La température moyenne dans la chambre de travail en général ne doit pas excéder 30° à 40 ° C, et au niveau de la surface de la pièce entre (500 à 700) ° C.

Elle est exprimée par la formule suivante :

$$T = \frac{2 \cdot m_1 \cdot V_p^2}{427} \cdot \frac{R(1-K^2) \cdot K_g \cdot K_m}{24 \cdot C \cdot \gamma \cdot n \cdot r} \quad (I.32)$$

Avec :

V_p : vitesse des particules dans le milieu actif. (m/s)

R : Rayon de particule. (mm)

γ : Densité.

r : Rayon de l'empreinte. (mm)

n : Coefficient de proportionnalité.

C : Capacité thermique massique (spécifique). ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)

K : Coefficient de régénération (récupération).

K_m : Coefficient caractérisant la simultanéité d'action des particules.

K_g : Coefficient caractérisant les propriétés d'amortissement du milieu actif.

L'énergie de l'impact des particules avec les pièces traitées, est le paramètre le plus important de l'intensité du processus. Elle est déterminée par le régime vibratoire (amplitude, fréquence).

Le transfert thermique augmente avec l'accroissement de l'intensité des vibrations et de la vitesse de circulation du milieu [1].

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des notions fondamentales sur les vibrations mécaniques, les phénomènes ondulatoires, les paramètres des systèmes vibratoires et la classification des caractéristiques du processus vibratoire, par la suite nous avons défini le procédé de vibro-abrasion qui est l'un des procédés du traitement mécanique des surfaces par déformation plastique superficielle le plus utilisé, car cette technique s'applique beaucoup plus à des fins multiples et aussi pour des pièces de formes géométriques simples et complexes afin d'améliorer leurs caractéristiques géométriques, mécaniques et métallurgiques.

Nous avons décrit les différents effets du procédé de vibro-abrasion en l'occurrence, l'effet de l'impact, l'effet de l'abrasion et l'effet de martelage.

Nous avons cité aussi les différents paramètres de cette méthode, nature, et lois empiriques, en l'occurrence la vitesse d'impact, l'accélération, la force d'impact, la pression et la température dans la zone d'impact.

Chapitre II

Amélioration de la qualité de l'état de surface et la tenue en fatigue par le procédé de vibro-abrasion

II.1 Introduction

Dans ce chapitre on s'intéresse aux différents types de traitements mécaniques de surface, ces types de traitements qui ont pour objectif d'améliorer la qualité de l'état de surface et la tenue en fatigue des matériaux.

Après les analyses statistiques sur les causes de la défaillance des composants mécaniques, on constate que, dans la grande majorité des cas, la défaillance est due à la rupture de la pièce avec un amorçage en surface.

La qualité de la couche superficielle est donc un facteur essentiel pour l'intégrité mécanique des structures mécaniques. En effet, les zones superficielles sont souvent les plus sollicitées à causes des concentrations de contraintes imposées par la géométrie d'une pièce mécanique qui possède des trous, des entailles et autres discontinuités géométriques.

En plus, à l'exception des sollicitations mécaniques par contact, les contraintes d'origines mécaniques et thermomécaniques sont très souvent maximales en surface, on peut citer la flexion et la torsion, et le choc thermique. Même pour une sollicitation en traction, les rugosités en surface génèrent une concentration de contraintes locales qui fait augmenter le niveau de contraintes mécaniques.

La surface d'une pièce mécanique est aussi une zone de contact avec l'environnement hostile comme l'air, pour des problèmes d'oxydation, et le milieu corrosif.

Elle est également la partie d'une pièce où se produisent les phénomènes de fretting, d'usure de frottement, de grippage et de matage.

Combinant tous les facteurs défavorables, la surface d'une pièce mécanique est une zone particulièrement vulnérable qui intéresse les mécaniciens pour la conception mécanique et les spécialistes en matériaux pour améliorer les caractéristiques métallurgiques [12].

Pour améliorer les propriétés de surface, il existe un nombre important de procédés de fabrication comme les traitements thermiques et thermochimiques, les dépôts en phase vapeur (PVD et CVD), les projections thermiques, les traitements mécaniques de surface.

Dans ce chapitre, nous allons traiter essentiellement la dernière catégorie de traitements qui est le traitement mécanique de surface, et en particulier le traitement par vibro-abrasion.

Les traitements mécaniques de surface mécaniques sont des procédés qui permettent d'améliorer les performances des matériaux par une action combinée de durcissement

superficiel, de modification structurale et d'introduction de contraintes résiduelles de compression grâce à une déformation plastique hétérogène à la surface des composants mécaniques.

Les traitements les plus utilisés sont la vibro-abrasion, le grenailage, le galetage, le martelage, le choc laser.

Le principe de base est la mise en application d'une pression à la surface d'un matériau (galetage, brunissage, martelage, etc...), ou une projection de particules, comme pour le grenailage, sablage, traitement par vibro-abrasion, etc..., pour provoquer une déformation plastique soit par un outil de forme, soit par une onde de choc comme pour le traitement par choc laser [48, 49].

Ce type de traitements génère des contraintes résiduelles de compression qui sont souvent favorables pour la résistance à la fatigue et à la corrosion.

Suite à des déformations plastiques, le matériau peut se durcir grâce à un écrouissage superficiel et/ou peut réduire la taille de grain ou générer une transformation de phase.

Ces changements structuraux sont aussi favorables dans une majorité partie des cas vis-à-vis des sollicitations mécaniques comme la fatigue, l'usure et le frottement. Si la dureté et la taille des grains sont des paramètres bien connus des mécaniciens et des métallurgistes par rapport aux autres traitements de surface, l'introduction des contraintes résiduelles de compression constitue une particularité [12].

L'autre caractéristique particulière de ces traitements mécaniques de surface est la rugosité des pièces traitées. En effet, après le traitement, l'état de surface et les propriétés géométriques des pièces sont souvent modifiés par rapport à l'état initial.

Dans le cas du grenailage et du martelage, une détérioration de l'état de surface est fréquemment observée. En revanche, les traitements par vibro-abrasion engendrent une amélioration considérable de l'état de surface si les conditions optimales de traitement sont appliquées.

II.2 Différents types de traitement mécanique de surface [27]

II.2.1 Traitement par rotation émergé dans des medias

La figure II.1 ci-après présente un traitement par rotation qui est fait spécialement pour les engrenages, roues dentées, pignons, arbres cannelés etc.

Ce procédé est destiné particulièrement pour durcir la couche superficielle des dentures des pièces mécaniques tout en faisant un mouvement de rotation et en les émergeant dans des medias adéquats.

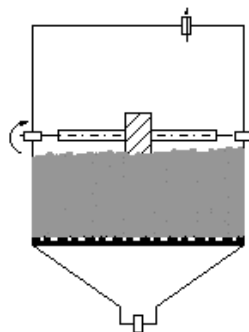


Figure II.1 Traitement par rotation destiné pour les engrenages [27]

II.2.2 Traitement par pistolet pneumatique conventionnel ou à haute fréquence (galetage et martelage)

Ce traitement est destiné pour des opérations bien spécifiques (dérouillage, décalaminage, nettoyage de la surface, durcissement superficiel, etc...), il s'agit en fait d'injecter des billes ou des tiges à bout arrondi avec un dispositif à air comprimé (figure II.2).

Ce type de procédé peut être utilisé manuellement ou adapté à une machine [27].

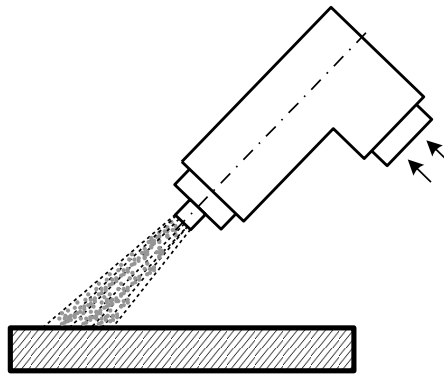


Figure II.2 Galetage et martelage [27]

II.2.3 Traitement par le procédé de brunissage

Le brunissage est un procédé de traitement à froid sans enlèvement de matière. Son principe est basé sur les propriétés des matériaux et leur aptitude à la déformation élasto-plastique de la couche superficielle. Sous la pression des métaux durs, des alliages durs ou diamant, de l'outil (bille, galet, pointe sphérique) appelé brunissoir, les microreliefs de départ de la pièce se déforment plastiquement, se compriment en formant un nouveau microrelief avec plus de régularité.

La couche superficielle s'écoule sous l'influence de la force de pression développée par la bille (voir figure II.3).

En général, on procède à une opération de traitement mécanique de surface en vue d'améliorer l'aptitude en service des pièces mécaniques, beaucoup plus de la résistance pendant le fonctionnement (tenue à la fatigue, résistance à l'usure, résistance à la corrosion, etc...), que sur la qualité de l'état de surface.

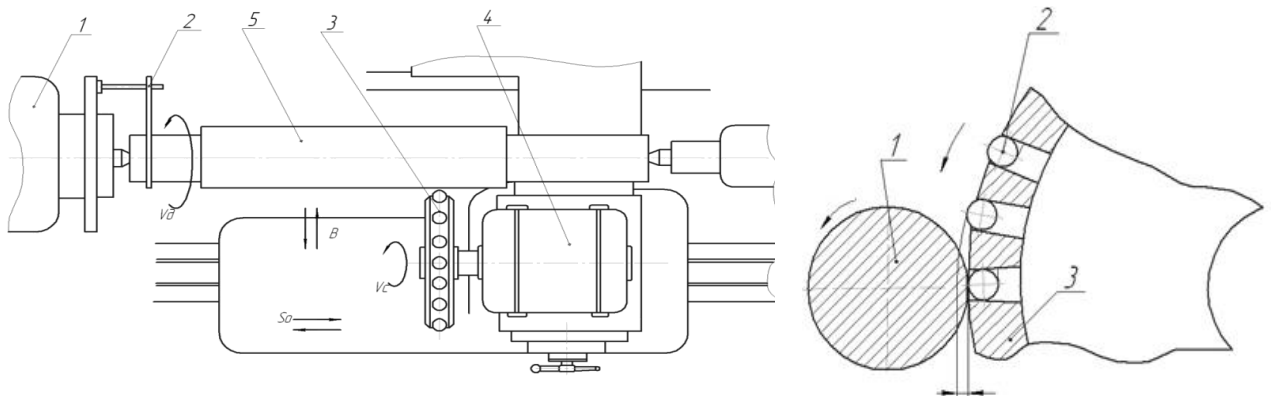


Figure II.3 Procédé de brunissage [27]

II.2.4 Traitement par le procédé de vibro-abrasion

Le traitement de vibro-abrasion fait partie du traitement mécanique de surface.

Dans ce processus et selon le schéma de base figure II.4, les échantillons et les medias sont mis dans la chambre de travail qui a deux types de mouvements, un mouvement vibratoire et un mouvement de rotation lent.

Dans ce processus, l'échantillon prend plusieurs positions dans le milieu actif, cela lui permet d'assurer un traitement uniforme sur toute la surface. L'échantillon reçoit un grand nombre de micro coups dans des directions différentes [5, 33].

L'additif chimique rajouté a pour but d'améliorer l'intensité du traitement et la qualité de surface. Le fluide joue aussi un rôle de refroidisseur.

L'intensité du traitement dépend aussi du régime, de la durée du traitement, des caractéristiques et des dimensions des medias, du volume de la chambre de travail, du degré de remplissage et des caractéristiques mécaniques des matériaux à traiter.

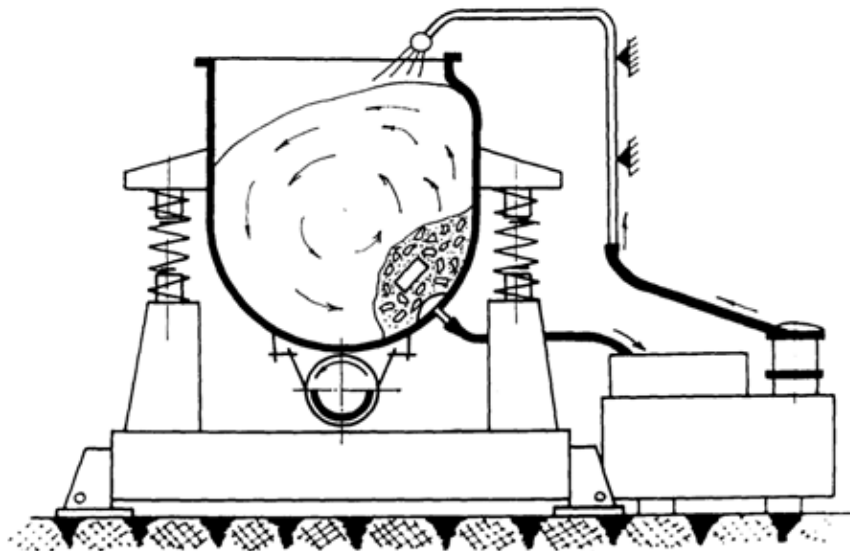


Figure II.4 Procédé de vibro-abrasion [26]

II.3 Influence du procédé de vibro-abrasion sur l'état de surface [6]

II.3.1 Description d'une Surface réelle d'un matériau

Dans ce paragraphe, nous intéressons à la description des surfaces réelles utilisées en ingénierie.

La figure II.5 montre la structure schématique d'un métal poly cristallin après usinage de la surface par un outil de coupe.

Quel que soit le processus de coupe, qui est toujours une rupture du matériau dans une zone plastifiée, il s'ensuivra de sévères perturbations du métal.

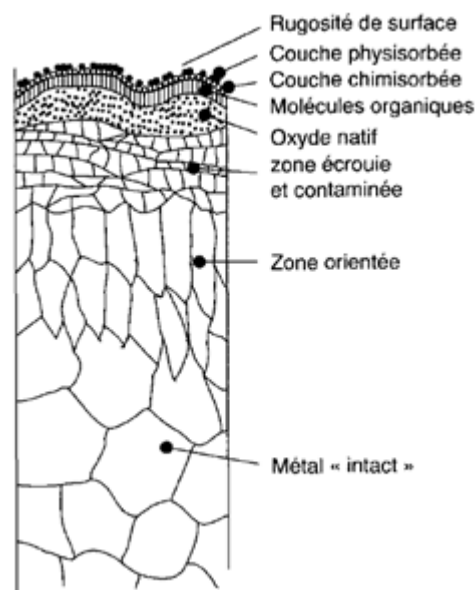


Figure II.5 Structure microscopique de la surface d'un métal usiné [6]

En allant du volume du matériau (bulk material) vers l'extrême surface, on traverse d'abord le métal intact, non perturbé par la coupe mais ayant ses propres défauts (impuretés, joints de grains, inclusions...).

Ensuite, se présente une zone texturée où les modifications induites par la coupe sont essentiellement structurales.

Puis vient une zone écrouie caractérisée par un grand désordre des grains et la présence de nouvelles impuretés introduites dans le matériau au moment de la coupe.

Cette région est recouverte d'une zone oxydée (oxyde natif) dont l'épaisseur va dépendre du matériau et de la cinétique d'oxydation.

Par exemple, dans le cas du silicium, l'épaisseur de la couche d'oxyde natif est de l'ordre de deux nanomètres et augmente très peu avec le temps.

Il en est de même pour la majorité des métaux passifs.

Dans le cas de l'aluminium, du titane ou du zirconium, il est possible de trouver ou de former des couches d'oxydes ou d'hydroxydes de plusieurs centaines de nanomètres.

Finalement, on trouve l'extrême surface Caractérisée par la présence de couches physi- et chimi-sorbées de molécules organiques, inertes ou vivantes (bio film).

L'ingénierie des surfaces doit prendre en compte toute cette région modifiée par divers types de dégradations ou de modifications : contraintes superficielles, altérations physiques et mécaniques, réactions chimiques avec l'atmosphère environnante qu'elle soit contrôlée ou non.

Dans le tableau II.1 sont répertoriées quelques propriétés physicochimiques observées dans les mêmes régions avec les domaines technologiques où elles interviennent de façon souvent spectaculaire [6].

Tableau II.1 Propriétés influencées par les phénomènes de surface [6]

Propriétés électriques	Propriétés mécaniques	Propriétés cinétiques	Propriétés magnétiques
Hétérojonctions Recombinaisons Diffusion et dopage Structures * MIS, MOS * SOI	Fragilisation Fatigue Adhésion * verre-métal * métal/céramique * métal/polymère Soudure Couches dures * nitrures * carbures	Adsorption Ségrégation Catalyse * activation * poisons Corrosion Dépôts, modes de croissance	Magnétorésistance Anisotropie perpendiculaire

II.3.2 Paramètres des surfaces

Le problème essentiel est de définir des critères permettant de caractériser les surfaces à partir de la mesure et de l'analyse des profils. Ces critères devraient :

- Permettre de caractériser la topographie des surfaces, indépendamment du procédé de mesure, et d'expliquer certaines de leurs propriétés fonctionnelles.
- Conduire à la définition de paramètres significatifs permettant de contrôler la préparation des surfaces et l'obtention des propriétés fonctionnelles visées.

Les défauts du 1^{er} et du 2^{ème} ordre correspondent à l'ondulation des surfaces, ceux du 3^{ème} et du 4^{ème} ordre correspondent à la rugosité.

Selon l'application recherchée on considère les paramètres du profil total, les paramètres d'ondulation ou les paramètres de rugosité.

Tous ces éléments sont décrits dans des normes françaises, allemandes, ISO. Ainsi que dans des normes établies par les industriels, en particulier les constructeurs d'automobiles (normes CNOMO).

Le nombre et l'évolution de ces normes, les positions divergentes de certaines catégories d'utilisateurs montrent que l'universalité n'est pas réalisée ; ceci résulte généralement de la mauvaise prise en compte, par les paramètres conventionnels, de la superposition des phénomènes d'échelles différentes [68].

Dans la grande majorité des cas, le profil dépend de la direction de la mesure, plus particulièrement de l'orientation de celle-ci par rapport aux stries d'usinage.

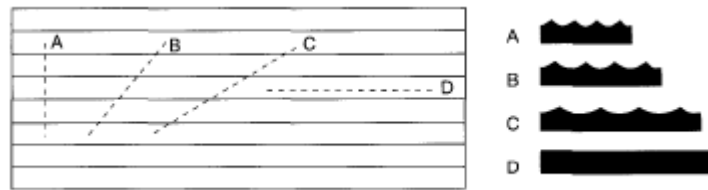


Figure II.6 Le profil dépend généralement de la direction de sa mesure

La détermination d'un tel profil (rugosité 2D) n'a de sens que si on connaît les directions significatives, c'est-à-dire l'orientation de la texture de la surface.

Si, pour des surfaces usinées à l'aide d'outils de coupe, il est souvent assez facile de prévoir la direction de mesure il faut, lorsque les surfaces deviennent plus complexes, en étudier la texture à partir de mesures et d'outils 3D.

II.3.3 Profilométrie 2D

II.3.3.1 Paramètres classiques

Pour définir un profil, il faut déterminer ses composantes de rugosité (roughness), d'ondulation (waviness) et de forme. Expérimentalement, on relève un profil total que l'on redresse car la surface analysée est rarement horizontale.

Ce redressement peut être obtenu par soustraction de la droite des moindres carrées ou par filtrage passe-haut [14].

On obtient alors le profil total à partir duquel on sépare rugosité et ondulation par filtrage.

Les filtres, de rugosité ou d'ondulation, sont caractérisés par leur longueur d'onde de coupure (cut-off).

La longueur de base, l , mesurée suivant la direction générale du profil, est numériquement égale à la longueur d'onde du filtre choisi pour les profils de rugosité et d'ondulation (par exemple 0,8 mm).

La longueur d'évaluation, L , sert à évaluer le profil brut ; elle peut contenir une ou plusieurs longueurs de base.

On désigne par P le profil brut, R la rugosité et W l'ondulation.

La ligne moyenne est obtenue par le calcul de la droite de régression dans le cas du profil brut ou par filtrage pour les profils d'ondulation et de rugosité.

La ligne moyenne n'est pas la seule ligne de référence, on peut utiliser la ligne enveloppe inférieure (LEI) ou la ligne enveloppe supérieure (LES) ; cette dernière a le plus de sens physique.

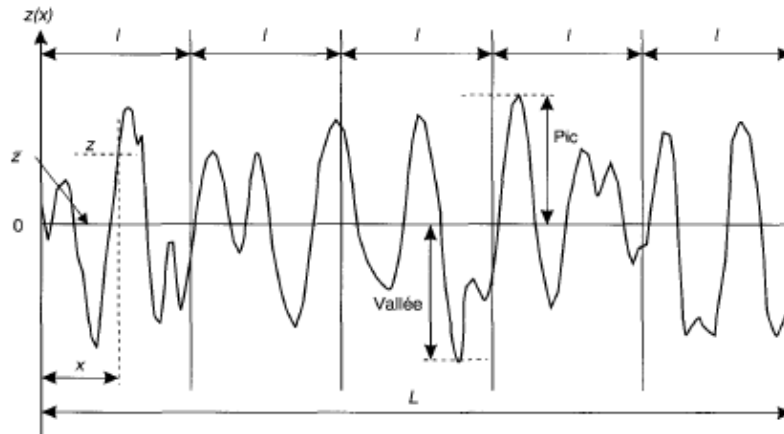


Figure II.7 Longueur d'évaluation L d'un profil comportant 5 longueurs de base (cut-off) ; définition dans cet exemple, des pics et vallées par rapport à la ligne moyenne [6]

- Les principaux paramètres d'amplitude sont :

Écart arithmétique moyen :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx \quad (\text{II.1})$$

Le terme R_a provient de roughness average, au Royaume-Uni on parle souvent de CLA (center line average) et aux USA de AA (arithmetic average).

L'écart quadratique moyen :

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L z^2(x) dx} \quad (\text{II.2})$$

R , est souvent appelé RMS (root mean square) Figure II.8

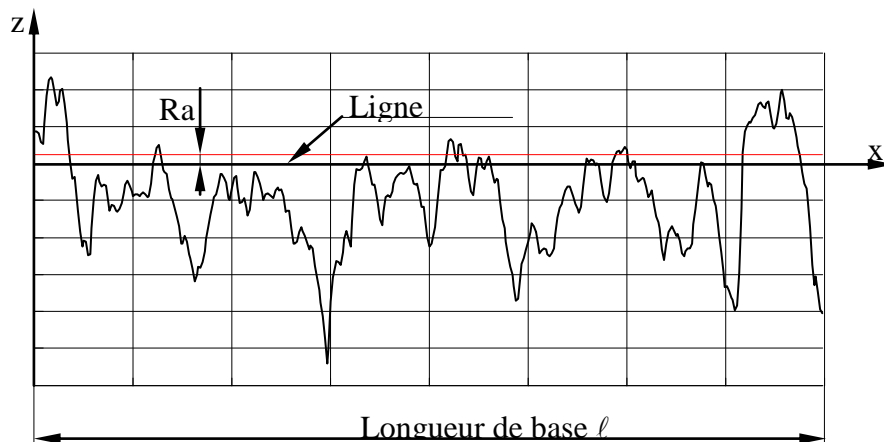


Figure II.8 Roughness average R_a

À ces paramètres de rugosité correspondent ceux d'ondulation W_a , et W_q .

On peut également définir R , (W , pour l'ondulation), écart entre le pic le plus haut et le creux le plus bas.

Tableau II.2 Quelques valeurs de R_a

Procédé d'usinage	R_a (μm)
Rabotage	25 à 3.2
Fraisage	12.5 à 0.8
Tournage	12.5 à 0.8
Rectification	1.8 à 0.05
Rodage	0.4 à 0.025
Polissage	0.4 à 0.010

II.3.4 Analyse d'une surface

Si l'on coupe normalement une surface par un plan, on obtient une courbe appelée (profil de surface).

C'est à partir de ce profil que l'on analyse les différents défauts de la surface.

On classe les défauts géométriques en quatre ordres de grandeur :

- Défauts du 1^{er} ordre :

Ce sont des défauts de forme, par exemple : écarts de rectitude, écarts de circularité (Figure II.9).

- Défauts du deuxième ordre :

C'est une ligne ondulée, elle est caractérisée par une ligne enveloppe supérieure.

La distance d'irrégularité entre deux sommets est comprise entre 0.5 et 2,5 mm environ.

- Défauts du troisième et quatrième ordre :

Ils caractérisent la rugosité de surface.

Les défauts du troisième ordre sont constitués des stries ou sillons.

La distance entre deux sillons est comprise entre 0.02 et 0.5 mm environ.

Les défauts du quatrième ordre sont des défauts aperiodiques constitués par des arrachements, fente etc.

La distance entre deux pics de ces irrégularités est inférieure ou égale 20 μm .

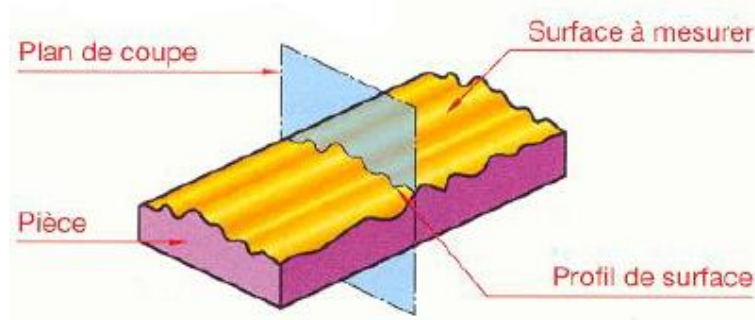


Figure II.9 Profil de surface [13]

- Hauteur maximale du profil Rz: c'est la distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux.
- Hauteur maximale des saillies Rp: c'est la distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne. (Voir figure II.10)

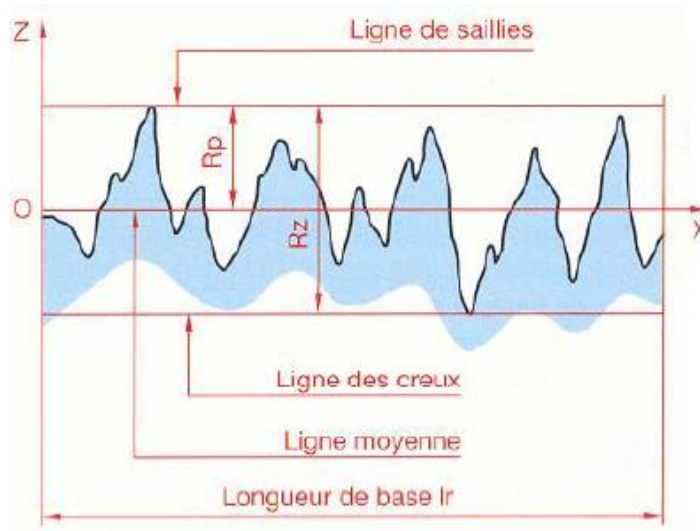


Figure II.10 Paramètres liés à la ligne moyenne [13]

II.3.5 Cas pratiques de l'amélioration de l'état de surface par le procédé de vibro-abrasion [15]

La figure II.11 représente l'influence de la durée du traitement sur la rugosité avec la variation de l'amplitude, d'après cette figure, on remarque qu'à chaque fois où l'amplitude augmente de 1.5mm jusqu'à 3.5mm, la rugosité diminue de plus en plus.

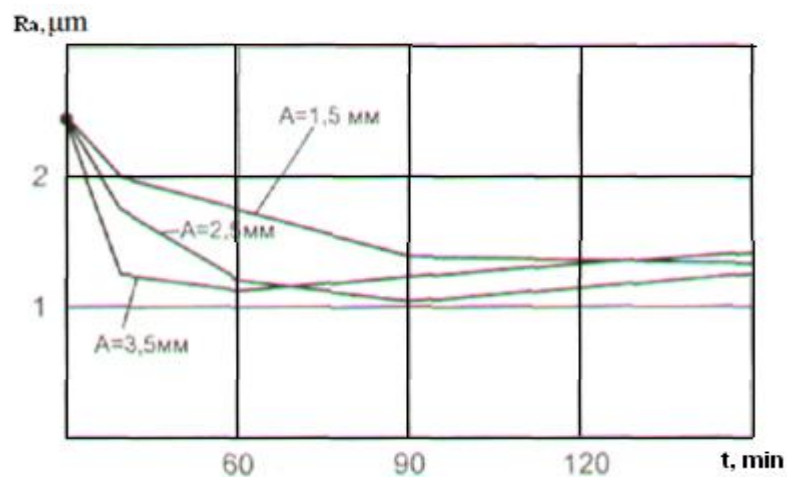


Figure II.11 Effet de la durée du traitement sur la rugosité avec la variation de l'amplitude

La figure II.12 représente l'influence de la durée du traitement sur la rugosité, on remarque que la rugosité initiale était de $0.53\mu\text{m}$ pour la courbe 1 et de $0.28\mu\text{m}$ pour la courbe 2.

La rugosité finale pour la courbe 1 est de $0.325\mu\text{m}$ et pour la courbe 2 est de $0.2\mu\text{m}$.



Figure II.12 Influence de la durée du traitement sur la rugosité

D'après les travaux réalisés [1, 2, 5, 11, 29, 30, 31, 32, 71, 76, 77, 78, 84, 92, 94, 100,101] les paramètres pris en compte ont une grande influence sur l'état de surface des pièces mécaniques.

II.4 Influence du traitement de vibro-abrasion sur la tenue en fatigue

II.4.1 fatigue des matériaux

La fatigue des matériaux est un phénomène qui survient sous l'effet des sollicitations cycliques [20].

Autrement dit, la fatigue est un processus (succession de mécanismes) qui sous l'action de contraintes ou déformations variables dans le temps modifie les propriétés locales d'un matériau. Ces dernières peuvent entraîner la formation de fissures et éventuellement la rupture de la structure.

La fatigue est notamment caractérisée par une étendue de variation de contrainte qui peut être bien inférieure à la limite d'élasticité du matériau. Les étapes principales de la ruine par fatigue d'un assemblage sont l'amorçage de fissures (si des défauts ne sont pas déjà présents dans le matériau), la propagation de fissures et la rupture finale [3].

II.4.2 Courbe de Wöhler

Les diagrammes de Wöhler permettent d'identifier trois principaux domaines d'endurance des matériaux, illustrés sur le graphique de la Figure II.13.

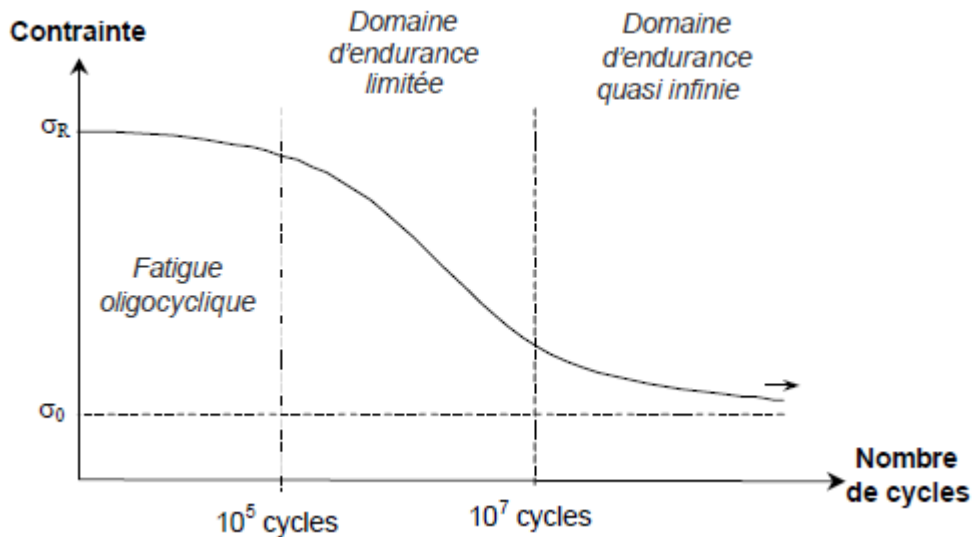


Figure II.13 Courbe de Wöhler [22]

- ❖ Le domaine de la fatigue oligo-cyclique dans lequel les matériaux sont endommagés après un nombre de cycles restreint. De manière générale, ce domaine de fatigue à faible nombre de cycles désigne les essais où les échantillons sont endommagés à moins de 10⁵ cycles. Ce domaine désigne principalement des sollicitations supérieures à la limite d'élasticité du matériau. L'endommagement des éprouvettes est lié à une fragilisation des échantillons suite à des écrouissages successifs.
- ❖ Le domaine d'endurance limitée désigne généralement la plage de contraintes autour de laquelle la durée de vie des échantillons varie de 10⁵ à 10⁷ cycles. Dans ce domaine la fragilisation du matériau et la croissance des fissures sont influencées par la concentration des contraintes autour des défauts de volume – criques, précipités, impuretés.
- ❖ Le domaine d'endurance quasi infinie désigne les essais de plus de 10⁷ cycles. A ce niveau, les concentrations de contraintes au voisinage des défauts de volume n'est pas suffisante pour permettre la croissance des micro- fissures et ce domaine est généralement représenté par une droite horizontale à une contrainte critiques σ_D. La notion de fatigue giga cyclique, ou fatigue à très grand nombre de cycles, désigne les essais dépassant 10⁸ cycles.

L'étude de ce domaine est difficile en raison de la durée des essais et son étude est relativement récente.

La rupture des matériaux est à ce niveau initiée par des défauts volumiques microscopiques – carbures, défauts cristallins [22].

II.4.3 Cas pratiques de l'amélioration de la tenue à la fatigue par le procédé de vibro-abrasion [28, 40, 66, 103]

Un nombre considérable de forces est exercé d'une manière continue sur la pièce et l'influence des variations en grandeur et en signe de ces forces provoquent la destruction de la pièce.

La destruction par fatigue provient de l'apparition de petites fissures superficiellement, elles se développent à une grandeur macroscopique, à la fin elles conduisent à la perte des capacités du travail de la pièce.

En cours des dernières années, des travaux à caractère expérimental ont surgi pour étudier la possibilité de prolonger la longévité des pièces mécaniques dans des conditions de fatigue en prenant compte de l'orientation de la structure des métaux afin d'orienter les contraintes créée par un traitement de renforcement de la structure.

L'analyse détaillée de la microstructure des matériaux a permis d'établir un diagramme de fatigue (figure II.14) en prenant compte de l'énergie de la destruction des matériaux. L'énergie de destruction se présente :

$$R_{\sigma} (N - N_i) = const \quad (II.3)$$

D'où R_{σ} : Valeur moyenne d'énergie de destruction pour un cycle de contraintes.

N : Nombre de cycles nécessaire pour l'apparition des fissures microscopiques sous un effort donné.

N_i : Nombre de cycles qui provoque la destruction sous le même effort.

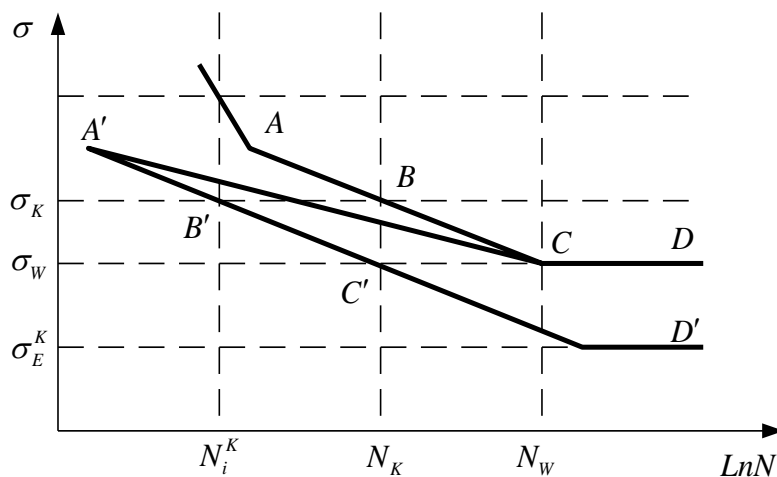


Figure II.14 Diagramme de fatigue et de destruction des métaux

D'où :

- A B C : Ligne de destruction
- A'B'C' : Début de formation des fissures microscopiques.
- A'C' : Ligne début de formation microfissures

Les trois périodes de fatigues sont :

- Période d'incubation
- Période d'évolution des fissures microscopiques
- Période de destruction (macro fissures)

II.4.4 Amélioration de la tenue à la fatigue par le procédé de vibro-impact

La figure II.15 illustre la courbe de fatigue avant et après le traitement de vibro-impact d'un alliage de titane, après un traitement de 60 minutes, l'endurance a été augmentée de 28%.

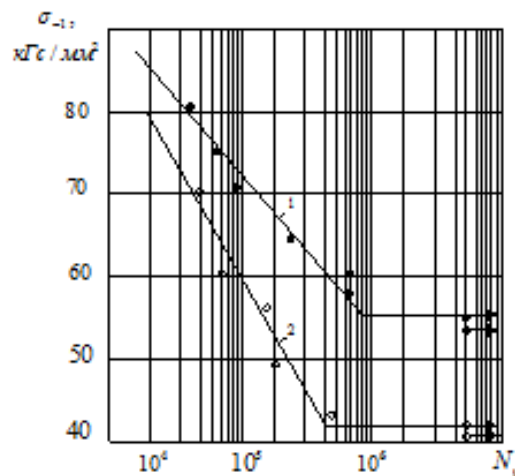


Figure II.15 Influence du traitement de vibro-impact sur la résistance à la fatigue [31]

La dureté, le durcissement superficiel et la résistance à la fatigue ont été examinés dans les travaux [33, 34, 35, 36, 37, 38, 70, 73].

II.5 Dureté et micro dureté [23, 63, 64, 65, Int6]

Dans les années 1920 – 1930, trois procédés de mesure statique de la dureté ont été développés successivement et normalisés :

- les essais de dureté selon Brinell.
- les essais de dureté selon Vickers
- et les essais de dureté selon Rockwell.

La méthode de mesure pour ces trois types d'essais est basée sur la pénétration d'un pénétrateur très dur à la surface d'un matériau.

Une valeur de dureté est déterminée à partir de la mesure de la dimension ou de la profondeur de l'empreinte (de l'ordre de millimètre mm) laissée par le pénétrateur soumis à une charge et une vitesse d'application contrôlées.

Les trois procédés se différencient par le type de pénétrateur, la force exercée sur celui-ci, la grandeur mesurée, et le mode de détermination de la valeur de la dureté.

En revanche, les essais de micro dureté sont des essais de dureté à l'échelle des différents constituants microstructuraux d'un matériau (polyphasé ou revêtu).

La figure ci-après II.16 définit la géométrie des différents types d'indenteurs utilisés pour les mesures de dureté et micro dureté.

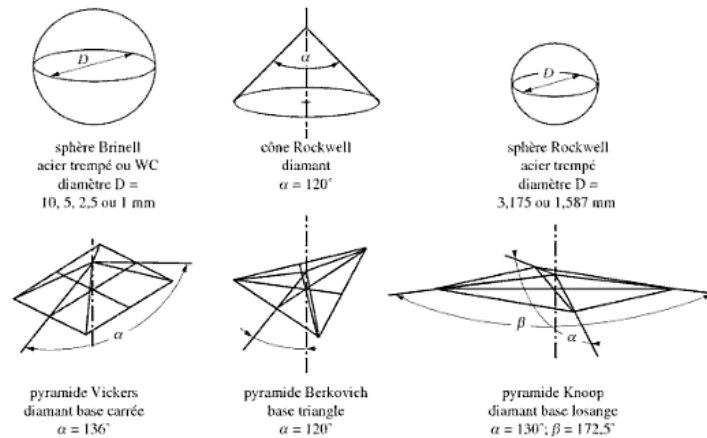


Figure II.16 Géométrie des différents types d'indenteurs utilisés pour les mesures de dureté et micro dureté

II.5.1 Différents essais de dureté

II.5.1.1 Essai de dureté Brinell HB

La dureté Brinell est notée HB. Les mesures de dureté Brinell, dont le principe est présenté en figure II.17 est qui consiste à pénétrer une bille d'acier trempé ou une bille en carbure.

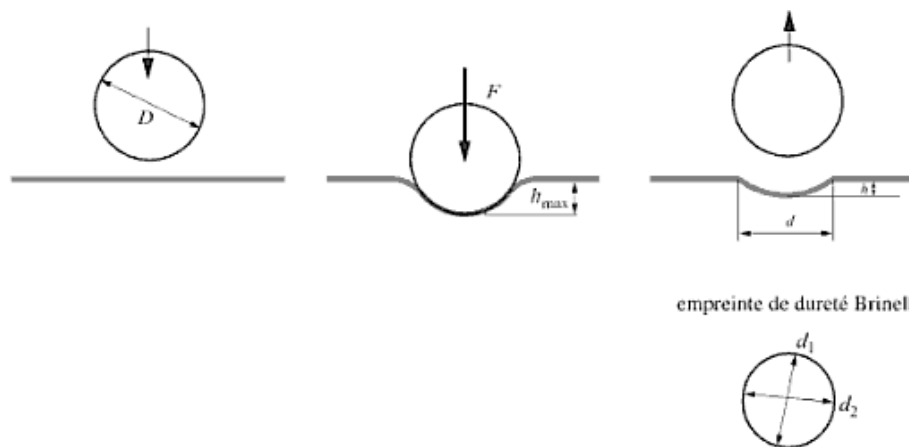


Figure II.17 Schéma de principe d'un essai de dureté Brinell HB

Pour les duretés de Brinell, la dureté peut aller jusqu'à 650 HB (pour les bille en acier HBW est utilise pour des duretés allant jusqu'à 350 HB, et pour des duretés plus importantes en utilise alors une bille en carbure HBS).

Le diamètre de la bille doit être adapté à l'épaisseur et à la dureté de la pièce, diamètres sont normalisés (1 ; 2.5 ; 5 ou 10 mm).

Le pénétrateur doit être appliqué sur une surface lisse des pièces traité avec une force donné et un maintien à la charge maximale de durée comprise entre 10 et 30 s (un maintien de 15 secondes pour les alliages ferreux et de 30 secondes pour les alliages non ferreux).

Dans le cas d'une empreinte circulaire avec une forme calotte sphérique on prend le diamètre de l'empreinte mais dans le cas d'une empreinte non circulaire, on prendra la valeur moyenne des deux diamètres perpendiculaires de l'empreinte.

Cette Dureté peut être déduite des formules suivantes :

$$HB = \frac{2.M}{\pi.D.(D-\sqrt{D^2-d^2})} \quad (II.4)$$

Où:

HB : Dureté Brinell.

M : Masse appliquée en (kgf), 1kgf= 9.80665 [N].

D : Diamètre de la bille. (mm)

d : Diamètre de l'empreinte laissée par la bille. (mm)

II.5.1.2 Essai de dureté Vickers HV

Le procédé de Vickers est le procédé de mesure de dureté le plus précis, et concerne le domaine de mesure le plus large, et en distingue plusieurs variantes, (mesure de micro dureté et nano dureté).

Le symbole de la dureté Vickers est HV mais ce symbole doit être complété par l'indice indiquant la valeur de la charge appliquée. Ex : HV₅₀.

Pour l'essai de dureté de Vickers, dont le principe est défini sur la figure II.18, on utilise comme pénétrateur un diamant épointé de forme pyramidale à base carrée et d'angle 136° entre deux faces opposées.

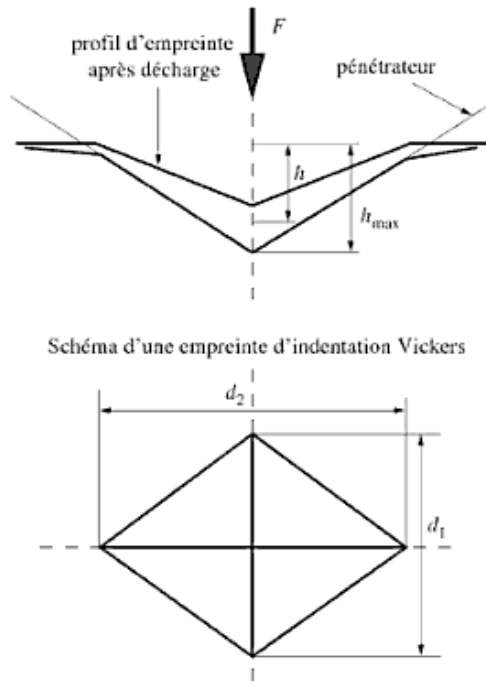


Figure II.18 Schéma de principe d'un essai de dureté Vickers HV

Celui-ci est fragile aux chocs, et de ce fait moins apte à l'utilisation en condition sévères que la bille dans le procédé Brinell. En revanche, il est possible d'examiner des matériaux plus durs. Il n'a priori pas de limite aux duretés mesurables par l'essai de dureté Vickers.

Le pénétrateur est amené au contact de la surface de la pièce, la charge est appliquée progressivement jusqu'à la valeur choisie et maintenue pendant 10 à 15 secondes.

Pour des charges comprises entre 100 et 1000 N, la charge est sans influence sur la mesure de la dureté. Pour les échantillons dont la surface de mesure est petite ou mince (couche dure superficielle par exemple), on utilise des charge comprises entre 2 et 50 N et si la charge est inférieure à 2 N on parlera-la d'essai de micro dureté Vickers.

La mesure de dureté Vickers est définie par :

$$HV = \frac{\text{Charge d'essai}}{\text{Aire de l'empreinte}} = \frac{1,854 \cdot F}{d^2} \quad (\text{II.5})$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (\text{II.6})$$

Où :

HV : Dureté Vickers.

F : Force de pénétration ou charge d'essai (N).

d_1 et d_2 : Diagonale de l'empreinte (mm).

d : La moyenne des deux diagonales (mm).

II.5.1.3 Essai de dureté Rockwell HRC

Dans l'essai de dureté selon Rockwell, la dureté n'est pas définie par le quotient d'une force par la surface de l'empreinte comme c'est le cas avec les procédés Brinell et Vickers, mais est déterminée par la profondeur de l'empreinte. Celle-ci, ainsi que la dureté elle-même, sont lues sur un cadran. Le procédé est entièrement automatisable.

Dans les essais de dureté Rockwell, le pénétrateur est soit un cône en diamant pointu d'angle au sommet 120° et à pointe arrondie sphérique (rayon 0.2mm), soit une bille en acier de diamètre 1.587mm ou 3.175mm (figure II.19).

La pénétration s'effectue en deux temps à la surface lisse de la pièce.

Une charge initiale F_0 et d'abord appliquée, cette charge est de 30 N pour les duretés superficielles, et de 100 N pour des échantillons massifs. Puis, la charge est augmentée progressivement jusqu'à la charge d'essai $F = F_0 + F_1$, elle est maintenue constante durant 4 ± 2 secondes.

Puis une décharge s'effectue jusqu'à la charge initial F_0 . Après enlèvement de la surcharge, le dispositif mesure automatiquement l'accroissement rémanent de la profondeur de l'empreinte e , correspondant à la déformation plastique.

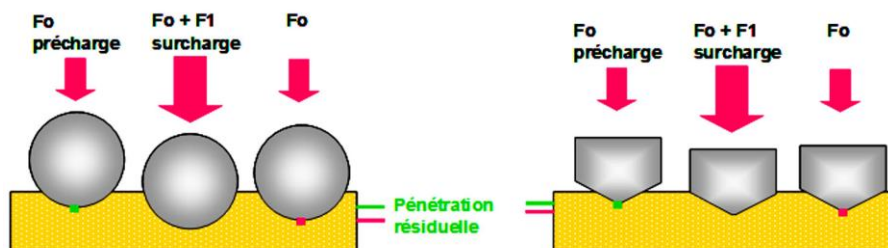


Figure II.19 Schéma de principe d'un essai de dureté Rockwell HRC

On déduit la dureté de Rockwell de l'accroissement de profondeur de pénétration, mesure entre la troisième et la première opération.

La valeur de Rockwell varie linéairement avec la profondeur de l'empreinte selon une relation dont les paramètres sont normalisés. Ces paramètres constants sont listés selon plusieurs échelles (A, B, C...N, T) correspondant à la nature des matériaux :

$$HR = N - \frac{e}{S} \quad (II.7)$$

Avec :

N : Constante des différentes échelles [N=130 (pour les billes) ou N=100 (pour les cônes)].

e : Profondeur de pénétration résiduelle (mm).

S : facteur [0,002 pour les échantillons massifs conventionnelle (échelle de A à K) et 0,001 pour les mesures de dureté superficielle (échelle de N et T)].

La combinaison de divers pénétrateurs et de diverses charges permet d'avoir un assez grand nombre d'échelles Rockwell qui figure dans le tableau suivant :

Tableau II.3 Divers pénétrateurs et charges

Échelle	Désignation	Pénétrateur	F_0 (N)	F_1 (N)	F (N)	Gamme
A	HRA	Cône diamant	98.07	490,3	588,4	20 à 88 HRA
B	HRB	Bille 1,5875 mm	98.07	882,6	980,7	20 à 100 HRB
C	HRC	Cône diamant	98.07	1373	1471	20 à 70 HRC
D	HRD	Cône diamant	98.07	882,6	980,7	40 à 77 HRD
E	HRE	Bille 3,175 mm	98.07	882,6	980,7	70 à 100 HRE
F	HRF	Bille 1,5875 mm	98.07	490,3	588,4	60 à 100 HRF
G	HRG	Bille 1,5875 mm	98.07	1373	1471	30 à 44 HRG
H	HRH	Bille 3,175 mm	98.07	490,3	588,4	80 à 100 HRH
K	HRK	Bille 3,175 mm	98.07	1373	1471	40 à 100 HRK

La valeur de dureté de Rockwell ainsi obtenue est désignée par le symbole HR suivi par la lettre correspondant à l'échelle de mesure utilisé. Ex : 59 HRC.

Le domaine d'application de la mesure de dureté Rockwell est essentiellement celui des mesures rapides de dureté pour les matériaux de dureté comprise entre 20 et 70 HRC. Pour les matériaux plus mous, l'échelle HRB doit être utilisée ou le cône est remplacé par une bille en acier de diamètre 1,587 mm. Pour Les matériaux de dureté supérieure à 65 HRC (dureté d'un acier trempé ou de la martensite), le procédé devient imprécis.

Les domaines d'application de la mesure de dureté Rockwell et la même que la dureté Vickers sauf que la dureté dans la couche superficielle durcie ni mesurable que par le procédé HRC que si son épaisseur est supérieur à 0.7 mm.

II.5.2 Cas pratiques de l'augmentation de la dureté et de la micro dureté par le procédé de vibro-abrasion

- **Exemple 1 (dureté)**

La figure II.20 illustre la variation de la rugosité Ra en fonction de la dureté HB [15]. On y remarque que lorsque Ra diminue, la dureté augmente. On note aussi que pour les rugosités initiales faibles, la variation de Ra est aussi faible. A titre d'exemple, pour une rugosité initiale de 2 μm , une diminution de Ra de (2 - 0,5) μm est accompagnée d'une variation d'une dureté de +600 HB.

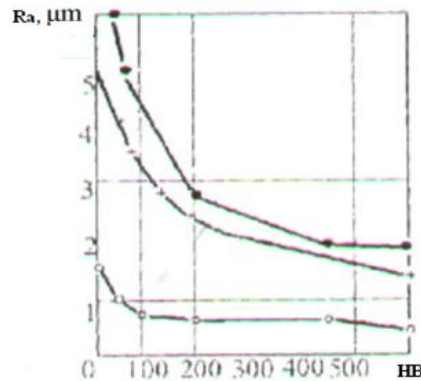
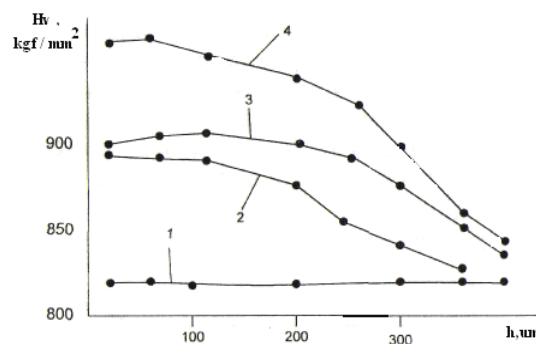


Figure II.20 Variation de la rugosité Ra en fonction de la dureté HB [18]

D'après les résultats obtenus dans [18], on constate qu'à chaque fois la rugosité est faible, la dureté est élevée, ceci s'explique par le fait que le matériau le plus dur doit avoir un meilleur état de surface [67, 69, 86, 87].

- **Exemple 2 (micro dureté) [86]**

Le traitement par vibro-abrasion a été effectué en utilisant des médias sous forme de billes en acier traité de diamètre $d=8\text{mm}$, avec un régime de : fréquence $f=30\text{ Hz}$, amplitude $A=4.5\text{ mm}$, la durée du traitement varie de 0 jusqu'à 180 minutes, Figure II.21.



1- état initial ; 2- t=60 min ; 3- t=120min ; 4- t=180 min

Figure II.21 Variation de la micro dureté HV en fonction de la profondeur de la couche superficielle [15, 86]

D'après les résultats, on remarque que la durée du traitement a une grande influence sur la micro dureté qui varie de 820 kgf/mm² jusqu'à 960 kgf/mm² pour la 1^{ere} couche de 100 microns et puis diminue petit à petit jusqu'à l'état initial pour atteindre les 400 microns de profondeur.

Il a été démontré dans plusieurs travaux réalisés [17, 18, 19, 21, 41, 53, 102] que la dureté et la micro dureté enregistre une augmentation considérable pour les couches superficielles des matériaux après un traitement de mécanique de surface.

II.6 Contraintes résiduelles [57, 72]

On définit généralement les contraintes résiduelles comme étant les contraintes qui subsistent (restent) dans les pièces mécaniques qui ne sont soumises à aucun effort extérieur. Celle-ci est générée par quasiment tous les processus de production et techniques de traitement utilisées.

Ces contraintes sont en équilibre sur l'ensemble du volume que constitue un composant ou une structure mécanique.

Elle définit les propriétés mécaniques des composants dans la zone proche de la surface.

L'élaboration de matériaux en fonction de l'application nécessite une prise en compte des contraintes résiduelles ciblées pour améliorer les performances et augmenter les capacités (ex. durée de vie, dureté, résistance, fatigue).

Des contraintes résiduelles existent dans pratiquement tous les matériaux solides, métalliques ou non métalliques (bois, polymère, verre, céramique,...etc).

Tout procédé de fabrication introduit dans une pièce mécanique des contraintes résiduelles qui vont influencer son comportement en fatigue, en rupture et même en corrosion. Il existe peu de modes de mise en œuvre de matériaux qui n'engendrent pas un nouvel état de contraintes.

Les traitements mécaniques de surface font partie d'une gamme de procédés dont le rôle est d'introduire des contraintes résiduelles de compression. Grâce à ce champ de contraintes résiduelles favorables pour décharger les couches superficielles d'une pièce mécanique, les performances sont nettement améliorées.

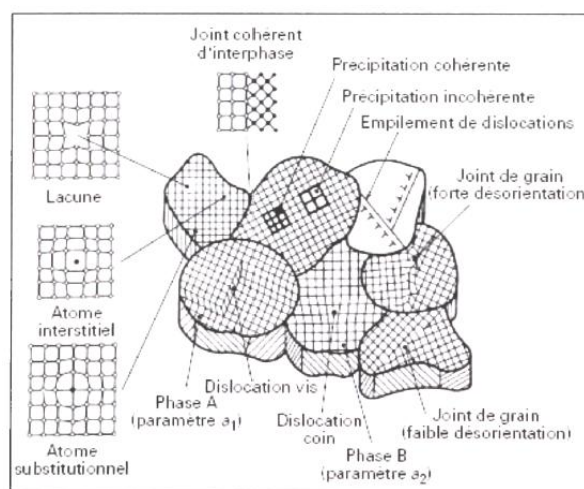


Figure II.22 Défauts cristallins pouvant induire des contraintes résiduelles [24]

II.6.1 Niveaux des contraintes résiduelles

Ces contraintes existent à différents niveaux. On distingue en général trois qui dépendent de l'échelle à laquelle on les observe :

- **Contraintes de 3^{ème} ordre, à l'échelle du cristal.** On atteint à ce niveau, la limite de la notion de contraintes. Ce sont les actions créées par tous les types de défauts cristallins dans les grains : lacunes, interstitiels, atomes en substitution, dislocations, défauts d'empilement, macles;
- **Contraintes de 2^{ème} ordre** dues à l'hétérogénéité et à l'anisotropie de chaque cristal ou grain dans un matériau poly cristallin. Lors d'une sollicitation mécanique (traction uniforme d'une éprouvette lisse par exemple), certains grains orientés favorablement atteindront avant d'autres la limite d'écoulement, ce qui provoquera une hétérogénéité du comportement lorsque la charge sera supprimée. Les retours élastiques se feront donc différemment et plus ou moins librement suivant les grains, ce qui conduira ceux-ci dans des états de contraintes résiduelles du 2e ordre non nulles. Cependant, la moyenne de ces contraintes, c'est-à-dire la résultante générale suivant l'axe de traction, sera nulle à la fin de l'essai (contrainte résiduelle du 1er ordre). Ce type de contraintes pourrait être mesuré par diffraction des rayons X.
- **Contraintes résiduelles de 1^{er} ordre**, ou macroscopiques, qui se situent à l'échelle d'un grand nombre de grains ou de la pièce mécanique. Elles sont accessibles à la mesure, par exemple à l'aide de jauges qui détectent les déformations qu'elles produisent et par rayons X.

Ces trois types de contraintes résiduelles interviennent les unes sur les autres. Ce sont bien sûr les contraintes du premier ordre ou macro-contraintes qui intéressent le mécanicien ou les bureaux d'études. Mais les contraintes résiduelles de 2e ordre sont également très importantes, car elles sont l'indicateur de l'état d'écrouissage et d'endommagement du matériau.

II.6.2 Origines des contraintes résiduelles

Les origines des contraintes résiduelles sont très diverses. Elles peuvent être séparées en trois catégories : mécanique, thermique et métallurgique (figure II.23). On assiste souvent à une combinaison de ces différentes causes pour la genèse des contraintes résiduelles.

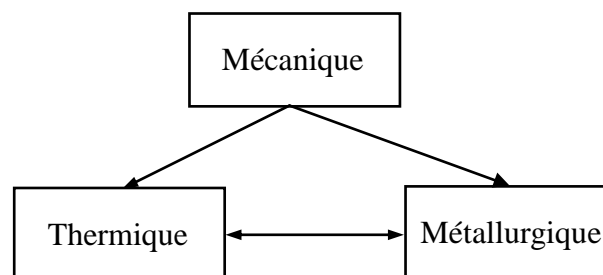


Figure II.23 Origines des contraintes résiduelles

On représente ci-après un tableau des différentes origines des contraintes résiduelles pour les opérations de mise en œuvre couramment utilisées dans l'industrie :

Tableau II.4 Origines des contraintes résiduelles

Procédés	Mécanique	Thermique	Structural
Fonderie moulage	Non	Gradient de température pendant le refroidissement	Changement de phase
Grenailage, martelage, galetage, choc laser, pliage, roulage, repoussage, forgeage, redressage, filage	Déformation plastique hétérogène entre le cœur et la surface de la pièce	Non	Oui dans certain cas, une opération peut réduire la taille de grain ou générer une transformation de phase (par exemple, une transformation martensitique pour des aciers inoxydables)
Rectification, tournage, fraisage, perçage, alésage	Déformation plastique due à l'enlèvement de copeaux	Gradient de température du à l'échauffement pendant l'usinage	Transformation de phase pendant l'usinage si la température est suffisamment élevée
Trempe sans transformation de phase	Non	Gradient thermique	Non
Trempe superficielle avec transformation de phase (induction, faisceau d'électrons, laser, plasma, méthodes classiques)	Non	Gradient thermique	Changement de volume dû à la transformation de phase
Cémentation nitruration	Non	Incompatibilité thermique	Nouveau composant chimique avec changement de volume
Soudage	Bridage	Gradient thermique	Modification microstructurale (ZAT)
Brasage	Incompatibilité mécanique	Incompatibilité thermique	Nouvelle phase à l'interface
Dépôt électrolytique	Incompatibilité mécanique	Incompatibilité thermique	Composition de dépôt selon les bains
Projection à chaud (plasma, laser, jet Kote)	Incompatibilité mécanique, microfissuration	Incompatibilité thermique, gradient de température	Changement de phase de dépôt
PVD, CVD	Incompatibilité mécanique	Incompatibilité thermique	Changement de phase
Composites	Incompatibilité mécanique	Incompatibilité thermique	Non

Note : PVD : Physical Vapor Deposition
CVD : Chemical Vapor Deposition

Pour réaliser une pièce industrielle, nous pouvons utiliser une ou plusieurs techniques regroupées dans ce tableau. Pour étudier le rôle des contraintes résiduelles existant dans les composants, il faut d'abord identifier les sources de contraintes.

II.6.3 Méthodes de détermination des contraintes résiduelles

Avec l'état de surface des pièces traitées, le niveau des contraintes résiduelles est un paramètre crucial et commun de tous les traitements de surface mécaniques. Pour cette raison, nous présentons les différentes techniques de détermination de contraintes résiduelles.

Diverses méthodes de mesure (mesure de la déformation et le calcul de la contrainte) soit qualitatives ont été développées depuis de nombreuses années. On peut en général les distinguer en les classant en deux catégories :

- Méthode destructive.
- Méthode non destructive (méthode d'excitation superficielle des métaux) [60].

II.6.3.1 Méthode destructive

Elle consiste à détruire un champ de contraintes résiduelles qui est en équilibre en l'absence de force extérieure pour avoir un accès à ces contraintes. L'efficacité de ces méthodes dépendra du choix judicieux de la technique pratiquée en fonction de la forme de la pièce et des contraintes résiduelles escomptées. Citons parmi ces méthodes :

- les techniques de découpages qui sont basées sur la mesure de déformations pendant le découpage global d'une pièce.
- la méthode de Sachs qui est basée sur la mesure de déformations pendant des enlèvements successifs de couches sur des pièces cylindriques ou sur des tubes.
- la méthode de la flèche qui est basée sur la mesure de la flèche d'une plaque longitudinale fine pendant des enlèvements successifs de couches par voie chimique ou électrolytique.
- la méthode de trépanage qui est basée sur la mesure des déformations pendant la réalisation d'un trépan.
- la méthode du trou incrémental qui est basée sur la mesure des déformations autour d'un trou pendant un perçage pas à pas du trou.
- la méthode dite de « compliance » qui est basée sur la mesure de la déformée d'une rainure dans une structure pendant un usinage localisé.
- la méthode de contour qui est basée sur la mesure de la morphologie de surface (contour superficiel) d'une pièce pendant un usinage.

II.6.3.2 Méthode non destructive ou méthode d'excitation

Elle lie les propriétés physiques ou cristallographiques du matériau à tester aux champs des contraintes résiduelles existants dans la pièce. On peut citer :

- la méthode de diffraction par rayons X et par neutrons qui est basée sur la mesure des variations des distances interatomiques liées directement au niveau des contraintes résiduelles.
- la méthode par ultrasons qui est basée sur la mesure du changement de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores qui dépend de l'état de contrainte du matériau.
- la méthode dite « Barkhausen » qui est basée sur les déplacements des parois de Bloch dus au champ de contrainte (magnétostriction) et qui sont détectables par le « bruit » de Barkhausen.
- la méthode de la perméabilité magnétique qui est basée sur la liaison entre la perméabilité magnétique effective du matériau et les contraintes appliquées.
- la méthode de spectroscopie Raman qui est basée sur la modification de localisation et la forme des pics de spectre entre une pièce sans contrainte et une pièce avec contraintes.
- la méthode de thermographie qui est basée sur la dépendance de propriétés thermiques.

II.6.4 Cas pratiques de la distribution des contraintes résiduelles en profondeur de la couche superficielles après le traitement de vibro-abrasion [16]

Citons deux cas pratiques concernant la distribution des contraintes résiduelles sur la profondeur de la couche superficielle sous l'influence de la fréquence et l'amplitude d'oscillation.

Cas 1 : Influence de la fréquence d'oscillation sur les contraintes résiduelles

La figure II.24 illustre la distribution des contraintes résiduelles sur la profondeur de la couche de superficielle après une durée de traitement par vibro-abrasion de 120 min, avec la variation du paramètre fréquence d'oscillation 15, 25 et 33 Hz, et le maintien du paramètre amplitude, $A=1,25$ mm.

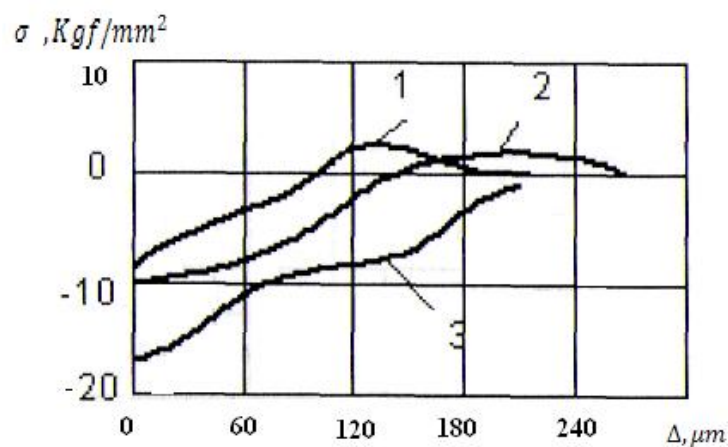


Figure II.24 Répartition des contraintes résiduelles en fonction de la fréquence [15]

Cas 2 : Influence de l'amplitude d'oscillation sur les contraintes résiduelles

La figure II.25 montre la propagation des contraintes résiduelles sur la profondeur de la couche de superficielle après un traitement par vibro-abrasion, avec deux amplitudes différentes, $A=1,25$ mm, $A=3$ mm.

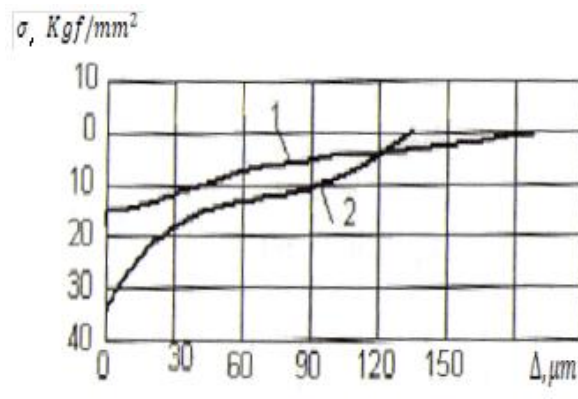


Figure II.25 Distribution des contraintes résiduelles en fonction de l'amplitude [15]

D'après les 2 figures II.24 et II.25, on constate que la propagation des contraintes résiduelles dépend des deux paramètres, fréquence et amplitude, à chaque fois ces paramètres augmentent, les contraintes résiduelles augmentent et se propagent profondément dans la couche superficielle, les contraintes résiduelles tractives se transforment en contraintes résiduelles compressives.

Cela s'explique par le nombre d'impact et l'augmentation de la quantité d'énergie formée sur la couche superficielle, la formation de la couche superficielle est effectuée sur toute la surface simultanément et de manière uniforme.

Les travaux de recherches réalisés [22, 25, 33, 72, 74, 79, 80, 81,82] ont affirmés que les contraintes résiduelles de traction prennent naissance après un traitement d'usinage ou un traitement thermique par la suite ils se transforment en contraintes de compression après un traitement mécanique de surface.

Ces contraintes s'opposent à la contrainte en service et retardent l'initiation ou la propagation des éventuelles fissures.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents types de traitement mécanique de surface en l'occurrence le galetage, le martelage, le brunissage qui sont destinés pour des pièces de formes géométriques plus ou moins très simples et a des fins bien spécifiques, par contre le procédé de vibro-abrasion est une méthode qui est destinées pour des formes géométriques simples et complexes et a des fins multiples, nous avons évoqué dans ce chapitre l'influence du procédé de vibro-abrasion sur la qualité de l'état de surface tout en citant des cas pratiques des travaux de recherche des scientifiques, nous avons cité aussi quelques notions fondamentales sur la surface et ses paramètres, la rugosité, la dureté, la micro dureté, la tenue en fatigue et les contraintes résiduelles, leurs niveaux, leurs origines, et les méthodes de détermination.

Nous avons apporté quelques cas pratiques pour chaque propriété géométrique, mécanique et métallurgique à savoir l'amélioration de qualité de l'état de surface, la dureté, la micro dureté et les contraintes résiduelles.

Chapitre III

Équipements et accessoires de la technologie de la vibro-abrasion

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les différents équipements les plus utilisés dans le domaine du traitement mécanique de surface en particulier le domaine de vibro-abrasion ainsi que leurs accessoires, à savoir, les medias de différentes tailles, de différentes formes géométriques et de différents matériaux.

Les additifs chimiques sous plusieurs formes, poudre, pâte et liquide, leurs compositions, ainsi que leurs domaines d'application.

III.2 Différents équipements de vibro-abrasion

La vibro-abrasion intègre des techniques mécanisées de traitement mécanique de surface, en particulier le polissage et l'ébavurage, les ingrédients utilisés sont les médias abrasifs (céramique, porcelaine, plastique, métaux), les additifs chimiques et bien sûr les équipements qui génèrent les mouvements (vibrateurs, centrifugeuses...) [54].

Ce traitement est l'exploitation industrielle des phénomènes de friction par vibro impact des pièces et abrasifs (medias) dans un environnement chimique contrôlé.

Les pièces et médias sont mis en vibration dans la chambre de travail sous l'action de deux mouvements (mouvement vibratoire à basse fréquence et un mouvement rotative lent) avec ajout d'eau et d'additif chimique pour obtention de la finition demandée.

Sous l'effet des vibrations le traitement se produit dans toutes les zones de la chambre de travail, celui-ci assure le traitement uniforme de toutes les surfaces en recevant un grand nombre de micros coups sous différents angles qui contribue à l'élimination des petites particules et écrasement de la surface de la couche superficielle, ce qui engendre des changements des paramètres géométriques et physico-mécaniques de la surface [56].

La majorité des traitements fonctionnent avec l'alimentation continue ou intermittente de l'additif chimique [58].

L'additif chimique joue le rôle de lubrificateur des medias et des pièces à traiter, arrosage des pièces, contribue à la séparation et distribution uniforme dans le milieu actif, il est possible aussi de régler l'intensité du traitement en changeant le niveau du liquide (eau+additif) dans la chambre de travail [43].

La composition de l'additif chimique permet également de régler l'intensité du procédé et la qualité de la surface usinée, il contribue également à refroidir les pièces.

L'intensité du traitement par vibro-abrasion dépend des paramètres tels que :

- le régime du traitement (f, A).
- la durée du traitement (t)
- la taille, la forme et le matériau des particules du milieu actif.
- le volume de la chambre de travail et le degré de son remplissage.
- les propriétés mécaniques du matériau.
- 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).

III.3 Différents types de vibrateurs

Les différents équipements (vibrateurs) les plus répandus dans le domaine de l'industrie de traitement mécanique de surface sont cités ci-après :

III.3.1 Vibrateurs en continu (circulaires, spirales ou linéaires)

Les installations en continu prennent une importance de plus en plus grande dans le domaine du traitement mécanique de surface grâce à toutes les innovations réalisées, elles sont l'aboutissement de la permanente volonté de perfectionnement dans le développement, car le traitement en grandes séries de pièces est un grand défi pour tous les concepteurs [Int2, Int3].

Ce traitement est utilisé pour une meilleure productivité grâce à une alimentation permanente en pièces, permet une meilleure automatisation des processus et diminue très fortement les frais liés à la manutention des pièces.

Pour le fonctionnement des installations en continu les pièces sont brassées dans une cuve (circulaire ou linéaire) remplie de médias de polissage et d'ébavurage durant un temps donné, pour obtenir le traitement souhaité. Les paramètres tels que la durée du traitement et la finition demandée (polissage, ébavurage, brillantage) peuvent être ajustés par modification de l'inclinaison de la cuve de traitement, réglage de la force centrifuge ou de la vitesse de traitement. En fin de traitement, une grande surface de tamisage assure la séparation des pièces et des médias. En même temps, les pièces peuvent être rincées puis transférées à l'étape de traitements suivants. Les abrasifs, quant à eux, sont transférés par convoyeur puis ramenés à l'intérieur de la cuve et les pièces sont séchées dans une machine de séchage [59, 61, 62].

Les installations en continu sont caractérisées par le chargement progressif et continu des pièces. Les temps de chargement et d'arrêt peuvent varier en fonction de la dimension des pièces et de leur fragilité. De ce fait, cette technique est parfaitement intégrable dans les procédés automatisés [44, 45].

III.3.1.1 Vibrateurs linéaires

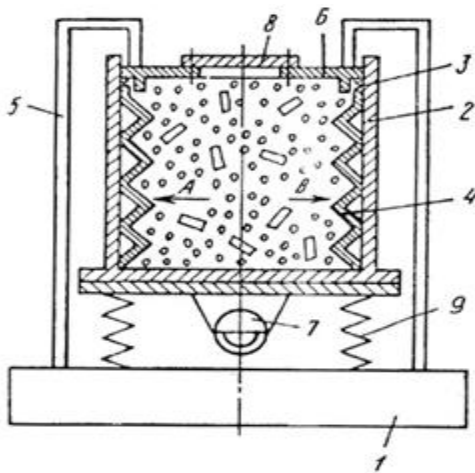
Le domaine d'application des vibrateurs linéaires sont spécialement adaptés pour tous les types de traitement mécanique de surface, tels qu'ébavurage, décapage, rayonnage, polissage et brillantage à la bille de pièces moulées et forgées. Ils permettent le traitement de pièces individuelles séparées par des cloisons amovibles ou le traitement de plusieurs pièces fixées sur des montages [Int4].

En fonction de leurs dimensions et de leur type, les vibreurs linéaires sont entraînés par différentes motorisations. Le traitement s'effectue dans une cuve 2 (sous forme U) de traitement montée sur ressorts hélicoïdaux 9. Un vibreur 1 monté au centre de la cuve fournit l'énergie nécessaire à la vibration. Les pièces et médias (abrasifs) 3, auxquels sont ajoutés l'eau et un additif chimique sont brassés dans la cuve de traitement dans une action linéaire rotative. (Voir figure III.1)

Il est également possible d'effectuer un traitement pièce contre pièce, sans médias.

L'effluent peut être recyclé via le système de centrifugation, ce qui permet la réduction de consommation en eau et additif.

Tableau III.1 Désignation des différents compartiments d'un vibreur linéaire



Repère	Désignation
1	Bâti (base) de la machine
2	Cuve de traitement
3	Environnement de travail (pièce + media)
4	Plaque (revêtement)
5	Bras support
6	Couvercle principale de la cuve
7	Vibreur
8	Couvercle secondaire de trappe pour un dispositif de fixation des pièces
9	Ressorts hélicoïdaux

Figure III.1 Schéma d'un vibreur linéaire [50]

Il y a 2 types de vibreurs linéaires qui se diffèrent par sa motorisation diverse :

- **Vibreurs linéaires type TE**

Moteur à entraînement direct qui est fixé directement sous la cuve de traitement.

- **Vibreurs linéaires type TS**

Deux groupes balourdés montés sur les flancs latéraux (gauche et droite) de la cuve de traitement.

III.3.2 Vibreurs circulaires

Le vibreur exploite le mouvement des pièces et des médias (chips) pour la finition des surfaces.

Les parois intérieures de la cuve du vibreur, qui est de forme annulaire, donnent à la masse chips/pièces à traiter une force vibrante tridimensionnelle.

Les différents réglages angulaires des poids, les différentes formes des chips, les quantités d'eau, l'additif plus abrasif permettent d'obtenir une large gamme d'opérations qui passent de l'ébavurage au lissage des pièces coulées et au polissage des pièces délicates.

Le traitement s'effectue dans une cuve de traitement montée sur ressorts hélicoïdaux. Un moto-vibrateur spécial monté au centre de la cuve fournit l'énergie nécessaire à la vibration. Les pièces et médias (abrasifs), auxquels sont ajoutés l'eau et l'additif chimique, sont brassés dans la cuve.

Les vibrateurs circulaires sont souvent équipés de tamis de séparation et de trappe pneumatique pour assurer la séparation des pièces et médias. Tandis que les pièces sont transférées via le tamis de séparation à l'extérieur du vibrateur pour être ensuite, séchées dans un sécheur circulaire, les médias restent dans la cuve de travail [Int5].

Les domaines d'applications des vibrateurs circulaires sont extrêmement flexibles et évolutifs et permettent plusieurs types de traitement en tribofinition : ébavurage, ébarbage, rayonnage, nettoyage, décalaminage et polissage de pièces provenant d'emboutissage, fonderie, formage, forge, usinage. Plusieurs matières peuvent être traitées : métal, plastique, céramique, caoutchouc, bois, pierre et verre.

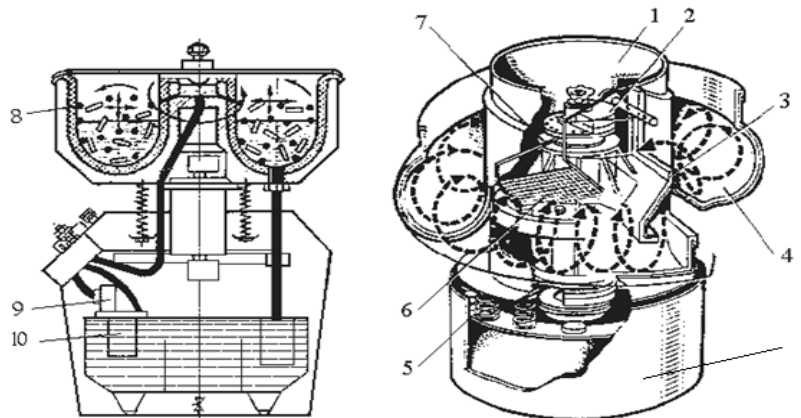


Figure III.2 Schéma d'un vibrateur circulaire [51]

D'excellents résultats peuvent être obtenus, tant pour les petites pièces que sur celles plus grandes et plus lourdes.

De par la grandeur efficace et la flexibilité des vibrateurs circulaires, ils offrent une multitude de solutions en finition.

Tableau III.2 Désignation des différents compartiments d'un vibrateur circulaire

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

Il existe plusieurs types de vibrateurs circulaires qui se différencient par la forme et les dimensions de la cuve ou par la caractéristique du vibrateur, citons quelques-uns.

- **Vibrateurs circulaires de type «EC»**

De par la conception spéciale de la cuve de traitement, les vibrateurs circulaires type EC sont les plus couramment proposés.

Le fond incliné de la cuve des machines EC permet le traitement et la séparation des petites et grandes pièces.

Les vibrateurs EC sont idéalement adaptés pour la finition de pièces fragiles.

- **Vibrateurs circulaires de type « Euro »**

Les vibrateurs circulaires de type Euro sont idéaux pour les traitements de finition automatiques.

Ils sont caractérisés par une cuve torique spiralée avec trappe de séparation automatique intégrée.

- **Vibrateurs circulaires de type «A»**

Ils sont munis d'un séparateur magnétique et sont spécialement conçus pour le traitement des pièces pouvant être séparées magnétiquement. Ils sont munis d'une cuve de travail renforcée spéciale pour faciliter la séparation magnétique.

- **Vibrateurs circulaires de type «R»**

Machines toriques à fond plat destinées au traitement de pièces lourdes et/ou fragiles.

Le fond plat assure une parfaite immersion des pièces dans la charge d'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.

- **Vibrateurs circulaires à grand rayon**

Leur plus grand avantage est la possibilité d'être utilisés dans un système de production en continu ou par charge. Leur haut degré de flexibilité offre des avantages significatifs pour les plannings de production, favorisant la réduction du temps de traitement avec un coût plus économique. Par ailleurs, ils nécessitent un faible encombrement au sol.

Ils sont utilisés dans plusieurs domaines d'application : ébavurage, rayonnage, amélioration de surface, polissage et brillantage de pièces découpées, moulées, forgées ou usinées.

La cuve comporte une double paroi toroïdale de largeur et profondeur égales.

Ils garantissent un excellent mouvement de rotation et une parfaite immersion des pièces dans la charge des médias.

Avec un diamètre de la cuve entre 2075 mm à 3050 mm et un volume supérieur à 500 dm³.

Ils ont un fonctionnement autonome ou intégré dans une ligne automatisée avec périphériques de chargement et déchargement des pièces.

Les machines circulaires à grand rayon offrent des solutions supérieures pour la finition de pièces.

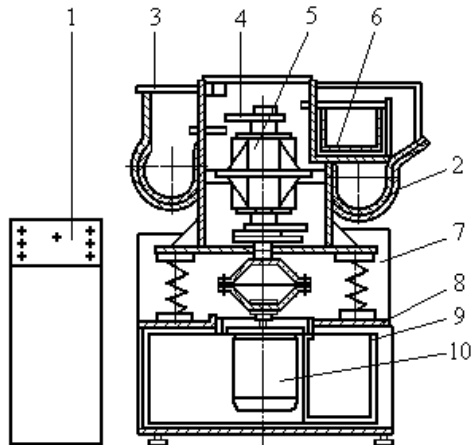
- **Vibrateurs circulaires hélicoïdaux**

Le traitement est accompli dans une cuve sous forme hélicoïdale(2) (figure III.3) montée sur des ressort hélicoïdaux (7), à l'aide d'une commande de mise en marche et d'arrêt.

Un moteur électrique (10) monté en bas dans la base (8) de la machine fournit de l'énergie au vibreur (5) qui se règle à l'aide des balourds (4) qui sont reliés au moteur, où les pièces à traiter et médias sans mis en contact et couverts par une couverture (3).

Ce type de machine est utilisé dans les machines à installation en continu.

Tableau III.3 Désignation de différents compartiments d'un vibreur hélicoïdal



Repere	Désignation
1	La commande de la machine
2	cuve
3	Couverture
4	Le balourd
5	Vibreur
6	pont
7	ressorts hélicoïdaux
8	Base
9	Réservoir
10	Moteur électrique

Figure III.3 Schéma machine vibrante avec une chambre de travail hélicoïdale

- **Vibreur circulaire spirale type Rotomatic**

La machine Rotomatic est particulièrement adaptée pour l'ébavurage, le décapage, le nettoyage, le rayonnage et d'autres applications. Toutes les Rotomatic sont équipées du système d'entraînement direct à haute énergie. Le nouveau concept type Rotomatic est caractérisé par une cuve multi-spires d'une longueur totale allant de 18 m jusqu'à 30 m (la largeur du bol de travail est de 200 mm), avec réglage des temps de traitement.

Dans ce vibreur la zone de séparation est directement intégrée dans le bol (cuve), ce qui économise l'espace.

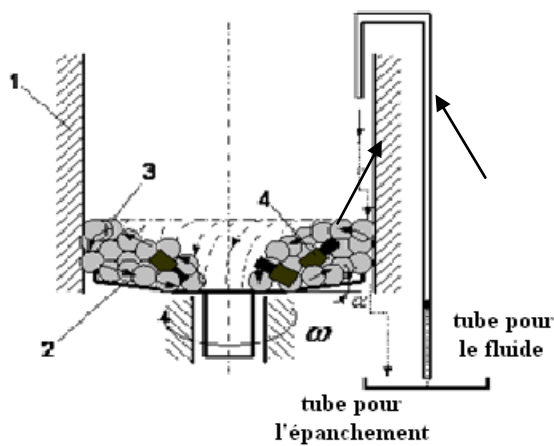
III.3.3 Machines à force centrifuge (centrifugeuses)

C'est une méthode de traitement des pièces dans flux toroïdal-hélice de l'environnement de fabrication, cette méthode existe dans différents pays mais dans chaque pays le nom ce diffère. Ainsi, en Pologne - il est appelé cascade de rotation, Allemagne - rotor de finition, et dans notre pays - une centrifugeuse.

Cette machine est utilisée principalement pour l'élimination de grosses bavures et rayonnage de pièces en grande série. Des technologies spécifiques permettent aussi le traitement de pièces petites et fragiles.

Les machines à force centrifuge permettent d'atteindre des gains de temps dans un ratio de 3 à 10 par rapport à une application similaire en machine vibrante.

Tableau III.4 Désignation des différents compartiments d'une machine à force centrifuge



Repère	Désignation
1	Cuve (fixé)
2	Lit (mobile)
3	Medias
4	Pièces traitées

Figure III.4 Schéma d'une machine à force centrifuge [32, 75, 91]

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

L'essentiel de la méthode de traitement par force centrifuge est que la charge granulaire (medias) 3 et les pièces 4, sont chargés dans la chambre de travail et sont en mouvement de rotation autour d'un axe vertical afin que le chargement de masse entière (pièces + medias) prenne la forme d'un tore.

La chambre de travail est un filetage toroïdal, composé d'une coque fixé en position verticale cylindrique 1 et un lit pour la rotation 2. Les surfaces du lit et la partie fixe de la chambre de travail sont recouvertes d'un matériel résistant à l'usure, pour réduire l'usure sur cette surface [83,85].

Et parmi les matériaux plus couramment utilisé dans le revêtement du lit et la cuve sont le caoutchouc ou enduit de polyuréthane.

La rotation du fond est généralement fournie par un moteur électrique réversible ou moteur hydraulique.

Comme dans les autres gammes de vibro-abrasion, on peut utiliser de différents matériaux granulaires (medias), des particules abrasives de différentes formes, des billes de porcelaine, des billes d'acier poli, etc.

Les principaux avantages du vibreur à force centrifuge sont les suivants:

- Il a une haute intensité de traitement.
- Simple d'utilisation dans les équipements de construction.
- Usinage simultané en grande quantité.

La rugosité de la surface usinée avec le traitement d'un vibreur à force centrifuge dépend des caractéristiques suivantes :

- Les modes de traitement.
- Le volume de chargement de la chambre de travail.
- Les propriétés physiques et mécaniques du matériau.
- Rugosité de la surface initiale et d'autres facteurs.

Domaine d'application :

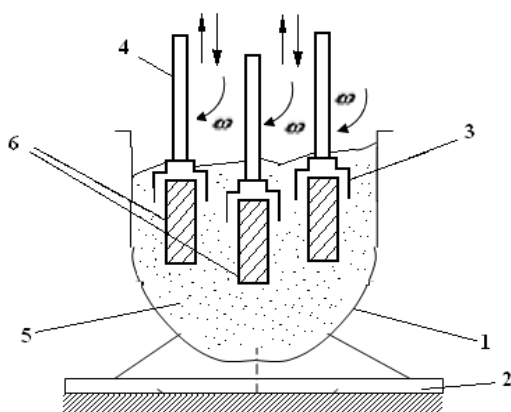
- Ebavurage.
- Rayonnage.
- Polissage.
- Dégraissage.

III.3.4. Machines multibroches type Smuritropie

Les machines de vibration multibroches ouvrent de nouvelles perspectives de traitement de pièces de grande valeur.

L'efficacité des machines multibroches, grâce à leur motorisation spéciale, permet de réduire les durées de traitement d'un facteur 50 par rapport aux machines vibrantes et d'un facteur 10 par rapport aux machines à force centrifuge.

Tableau III.5 Désignation des différents compartiments d'une machine multibroche type smuritropie



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

Figure III.5 Schéma d'une machine multibroche type Smuritropie [89]

Le coût d'exploitation des machines multibroches sont très importantes grâce à leur puissance, à la rapidité du traitement et à la faible consommation d'abrasifs. En effet, à la différence des autres machines de vibro-abrasion, la charge d'abrasifs est statique et seuls les éléments de cette charge en contact direct avec les pièces à traiter subissent une usure due au

frottement. La proportion d'abrasifs travaillant réellement est donc beaucoup plus réduite que dans les autres machines de vibro-abrasion où la totalité de ces abrasifs est en mouvement et où la plupart s'usent entre eux.

Durant le traitement, les pièces fixées par l'intermédiaire de broches 3, fixes sur un anneau rotatif sont immergées dans la charge abrasive statique. Dans certains cas, les pièces peuvent aussi être animées d'un mouvement satellitaire par mise en rotation des broches.

Le choix des machines multibroches peut s'imposer dans les cas ci-après:

- Leur traitement manuel demande une main d'œuvre longue et coûteuse.
- Les pièces doivent être traitées de façon très régulière et reproductible.
- Les pièces sont constituées d'alliages de grande dureté.
- La morphologie des pièces est complexe et comporte de nombreuses arêtes.
- Les pièces extrêmement fragiles ne doivent pas risquer de s'entrechoquer.
- Les pièces doivent avoir un état de surface très fin.

Les multibroches sont utilisées pour les pièces suivantes:

- Hélices marines ou aéronautiques.
- Outils à main (pinces, marteaux, etc...).
- Carcasses d'outils électroportatifs ou pneumatiques.
- Implants chirurgicaux.
- Poignées de porte (haut de gamme).
- Semelles de fer à repasser (polissage après revêtement).
- Aubes de turbine.
- Guide-fil de machines pour l'industrie textile.
- Corps et boisseaux de vannes.
- Pignons et carters de boîtes de vitesse.
- Pièces forgées (amélioration d'état de surface).
- Composants d'armes.
- Eléments de machines-outils.
- Pièces de moteurs, pompes et vannes hydrauliques.

Les avantages du système multibroches sont:

- Machines équipées en série de 12 broches porte pièces rotatives permettant de fixer une ou plusieurs pièces.
- Vitesse variable en continu.
- Possibilité d'inversion de sens de rotation de l'anneau.
- Le mouvement satellitaire des broches peut être activé ou interrompu.
- Les vitesses de rotation de l'anneau et des broches sont indépendantes.
- Possibilité d'inversion de sens de rotation des broches.
- Angle d'inclinaison des broches réglables.
- Dispositif intégré de lavage et de séchage des pièces.
- Broches à pince automatique pour échange rapide des pièces.
- Verrouillage commandé par pédale.

III.4 Milieu actif (medias et additifs chimiques) [90]

III.4.1 Medias (abrasifs)

Un abrasif est une matière extrêmement dure, qui use d'autres matériaux plus tendres que cette matière donc on peut les appeler des ingrédients de la tribofinition. Ils sont généralement à base de céramique ou polyester. Leur forme est particulièrement variable et comprend essentiellement des cylindres coupe droite ou en biais, des triangles coupe droite ou en biais, des billes, des cônes, des pyramides, des tristar, etc.

Ces médias abrasifs permettent de mécaniser des opérations d'ébavurage ou de polissage et d'apporter un traitement à la fois très uniforme et surtout constant, même sur des séries de pièce très importantes.

Pour le choix de la constitue des médias il est nécessaire de prendre en compte l'opération à réaliser :

- Matériau en abrasif pour des opérations vibro-abrasif.
- Matériau non abrasif pour des opérations de finition.
- Les matériaux métallique (bille, rouleau,...) pour le durcissement superficiel, par exemple pour la réalisation des opérations grossières « ébauche » (l'enlèvement des grosses bavures).

Les abrasif sont réalisés avec des matériaux particulièrement résistants à l'usure et sont choisis toujours en fonction du travail qu'ils doivent effectuer.

Ils possèdent deux caractéristiques importantes :

- La dureté qui leur permet d'attaquer les matériaux plus tendre.
- La taille et la géométrie des grains qui génère l'état de surface final (la rugosité).

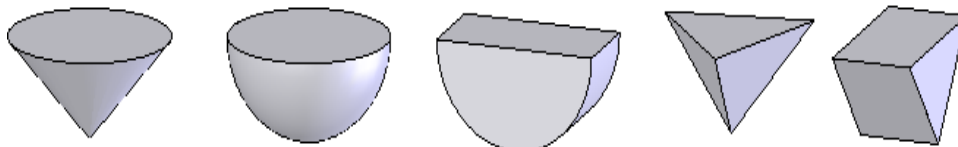


Figure III.6 Géométrie de la particule abrasive

La déformation de la surface sous l'action de la particule abrasive dépend en effet de plusieurs paramètres:

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

❖ Paramètres de l'abrasif

➤ **Composition** : La composition de l'abrasif détermine son pouvoir de coupe ainsi que l'état de surface de la pièce souhaitée.

➤ **Forme (géométrie de l'abrasif)**: 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.

En générale, on trouve les médias abrasifs sous forme de Tétraèdre, Pyramide, Tristar, Cône, Paraboloïde, Lentille Triangle, Cylindre, Étoile, Ellipse, Flèche, Rhomboïde, Bille selon l'opération et la rugosité souhaitée.

➤ **Dimensions** : La dimension et le poids sont des facteurs clés du pouvoir de coupe.

Un abrasif de grande taille et lourd, de haute dureté, procure un état de surface plus grossier, on l'utilise quant on a besoin plus d'enlèvement de la matière et aussi pour les opérations de nettoyage des pièces brutes moulées, un abrasif petit et léger est moins agressif, donc mieux adapté à des exigences de bon état de surface, c'est pour les opérations de finition.



Figure III.7 Différents types d'abrasifs (Cône, Bille et prisme)

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. En générale la taille des particules d'abrasifs doit être inférieure de 2,5 fois par rapport aux trous des pièces à traiter.

Quant on a besoin plus d'enlèvement de la matière on utilise des abrasives grossières hautes duretés avec grosse granulation (abrasif de grand taille et lourd) et aussi pour les opérations de nettoyage des pièces brute moulée. Pour les opérations de finition pour avoir un bon état de surface on utilise beaucoup plus les abrasifs à granulation fine moins agressif (abrasif de petit taille et léger).

La composition de l'abrasif (granulation) est déterminée par son pouvoir de coupe ainsi que l'état de surface de la pièce, par exemple pour métaux et les alliages non ferreux on utilise

des billes en verre (ce choix a été fait en fonction de l'état de surface initial et celle qu'on veut obtenir).

Pour le durcissement superficiel, habituellement on prend des billes en acier traité de différents diamètres avec un rajout d'additif chimique.

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, ...etc), par exemple la taille des particules d'abrasif ne doit pas être supérieure à la dimension de trous ou bien les cavités d'une pièce qui sera traitée.

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 sans oublier que la taille et le poids de l'abrasif peut entraîner des déformations de la pièce à traiter.

Tableau III.6 Différents types d'abrasifs et leur domaine d'application [1]

N°	La composition du matériau	Domaine d'utilisation
1	Granule d'abrasif (céramique)	L'ébavurage, l'arrondissement des angles vifs, rectifications des surfaces
2	Bakélite	Nettoyage des déchets, l'ébavurage, l'arrondissement des angles vifs
3	Granule d'abrasif sous forme cylindrique (rouleaux)	Décalaminage, l'arrondissement des angles vifs et rectifications
4	Les billes en porcelaine (Φ 6 et 10mm)	L'ébavurage léger, l'arrondissement des angles vifs, polissage
5	Les billes en verre (Φ 2-14mm)	Polissage des matériaux ferriaux et non ferriaux, rectifications des pièces en alliage à base de cuivre.
6	Granule abrasif en polymère	Le polissage, opération de finissage de surface
7	Les billes en acier inoxydable	Polissage, durcissement superficiel, opération des stabilisations
8	Granule en résine	Nettoyage des pièces de la saleté

III.4.2 Additifs chimiques

Dans le processus de la technologie de vibration, il est nécessaire pour avoir un traitement complet de rajouter des additifs chimiques.

Le choix de l'additif doit être fait en tenant compte des facteurs suivants :

- Type de travail à effectuer (ébavurage, polissage, brillantage, effet mat, dégraissage, passivation...).
- Type de pièces à traiter.
- Type de chips (abrasifs) à employer.
- Type d'équipement utilisé.
- Les normes environnementales à respecter.

Les additifs chimiques utilisés dans le domaine du traitement par vibro-abrasion sont sous les formes suivantes :

- Liquides.
- Poudres.
- Pâtes.

1) Additifs chimiques en liquide

Les composés liquides constituent les bases de travail optimales des techniques modernes du traitement par vibration.

Grâce à leur grande capacité de nettoyage, ils gardent les pièces et les abrasifs propres et les préparent pour tout traitement de finition.

Il est le produit le plus utilisé dans le traitement par vibro-abrasion car il est le plus approprié et le plus favorisé pour la rentabilité et la protection de l'environnement.

Le fluide dans le processus du traitement par vibro-abrasion accomplit l'état suivant :

- Intensification du traitement.
- Refroidissement des pièces.
- Assurer la stabilité des outils coupants du milieu actif pour les protéger contre la saleté et la pollution.
- Protection de la surface de la corrosion.

Il existe trois types de fluides :

1. **activateur chimique dans un milieu acide** : 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.
2. **activateur chimique dans un milieu alcalin (basique)** : il est destiné pour l'enlèvement de la bavure, et aussi pour le polissage.
3. **activateur chimique dans un milieu neutre** : il est destiné pour le nettoyage et le lavage et l'enlèvement des produits d'usure.

a. Caractéristiques et désignations

Le lubrifiant le plus utilisé est l'activateur chimique en milieu acide et basique, dans le but d'élargir et de renforcer leur action on rajoutant les éléments suivants : La soude, le détergent, ...etc.

Pour le nettoyage, on utilise anhydride chromique.

Le volume de remplissage de fluide utilisé varie entre 3 à 5% par rapport à la chambre de travail, la durée de traitement ne doit pas dépasser deux heures, dans le cas contraire le pourcentage de la saleté augmente et la concentration d'activation diminue.

Pour le traitement de longue durée, on utilise des solutions chimiques à concentration moindre, ce qui préserve leurs propriétés physico-chimiques.

Le débit de fluide varie de 2 - 10 (l/min), tout dépend de l'opération à réaliser, du volume de la chambre de travail, et aussi de la rigidité des pièces à traiter.

b. Classification et propriétés des fluides

La classification des fluides et leur propriétés est divisé en trois groupes:

- Neutre (PH=7).
- Acide (PH< 7).
- Basic (PH>7).

Le plus grand débit est utilisé pour un vibreur avec une grande capacité de la chambre de travail [3].

Le tableau ci-après représente la composition de l'additif chimique recommandé pour différentes opérations :

Tableau III.7 Composition de l'additif chimique recommandé pour différentes opérations [1, 4]

N°	Compositions d'additifs chimiques	Symboles chimiques	Concentration (g/l)	Domaine d'utilisation
1	Hydrate d'oxyde de sodium	[Na ₂ O]	15	Nettoyage des surfaces épaisses de la calamine,
2	Hydroxyde de sodium	[NaOH]	20	“
3	Carbonate de soude	[Na ₂ CO ₃]	20	“
4	Nitrate de sodium	[NaNO ₃]	20 - 30	Nettoyage, décalaminage
5	Soude à l'ammoniac	[NH ₄ OH]	20 - 30	“
6	Silicate de sodium	[Na ₂ O.2SiO ₂]	20 - 30	Protéger les détails de la corrosion, conservation de courte durée
7	Phosphate de sodium	[Na ₃ PO ₄]	20 – 30	“
8	Perchlorure de fer	[Fe Cl ₃]	2 – 10	Assure une couleur éclatante pour l'état de surface
9	polyacrylamides	$\left[\begin{array}{c} -CH_2 - CH - \\ \\ CONH_2n \end{array} \right]$	10	Assure la brillance du métal

2) Additif chimiques en poudres

Les additifs peuvent être sous forme de poudre, ces composés en poudre remplissent leur fonction là où d'autres produits seuls ne suffisent pas :

- dégraissage massif.
- procédés spéciaux de décapage et de décalaminage.
- augmentation du pouvoir abrasif.
- nettoyage des abrasifs sont les principales fonctions de ce type de produit.

Il existe aussi des poudres très fines dont la taille est de l'ordre de dizaine de nanomètres.

Ces poudres permettent d'obtenir des résultats particulièrement intéressants lorsque l'on recherche un état de surface de très haute qualité :

Tableau III.8 Domaine d'utilisation de différentes poudres

N°	Composition des additifs chimiques	L'utilisation
1	poudre d'oxyde d'Aluminium	Bien adaptée pour des travaux d'ébavurage doux, mais également pour des travaux de préparation au polissage
2	poudre d'oxyde d'Aluminium	Destinée à des travaux de polissage fin. Nécessite une première étape de préparation au polissage avec une poudre de type poudre d'oxyde d'Aluminium ou équivalent
3	poudre de carbure de silicium purifiée	Bien adaptée pour des travaux d'ébavurage puissant. Il peut avoir pour inconvénient de ternir les surfaces (inox par exemple) et nécessiter un ébavurage complémentaire à la poudre d'oxyde d'Aluminium avant de passer au polissage

3) Additifs chimiques sous forme de pâte

Les pâtes sont utilisées avec des médias en vibrateurs circulaires et machines à force centrifuge pour obtenir une finition lisse et très brillante sur des surfaces sensibles.

Cette même pâte s'accordent à la structure des surfaces et les affinent de façon économique en respectant l'environnement.

Les produits en poudre sont l'évolution logique de nos pâtes déjà éprouvées.

Et en trouve plusieurs type de pate qui se différencie avec le type de matériaux utilisés (Acier, Cuivre, Aluminium, Zinc.....) et le travail à faire (Ebarbage, Ebavurage, Rayonnage, Superfinition, Brillantage, Polissage....).

Et parmi les différents types de pâte on trouve :

- Pâte de polissage.
- Pâte d'ébavurage universelle.
- Pâte à effet légèrement abrasif.
- Pâte de polissage avec effet de brillantage.
- Pâte de brillantage pour la finition de pièces pré-polies.
- Pâte légèrement abrasive ayant une bonne action de brillantage et de polissage.

- Pâte universelle pour polissage avec pouvoir abrasif réduit.
- Pâte de polissage avec bonne capacité de brillantage.
- Produit spécial pour métaux non ferreux et précieux.
- Pâte d'ébavurage avec pouvoir abrasif renforcé.
- Pâte d'ébavurage très et extrêmement mordante.

Conclusion

Les différents équipements cités ci-dessus sont des équipements utilisés dans le domaine de traitement mécanique de surface qui ont pour but d'améliorer les caractéristiques mécaniques, géométriques et métallurgiques, chaque équipement est choisis en fonction des pièces à traiter (matériaux, formes géométriques et dimensions), les medias aussi sont choisis en fonction de l'état de surface qu'on veut obtenir ainsi que la dureté demandée, ou pour d'autres fins et enfin les additifs chimiques sont choisis en fonction du milieu actif et de l'environnement de travail et aussi en fonction des objectifs fixés.

Chapitre IV

Plans d'expériences de Box-Behnken et modélisation mathématique

IV.1 Introduction

Les plans d'expériences servent à optimiser l'organisation des essais, cette organisation permet d'obtenir le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences.

Elle permet également d'obtenir la meilleure précision possible sur la modélisation des résultats.

Cette méthode des plans d'expériences est basée sur des règles mathématiques strictes et elle exige une démarche rigoureuse de la part de l'expérimentateur.

Les plans d'expériences permettant d'acquérir de nouvelles connaissances en contrôlant un ou plusieurs paramètres d'entrée dans le système pièces/abrasifs pour obtenir des résultats tout en validant un modèle mathématique avec une bonne économie d'expérimentation, nombre d'essais le plus faible possible. (Figure IV.1) [7].

La méthode utilisée dans les plans d'expériences est la méthode de Box-Behnken, les résultats seront présentés dans le chapitre V.

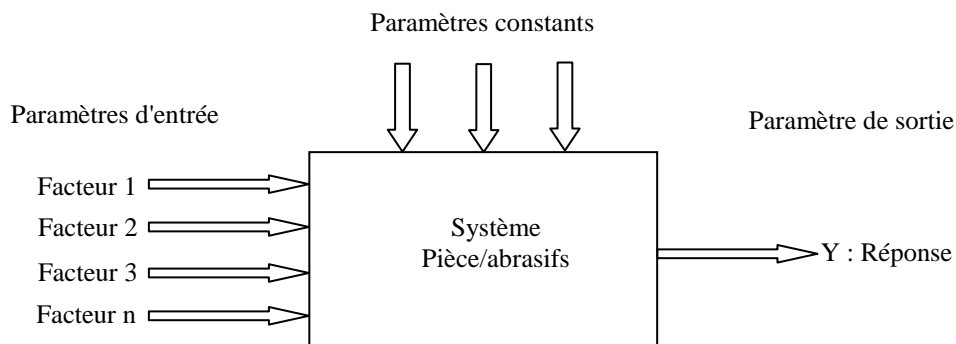


Figure IV.1 Schéma de l'expérimentation

Cette science de l'organisation des essais et de la modélisation des résultats expérimentaux nécessite une terminologie adaptée, précise et une mise en œuvre rigoureuse.

IV.2 Terminologie

Sous une forme mathématique, on peut écrire la grandeur d'intérêt y , que nous appellerons également réponse par la suite, est une fonction de plusieurs variables x_i (variables que nous appellerons aussi facteurs par la suite). On a :

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) \quad (\text{IV.1})$$

L'étude du phénomène se ramène à déterminer la fonction $f()$ qui lie la réponse y aux différents facteurs x_1, x_2, \dots, x_k .

Pour approfondir cette approche il faut introduire quelques notions particulières et une terminologie spécifique aux plans d'expériences.

IV.2.1 Différents types de facteurs [8]

La construction des plans et l'interprétation des résultats dépendent en grande partie des types de facteurs rencontrés dans l'étude. On distingue plusieurs types de facteurs. Nous retiendrons les types de facteurs suivants : les facteurs continus, les facteurs discrets, les facteurs ordonnables, les facteurs booléens.

IV.2.1.1 Facteurs continus

La pression est un exemple de facteur continu. Dans un intervalle de pression donné, on peut choisir toutes les valeurs possibles. Il en est de même d'une longueur, d'une concentration ou d'une température. Les valeurs prises par les facteurs continus sont donc représentées par des nombres continus.

IV.2.1.2 Facteurs discrets

Au contraire, les facteurs discrets ne peuvent prendre que des valeurs particulières. Ces valeurs ne sont pas forcément numériques, on peut représenter un facteur discret par un nom, une lettre, une propriété ou même par un nombre qui n'a alors en soi aucune valeur numérique mais qu'une signification de repère. Par exemple, on peut s'intéresser aux couleurs d'un produit : bleu, rouge et jaune sont des facteurs discrets.

IV.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.

IV.2.1.4 Facteurs booléens

Les facteurs booléens sont des facteurs discrets qui ne peuvent prendre que deux valeurs, haut ou bas, ouvert ou fermé, blanc ou noir, etc.

La compréhension des plans d'expériences s'appuie sur la notion essentielle d'espace expérimental des grandeurs étudiées. Nous allons examiner en détail ce concept fondamental. Nous insisterons sur les facteurs continus qui sont les plus couramment utilisés.

IV.2.2 Espace expérimental

Pour présenter l'espace expérimental nous utiliserons un espace à deux dimensions, ce qui facilitera les représentations graphiques. Il est ensuite facile d'étendre les notions introduites à des espaces multidimensionnels.

Un facteur continu peut être représenté par un axe gradué et orienté. S'il y a un second facteur continu, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté.

Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions.

Cet espace est appelé l'espace expérimental (figure IV.2). L'espace expérimental comprend tous les points du plan « facteur 1 X facteur 2 » et chacun d'eux représente une expérience.

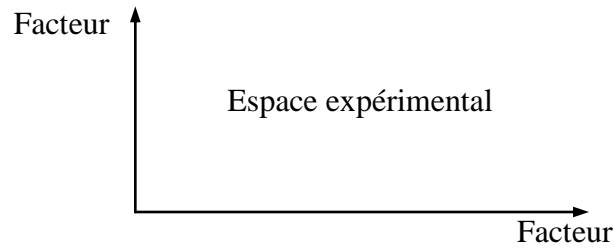


Figure IV.2 Espace expérimental constitué par deux axes gradués et orientés, les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux

S'il y a un troisième facteur, on le représente aussi par un axe orienté et gradué, et on le positionne perpendiculairement aux deux premiers. À partir de quatre facteurs, on opère de même, mais il n'y a plus de représentation géométrique possible et l'on doit adopter une représentation purement mathématique de l'espace expérimental qui est un hyper volume à quatre dimensions.

IV.2.3 Domaine d'un facteur

La valeur donnée à un facteur pour réaliser une expérience est appelée niveau.

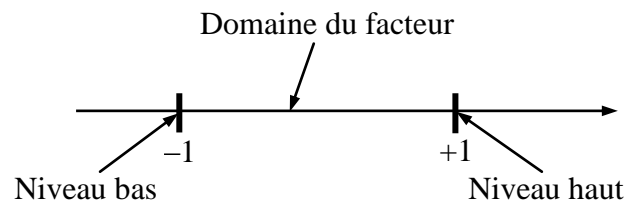


Figure IV.3 Domaine d'un facteur situé entre deux bornes (-1, +1)

Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut.

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.

S'il y a plusieurs facteurs, chacun d'eux a son domaine de variation. Afin d'avoir une représentation commune pour tous les facteurs, on a l'habitude d'indiquer les niveaux bas par -1 et les niveaux hauts par $+1$.

À l'intérieur du domaine d'un facteur continu toutes les valeurs sont théoriquement possibles. On peut donc y choisir deux, trois ou plusieurs niveaux selon les besoins de l'étude. Par exemple, si l'on veut établir un modèle du second degré, on choisira trois ou quatre niveaux.

IV.2.4 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 (figure VI.4). Ce domaine est défini par les niveaux hauts et les niveaux bas de tous les facteurs et éventuellement par des contraintes entre les facteurs.

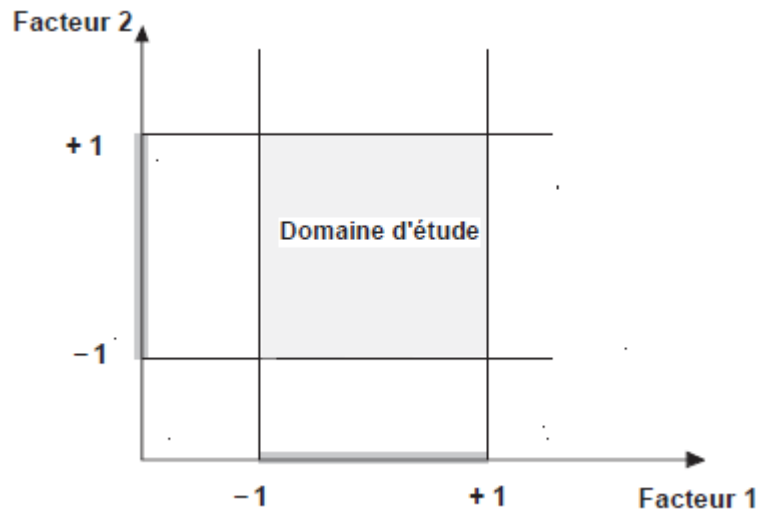


Figure IV.4 Domaine d'étude est défini par la réunion des domaines de différents facteurs (ici, il n'y a pas de contraintes)

Il peut y avoir des contraintes sur le domaine d'étude.

La figure IV.5 illustre une réduction possible du domaine d'étude initial. Une zone du domaine d'étude initial échappe aux expériences.

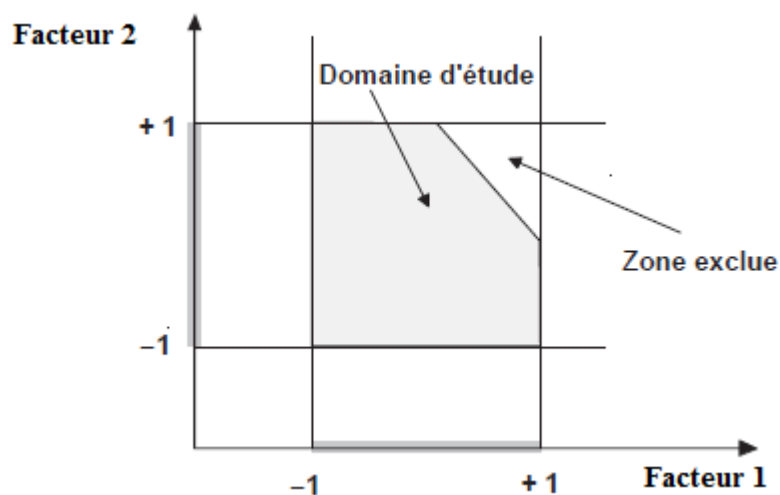


Figure IV.5 Domaine d'étude sous contrainte est représenté par la partie grisée

IV.2.5 Points expérimentaux

Dans un espace à deux dimensions, le niveau i du facteur 1, noté $x_{1,i}$, et le niveau j du facteur 2, noté $x_{2,j}$, peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental ou du domaine d'étude (figure IV.6).

Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes.

C'est la raison pour laquelle une expérience est souvent désignée par l'expression point expérimental, point d'expérience ou même simplement point. Un plan d'expériences est donc représenté par un ensemble de points expérimentaux, eux-mêmes situés dans l'espace expérimental.

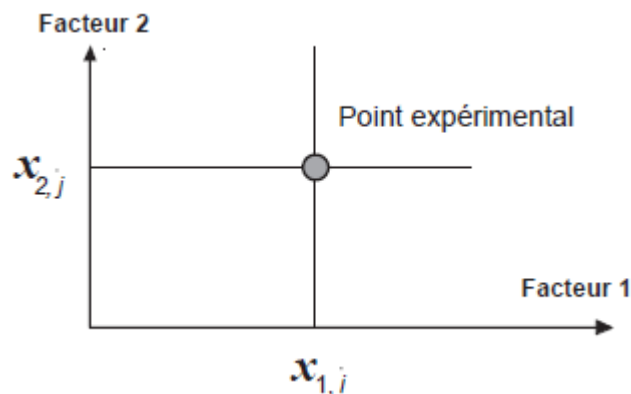


Figure IV.6 Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux

Jusqu'à trois facteurs, il est possible de dessiner le domaine d'étude.

Au-delà de trois facteurs, on utilise une représentation en tableau, dite matricielle, plus générale puisqu'elle permet de représenter les points d'expériences dans un hyper volume à un nombre quelconque de dimensions.

IV.2.6 Surfaces de réponse

À chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. À l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localise sur une surface appelée surface de réponse (figure IV.7).

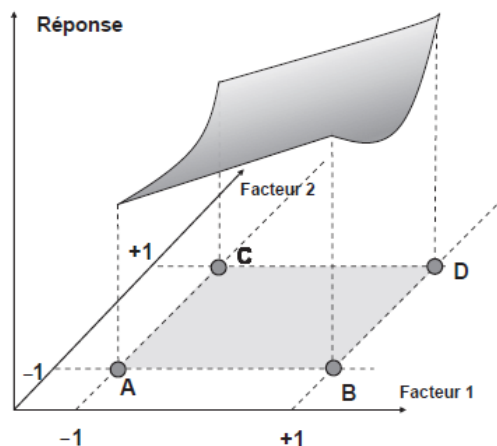


Figure IV.7 Surface de réponse

En général, on ne connaît que quelques réponses, celles qui correspondent aux points expérimentaux retenus par l'expérimentateur. On interpole à l'aide d'un modèle mathématique, les réponses inconnues pour obtenir la surface de réponse.

Les points d'expériences retenus par la théorie des plans d'expériences assurent la meilleure précision possible sur la forme et la position de la surface de réponse.

IV.2.7 Variables centrées réduites

Lorsqu'on attribue la valeur -1 au niveau bas d'un facteur et la valeur $+1$ au niveau haut, on effectue deux modifications importantes :

- On déplace l'origine des mesures, la valeur numérique de la nouvelle origine, zéro, diffère donc de l'origine exprimée en unité courante.
- On change l'unité de mesure, on lui donne le nom de *Pas*.

Ces deux modifications entraînent l'introduction de nouvelles variables que l'on appelle variables centrées réduites (v.c.r) : centrées pour indiquer le changement d'origine et réduites pour signaler la nouvelle unité. On utilise également le terme de variables codées ou d'unités codées.

Le passage des variables d'origine A aux variables codées x , et inversement, est donné par la formule suivante (A_0 est la valeur centrale en unités courantes) :

$$x = \frac{A - A_0}{Pas} \quad (IV.2)$$

L'intérêt des unités codées est de pouvoir présenter les plans d'expériences de la même manière quels que soient les domaines d'étude retenus et quels que soient les facteurs.

La théorie des plans d'expériences présente ainsi une grande généralité.

L'utilisation des V.C.R est très répandue dans les logiciels de plans d'expériences et certaines opérations comme la recherche des meilleurs points d'expériences par le critère de D-optimalité n'est réalisable qu'avec ces variables.

Les variables codées résultent du rapport de deux grandeurs de même unité physique, elles sont donc sans dimension. La disparition des unités naturelles associée au fait que tous les facteurs ont le même domaine de variation (deux unités codées) permet la comparaison directe des effets des facteurs entre eux.

IV.2.8 Matrice d'expériences [7]

La représentation géométrique d'un plan d'expériences est commode pour imaginer la position des points expérimentaux dans le domaine d'étude, mais elle ne peut plus être employée dès que le nombre de facteur est supérieur à trois. Pour les espaces multidimensionnels, nous adopterons une représentation en forme de tableau ou matrice d'expériences.

La matrice d'expériences (tableau IV.1) définit les essais à réaliser le terme essai est équivalent de point d'expérience lorsque l'on emploie la représentation en tableau des plans d'expériences.

Tableau IV.1 Matrice d'expériences

N° Essai	Facteur 1	Facteur 2
1 (A)	-1	-1
2 (B)	+1	-1
3 (C)	-1	+1
4 (D)	+1	+1

La matrice d'expériences comprend une première colonne qui identifie les essais.

Les colonnes suivantes indiquent les coordonnées des points représentatifs des expériences prévues. Par exemple, l'essai N°1 est celui pour lequel les deux facteurs étudiés sont aux niveaux bas (-1). Cet essai correspond au point A de la figure IV.8.

L'essai N°2 est celui pour lequel le premier facteur est fixé au niveau haut (+1) et le second facteur est fixe au niveau bas (-1). Cet essai correspond au point B.

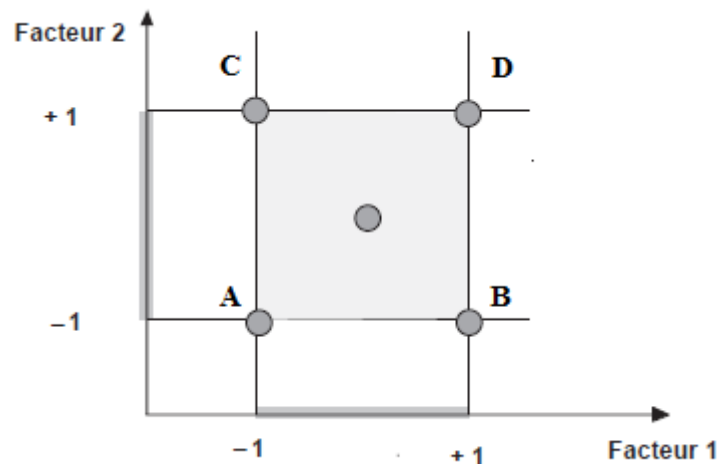


Figure IV.8 Points expérimentaux aux sommets du domaine d'étude

IV.2.9 Différents types de plans d'expériences

Il existe plusieurs types de plans d'expériences, parmi ces plans nous avons :

IV.2.9.1 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 « un facteur à la fois »**

Contrairement à ce que l'on a voulu faire croire, ce type de plan veut se révéler très utile lorsqu'il y a beaucoup de facteurs et que le phénomène est compliqué.

On n'obtient aucune interaction. Seuls les effets principaux sont connus.

- **Plans factoriels fractionnaires**

Ce type de plan permet d'étudier beaucoup de facteurs et, si l'on sait bien les interpréter (théories des aliases) on peut détecter les interactions entre les facteurs.

Ces plans portent par fois des noms différents, plan de Plackett et Burman, table de Taguchi, plans de pesées, etc. Ils sont tous basés sur des matrices d'Hadamard et sont parmi les plans les plus utilisés.

- **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.

IV.2.9.2 Plans de modélisation

- **Plans factoriels complets**

Ces plans peuvent être utilisés pour la modélisation mais, comme il n'y a que deux niveaux par facteur, 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**

On entend par le plan non conventionnel 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'aient pas été respectés et que les points d'expériences soient décalés par rapport aux sommets.

Le plan réalisé est alors un plan non conventionnel. Un autre cas de plan non conventionnel concerne le nombre de points d'expériences. Un plan classique possède un

nombre précis d'essais à réaliser. Pour certaines raisons, il se peut qu'il y ait soit plus, soit moins d'essais effectivement réalisés.

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

- **Plans composites**

Ces plans permettent une modélisation du second degré. La démarche séquentielle a déjà été signalée. Elle comprend un plan factoriel. Un plan en étoile et des points centraux. Elle se révèle très pratique pour maîtriser le nombre des essais.

- **Plans de Doehlert**

Ces plans ont été imaginés pour interpréter les réponses obtenues avec un modèle du second degré tout en effectuant un minimum d'essais. Des plans se prêtent bien à l'étude séquentielle des facteurs.

- **Plans de Box-Behnken**

Ces plans permettent de modéliser les réponses avec un modèle du second degré tout en respectant certains critères d'optimalité.

- **Plans de Roquemore**

Ces plans ne nécessitent que peu d'essais pour obtenir un modèle du second degré. Ils tentent de respecter plusieurs critères d'optimalité.

- **Plans D-optimaux**

Ces plans sont fort utiles car ils permettent de tenir compte de nombreuses contraintes. Ils assurent malgré tout une bonne précision sur les coefficients du modèle prédictif.

Ces cinq derniers types de plans donnent accès à des modèles mathématiques du second degré. On les regroupe sous la dénomination des plans pour surfaces de réponse. Ils possèdent des avantages et des inconvénients qu'il faut connaître pour choisir la stratégie qui s'adapte le mieux au problème posé.

IV.4.9.3 Plans de mélanges

Les plans de mélanges sont des plans particuliers adaptés aux facteurs dépendants. Ils sont surtout utilisés pour étudier l'influence des proportions des constituants d'un produit sur une réponse donnée. Les pourcentages des constituants sont les facteurs que l'on prend en compte.

Or, le pourcentage de tous les constituants est 100%. Si l'on modifie la proportion d'un seul constituant, il faut modifier au moins le pourcentage d'un autre constituant. Cette contrainte a des conséquences importantes sur la représentation géométriques et matricielles de ces plans. Elle a également des répercussions sur la modélisation des résultats.

IV.2.10 Choix du plan

Le choix du plan est important pour pouvoir extraire le maximum d'information et mieux les interpréter, le plan retenu tout au long de cette étude est le plan de Box-Behnken et cela pour des raisons pratiques, les facteurs à varier sont tous à trois niveaux, le nombre d'expérience est limité et le modèle mathématique est du second degré ce qui donne des résultats plus précis.

IV.2.11 Plan de Box-Behnken [7, 9, 55]

Box et Behnken ont proposé en 1960 ces plans qui permettent d'établir des modèles du second degré. En effet, 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.

IV.2.11.1 Construction des plans de Box-Behnken

Le plan de Box-Behnken pour trois facteurs est construit sur un cube. Les suivants qui prennent en compte plus de trois facteurs, sont construits sur des hyper cubes à quatre et cinq dimensions. Lorsque le nombre de dimensions dépasse 3, nous parlerons de n cubes, n étant le nombre de dimensions.

Par exemple, hyper cube à 4 dimensions sera un cube à 4-cube et hyper cube à 5 dimensions sera un 5-cube. On place les points expérimentaux non pas aux sommets du cube ou de l'hyper cube, mais au milieu des arêtes, au centre des faces (carrés) ou au centre des cubes.

Cette disposition a pour conséquence de placer tous les points expérimentaux à égale distance du centre du domaine d'étude. Donc sur une sphère dans un espace à trois dimensions et sur une hyper sphère lorsqu'il y en a plus de trois. On ajoute des points au centre du domaine d'étude pour réduire l'erreur de prévision en ce point.

IV.2.11.2 Nombre des éléments géométriques des cubes et des hyper cubes

Le cube possède :

- 8 sommets (dimension zéro)
- 12 arêtes qui sont des segments (dimension un)
- 6 faces qui sont des carrés (dimension deux)
- 1 cube qui est le cube lui-même (dimension trois)

Tous comme le cube, un hyper cube possède des éléments géométriques qui vont de zéro à n dimensions.

IV.2.11.3 Plan de Box-Behnken pour trois facteurs

Les points expérimentaux de ce plan sont situés au milieu des arêtes du cube (figure IV.9) le cube possède 12 arêtes.

On a d'habitude d'ajouter des points d'expériences au centre du domaine d'études, en général trois. Le plan de Box-Behnken pour trois facteurs a donc 12+3 essais, soit 15 essais. C'est le plan classique indiqué par Box-Behnken.

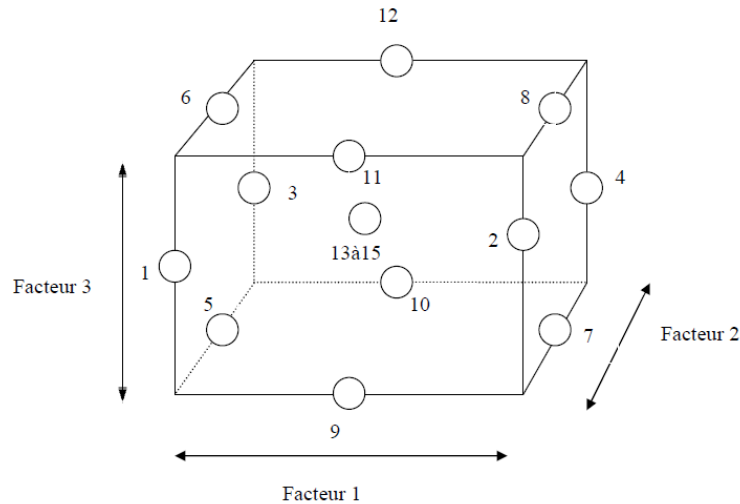


Figure IV.9 Illustration du plan de Box-Behnken pour trois facteurs. Douze points d'expériences sont au milieu des arêtes du cube et trois points centraux ont été ajoutés [7]

Les points situés au centre d'une arête ont pour coordonnées $0, \pm 1, \pm 1$, la construction du plan suit le principe suivant : deux facteurs décrivent un carré (4 essais d'un plan 2^2) et les coordonnées correspondants du troisième facteur valent zéro (tableau IV.2).

Tableau IV.2 Plan de Box-Behnken pour trois facteurs. [7]

Essai N°	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3
1	-1	-1	0
2	+1	-1	0
3	-1	+1	0
4	+1	+1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	+1
7	+1	0	-1
8	+1	0	+1
9	0	-1	-1
10	0	+1	-1

11	0	-1	+1
12	0	+1	+1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

IV.2.11.4 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 mathématiques postulé choisi au paragraphe suivant.

Les propriétés qui vont être établies ne sont valables que pour le modèle mathématique postulé choisi. Si, pour certaines raisons, expérimentateur est amené à changer de modèle, il devra établir les nouvelles propriétés de ce plan.

IV.2.11.5 Modèle mathématique

Le modèle mathématique postulé que l'on utilise, avec le plan de box-Behnken est du second degré avec les interactions d'ordre deux :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + e \quad (IV.3)$$

D'où :

- y- Grandeur de réponse mesurée pendant l'expérimentation.
- a- Coefficients.
- x- Variables.
- e- Erreur de prédiction.

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 à 15 équations et 10 inconnus [10].

4.2.11.6 Matrice de calcul

La matrice de calcul X est une matrice (15,10) puisqu'il ya 15 expériences et 10 coefficients.

Cette matrice est construite à partir du plan d'expériences (tableau IV.2) et du modèle postulé.

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

Avec cette matrice, on peut calculer les coefficients (a) en appliquant l'équation suivante :

$$\hat{a} = (X^t X)^{-1} X^t y \quad (\text{IV.4})$$

IV.2.11.7 Matrice d'information

La matrice d'information est calculée à partir de la matrice de calcul.

C'est une matrice (10,10)

$$X^t X = \begin{bmatrix} 15 & & & & & & 8 & 8 & 8 \\ & 8 & & & & & & & \\ & & 8 & & & & & & \\ & & & 8 & & & & & \\ & & & & 4 & & & & \\ & & & & & 4 & & & \\ & & & & & & 4 & & \\ & & & & & & & 8 & 4 & 4 \\ & & & & & & & 4 & 8 & 4 \\ & & & & & & & 4 & 4 & 8 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.5})$$

Tous les éléments qui ne sont pas écrit dans cette matrice sont des zéro. La structure de la matrice d'information montre que le plan de Box-Behnken pour trois facteurs ne respecte pas l'iso variance par rotation.

IV.2.11.8 Matrice de dispersion

La matrice de dispersion est l'inverse de la matrice d'information. C'est également une matrice (10,10)

$$(X'X)^{-1} = \begin{bmatrix} 0,333 & & & & & & & & & & -0,167 & -0,167 & -0,167 \\ & 0,125 & & & & & & & & & & & & \\ & & 0,125 & & & & & & & & & & & \\ & & & 0,125 & & & & & & & & & & \\ & & & & 0,250 & & & & & & & & & \\ & & & & & 0,250 & & & & & & & & \\ & & & & & & 0,250 & & & & & & & \\ -0,167 & & & & & & & 0,271 & 0,021 & 0,021 & & & & \\ -0,167 & & & & & & & 0,021 & 0,271 & 0,021 & & & & \\ -0,167 & & & & & & & 0,021 & 0,021 & 0,271 & & & & \end{bmatrix} \quad (\text{IV.6})$$

La matrice de dispersion montre que ce plan ne respecte pas le critère de presque orthogonale : il y a des éléments non nuls en dehors de la première ligne, de la première colonne et de la diagonale principale.

Mais, si l'on ajoute quatre points au centre au lieu de trois, on obtiendra un plan de Box-Behnken qui respecte ce critère.

IV.2.11.9 Ecart type des coefficients du modèle prédictif

La variance de chacun des coefficients du modèle postulé est donnée par la formule suivante :

$$\text{Diag } V(\hat{a}) = \sigma_r^2 \text{Diag}(X^t X)^{-1} \quad (\text{IV.7})$$

Nous possédons déjà les éléments diagonaux de la matrice de dispersion. Nous devons les identifier aux éléments diagonaux de la matrice des variances des coefficients.

En prenant les racines carrées des ces relations on obtient les écarts-types des coefficients :

$$\begin{array}{ll} \sigma(\hat{a}_0) = 0.577\sigma_r & \sigma(\hat{a}_{13}) = 0.50\sigma_r \\ \sigma(\hat{a}_1) = 0.354\sigma_r & \sigma(\hat{a}_{23}) = 0.50\sigma_r \\ \sigma(\hat{a}_2) = 0.354\sigma_r & \sigma(\hat{a}_{11}) = 0.52\sigma_r \\ \sigma(\hat{a}_3) = 0.354\sigma_r & \sigma(\hat{a}_{22}) = 0.52\sigma_r \\ \sigma(\hat{a}_{12}) = 0.50\sigma_r & \sigma(\hat{a}_{33}) = 0.52\sigma_r \end{array}$$

On constate que les rapports des écarts-types des coefficients à l'écart-type des résidus sont tous inférieurs à l'unité. Si les tests statistiques montrent que le modèle est bien ajusté, on peut dire alors que les écarts-types des coefficients sont inférieurs à l'écart-types de l'erreur expérimentale.

IV.2.11.10 Erreur de prédiction

La fonction de variance de prédiction au point p est donnée par la formule suivante :

$$d^2(\hat{y}_p) = x_p^t (X^t X)^{-1} x_p \quad (IV.8)$$

Dans la quelle nous connaissons $(X^t X)^{-1}$ et le vecteur-modélisé du point p :

$$x_p^t = 1 \quad x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_1 x_2 \quad x_1 x_3 \quad x_2 x_3 \quad x_1^2 \quad x_2^2 \quad x_3^2$$

IV.3 Tests statistiques

Afin de vérifier la qualité du modèle mathématique obtenu par les expériences, on utilise deux moyens, le test de Fisher et le coefficient R^2 , leurs valeurs sont obtenues à l'aide du logiciel Minitab version 17.

IV.3.1 Test de Fisher

Le test de Fisher, ou test F, est un test d'hypothèse statistique qui permet de tester l'égalité de deux variances en faisant le rapport des deux variances tout en vérifiant que ce rapport ne dépasse pas une certaine valeur théorique que l'on cherche dans la table de Fisher (ou table de Snedecor). Le logiciel fait le rapport de la variance d'ajustement sur la variance de l'erreur expérimentale.

$$F_{cal} = \frac{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{v_1}}{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{v_2}} \quad (IV.9)$$

IV.3.2 Coefficient de détermination R^2

Le coefficient de détermination (R^2) est un indicateur qui permet de juger la qualité d'une régression linéaire, simple ou multiple. D'une valeur comprise entre 0 et 1, il mesure l'adéquation entre le modèle et les données observées. Il peut être calculé par la formule suivante :

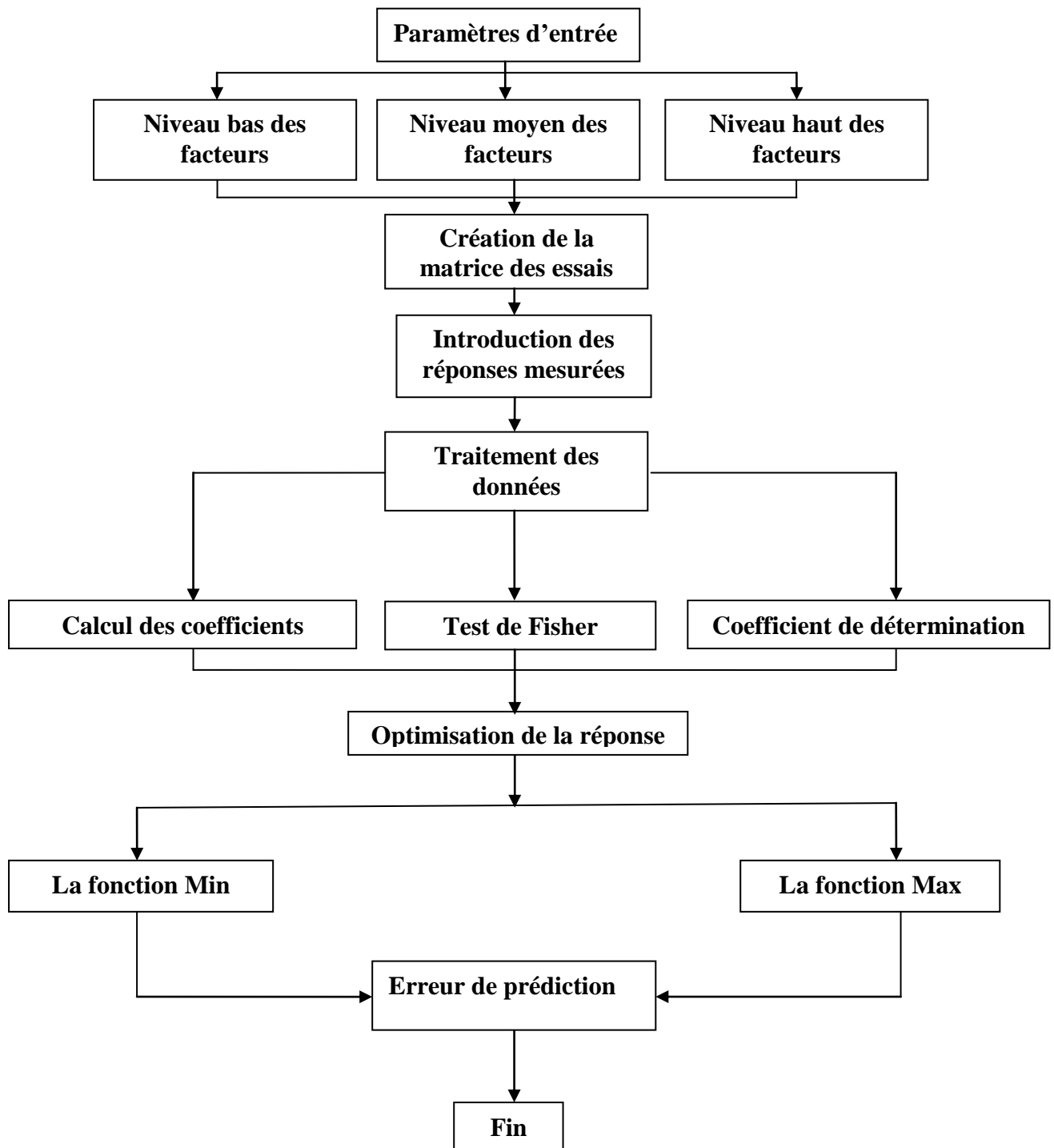
$$R^2 = \frac{\hat{y}^t \hat{y} - \hat{y}^t \bar{y}}{y^t y - \bar{y}^t \bar{y}} \quad (IV.10)$$

Où :

- $\hat{y}^t \hat{y}$ Somme des carrés des réponses prédites
- $y^t y$ Somme des carrés des réponses mesurées
- $\hat{y}^t \bar{y}$ Somme des carrés de la moyenne

Algorithme

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



Conclusion

Dans ce chapitre nous avons mentionné le rôle des plans d'expériences ainsi que ses différents types, en l'occurrence les plans de criblages, les plans de modélisation et les plans de mélanges, le choix a été porté sur le plans de modélisation (plans de Box-Behnken).

Les plans de Box-Behnken permettent d'étudier à partir de 3 facteurs et plus, avec trois niveaux pour chaque facteur (-1, 0, +1), tout en réalisons un minimum d'essais pour avoir un maximum d'informations.

Le modèle mathématique postulé du second degré, permet de mieux voir l'influence de chaque facteur, ainsi que l'effet de l'interaction entre les facteurs sur la réponse.

Les erreurs de prédiction sur les réponses calculées sont plus faibles que les erreurs expérimentales sur les réponses mesurées dans le domaine du plan de Box-Behnken.

Chapitre V

Procédure expérimentale, résultats et interprétions

V.1. Introduction

Ce chapitre est consacré aux essais expérimentaux, présentation des résultats obtenus et interprétations. Il est composé de 2 parties :

- La 1^{ère} partie est réservée au traitement par le procédé de vibro-abrasion sur des échantillons de différents matériaux (ferreux et non ferreux) à savoir, acier XC48, en vue d'analyser l'état de surface en observant les caractéristiques mécaniques et métallurgiques (variation de la masse, dureté, micro-dureté, observation de la structure). Le milieu du travail est composé de différents types de medias (billes en acier traité, en porcelaine, prismes en céramique, cônes en polymère) et d'additifs chimiques. L'équipement utilisé est un vibreur linéaire composé de 4 chambres de travail de 10 dm³ chacune.
- La 2^{ème} partie porte les essais expérimentaux réalisés sur une série d'éprouvettes normalisées en alliage d'aluminium (AlCu4MgSi) en vue d'étudier leur tenue en fatigue. Dans cette partie, le milieu du travail est composé de billes en acier traité. L'équipement utilisé est un vibreur circulaire ayant une seule chambre de travail de capacité 230 dm³. Les éprouvettes d'essais sont soumises aux essais de traction simple et cyclique afin de comparer l'effet du traitement de vibro-abrasion sur leur tenue en fatigue avant et après traitement.

1^{ère} partie des essais expérimentaux

V.2. Description de la méthode expérimentale

V.2.1. Dispositif expérimental (vibreur linéaire)

Le 1^{er} dispositif expérimental utilisé pour l'étude de la qualité de l'état de surface du matériau en XC48 avec différents medias est un vibreur linéaire de type (YBF 4 x 10) (Figure V.1) et ayant les caractéristiques suivantes :

- Nombre de chambres de travail : 4
- Volume de chacune de ces chambres (dm³) : 10
- Amplitude (mm) : 0 à 5
- Fréquence (Hz) : 15 ; 33 ; 50
- Puissance du moteur (KW) : 1
- Dimensions (mm) : 1300x952x1370
- Type de pompe : ПА-22
- Puissance (KW) : 0.12
- Débit (l/min) : 22

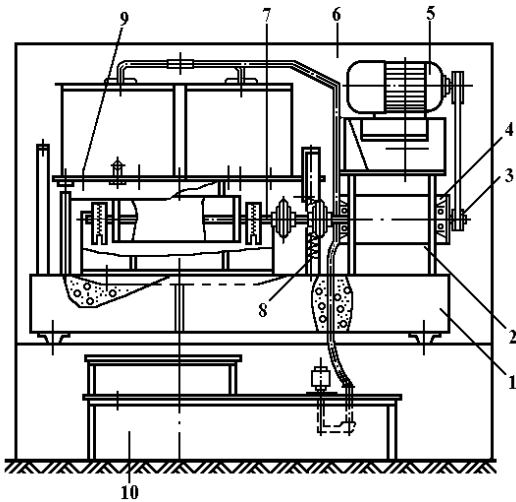


Figure V.1 Vibrateur linéaire de type (YBF 4 x 10)

- 1- Fondation.
- 2- Arbre intermédiaire.
- 3- Système de transmission par courroie.
- 4- arbre principal
- 5- Moteur électrique
- 6- Système de lubrification
- 7- Manchon élastique
- 8- Balourd
- 9- Chambre de travail
- 10- Bac de réservoir.

V.2.2. Essais effectués sur les échantillons en XC48 :

V.2.2.1. Préparation des essais expérimentaux

Les échantillons utilisés lors des essais expérimentaux sont en acier XC48.

La figure V.2 représente les échantillons en acier XC48 d'une dureté HB 190 à 200 et de limite élastique de 340 MPa.

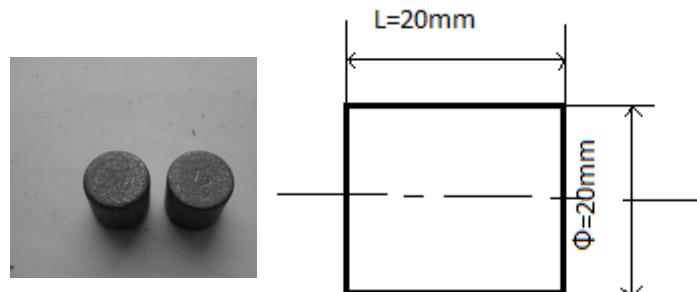


Figure V.2 Echantillons en acier XC48

V.2.2.2 Différents types de medias utilisés

Les différents medias utilisés sont illustrées à la figure V.3.



Figure V.3 Différents types de medias

(a) : Billes en porcelaine de diamètre 10 mm.

(b) : Prismes triangulaires en céramique de taille 15x15mm (base x hauteur).

(c) : Billes en acier traité de diamètre 10 mm.

(d) : Cônes en polymère de taille 15x15 mm (diamètre de base x hauteur).

V.2.2.3. Additifs chimiques

L'additif chimique utilisé lors de ces essais est le Perchlorure de fer de composition chimique FeCl_3 . La solution est constituée de 5g de FeCl_3 pour un litre d'eau. Le régime de travail est le suivant :

- Fréquence : $f = 50 \text{ Hz}$
- Amplitude : $A = 5 \text{ mm}$
- Durée du traitement : 240 mn

Le relevé de la rugosité est effectué toutes les 30 minutes.

V.3. Mesures de la rugosité (matériau XC48)

La rugosité est mesurée à l'aide d'un rugosimètre, type профилметр, modèle 296. Elle est relevée toutes les 30 mn. 5 mesures sont effectuées. Leur moyenne est retenue pour l'analyse.



Figure V.4 Rugosimètre de type профилметр, modèle 296

Le tableau V.1 regroupe les résultats de la rugosité mesurée avant et après traitement avec des billes en porcelaine.

Tableau V.1 Résultats des mesures de rugosité avec des billes en porcelaine

Durée de traitement (mn)	Rugosité Ra (μm)					
	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4	Mesure 5	Moyenne
Avant traitement	3.71	3.72	3.71	3.74	3.79	3.734
30	3.17	3.16	3.17	3.16	3.16	3.164
60	2.68	2.68	2.67	2.67	2.68	2.676
90	2.27	2.27	2.26	2.26	2.27	2.266
120	1.94	1.94	1.94	1.93	1.94	1.938
150	1.67	1.66	1.67	1.67	1.66	1.666
180	1.46	1.45	1.47	1.46	1.45	1.458
210	1.44	1.43	1.46	1.45	1.40	1.436
240	1.41	1.41	1.38	1.40	1.39	1.398

La figure V.5 représente le graphe de la rugosité en fonction de la durée du traitement.

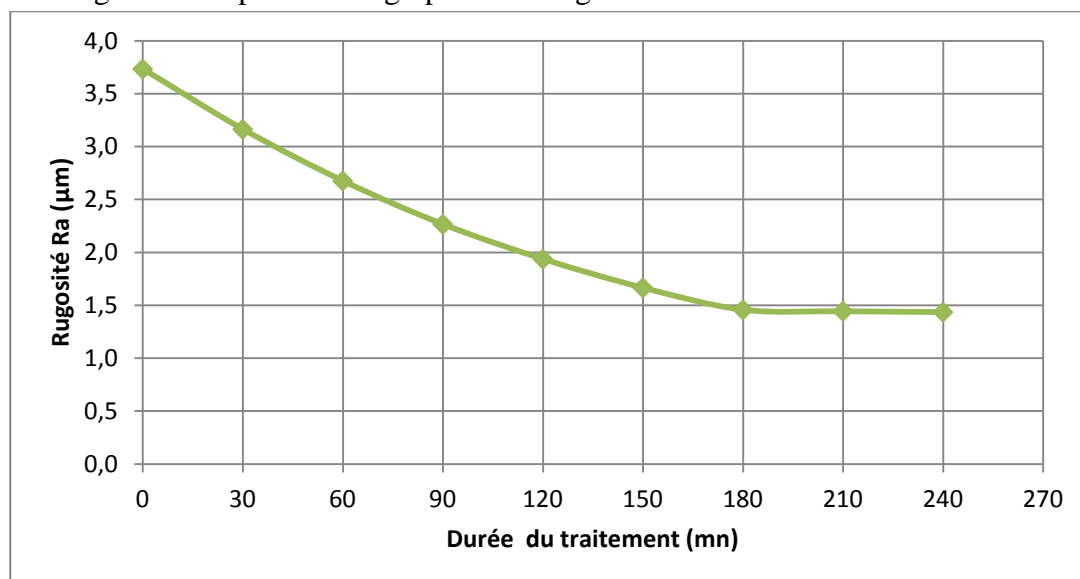


Figure V.5 Effet de la durée du traitement sur la rugosité dans un milieu actif, billes en porcelaine

On remarque que la rugosité a nettement diminué en prolongeant la durée du traitement. Elle passe de 3.734 μm à 1.398 μm , soit une amélioration de 62.56 %. Au-delà de 180 mn de traitement, elle est pratiquement constante.

Le tableau V.2 regroupe les résultats de mesure de la rugosité obtenue avec des medias en céramique sous forme de prisme triangulaire.

Tableau V.2 Résultats des mesures de rugosité avec des prismes en céramique

Durée de traitement (mn)	Rugosité Ra (μm)					
	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4	Mesure 5	Moyenne
Avant traitement	3.71	3.72	3.71	3.74	3.79	3.734
30	3.46	3.48	3.47	3.44	3.43	3.256
60	3.10	3.15	3.09	3.11	3.14	2.918
90	2.44	2.48	2.50	2.41	2.40	2.596
120	2.33	2.35	2.31	2.37	2.30	2.332
150	2.16	2.10	2.19	2.09	2.12	2.132
180	1.91	2.05	1.94	2.02	1.89	1.962
210	1.97	2.20	2.15	2.11	2.09	2.104
240	2.18	2.13	2.05	2.10	2.21	2.224

La figure V.6 illustre l'effet de la durée du traitement de vibro-abrasion sur la rugosité dans un milieu actif, prismes en céramique.

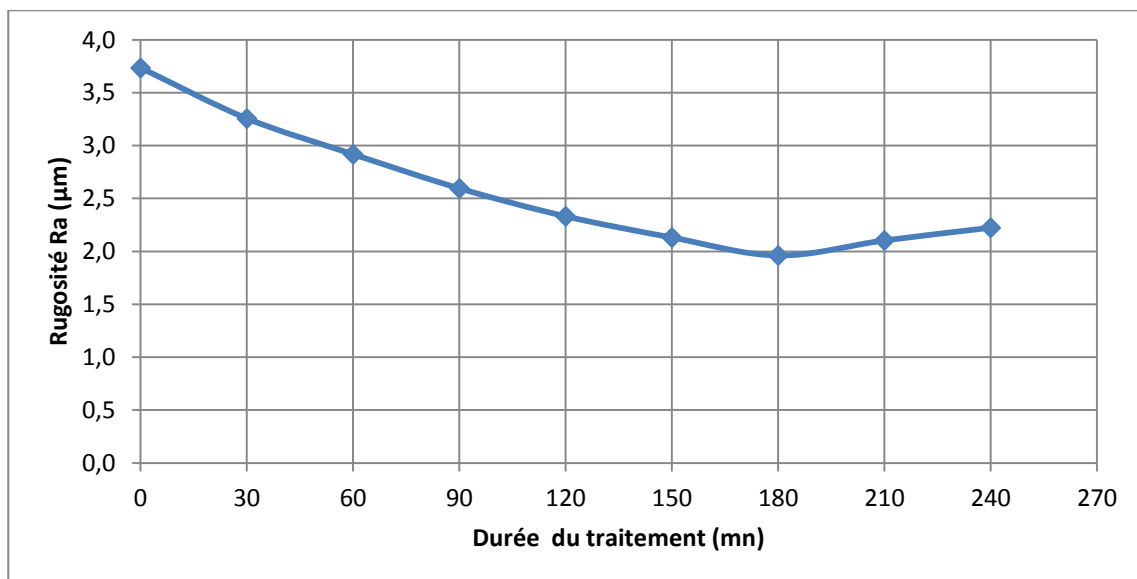


Figure V.6. Effet de la durée du traitement sur la rugosité dans un milieu actif, prisme en céramique

On remarque que la rugosité a diminué en passant de 3.734 μm à 2.224 μm , soit une amélioration de 40.44 %. Après un traitement de 180 minutes la rugosité augmente légèrement.

Le tableau V.3 regroupe les résultats de mesure de la rugosité obtenue avec des medias en acier traité.

Tableau V.3 Résultats des mesures de rugosité, billes en acier traité

Durée de traitement (mn)	Rugosité Ra (μm)					
	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4	Mesure 5	Moyenne
Avant traitement	3.71	3.72	3.71	3.74	3.79	3.734
30	3.45	3.44	3.47	3.49	3.43	3.456
60	3.22	3.24	3.29	3.28	3.30	3.266
90	3.10	3.12	3.08	3.14	3.07	3.102
120	2.80	2.83	2.85	2.89	2.84	2.842
150	2.60	2.65	2.63	2.67	2.69	2.648
180	2.50	2.57	2.51	2.49	2.48	2.510
210	2.69	2.67	2.66	2.64	2.68	2.668
240	2.67	2.71	2.69	2.72	2.66	2.690

La figure V.7 représente l'effet de la durée du traitement de vibro-abrasion sur la rugosité dans un milieu actif, bille en acier traité.

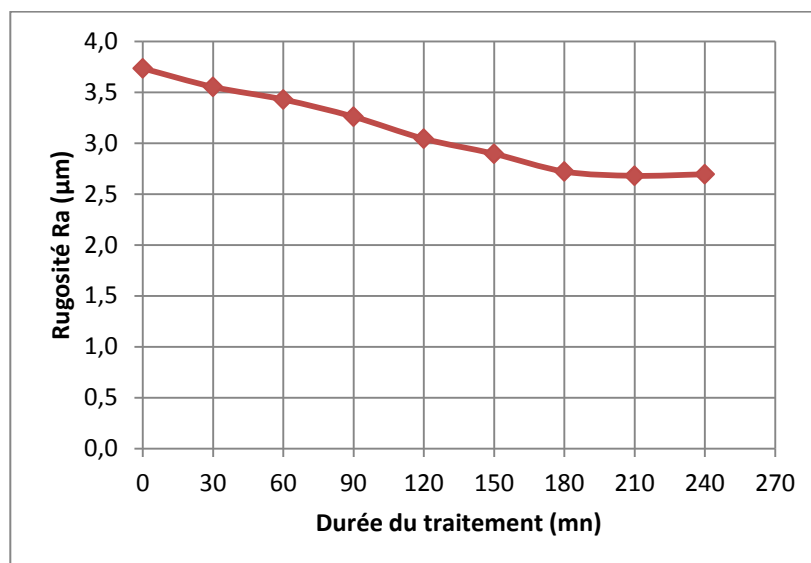


Figure V.7. Effet de la durée du traitement sur la rugosité dans un milieu actif, acier traité

On remarque que la rugosité a diminué de 3.734 μm à 2.690 μm , soit un pourcentage de 27.96 %.

Le tableau V.4 regroupe les résultats de la rugosité mesurée avant et après le traitement avec des medias en polymère.

Tableau V.4 Résultats des mesures de rugosité, Cônes en polymère

Durée de traitement (mn)	Rugosité Ra (μm)					Moyenne
	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4	Mesure 5	
Avant traitement	3.71	3.72	3.71	3.74	3.79	3.734
30	3.24	3.21	3.27	3.26	3.22	3.240
60	2.94	2.92	2.97	2.90	2.88	2.922
90	2.67	2.69	2.71	2.65	2.66	2.676
120	2.40	2.44	2.47	2.42	2.39	2.384
150	2.20	2.16	2.17	2.18	2.21	2.184
180	1.90	1.94	1.97	2.02	2.10	1.986
210	1.80	1.74	1.73	1.75	1.72	1.748
240	1.48	1.57	1.54	1.50	1.55	1.528

La figure V.8 représente l'effet de la durée du traitement de vibro-abrasion sur la rugosité dans un milieu actif, cônes en polymère.

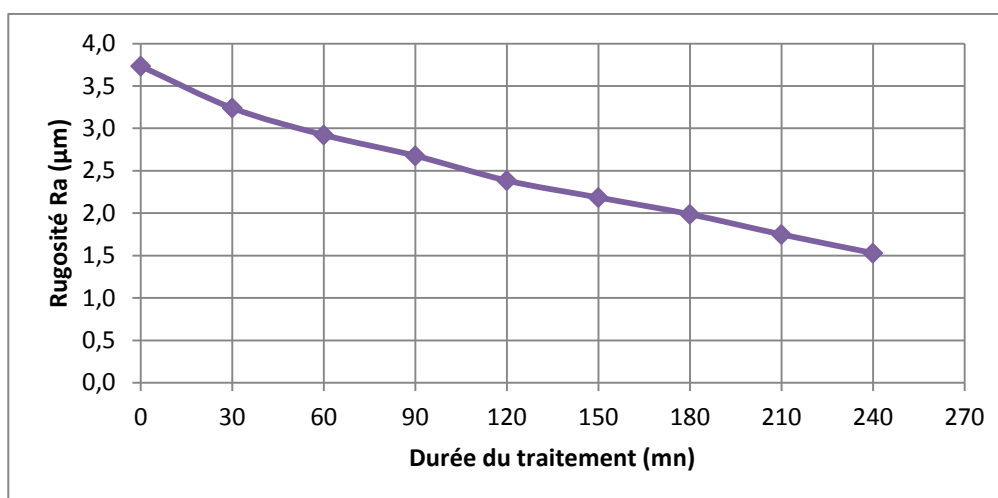


Figure V.8 Effet de la durée du traitement sur la rugosité dans un milieu actif, cônes en polymère

On remarque que la rugosité est passée de 3.734 μm (état initial) à 1.528 μm (après traitement de 240 mn), soit une amélioration de 59 % environ.

La figure V.9 représente l'effet de la durée du traitement sur la rugosité obtenues avec différents medias, à savoir, billes en porcelaine, billes en acier traité, abrasifs en céramique et cônes en polymère.

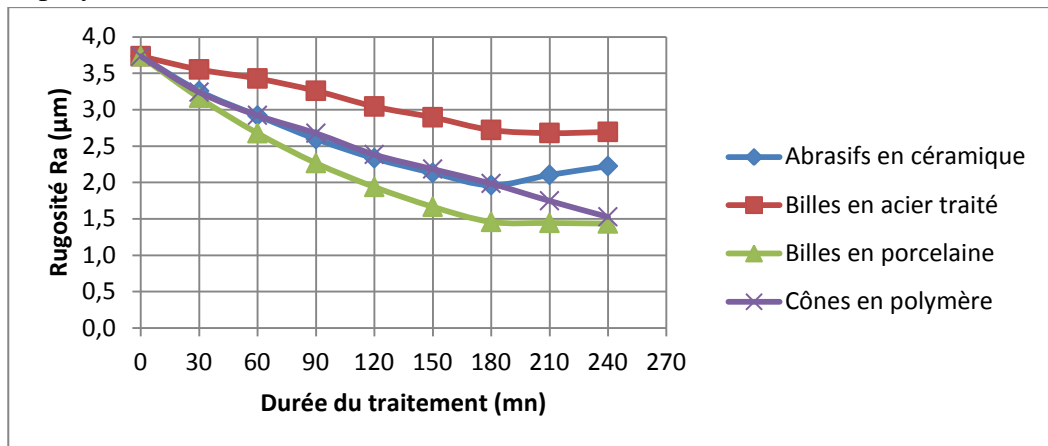


Figure V.9 Effet de la durée du traitement sur la rugosité dans un milieu actif de différents medias

On remarque que la rugosité de l'échantillon XC48 a nettement diminué, cela s'explique par l'élimination des pics de quelques dixièmes de millimètres de profondeur suite à la continuité au frottement entre les medias et les pièces.

On observe également que les billes en porcelaine ont donné une amélioration considérable par rapport à d'autres medias. On peut expliquer ceci par le fait que ces billes ont une dureté qui leur permet d'attaquer facilement les matériaux plus tendres, une légèreté qui assure un impact moins agressif, ce qui génère un bon état de surface, et enfin, une forme sphérique qui donne un impact régulier sur la surface de la pièce.

V.4 Tests de dureté HB et de micro-dureté HV

V.4.1 Tests de dureté HB

Les tests de dureté HB sont réalisés sur un duromètre universel de type TB, modèle TIII-24 (figure V.10) Sur un ensemble d'échantillons avant et après les traitements de 30 minutes chacun.

L'indenteur utilisé est une bille de diamètre 10 mm avec une charge de 588N appliquée pendant 15 secondes.



Figure V.10 Duromètre universel de type TB, modèle TIII -24

Le tableau V.5 regroupe les résultats obtenus avec des billes en porcelaine.

Tableau V.5 Résultats des tests de dureté avec billes en porcelaine

Durée de traitement (mn)	Dureté HB			
	Test 1	Test 2	Test 3	Moyenne
Avant traitement	218	222	220	220
30	232	231	232	232
60	242	242	241	242
90	251	251	250	251
120	258	259	259	259
150	266	265	266	266
180	272	271	272	272
210	277	277	276	277
240	282	281	282	282

La figure V.11 représente l'influence de la durée de traitement de vibro-abrasion sur la dureté HB superficielle du matériau XC48 après traitement. D'après le graphe, on constate que la dureté des échantillons après traitement de 240 minutes a augmenté de 220 HB à 282 HB, soit une augmentation de 28.18%.

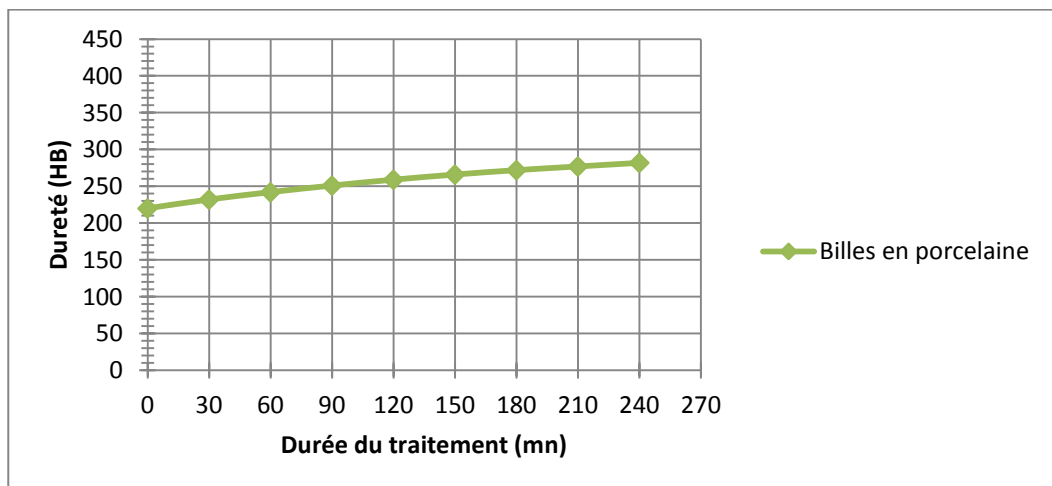


Figure V.11 Effet de la durée du traitement sur la dureté avec billes en porcelaine

Le tableau V.6 regroupe les résultats obtenus avec des médias en céramique.

Tableau V.6 Résultats des tests de dureté avec prisme en céramique

Durée de traitement (mn)	Dureté HB			
	Test 1	Test 2	Test 3	Moyenne
Avant traitement	218	222	220	220
30	249	250	250	250
60	271	270	270	270
90	287	286	287	287
120	300	301	300	300
150	311	310	311	311
180	319	319	319	319
210	326	327	326	326
240	332	331	332	332

La figure V.12 représente l'influence de la durée de traitement sur la dureté superficielle HB du matériau XC48. On observe que la dureté des échantillons après le traitement d'une durée de 240 minutes a augmenté de 220 HB à 332 HB soit une augmentation de 50.9%.

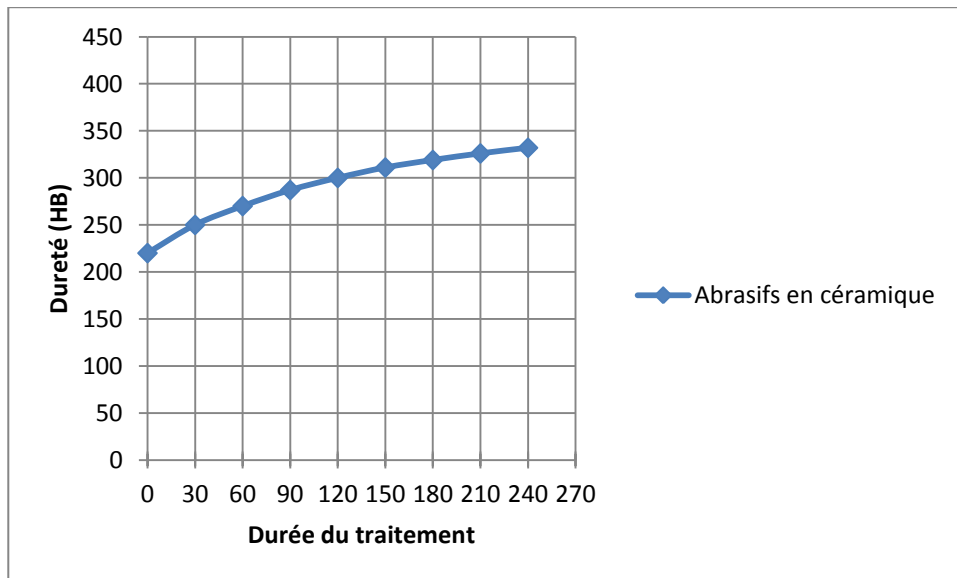


Figure V.12 Effet de la durée du traitement sur la dureté

Le tableau V.7 regroupe les résultats obtenus avec des billes en acier traité.

Tableau V.7 Résultats des tests de dureté avec billes en acier traité

Durée de traitement (mn)	Dureté HB			
	Test 1	Test 2	Test 3	Moyenne
Avant traitement	218	222	220	220
30	261	260	261	261
60	294	295	294	294
90	225	225	227	326
120	347	346	347	347
150	360	361	363	362
180	373	373	372	373
210	380	380	380	380
240	384	383	384	384

La figure V.13 représente l'influence de la durée de traitement sur la dureté HB du matériau XC48. On remarque que la dureté des échantillons après le traitement d'une durée de 240 minutes a augmenté de 220 HB à 384 HB soit une augmentation de 74.5%.

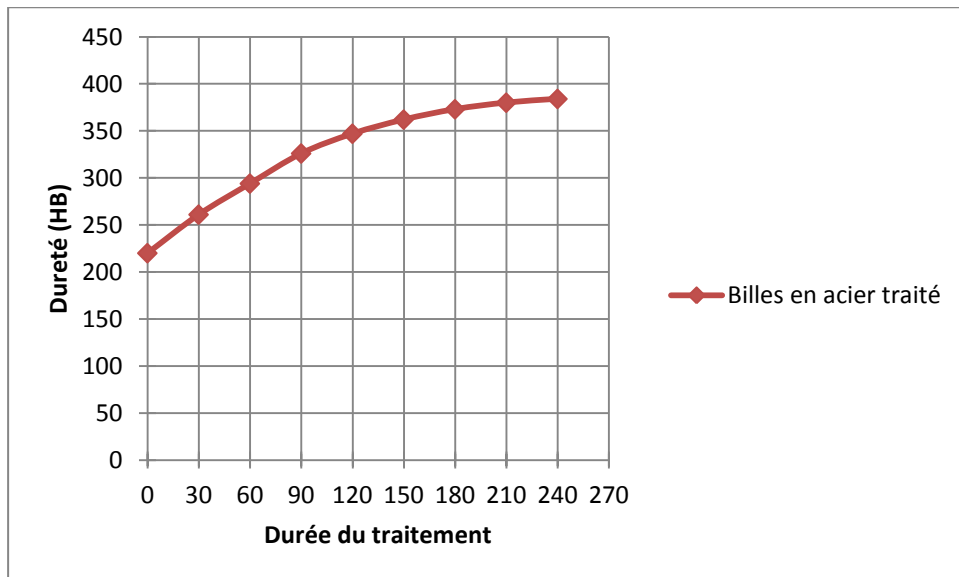


Figure V.13 Effet de la durée du traitement sur la dureté avec billes en acier traité

Le tableau V.8 regroupe les résultats obtenus avec des cônes en polymère.

Tableau V.8 Résultats des tests de dureté avec cônes en polymère

Durée de traitement (mn)	Dureté HB			
	Test 1	Test 2	Test 3	Moyenne
Avant traitement	218	222	220	220
30	227	227	226	227
60	233	233	232	233
90	238	239	239	239
120	245	246	245	245
150	250	251	250	251
180	256	257	257	256
210	261	260	261	261
240	265	266	266	265

La figure V.14 représente l'influence de la durée de traitement de vibro-abrasion sur la dureté HB du matériau XC 48, on remarque que la dureté des échantillons après le traitement de vibro-abrasion d'une durée de 240 minutes a augmenté de 220 HB à 265 HB soit 20.45%.

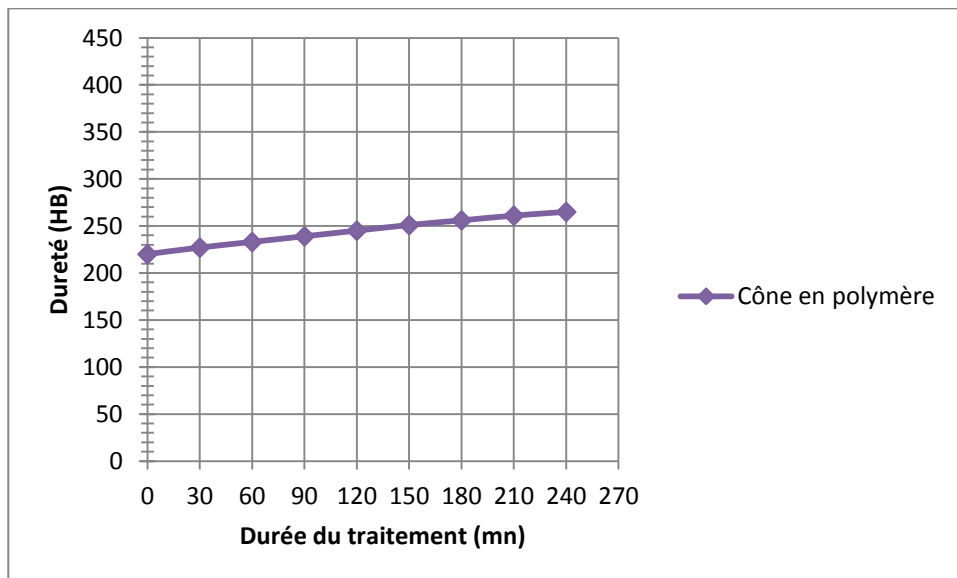


Figure V.14 Effet de la durée du traitement sur la dureté avec cônes en polymère

La figure V.15 montre l'effet de la durée du traitement sur la dureté avec différents types de medias.

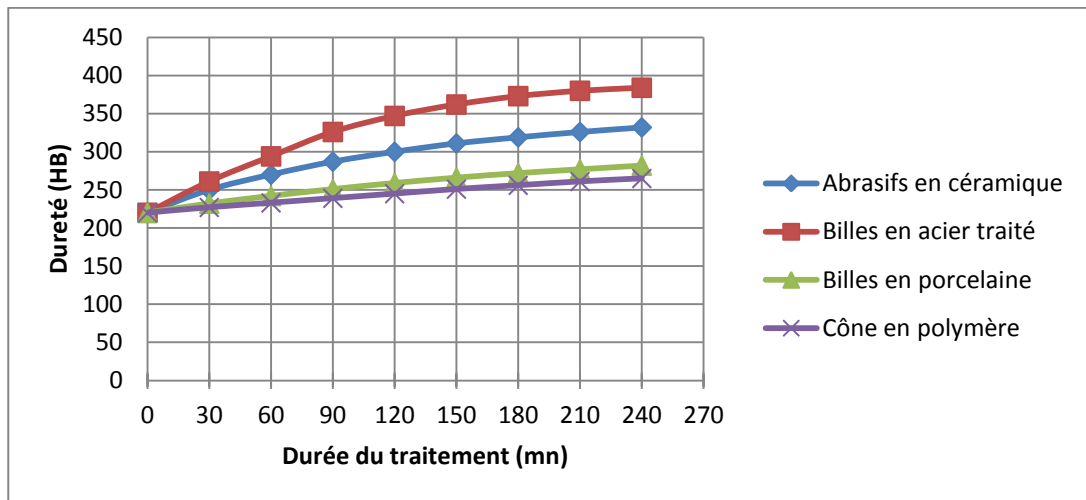


Figure V.15 Effet de la durée du traitement sur la dureté HB dans un milieu actif de différents types de medias

Les différents graphes montrent que la dureté superficielle du matériau traité XC48 a nettement augmenté. Ceci peut être expliqué par la quantité importante de micros coups que la surface reçoit et ayant provoqué une déformation plastique à froid qui se manifeste par des dislocations engendrant un durcissement par écrouissage.

On remarque également que les billes en acier traité ont apporté une augmentation considérable de la dureté superficielle par rapport aux autres medias. Ceci peut être expliqué par le fait que ces medias ont une dureté très élevée par rapport aux pièces traitées, une énergie d'impact importante due à leur masse, et une forme sphérique assurant une uniformité de la surface traitée.

V.4.2 Tests de micro-dureté HV

Les tests de micro dureté HV ont été réalisés sur un micro duromètre de type Mitutoyo HM-100 (figure V.16). Le pénétrateur utilisé est une pyramide avec un angle au sommet de 136° et une charge de 100 gf appliquée pendant une période de 10 secondes.



Figure V.16 Micro duromètre Mitutoyo HM-100

❖ Procédure des tests de micro dureté HV

Cet essai évalue la dureté du matériau par indentation en mesurant la pression de contact pendant l'enfoncement d'un indenteur. La micro-dureté est calculée après l'essai, par mesure de la surface de l'empreinte en fonction de la charge appliquée. Le résultat obtenu s'exprime dans une unité liée à la géométrie du pénétrateur.

Le micro-duromètre utilisé est connecté à un ordinateur sur lequel s'affiche la valeur mesurée de la micro dureté HV.

Le tableau V.9 récapitule les résultats de micro-dureté HV obtenus :

Tableau V.9 Résultats des tests de micro dureté HV

N° Test	1 ^{er} test	2 ^{ème} test	3 ^{ème} test	Moyenne
Avant traitement	217.7	197.1	209.4	208.06
Après traitement	378.5	380.2	375.9	378.2

La figure V.17 représente l'histogramme de la micro-dureté avant et après traitement.

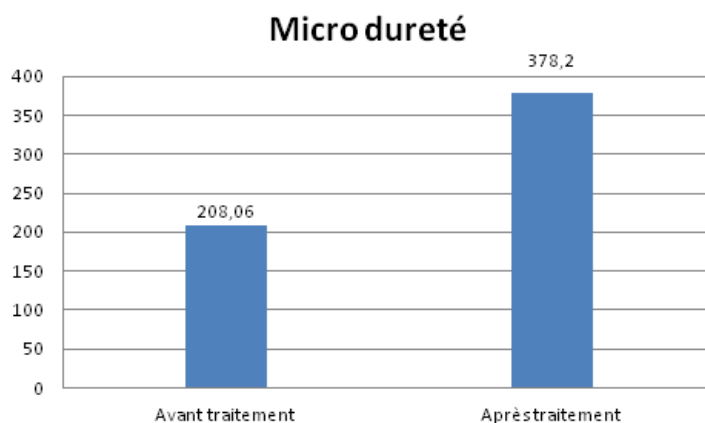


Figure V.17 Micro dureté HV avant et après le traitement

V.5 Variation de la masse, Quantité de matière enlevée

La figure V.18 montre la balance utilisée pour la pesée des enchantions en XC48 avant traitement et après toutes les 30mn. Cette balance possède une résolution de 0.0001g.

Les medias retenus pour ce traitement sont des céramiques en forme prismatique.



Figure V.18 Balance analogique, modèle АД-200

Le tableau V.10 représente les résultats de la variation de la masse en gramme.
La valeur de la masse avant traitement est de 50.1896 g.

Tableau V.10 Résultats de la variation de la masse

Durée de traitement (mn)	30	60	90	120	150	180	210	240
Masse (g)	49.9818	49.8010	49.6414	49.5069	49.3884	49.3001	49.2449	49.2059
Masse enlevée (g)	0.2078	0.1808	0.1596	0.1345	0.1185	0.0883	0.0552	0.039

La figure V.19 représente la variation de la masse avant et après le traitement.

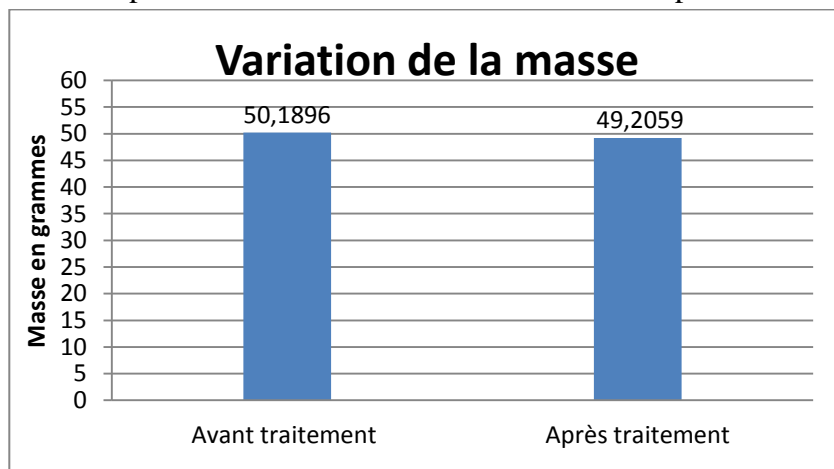


Figure V.19 Variation de la masse avant et après le traitement

D'après la figure V.19, on remarque que la masse de l'échantillon a diminuée de 50.1896 à 49.2059g, soit une diminution de 0.9837g après une durée de traitement de 240 minutes. Les travaux de recherche confirment ces résultats [46]

La figure V.20 représente la variation de la masse enlevée en fonction de la durée de traitement.

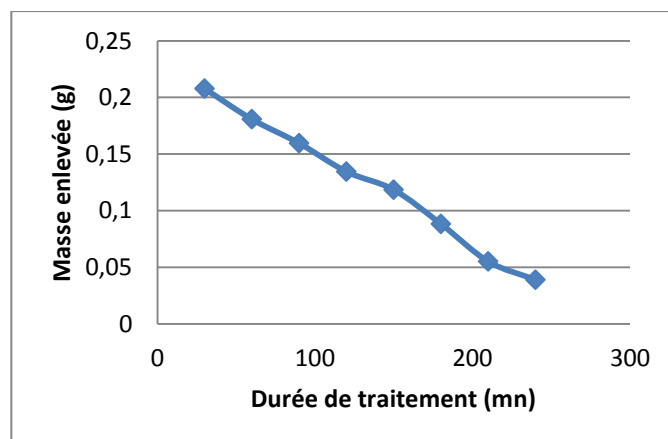


Figure V.20 Variation de la masse enlevée en fonction de la durée de traitement

D'après la figure V.20, on remarque que la masse enlevée diminue avec l'augmentation de la durée de traitement, cela s'explique par l'augmentation de la dureté et la résistance du matériau à la pénétration des medias.

Le niveau de remplissage de la chambre de travail influe lui aussi sur la quantité d'enlèvement de la matière. En effet, en augmentant le volume de remplissage (limite max : 2/3 du volume de la chambre de travail), la pression de contact medias-surface traitée augmente. Ceci est confirmé par les travaux de recherche [1, 4, 15, 18]. Dans ces travaux, il a été révélé que des pièces ont été fixées sur des broches placées à trois niveaux de profondeurs. Il a été constaté que la quantité de matière enlevée sur les pièces de la broche supérieure (à proximité du niveau de bac) est de 0,006g. Elle est de 0,079g pour les pièces de la broche du milieu (milieu de la chambre de travail) et de 0,170g pour les pièces de la broche inférieure (fond de la chambre de travail).

L'équation suivante [15] exprime la quantité de matière enlevée en fonction de la dureté du matériau :

$$Q = \frac{K.m}{HB} \quad (V.3)$$

Ou :

K et m sont des coefficients ayant pour valeurs :

$HB \leq 150$, $K=59$, $m=1,1$

$HB > 150$, $K=65$, $m=0,61$

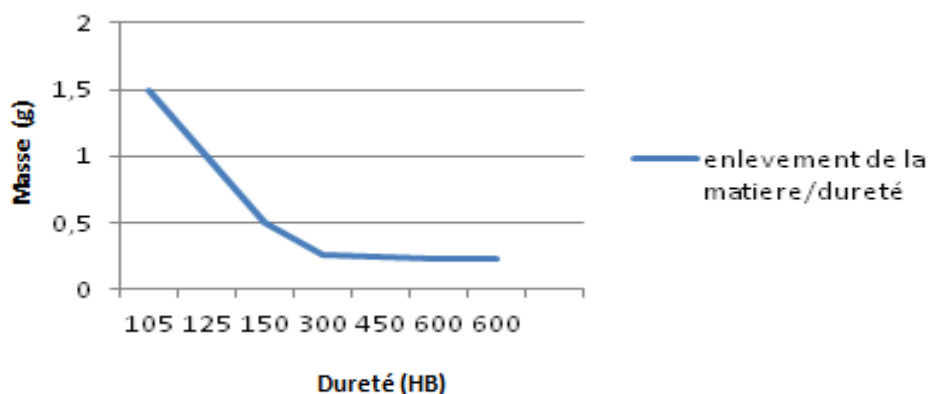


Figure V.21 Variation de la masse (g) en fonction de la dureté (HB) [15]

Les propriétés du matériau sur l'enlèvement de la matière a une grande influence, parmi ces propriétés on trouve la dureté du matériau HB et la plasticité (δ , %), avec l'augmentation de la dureté du matériau, l'intensité du traitement diminue, et avec l'augmentation de la plasticité du matériau, l'enlèvement de la matière diminue.

Par exemple avec la variation de la dureté de 30 à 450 HB, l'enlèvement de la matière diminue de 2,07 jusqu'à 0,19 g.

D'après la figure V.21, la variation de la masse se fait en fonction de la variation de la dureté. Si la dureté augmente, l'enlèvement de la matière diminue progressivement.

La diminution de l'enlèvement de la matière avec l'augmentation de la dureté, s'explique par la résistance à la pénétration des abrasifs dans le métal.

V.6 Microscopie

V.6.1 Observation de la microstructure

L'observation de la microstructure des échantillons en acier XC48 est réalisée sur un microscope optique de type NIKON EPIPHOT 300, équipé d'un logiciel INSPECTOR relié par une camera NIKON FDX.

D'après le Hand-book [39], pour l'observation de la microstructure des métaux ferreux aciers et fontes nécessite de suivre la procédure suivante :

a. Polissage

Premièrement, on utilise une succession de papier abrasif avec différentes textures 200, 400, 600, 800, 1000, 1200 pour assurer une bonne planéité et éliminer les macros fissures.

Secundo, on utilise un papier feutre avec de l'alumine pour éliminer les microfissures et d'aboutir à un état de surface exploitable.

b. Attaque chimique

Avec réactif NITAL : (4-5)% HNO_3 acide nitrique + alcool éthylique, la durée est de 10 à 20 secondes dans le but de créer un contraste révélant la microstructure du matériau. Lorsque celle-ci n'apparaît pas à l'issue du polissage, il faut la suivre par la suite par un nettoyage avec de l'alcool et puis un séchage.

La figure V.22 représente la microstructure de l'acier XC48 avant et après le traitement avec un grossissement de X100.

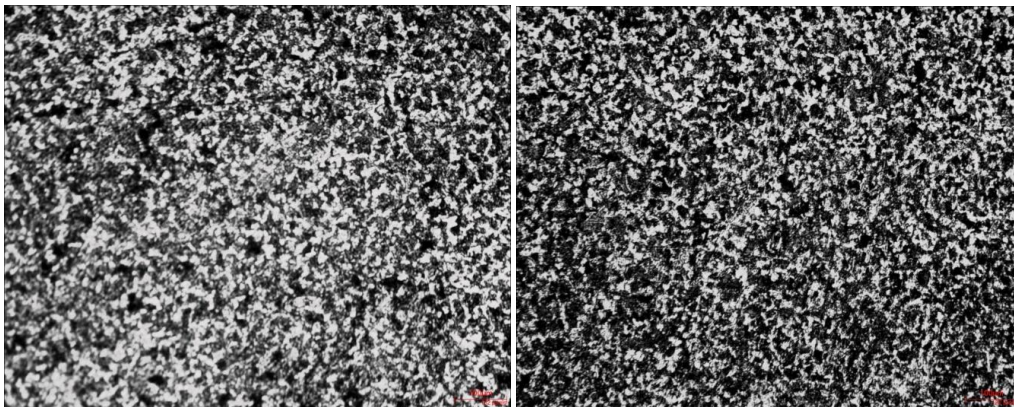


Figure V.22 Microstructure de l'acier XC48 avant et après le traitement avec un grossissement de X100

On remarque que la taille de grain influe donc sur les propriétés mécaniques des poly cristaux, plus les grains sont petits, plus il y a de joints de grain, et donc plus le mouvement des dislocations est entravé. Ce résultat est confirmé par la loi suivante de Hall-Petch [int.1] qui exprime une relation entre la contrainte à partir de laquelle un matériau poly cristallin subit une déformation plastique et la taille de ses grains.

$$\sigma_c = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}}$$

Où σ_c désigne la contrainte critique, d est la taille des cristallites et σ_0 et k sont des constantes.

V.6.2 Couche durcie

L'observation a été faite à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) de type JEOL JSM-6360, on remarque que la zone durcie qui apparaît sur l'image MEB (figure V.23), en couleur grise claire de l'ordre de 120µm obtenue avec un grossissement de X350.

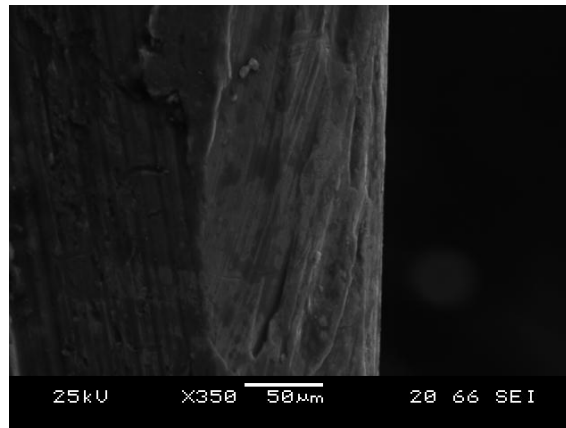


Figure V.23 Couche durcie

D'après la figure V.23, on observe la zone durcie provoquée par une déformation plastique qui fait transformer les contraintes résiduelles de traction en compression, la présence de contraintes résiduelles locales favorise le développement des dislocations, au cours de la déformation, ces dislocations se multiplient de plus en plus, les dislocations se gênent mutuellement, si elles sont dans le même plan de glissement, elles s'attirent ou se repoussent, limitant leurs propagations, et si elles sont dans des plans orthogonaux, elles s'épinglent mutuellement, phénomène des « arbres de la forêt ». Donc plus il y a de dislocations, plus il y a de déformations possibles, mais moins les dislocations sont mobiles car elles se gênent.

La perte de mobilité des dislocations entraîne une élévation de la limite d'élasticité, donc de la dureté, ce qui constitue l'écrouissage [int1].

L'écrouissage correspond aux modifications que subit le métal lorsque les contraintes qui lui sont appliquées sont suffisamment fortes pour provoquer des déformations plastiques, permanentes. Ces modifications sont d'ordre métallurgique (modification de la structure interne du métal) et ont généralement une influence sur ses propriétés mécaniques

Si l'on change la direction de la déformation plastique, l'écrouissage peut aussi à l'inverse abaisser la limite d'élasticité : c'est l'effet Bauschinger.

On utilise en général deux modèles d'écrouissage.

Dans le premier modèle, dit modèle « isotrope », l'écrouissage correspond à une dilatation de la surface frontière par une homothétie centrée en (0, 0, 0). Cela signifie qu'il y a un durcissement quelle que soit la direction de déformation.

Dans le deuxième modèle, dit « cinématique », la surface frontière ne se déforme pas mais est translatée. Cela signifie qu'il y a un durcissement dans certaines directions, mais un adoucissement dans d'autres directions. Cela correspond à l'effet Bauschinger [int1].

V.7 Application de plans d'expériences de Box-Behnken

L'application de plans d'expériences de Box-Behnken a pour but d'obtenir un maximum d'informations avec un minimum d'expériences réalisées et enfin d'optimiser la réponse.

Les essais expérimentaux réalisés avec la variation de 3 facteurs à savoir (la fréquence, l'amplitude et la taille des médias), dans le but de mesurer la réponse et connaître le facteur le plus influant sur la réponse.

Pour réaliser cette étude, nous avons choisi 2 réponses, en l'occurrence la rugosité arithmétique (Ra) et la dureté Brinell (HB), pour chaque réponse on a pris 3 niveaux : niveau bas, niveau moyen et niveau haut (-1, 0, +1).

L'élaboration du modèle est faite par le logiciel de Mini tab version 17 afin de déterminer les valeurs prédites avec l'optimisation des facteurs offrant la meilleure réponse recherchée [10].

V.7.1 Préparation de l'expérimentation

La préparation de l'expérimentation doit aboutir à la définition du plan d'expériences le mieux adapté à l'objectif de l'étude. On peut décomposer cette préparation en plusieurs phases principales, la description du problème à résoudre, l'énoncé de l'objectif de l'étude, la description du procédé, le choix des facteurs, le choix de la réponse, la définition du domaine d'étude.

- **Description du problème**

Un chercheur en mécanique cherche toujours un moyen d'améliorer la qualité des pièces mécaniques, tout en diminuant sa rugosité et augmentant sa dureté avec des procédés plus performants dans le domaine du traitement mécanique de surface, la méthode de vibro-abrasion justement répond bien à résoudre ces problèmes de qualité et de fiabilité.

- **Objectif de l'étude**

L'objectif de l'étude est d'optimiser les facteurs (fréquence, amplitude et taille des médias) pour avoir une meilleure réponse possible (rugosité et dureté).

- **Description du procédé**

Le procédé consiste dans un premier temps de choisir un régime de travail adéquat tout en faisant un réglage des paramètres nécessaires du vibreur linéaire:

- Fréquence : 15-50 [Hz]
- Amplitude : 0-5 [mm]
- Choix des médias : taille, forme, matériau.
- Choix du lubrifiant.
- Durée du traitement : 240 minutes.

La figure V.24 montre le schéma de représentation des essais à trois facteurs à savoir la fréquence, l'amplitude et la taille des medias comme paramètres d'entrée et la rugosité Ra et la dureté HB comme paramètres de sortie.

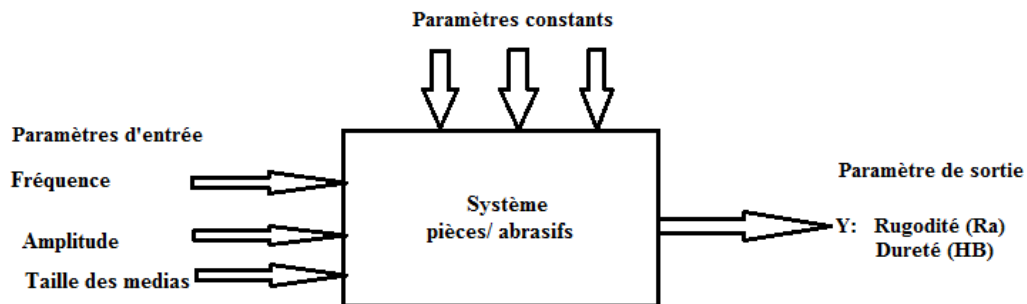


Figure V.24 Schéma des essais à trois facteurs

- **Choix des facteurs**

Trois facteurs sont retenus pour l'expérimentation :

Facteur 1 : Fréquence d'oscillation f est caractérisée par le nombre d'oscillations par unité de temps, elle varie de 0 à 50 Hz.

Facteur 2 : Amplitude d'oscillation A est caractérisée comme le plus grand écart entre la valeur mesurée et la valeur moyenne, elle varie de 0 à 5 mm.

Facteur 3 : Taille des medias retenues pour les essais expérimentaux sont 6mm, 8mm et 10 mm de forme cylindrique.

- **Choix de la réponse**

Deux réponses ont été choisies :

- la rugosité, on cherche à avoir la valeur la plus faible possible pour avoir un meilleur état de surface.
- la dureté, on cherche à avoir la valeur la plus forte possible pour que le matériau résiste mieux.

- **Définition du domaine d'étude**

Le domaine d'étude est défini par les niveaux hauts, moyens et bas de chaque facteur comme l'indique le tableau ci-après :

Tableau V.11. Domaine d'étude

Facteurs	Niveau bas (-1)	Niveau moyen (0)	Niveau haut (+1)
Fréquence f , [Hz]	15	33	50
Amplitude A , [mm]	1.5	3.5	5
Taille des medias T , [mm]	6	8	10

➤ **Choix du plan expérimental**

En attendant des variations de la réponse correspondant à un modèle du second degré, et après avoir examiné le problème en détail, on a retenu le plan de Box-Behnken qui permet d'établir un modèle désiré et ne nécessite qu'un nombre restreint d'essais.

➤ **Expérimentation**

Les résultats des essais expérimentaux de la rugosité Ra réalisés sont rassemblés dans le tableau V.12, il existe en tout et pour tout 13 expériences.

Les essais ont été reclassés dans l'ordre classique de présentation du plan de Box-Behnken, ces essais ont été réalisés en fonction de la variation de la fréquence, de l'amplitude, et de la taille des médias après 240 minutes de traitement.

Tableau V.12. Résultats des rugosités obtenus après les essais expérimentaux

N°	F/A/T	1ère mesure Ra (µm)	2e mesure Ra (µm)	3e mesure Ra (µm)	4e mesure Ra (µm)	5e mesure Ra (µm)	Moyenne Ra (µm)
1	(-1, -1, 0)	1.61	1.62	1.60	1.61	1.61	1.610
2	(+1, -1, 0)	1.49	1.48	1.49	1.48	1.50	1.488
3	(-1, +1, 0)	1.61	1.60	1.60	1.59	1.60	1.600
4	(+1, +1, 0)	1.36	1.35	1.36	1.36	1.36	1.358
5	(-1, 0, -1)	1.60	1.62	1.59	1.60	1.60	1.602
6	(-1, 0, +1)	1.61	1.61	1.60	1.60	1.61	1.606
7	(+1, 0, -1)	1.41	1.41	1.42	1.41	1.41	1.412
8	(+1, 0, +1)	1.45	1.46	1.45	1.46	1.45	1.454
9	(0, -1, -1)	1.57	1.57	1.58	1.57	1.56	1.570
10	(0, +1, -1)	1.54	1.53	1.53	1.54	1.55	1.516
11	(0, -1, +1)	1.58	1.59	1.58	1.58	1.58	1.582
12	(0, +1, +1)	1.52	1.51	1.52	1.51	1.52	1.538
13	(0, 0, 0)	1.55	1.56	1.56	1.57	1.54	1.556

V.8 Construction du plan de Box-Behnken avec le logiciel Mini tab (La réponse Y= Rugosité Ra)

Après introduction des valeurs des rugosités avec les niveaux des facteurs obtenus après essais dans le logiciel de Mini tab version 17, voir tableau V.13.

Tableau V.13. Résultats des rugosités avec facteurs

Essais N°	Facteur 1 (Fréquence)	facteur 2 (Amplitude)	Facteur 3 (Taille des medias)	Réponse (Rugosité Ra)
1	-1	-1	0	1.610
2	+1	-1	0	1.488
3	-1	+1	0	1.600
4	+1	+1	0	1.358
5	-1	0	-1	1.602
6	-1	0	+1	1.606
7	+1	0	-1	1.412
8	+1	0	+1	1.454
9	0	-1	-1	1.570
10	0	+1	-1	1.516
11	0	-1	+1	1.582
12	0	+1	+1	1.538
13	0	0	0	1.556
14	0	0	0	1.556
15	0	0	0	1.556

Le programme se charge du calcul mathématique à savoir :

- Etablissement du modèle mathématique
- Calcul des paramètres statistiques
- Calcul de la réponse optimale
- Calcul de l'erreur de prédiction
- Etc....

V.8.1 Résultats numériques (statistiques) de la réponse (rugosité) et interprétations

Après avoir introduit les données nécessaires pour analyse, on a obtenu les résultats suivants :

Plan de Box-Behnken

Facteurs : 3 Répliques : 1
 Essais de base : 15 Nombre total d'essais : 15
 Blocs de base : 1 Nombre total de blocs : 1

Points centraux : 3

Régression de la surface de réponse :

Rugosité Ra en fonction de la fréquence, Amplitude et Taille des medias.

Analyse de la variance (ANOVA)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	de p
Modèle	9	0,079407	0,008823	147,54	0,000
Linéaire	3	0,070185	0,023395	391,22	0,000
Fréquence	1	0,062305	0,062305	1041,88	0,000
Amplitude	1	0,007081	0,007081	118,40	0,000
Taille	1	0,000800	0,000800	13,38	0,015
Carré	3	0,005236	0,001745	29,18	0,001
Fréquence*Fréquence	1	0,005192	0,005192	86,83	0,000
Amplitude*Amplitude	1	0,000075	0,000075	1,25	0,314
Taille*Taille	1	0,000000	0,000000	0,00	1,000
Interaction à 2 facteurs	3	0,003986	0,001329	22,22	0,003
Fréquence*Amplitude	1	0,003600	0,003600	60,20	0,001
Fréquence*Taille	1	0,000361	0,000361	6,04	0,057
Amplitude*Taille	1	0,000025	0,000025	0,42	0,546
Erreur	5	0,000299	0,000060		
Inadéquation de l'ajustement	3	0,000299	0,000100		* *
Erreur pure	2	0,000000	0,000000		
Total	14	0,079706			

Récapitulatif du modèle

	R carré	R carré
S R carré (ajust) (prév)	0,0077330	99,62%
	98,95%	94,00%

Coefficients codés

Terme	Valeur		de T	de p	FIV
	Coeff	Coef ErT			
Constante	1,55600	0,00446	348,51	0,000	
Fréquence	-0,08825	0,00273	-32,28	0,000	1,00
Amplitude	-0,02975	0,00273	-10,88	0,000	1,00
Taille	0,01000	0,00273	3,66	0,015	1,00

Fréquence*Fréquence -0,03750 0,00402 -9,32 0,000 1,01
 Amplitude*Amplitude -0,00450 0,00402 -1,12 0,314 1,01
 Taille*Taille -0,00000 0,00402 -0,00 1,000 1,01
 Fréquence*Amplitude -0,03000 0,00387 -7,76 0,001 1,00
 Fréquence*Taille 0,00950 0,00387 2,46 0,057 1,00
 Amplitude*Taille 0,00250 0,00387 0,65 0,546 1,00

Equation de régression en unités non codées

Rugosité Ra = 1,5760 + 0,00393 Fréquence + 0,0187 Amplitude - 0,0061 Taille
 - 0,000122 Fréquence*Fréquence - 0,00147 Amplitude*Amplitude
 - 0,00000 Taille*Taille - 0,000980 Fréquence*Amplitude
 + 0,000271 Fréquence*Taille + 0,00071 Amplitude*Taille

Ajustements et diagnostics pour les observations aberrantes

Observation	Valeur	Val.	Résid.	norm.
	Rugosité Ra	ajustée	Résiduelle	
10	1,35800	1,36600	-0,00800	-2,07 R
13	1,61000	1,60200	0,00800	2,07 R

R : Valeur résiduelle élevée

Dans un premier temps on doit analyser les valeurs de p, c'est à dire on les compare par rapport au niveau d' α . Si elles sont inférieures à 5 % c'est à dire 0,05, cela signifie que les valeurs du modèle sont statistiquement significatives.

D'après les résultats obtenus, on remarque que toutes les valeurs du modèle et des facteurs sont inférieures à 0.05, à l'exception de la taille au carré, et interaction de l'amplitude et la taille qui sont légèrement au dessus des 0.05.

En ce qui concerne le coefficient de détermination R2, sa valeur est de 99.62, R2 ajusté est de 98.95 et R2 prévu est de 94. On conclut que les résultats sont satisfaisants.

V.8.2 Résultats graphiques de la réponse (rugosité) et interprétations

V.8.2.1 Diagramme des valeurs résiduelles

La figure V.25 représente les diagrammes des valeurs résiduelles pour la réponse (rugosité Ra) :

- La droite de Henry qui représente les valeurs résiduelles en fonction du pourcentage.
- Les valeurs résiduelles en fonction en valeurs ajustées.
- Les valeurs résiduelles en fonction de l'effectif sous forme d'histogramme.
- Les valeurs résiduelles en fonction de l'ordre des observations.

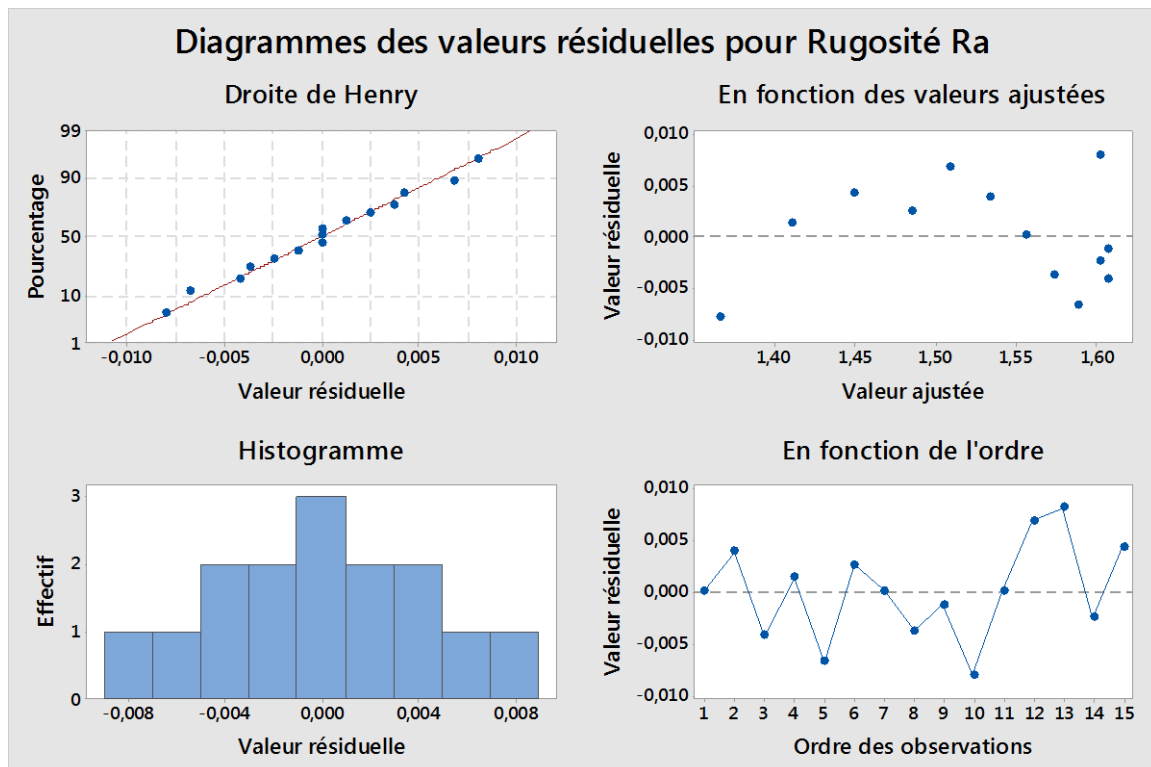


Figure V.25 Diagrammes des valeurs résiduelles pour la rugosité

- La droite de Henry représente les valeurs résiduelles en fonction du pourcentage. Pour les données sur la rugosité, les valeurs résiduelles semblent généralement suivre une ligne droite.

Il n'existe aucune évidence de non normalité, d'asymétrie, de valeurs aberrantes ou de variables non identifiées.

- Non normalité : ligne pas droite
- Asymétrie : extrémités courbées
- Une valeur aberrante : un point éloigné de zéro
- Une variable non identifiée : modification de la pente.

b. Les valeurs résiduelles en fonction des valeurs ajustées.

D'après le diagramme, les valeurs résiduelles semblent être dispersées aléatoirement autour de zéro. Il n'existe aucune évidence de variance non constante, de terme manquants, de valeurs aberrantes ou de points d'influence.

- Une variance non constante : éparpillement ou répartition déséquilibrées des valeurs résiduelles en fonction des valeurs ajustées.
- Un terme d'ordre supérieur manquant : curviligne.
- Un point influent : un point éloigné des autres points dans le sens des X.

c. L'histogramme des valeurs résiduelles suit une courbe en cloche, il n'existe aucune évidence d'asymétries ou de valeurs aberrantes.

- Asymétrie : extrémité allongées
- Valeur aberrante : barre éloigné des autres.

d. D'après le diagramme, les valeurs résiduelles semblent dispersées aléatoirement autour de zéro (la ligne centrale), il n'existe aucune évidence de corrélation entre les termes d'erreur.

V.8.2.2 Diagrammes factoriels individuels

La figure V.26 représente les diagrammes factoriels individuels sans interaction.

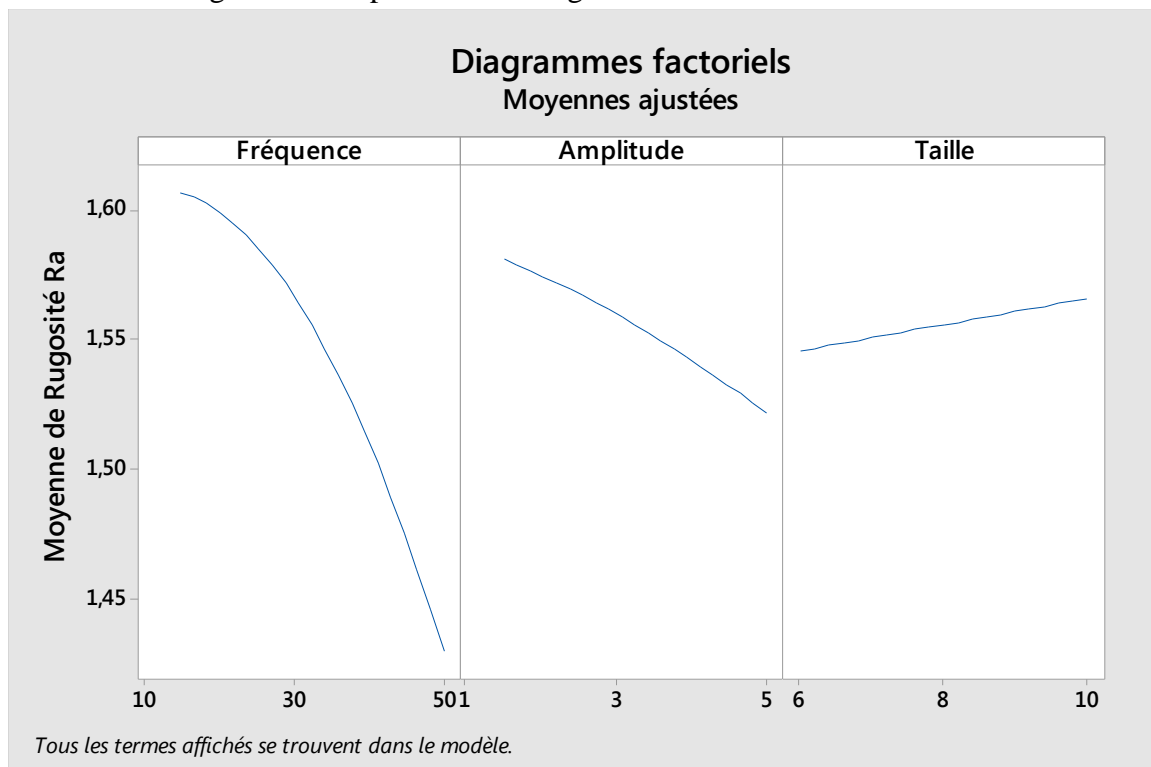


Figure V.26 Diagrammes factoriels sans interaction

D'après la figure V.26, on remarque que la variable fréquence a une grande influence sur la réponse (effet principal) car la pente est grande, puis en second temps la variable amplitude et en dernier lieu la variable taille des medias.

V.8.2.3 Diagrammes factoriels avec l'interaction des facteurs

La figure V.27 représente les diagrammes factoriels de la réponse en fonction de l'interaction de 2 variables.

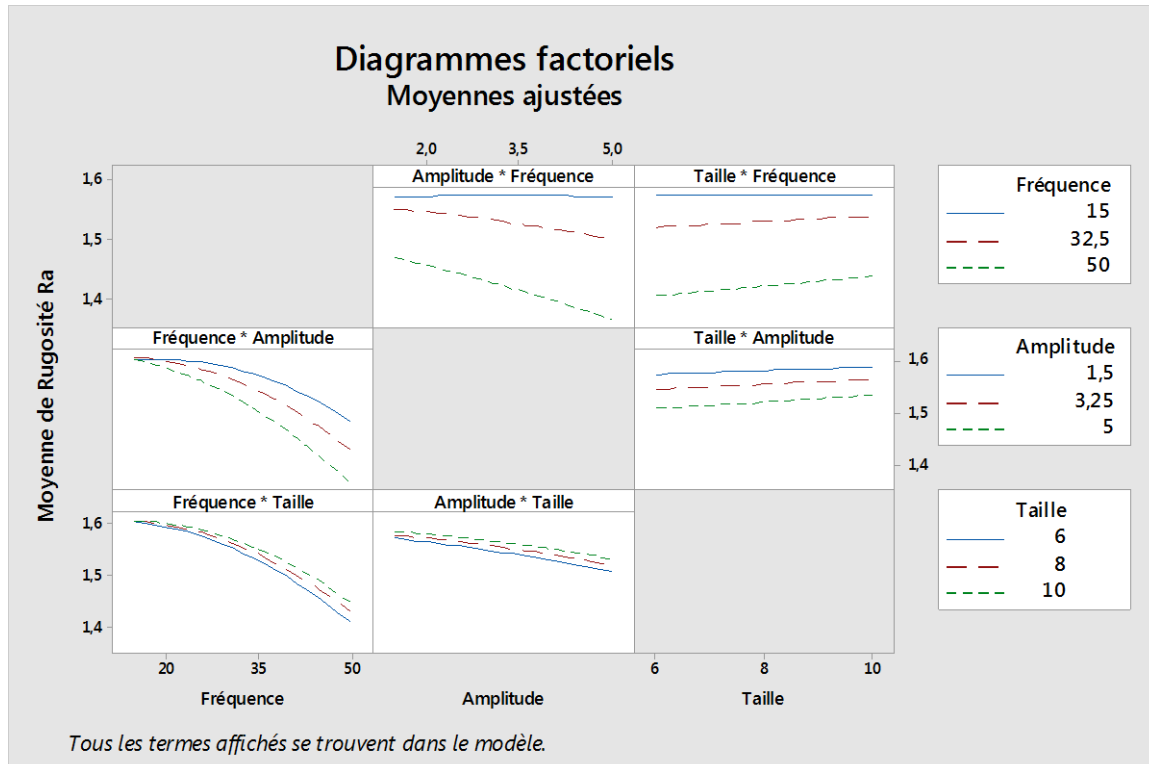


Figure V.27 Diagrammes factoriels avec interaction

La figure V.27 affiche une matrice complète des diagrammes des interactions, chaque paire de variables présente deux panneaux.

- **Fréquence et amplitude** : les deux panneaux montrent qu'il existe une interaction entre les variables.
 - Panneau de la ligne 1 : la ligne verte ($f=50$) montre à mesure que la rugosité diminue en augmentant la fréquence avec une vitesse plus grande par rapport à la ligne rouge (32.5) par contre la ligne bleue ($f=15$) semble être une ligne horizontale.
 - Panneau de la ligne 2 : la ligne verte ($A=5$) montre à mesure que la rugosité diminue en augmentant l'amplitude avec une vitesse plus grande par rapport à la ligne rouge (3.25) et la ligne bleue (1.5).
 - **Fréquence et taille** : les deux panneaux montrent qu'il existe une interaction entre les variables.
 - Panneau de la ligne 1 : la ligne verte ($f=50$) montre que rugosité diminue, tout en diminuant la taille, la ligne rouge (32.5) semble avoir une amélioration moins que la précédente, la ligne bleue (15) semble être une ligne horizontale, cela signifie qu'il n'y a pas d'amélioration.
 - Panneau de la ligne 3 : la ligne bleue ($T=6$) montre que rugosité diminue, tout en augmentant la fréquence et en diminuant la taille et avec une vitesse plus grande que la ligne rouge (8) et la ligne verte (10).

- **Amplitude et taille** : les deux panneaux montrent qu'il existe une interaction entre les variables.
- Panneau de la ligne 2 : la ligne verte ($A=5$) montre que rugosité diminue, tout en diminuant la taille, la ligne rouge ($A=3.25$), la ligne bleue ($A=1.5$) semble être une ligne horizontale, cela signifie qu'il n'y a pas d'amélioration de la réponse.
- Panneau de la ligne 3 : la ligne bleue ($T=6$) montre que rugosité diminue, tout en augmentant l'amplitude et en diminuant la taille avec une vitesse plus grande par rapport à la ligne verte (10) et la ligne rouge (8).

V.8.2.4 Graphique de contour

La figure V.28 représente un graphique de contour montrant la relation entre la réponse et deux variables, la troisième variable est maintenue à un niveau moyen constant.

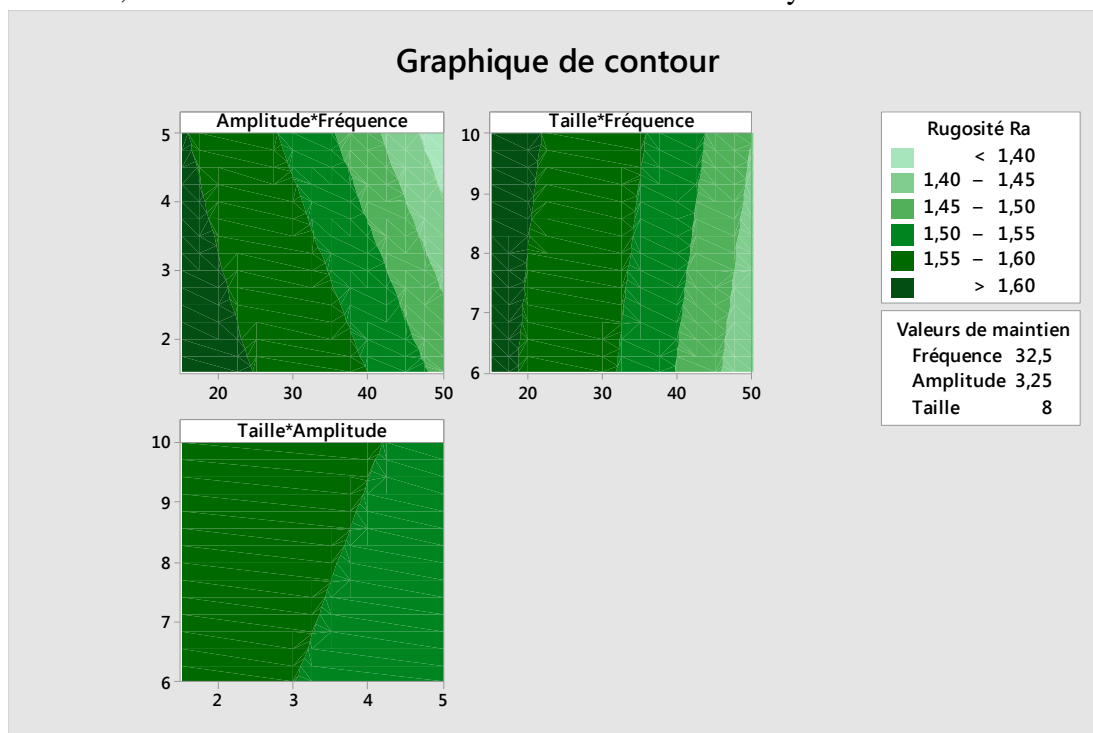


Figure V.28 Graphique de contour

D'après le graphique de contour en deux dimensions qui illustre la relation fonctionnelle entre la réponse et deux variables continues à partir d'un modèle d'équation, en fait, le contour comportant la couleur verte la plus claire indiquant la meilleure réponse (la rugosité la plus faible).

On remarque que l'influence de la fréquence est nettement supérieure à celle de l'amplitude et de la taille des médias, cela s'explique par le fait que pour obtenir une rugosité inférieure à $1.40 \mu\text{m}$ avec une interaction de la fréquence et de l'amplitude, il faut avoir un diapason de la fréquence de 48 à 50 Hz, et une amplitude avec une fourchette de 4 à 5 mm.

En ce qui concerne l'interaction de la fréquence et de la taille, il faut avoir une plage de la fréquence entre 46 et 50 Hz, pour la taille entre 6 et 9.5 mm.

Par contre, en ce qui concerne l'interaction de l'amplitude et de la taille, la réponse est située entre 1.45 et $1.55 \mu\text{m}$.

V.8.2.5 Diagrammes de surface

La figure V.29, représente les diagrammes de surface en trois dimensions, (une réponse et deux variables).

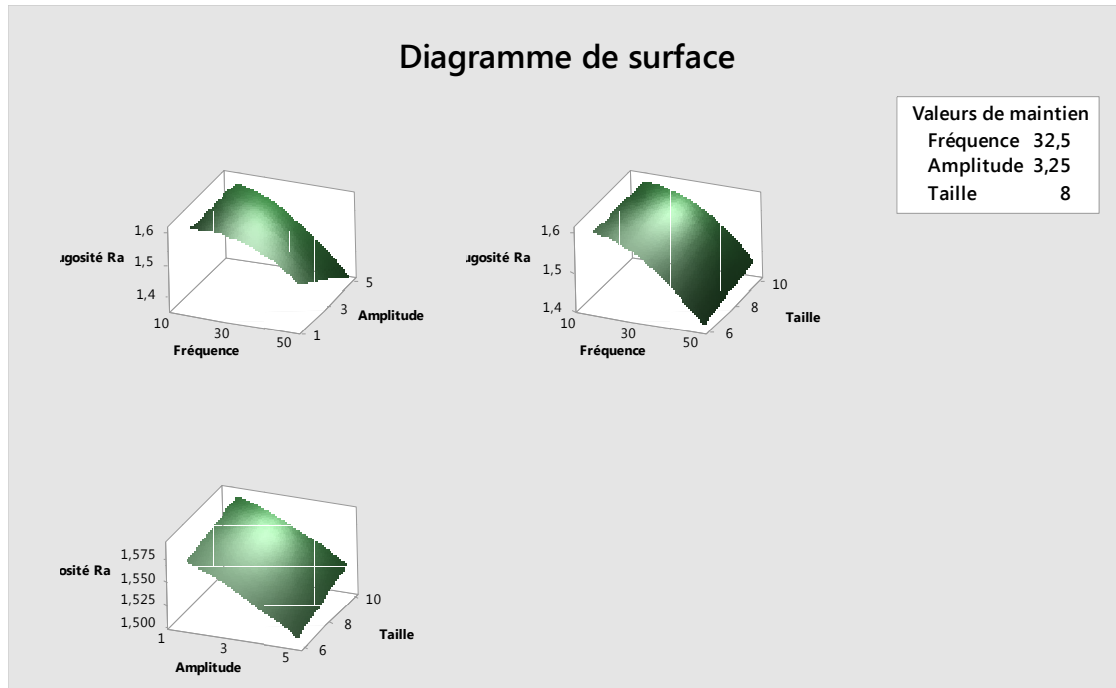


Figure V.29 Diagrammes de surface

Le graphique de la surface de réponse montre que, pour avoir une rugosité au alentour de 1.4μm, il faut avoir une fréquence de 50Hz, une amplitude de 5mm et une taille de 6mm.

La diminution de la réponse impose à la fréquence et à l'amplitude d'avoir une valeur élevée et à la taille des medias une valeur faible.

V.8.2.6 Diagrammes d'optimisation

La figure V.30 représente les diagrammes d'optimisation qui illustre les courbes d'optimisation pour chaque facteur.

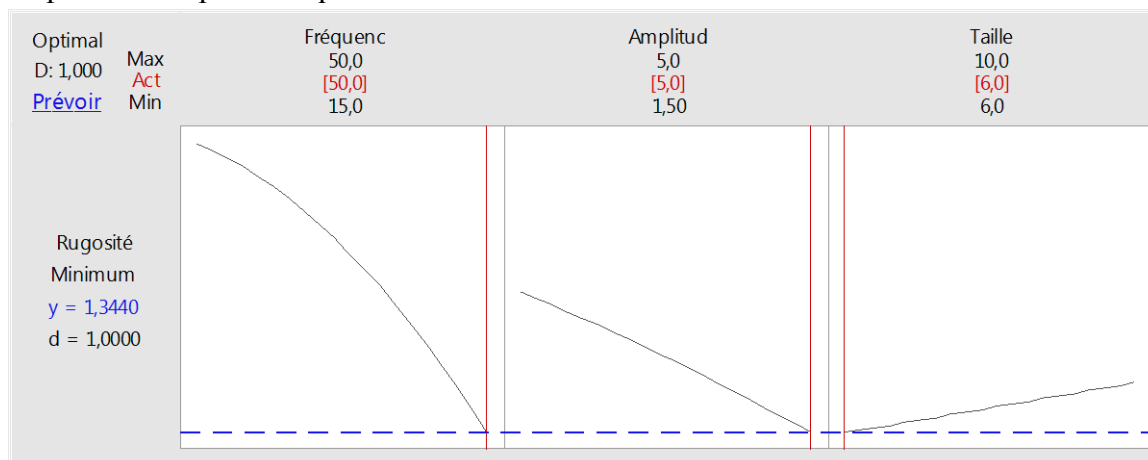


Figure V.30 Diagrammes d'optimisation

D'après la figure V.30, pour minimiser la réponse, il faut prendre la valeur maximale de la fréquence et de l'amplitude à savoir 50Hz et 5mm, et la valeur minimale de la taille à savoir 6mm pour atteindre une rugosité de 1.3440µm.

Plus la réponse prévue s'approche des exigences de notre cible, plus la désirabilité s'approche de 1.

La désirabilité est mesurée d'après une échelle allant de 0 à 1.

La désirabilité affichée dans le diagramme d'optimisation est de 1,000, est un résultat parfait et signifie que la réponse a atteint ses paramètres idéaux.

Solution

	Rugosité			
	Ra			
	Valeur			
Solution	Fréquence	Amplitude	Taille	ajustée
1	50	5	6	1,344

Prévisions de réponses multiples

Variable Configuration
Fréquence 50
Amplitude 5
Taille 6

V.9. Construction du plan de Box-Behnken avec le logiciel de Mini tab (La réponse Y= Dureté HB)

Les résultats des essais expérimentaux réalisés de la dureté HB sont rassemblés dans le tableau V.14.

Les essais ont été reclassés dans l'ordre classique de présentation du plan de Box-Behnken V.15, ces essais ont été réalisés en fonction de la variation des facteurs (fréquence, amplitude, et taille) après une durée de traitement de 240 minutes.

Tableau V.14 Résultats de la dureté obtenus après les essais expérimentaux

Essai N°	F/A/T	1 ^{er} test Dureté (HB)	2eme test Dureté (HB)	3eme test Dureté (HB)	Moyenne Dureté (HB)
1	(-1, -1, 0)	350	350	351	350
2	(+1, -1, 0)	375	374	374	374
3	(-1, +1, 0)	355	356	357	356
4	(+1, +1, 0)	387	385	386	386
5	(-1, 0, -1)	355	354	354	354
6	(-1, 0, +1)	351	352	351	352
7	(+1, 0, -1)	381	381	383	382
8	(+1, 0, +1)	379	377	378	378
9	(0, -1, -1)	364	363	363	363
10	(0, +1, -1)	370	369	369	369
11	(0, -1, +1)	360	361	361	361
12	(0, +1, +1)	368	367	366	367
13	(0, 0, 0)	365	365	366	365

Tableau V.15 Résultats des duretés avec facteurs

Essais N°	Facteur 1 (Fréquence)	facteur 2 (Amplitude)	Facteur 3 (Taille des medias)	Réponse (Dureté HB)
1	-1	-1	0	350
2	+1	-1	0	374
3	-1	+1	0	356
4	+1	+1	0	386
5	-1	0	-1	354
6	-1	0	+1	352
7	+1	0	-1	382
8	+1	0	+1	378
9	0	-1	-1	363
10	0	+1	-1	369
11	0	-1	+1	361
12	0	+1	+1	367
13	0	0	0	365
14	0	0	0	365
15	0	0	0	365

V.9.1 Résultats numériques et interprétations

Après l'introduction des valeurs des duretés au niveau du logiciel de Mini tab pour analyse, on obtient les résultats suivants :

Plan de Box-Behnken

Facteurs : 3 Répliques : 1
 Essais de base : 15 Nombre total d'essais : 15
 Blocs de base : 1 Nombre total de blocs : 1

Points centraux : 3

Régression de la surface de réponse : Dureté HB en fonction de Fréquence; Amplitude; Taille

Analyse de variance

Source	SomCar		Valeur		
	DL	ajust	CM ajust	Valeur F	de p
Modèle	9	1601,40	177,93	177,93	0,000
Linéaire	3	1583,00	527,67	527,67	0,000
Fréquence	1	1458,00	1458,00	1458,00	0,000
Amplitude	1	112,50	112,50	112,50	0,000
Taille	1	12,50	12,50	12,50	0,017
Carré	3	8,40	2,80	2,80	0,148
Fréquence*Fréquence	1	8,31	8,31	8,31	0,034
Amplitude*Amplitude	1	0,00	0,00	0,00	1,000
Taille*Taille	1	0,00	0,00	0,00	1,000
Interaction à 2 facteurs	3	10,00	3,33	3,33	0,114
Fréquence*Amplitude	1	9,00	9,00	9,00	0,030
Fréquence*Taille	1	1,00	1,00	1,00	0,363
Amplitude*Taille	1	0,00	0,00	0,00	1,000
Erreur	5	5,00	1,00		
Inadéquation de l'ajustement	3	5,00	1,67	*	*
Erreur pure	2	0,00	0,00		
Total	14	1606,40			

Récapitulatif du modèle

	R carré	R carré	R carré
S R carré (ajust) (prév)	1	99,69%	95,02%

Coefficients codés

Terme	Valeur				
	Coef	Coef ErT	de T	de p	FIV
Constante	365,000	0,577	632,20	0,000	
Fréquence	13,500	0,354	38,18	0,000	1,00
Amplitude	3,750	0,354	10,61	0,000	1,00
Taille	-1,250	0,354	-3,54	0,017	1,00
Fréquence*Fréquence	1,500	0,520	2,88	0,034	1,01
Amplitude*Amplitude	0,000	0,520	0,00	1,000	1,01
Taille*Taille	-0,000	0,520	-0,00	1,000	1,01
Fréquence*Amplitude	1,500	0,500	3,00	0,030	1,00
Fréquence*Taille	-0,500	0,500	-1,00	0,363	1,00
Amplitude*Taille	0,000	0,500	0,00	1,000	1,00

Equation de régression en unités non codées

$$\text{Dureté HB} = 344,6 + 0,408 \text{ Fréquence} + 0,55 \text{ Amplitude} - 0,16 \text{ Taille} \\ + 0,00490 \text{ Fréquence*Fréquence} + 0,000 \text{ Amplitude*Amplitude} - 0,000 \text{ Taille*Taille} + 0,0490 \text{ Fréquence*Amplitude} - \\ 0,0143 \text{ Fréquence*Taille} - 0,000 \text{ Amplitude*Taille}$$

V.9.2 Résultats graphiques et Interprétations

V.9.2.1 Diagramme des valeurs résiduelles

La figure V.31 illustre les diagrammes des valeurs résiduelles pour la réponse (dureté HB).

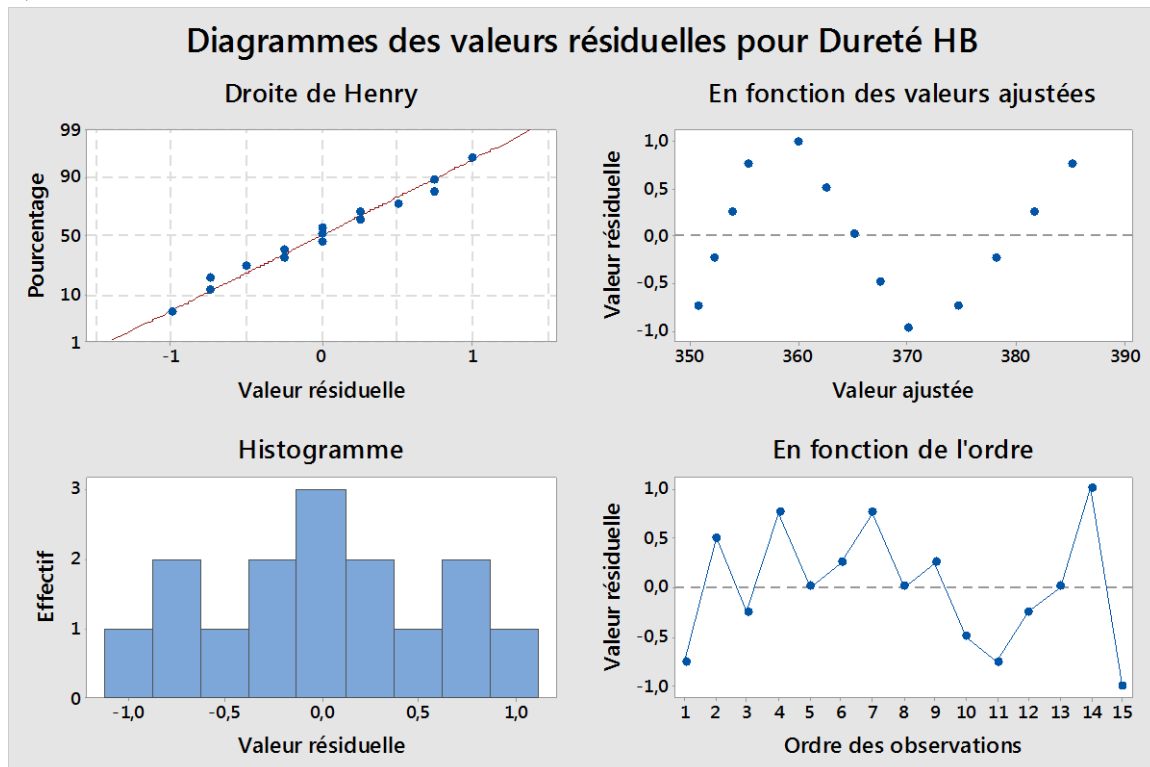


Figure V.31 Diagrammes des valeurs résiduelles pour la dureté HB

- La droite de Henry représente les valeurs résiduelles en fonction du pourcentage. Pour les données sur la rugosité, les valeurs résiduelles semblent généralement suivre une ligne droite.
Il n'existe aucune évidence de non normalité, d'asymétrie, de valeurs aberrantes ou de variables non identifiées.
- Les valeurs résiduelles en fonction en valeurs ajustées.
D'après le diagramme, les valeurs résiduelles sont éparpillées de manière aléatoire autour de zéro.
Il n'existe aucune évidence de variance non constante, de terme manquants, de valeurs aberrantes ou de points d'influence.
- L'histogramme des valeurs résiduelles suit une courbe en cloche, il n'existe aucune évidence d'asymétries ou de valeurs aberrantes.
- D'après le diagramme, les valeurs résiduelles semblent dispersées aléatoirement autour de zéro (la ligne centrale), il n'existe aucune évidence de corrélation entre les termes d'erreur.

V.9.2.2 Diagrammes factoriels individuels

La figure V.32 représente les diagrammes factoriels de la réponse en fonction des facteurs individuels.

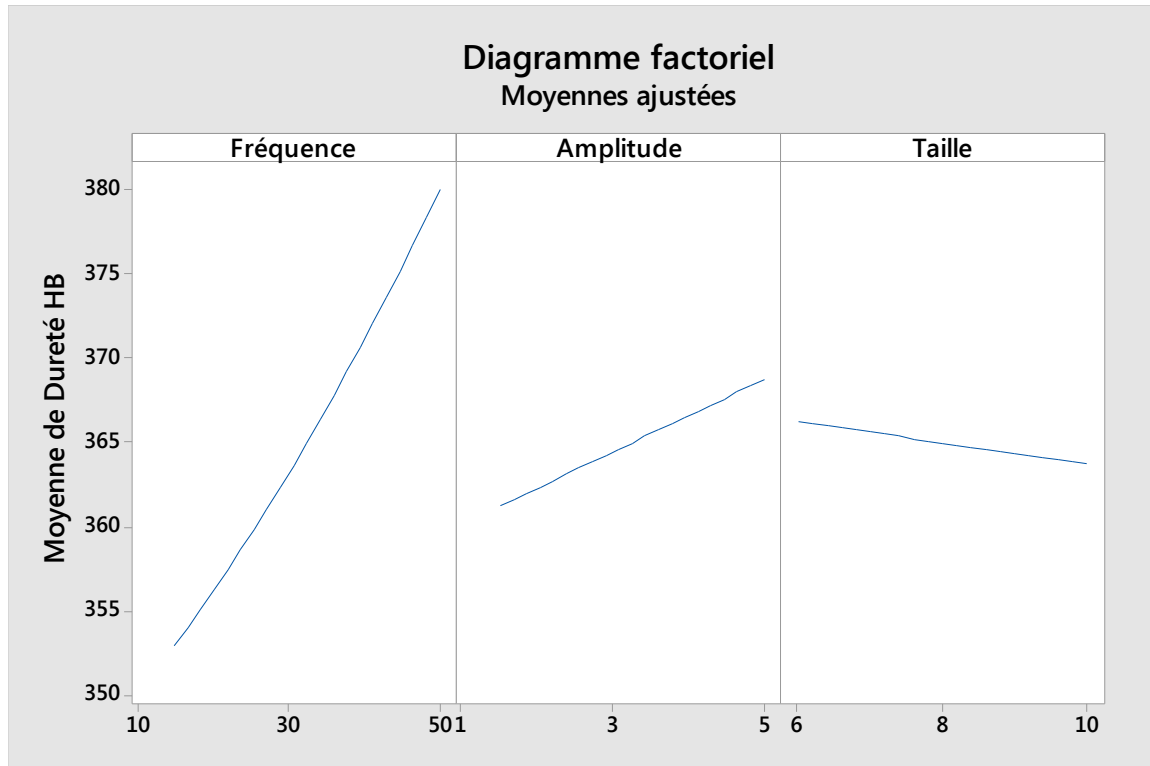


Figure V.32 Diagrammes factoriels sans interaction

D'après la figure V.32, on remarque que la fréquence a une grande influence sur la réponse (effet principal) car la pente est assez grande, en second temps c'est l'amplitude qui a une influence plus ou moins importante et en dernier lieu la taille des medias.

V.9.2.3 Diagrammes factoriels avec l'interaction des facteurs

La figure V.33 montre les diagrammes factoriels de la réponse en fonction de l'interaction de 2 variables.

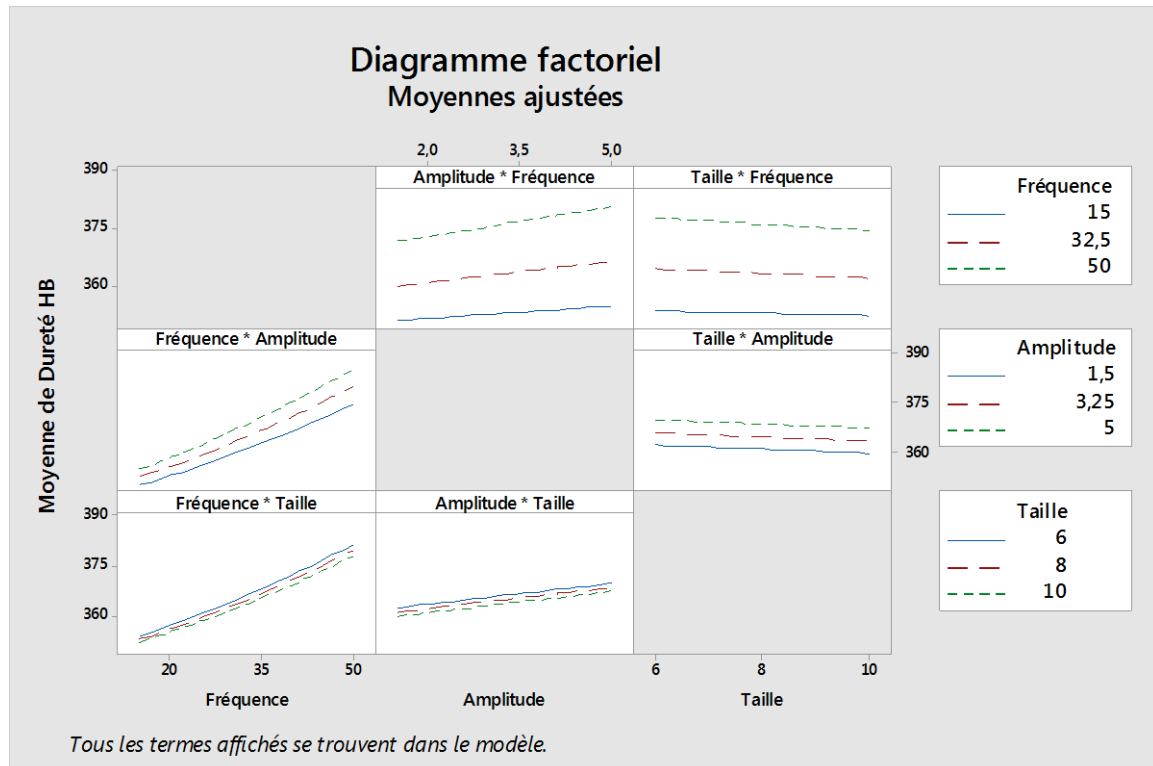


Figure V.33 Diagrammes factoriels avec interaction

La figure V.33 affiche une matrice complète des diagrammes des interactions, chaque paire de variables présente deux panneaux

- **Fréquence et amplitude** : les deux panneaux montrent qu'il existe une interaction entre les variables.
 - Panneau de la ligne 1 : la ligne verte ($f=50$) montre à mesure que la dureté augmente en augmentant la fréquence avec une vitesse plus grande par rapport à la ligne rouge (32.5) par contre la ligne bleue ($f=15$) semble être une ligne presque horizontale.
 - Panneau de la ligne 2 : la ligne verte ($A=5$) montre à mesure que la dureté augmente en augmentant l'amplitude avec une vitesse plus grande par rapport à la ligne rouge (3.25) et la ligne bleue (1.5).
- **Fréquence et taille** : les deux panneaux montrent qu'il existe une interaction entre les variables.
 - Panneau de la ligne 1 : la ligne verte ($f=50$) montre que la dureté augmente légèrement, tout en diminuant la taille, la ligne rouge (32.5), la ligne bleue semble augmenter plus légèrement que la précédente, la ligne bleue (15) semble être une ligne presque horizontale, cela signifie que l'amélioration de la réponse est plus faible que les deux lignes précédentes.
 - Panneau de la ligne 3 : la ligne bleue ($T=6$) montre que dureté augmente, tout en augmentant la fréquence et en diminuant la taille et avec une vitesse plus grande que la ligne rouge (8) et la ligne verte (10).

- **Amplitude et taille** : les deux panneaux montrent qu'il existe une interaction entre les variables.
- Panneau de la ligne 2 : la ligne verte ($A=5$) montre que la dureté augmente, tout en diminuant la taille, la ligne rouge ($A=3.25$) montre aussi que la dureté augmente mais moins que la première, la ligne bleue ($A=1.5$) montre aussi une augmentation plus légère que les deux précédentes, l'amélioration de la réponse est plus faible.
- Panneau de la ligne 3 : la ligne bleue ($T=6$) montre que la dureté augmente, tout en augmentant l'amplitude et en diminuant la taille avec une vitesse plus grande par rapport à la ligne verte (10) et la ligne rouge (8).

V.9.2.4 Graphique de contour

La figure V.34 représente un graphique de contour montrant la relation entre la réponse et deux variables, la troisième variable est maintenue à un niveau moyen constant.

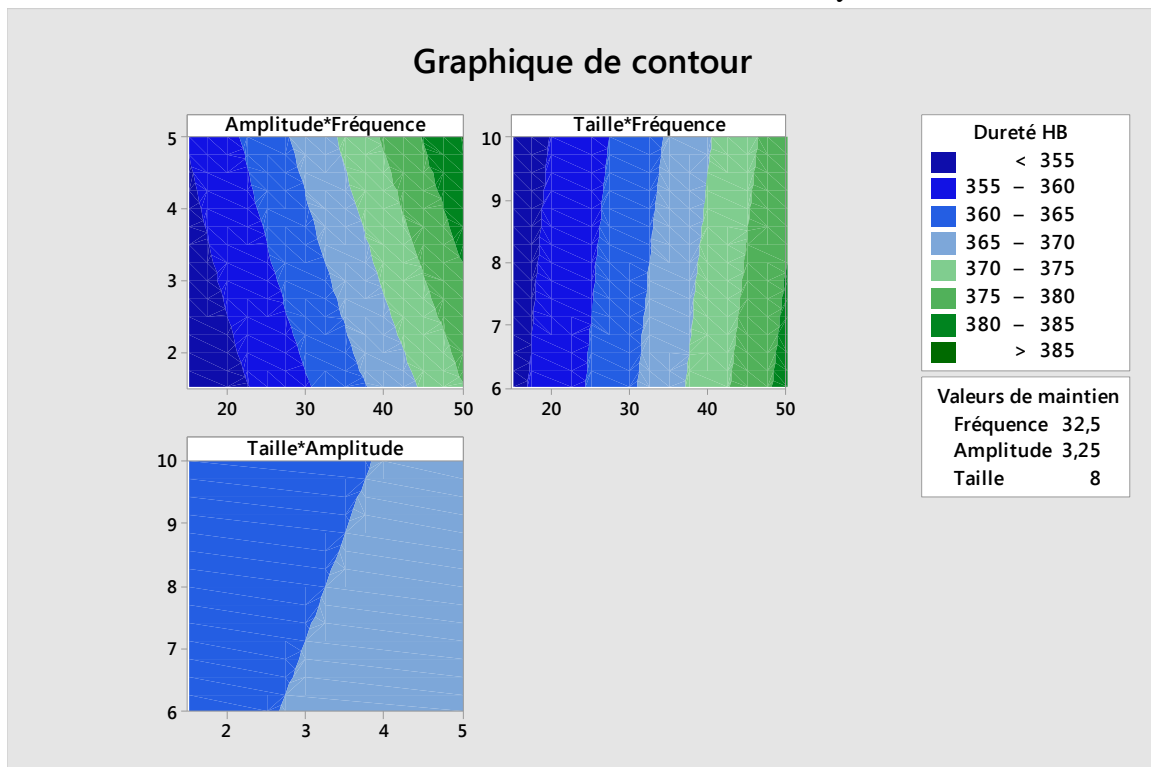


Figure V.34 Graphique de contour

D'après le graphique de contour en deux dimensions qui illustre la relation fonctionnelle entre la réponse et deux variables continues à partir d'un modèle d'équation, en faite, le contour comportant la couleur verte la plus foncée indiquant la meilleure réponse (la dureté la plus élevée).

On remarque que l'influence de la fréquence sur la réponse est nettement supérieure à celle de l'amplitude et de la taille des medias, cela s'explique par le faite que pour obtenir une dureté supérieure à 380 HB, et avec une interaction de la fréquence et l'amplitude, il faut avoir un diapasonne de la fréquence de 45 à 50 Hz, et une amplitude avec une fourchette de 3.5 à 5 mm.

En ce qui concerne l'interaction de la fréquence et la taille, il faut avoir une plage de la fréquence entre 48 et 50 Hz, pour de la taille entre 6 et 8 mm.

Par contre, en ce qui concerne l'interaction de l'amplitude et de la taille, la meilleure réponse qu'on peut obtenir est de 370HB.

V.9.2.5 Diagrammes de surface

La figure V.35, montre les diagrammes de surface en trois dimensions (une réponse et deux variables).

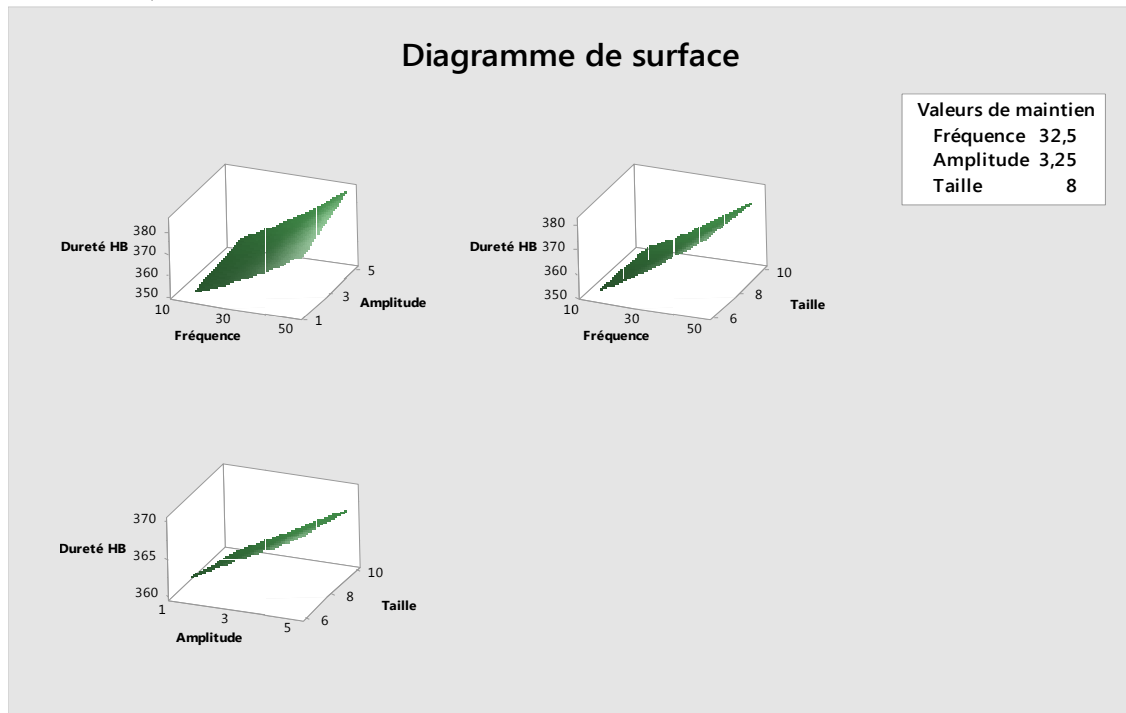


Figure V.35 Diagrammes de surface

Le graphique de la surface de réponse montre que, pour avoir une dureté au alentour de 380 HB, il faut avoir une fréquence de 50Hz, une amplitude de 5mm et une taille de 6mm.

L'augmentation de la réponse impose à la fréquence et l'amplitude d'avoir une valeur élevée, par contre elle impose à la taille d'avoir une valeur faible.

V.9.2.6 Diagrammes d'optimisation

La figure V.36, représente les diagrammes d'optimisation qui illustre les courbes d'optimisation pour chaque facteur individuellement.

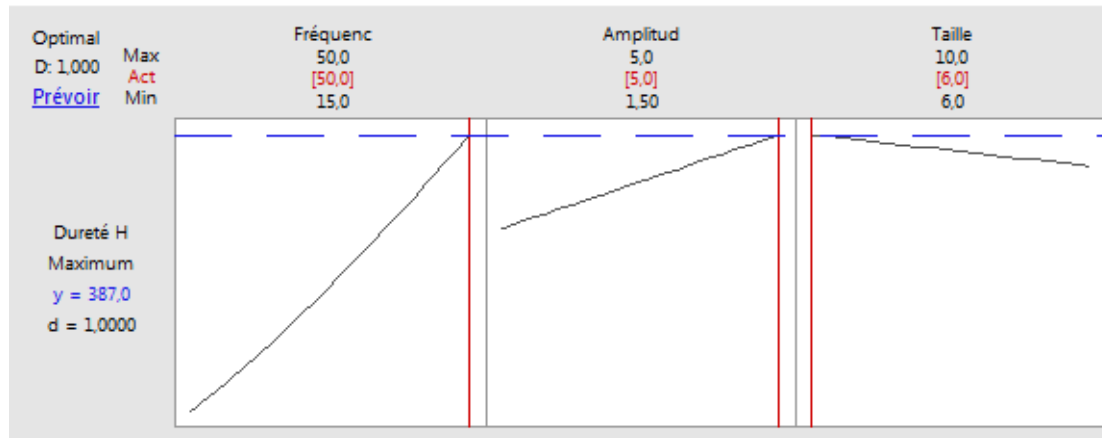


Figure V.36 Diagrammes d'optimisation

D'après la figure V.36, pour maximiser la réponse, il faut prendre la valeur maximale de la fréquence et de l'amplitude à savoir 50Hz et 5mm, et la valeur minimale de la taille à savoir 6mm pour atteindre une dureté de 387HB.

Plus la réponse prévue s'approche des exigences de notre cible, plus la désirabilité s'approche de 1.

La désirabilité est mesurée d'après une échelle allant de 0 à 1.

La désirabilité affichée dans le diagramme d'optimisation est de 1,000, est un résultat parfait et signifie que la réponse a atteint ses paramètres idéaux.

Solution

Dureté
HB
Valeur

Solution	Fréquence	Amplitude	Taille	ajustée
1	50	5	6	387

Prévisions de réponses multiples

Variable Configuration

Fréquence 50

Amplitude 5

Taille 6

2^{ème} partie des essais expérimentaux

V.10 Description de la méthode expérimentale

La 2^{ème} partie de l'expérimentation consiste à réaliser des essais expérimentaux sur une série d'éprouvettes normalisées en alliage d'aluminium (AlCu4MgSi) dans le but d'améliorer leur tenue en fatigue.

Le milieu du travail est composé de medias, billes en acier traité.

L'équipement utilisé est un vibreur circulaire composé d'une seule chambre de travail de capacité de 230 dm³. Les éprouvettes normalisées sont soumises aux essais de traction simple, puis cyclique, afin de comparer les résultats avant et après traitement.

V.10.1 Dispositif expérimental (vibreur circulaire)

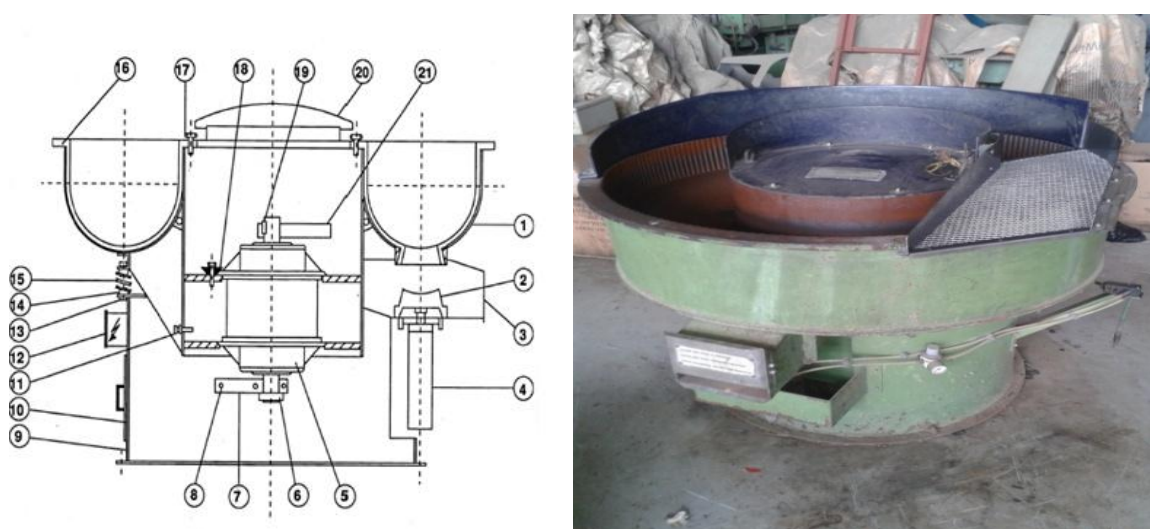


Figure V.37 Vibreur circulaire de type Renti CIRILLO, RC230

Le dispositif expérimental utilisé est un vibreur circulaire de marque Renti CIRILLO, de type RC230 à fond plat pour assurer une parfaite immersion des éprouvettes en alliage d'aluminium dans la charge d'abrasifs (billes en acier traité), dans le but d'améliorer leur durée de vie.

Pour les pièces qui doivent 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 medias.

Le dispositif possède les caractéristiques suivantes :

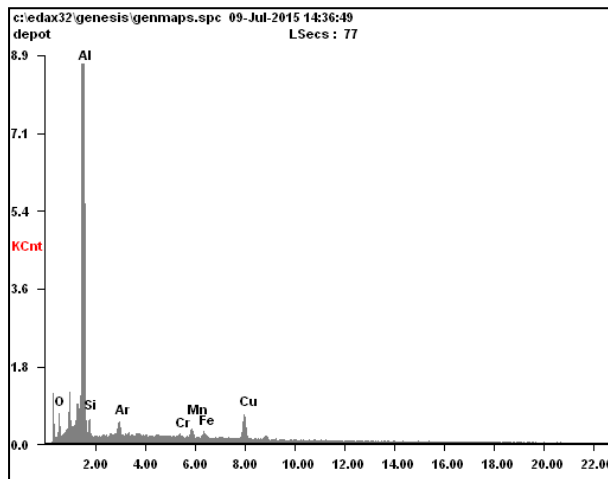
- Moteur balourdé avec 2 vitesses de rotation (1000 et 1500 tr/mn) à 50 Hz.
- Réglage des balourds.
- Revêtement polyuréthane moulé à chaud.
- Bande de vidage pour medias et drainage des effluents.
- Cuve de travail d'une capacité de 230 dm³.
- Puissance nominale : 1.5KW.

V.10.2 Identification du matériau utilisé (AlCu4MgSi)

Le matériau utilisé lors des essais expérimentaux est un alliage d'aluminium N° de série 2017A [AlCu4MgSi].

Tableau V.16 Composition chimique théorique en % de l'alliage d'aluminium

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Remarques	Autres		Al
								Chaque	Total	
0,2-0,8	0,7	3,5-4,5	0,4-1,0	0,4-1,0	0,1	0,25	0,25 Zr+Ti	0,05	0,15	Reste



Element	Wt%	At%
<i>O K</i>	03.87	06.64
<i>AlK</i>	86.15	87.68
<i>SiK</i>	01.86	01.81
<i>ArK</i>	00.93	00.64
<i>CrK</i>	00.18	00.10
<i>MnK</i>	00.92	00.46
<i>FeK</i>	00.58	00.29
<i>CuK</i>	05.51	02.38

Figure V.38 Composition chimique mesurée en % de l'alliage d'aluminium

V.10.3 Eprouvette d'essai

La figure ci-après V.39 représente l'éprouvette normalisée de l'alliage d'aluminium.

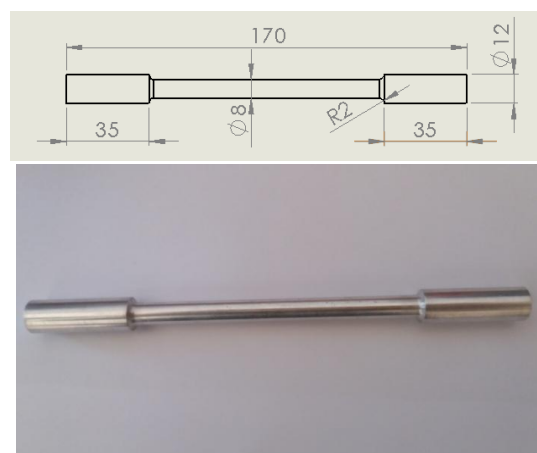
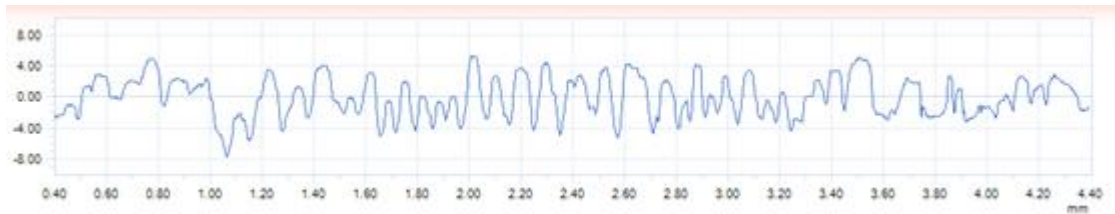


Figure V.39 Eprouvette en alliage d'aluminium

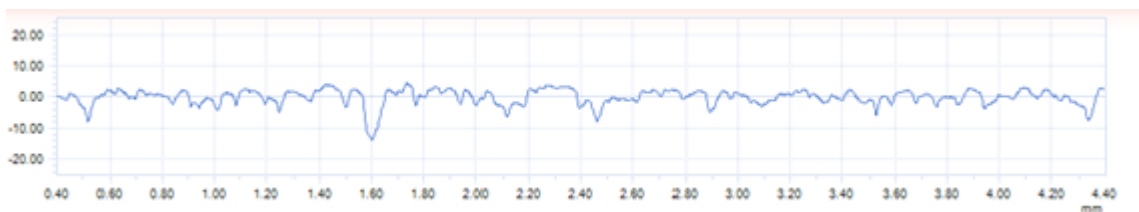
V.10.4 Mesure de la rugosité

La rugosité est mesurée à l'aide d'un rugosimètre, type TESA-rugosurf 10-G. Elle est relevée après un traitement de 180 minutes. 5 mesures sont effectuées.

Les figures V.40, V.41 représentent le profil gramme de rugosité avant et après le traitement de vibro-abrasion.



V.40 Profil gramme de rugosité avant traitement



V.41 Profil gramme de rugosité après traitement

Le tableau V.17 regroupe les résultats de la rugosité mesurée avant et après traitement.

Tableau V.17 Résultats des mesures de rugosité Ra

Durée de traitement (mn)	Rugosité Ra (μm)					
	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4	Mesure 5	Moyenne
Avant traitement	1.392	1.205	1.269	1.046	0.919	1.1662
180	0.821	0.811	0.814	0.780	0.702	0.7856

On remarque que la rugosité a nettement diminué après une durée de traitement de 180 minutes. Elle passe de 1.1662 μm à 0.7856 μm , soit une amélioration de 32.63 %.

V.10.5 Tests de micro dureté

Les tests de micro dureté HV ont été réalisés sur un micro duromètre de type Mitutoyo HM-100.

Le tableau ci-après V.18 représente les différents tests de micro dureté effectués sur les éprouvettes.

Tableau V.18 différents tests de micro dureté

N° Test	1 ^{er} test	2 ^{ème} test	3 ^{ème} test	Moyenne
Avant traitement	105.2	110.1	108.3	107.86
Après traitement	138.1	132.7	136.0	135.6

L'histogramme évoque la micro dureté avant et après le traitement.

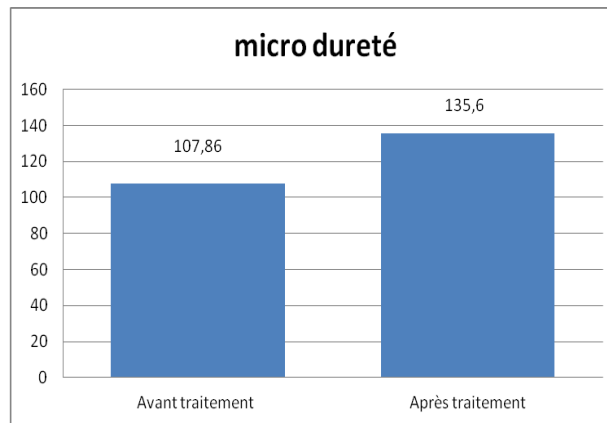


Figure V.42 Micro dureté de l'alliage d'aluminium AlCu4MgSi avant et après le traitement

D'après cette figure, on remarque que la micro-dureté des éprouvettes après un traitement de vibro-abrasion d'une durée de 180 minutes a augmenté de 107.86 HV à 135.6 HV, soit une amélioration de 25.71%.

V.10.6 Medias

Les medias utilisés durant les essais expérimentaux sont représentés à la figure V.43.



Figure V.43 Medias utilisés pendant les essais (billes en acier traité avec un diamètre de 10 mm)

V.10.7 Additifs chimiques

L'additif utilisé est le Phosphate de sodium de composition chimique Na_3PO_4 . La solution est constituée de 25g de Na_3PO_4 pour un litre d'eau.

V.10.8 Régime de travail

Le régime choisi lors des essais expérimentaux est le suivant :

- Fréquence : $f=50$ Hz.
- Amplitude : $A=5$ mm.
- Durée : $t=180$ mn.

Pour l'alliage d'aluminium (AlCu4MgSi) série 2017A et d'après le Hand-book [39], l'attaque chimique doit suivre la procédure suivante :

a. Le polissage

Premièrement, on utilise une succession de papier abrasif avec différentes textures 200, 400, 600, 800, 1000, 1200 pour assurer une bonne planéité et éliminer les macros fissures.

Deuxièmement, on utilise un papier feutre avec de l'alumine pour éliminer les microfissures et d'aboutir à un état de surface exploitable.

b. Attaque chimique

Avec un flick (acide fluorhydrique 10cm³, acide chlorhydrique 10cm³, eau 90cm³), la durée est de 10 à 20 secondes dans le but de créer un contraste révélant la microstructure du matériau. Lorsque celle-ci n'apparaît pas à l'issue du polissage, il faut la suivre par la suite par un nettoyage avec de l'alcool et puis un séchage.

c. Réactif pour un alliage d'aluminium (Keller)

HF 10% ; Hcl 15% ; HNO₃25% ; H₂O.

La figure V.44 représente la surface de l'alliage d'aluminium observée avec un microscope portable B003 avec un grossissement allant jusqu'à 50X sans attaque chimique.



Figure V.44 Surface de l'éprouvette en alliage d'aluminium observée avec un microscope portable avant et après traitement

V.11 Essais de traction simple

V.11.1 Présentation du dispositif expérimental

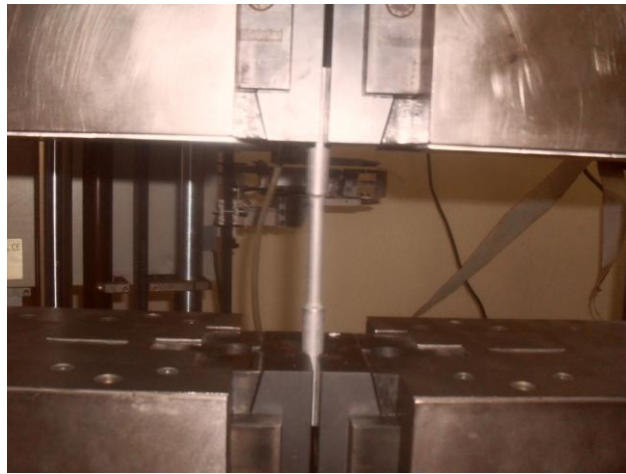


Figure V.45 Dispositif pour la réalisation des essais de traction simple

Les essais de traction statique sont effectués sur une machine universelle INSTRON de type 5982 piloté par un ordinateur équipé d'un logiciel Blue Hill et doté d'un capteur de force de 100KN, celle-ci est reliée à une chaîne d'acquisition qui permet l'enregistrement simultané de force et déplacement, la vitesse d'essais est de 2mm/min.

La figure V.46 représente la courbe de traction simple avant traitement.

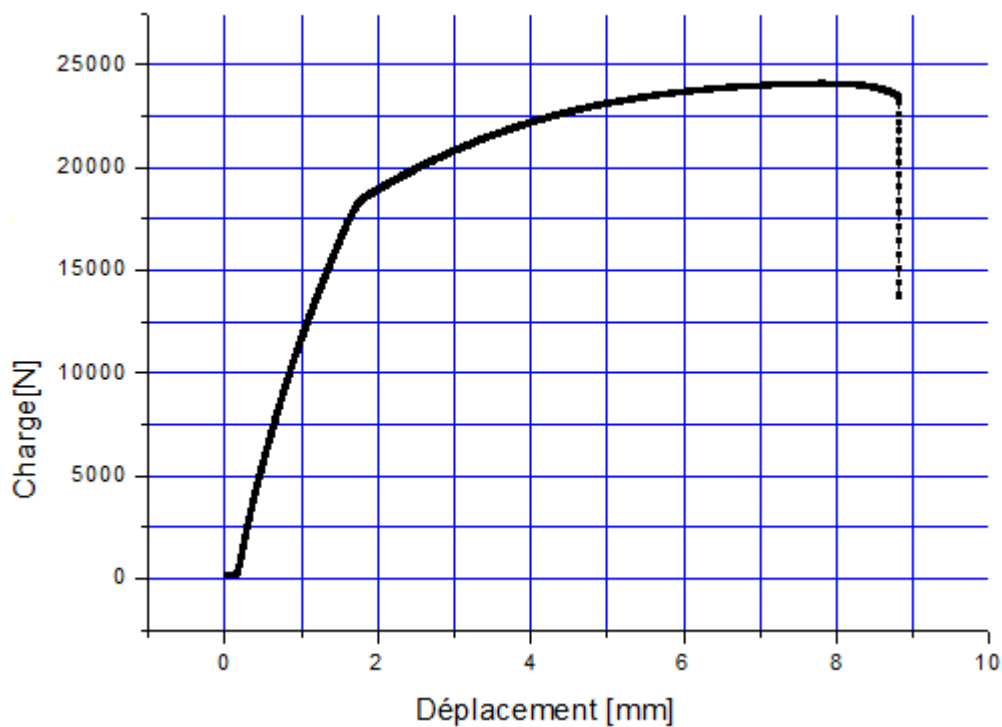


Figure V.46 Courbe de traction simple avant traitement

La figure V.47 représente la courbe de traction après traitement.

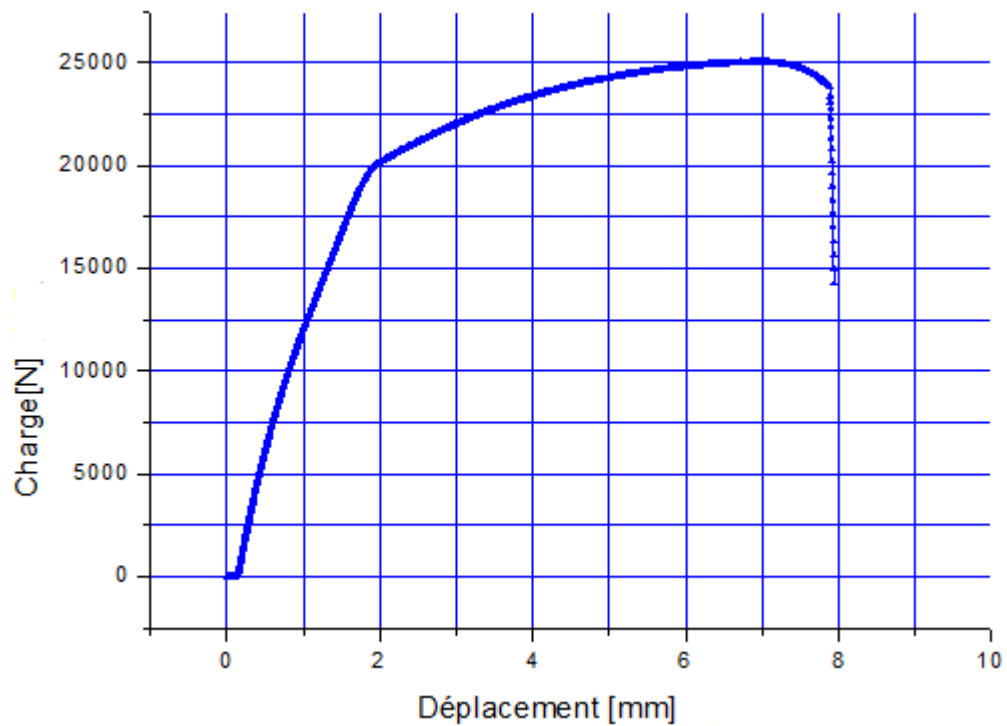


Figure V.47 Courbe de traction simple après traitement

La figure V.48 représente les courbes de traction avant et après traitement.

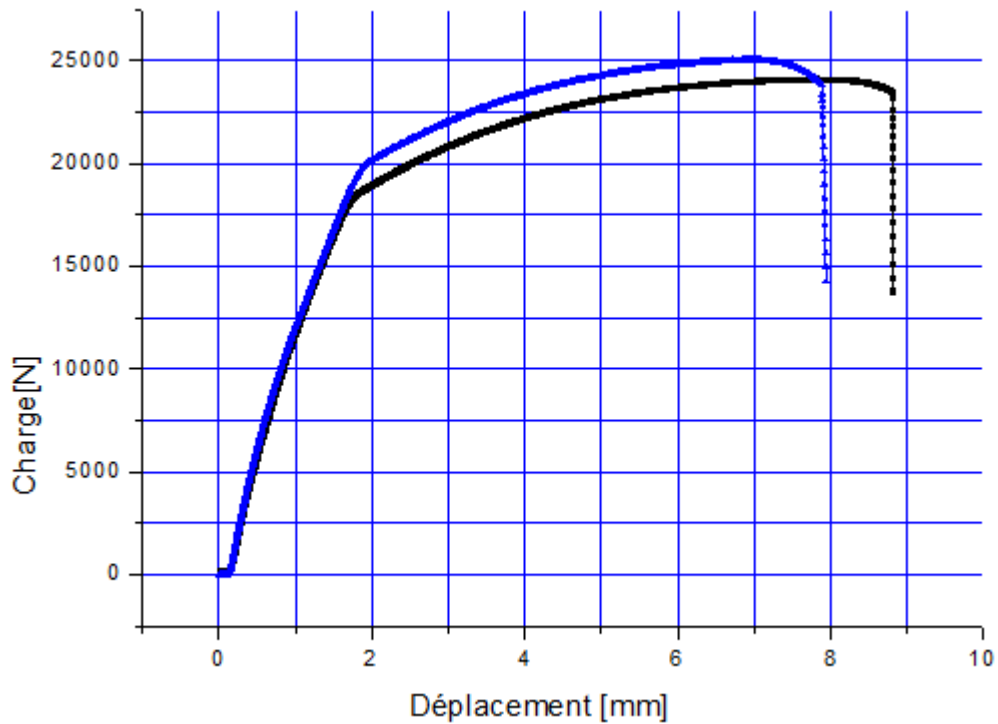


Figure V.48 Courbes de traction simple avant et après traitement

D'après les résultats obtenus lors des essais de traction classique, on remarque que les éprouvettes non traitées ont atteint une force maximale de 24160,12 avec un allongement de

8.80 mm, par contres les éprouvettes traitées ont atteint une force maximale de rupture de 25049,87 N avec un allongement de 7.88 mm.

V.12 Essais de fatigue

V.12.1 Protocole d'essais

Les essais de traction cyclique (fatigue) sont effectués sur une machine ZWICK/ROEL de type VIBROPHORE piloté par un ordinateur équipé d'un logiciel TEST EXPERT V12.1 et doté d'un capteur de force de 150KN, la fréquence varie entre 30 et 300 Hz, celle-ci est reliée à une chaine d'acquisition qui permet l'enregistrement simultané de contrainte et le nombre de cycles.

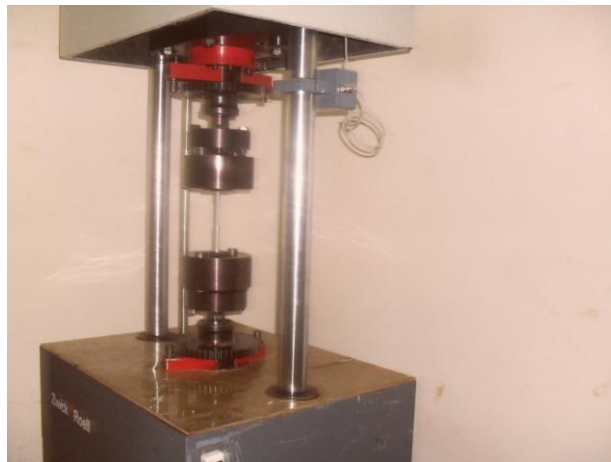


Figure V.49 Dispositif pour essais de fatigue

Le tableau V.19 représente le protocole d'essais.

Tableau V.19 Protocole d'essais

contrainte	80% (Rm)	70% (Rm)	60% (Rm)	50% (Rm)	40% (Rm)	35% (Rm)
cycle sans	24975	61942	100639	152783	304016	448137
contrainte	312,216	263,189	214,162	165,135	116,108	91,59
cycle avec	79983	102476	125963	206712	1153735	1453464
contrainte	326,576	275,754	224,932	174,11	123,288	97,877

Resistance maxi avant traitement : 490.27 MPa

Resistance maxi après traitement : 508.22 MPa.

$\sigma_a = 80$ MPa

V.12.2 Essais de traction cyclique (fatigue)

La figure V.50 représente la courbe de Wöhler avant le traitement de vibro-abrasion.

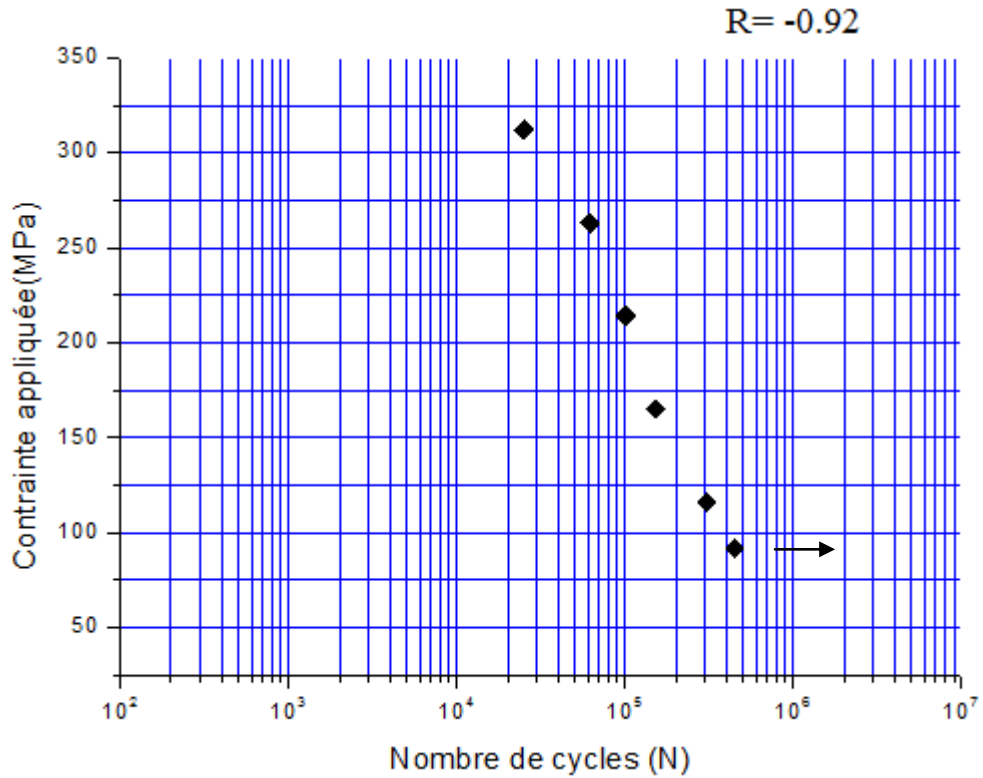


Figure V.50 Courbe de Wöhler avant traitement

La figure V.51 représente la courbe de Wöhler après le traitement de vibro-abrasion.

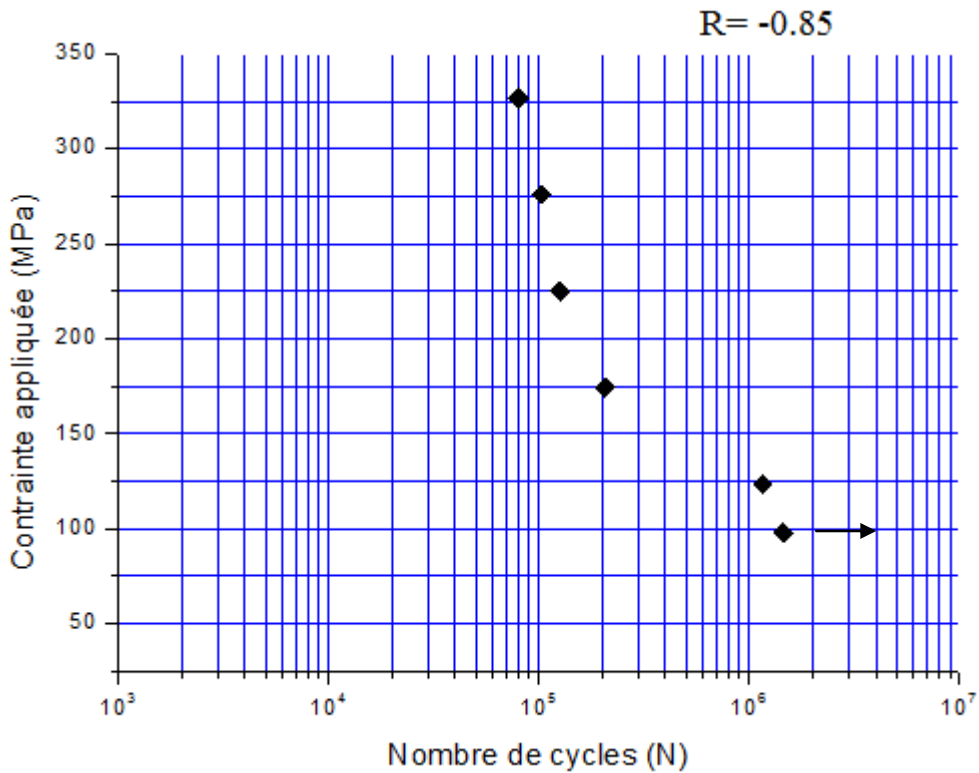


Figure V.51 Courbe de Wöhler après traitement

La figure V.52 illustre les deux courbes de Wöhler avant et après le traitement de vibro-abrasion.

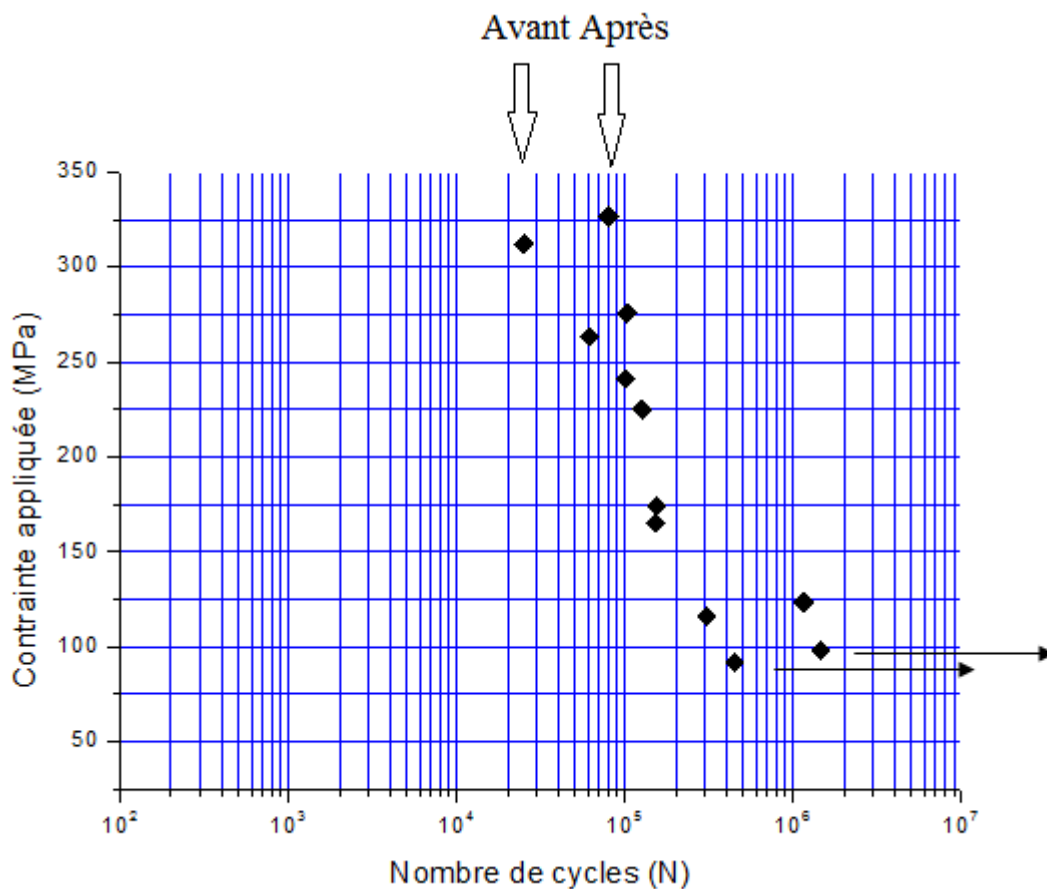


Figure V.52 Courbes de Wöhler avant et après traitement

D'après les deux courbes figure V.52, on remarque que les éprouvettes traitées ont atteint un nombre de cycles de 1453464, par contre les éprouvettes non traitées ont atteint un nombre de cycles de 448137 à 35% de la résistance maximale.

Cette augmentation s'explique par des déformations plastiques qu'ont subies les éprouvettes lors du traitement par vibro-abrasion.

Ces déformations à froid conduisent à des déformations plastiques résultant du glissement d'une partie du cristal par rapport à l'autre suivant certaines distances inter réticulaires. Ce type de glissement est favorisé par la formation, la multiplication et le déplacement de défauts linéaires mobiles dans le cristal (dislocations) qui se sont concentré en surface du matériau. Le mouvement des dislocations étant irréversible, le métal ne reprend pas sa forme d'origine lorsque l'on supprime la contrainte.

Le nombre croissant de dislocations produites lors des déformations plastiques et leur interaction entre elles conduit à réduire leur mobilité, c'est le phénomène d'écrouissage d'où résulte un durcissement du métal.

V.13 Facies de rupture

La figure V.53 représente le faciès de rupture avant traitement à l'échelle macroscopique et microscopique observé par le microscope électronique à balayage (MEB) de type JEOL JSM-6360.

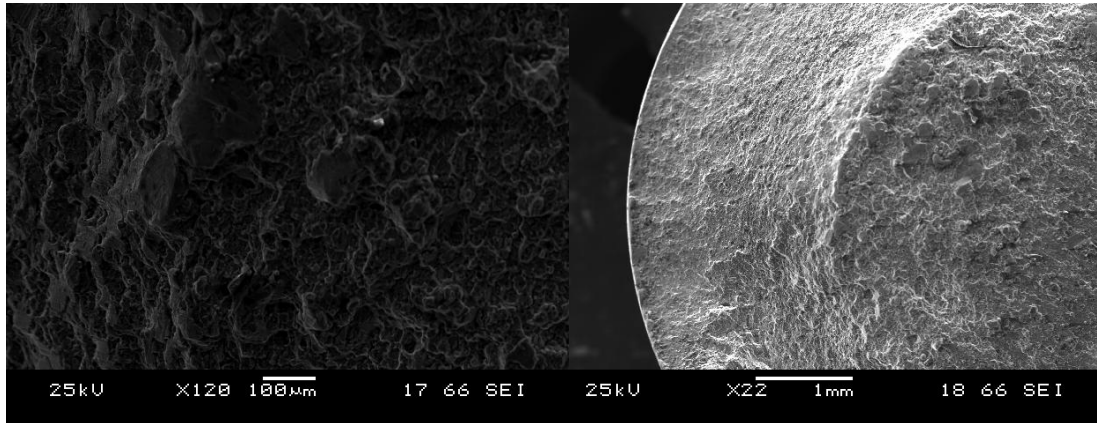


Figure V.53 Faciès de rupture avant traitement à l'échelle macro et micro observé par le MEB

On remarque d'après la figure V.53 que la rupture est ductile, l'observation à l'échelle macroscopique du faciès de rupture fait apparaître deux zones distinctes :

- ✓ Zone centrale d'apparence irrégulière et fibreuse \Rightarrow déformation plastique.
- ✓ Zone périphérique d'apparence régulière et lisse \Rightarrow cisaillement du solide.

L'observation à l'échelle microscopique du faciès de rupture fait apparaître dans la région centrale (zone fibreuse) des cupules sphériques caractéristiques d'une rupture ductile sous une sollicitation en traction.

La figure V.54 montre le faciès de rupture après traitement à l'échelle macroscopique et microscopique observé par le microscope électronique à balayage (MEB) de type JEOL JSM-6360.

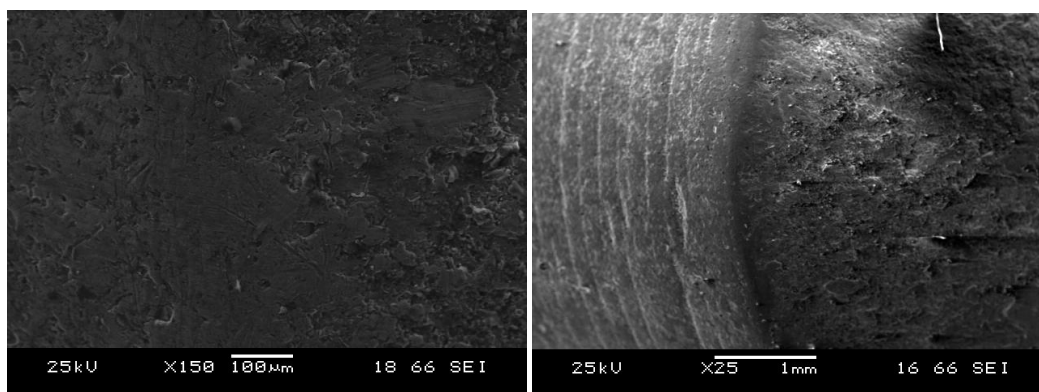


Figure V.54 Faciès de rupture après traitement à l'échelle macro et micro observé par le MEB

D'après la figure V.54, on observe bien la zone durcie sous l'effet de la déformation plastique à l'échelle macroscopique comme à l'échelle microscopique.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude expérimentale portant sur l'analyse de l'état de surface, la dureté, les essais de traction statique et dynamique.

L'analyse des deux paramètres porte sur la rugosité Ra et la dureté HB en fonction de la durée du traitement de vibro-abrasion et le type de medias. Elle montre que la porcelaine donne le meilleur état de surface. Ceci est dû à la dureté et la légèreté de ce matériau. Quant à la dureté HB, le media en acier traité est mieux adapté pour l'augmenter. En effet, l'acier étant de masse volumique importante et de dureté suffisante, les impacts sur les pièces traitées provoquent un écrouissage, donc une augmentation de la dureté superficielle.

La modélisation mathématique de ces deux paramètres est réalisée en utilisant les plans d'expériences de Box-Behnken à trois facteurs (fréquence, amplitude, taille de media). Nous obtenons, pour un niveau de confiance supérieur à 95%, un coefficient de détermination R^2 (ou de corrélation) de 0.9962 pour la rugosité et de 0.9969 pour la dureté, ce qui signifie que les valeurs du modèle sont statistiquement significatives.

Les essais de traction statique et dynamique sont réalisés sur des éprouvettes en alliage d'aluminium. En traction statique, les éprouvettes traitées ont une résistance plus élevées que celles des éprouvettes non traitées (25049.87 N contre 24162.12 N). En traction dynamique, le nombre de cycles est de 1453464 pour les éprouvettes traitées, de 448137 pour celles non traitées à 35% de la résistance maximale. Ceci montre bien que le procédé de traitement par vibro-abrasion apporte une amélioration à la longévité des pièces traitées.

Conclusion générale et perspectives

La présente thèse a pour objectif d'apporter une contribution à l'amélioration de l'état de surface et de la longévité des pièces mécaniques traitées par le procédé de vibro-abrasion. Elle comporte deux parties, l'une théorique et l'autre expérimentale.

Le procédé de vibro-abrasion est une technique de traitement mécanique des surfaces par déformation plastique superficielle. Il est caractérisé par différents paramètres : Vitesse, accélération et force de l'impact, pression et température dans la zone d'impact. Ces paramètres ont permis d'étudier leurs influences sur les caractéristiques mécaniques (dureté, micro-dureté, endurance, etc...), géométriques (état de surface) et métallurgiques (structure et contraintes résiduelles) des pièces traitées.

Il peut être réalisé avec différents types d'équipements : vibrateurs linéaires, circulaires, machines à force centrifuge, vibrateurs multibroches de type Smuritropie. Dans cette étude, l'expérimentation est réalisée sur les deux premiers types de machines (vibrateur linéaire de type YBF 4 x 10, vibrateurs circulaire de marque Renti CIRILLO, type RC230) en utilisant différents medias (abrasifs de différentes formes, tailles et natures) et deux additifs chimiques (Perchlorure de fer FeCl_3 , Phosphate de sodium Na_3PO_4).

L'analyse des résultats d'expérimentation est effectuée suivant le plan d'expérience de Box-Behnken qui permet d'étudier à partir de 3 facteurs et plus, avec trois niveaux pour chaque facteur. Les facteurs d'entrée sont la fréquence (f) et l'amplitude (A) d'oscillation et la taille des medias (T) avec les niveaux -1, 0, +1. La réponse (facteurs de sortie) est représentée par la rugosité (R_a) et la dureté (HB) de la couche superficielle.

Le modèle mathématique postulé est de second degré pour mettre en évidence l'influence des facteurs considérés ainsi que leurs interactions sur la réponse.

Le dernier volet de la présente thèse porte sur la réalisation des essais expérimentaux, qui sont subdivisés en deux parties, l'une est consacrée sur des échantillons en acier XC 48, et l'autre est effectuée sur des éprouvettes en alliage d'aluminium AlCu4MgSi (2017A).

Pour la première partie, les résultats obtenus après traitement exprimés en fonction de la durée du traitement et en faisant varier les medias, montrent que la qualité de l'état de surface des pièces traitées est améliorée. Le meilleur état de surface est obtenu avec des billes en porcelaine ; l'amélioration est de 62.6% par rapport à la rugosité initiale. Par contre, avec les billes en acier traité, l'amélioration est de 28%.

En ce qui concerne la dureté HB, on enregistre une augmentation de 74,5% avec des billes en acier traité. Par contre, avec les cônes en polymère, cette augmentation est de 20,5% et est la plus faibles des valeurs obtenues.

Les essais expérimentaux sont réalisés suivant la méthode des plans d'expériences de Box-Behnken. Cette méthode a permis d'observer l'influence des facteurs choisis, à savoir la fréquence, l'amplitude et la taille des medias sur les réponses, en l'occurrence, la rugosité arithmétique Ra et la dureté Brinell HB.

Les résultats expérimentaux montrent que l'ordre d'influence des ces facteurs est comme suit : fréquence, amplitude, taille des medias. Leur combinaison optimale correspond à une fréquence de 50 Hz, une amplitude de 5 mm et une taille des medias de 6mm. Cette combinaison donne les meilleurs résultats des réponses, à savoir, Ra = 1,34 μm et HB = 387.

La deuxième partie concernant les éprouvettes en alliage d'aluminium, montre que la longévité est améliorée. En effet, les impacts des medias provoquent un écrouissage des couches superficielles et transformation des contraintes résiduelles de traction en compression, ce qui a permis une augmentation de la durée de vie. Cette amélioration est évaluée à 224%.

En résumé, le procédé utilisé est très adéquat pour l'amélioration de l'état de surface et de la longévité des pièces mécaniques.

En perspective, nous proposons la continuation de cette étude sur d'autres types de matériaux et en examinant d'autres caractéristiques mécaniques (résistance à l'usure, essais de flexion, ...) et métallurgiques (observation de la microstructure, résistance à la corrosion ...) et autres réponses telle que la distribution des contraintes résiduelles sur la couche superficielle durcie. Nous suggérons aussi que l'analyse des résultats soit effectuée avec des plans d'expériences pour un nombre de facteurs supérieur à trois.

Enfin, nous souhaitons l'intégration de cette technique au niveau des entreprises algériennes privées et étatiques.

Références Bibliographiques

- [1] A. P. BABICHEV, Основы вибрационной технологии , Basics of Vibration Technology, ISBN 978-5-7890-0472-2, Edition DSTU, 2008.
- [2] V.VIJARAGHAVAN, S. CASTAGNE, measurement of surface characteristics of Ti6Al4V aerospace engineering components in mass finishing process, scientific article, Elsevier, measurement, vol.115, pp279-287, 2017.
- [3] T. LABIB, Traitements et revêtements de surface pour application tribologique, ISBN 2-85400-333-0, Edition CETIM et GAMI, 1994.
- [4] VIGNEASHWARA PANDIYAN, High frequency and amplitude effects in vibratory media finishing, scientific article, Elsevier, Procedia manufacturing, Vol.5, pp546-557, 2016.
- [5] F. SALVATORE, Experimental and numerical study of media action during tribofinishing in the case of SLM titanium parts, scientific article, Elsevier, Procedia, vol.58, pp451-456, 2017.
- [6] A. CORNET, J. P. DEVILLE, Physique et ingénierie des surfaces, Monographie de Matérialogie, ISBN 2-86883-352-7, EDP sciences, 1998.
- [7] J. GOUPY, Plans d'expériences pour surfaces de réponses, ISBN 2-10-003993-8, DUNOD, 1999.
- [8] J. GOUPY, L. CREIGHTON, Introduction aux Plans d'expériences, ISBN 2-10-049744-8, DUNOD, 2009.
- [9] J. GOUPY, Pratiquer les plans d'expériences, ISBN2-10-004217-3, DUNOD, 2005.
- [10] J. GOUPY, Plans d'expériences, Manuel d'utilisation du logiciel Mini tab (version 16).
- [11] ESCART UHLMANN, Investigation of material removal and surface topology formation in vibratory finishing, scientific article, 6th CIRP, International Conference on High Performance Cutting, vol.14, pp25-30, HPC2014, Berkeley, California, USA.
- [12] LU. JIAN, Traitements de surface mécaniques, Principes, Techniques de l'ingénieur, Réf : M1190 V2, 2006.
- [13] A.CHEVALIER, J. LECRINIER, Guide du dessinateur industriel, ISBN 2.01.16.8831.0, Édition Hachette, 2004.
- [14] D. WEHBI, J.F. QUINIOU, C. ROQUES-CARMES, Rôle de la rugosité des surfaces en sciences des matériaux, article scientifique, Revue Traitement Thermique, N22, pp63-73, 1988.
- [15] A. P. BABICHEV, P. D. MOTRENKO, Применение вибрационных технологий для повышения качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей. The use of vibration technology to improve the surface quality and performance properties of parts, ISBN 5-7890-0390-7, Edition DSTU, 2006.

[16] A. P. BABICHEV, Вибрационная механохимия в процессах отделочно-упрочняющей обработки и покрытий деталией машин. Vibration mechanochemical in the processes of finishing and hardening treatment and coating of machine parts, ISBN 978-5-7890-0702-0, Edition DSTU, 2012.

[17] S. WANG, Experimental investigation of vibratory finishing of aluminium, scientific article, journal Elsevier, WEAR, vol.243, pp147-156, 2000.

[18] A. P. BABICHEV, Применение вибрационных технологии на операциях отделочно-зачистной обработки деталией. Application of vibration technology on finishing and grinding machining of parts, ISBN 978-5-7890-0580-4, Edition DSTU, 2010.

[19] A. P. BABICHEV, Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом. Finishing and hardening processing of parts by multi-contact vibro-impact tool, ISBN 5-7890-0271-4, Edition DSTU, 2003.

[20] DOMINIQUE FRANÇOIS, Endommagements et rupture de matériaux, ISBN 978-2-86883-714-1, édition EDP Sciences, 2004.

[21] LAYOUNI AHMED BEN AZZEDINE, Улучшение качества поверхности и срока службы деталей методом финишной и упрочняющей обработки. Improvement of surface quality and longevity of parts by the finishing and hardening treatment method, PhD thesis defended in 1995, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.

[22] FLORENT LEDRAPPIER, Méthodologie d'étude pour optimiser la tenue en fatigue superficielle de dépôts minces, thèse de doctorat soutenue en 2005, Ecole centrale de Lyon, Lyon, France.

[23] S. BESAADA, D. FELIACHI, Essais mécaniques, ISBN 978.9961.0.0756.3, édition OPU, 2008.

[24] HACINI LYES, Étude des effets du martelage répétitif sur les contraintes résiduelles, Thèse de doctorat soutenue en 2009, Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec, Québec, Canada.

[25] GUENHAËL LE QUILLIEC, Application du martelage à haute fréquence à l'optimisation de la maintenance des ouvrages et des structures soudées, Thèse de doctorat soutenue en 2011, École Centrale de Nantes, Nantes, France.

[26] MOTRENKO PETER DANILOVICH, Повышение интенсивности отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием на основе применения многоконтактных виброударных инструментов. Increasing the intensity of finishing and hardening processing of parts by surface plastic deformation based on the use of multi-contact vibro-impact tools, PhD thesis defended in 2008, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.

[27] М. А. ТАМАРКИН, Технологическое обеспечение заданного качества поверхностного слоя деталей при обработке динамическими методами поверхностного пластического деформирования. Technological support of a given quality of the surface layer

of parts during the treatment by dynamic methods of plastic surface deformation, scientific article, Journal Vestnik DSTU, N° (3)86, pp46-52, 2016.

[28] А. Р. ТШОУТШОУКАЛОВ, Повышение циклической прочности деталей на основе разработки и исследования новых технологических схем виброударной отделочно-упрочняющей обработки. Increasing the cyclic strength of parts based on the development and research of new technological schemes for vibro-impact finishing and hardening processing, PhD thesis defended in en 2007, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.

[29] SIDILEVA ANNA IVANOVA, Оптимизация процесса многоступенчатой обработки свободными абразивами. Optimization of the process of multi-stage processing of free abrasives, PhD thesis defended in 1998, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.

[30] АКЦЕНОВ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ, Совершенствование процесса отделочно - упрочняющей обработки многоконтakтным виброударным инструментом с учетом ударно волновых явлений. Improving the process of finishing and hardening processing by multi-contact vibro-impact tool, taking into account shock-wave phenomena, PhD thesis defended in 2000, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.

[31] ДРОПPOB ВИТАЛИ ВЛАДИМИРОВИЧ, Оптимизация процесса центробежно-ротационной обработки в среде абразива. Optimization of the process of centrifugal-rotational processing in the environment of abrasive, PhD thesis defended in 2007, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.

[32] ТИШИНКО ЕЛИНА ЕДУАРДОВНА, Повышение эффективности отделочно-упрочняющей центробежно-ротационной обработки. Improving the efficiency of finishing and hardening centrifugal-rotary processing, PhD thesis defended in 2004, Don State Technical University, Rostov-on-Don Russia.

[33] ANDREAS KACARAS, Influence of rotational speed on surface states after stream finishing, scientific article, Elsevier, Procedia CIRP, vol.71, pp221-226, 2018.

[34] ЛЕБЕДЕНКО ВЕЧЕСЛАВ ГЕОРГИЕВИЧ, Повышение эффективности обработки деталей дробью и улучшение условий труда операторов. Improving the efficiency of processing parts of shotgun and improving the working conditions of operators, PhD thesis defended in 2009, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.

[35] РОЖНЕНКО ОКСАНА АНАТОЛИЕВНА, Оптимизация процесса центробежно-ротационной обработки в среде абразива. Optimization of the process of centrifugal-rotational processing in the environment of abrasive, PhD thesis defended in 2006, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.

[36] СОУКHOB МАКСИМ ВЛАДИМИРОВИЧ, Оптимизация технологических параметров вибрационной отделочно - упрочняющей обработки. Optimization of technological parameters of vibration finishing - hardening processing, PhD thesis defended in 2003, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.

[37] TAMARKIN MIKHAIL ARAKADIEVICH, Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами. Theoretical basis for optimizing the processing of parts with free abrasives, Doctoral dissertation of state defended in 1995, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.

[38] CHAVA MEKHAIL MEGONOVICH, Оптимизация технологических параметров вибрационной отделочной обработки. Optimization of technological parameters of vibration finishing processing, PhD thesis defended in 1997, DSTU, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.

[39] GEORGE F. VANDER VOORT, Hand-Book, ASM, Metallography and Microstructures, ISBN 978-0-87170-706-2. Volume 9. Publisher: ASM International, 2004

[40] C. LALANNE, Dommages par fatigue – Vibrations et chocs mécaniques, ISBN 2-7462-0038-4, Tome 4, Edition HERMES, 1999.

[41] B. ARIFVIANTO, Effect of surface mechanical attrition treatment (SMAT) on micro hardness, surface roughness and wettability of AISI 316L, Scientific article, Materials chemistry and physics, vol.125(3), pp418-426, 2010.

[42] G. LAROUX, Deburring and Edge Finishing, Handbook, ISBN 978-0872635012, Edition SME, 1999.

[43] A. N REZNIKOVA, Абразивная и алмазная обработка материалов. Abrasive and diamond processing of materials, Aide mémoire, УДК 621.921.34, Edition MASHENOSTROENIE, 1977.

[44] EMELYANOV, S.V. Повышение интенсивности и равномерности виброабразивной и виброупрочняющей обработки стоек шасси, Increasing the intensity and uniformity of vibroabrasive and vibration-strengthening treatment of the landing gear, PhD thesis defended in 2008, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia.

[45] A. P. SERGUIEV, Окончательная обработка в абразивной среде без жесткой кинематической связи. Finishing treatment in an abrasive medium without rigid kinematic connection, PhD thesis defended in en 1990, University of Tula, Tula, Russia.

[46] A.P. BABICHEV, V.N. VESNIN, Экспериментальные исследования виброволновых процессов в технологии утилизации сборочных единиц. Experimental studies of vibration wave processes in the technology of utilization of assembly units, Scientific article, Journal Vestnik, N°1(88), pp47-54, 2017.

[47] A.P. CHAPYSHEV, A.V. IVANOVA, A.V. KRYUCHKIN, Technological possibilities of processes mechanized detail finishing. Technological possibilities of processes mechanized detail finishing, V All-Russian Conference (Modern high-tech innovative technologies), 3-5.12.2013, T15, N°6(2), pp533-537, Irkutsk, Russia, 2013.

[48] A.P. BABICHEV, P.D. MOTRENKO, Вибрационные технологии в машиностроении: Опыт применения и перспективы развития. Vibration technologies in mechanical engineering: Application experience and development prospects, the monthly scientific and production journal, N°8 (128), pp3-5, 2015, Russia.

[49] BABICHEV A.P., GLASMAN B.S., KRAVCHENKO D.N., IVANOV V.V. Removal of burrs under vibration scrapping // Proceedings of the 7th International Conference on Deburring and Surface Finishing. University of California at Berkeley, pp187-191, 2004

[50] BABICHEV A. P, Quality of Deburring and Surface Finishing (DSF) in Russia, Vols. 291-292, pp315-318, 2005.

[51] BABICHEV A. P, Физико-технологические основы методов обработки. Physical and technological bases of treatment methods, ISBN 5-7890-0284-6, Edition DSTU, 2003.

[52] BABICHEV A. P. V.I. BEZHNON, ME POPOV, A.M. POPOV, A.G. KHVEDELIDZE, N.O. SHEVCHENKO, Технологичность конструкции изделий машиностроения. Manufacturability of engineering products design, ISBN 978-5-7890-0907-9, Edition DSTU, 2014.

[53] А. Р. BABICHEV, М. А. ТАМАРКИН, Ю. Р. АНКУДИМОВ, Методы обработки типовых поверхностей деталей. Methods of processing typical surfaces of parts, ISBN 5-7890-0159-9, Edition DSTU, 2001.

[54] LAROUX. K. GILLESPIE, Mass Finishing Handbook, ISBN 0-8311-3257-4, Edition Industrial Press New York, 2007.

[55] DOUGLAS C. MONTGOMERY, Design and analysis of experiments, ISBN 0-471-31649-0, Publisher: JOHN WILEY & SONS, 5th Edition, 2001.

[56] Т.Ю. СТЕПАНОВА, Технологии поверхностного упрочнения деталей машин. Surface technology hardening machine parts, ISBN-5-9616-0315-4, Edition ISCTU, 2009.

[57] V. P. SAZANOV, V.A. KIRPICHEV, V.S. VAKULYUK, V.F. PAVLOV, Определение первоначальных деформаций в упрочненном слое цилиндрической детали методом конечно-элементного моделирования с использованием расчетного комплекса patran/nastran. Determination of the initial deformations in the strengthened layer of a cylindrical part by the method of finite element modeling using the patran / nastran computational complex, journal UGATU, T19, N°2(68), pp35-40, 2015.

[58] BABICHEV A.P. АНКУДИМОВ Ю.Р. Садовая Образование модифицированного слоя на стальной поверхности при вибрационной механотермической обработке. Garden Formation of a modified layer on a steel surface during vibration mechano-thermal processing, scientific article, Journal Vestnik RSATA, № 2 (41), pp52-56, 2017.

[60] BIRGER I. A. Остаточные напряжения, Residual stresses, УДК 639.6.014.13, Edition MASHGIZ, 1963.

[61] N.S. KOVAL, P.D. MOTRENKO, Разработка и исследование технологических схем многопозиционной виброударной упрочняющей обработки длинномерных деталей сложной формы. Development and research of technological schemes of multiposical vibro-impact strengthen treatment of long-dimensional details of complex form, scientific article, Journal Vestnik DSTU, T11, N°3(54), pp437-440, 2011.

- [62] GOROKHOV V. A. Обработка деталей пластическим деформированием. Processing of parts by plastic deformation, УДК 621.73, Edition ТЕХНИКА, 1978.
- [63] GRIGOROVICH V. K, Твердость и микротвердость металлов. Hardness and micro hardness of metals, УДК 669: 620.178, Edition НАУКА, 1976.
- [64] GUDKOV A. A, SLAVSKY.YU. I, Методы измерения твердости металлов и сплавов. Methods for measuring the hardness of metals and alloys, УДК 669.539.5.531, Edition Металлургия, 1982.
- [65] GULYAEV A.P, Металловедение. Metal science, УДК 669.017. (075.8), Edition Metallurgy, 1986.
- [66] IVANOVA V. S, Природа усталости металлов. The nature of metal fatigue, УДК 669.589.43, Edition Metallurgy, 1975.
- [67] OTENY, YAROSLAV NIKOLAEVICH, Технологическое обеспечение качества деталей машин при обработке поверхностным пластическим деформированием роликами, Technological quality assurance of machine parts in the processing of surface plastic deformation rollers, PhD thesis defended in 2007, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia.
- [68] A. V. VERCHENKO, M. A. TAMARKIN, A. A. KISHKO, Исследование шероховатости поверхности реза при гидроабразивной резке, Cut face roughness analysis under water jet cutting, scientific article, Journal Vestnik DSTU, N°2(89), pp116-130, 2017.
- [69] GOLOVKIN VALERY VIKTOROVICH, Повышение эффективности обработки и качества поверхностного слоя при нарезании резьбы в заготовках из труднообрабатываемых материалов с наложением ультразвуковых колебаний, Improving the efficiency of processing and quality surface layer in threading thread in preparations from difficulty processed materials with the ultrasound ultrasound vibrations, PhD thesis defended in 2015, Samara State Technical University, Samara, Russia.
- [70] VOLKER SCHULZE, Modern Mechanical Surface Treatment, ISBN: 978-3-527-31371-6, Edition WILEY-VCH, 2006.
- [71] KLIMENKO, ANNA ALEXANDROVNA, Совершенствование методики оптимизации вибрационной обработки на основе новой модели контактного взаимодействия, Improving the technique of optimizing vibration processing based on a new model of contact interaction, PhD thesis defended in 2002, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.
- [72] MATALIN A. A, Технологические методы повышения долговечности машин, Издательство ТЕХНИКА. Technological methods to increase the durability of machines, УДК 621.81:539.4, Edition ТЕХНИКА, 1971.

- [73] S. BAGEHORN, Application of mechanical surface finishing process for roughness reduction and fatigue improvement of additively manufactured Ti-6Al-4V parts, scientific article, International Journal of Fatigue, Vol.102, pp135-142, 2017.
- [74] БОУКО М. А, Повышение технологических характеристик абразивных гранул для вибро-абразивной обработки. Increasing the technological characteristics of abrasive granules for vibro-abrasive treatment. PhD thesis defended in 2000, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.
- [75] A. S. SHVEDOVA, D.V. KAZAKOV, Обеспечение надежности технологического процесса центробежно-ротационной отделочно-упрочняющей обработки. Ensuring the reliability of the technological process of centrifugal-rotary finishing and hardening processing, scientific article, Journal Inženernyj vestnik Dona, ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2616, N°14, 2014.
- [76] DEMKIN N. B, RYZHOV E.V, Качество поверхности и контакт деталей машин. Surface quality and contact of machine parts, УДК 621.81.004, Edition MASHENOSTROENIE, 1981.
- [77] КОМБАЛОВ. V. S, Влияние шероховатости Твёрдых тел на трение и износ. Influence of Roughness of Solids on Friction and Wear, УДК 620.178.162, Edition НАУКА, 1974.
- [78] LUKYANOV V.S RUDZIT Y.A, Параметры шероховатости поверхности. Surface roughness parameters, УДК 62-408.8:006.354, Edition Standards, 1979.
- [79] ТАМАРКИН МА, ТИШЧЕНКО Е. Е., ГРЕВЬОНКИН R.V., СТЕЛМАХ А.В. Исследование надежности процесса вибрационной отделочно-упрочняющей обработки деталей, Investigation of the reliability of the process of vibration finishing-strengthening processing of parts. УДК 621.048, pp78-80, Don State Technical University, Collection of papers on the materials of the International Scientific Symposium of mechanical engineers (Rostov-on-Don, September 14-17, 2016), Russia.
- [80] V.M. SCHUMACHER, Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Abrasive treatment processes, abrasive tools and materials, ISBN 978-5-98276-359-4, Edition VolgGASU, 2010.
- [81] ТАМАРКИН М.А, ТИШЧЕНКО Е.Е., ВЕРЧЕНКО А.Ю., ТРОИТСКИЙ V.M., СТЕЛМАХ А.М., ЧУКАРИНА N.A. Исследование возможности гидроабразивной резки листовых композиционных материалов Research of the possibility of hydroabrasive cutting sheet composite materials, Perspective directions of development of finishing and strengthening treatment and vibrowave technologies, Collection of works of the international scientific and technical conference dedicated to the 90th anniversary of the Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Honorary Professor of DSTU A.P. BABICHEV (Rostov-on-Don, February 27-28, 2018) УДК 621.048, pp14-16, Don State Technical University, Russia
- [82] ФРИДМАН Y. B, Механические свойства металлов. Mechanical properties of metals, УДК 620.17, Edition MASHENOSTROENIE, 1974.

[83] T.A. KHODJAEV, A.I. MIRZOALIYEV, Технология центробежной абразивной обработки сферических тел, Technology of centrifugal abrasive machining of spherical bodies, scientific article, journal Vestnik ISTU, T20, № 10, pp63–70, 2016.

[84] TIKHONOV AL. , TIKHONOV AN. A., BUDARAGIN A.P., Определение времени гидроабразивной обработки для изменения шероховатости поверхности, Determination of time of hydro-abrasive treatment to change the surface, perspective directions of development of finishing and strengthening treatment and vibrowave technologies, УДК 621.924.093, pp52-54, DSTU, Rostov on Don, Russia, 2018.

[85] V. A. SCRIBAN, Камерная обработка поверхности деталей незакрепленным шлифовальным материалом, Chamber treatment of the surface of details unlaved sanding, scientific article, journal Vestnik MRSU, T27, № 1, pp41–51, 2017.

[86] А. П. BABICHEV, P. D. MOTRENKO, Инструментальное обеспечение процессов обработки деталией в гранулированных средах. Tool support for the processing of parts in granular media, ISBN 978-5-7890-0644-3, Edition DSTU, 2011.

[87] NELIDIN, VLADIMIR VLADIMIROVICH, Повышение интенсивности процесса шпиндельной виброотделки деталей на основе уплотнения рабочей среды, Increasing the intensity of the process of spindle vibration finishing of parts based on the sealing of the working medium, PhD thesis defended in 2010, Don State Technical University, Rostov on Don, Russia.

[88] OSIPOV, ALEXANDER PETROVICH, Оптимизация процесса шлифования на основе целенаправленного формирования рабочей поверхности абразивного инструмента, Optimization of the grinding process based on the targeted formation of the working surface of the abrasive tool, PhD thesis defended in 1999, Samara State Technical University, Samara, Russia.

[89] TAMARKIN, M. A, Оптимизация процесса многоступенчатой обработки деталей свободными абразивами, Optimization of the process of multi-stage processing of parts with free abrasives, journal Vestnik, N11, pp15-19, 2001.

[90] CHERNYSHEV E. N, SHVEDOVA A. S, TISHCHENKO E. E. Повышение эффективности технологических процессов обработки деталей динамическими методами ппд, Improving the efficiency of technological processes of processing parts by dynamic methods, scientific article, MID Journal, N°4(13), pp156-161, 2018.

[91] М.А. ТАМАРКИН, Е.Е. ТИШЧЕНКО, V.G. LEBEDENKO, Повышение качества поверхностного слоя деталей при обработке поверхностным пластическим деформированием в гибких гранулированных средах. Improving the quality of a surface detail layer during surface plastic deformation in flexible granulated media, scientific article, Journal Vestnik DSTU, pp213-224, Т9.№(3)42, 2009

[92] F. HASHIMOTO, Modelling and optimization of vibratory finishing process, scientific article, Elsevier, CIRP Annals, pp303-306, vol.45, 1996.

[93] A.V. MITSYK, Возможности мультиэнергетической технологии отделочно-зачистной обработки и гибридного станка вибрационного и двойного центробежного динамического воздействия, Opportunities of multienergetic technology finishing and cleaning processing and hybrid vibration and double centrifugal dynamic exposure machine, scientific article, journal High technology in engineering, vol.1(26), pp62-68, 2016.

[94] KOMBALOV V. S, Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ, The effect of roughness on friction and wear, УДК620.178.162, Edition НАУКА, 1974.

[95] MURASHKIN, SERGEY VIKTOROVICH, Повышение эффективности процесса шлифования за счет правки шлифовальных кругов с применением ультразвуковых колебаний. Improving the efficiency of the grinding process by editing the grinding wheels using ultrasonic vibrations, PhD thesis defended in 2006, Tolyatti State University, Tolyatti, Russia.

[96] SAMODUMSKY YU. M, BABICHEV A.P., ZELENTSOV L.K, Конструирование и эксплуатация вибрационных станков для обработки деталей, Design and operation of vibration machines for machining parts, УДК621.9.048.6, Edition DSTU, 1981.

[97] BLUMENSTEIN, VALERY Y., Механика технологического наследования как научная основа проектирования процессов упрочнения деталей машин поверхностным пластическим деформированием. Mechanical technological inheritance as a scientific basis for designing the processes of hardening machine parts by surface plastic deformation, PhD thesis defended in 2002, Moscow State Technical University, Moscow, Russia.

[98] TAMARKIN M. A, VYALIKOV I.L., Особенности формирования шероховатости поверхности при виброабразивной ультразвуковой обработке, Features of forming roughness surface at vibroabrasive ultrasound treatment, УДК 621.048, pp11-18, International Scientific Symposium mechanical engineers and mechanics (Rostov-on-Don, Russia, October 7–10, 2014).

[99] М.А. ТАМАРКИН, G.A. PROKOPETS, V.N. AKSENOV, Проектирование механосборочного производства, Design of mechanical assembly production, ISBN 5-7890-0231-5, Edition DSTU, 2002.

[100] М.А. ТАМАРКИН, V.A. LEBEDEV, Проектирование технологии изготовления деталей, Designing manufacturing technology parts, ISBN 5-7890-0362, Edition DSTU, 2006.

[101] HAMOUDA Khaled, Технологические возможности и организационно-технические особенности применения вибрационной технологии в авторемонтном производстве. Technological capabilities and organizational and technical features of the use of vibration technology in car repair production, PhD thesis defended in 2001, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.

[102] КРОНА V. A, Кривые упрочнения металлов при холодной деформации. Hardening curves of metals during cold deformation, УДК3-12-3, Edition MASHENOSTROENIE, 1968.

[103] A.G. IGNATYEV, A.A. TRET'YAKOV, Повышение долговечности восстановленных деталей машин на основе управления остаточными напряжениями. Increased durability of reconditioned machine parts based on residual stress management, scientific article, Bulletin of the South Ural State University, vol.18, N1, pp58–67, 2018.

- **Sites internet**

[Int1] www.wikipedia.org, consulté en 2012.

[Int2] www.rosler.fr, consulté en 2011.

[Int3] www.abcsuisstech.com, consulté en 2010.

[Int4] www.gpi-tribofinition.fr, consulté en 2014.

[Int5] www.grana.fr, consulté en 2015.

[Int6] www.universalis.fr consulté en 2013