

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'Ingénierat
Département : Génie Mécanique
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Fabrication Mécanique et Productive

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Effet de la qualité de surface sur la tenue à l'usure par
abrasion – cas d'un acier allié au Cr Mo**

Présenté par : *BENARAB Mohamed*

Encadrant : LAOUAR Lakhdar *Professeur Université Badji Mokhtar-Annaba*

Jury de Soutenance :

AMIRAT Abdelaziz	Professeur	Université Badji Mokhtar- Annaba	Président
LAOUAR Lakhdar	Professeur	Université Badji Mokhtar- Annaba	Encadrant
BOUREBIA Mounira	Maitre de Recherche	CRTI-URASM -Annaba	Co-encadrant
BENGHERSALLAH Mohieddine	Professeur	Université Badji Mokhtar- Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

REMERCIEMENTS

*AVANT D'ENTAMER CE TRAVAIL, JE TIENS À REMERCIER **DIEU** LE TOUT PUISSANT DE M'AVOIR MUNI DE FORCE ET DE BONNE VOLONTÉ POUR ARRIVER À CE STADE DE MON CURSUS UNIVERSITAIRE.*

*UN GRAND MERCI À **MA FAMILLE** POUR LEUR CONTRIBUTION, LEURS SOUTIENS ET LEURS PATIENCES, JE TIENS À EXPRIMER MA GRANDE RECONNAISSANCE ENVERS EUX.*

*JE TIENS À REMERCIER MON PROFESSEUR **LAKHDAR LAOUAR** DE L'UNIVERSITÉ **BADJI MOKHTAR ANNABA** D'AVOIR ORIENTÉ MES RECHERCHES ET CROIRE EN MES CAPACITÉS AINSI QUE POUR SES ENCOURAGEMENTS, ET QUI N'A PAS HÉSITÉ À ME DONNER DE PRÉCIEUX CONSEILS.*

*J'EXPRIME AUSSI MA RECONNAISSANCE ET MES REMERCIEMENTS À MON CO-ENCADREUR, DOCTEUR **MOUNIRA BOUREBLA** POUR SON SOUTIEN DURANT MON PARCOURS.*

*JE TIENS À REMERCIER AUSSI DOCTEUR **BENGHERSALLAH MOHIEDDINE** ET PROFESSEUR **AMIRAT ABDELAZIZ** DU LABORATOIRE DE RECHERCHES DES TECHNOLOGIES AVANCÉES EN PRODUCTION MÉCANIQUE POUR M'AVOIR ACCUEILLI AFIN DE RÉALISER LES MESURES SUR ÉCHANTILLONS*

*MES REMERCIEMENTS VONT ÉGALEMENT À **TOUS MES PROFESSEURS** QUI ONT MIS TOUTES LEURS COMPÉTENCES À MA DISPOSITION, ET TOUT LE PERSONNEL TECHNIQUE ET ADMINISTRATIF DE DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE DE L'UNIVERSITÉ D'ANNABA.*

ENFIN, JE REMERCIE TOUS CEUX ET CELLES QUI DE PRÈS OU DE LOIN, ONT CONTRIBUÉ À LA RÉALISATION DE CE TRAVAIL.

MERCI.

Résumé

L'intérêt majeur des ingénieurs dans l'industrie est la réalisation des systèmes mécaniques de durées de vie et de fiabilité de fonctionnement les plus importantes possibles et cela par l'amélioration des performances des produits qui passent généralement par la réduction des tolérances dimensionnelles et géométriques offrant des états de surface plus réguliers.

Dans ce contexte, le travail entrepris dans ce projet concerne l'examen du comportement à l'usure par abrasion d'un acier allié au chrome molybdène, vis-à-vis de la qualité de surface produite par deux procédés de fabrication, en l'occurrence, le parachèvement sur tour et la finition par traitement mécanique de surface (TMS).

Le projet a été conduit au moyen des méthodes scientifiques basées sur une stratégie expérimentale permettant de déterminer dans un premier temps et par simulation à l'aide des plans d'expériences, les régimes de tournage offrant les variétés de rugosités à considérer. Dans un second temps, des échantillons ont été réalisés avec des surfaces à valeurs de rugosité élevées (maximale) et à valeurs de rugosité faibles (minimales), dont certains ont été traités par TMS ayant pour but la création d'une surface écrouie. Ces variétés de surfaces de différentes qualités ont été soumis au test d'usure par abrasion en fixant les paramètres (nature d'abrasif, charge, parcours et vitesse) sur une machine adaptée. Les résultats obtenus ont montré l'effet de la qualité de surface sur la tenue à l'usure du matériau considéré et qui sont en accord avec certains travaux dévoilant l'importance de la qualité de la surface dans le cas de la tenue à l'usure par abrasion.

Abstract

The major interest of engineers in industry is the realization of mechanical systems with the longest possible lifetimes and operating reliability and this by improving the performance of products which generally involve reducing dimensional and geometric tolerances. Offering more regular surface finishes. In this context, the work undertaken in this project concerns the examination of the wear behavior by abrasion of steel alloyed with chromium molybdenum, against the surface quality produced by two manufacturing processes, in occurrence, finishing on lathe and finishing by mechanical surface treatment (TMS).

The project was carried out by means of scientific methods based on an experimental strategy making it possible to determine initially and by simulation using experimental designs, the turning regimes offering the varieties of roughness to be considered. Secondly, samples were taken with surfaces with high (maximum) roughness values and low (minimum) roughness values, some of which were treated by TMS with the aim of creating a work-hardened surface. These varieties of surfaces of different qualities were subjected to the abrasion wear test by setting the parameters (type of abrasive, load, path and speed) on a suitable machine. The results obtained showed the effect of the surface quality on the wear resistance of the material considered and which are in agreement with certain studies revealing the importance of the surface quality in the case of resistance to wear. abrasion wear.

ملخص

إن الاهتمام الرئيسي للمهندسين في الصناعة هو تحقيق أنظمة ميكانيكية بأطول عمر ممكن وموثوقية تشغيلية ، وذلك من خلال تحسين أداء المنتجات التي تتضمن بشكل عام تقليل التفاوتات البعدية والهندسية. التي تقدم حالة سطح جيدة ومنتظمة.

في هذا السياق ، يتعلق العمل المنجز في هذا المشروع بفحص سلوك التآكل في سبيكة فولاذية ممزوجة بالكروم و الموليبدان، مقابل جودة السطح الناتجة عن عمليتي تصنيع ، في الحدوث ، والتشطيب على المخرطة والتشطيب عن طريق المعالجة الميكانيكية للأسطح (TMS).

تم تنفيذ المشروع بأساليب علمية قائمة على استراتيجية تجريبية تمكن من التحديد المبدئي ومن خلال المحاكاة باستخدام التصاميم التجريبية وأنظمة الدوران التي تقدم أنواع الخشونة التي يجب أخذها في الاعتبار. ثانياً ، تم أخذ عينات من الأسطح ذات قيم الخشونة العالية (القصى) وقيم الخشونة المنخفضة (الدنيا) ، والتي تم معالجة بعضها بواسطة TMS بهدف إنشاء سطح مقوى للعمل. خضعت هذه الأنواع من الأسطح ذات الصفات المختلفة لاختبار التآكل من خلال ضبط المعلمات (نوع المادة الكاشطة، والحمولة المطبقة، والمسار، والسرعة) على آلة مناسبة. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها تأثير جودة السطح على مقاومة التآكل للمادة المدروسة والتي تتفق مع بعض الدراسات التي تكشف عن أهمية جودة السطح في حالة مقاومة التآكل.

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	1
<i>CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE</i>	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition d'un état de surface	4
I.3 Relation entre qualité de surface (état de surface) et rugosité.....	4
I.4 Définition de la rugosité [2].....	5
I.5 Les principaux paramètres d'espacement	6
I.6 Importance de la topographie de surface (3D) [2]	7
I.7 Surface et tribologie.....	7
I.7.1 Introduction à la tribologie. [3]	7
I.7.2 Historique [4]	8
I.7.3 Éléments de la tribologie [4]	9
I.7.4 Surface tribologique :	9
I.8 L'usure	10
I.8.1 Introduction	10
I.8.2 Définition [6].	10
I.8.3 Les origines de l'usure.....	10
I.8.4 Phases de la vie d'un mécanisme.....	11
I.8.5-Relation entre le type de mouvement et matériaux en contact [3].....	11
I.8.6 Principaux modes d'usure des surfaces.....	12
I.8.6.1 Usure par adhérence	12
I.8.6.2 Usure par abrasion.....	13
I.8.6.3 Usure par érosion :	14
I.8.6.4 Usure par fretting	14
I.8.6.5 Usure par fatigue [3]	15
I.8.7 Coefficient d'usure (Archard - 1950).....	16
I.9 Le frottement	16
I.9.1 Synthèse sur le frottement [3].....	17
I.9.2 Frottement contact solide/solide	17
I.9.3 Frottement contact solide/fluide (milieu fluide)	20
I.10 Corrosion.....	21
I.10 .1.Introduction	21
I.10 .2 Définition de la corrosion.....	21
I.10 .3 Cause de la corrosion	22
I.10 .4 Classification de la corrosion.....	22

I.10 .4 .1 La corrosion chimique	22
I.10 .4 .2 La corrosion biochimique	23
I.10 .4 .3 La corrosion électrochimique.....	24
I.10 .5 Protection contre la corrosion	25
I.11 lubrification [3].....	25
I.11.1 Introduction	25
I.11.2 Types de lubrifiants.....	25
I.11.2.1-Huile.....	25
I.11.2.2-Graisse.....	26
I.11.2.3 Lubrifiants solides	26
I.11.3 Procédés de lubrification	26
I.12 - Rôle des plans d'expérimentation	27
I.12.1. Introduction	27
I.12.2 Principe de la Méthodologie des plans d'expériences	28
I.12.2.1 Aperçu historique	28
I.12.2.2 Présentation des plans d'expériences	29
I.12.2.3 Contexte et objectifs des plans d'expériences.....	29
I.12.2.4 Principe.....	30
I.13 Conclusion	31
 <i>CHAPITRE II : TECHNIQUE EXPERIMENTALES</i> 	
II.1 Introduction.....	32
II.2 Matériels et méthodes.....	32
II.2.1 Matériau	32
II.2.1.1 Composition chimique du matériau	32
II.2. 2 Procédé de tournage et de brunissage	33
II.2.2.1 Outil de coupe pour tournage	33
II.2.2.2 Dispositif de brunissage	34
II.2. 3 Essai d'usure par abrasion.....	34
II.3.3 les appareils des mesures	35
II.3.3.1 Mesure de la Dureté	35
II.3.3.2 Mesure de rugosité.....	35
II.3.3.3 Mesure de la Masse.....	35
II.4 Méthodologie expérimentale	36
II.5 Réalisation des expériences	38
II.5.1 Montage de la pièce.....	38
II.5.2 Choix des vitesses de coupe.....	39

II.5.3 Préparation des échantillons sur tour39

II.5.2 Mesure de la rugosité.....41

II.5.3 Mesure et traitement des données relatifs des pastilles.....41

II.5.5 Traitement par Box-Behnken42

II.5.6 Préparation des échantillons pour l'opération de brunissage43

II. 5.7 Traitement par brunissage43

II. 6 Conclusion45

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

III.1 Introduction.....46

III.2 Interprétation des résultats.....46

 III.2.1 Effet des paramètres de coupe sur la rugosité "Ra".....46

 III.2.2 Effet et interaction des paramètres du régime sur Ra.....47

III. 3 Comportement de la rugosité Ra à l'usure par abrasion.....48

 III. 3.1 cas des surfaces non déformées.....49

 III. 3.2 cas des surfaces déformées50

III.4 Conclusion.....51

Conclusion générale52

Références bibliographies..... 54

CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Les différents défauts de surface	4
I.2 a) L'écart arithmétique moyen "Ra" b) État de surface différents et l'écart moyen identique	5
I.3. Le coefficient de symétrie "Sk"	6
I.4 Le coefficient d'aplatissement "Ek"	6
I.5 Espacement entre pics "Rsm"	6
I.6 Comptage des pics "Pc"	7
I. 7 Schéma général de la tribologie	9
I.8 Surface tribologique.....	10
I.9 perte de matière en fonction de temps	11
I.10 Mécanisme d'usure par adhérence	12
I.11 a-usure à deux corps .b-usure à trois corps.....	13
I.12 coefficient d'aplatissement "Ek"	14
I.13 usure par fatigue	15
I.14 coefficient d'usure (Archard-1950)	16
I.15 Synthèse sur le frottement	17
I.16 Frottement de glissement.....	17
I .17(a, b, c, d)-Frottement de roulement	19
I.18 Frottement aérodynamique	20
I.19 Frottement visqueux	21
I. 20 Mécanisme de la corrosion atmosphérique	23
I.21 la corrosion bactérienne et corrosion dentaire.....	24
I.22 Corrosion humide d'un métal bivalent M dans un électrolyte	24
I.23 Aperçu historique	29
I.24 Système de boîte noire	30

CHAPITRE II : TECHNIQUE EXPERIMENTALES

II.1 Spectromètre à émission optique (Thermo Fisher).....	32
II.2 Tour 1k 62 N°00212.....	33
II.3. Outil de dressage (P20 16x16)	33
II.4 Dispositif de brunissage	34
II.5 SERVOCUT 301.....	34
II.6 Machine d'usure	34
II.7 Duromètre de type INDENTEC	35

II.8 Rugosimètres	35
II.9_Balance de typeKERN	36
II.10 Schéma de l'expérimentation	36
II.11 Organigramme de calcul	38
II.12 Montage de la pièce 1-mandrin, 2- pièce.....	39
I.13 Préparation les échantillons (a ,b,c)	41
I.14 Mesure de la rugosité	41
II.15 échantillons pour Traitement par brunissage.....	43
II.16 Principe de brunissage	43
II .17 opération du brunissage	44
II .18 Organigramme de la procédure expérimentale	45

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

III.1 Variation de "Ra" en fonction de "a" et "n" pour P=1mm.....	47
III.2. Evolution de la perte en masse des surfaces non déformées	49
III.3 Evolution de la perte en masse des surfaces déformées	50
III.4 Topographies des états de surface pour les différents régimes réalisés	50

CHAPITRE I : ÉTUDE BIBIOGRAPHIQUE

I.1 Relation entre le type de mouvement et matériaux en contact.....	11
I.2 Coefficients de frottement de glissement	18
I.3. Coefficient de traînée	20

CHAPITRE II : TECHNIQUE EXPERIMENTALES

II.1 Composition chimique	33
II.2 Caractéristiques du tour 1k 62.....	33
II.3. Régime d’essai d’usure	34
II.4 Matrice de Box Behnken pour trois facteurs Dispositif de brunissage.....	37
II.5 Régime de coupe	39
II.6 Facteurs codés en tournage	39
II. 7 Matrice d’expériences en tournage	40
II.8 Résultats expérimentaux lors du tournage (dressage).....	41
II.9_Traitement de la matrice d’expériences de la rugosité "Ra".....	42
II.10 Régime du brunissage	44

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

III.1 Tableau des valeurs de la perte en masse en fonction de parcours	48
III.2 Tableau de caractéristique des échantillons	48

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans l'industrie, les ingénieurs sont confrontés à la réaliser des produits de qualité, répondant à des durées de vie les plus importantes possibles, surtout dans des conditions de fonctionnement sévères. En effet, la longévité des pièces de machine est conditionnée par la qualité des surfaces fonctionnelles, qui sont le plus souvent exposées aux agressions par le milieu dans lequel ils travaillent. De ce fait, les fabricants doivent chercher les conditions d'usinages qui améliorent la précision et la qualité des produits des pièces usinées. Par conséquent, la recherche d'un régime de coupe optimale et son utilisation pendant l'usinage s'impose. Dans ce contexte et en premier lieu, notre projet porte sur l'emploi des méthodes scientifiques basées sur une stratégie expérimentale permettant de déterminer les régimes de coupe des pièces les plus adéquats permettant l'amélioration de la qualité des surfaces des produits. En effet, au cours de la mise en œuvre de la pièce, les surfaces sont le résultat des régimes de coupe choisies. Lors de leur fabrication, les surfaces présentent des irrégularités qui sont dues au passage de l'outil et aux vibrations de la machine-outil, ce qui se manifeste par des défauts de troisième et quatrième ordre, caractérisés par la rugosité. Ce dernier est un paramètre qui est contrôlé dès la conception des pièces. Le plus souvent la rugosité "Ra" constitue un paramètre pertinent et est considéré comme indicateur de la qualité de surface. Cette approche a été déjà testée dans des applications concrètes comme le contact inter aspérités où une modification de la topographie de surface due à l'usure ou au procédé d'usinage.

L'objectif de ce travail est :

- La détermination par une méthodologie expérimentale des régimes de coupe offrant des rugosités de surface en vue de réalisation des tests d'usure
- L'application du traitement mécanique de surface (TMS) ayant pour but la création d'une surface écrouie
- L'examen du comportement à l'usure vis-à-vis de la qualité de surface produite, tests et observation de l'effet de l'état de surface et la dureté superficielle sur la tenue à l'usure du matériau considéré : acier de construction.

Ce projet s'articule autour de trois chapitres qui sont organisés comme suit :

Dans le premier chapitre, est présentée une étude bibliographique mettant en relief la science de la tribologie, l'importance de l'état de surface dans les mécanismes, les effets des frottements, de l'usure ainsi que l'apport de la lubrification. La fin de ce chapitre est consacrée au rôle des plans d'expérimentation.

Le deuxième chapitre comprend une description du matériel utilisé dans le travail expérimental, essentiellement les machines, les équipements de caractérisation ainsi que l'appareillage de mesure. Les techniques expérimentales choisies ainsi que la méthodologie suivie, ont été présentés. La dernière partie de ce chapitre comprend la préparation des différents échantillons par tournage, leur traitement par brunissage et l'essai d'usure.

Le troisième chapitre regroupe le traitement des données relatives, la modélisation des réponses de sortie et l'interprétation des résultats obtenus. Dans la dernière partie de ce chapitre est présentée une explication sur le comportement à l'usure par abrasion des échantillons testés.

Le mémoire s'achève par une conclusion générale, des références bibliographiques.

جامعة باجي مختار - عنابة

CHAPITRE I

Etude bibliographique

Université Badji Mokhtar-Annaba

I.1 Introduction [1]

Le comportement et la durée de vie d'un système mécanique fonctionnant sous différentes sollicitations dépendent, souvent des caractéristiques des surfaces en contact en l'occurrence leurs propriétés massiques ou volumiques. La surface d'un corps solide représente la partie de ce solide qui le limite dans l'espace et le sépare du milieu environnant. Elle est prépondérante pour assurer des fonctions telles que la résistance aux frottements, à l'usure, à la corrosion, conduction thermique et électrique, résistance aux contraintes mécaniques, étanchéité statique ou dynamique etc.

Les surfaces mécaniques produites par des moyens techniques présentent toujours des irrégularités par rapport à la surface idéale. Pour les décrire en toute rigueur, il faudrait utiliser une fonction continue $z(x, y)$ donnant l'altitude de chaque point par rapport à la surface idéale.

Connaître l'influence de l'état d'une surface sur le fonctionnement d'une pièce et son comportement dans le temps nécessite une caractérisation de sa géométrie, macro, micro, voire même nano géométrie dans certains cas.

Seule la caractérisation des états de surface effectuée sur un profil est normalisée. Le développement des technologies et des équipements permet de disposer d'une représentation tridimensionnelle de la surface (topographie). Si cette approche est actuellement le moyen le plus fidèle pour caractériser une surface, elle n'est pas encore reconnue et son application n'est pas envisageable en production.

Les problèmes relatifs à la géométrie des surfaces se posent à trois niveaux :

- la conception : quel état de surface convient à la fonction à assurer et comment doit-on le spécifier sur un dessin technique ?
- la réalisation de la surface : quels moyens mettre en œuvre pour obtenir l'état de surface souhaité ?
- la mesure de la surface : quels moyens et quelles conditions de mesure pour vérifier que la surface correspond aux spécifications ?

Pour les concepteurs, l'amélioration des performances des produits passe généralement par la réduction des tolérances dimensionnelles et géométriques, ce qui permet implicitement d'obtenir des états de surface plus régulière. Cependant, le procédé d'obtention de telles surfaces est très onéreux. Par conséquent l'état de surface constitue un facteur important qui influe sur les performances d'un système mécanique, d'où le choix des paramètres à spécifier lors de la conception reste toujours un problème délicat. Le manque de connaissance des relations entre les fonctions d'une surface et les paramètres d'états de surface fait que le concepteur spécifie ses produits avec un nombre très restreint de paramètres, souvent les mêmes, par habitude.

I.2 Définition d'un état de surface

En mécanique, l'état de surface est un élément de cotation d'une pièce indiquant la fonction, la rugosité, la géométrie et l'aspect des surfaces usinées. Lors de l'usinage, l'étude de l'état de surface d'une pièce se limite souvent à l'écart géométrique représenté par les irrégularités. Ces derniers sont déterminés par l'écart de la surface réelle par rapport à la surface nominale, il est classé suivant quatre ordre (Figure I.1)[2]

- Ordre 1 : écarts de forme et de profil (rectitude, circularité, profil, ...) généralement mesurés sur l'étendue globale de la pièce inspectée ;
- Ordre 2 : erreur d'ondulation, généralement mesurée sur une longueur pré déterminée ;
- Ordre 3 : stries, sillons périodiques ou pseudopériodiques ;
- Ordre 4 : arrachement, marque de l'outil, fente, pique.

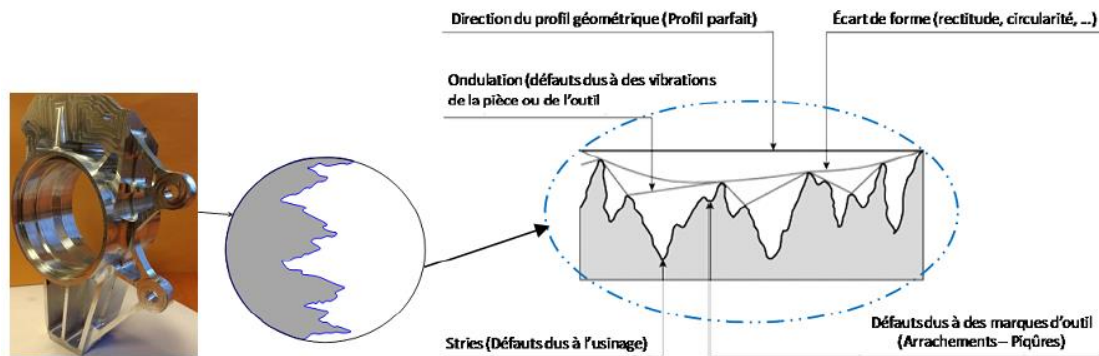


Figure I.1 Les différents défauts de surface [2]

I.3 Relation entre qualité de surface (état de surface) et rugosité

Dans le domaine mécanique, la qualité de surface (rugosité et texture) est un requis très important pour les pièces, spécialement dans des secteurs tel que l'aéronautique et l'automobile, ce requis est critique pour la fiabilité en fatigue. En effet, l'amorce des fissures est directement liée à la qualité de surface. Cette dernière joue un rôle très essentiel dans le fonctionnement et la durée de vie d'un système mécanique soumis au frottement et à l'usure. La surface peut donc, exiger une qualité particulière spécifiée par le concepteur, pour des raisons fonctionnelles (caractéristiques tribologiques) ou esthétique (lisse, brillante). Par conséquent l'état de surface usinée en l'occurrence la rugosité est une spécification de conception indispensable par laquelle la qualité technologique de la pièce usinée peut être évaluée. En effet elle a une grande influence sur la qualité des surfaces usinées et les propriétés fonctionnelles telles que la surface portante, les propriétés de frottement, résistance à l'usure et à la fatigue.

I.4 Définition de la rugosité [2]

Une surface quelque soit son procédé de fabrication n'est pas une surface parfaitement lisse selon la méthode d'usinage et les outils utilisés (Figure I.2), mais aussi selon le matériau, elle présente de nombreuses irrégularités micro-géométriques ou macro-géométriques. Ces irrégularités sont définies par rapport a une ligne "moyenne" et sont classées en deux catégorie : des aspérités ou "pics" et des cavités ou "creux". L'ensemble de ces défauts de surface constitue la rugosité. Elle peut être déterminée par la mesure d'un certain nombre de paramètres dont on peut citer :

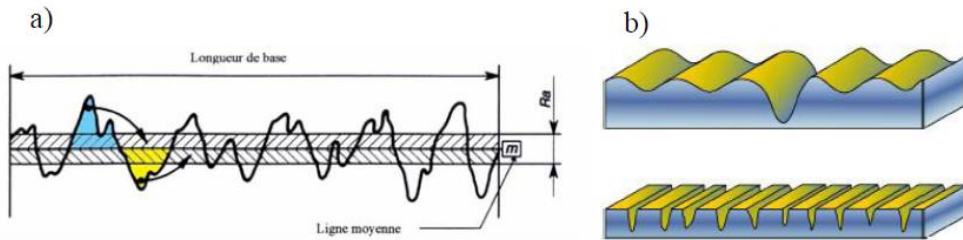


Figure I. 2 a) L'écart arithmétique moyen "Ra"
b) État de surface différents et l'écart moyen identique Ra = 2 µm

• Rugosité moyenne quadratique "Rq"

La moyenne quadratique des écarts de hauteur du profil "Rq" est la valeur moyenne quadratique des écarts du profil par rapport à la ligne de référence des moindres carrés à l'intérieur de la longueur de base, "Rq" est souvent appelé RMS (rootmean square). "Rq" est défini par l'équation (I.1) :

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L |Z^2(x)| dx}$$

• Le coefficient de symétrie "Sk"

Le coefficient de symétrie "Sk" (skewness en anglais) est défini sur la longueur d'évaluation, il correspond à la symétrie du profil par rapport à la ligne de référence et illustre la capacité portante ou la porosité du profil. Ce paramètre est important car il renseigne sur la morphologie de l'état de surface (Figure I. 3). Une valeur positive de "Sk" correspond à une surface présentant des pics et protubérances dépassant au-dessus de la surface, et donc une distribution décalée vers les points les plus bas, alors qu'une valeur négative correspond à une surface en plateau avec des rayures ou des pores profonds, et une distribution décalée vers les points les plus hauts. C'est donc un paramètre important pour caractériser les fonctions de contact ou de lubrification.

$$Sk = \frac{1}{Rq^3} \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N Zi^3$$

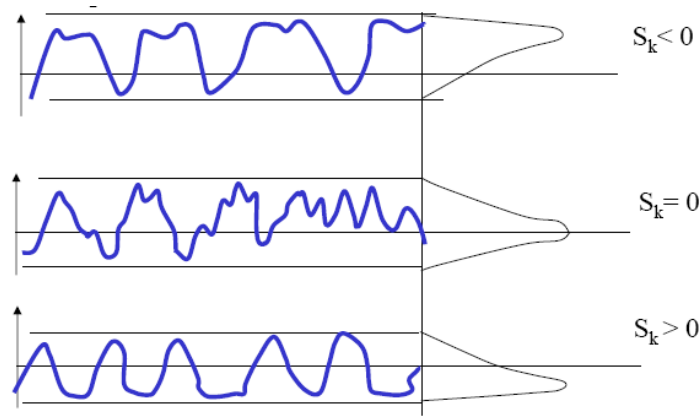


Figure I. 3 Le coefficient de symétrie "Sk"

• **Le coefficient d’aplatissement "Ek"**

Le coefficient d’aplatissement "Ek" (kurtosis en anglais) caractérise la largeur de la distribution des hauteurs défini sur la longueur d’évaluation (Figure I.4).

$$Ek = \frac{1}{Rq^4} \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N Zi^4$$

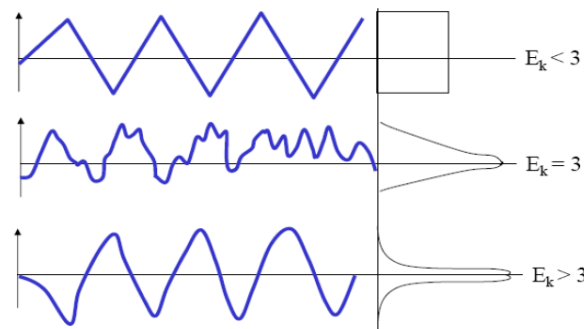


Figure I. 4. Le coefficient d’aplatissement "Ek"

I.5 Les principaux paramètres d’espacement

• l’espacement moyen entre pics du profil "Rsm" L’espacement moyen entre pics du profil "Rsm" représente la distance moyenne entre les pics qui interceptent la ligne moyenne mesurée sur la longueur d’évaluation (Figure I.5).Ce paramètre peut être calculé par la formule suivante :

$$Rsm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m XSi$$

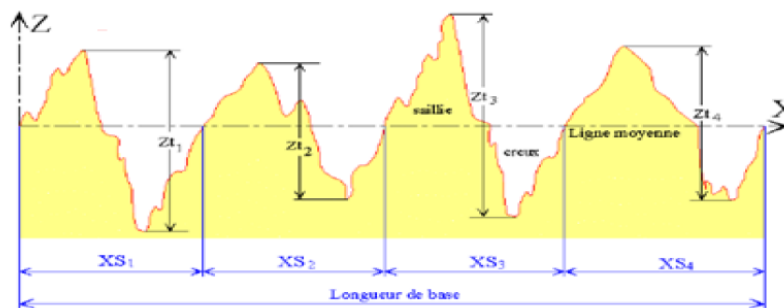


Figure I.5 Espacement entre pics "Rsm"

• le nombre des points hauts "Pc"

Le nombre de points hauts "Pc" compte les pics qui dépassent de part et d'autre d'une bande centrée sur la ligne moyenne (Figure I.6), il est exprimé en pics.cm-1.

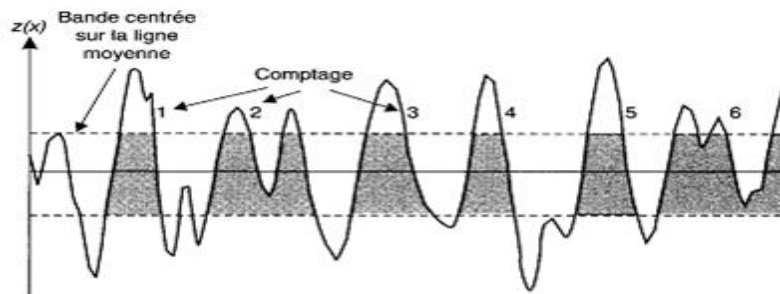


Figure I.6 Comptage des pics "Pc"

I.6 Importance de la topographie de surface (3D) [2]

La topographie agit sur la plus part des facteurs qui gouvernent le comportement au frottement et à l'usure notamment :

- Le mode de contact ;
- Comportement du milieu inter facial (3ème corps).

Elle doit prendre en compte toutes les irrégularités de surface dimensionnelles (hauteur des pics) géométriques (forme, acuité des aspérités ou cavité), mais aussi la répartition et l'orientation (préférentielle, aléatoire).

La connaissance de la topographie est primordiale pour déterminer les propriétés tribologiques d'une surface. En effet la quantification de l'usure en termes de changements dans la morphologie de la surface peut offrir une image plus détaillée du processus d'usure par rapport à une simple pesée D'où la topographie 2D traditionnelle a été remplacée par les techniques de mesure tridimensionnelle (3D) (paramètres surfaciques ISO 25178) ainsi la caractérisation des surfaces en 3D permet des interprétations faciles et intuitives. Avec un jeu de paramètres adéquats, il est possible de quantifier la fonctionnalité de la surface pour une application donnée.

I.7 Surface et tribologie

I.7.1 Introduction à la tribologie.[3]

Le mot tribologie, construit à partir des racines grecques tri bien, frotter et logos, discours, étude, à été proposé en 1968 par G.SALMON pour désigner la science qui étudie les phénomènes susceptibles de se produire lorsque deux corps en contact sont animés de mouvements relatifs, il recouvre, entre autre, tous les domaines du frottement, de l'usure et de lubrification.

La tribologie s'intéresse aussi aux diverses méthodes qui permettent d'améliorer le comportement des contacts. Aujourd'hui, l'étude de ses surfaces s'impose pour de nombreuses raisons :

- Assurer le bon fonctionnement et la fiabilité des machines,
- Diminuer le coût d'obtention des surfaces,
- Améliorer le rendement et la longévité des machines,
- Assurer la sécurité des biens et des personnes, particulièrement dans le domaine des transports,
- Contribuer à la santé publique et au confort, par exemple en diminuant les bruits, très nombreux, liés aux contacts mécaniques.

Ce sujet d'une rare universalité nous conduira à explorer de très nombreux aspects des sciences et des techniques tels que :

- Cristallographie, car il faut considérer les propriétés des microcristaux et de leurs arrangements pour former les couches superficielles des pièces,
- Physicochimie des surfaces, en particulier en ce qui concerne les propriétés et la composition des couches superficielles, la solidité de leur accrochage sur le substrat et leurs interactions avec les lubrifiants,
- Thermodynamique, car les phénomènes thermiques et en particulier les pics de température atteints lors des chocs d'aspérités influencent sur les comportements des surfaces en usure,
- Thermochimie, car ces hautes températures engendrent de nombreuses réactions chimiques dans les interfaces,
- Résistance des matériaux, en particulier dans le cas des contacts dits « ponctuels » ou « linéiques » qui peuvent être détruits non pas à cause des contraintes superficielles, mais par suite à la fatigue des sous-couches, à quoi il faut ajouter en vrac pressions de contact, usure, lubrification, matériaux, traitements thermiques, traitements de surfaces.

I.7.2 Historique [4]

- Les Egyptiens et les Assyriens lubrifiaient les patins de transport à l'huile de palme. Ils utilisaient aussi des rouleaux pour transporter des lourdes charges (les immenses blocs de pierre utilisés dans les pyramides.)
- Les Romains ont mis en évidence que les objets pouvaient s'user sous l'effet du frottement.
- Leonardo Davinci 1452-1519 : premières idées sur les concepts de base de friction.
- Amontons (1663-1705) et Coulomb (1736-1806) : énoncent la loi de frottement. Etudes de frottement sur des machines simples.
- John Garrett 1787 : brevet d'invention pour des systèmes de base de la conception des roulements.

- Heinrich Hertz 1881 : première étude mathématique dans l’analyse des surfaces.
- Firestone et Abbott 1933 : étude de la texture des surfaces (à l’aide de courbe portante Abbott- Firestone)

Bowden et Tabor 1950 : (la friction et la lubrification des solides) une explication physique des lois de frottement.

La tribologie est une science qui s’intéresse aux couples de pièces en contact lorsque les conséquences du frottement devenaient gênantes. Même une usure très faible peut influencer, de façon importante, le fonctionnement des systèmes. Il est possible de réaliser des études de la tribologie à partir du moment où l’on avait des outils suffisamment performants. Les moyens se sont développés depuis environ 30ans et continuent à évoluer (moyens d’analyse tribologique).

I.7.3 Éléments de la tribologie [4]

La tribologie étudie les phénomènes suivants :(voir figure I.6)

- Frottement,
- Usure
- Lubrification

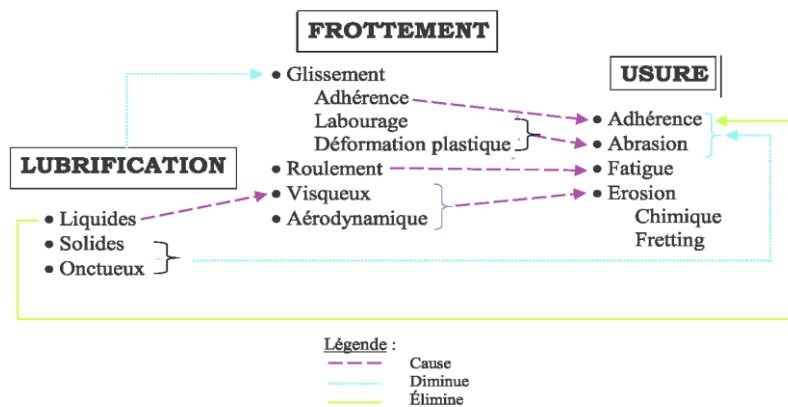


Figure I.7-Schéma général de la tribologie

I.7.4 Surface tribologique : (voir figure I.8)

La surface tribologique est amalgame comprenant des zones (couches) avec des propriétés physiques et chimiques dépendant de la composition du matériau et de l’environnement :

- Couche des molécules de (gaz, eau, gras)
- Couche d’oxyde
- Couche du métal de base

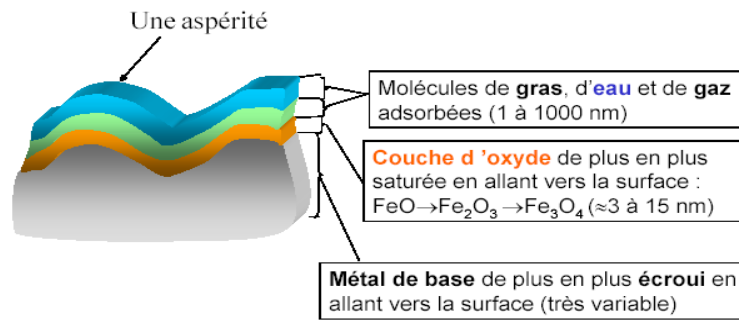


Figure I.8 - Surface tribologique

I.8 L'usure

I.8.1 Introduction [6]

Dans l'ensemble des secteurs industriels concernés par l'usure, plus de deux tiers, où les phénomènes rencontrés relèvent de la mécanique, dans ce domaine 30% des avaries sont imputable à l'usure. Liée aux déplacements de deux corps l'un par rapport à l'autre, l'usure se rencontre plus particulièrement sur toutes machines dont les fonctions utilisent les actions de contact : transmission des forces ou les mouvements entre les différentes parties constitutives, guidage en rotation ou translation, assemblage et étanchéité.

I.8.2 Définition [6].

On définit l'usure comme une détérioration d'une chose suite à l'usage qu'on en fait. L'usure est une conséquence du frottement, et se produit au niveau de la zone de contact.

Les paramètres influençant le taux d'usure sont :

- La force de contact
- La température
- L'aire de contact
- L'état physico-chimique des surfaces frottantes (la rugosité, les couches d'oxydes)
- La structure cristallographique et les propriétés mécaniques des matériaux (la dureté)
- L'absence ou la présence d'un lubrifiant
- La présence d'agents actifs en frottement (additifs anti usure)

I.8.3 Les origines de l'usure

- Les déformations plastiques
 - Les fissurations
 - Les transformations physico-chimiques des surfaces
 - Adhésion

I.8.4 Phases de la vie d'un mécanisme

Un mécanisme passe normalement par trois phases d'usure successives :

-l'ultime finition des surfaces lors du rodage : les actions sur les grosses aspérités diminuent avec le temps, les pics sont arasés progressivement tandis que les vallées restent intactes. Le taux d'usure et le facteur de frottement baissent, les portées s'améliorent, les films d'huile s'amincissent. Une nouvelle topographie remplace la rugosité originale de la pièce. Si l'usure se ralentit lors de la mise en fonctionnement, on constate une amélioration de l'état de surface, et réciproquement.

- vie utile correspond au régime d'usure douce : la couche superficielle très dure qui semble se former est éliminée peu à peu sous forme de petites écailles. L'usure douce diminue la rugosité, tandis que l'usure sévère l'accroît [5]

Enfin, la vieillissement se caractérise par une usure sévère qui aboutit à la mise hors d'usage.

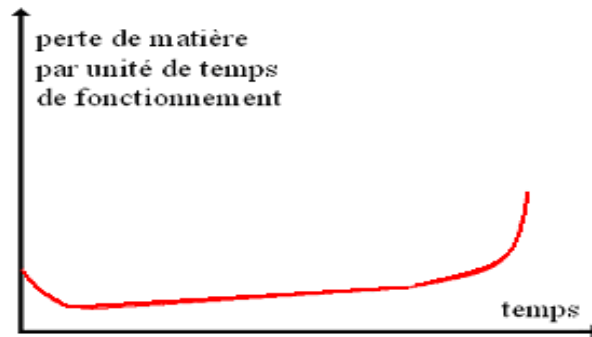
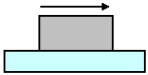
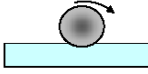
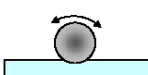



Figure I.9- perte de matière en fonction de temps

Les débris d'usure portent en eux l'histoire de leur formation et l'examen des particules de fer dans les lubrifiants, ou Ferro-graphie, apporte de précieuses informations. Les processus d'avarie produisent des particules atteignant 0.1 mm, mais les débris d'usure douce ont moins de 15 micromètres. Même après une vidange, il y a vite équilibre dans un lubrifiant entre la production des particules et leur élimination par décantation, filtration, rétention par un bouchon magnétique.

I.8.5-Relation entre le type de mouvement et matériaux en contact [3]

Tableau 1.1: Relation entre le type de mouvement et matériaux en contact

Matériaux en contact	Type de mouvement	Mécanisme d'usure
Solide/ solide	 Glissement	Adhérence Abrasion
	 Roulement	Fatigue
	 Oscillation	Fretting
Solide / fluide	 Écoulement	Érosion

I.8.6 Principaux modes d'usure des surfaces

I.8.6.1 Usure par adhérence

L'usure par adhérence est celle qui existe toujours en premier, même en absence d'abrasifs ou de produits d'usure. Elle se divise en deux classes :

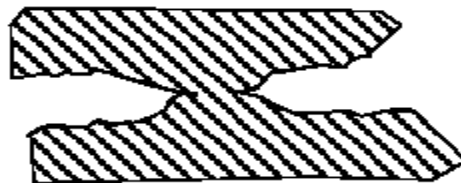
- l'usure douce (soft) qui produit des débris petits, plats, minces et formés principalement d'oxydes. L'usure douce laisse les surfaces lisses et polies, augmente la capacité de charge.
- l'usure sévère (hard) caractérisée par des débris grossiers, anguleux, nombreux, formés d'un mélange d'oxydes et du matériau de base et des surfaces résultantes rugueuses. L'usure sévère conduit éventuellement au grippage.

*Mécanisme d'usure par adhérence :

- Bris des films d'oxyde et déformation plastique de l'aspérité



- Formation d'un point d'adhérence



- Détachement d'une particule d'usure



Figure I .10- Mécanisme d'usure par adhérence

*Équation : FORMULE D 'ARCHARD

Le mécanisme d'usure par adhérence conduit à une équation d'usure de la forme :

$$V = k_u F_N L/H$$

k_u : coefficient d'usure F_N : effort normal

L : distance parcourue V : volume usé (mm³) H : dureté du matériau le plus mou

Pour limiter l'usure par adhérence il faut :

- Utiliser des surfaces dures
- Favoriser le profil adéquat

- Utiliser des charges raisonnables pour la dureté et le fini (par expérience ou calcul de l'aire de la surface portante)
- Favoriser la formation des films d'oxydes (vitesses raisonnables)
- Utiliser des matériaux tribologiquement compatibles
- Les facteurs d'usure servent à comparer des situations semblables (Tribologie Data Hand book, E.R .Booser , Press , 1997)
- Pour les matériaux durs et fragiles tels les céramiques, il faut limiter la charge à une valeur que l'on appelle la charge critique
- Pour les polymères, la résistance à l'usure est inversement proportionnelle à la ténacité que l'on peut associer à la déformation à la rupture.

I.8.6.2 Usure par abrasion

Le mécanisme d'usure par abrasion suit naturellement celui par adhérence aussitôt qu'il y a formation de débris d'usure.

C'est le mécanisme d'usure prévalant dans toutes les machines, le plus sévère et celui qui cause le plus de perte de matériau.

L'usure par abrasion peut se faire à deux corps ou à trois corps : (voir figure I.11 a et b)

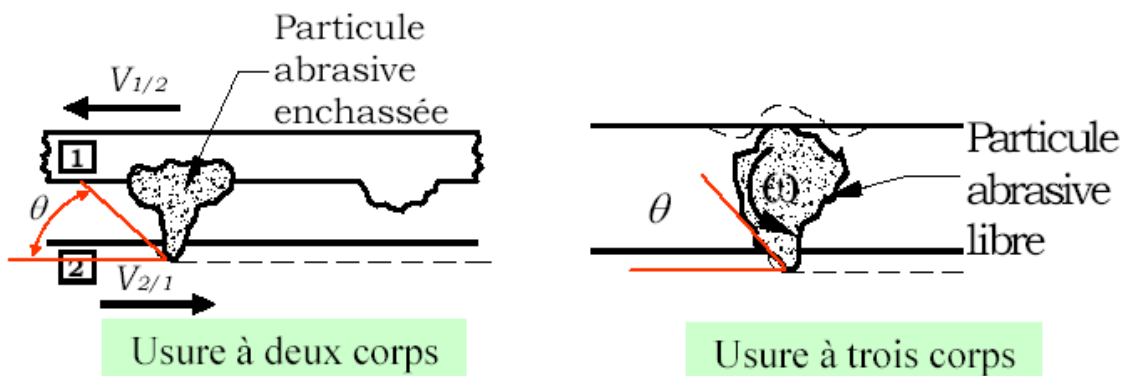


Figure I.11.a-usure à deux corps

Figure I.11.b-usure à trois corps

*Équation : FORMULE D'ARCHARD

Le mécanisme d'usure par abrasion conduit à une équation d'usure de la forme :

$$V_a = k_{u1} k_{u2} L F_N / H$$

Où k_{u1} est identique au coefficient d'usure par adhérence et k_{u2} est fonction de l'angle des particules abrasives : $k_{u2} = \pi / 2 \tan \theta$

Pour la plupart des particules, θ est petit et de l'ordre de 5° à 10°

***Pour limiter l'usure par abrasion il est nécessaire que :**

- La dureté des surface est primordiale : on veut que $H_s / H_a \geq 1,2$

H_a est la dureté de l'abrasif

H_s est la dureté de la surface

- Il faut favoriser l'élimination des débris d'usure en prévoyant des micro-canaux dans la surface ou en utilisant des surfaces avec des vallées profondes ($S_k > 0$ ou $E_k > 3$).

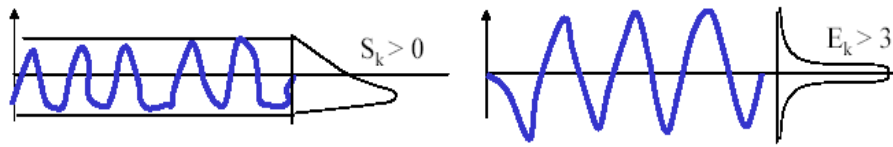


Figure I.12

I.8.6.3 Usure par érosion :

L'usure par érosion résulte de l'enlèvement de matière par un fluide chargé de particules en contact avec la surface d'un matériau ; elle conduit à la création d'impacts et de rayures sur les surfaces. Dans les applications mécaniques, ce type d'usure intervient notamment sur les systèmes soumis à un flux de produit liquide ou pâteux chargé d'abrasif et circulant à vitesse élevée.

***Limiter l'usure par érosion**

- La dureté des surface est primordiale : on veut que $H_s / H_a \geq 1,2$
- Limiter l'énergie de la particule avec les matériaux fragiles.
- Utiliser des matériaux tenaces ; une mesure de la ténacité est la déformation ϵ_u à la rupture.

I.8.6.4 Usure par fretting

Le fretting est un endommagement par petits débattements (oscillations de faibles amplitudes), il se produit entre deux surfaces au contact. L'usure apparaît sur les matériaux métallique et non métallique. Le fretting concerne toutes les industries et installations industrielles : aéronautiques, biomédicales, industries nucléaires, génie civile et les constructions mécaniques etc.

On peut distinguer :

- Fretting wear : si on a des vibrations externes appliquées à des surfaces qui ne sont pas soumises à des déplacements imposés, il se produit de faibles débattements.
- Fretting corrosion : la corrosion est une conséquence, et non une cause du dommage. Les produits de la dégradation sont des oxydes (corrosion en contact)
- Fretting fatigue : on utilise ce terme lorsque des phénomènes de fatigue se produisent au niveau des contacts sous l'effet de sollicitations cycliques.

Les dommages identifiés sur les surfaces sont:

Les piqûres, les oxydes et les débris, les rayures, les transferts, la déformation plastique, la fissuration en sous-couche, les cratères, la fissuration en surface. Les paramètres qui influencent le comportement des matériaux en fretting sont :

- l'amplitude de débattement
- la charge appliquée

- la température en contact
- la fréquence
- l'environnement
- les matériaux en contact
- le nombre de cycles

***Limiter l'usure par fretting**

L'usure par fretting se produit dans les montages serrés ou entre les pièces de machines au repos.

Dans les montages serrés, il faut s'assurer que le serrage est suffisant pour prévenir le mouvement entre les pièces jointes, comme dans les joints boulonnés ou les montages à interférence. Dans les machines au repos, il faut laisser un film de lubrifiant entre les pièces pour éviter l'adhérence au contact.

I.8.6.5 Usure par fatigue [3]

Les contraintes générées en frottement peuvent créer des fractures. Pour des matériaux ductiles on a l'usure par fatigue superficielle, ou la délamination. Les écailles se forment dans les zones de frottement, ainsi cette détérioration se trouve dans le cas des roulements à billes. Pour des matériaux fragiles les fractures se produisent dans les zones de fortes contraintes de tension. Les fractures sont perpendiculaires à la surface.

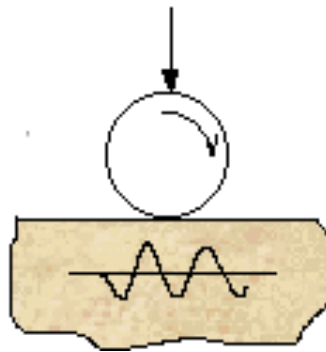


Figure I.13-usure par fatigue

***Limiter l'usure par fatigue :**

L'usure par fatigue est inévitable en effet tous les matériaux cristallins ont des défauts de structure susceptibles d'engendrer des fissures qui conduisent inéluctablement à la fatigue. Le phénomène est aussi fortement lié à la probabilité qu'un défaut qui se trouve au bon endroit pour développer une fissure. Pour limiter l'usure par fatigue, il faut :

- Limiter la charge : Les manufacturiers de roulements appellent cette charge, la limite de fatigue ; elle est en général 20 fois plus faible que la charge normale.
- Utiliser des matériaux très purs, ayant peu de défauts
- Fermer les fissures de surface (par grenailage par exemple)

I.8.7 Coefficient d’usure (Archard - 1950)

Les valeurs des coefficients d'usure pour des métaux et des non métaux[5].

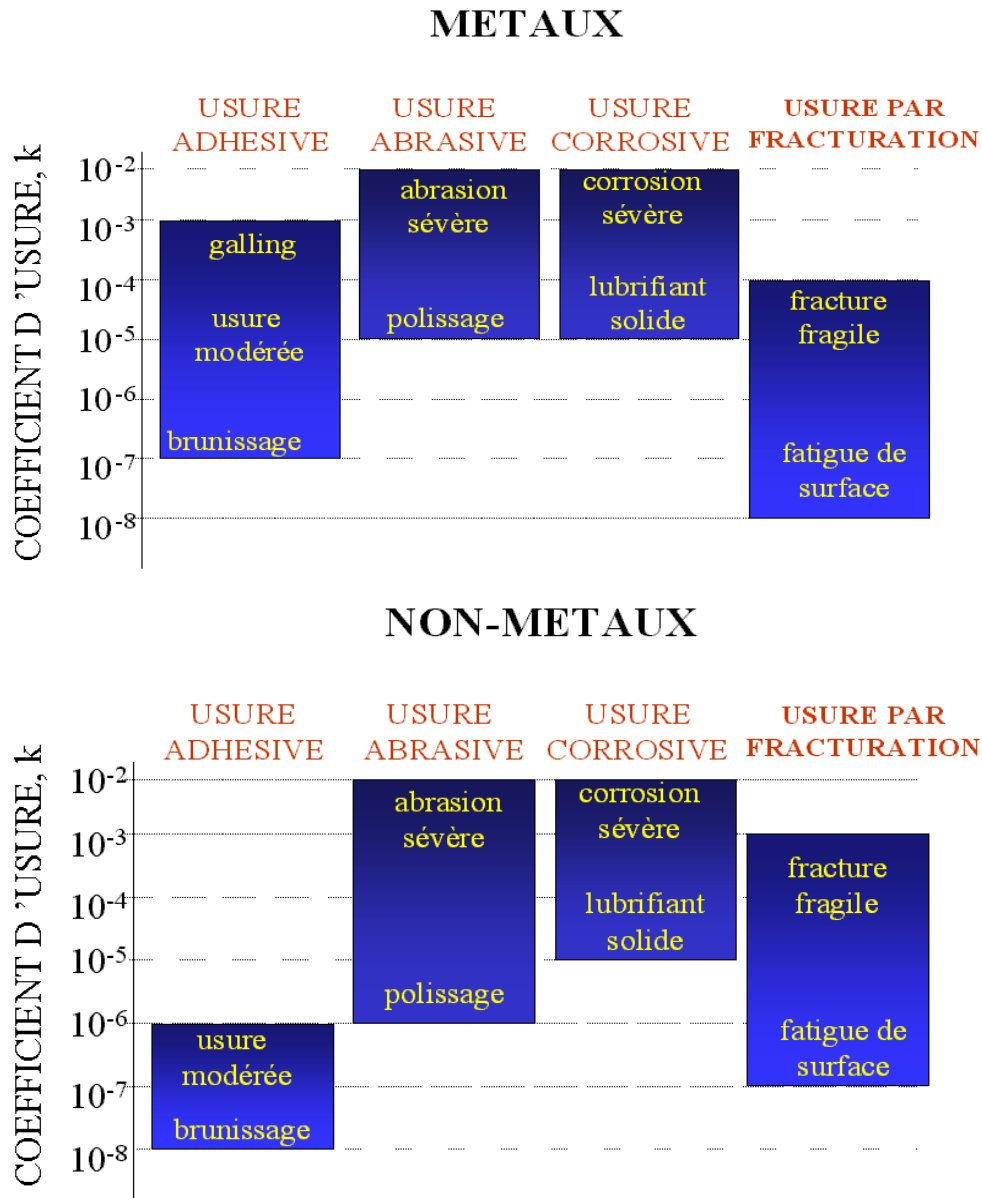


Figure I 14- coefficient d’usure (Archard-1950)

I.9 Le frottement [6]

Le frottement est omniprésent dans la vie quotidienne : par exemple lorsqu’on marche, démarre une voiture, qu’on freine. Dès les débuts de l’humanité, on a été préoccupé par le frottement :

- Invention de la roue.
- Tombes égyptienne : construction des pyramides.

Lorsque deux corps en contact se déplacent, il existe une force de frottement qui s’oppose au glissement [.On peut définir le coefficient de frottement, Cf, comme le rapport de force tangentielle Ft sur la force normale supportée par le contact FN:

$$Cf = Ft / FN$$

Le coefficient de frottement peut être :

- Statique : correspond à l'effort tangentielle nécessaire à crée la mise en mouvement.
- Dynamique : correspond à l'effort tangentiél nécessaire pour entretenir le mouvement.

On considère la force et le coefficient de frottement comme des grandeurs qui dépendent de la nature des deux corps en contact :

- Déformation plastique ou abrasion.
- Cisaillement d'un film inter facial.
- Cisaillement des jonctions adhésives.

I.9.1 Synthèse sur le frottement [3]

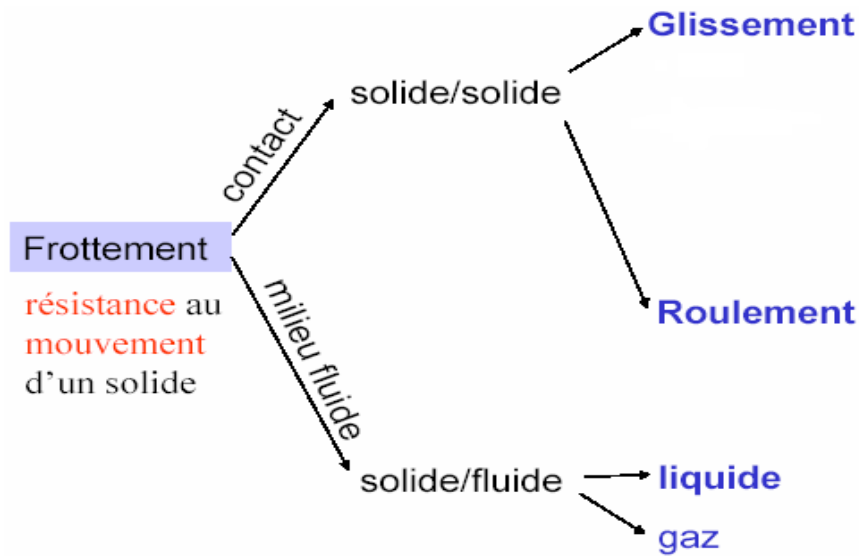


Figure I 15 Synthèse sur le frottement

I.9.2 Frottement contact solide/solide

a) Frottement de glissement

Elle se résume sous forme de deux lois :

- la force de frottement est indépendante de l'aire apparente de contact.
- la force de frottement est proportionnelle au poids du corps déplacé sur le plan horizontal et plus généralement à la charge normale appliquée à la surface (Voir figure 1.8).

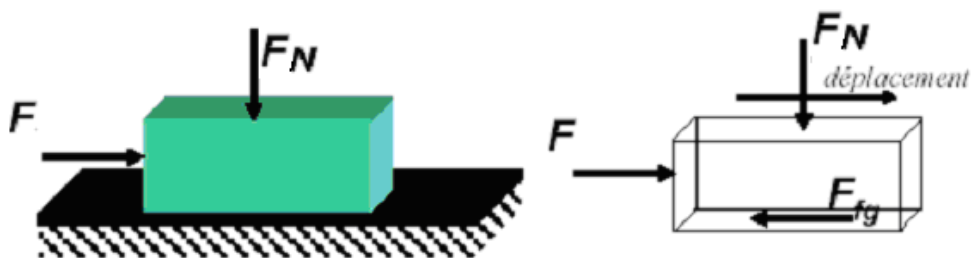


Figure I 16-Frottement de glissement

Avant le début du déplacement, $F \leq F_{fg}$

Après le début du déplacement, $F = F_{fg}$

Le coefficient de frottement de glissement est défini par :

$$C_f = F_{fg} / F_N$$

Pour minimiser le frottement de glissement il faut :

- utiliser des matériaux incompatibles
 - favoriser la formation de films de surface à faible cisaillement comme les films d'oxyde, de matières organiques adsorbées ou à base de matériaux de faible résistance (graphite, PTFE , MoS₂)
 - favoriser la formation de films d'oxyde à la surface par une élévation modérée de température ou l'ajout de matières oxydantes
- * Coefficients de frottement de glissement pour quelques combinaisons de matériaux usuels :

Tableau I.2 : Coefficients de frottement de glissement [3]

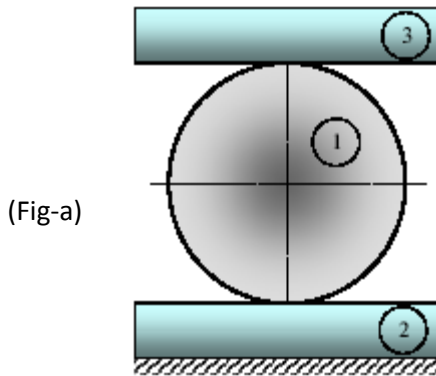
Matériau 1	Matériau 2	Statique	Dynamique
Acier doux	Acier doux	0,75	0,57
Acier doux	Fonte	-	0,23
Acier doux	Al	0,60	0,47
Acier doux	Bronze	0,50	0,45
Acier durci	Acier durci	0,78	0,42
Acier durci	Régule	0,40-0,70	0,35
Téflon	Téflon	0,10	0,05
Téflon	Acier	0,05	0,05
Fonte	Fonte	1,1	0,15
Fonte	Bronze	-	0,20
Al	Al	1,1	1,4
Diamant	Diamant	0,15	-
Diamant	Acier	0,10	-
Nylon	Acier	-	0,2
Nylon	Nylon	-	0,2
Polystyrène	Acier	-	0,30
Polystyrène	Polystyrène	-	0,50
Verre	Acier	-	0,60
Verre	Verre	-	1,0
Carbone	Acier	-	0,15
Carbone	Carbone	-	0,20
Graphite	Acier	-	0,10
Chêne	Chêne ⁽¹⁾	0,60	0,48
Chêne	Chêne ⁽²⁾	0,55	0,30
Chêne ⁽¹⁾	Cuir	0,60	0,50
Cuir	Fonte	-	0,55
Caoutchouc	Acier	-	0,30
Caoutchouc	Caoutchouc	-	0,43

(1) Parallèle au grain; (2) Perpendiculaire au grain

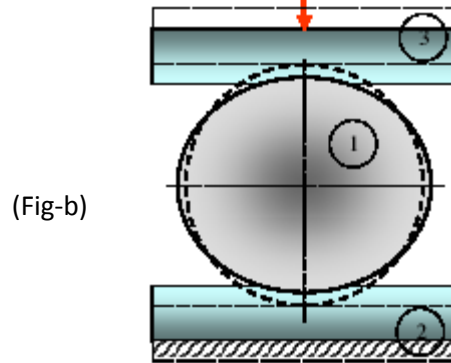
b) Frottement de roulement

Dans les corps en roulement, il existe toujours un frottement de glissement qui résulte de l'adhérence, sinon il n'y aurait pas de roulement voir figure (I .17 a, b, c, d)

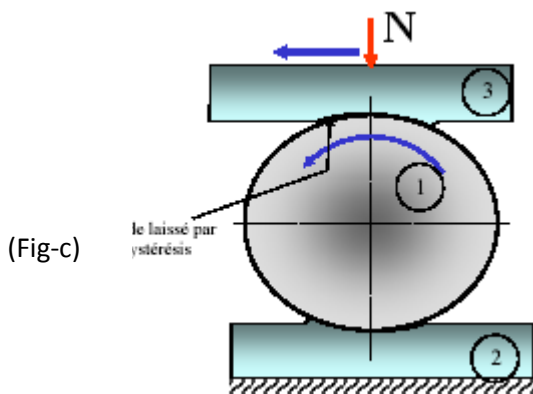
1- Une sphère entre deux plans :
charge extérieure nulle.



2- On ajoute une charge extérieure N :
la sphère et les plans se déforment



3- On impose un mouvement au plan supérieur
1) à l'avant de la sphère, un bourrelet se forme;
2) à l'arrière, il reste un vide dû à l'hystérésis



4 - Le vide laissé par l'hystérésis est comblé avec le temps par recouvrement élastique

Ici, le phénomène est montré dans une coupe verticale, mais il se produit sur l'ensemble de la sphère.

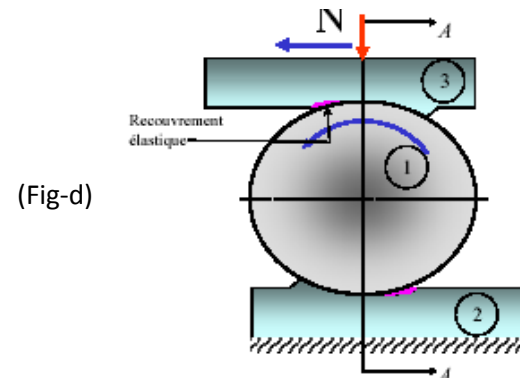


Figure I .17(a, b, c, d)-Frottement de roulement [6]

***Minimisation du frottement de roulement**

Pour minimiser le frottement de roulement :

- Utiliser des éléments roulants de grand rayon
- Utiliser des matériaux avec un grand module de Young
- Lubrifier le contact (pour diminuer coefficient de frottement)

I.9.3 Frottement contact solide/fluide (milieu fluide)

a) Frottement aérodynamique

Le frottement aérodynamique est la force résultante F_{fd} qui s'oppose au mouvement d'un corps solide d'aire apparente A_a qui se déplace dans un fluide à une vitesse V (voir figure I.18).

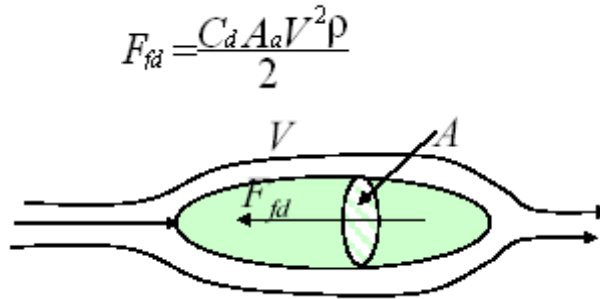


Figure I.18-Frottement aérodynamique

C_d est le coefficient de traînée, qui est fonction du nombre de Reynolds et de la forme du corps solide, A_a est l'aire projetée perpendiculaire au mouvement (m^2) et ρ est la densité du fluide (Kg/m^3)

*Coefficient de traînée de corps solides de diverses formes dans l'air :

Tableau I.3 Coefficient de traînée

FORME	COEFFICIENT DE TRAÎNÉE, C_d
Carré ou plaque circulaire	1,2
Cylindre circulaire $L/D = 6$ (longitudinalement)	0,8
Cylindre à bouts arrondis ($L/D = 6$)	0,2
Ellipsoïde (longitudinalement)	0,06
Hémisphère (arrondi en amont)	0,4
Hémisphère (plat en amont)	1,3
Angle structural (angle commun en amont)	1,5
Profil d'aile ($A = \text{corde} \times \text{envergure}$)	$\sim 0,02^{2 \text{ ou } 3}$
Fuselage ($L/D = 5$ et $A = \text{total}$)	0,05
Nacelle ou flotteur	0,07
Parachutiste ou skieur en saut ($A = 8 \pi^2$)	1,0
Motocycliste ou passager ($A = 6 \pi^2$)	0,9
Automobiles (approximations)	
- décapotable ouverte	0,9
- sedan ou coupé	0,5
- voiture profilée	0,25
Autobus ou véhicule sur rails	0,5
Locomotive ou voiture fuselée	0,4
Train profilé (court)	0,15
Voiture dans un train	0,15

b) Frottement visqueux

Il y a présence d'un film fluide entre les surfaces en mouvement ; ce film peut être créé artificiellement par injection du fluide entre les deux surfaces en mouvement, à l'aide d'une pompe (lubrification hydrostatique). ou peut s'établir spontanément sous l'effet du mouvement si la géométrie de surface. Les vitesses relatives et la viscosité du fluide le permettent (lubrification hydrodynamique). (Voir figure I.19)

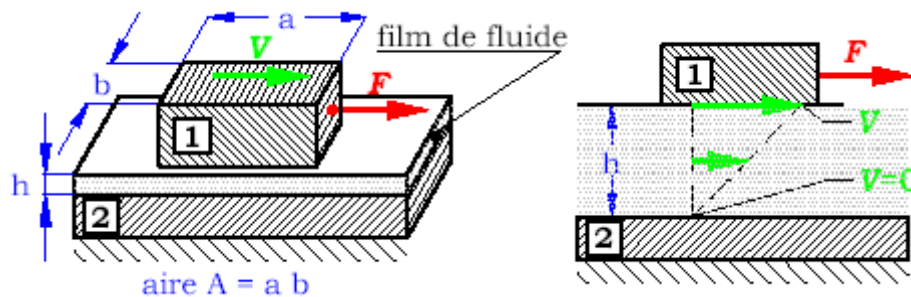


Figure I.19- Frottement visqueux [6]

I.10 Corrosion [13]**I.10 .1.Introduction**

La corrosion est le phénomène suivant lequel les métaux ont tendance, sous l'action d'agents atmosphériques ou de réactifs chimiques, à retourner à leur état original d'oxyde, carbonate, plus stable par rapport au milieu considéré, et ainsi à subir une détérioration de leurs propriétés. Le problème de la corrosion a pris de nos jours une importance considérable, étant donnée l'utilisation importante des métaux et alliages dans la vie moderne. L'étude de la corrosion se situe à croisée de divers domaines : Électrochimie, physique du solide, métallurgie, chimie, physique, thermo dynamique. Outre son intérêt scientifique interdisciplinaire, elle répond à un enjeu industriel important.

I.10 .2 Définition de la corrosion

La corrosion est le phénomène d'interaction entre un métal ou alliage métallique et son environnement et qui entraîne une détérioration des propriétés utiles du métal permettant ainsi un retour à la situation stable de sulfure, d'oxyde qui était la sienne avant les opérations d'élaboration et d'extraction. Les composés non métalliques ne sont pas inclus dans la présente définition, les plastiques peuvent être gonflé ou craqué, le bois peut se fondre ou s'ouvrir, le granit peut s'éroder et

le ciment portland peut se lessiver mais le terme corrosion est ici limité à l'attaque chimique des métaux.

Le nom « corrosion » vient du latin « corroder » qui signifie ronger ou attaquer. En effet, la corrosion est une dégradation du matériau ou de ses propriétés (physicochimiques, mécaniques, etc.) par interaction chimique avec le milieu environnant. Cette définition admet que la corrosion est un phénomène nuisible car il détruit le matériau et réduit ses propriétés, le rendant inutilisable pour une application prévue. Mais d'un autre point de vue la corrosion est un phénomène bien venu, voir souhaité, car elle détruit et élimine un nombre d'objets abandonnés dans la nature. Certains procédés industriels font également appel à la corrosion (anodisation de l'aluminium, polissage électrochimique, etc).

I.10 .3 Cause de la corrosion

Les causes de la corrosion sont complexes et varient selon les industries. Voici quelques exemples propres à des industries spécifiques :

- Dans la construction, la corrosion se produit souvent en raison de l'exposition des métaux aux éléments extérieurs et à des températures extrêmes.
- L'exploitation minière souterraine se caractérise par un milieu aquatique acide (souvent riche en chlorures et sulfates), combiné à une humidité et à des températures élevées.
- Dans l'industrie forestière, la corrosion se manifeste fréquemment dans des endroits éloignés : l'équipement étant stationné sur l'herbe ou sur le sol est exposé à une grande quantité d'humidité pendant la nuit. Cela risque de corroder les systèmes mécaniques et les composants intégrés. Les conditions environnementales influent également sur les taux de corrosion et la propagation. En présence d'humidité, les métaux se corrodent beaucoup plus rapidement qu'ils ne le feraient dans des conditions sèches.

Un environnement corrosif se caractérise par un ou plusieurs éléments suivants :

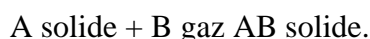
- Humidité
- Températures extrêmes
- Humidité de surface
- Particules en suspension dans l'air
- Sel
- Lubrifiants industriels

I.10 .4 Classification de la corrosion

I.10 .4 .1 La corrosion chimique

Il s'agit d'une réaction hétérogène entre une phase solide (le métal) et une phase gazeuse. Le processus d'oxydoréduction de la corrosion chimique se déroule dans le domaine atomique avec le

milieu ambiant sans présence d'électrolyte. Donc la corrosion purement chimique ne fait donc pas intervenir le passage d'un courant électrique, un flux électronique cesse, car l'échange d'électrons entre les différents partenaires de réactions s'effectue directement. L'air renferme l'oxygène, de la vapeur d'eau et des vapeurs acides (anhydride carbonique CO₂ et sulfureux SO₂, hydrogène sulfureux HS etc.) ce sont les agents corrosifs mais le plus souvent c'est le CO₂. On admet que la formation de la rouille est alors la résultante de l'action de tous ces corps, mais il faut qu'un acide soit présent, même en protection faible pour que l'attaque puisse se produire. L'attaque du métal par une réaction chimique avec le milieu ambiant sans intervention du courant électrique nécessite généralement des températures élevées, la réaction qui se produit est de la forme :



Il est très difficile de donner des exemples de corrosion purement chimique, puisque le plus souvent elle est accompagnée de corrosion électrochimique. On peut considérer comme corrosion chimique l'attaque d'un métal par un autre métal liquide (Hg), par un seul fondu ou par une solution aqueuse (Al dans CCl₄) l'exemple de la corrosion sèche en atmosphère oxydante à haute température.

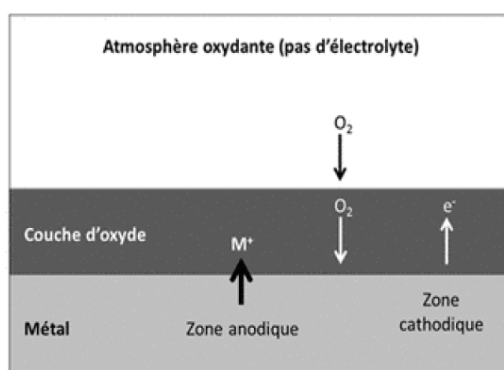


Figure I-20 : Mécanisme de la corrosion atmosphérique : exemple de la corrosion d'un collecteur d'échappement.

I.10 .4 .2 La corrosion biochimique

C'est l'attaque bactérienne des métaux en particulier dans les canalisations enterrées. Le mécanisme de ce mode de corrosion peut être de plusieurs types.

- a. Chimique par production de substances corrosives telles que CO₂, H₂S, H₂SO₄, NH₃ ou D'un acide organique, le cas le plus répandu est celui rencontré dans les canalisations enterrées et déterminé par la formation d'acide sulfurique qui attaque le métal.
- b. Certaines bactéries peuvent réduire les sulfates par l'intermédiaire d'hydrogène.



L'hydrogène provient par exemple des régions cathodiques, il y a donc dépolarisation des cathodes et formation accélérée de Fe^{2+} aux anodes.



c. Dans certains cas, on peut observer sur les canalisations des dépôts adhérents résultant de l'attaque, non pas du métal lui-même, mais celle de certains constituants du milieu ambiant par des bactéries. Il en résulte la formation de piqûres sur le métal, à l'endroit où s'est produit le dépôt, suivant un processus de corrosion par différence de concentration en oxygène.

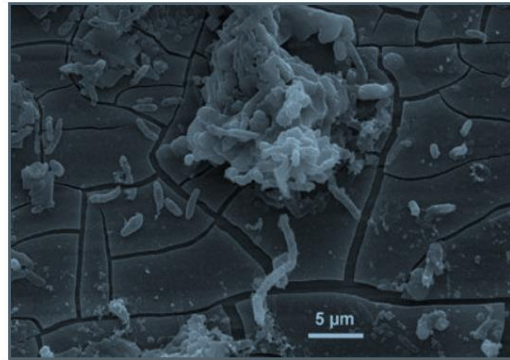


Figure I-21 : Exemple de bactéries responsable de la corrosion bactérienne et corrosion dentaire.

I.10 .4 .3 La corrosion électrochimique

La corrosion électrochimique, appelée encore corrosion humide, est le mode de corrosion le plus important et le plus fréquent. Elle réside essentiellement dans l'oxydation du métal sous forme d'ions ou d'oxydes. La corrosion électrochimique fait appelle à la fois à une réaction chimique et un transfert de charges électriques (circulation d'un courant). Cette corrosion nécessite la présence d'un agent réducteur (H_2O , O_2 , H_2 , etc.), sans celui-ci la corrosion du métal ne peut se produire. La corrosion électrochimique d'un matériau correspond à une réaction d'oxydo-réduction, dont :

- la réaction d'oxydation d'un métal est appelée réaction «anodique»,
- la réaction de réduction d'un agent oxydant est appelée réaction «cathodique».

Dans la corrosion électrochimique, la réaction cathodique et la réaction anodique sont indissociables.

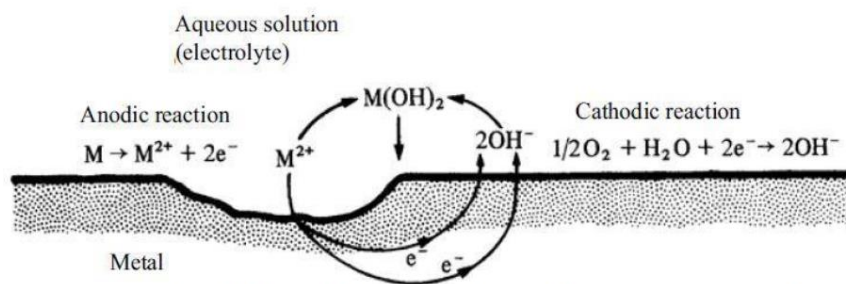


Figure I-22 : Corrosion humide d'un métal bivalent M dans un électrolyte qui contient l'oxygène

I.10 .5 Protection contre la corrosion

La prévention de la corrosion doit être envisagée dès la phase de conception d'une installation. En effet, des mesures préventives prises au bon moment permettent d'éviter de nombreux problèmes lorsqu'il s'agit de garantir une certaine durée de vie à un objet, notamment pour des industries telles que le nucléaire, l'industrie chimique ou l'aéronautique, où les risques d'accident peuvent avoir des conséquences particulièrement graves pour les personnes et l'environnement. La lutte contre la corrosion englobe plusieurs méthodes :

- Prévention par une forme adaptée des pièces métalliques,
- Prévention par un choix judicieux des matériaux,
- Protection par revêtements,
- Protection par inhibiteurs,
- Protection électrochimique.

I.11 lubrification [3].

I.11.1 Introduction

Le rôle principale d'un lubrifiant est de réduire le frottement et l'usure en introduisant un film entre les surfaces qui sont en déplacement relatif. Les lubrifiants peuvent être à l'état gazeux, liquide ou solide. Les conditions opératoires des mécanismes frottant lubrifiés varient énormément, et donc on impose des exigences importantes aux lubrifiants, quand on a besoin de hautes performances ces exigences augmentent encore plus. Il existe des efforts importants pour augmenter la durée de vie des systèmes, et de réduire les coûts de maintenance.

I.11.2 Types de lubrifiants

Il existe trois types de lubrifiants : l'huile, la graisse et les lubrifiants solides :

I.11.2.1-Huile

On distingue les huiles suivantes :

- Les huiles végétales sont destinées pour des utilisations peu sollicitées thermiquement, elles sont biodégradables (on les appelle huiles vertes).
- Les huiles minérales, obtenues par raffinage du pétrole, sont les plus utilisées.
- Les huiles synthétiques, obtenues par synthèse chimique. La lubrification à l'huile est utilisée pour tous les coussinets (paliers lisses) sans exception, quand il s'agit de grandes vitesses.

Afin d'améliorer la qualité de lubrification de l'huile on y'ajoute des additifs tels que les sulfures de molybdène.

I.11.2.2-Graisse

Une graisse lubrifiante est un produit de consistance semi fluide à solide, obtenu par dispersion d'un agent épaississant dans un liquide lubrifiant. La graisse est considérée comme un lubrifiant bi-phasique. On utilise les graisses quand la quantité de chaleur à éliminer du mécanisme à lubrifier est faible (faible vitesse de glissement, même sous forte charge ou vitesse moyenne avec charge modérée). Les avantages de l'utilisation de graisse par rapport à celle de l'huile sont :

- Utilisation de joint d'étanchéité simple (contribution à l'étanchéité).
- Protection permanente contre les agents agressifs (même à l'arrêt).
- Pas de nécessité de circuit de lubrification.
- Pas de surveillance continue.

Les inconvénients sont :

- Inutilisable pour les grandes vitesses.
- Démontage indispensable lors de son chargement.

La lubrification par graisse est utilisée pour les petites vitesses de rotation, pour les mouvements alternatifs rectilignes et aussi lorsqu'il y a présence de sollicitation par à-coups.

I.11.2.3 Lubrifiants solides

Les lubrifiants solides sont utilisés soit seuls soit associés aux lubrifiants conventionnels pour améliorer leurs performances en régime de lubrification limite ou assurer une lubrification temporaire de secours (urgence) comme par exemple en cas de défaillance accidentelle du système de graissage.

L'utilisation de lubrifiants solides seuls ; tel que les sulfures de molybdène est pratiquée pour des températures et charges élevées, mais seulement pour les basses vitesses et le graissage est unique.

Les lubrifiants solides sont mis en œuvre sous forme de poudre, de dispersion dans un fluide (huile, eau, solvant), dans les graisses et pâtes lubrifiantes, sous forme de vernis de glissement et de matériaux composites autolubrifiants.

I.11.3 Procédés de lubrification

Les procédés de lubrification à l'huile les plus utilisés sont :

- La lubrification manuelle : L'apport d'huile est assuré par burettes ; on remplit une réserve (généralement petite), qui faisant partie constructivement des éléments à lubrifier, alimentera la zone à lubrifier. L'huile utilisée est une huile perdue.
- La lubrification par mèche : L'huile est acheminée à partir soit d'un réservoir monté soit d'une poche aménagée dans le couvercle du palier, grâce à une mèche (en zéphire ou en alpage coton) par capillarité ou par aspiration jusqu'à la partie à lubrifier.
- La lubrification goutte à goutte : Le débit de gouttes est réglable.

- La lubrification par bague : La bague peut être libre ou fixe par rapport à l'arbre.

L'huile est transportée avec la bague sur la partie supérieure de l'arbre. Le débit d'huile, lors de la lubrification par bague libre augmente avec la vitesse de rotation de l'arbre.

La lubrification par bague fixe est utilisée pour les basses vitesses et les petits diamètres d'arbre.

-Lubrification par barbotage : Dans les machines à pistons verticaux pour des grandes vitesses, les têtes de bielles plongent dans la cuve d'huile et éclaboussent ainsi toutes les parties à lubrifier (parois internes des cylindres, coussinets de bielle, axes de pistons, etc.)

-la lubrification par pompe : une pompe alimente en huile l'endroit à lubrifier.

I.12 - Rôle des plans d'expérimentation [9]

I.12.1. Introduction

La plupart des ingénieurs et techniciens améliorent leurs produits ou leurs processus de production à partir des expériences. Malheureusement, les stratégies couramment utilisées pour mener ces expériences sont souvent coûteuses et peu performantes et elles conduisent à de nombreuses expériences difficiles exploitables. Pour toutes ces raisons, de nombreux ingénieurs et techniciens font appel à la planification des expériences. Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt (y) et des variables (xi). Elle a donc pour but de déterminer des modèles mathématiques reliant les grandeurs d'intérêt aux variables contrôlables. Les plans d'expériences apportent une aide notable aux expérimentateurs et constituent un outil indispensable à toute élaboration de stratégies expérimentales sans restriction disciplinaire.

Parmi les industries pouvant utiliser cette méthodologie, on peut notamment citer :

- Industries chimique, pétrochimique et pharmaceutique;
- Industries mécanique et automobile;
- Industrie métallurgique.

Il existe de nombreux plans d'expériences pouvant être adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur. Leur utilisation vise les objectifs suivants :

- La détermination des facteurs clés dans la conception d'un nouveau produit ou d'un nouveau procédé;
- L'optimisation des réglages d'un procédé de fabrication ou d'un appareil de mesure;
- La prédiction par modélisation du comportement d'un procédé.

Les plans d'expériences s'inscrivent dans une démarche générale d'amélioration de la qualité. Le succès de la démarche originale des plans d'expériences réside dans la possibilité d'aboutir aux

résultats escomptés et d'interpréter ces résultats avec un effort minimal sur le plan expérimental. La minimisation du nombre d'expériences à effectuer pour une étude donnée permet un gain en temps et en coût financier. Il faut néanmoins comprendre que les plans d'expériences ne sont pas un outil destiné a priori à la recherche fondamentale car ils ne permettront jamais une explication du phénomène physico-chimique étudié.

I.12.2 Principe de la Méthodologie des plans d'expériences

I.12.2.1 Aperçu historique

Les plans d'expériences ne sont pas une découverte récente. La chronologie ci-après (Figure I.23) le rappelle en indiquant quelques points de repères généraux. La construction industrielle du Japon a permis aux méthodes statistiques développées entre le 18e et le 20e siècle, de jouer un rôle essentiel dans l'étude et l'optimisation de produits ou procédés. Les brillants succès des Japonais ont incité les entreprises européennes et américaines à considérer l'application des statistiques dans leurs activités de production. Ces outils polyvalents permettent des interventions rapides et structurées sur les processus. On peut désormais améliorer produits et procédés sans connaître toutes les lois physiques et chimiques du phénomène étudié. Depuis quelques années, on s'est aperçu que la qualité d'un produit (notion essentielle dans le monde de l'industrie et dans le monde en général) dépendait principalement de la conception de ce produit ou plus précisément de la connaissance parfaite de cette conception, plutôt que du produit fini lui-même. En effet, connaître sur le bout des doigts l'élaboration d'un produit permet de prévoir son évolution au cours du temps en fonction des paramètres influents, qu'ils soient internes ou externes. Or, ces paramètres sont généralement nombreux et difficilement modélisables par les méthodes classiques de la physique. Le concepteur a donc besoin d'une méthode expérimentale, peu coûteuse en expériences, qui lui permettra de mesurer et de connaître l'influence de tous les paramètres et d'en déduire les plus influents. Un plan d'expériences représente l'outil adéquat qui permettra de répondre à l'ensemble de ces questions. Le présent chapitre est consacré à la planification des expériences. Des généralités sur les plans factoriels complets sont d'abord exposées suivies de la méthode des plans composites centrés utilisés pour la modélisation et l'optimisation du procédé envisagé.

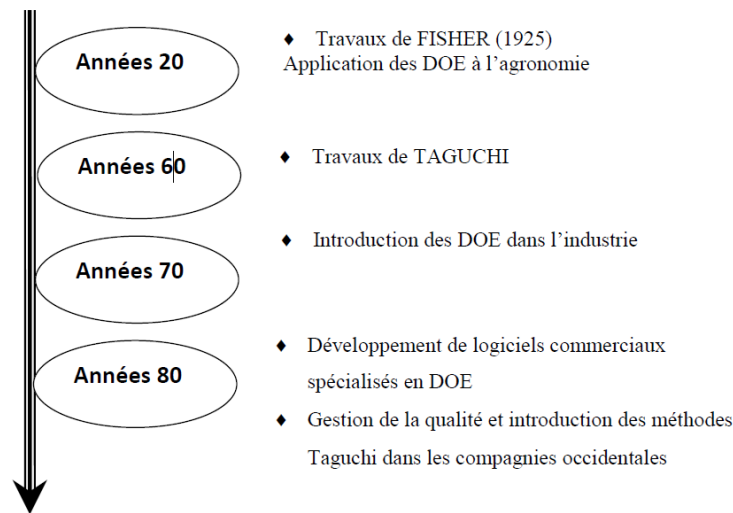


Figure I.23 : Aperçu historique

I.12.2.2 Présentation des plans d'expériences

Les plans d'expériences sont issus de méthodes mathématiques et statistiques appliquées à l'expérimentation. Les premiers scientifiques à s'être posé le problème de l'organisation des essais sont des agronomes. Ils avaient en effet beaucoup de paramètres à étudier et n'avaient pas la possibilité de multiplier le nombre d'expériences. De plus, la durée des expériences constituait une contrainte supplémentaire forte. C'est Fisher, qui, pour la première fois en 1925, proposa une méthode avec laquelle on étudiait plusieurs facteurs à la fois. Cette méthode fut reprise puis développée par des statisticiens et des mathématiciens qui définirent des tables d'expériences permettant de réduire considérablement le nombre d'expériences à effectuer sans diminuer la pertinence de la campagne d'essais. Les grandes entreprises se sont ensuite intéressées à cette méthodologie dans le cadre de l'approche qualité à la suite des travaux du docteur Taguchi. Il a fortement contribué à l'expansion de l'utilisation des plans d'expériences en milieux industriels au Japon dans les années 1960. Au cours de ces dernières années, cette méthodologie, du fait de la pertinence des informations apportées, s'est développée dans la plupart des secteurs d'activités.

I.12.2.3 Contexte et objectifs des plans d'expériences

Le contexte de l'utilisation des plans d'expériences recouvre des phénomènes de type « boîte noire » (Figure 23), que l'on cherche à éclaircir pour mieux comprendre le fonctionnement et en optimiser les performances. La démarche est expérimentale : l'information sur le phénomène est acquise à partir des essais. Cela impose une connaissance minimale du phénomène étudié avant d'entreprendre les essais.

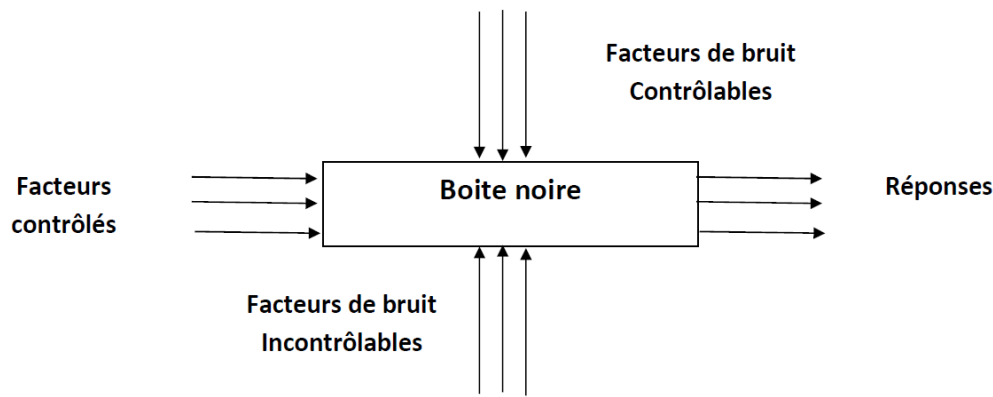


Figure I.24 : Système de boîte noire

I.12.2.4 Principe

La technique des plans d'expériences va permettre de répondre à nos exigences. En effet, son principe consiste à faire varier simultanément les niveaux de un ou plusieurs facteurs (qui sont des variables discrètes ou continues) à chaque essai. Ceci va permettre d'une part, de diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés et d'autre part, à détecter les interactions entre les facteurs et la détermination du réglage dit optimal de ces facteurs par rapport à une réponse. Le point délicat dans l'utilisation des plans d'expériences sera donc de minimiser le plus possible le nombre d'expériences à mener sans sacrifier la précision sur les résultats. Il existe actuellement un nombre important de plans différents. Chacun, par ses propriétés, permet de résoudre certains problèmes particuliers. On peut cependant, diviser les plans d'expériences en deux grandes catégories :

- Les plans pour étudier (estimer et comparer) les effets des paramètres ;
- Les plans pour régler les paramètres afin d'atteindre un optimum.

Pour obtenir des informations pertinentes, une démarche méthodologique doit être suivie :

- Définition des objectifs et critères;
- Définition des facteurs à étudier et du domaine expérimental;
- Construction du plan d'expériences;
- Expérimentation;
- analyse des résultats;
- conduite éventuelle d'essais supplémentaires;
- Validation des résultats;
- Conclusion de l'étude.

À l'issue de cette procédure, on pourra conclure sur les résultats obtenus par les plans d'expériences

I.13 Conclusion

D'après la recherche bibliographique, on peut conclure que l'état de surface contribue de façon considérable en tribologie (frottements, usure, lubrification). En effet, il a été montré dans plusieurs travaux l'importance de la surface, ainsi que les différents paramètres caractérisant la rugosité. Par ailleurs, de nombreux travaux ont prouvé que le procédé de finition par TMS offre des effets bénéfiques dans l'amélioration des caractéristiques physiques et géométriques des surfaces. Des travaux d'expérimentation et de simulation seront développés dans les prochains chapitres

جامعة باجي مختار - عنابة

CHAPITRE II
Techniques Expérimentales

Université Badji Mokhtar-Annaba

II.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons passé en revue la partie bibliographique, où il est montré que l'état de surface influe énormément sur le comportement d'un système mécanique, et que les phénomènes de frottement, d'usure et de lubrification sont étroitement liés au fini de la surface. Effectivement, durant la fabrication d'une pièce, plusieurs facteurs du régime entrent dans le processus de fabrication, en agissant sur la qualité de surface. Dans ce chapitre, les équipements utilisés pour l'expérimentation tels que : les machines, les outils, les appareils de mesure de la dureté et de la rugosité, sont exposés. Pour l'organisation des essais, une méthodologie basée sur les plans d'expériences, en l'occurrence, les plans de Box-Behnken à 3 facteurs d'entrée (N, f et ap) a été utilisée pour la réalisation de l'expérimentation.

II.2 Matériels et méthodes

II.2.1 Matériau

Le matériau utilisé pour cette étude expérimentale est un acier allié au chrome molybdène, sa nuance est présentée dans le tableau II.1.

Domaines d'applications : Pièces de qualité employées en mécanique générale telles que : vérins, colonnes de presse, arbres.

Propriétés : Acier dur pouvant être utilisé à l'état traité ou normalisé selon le niveau de caractéristiques mécaniques recherché.

II.2.1.1 Composition chimique du matériau

L'analyse chimique du matériau a été réalisée dans le laboratoire de service de spectrométrie et équipements d'analyses (Complexe sidérurgique d'El Hadjar), au moyen d'un spectromètre à émission optique (Thermo Fisher) représenté par la figure II.1, les éléments chimiques sont présentés dans le tableau II.1.



Figure II.1 Spectromètre à émission optique (Thermo Fisher)

Tableau II.1 Composition chimique

<i>C</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>S</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>Ni</i>	<i>V</i>
0.27	2.99	2.46	0.009	0.30	0.016	0.13	0.46

II.2. 2Procédé de tournage et de brunissage

Les opérations de tournage et les opérations de brunissage ont été effectuées sur un tour modèle 1k 62 N°00212 (FigureII.11), dont les caractéristiques sont indiquées sur le tableau II.6.



Figure II 2. Tour 1k 62 N°00212

Tableau II.2 Caractéristiques du tour 1k 62

D max (mm)	Distance entre pointe(mm)	Diamètre de passage dans la broche (mm)	Avance mm/tr	Vitesse de rotation trs /min	Puissance de la machine KW
600-700	1060-2060	52	0,07- 1.5	12.5-2000	7.2 Kw

II.2.2.1 Outil de coupe pour tournage

Pour l’opération de tournage on a choisi un outil de coupe à plaquette en carbure de nuance P2 pour réaliser l’opération de dressage (Figure II.3)



Figure II.3 Outil de dressage (P20 16x16)

II.2.2.2 Dispositif de brunissage

L'opération de brunissage est réalisée à l'aide d'un dispositif adapté aux diamètres de billes utilisées, respectivement 7 mm, 10 mm, 13.5mm (Figure II.4) et dont la dureté superficielle est : $Hv_{Db7}=886.7Hv$, $Db_{10}=611.9Hv$, $Db_{13.5}=712.1Hv$ [2].

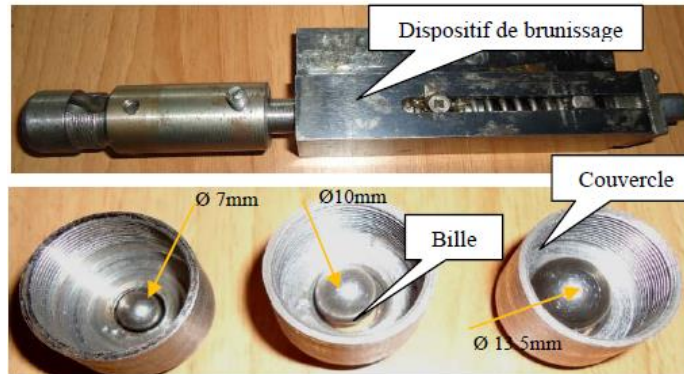


Figure II.4 Dispositif de brunissage [2]

II.2. 3 Essai d'usure par abrasion

Les essais d'usure par abrasion ont été réalisés sur une machine de test d'usure (figure II 6 a) .Pour cet essai les échantillons ayant subi une opération de brunissage ont été découpé au moyen d'une machine modèle SERVOCUT 301(figure II 5). L'essai d'usure par abrasion a été effectué en utilisant un papier en carbure de silicium de grade 400. (Figure II 6 b)

- Tableau II.3 Régime d'essai d'usure

Parcours (m)	Vitesse de rotation N (tr/mn)	Charge appliquée (daN)
50	150	1



Figure II 5 Machine de découpage SERVOCUT 301



Figure II 6 a) Machine d'usure

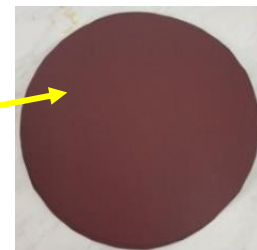


Figure II 6 b) Papier abrasif

II.3.3 les appareils des mesures

II.3.3.1 Mesure de la Dureté

Les mesures de dureté ont été réalisées sur un duromètre de type INDENTEC (Figure II.7) avec une bille en tungstène de diamètre $d=2,5\text{mm}$.



Figure II 7 Duromètre de type INDENTEC

II.3.3.2 Mesure de rugosité

Des mesures de rugosité ont été réalisées au laboratoire de métallurgie à l'École Nationale Supérieure des Mines et Métallurgie d'Annaba (ENSMM). Les échantillons usinés à l'aide d'un rugosimètre de modèle TR220 (Figure II.8). Des mesures de rugosité ont été effectuées sur les échantillons usinés à l'aide d'un rugosimètre de modèle CYBER TECHNOLOGIES CT 100 (Figure II.8) au laboratoire de métallurgie à l'École Nationale Supérieure des Mines et Métallurgie d'Annaba (ENSMM).

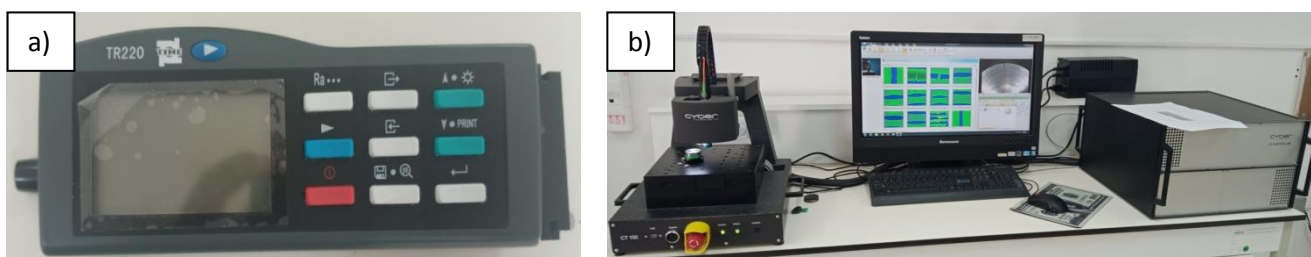


Figure II.8 Rugosimètres :a) 2D modèle TR220, b)3D modèle CYBER TECHNOLOGIES CT 100

II.3.3.3 Mesure de la Masse

Au cours de l'essai d'usure par abrasion les pertes de masse ont été mesurées sur un balance de type **KERN** (figure II.9)

Figure II.9 Balance de type **KERN**

II.4 Méthodologie expérimentale[2]

Toute expérimentation se déroule selon des étapes précises afin de faciliter son enchaînement. Dans ce travail, une méthodologie des plans d'expériences a été adoptée (Figure II.10), ce qui permet de minimiser le nombre d'expériences tout en ayant le maximum de renseignements, de gagner du temps et d'économiser la matière première. Les plans d'expériences présentent beaucoup d'avantages tels que :

- La possibilité d'utiliser un grand nombre de facteurs ;
- L'évaluation des représentations graphiques des réponses de sortie en fonction des paramètres d'entrée ;
- L'utilisation d'un modèle mathématique répondant aux objectifs à atteindre suivant le besoin.
- L'optimisation des paramètres d'entrée relatifs aux paramètres de sortie envisagés.

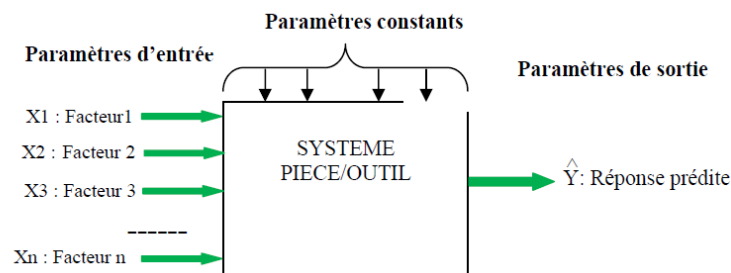


Figure II 10. Schéma de l'expérimentation

Les essais expérimentaux ont été conduits selon les plans de Box Behnken à trois facteurs en vue d'évaluer l'influence des différents paramètres du régime et leurs interactions sur les réponses considérées. Ce type de plans d'expériences, possède la propriété de séquentialité et permet de :

- modéliser les réponses avec un modèle du second degré tout en respectant certains critères d'optimalité ;
- Une mise en œuvre facile.

Ces plans prennent en compte trois facteurs à trois niveaux : -1 ; 0 ; +1, ils permettent à l'aide d'une matrice de 15 essais (tableau II.3) de formuler un modèle du second degré avec les interactions d'ordre deux présenté dans l'équation (II.1)

$$\hat{y} = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + a_{33}X_3^2 + e \quad (\text{II.1})$$

Où e: erreur de prédiction

Tableau II. 4. Matrice de Box Behnken pour trois facteurs [11]

Essai N°	Facteur N°1	Facteur N°2	Facteur N°3
01	-1	-1	0
02	+1	-1	0
03	-1	+1	0
04	+1	+1	0
05	-1	0	-1
06	-1	0	+1
07	+1	0	-1
08	+1	0	+1
09	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

Dans ce travail, un programme sous Matlab [14] dont le déroulement se fait selon l'organigramme indiqué sur la Figure II.11, a été utilisé pour déterminer les équations de prédiction des réponses, simuler leurs évolutions en fonction des paramètres d'entrée et d'établir le régime optimal.

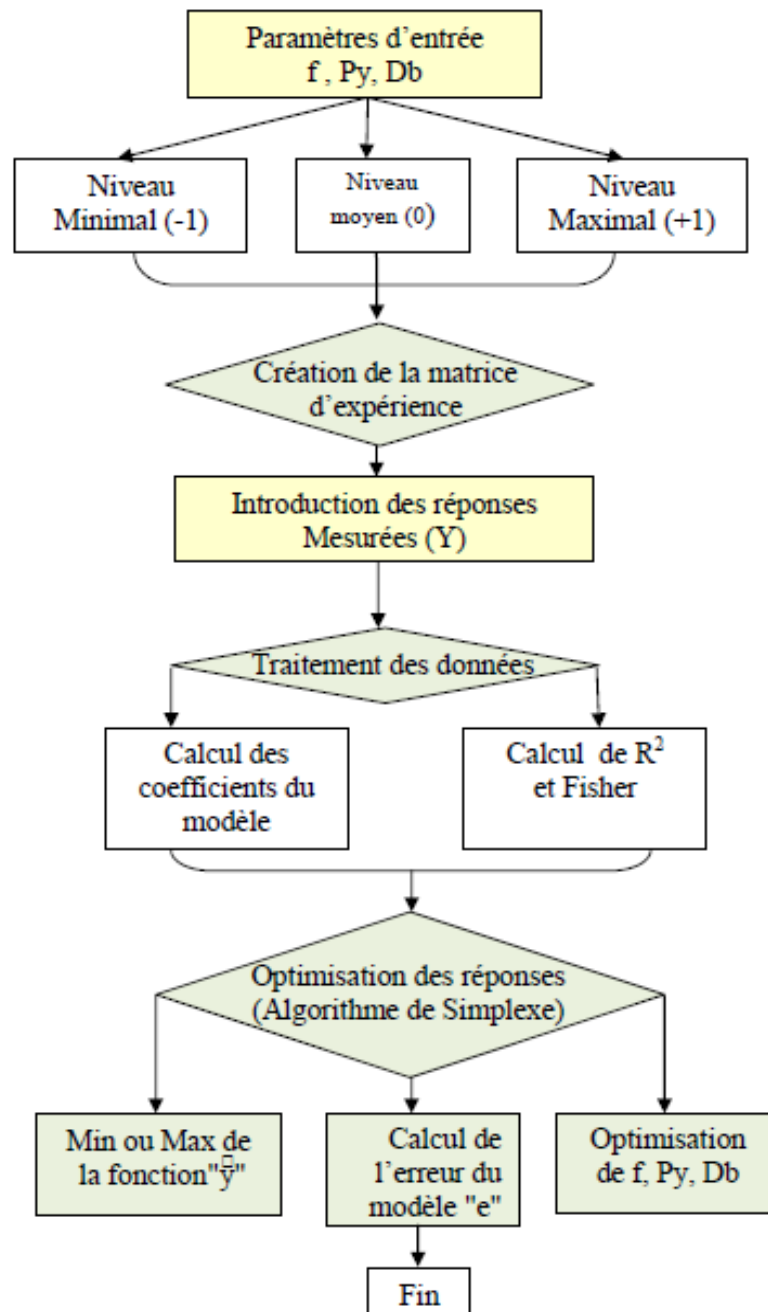


Figure II .11 Organigramme de calcul

II.5 Réalisation des expériences

II.5.1 Montage de la pièce

Au cours d'expérience opération de tournage (dressage), réalisation des pastilles, la pièce est fixée dans un montage libre (Figure II.12).

L = 40 mm pour l'usinage de tous les échantillons (les pastilles).

- d= 34 mm

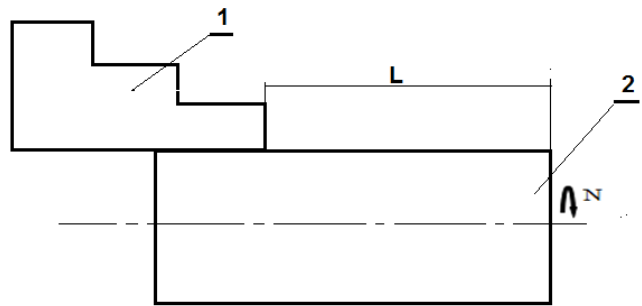


Figure II.12 Montage de la pièce 1-mandrin, 2- pièce

II.5.2 Choix des vitesses de coupe

Les vitesses de coupe sont choisies d’après le guide du technicien en productique [8].

Vitesse de coupe $V_{cmin}=110(m/min)$, $V_{cmoy} =190(m/min)$ et $V_{cmax}=260(m/min)$

Calcul de la fréquence de rotation "N" d’après la formule suivant :

$$N=1000V_c / \pi D \text{ (II.3)}$$

$N_{min}= 660 \text{ (tr/min)}$, $N_{moy}=1142(tr/min)$ et $N_{max}=1562(tr/min)$

Selon la machine-outil on a choisi les fréquences de rotation "N" suivant :

$N_{min}= 630(tr/min)$, $N_{moy}=1000(tr/min)$ et $N_{max}=1600(tr/min)$

II.5.3 Préparation des échantillons sur tour

La préparation de la pièce est réalisée selon la matrice d’expériences de Box Behnken, comme explicité dans le paragraphe II.4. L’opération de tournage se déroule sous lubrification abondante. Le régime de coupe a été choisi à partir du document[8]. Tout en respectant les caractéristiques de la machine-outil tableau II.2.

Tableau II.5 Régime de coupe

Profondeur de passe a (mm)	Avance f (mm/tr)	Vitesse de rotation N (tr/mn)
0,5 ÷ 1,5	0,07 ÷ 1,14	630 ÷ 1600

La matrice d’expériences de Box Behnken à trois facteurs et trois niveaux (tableau II.6) prévoit 15 combinaisons consignées dans le tableau II.7. La pièce est réalisée en 15 pastilles (Figure II.13).

Tableau II.6 Facteurs codés en tournage

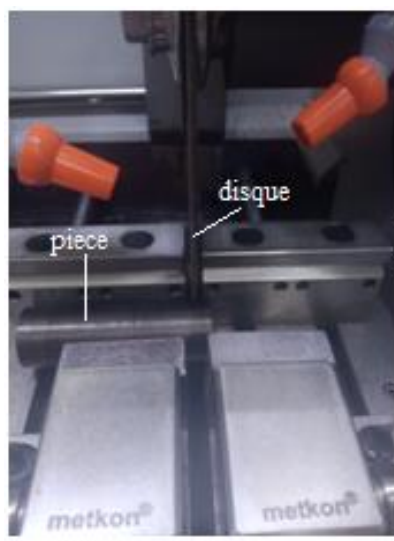
Facteur	Paramètres	Valeur max +1	Valeur min -1	Valeur 0
X1	N (tr/mn)	1600	630	1000
X2	f (mm/tr)	1.14	0,07	0,61
X3	a (mm)	1,5	0,5	1

Tableau II.7 Matrice d'expériences en tournage

N°Essai	Paramètres d'entrée		
	N (tr/mn)	f (mm/tr)	a (mm)
01	630	0.07	1
02	1600	0.07	1
03	630	1.14	1
04	1600	1.14	1
05	630	0.61	0.5
06	630	0.61	1.5
07	1600	0.61	0.5
08	1600	0.61	1.5
09	1000	0.07	1.5
10	1000	1.14	0.5
11	1000	0.07	0.5
12	1000	1.14	1.5
13	1000	0.61	1
14	1000	0.61	1
15	1000	0.61	1



a



b



c

Figure II.13. Préparation les échantillons

II.5.2 Mesure de la rugosité

Les mesures de rugosité (2D) des pastilles (figure II.14 a) ont été effectuées sur trois génératrices de chaque pastille (figure II.14 b). Les valeurs moyennes pour chaque paramètre étudié ont été calculées. Les mesures (2D) ont été effectuées, en prenant une longueur d'évaluation ($L=4,0$ mm), une longueur de coupe de ($\lambda=0,8$) mm



Figure II.14(a)

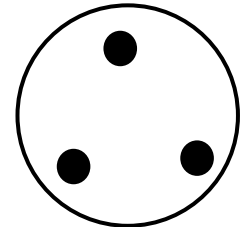
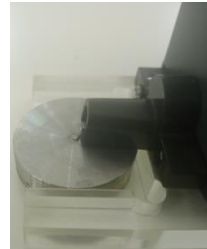


Figure II.14 (b)

II.5.3 Mesure et traitement des données relatifs des pastilles

L'objectif de ces essais est d'optimiser les paramètres de coupe en tournage (dressage). Les facteurs d'entrée du modèle correspondent à : la vitesse de rotation "N" ; l'avance "f" et la profondeur de passe "ap". Les valeurs de la rugosité "Ra" mesurées sont consignées dans le tableau II.8

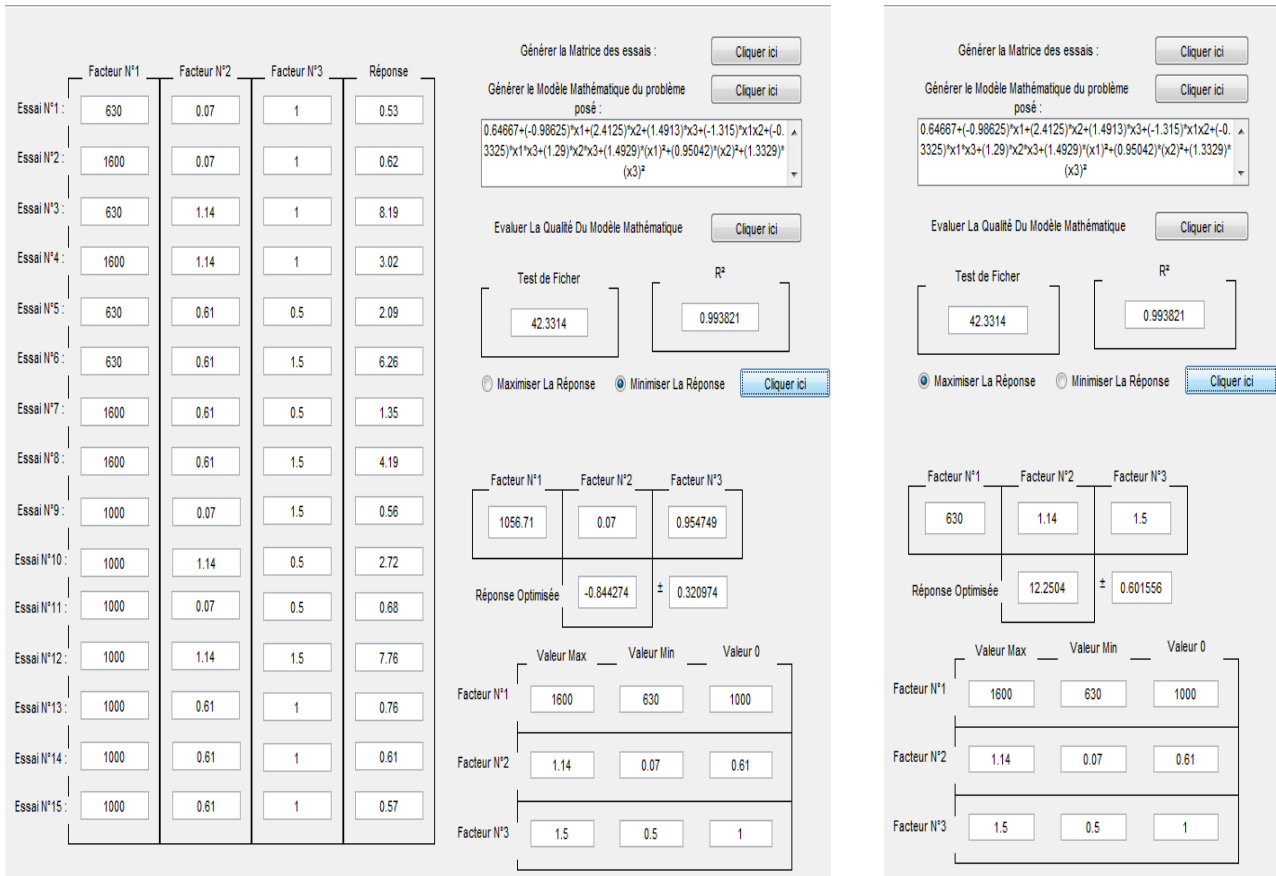
Tableau II.8 Résultats expérimentaux lors du tournage (dressage)

N° Essai	Paramètres d'entrée			R _{amoy}
	N (tr/mn)	f (mm/tr)	ap (mm)	
01	630	0.07	1	0,53
02	1600	0.07	1	0,62
03	630	1.14	1	8,19
04	1600	1.14	1	3,02
05	630	0.61	0.5	2,09
06	630	0.61	1.5	6,26
07	1600	0.61	0.5	1,35
08	1600	0.61	1.5	4,19
09	1000	0.07	1.5	0,56
10	1000	1.14	0.5	2,72
11	1000	0.07	0.5	0,68
12	1000	1.14	1.5	7,76
13	1000	0.61	1	0,76
14	1000	0.61	1	0,61
15	1000	0.61	1	0,57

II.5.5 Traitement par Box-Behnken

Le paramètre de rugosité "Ra" a été utilisé comme paramètres de sortie traitements des matrices des essais relatives au paramètre de sortie par les plans de Box-Behnken sont illustrés respectivement sur le tableau II.8

Tableau II.9 Traitement de la matrice d'expériences de la rugosité "Ra"



Le modèle mathématique ainsi obtenu pour le paramètre de rugosité est indiqué par l'équation III.1 ci-dessous :

$$\hat{y} = \text{La rugosité prédite} = 0.64667 + (-0.98625) \cdot x_1 + (2.4125) \cdot x_2 + (1.4913) \cdot x_3 + (-1.315) \cdot x_1 x_2 + (-0.03325) \cdot x_1 \cdot x_3 + (1.29) \cdot x_2 \cdot x_3 + (1.4929) \cdot (x_1)^2 + (0.95042) \cdot (x_2)^2 + (1.3329) \cdot (x_3)^2 \quad \text{(II.4)}$$

Le régime optimal qui en découle pour la valeur minimale de la rugosité est :

N=1000 tr/min ; f=0.07 mm/tr ; ap=1 mm

Le régime qui en découle pour la valeur maximale de la rugosité est :

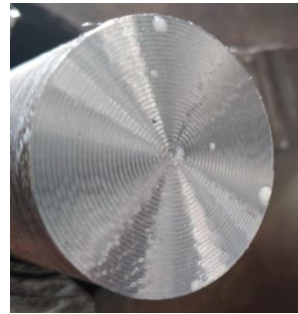
N=630 tr/min ; f=1.14 mm/tr ; ap=1.5 mm

II.5.6 Préparation des échantillons pour l'opération de brunissage

Dans la deuxième partie de l'expérience nous avons fait quatre échantillons deux échantillons sont été réalisés par le régime de la valeur minimale de la rugosité (Figure II.15 a) deux échantillons sont été réalisés par le régime de la valeur maximale de la rugosité (Figure II.15 b).



(Figure II.15 a)



(Figure II.15 b).

II. 5.7 Traitement par brunissage

Le brunissage est un traitement mécanique superficiel le plus répandu et est très utilisé en raison de sa forte productivité, il permet d'économiser la matière par rapport aux procédés classiques de finition. Le principe de ce procédé est basé sur l'application d'une pression sur les crêtes de la surface au moyen d'une bille (Figure II.16), ce qui a pour conséquence un fluage de la matière dans les creux, au fur et à mesure de l'avance de la bille. Il permet de niveler les aspérités de la surface usinée en créant une zone de métal écrouie, indice d'une amélioration de l'état de surface[2]

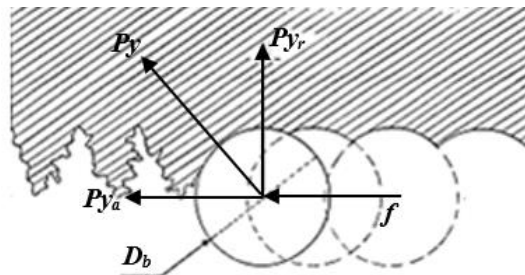


Figure II.16 Principe de brunissage[2]

- Dans cette partie de l'expérimentation nous avons fait un traitement mécanique par Le brunissage sur deux échantillons ; le premier échantillon a été fait avec le régime de la valeur minimale de la rugosité, et le deuxième avec le régime de la valeur maximale de la rugosité (Figure II.17).

- Tableau II.10 Régime du brunissage[7]

Diamètre de bille (mm)	Nombre de passe	Avance f (mm/tr)	Vitesse rotation (tr/mn)	de Charge N appliquée (N)
7	3	0,07	630	200

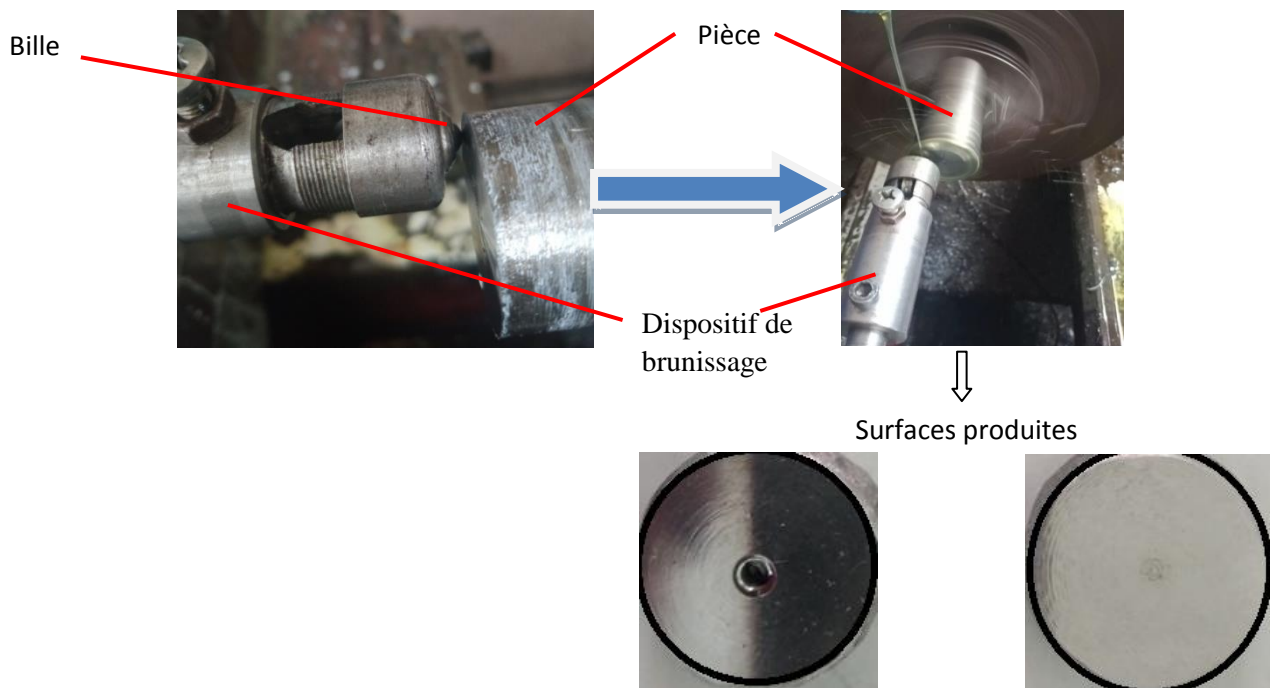


Figure II.17 : opération du brunissage

II. 6 Conclusion

Les différentes étapes expérimentales (opérations réalisés) ont été représentées schématiquement sur la figure II.18. Dans le chapitre suivant, nous présentons les résultats et leurs interprétations.

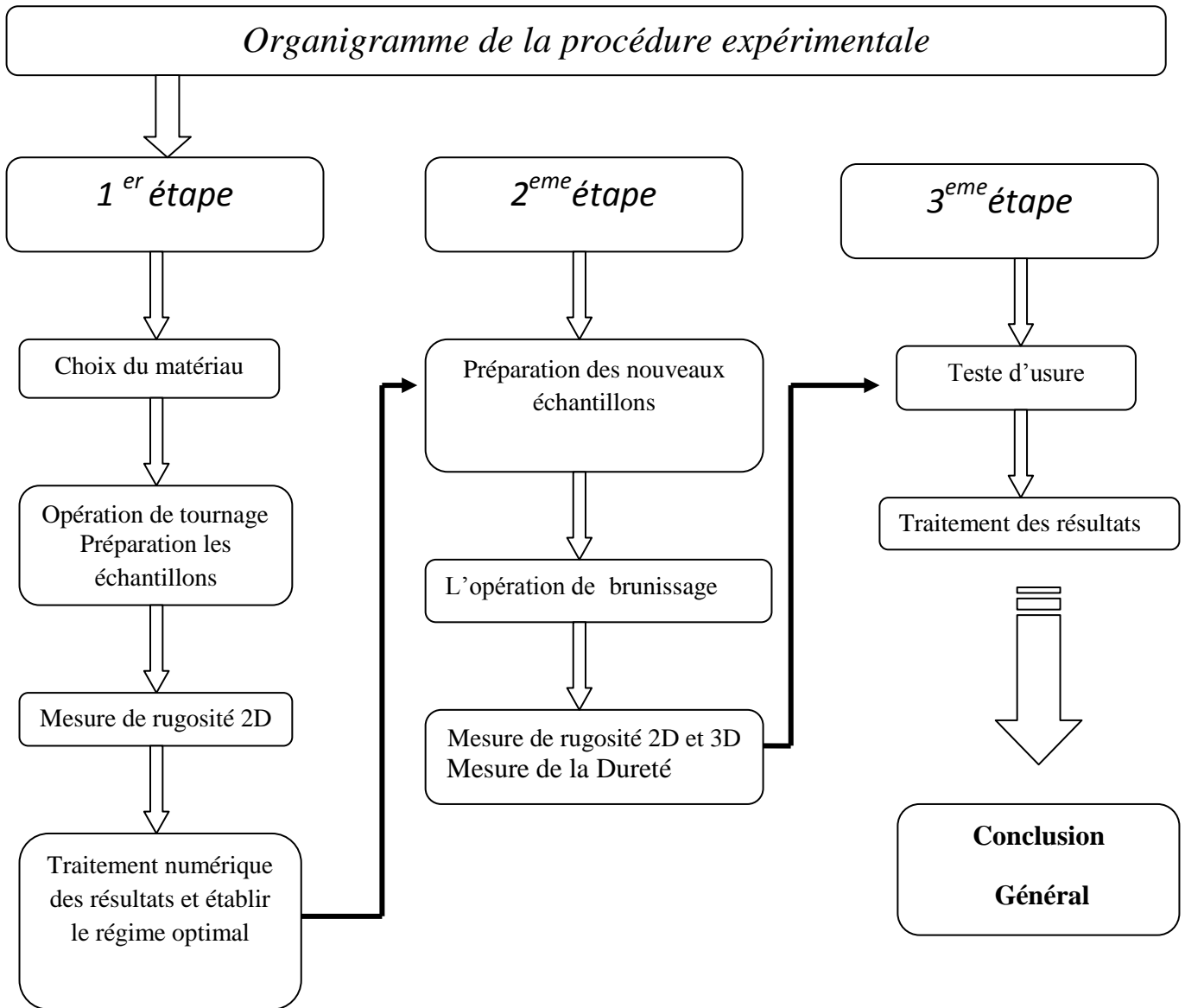


Figure II.18 *Organigramme de la procédure expérimentale*



CHAPITRE III

Résultats et discussion

III.1 Introduction

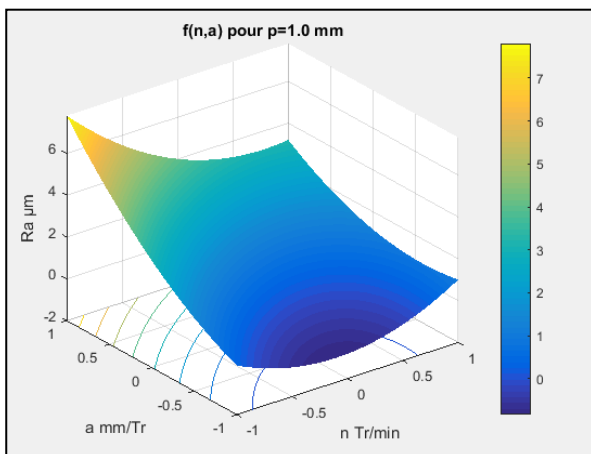
A partir des résultats obtenus une simulation numérique a été réalisée au moyen d'un programme sous Matlab permettant d'étudier l'effet du processus de tournage la rugosité de surface et la percutions de cette dernière sur un système mécanique. Dans un premier temps, nous avons présentés les courbes obtenus par les plans d'expériences du modèle de Box-Behnken, qui montrent l'influence des paramètres d'entrée, en l'occurrence : nombre de tour (n), l'avance (p) et la profondeur de passe (a), sur la réponse de sortie "Ra".

Dans un second temps, l'opération de brunissage a été appliquée sur deux échantillons afin d'analyser l'effet de la rugosité sur la dureté et sur l'usure.

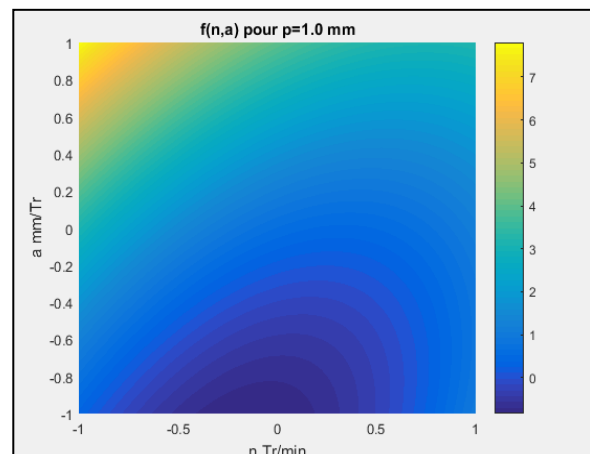
III.2 Interprétation des résultats

III.2.1 Effet des paramètres de coupe sur la rugosité "Ra"

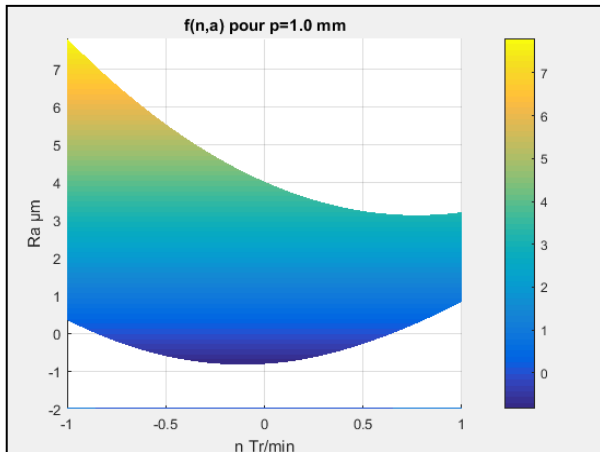
Les courbes représentées sur la figure III.1 qui montrent la variation de la rugosité «Ra» en fonction de l'avance «f» et la vitesse de rotation «n» pour $p=1$ mm. On remarque que la diminution de l'avance "f" engendre une amélioration de la rugosité "Ra" (Figure III.1d), ainsi qu'une augmentation de la vitesse de rotation "n", on observe une amélioration significative de l'état de surface, ce qui signifie une bonne rugosité (Figure III.1.c), la rugosité diminue avec une petite avance conjuguée avec une vitesse de rotation moyenne. Par contre, quand on augmente les avances avec des grande vitesses de rotation, nous constatons un grand effet sur la rugosité, un accroissement de Ra ce qui altère la qualité de la surface.



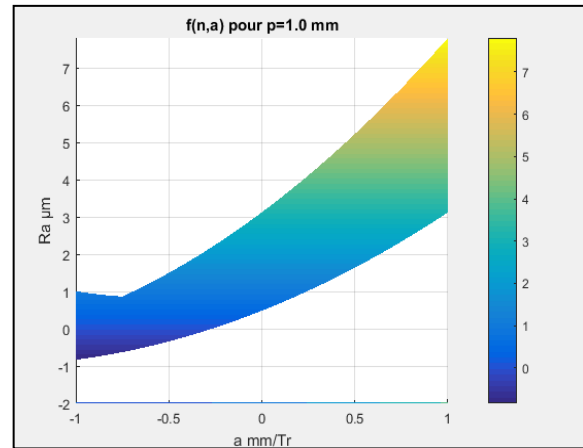
a) Variation de Ra en fonction de a et n pour $p=1$ mm



b) Courbe d'isoreponse variation de Ra en fonction de a et n



c) Courbe d'isoréponse évolution de Ra en fonction de la vitesse n



d) Courbe d'isoréponse évolution de Ra en fonction de l'avance a

Figure III.1 Variation de "Ra" en fonction de "a" et "n" pour P=1mm

III.2.2 Effet et interaction des paramètres du régime sur Ra

L'interaction entre les différents paramètres du régime (n, a, p) et leur influence sur la rugosité Ra sont représentées sur les graphiques de la (figure III.a) qui montrent que :

- l'interaction semble être significative entre les facteurs X1 (n) et X2 (a) lors du passage du facteur X1 du niveau -1 à 0 et dépend de l'avance. Lorsque X1 tend vers son maximum, on constate une divergence des valeurs de Ra où pour une valeur moyenne de l'avance, la valeur de la rugosité Ra est presque stable. Alors que pour X2=+1, Ra converge vers une valeur maximale de $8\mu\text{m}$, en contrepartie Ra tend à décroître vers une valeur minimale de $0,5\mu\text{m}$ pour du passage du facteur X2 du niveau -1 à 0.
- Concernant l'interaction entre la vitesse de rotation (X1) et la profondeur de passe (X3) elle est peu significative et montre que : lors du passage du facteur X1 du niveau -1 à 0 avec (X3)=0 on constate la valeur de la rugosité Ra est presque stable et pour X1=0 et X3=+1 Ra converge vers une valeur maximale
- Par ailleurs, l'interaction entre la profondeur de passe (X3) et l'avance (X2) lors du passage du facteur X3 du niveau -1 à 0 avec (X2)=-1 on constate la valeur de la rugosité Ra est presque stable, alors que pour X2=+1 et X3=+1 Ra converge vers une valeur maximale entre ($7,7$ de $8,2\mu\text{m}$).

D'après les résultats obtenus par le Traitement de Box-Behnken qui détermine le régime optimal pour Ra_{min} et Ra_{max} :

Le régime optimal qui en découle pour la valeur minimale de la rugosité est :

$n=1000$ tr/min ; $a=0.07$ mm/tr ; $p=1$ mm respectivement ($X_1=0$ $X_2=-1$ $X_3=0$)

Le régime qui en découle pour la valeur maximale de la rugosité est :

$n=630$ tr/min ; $a=1.14$ mm/tr ; $p=1.5$ mm respectivement ($X_1=-1$ $X_2=+1$ $X_3=+1$)

III. 3 Comportement de la rugosité Ra à l'usure par abrasion

Pour mieux analyser le comportement de l'état de surface à l'usure par abrasion des essais ont été réalisés. La figure III.2 représente l'évolution de la perte en masse avec les différentes surfaces traitées dans les conditions sélectionnées, à savoir la rugosité de surface Ra en fonction du parcours d'abrasion.

Tableau III.1 tableau des valeurs de la perte en masse en fonction de parcours

Parcours(m)	échantillon N°1	échantillon N°2	échantillon N°3	échantillon N°4
0	0	0	0	0
10	0,0026	0,0042	0,0069	0,0051
20	0,0066	0,0135	0,0179	0,0151
30	0,0149	0,0176	0,0228	0,0196
40	0,0214	0,0231	0,0314	0,0258
50	0,0305	0,0342	0,0405	0,0349

Tableau III.2 tableau de caractéristique des échantillons

	Régime d'usinage	Nature	Ra μm	Dureté Hv10
échantillon N°1	$N=1000$ tr/min ; $f=0.07$ mm/tr ; $ap=1$ mm	Tournée	0.63	179
échantillon N°2	$N=1000$ tr/min ; $f=0.21$ mm/tr ; $ap=1$ mm	Déformée	0,25	216
échantillon N°3	$N=630$ tr/min ; $f=1.14$ mm/tr ; $ap=1.5$ mm	Tournée	5,06	183
échantillon N°4	$N=630$ tr/min ; $f=1.14$ mm/tr ; $ap=1.5$ mm	Déformée	0,43	220

Les travaux de recherche attribuent la perte d'usure abrasive à des particules dures qui se placent entre les surfaces de frottement. Si la dureté de ces particules est supérieure à celle des surfaces, elles pénètrent dans la surface et provoquent des phénomènes d'usinage à l'échelle microscopique (rayures). La nature de l'usure abrasive est aussi déterminée par le mode d'acheminement des particules dans le contact. Si les particules sont fixées à l'une des deux surfaces, il s'agit d'abrasion à deux corps et si ces particules sont libres de rouler ou de glisser par rapport aux deux surfaces, on parle alors d'abrasion à trois corps. La résistance à l'usure est en corrélation avec la dureté superficielle et l'état de surface obtenu. Dans notre cas les valeurs de duretés pour les différents régimes imposés sont entre 179 et 220HV₁₀.

III. 3.1 cas des surfaces non déformées

La courbe correspondant à l'évolution de l'usure de la surface non déformée avec une rugosité de l'ordre de 0,63 μm, montre que les plus faibles pertes en masses en fonction du parcours d'abrasion en enregistrant la résistance la plus importante et donc le meilleur comportement à l'usure abrasive. L'évolution de l'usure de la surface non déformée avec une rugosité maximale montre des pertes en masses très élevées. La rugosité importante en surface de l'ordre de 5μm, facilite le décollement de la matière et en conséquence la perte de la résistance et donc la dégradation du comportement à l'usure abrasive.

D'où on peut dire que pour les surfaces non déformées de duretés proches (179 -183 HV₁₀) c'est l'influence de la rugosité de surface qui un facteur le plus dominant. L'effet de la rugosité sur la tenue à l'usure est particulièrement sensible sur les matériaux : l'augmentation de la rugosité induit systématiquement l'augmentation de la vitesse d'usure.

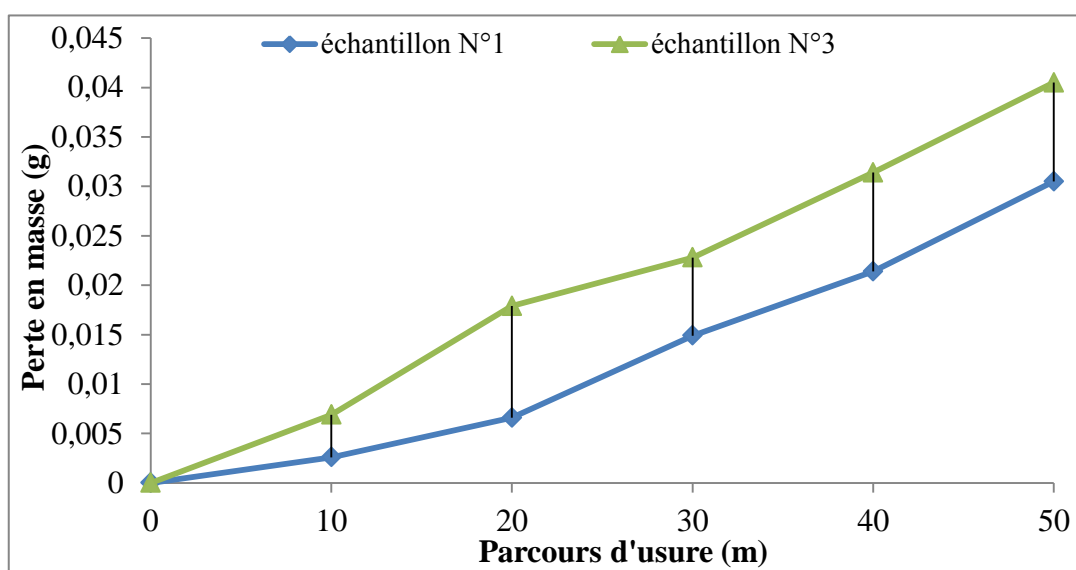


Figure III. 2 : Evolution de la perte en masse des surfaces non déformées

III. 3.2 cas des surfaces déformées

Les échantillons qui ont subi une déformation présentent une dureté entre 216 et 223HV₁₀. L'augmentation de la dureté est due à la consolidation des propriétés mécaniques en surface suite à la formation de contraintes résiduelles après déformation, il s'agit du phénomène d'écrouissage. Pour ces échantillons l'état de surface imposé par les régimes d'usinage réalisés est proche avec des rugosités de 0,25 et 0,43 respectivement. Dans ces conditions opératoires, l'évolution de l'usure est presque similaire. Donc, c'est l'effet combiné de la rugosité de surface Ra et de la dureté obtenue par déformation.

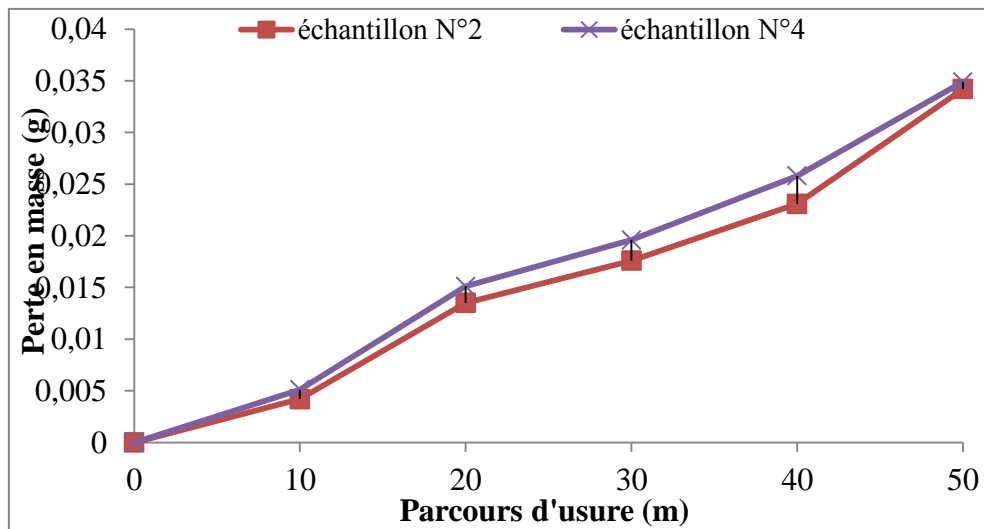


Figure III.3 : Evolution de la perte en masse des surfaces déformées

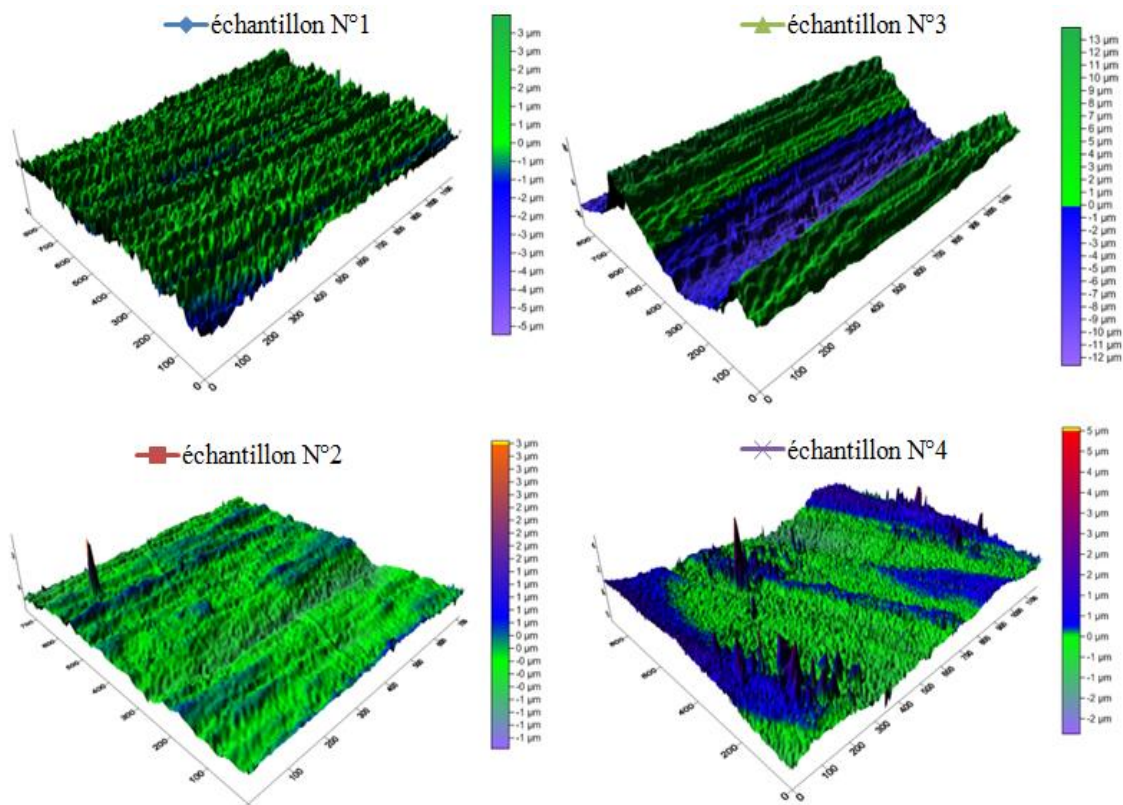


Figure III.4 Topographies des états de surface pour les différents régimes réalisés

III.4 Conclusion

Les conclusions qui peuvent être tirées de ce de chapitre se résument en ce qui suit :

Le modèle mathématique de prédiction de la réponse formulée avec les différents tests a permis d'optimiser le régimes dans le but de minimiser la rugosité " Ra" .

La rugosité minimale $Ra = 0,63 \mu\text{m}$ est obtenue par le régime de coupe suivant :

$n=1000 \text{ tr/min}$; $a=0.07 \text{ mm/tr}$; $p=1 \text{ mm}$ ($X1=0$ $X2=-1$ $X3=0$)

- Le modèle mathématique de Box-Behnken permis de prédire les paramètres de traitement les plus favorables afin d'atteindre une meilleure qualité de surface.
- La résistance à l'usure par abrasion est en corrélation directe avec la dureté et la rugosité obtenues en surface. La rugosité importante en surface induit systématiquement l'augmentation de la vitesse d'usure et donc facilite le décollement de la matière et en conséquence la dégradation du comportement à l'usure abrasive.

Après déformation de la surface, la dureté augmente suite à la consolidation des propriétés mécaniques en surface par la formation de contraintes résiduelles dues au phénomène d'érouissage. Dans ce cas, la perte de masse correspond à une combinaison de l'influence de la rugosité de surface et de la dureté obtenue par déformation.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail entrepris dans ce mémoire de fin d'études a été orienté sur l'analyse de l'effet de la qualité de surface caractérisée par la rugosité surfaces sur la tenue à l'usure par abrasion. Deux cas ont été examinés, en l'occurrence, le cas des surfaces préparées par le procédé de tournage et celui des surfaces traitées par déformation plastique superficielle ou TMS.

Le mémoire comprend deux parties essentielles, la première partie est une étude bibliographique, qui met en évidence, l'impact de la qualité de surface en tribologie, les différents paramètres (profil, surface) de rugosité, surface et tribologie (frottement, usure, corrosion, lubrification).

Les résultats obtenus dans ce travail reposent sur des essais expérimentaux qui ont été réalisés sur des échantillons (15 pastilles) en acier de construction, qui est largement utilisé dans l'industrie. La méthodologie suivie pour la réalisation des essais repose sur la méthode des surfaces de réponses, de Box-behken, ce qui a permis de juger l'influence des paramètres du régime de coupe (N , f , a_p) sur la réponse de sortie R_a fixée. A la suite des résultats obtenus et sur des modèles élaborés, des régimes d'usinage ont été choisis en vue de la préparation des surfaces usinées avec différentes rugosités.

Les tests d'usure par abrasion ont été réalisés sur quatre échantillons. Ces derniers ont été préparés, au moyen des régimes établis, dont deux ont été soumis à un traitement mécanique de surface (opération du brunissage).

Les résultats de cette étude peuvent se résumer comme suit :

- Pour obtenir une bonne rugosité, il n'est pas nécessaire d'utiliser une vitesse de rotation élevée, une petite vitesse d'avance ou une petite profondeur de passe
- Le bon résultat s'obtient par la combinaison appropriée entre ces trois facteurs, c'est ce qui a été montré dans la première par le modèle mathématique élaboré lors de l'expérimentation.
- La résistance à l'usure par abrasion est en corrélation directe avec la dureté et la rugosité obtenues en surface. La rugosité importante en surface induit systématiquement l'augmentation de la vitesse d'usure et donc facilite le décollement de la matière et en conséquence la dégradation du comportement à l'usure abrasive.
- Après déformation de la surface, la dureté augmente suite à la consolidation des propriétés mécaniques en surface par la formation de contraintes résiduelles dues au phénomène d'écroutissage. Dans ce cas, la perte de masse correspond à une combinaison de l'influence de la rugosité de surface et de la dureté obtenue par déformation.
- Par cette étude, on a montré que lorsque la déformation réalisée en surface est faible, le facteur état de surface est prédominant.

Au final, les résultats obtenus dans ce projet d'étude ont permis de comprendre l'impact des paramètres du régime lors de la préparation d'une surface par enlèvement et comment aboutir à une qualité de surface

au moyen de la modélisation par les plans d'expériences. Par ailleurs, ses résultats confirment plusieurs travaux avançant l'importance de la qualité de la surface dans le cas de la tenue à l'usure par abrasion.

Références

- [1] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/surfaces-42463210/etats-de-surface-r1230/>
- [2] Mounira BOUREBIA, Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur " Effet de la rugosité sur les performances d'un système mécanique - approche par fractale " Université Badji Mokhtar- Annaba, 2017.
- [3] JEAN-MARIE – GORGES ; Frottement, usure et lubrification ; 2000.
- [4] Web www.tribologie.free.fr .
- [5] KAPSA et CARTIEN ; Technique de l'ingénieur traité mécanique ; 1986.
- [6] Web www.usureetfrottement.free.fr
- [7] Selma Attabi, Abdelaziz, Himour, Lakhdar Laouar & Amir Motallebzadeh ; Effect of Ball Burnishing on Surface Roughness and Wear of AISI 316L SS ; Journal of Bio- and Tribo-Corrosion volume 7, Article number: 7 (2021).
- [8] A.Chevalier et Bohan, Guide de technicien en productique, Edition HACHETTE Technique, 199
- [9] YAHIAOUI Idris ; Les plans d'expériences (Initiation à la construction et l'analyse des plans) Université A. MIRA - Bejaia2014/2015
- [10] TALHI Seif Eddine, Mémoire de master " Amélioration du fini de surface par usinage - Approche par la dimension fractale" Université Badji Mokhtar Annaba 2021.
- [11] Goupy J , 1999. Plan d'expériences pour surface de réponse, collection Dunod.
- [12] M. Bourebia (2010). Influence des procédés d'usinage sur les rugosités de surface et leurs répercussions sur un contact mécanique, mémoire de magistère, Département de Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar, Annaba
- [13] BENKHOUL HICHAM et BARKA TAHAR, Mémoire de master " Méthodes de protection contre la corrosion" UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2020
- [14] L.Laouar (2009), Mechanical surface treatment of steel- Optimization parameters of regime, Physics Procedia ,2009, 2 , 1213-1221