

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté de Technologie
Département : Génie Mécanique
Domaine : Science et technologie
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master
Thème:

Effet de la qualité de surface sur la tenue à la corrosion-Cas de
l'acier C50

Présentée par : *BOUSSAKTA Roumaïssa*

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

Jury de Soutenance :

BOUCHELAGHEM Abdelaziz	Professeur	Université Badji Mokhtar-Annaba	Président
LAOUAR Lakhdar	Professeur	Université Badji Mokhtar-Annaba	Encadrant
MEKHILEF Slimane	M.C.A	Université Badji Mokhtar-Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

Remerciements

Je tiens à remercier dieu le tout puissant de m'avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Un grand merci à mes chers parents, qui ont toujours été là pour moi, qui m'ont donné un modèle magnifique de labeur et de persévérance, " cher papa, tu es mon idole".

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de mon Encadrant Professeur **LAOUAR Lakhdar** de l'université Badji Mokhtar Annaba, je le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel et ses encouragements.*

*Je tiens à remercier les membres de jury, Professeur Abdelaziz **BOUCHELACHEM** de m'avoir honoré de présider le jury de soutenance, ainsi que le docteur Slimane **MEKHILEF** Maître de conférences, d'avoir examiné le contenu du présent travail.*

Mes remerciements s'adressent également à tous mes professeurs de l'institut d'optique et de mécanique de précision, Université Ferhat Abass-Sétif, ainsi que mes professeurs de département de Génie Mécanique de l'Université Badji Mokhtar-Annaba, pour leur générosités et leurs qualité d'enseignement qu'ils m'ont prodigué.

*J'exprime ma profondeur reconnaissance et remerciements aux collègues doctorants **Mebark Majdi** et **Bouchelaghem Nassim** de m'avoir aidé durant la réalisation de ce travail.*

Mes plus sincères remerciements au personnel de l'entreprise AMM El-Hadjar d'avoir apporté des réponses à toutes mes questions et pour les conseils qu'ils m'ont donné durant le stage.

Tout spécialement, je remercie ma famille dont l'ingéniosité, la patience et les encouragements pour l'avancement de mon travail.

Finalement je remercie tous mes amis et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

Merci.

Dédicaces

A ma chère mère

A mon cher père

A mes Sœurs et mon frère

A mes amis.

Résumé

L'objectif principal de ce travail est de mettre en relief le comportement des pièces mécaniques sous l'effet de la corrosion. Sachant que la surface d'une pièce joue un rôle crucial dans la durée de vie d'une structure mécanique et que dans la plupart des cas elle est obtenue par enlèvement de matière, on se propose alors dans ce projet et dans un premier temps, de rechercher les conditions optimales de coupe (en tournage) d'un acier de nuance C50, pour atteindre une meilleure qualité de surface caractérisé par la rugosité "Ra". Pour ce faire, les méthodes basées sur les plans d'expériences de Box-behnkenont ont été utilisées et des modèles de prédiction ont été dégagés. Dans un second temps, un travail d'investigation a été mené afin de montrer l'interaction de la qualité de surface et la résistance à la corrosion. Des testes de corrosion ont été effectués par les méthodes électrochimiques (Tafel et spectroscopie d'impédance) sur des échantillons préparés par des procédés d'usinage, en l'occurrence, le tournage avec le régime optimal prédit, le polissage et la rectification. Les résultats obtenus ont montré que la capacité de résistance des surfaces soumises à la corrosion dépend de l'aspect de la surface réalisée et du procédé d'usinage.

Mots clés: Qualité de surface, optimisation, corrosion, durée de vie.

Abstract

The main objective of this work is to highlight the behavior of mechanical parts under the effect of corrosion. Knowing that the surface plays a crucial role in the life of a mechanical structure and in most cases it is obtained by removal of material, we then propose in this project as a first step, to seek the optimal conditions of cutting (turning) of a C50 grade steel, to achieve a better surface quality characterized by the roughness "Ra". To do this, methods based on the Box-Behnken experimental plans were used and prediction models have been identified. In a second step, an investigation work was carried out in order to show the interaction of surface quality and corrosion resistance. Corrosion tests were carried out by electrochemical methods (Tafel and impedance spectroscopy) on samples prepared by machining processes in this case, turning with a predicted optimal regime, polishing and rectification. The results obtained showed that the resistance capacity of surfaces subjected to corrosion depends on the appearance of the surface produced and the machining process.

Key words: Surface quality, optimization, corrosion, lifetime.

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو إبراز سلوك الأجزاء الميكانيكية تحت تأثير الصدأ. علما أن سطح الجزء يلعب دورًا مهمًا في العمر الافتراضي للهيكل الميكانيكي وأنه يتم الحصول عليه في معظم الحالات عن طريق إزالة المواد، و لذلك تم أولاً اقتراح البحث عن ظروف القطع المثلى لخراطة الفولاذ من الدرجة C50 ، لتحقيق جودة أفضل للسطح الذي يتميز بخشونة (Ra). للقيام بذلك ، تم استخدام الأساليب القائمة على التصاميم التجريبية (Box-behnken) وتم تحديد نماذج التنبؤ. في الخطوة الثانية، تم إجراء بحث لإظهار التفاعل بين جودة السطح ومقاومة الصدأ. تم إجراء اختبارات الصدأ بالطرق الكهروكيميائية (مطيافية التافل والمقاومة) على العينات المحضرة بعمليات التشغيل، وفي هذه الحالة يتم التحويل بالنظام الأمثل المتوقع، التجليخ والتلميع. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن قدرة مقاومة الأسطح المعرضة للصدأ تعتمد على مظهر السطح المنتج و عملية التشغيل.

الكلمات المفتاحية: جودة السطح ، التحسين ، الصدأ ، عمر افتراضي.

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction Générale..... 1

CHAPITRE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction	3
I.2 Structure mécanique et matériaux	3
I.3 Généralités sur les procédés d'usinage.....	4
I.3.1 Usinage par coupe.....	5
I.3.1.1 Tournage	5
I.3.1.1.1 Opérations de tournage	5
I.3.1.1.2 Matériaux utilisés pour les outils	6
I.3.1.1.3 Conditions de coupe.....	6
I.3.2 Usinage par abrasion.....	7
I.3.2.1 Rectification.....	7
I.3.2.1.1 Procédés de rectification	7
I.3.2.1.2 Outil de rectification (Meule)	9
I.3.2.2 Polissage	10
I.3.2.2.1 Outil de polissage.....	10
I.3.2.2.2 Principe de polissage.....	11
I.4 Etat de surface	11
I.4.1 Importance	11
I.4.2 Défauts d'état de surface.....	11
I.4.3 Les types de défauts de surface.....	12
I.4.4 Paramètres de rugosité	14
I.4.5 Rôle et Fonction de surface.....	15
I.4.6 Relation entre la qualité de surface et la corrosion	15
I.5 Corrosion.....	16
I.5.1 Introduction.....	16
I.5.2 Définition.....	16
I.5.3 Les types de corrosion	17
I.5.3.1 Corrosion chimique.....	17

I.5.3.2 Corrosion biochimique (bactérienne).....	17
I.5.3.3 Corrosion électrochimique.....	18
I.5.4 Forme de corrosion	18
I.5.4.1 Corrosion uniforme.....	18
I.5.4.2 Corrosion localisée	19
I.5.5 Les causes de corrosion	22
I.5.6 Les facteurs de corrosion	23
I.5.7 Influence de la corrosion sur le fonctionnemnt d’une structure mécanique.....	24
I.5.8 Méthodes électrochimiques de mesure de la corrosion.....	25
I.5.8.1 Méthode des droites de Tafel.....	25
I.5.8.2 Spectroscopie d’impédance électrochimique.....	25
I.6 Conclusion.....	26

**CHAPITRE II MATERIELS ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES-PREPARATION
DES ECHANTILLONS-**

II.1 Introduction.....	28
II.2 Equipements utilisés	28
II.2.1 Matériau.....	28
II.2.1.1 Composition chimique	28
II.2.2 Mesure de la Dureté.....	29
II.2.3 Machine-outil	30
II.2.4 Outils de coupe.....	30
II.3 Méthodologie expérimentale	31
II.4 Préparation de la pièce.....	32
II.4.1 Montage de la pièce.....	33
II.4.2 Choix de vitesse de coupe	34
II.4.3 Régime de coupe	34
II.4.4 Mesure de rugosité	35
II.4.5 Traitement des données	37
II.5 Résultats et interprétation	39
II.6 Préparation des échantillons	41
II.6.1 Opération de polissage.....	41
II.6.2 Opération de rectification	42
II.6.3 Mesure de rugosité des échantillons	43

II.7 Conclusion43

CHAPITRE III ESSAI DE CORROSION

III.1 Introduction45

III.2 Matériels utilisés et conditions de travail45

III.3 Résultats.....46

III.3.1 Traitement par "tafel"46

III.3.1.1 Graphe de Tafel.....46

III.3.2 Traitement par "spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS) "47

III.3.2.1 Graphe EIS47

III.4 Interprétation des résultats.....48

III.5 Conclusion.....49

Conclusion Générale 51

Références Bibliographiques..... 53

CHAPITRE I: ETUDE BEBLIOGRAPHIQUE

Figure I.1 Opérations de tournage	5
Figure I.2 Les choix de paramètres de coupe	6
Figure I.3 Environnement du processus de rectification	7
Figure I.4 Rectification plane	8
Figure I.5 Rectification cylindrique	8
Figure I.6 Formes de meule	9
Figure I.7 Structure d'un outil abrasif de polissage	11
Figure I.8 Défauts d'ordre1	12
Figure I.9 Défauts d'ordre2	13
Figure I.10 Défauts d'ordre3	13
Figure I.11 Défauts d'ordre4	13
Figure I.12 Paramètres de rugosité	14
Figure I.13 Phénomène de corrosion	16
Figure I.14 Corrosion uniforme	19
Figure I.15 Corrosion inter granulaire	19
Figure I.16 Corrosion par pique	20
Figure I.17 Corrosion sous contrainte	21
Figure I.18 Fragilisation par l'hydrogène	21
Figure I.19 Corrosion par érosion	22
Figure I.20 Détermination du courant de corrosion par la méthode des droites de tafel	25
Figure I.21 Détermination de la résistance de transfert par spectroscopie d'impédance	26

**CHAPITRE II MATERIELS ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES-PREPARATION
DES ECHANTILLONS-**

Figure II.1 Spectromètre à émission optique (Thermo Fisher)	29
Figure II.2 Duromètre	29
Figure II.3 Tour 1A616	30
Figure II.4 Outils de coupe	31
Figure II.5 Modèle de fonctionnement des paramètres de l'essai	31
Figure II.6 Dessin de définition de la pièce	33
Figure II.7 Montage de la pièce	33
Figure II.8 Rugosimètre2D TR220	35
Figure II.9 Organnigramme fonctionnel	37
Figure II.10 Variation de Ra en fonction de ap et f pour N=1400tr/min	40
Figure II.11 Variation de Ra en fonction de N et f pour ap=1.2mm	40

Figure II.12 Opération de dressage	41
Figure II.13 Opération de tronçonnage	41
Figure II.14 Les échantillons	41
Figure II.15 Polisseuse	42
Figure II.16 Papiers abrasifs	42
Figure II.17 Rectifieuse plane	42
Figure II.18 Rugosimètre RT-10	43

CHAPITRE III ESSAI DE CORROSION

Figure III.1 Schéma et équipements d'essai de corrosion	45
Figure III.2 Echantillons après l'essai de corrosion	46
Figure III.3 Graphe de Tafel	46
Figure III.4 Graphe de spectroscopie d'impédance électrochimique	47
Figure III.5 Echantillon rectifié	48
Figure III.6 Echantillon tourné	49
Figure III.7 Echantillon polis	49

CHAPITRE I : ETUDE BEBLIOGRAPHIQUE

Tableau I.1 Les facteurs principaux de corrosion 23

**CHAPITRE II MATERIELS ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES-PREPARATION
DES ECHANTILLONS-**

Tableau II.1 Composition chimique..... 29

Tableau II.2 Caractéristique du tour 1A616..... 30

Tableau II.3 Matrice de Box-Behnken pour trois facteurs 32

Tableau II.4 Matrice des essais 34

Tableau II.6 Matrice d'expériences..... 35

Tableau II.7 Les valeurs de Ra correspondantes aux régimes..... 36

Tableau II.8 Traitement de matrice des essais 38

Tableau II.9 Les valeurs de rugosité pour chaque procédé 43

CHAPITRE III ESSAI DE CORROSION

Tableau III.1 le courant I (μ A) et le potentiel E (mV) des échantillons..... 47

Tableau III.2 Les valeurs de résistance de la solution et d'échantillon..... 48

Introduction Générale

Une structure mécanique est composée d'un ensemble des pièces liées entre elles pour remplir une fonction donnée. La longévité d'un mécanisme est liée à la qualité de surfaces fonctionnelles surtout lorsqu'elles sont exposées à un milieu agressif comme (la corrosion l'usure etc.). Les éléments de machine sont fabriquées par diverses procédés où le procédé par enlèvement de matière occupe une grande place dans le secteur industriel grâce aux apports techniques et économiques qu'il permet d'offrir. Obtenir des pièces de qualité qui répondent aux exigences techniques tout en minimisant le coût et le temps de fabrication, représente le premier souci du fabricant auquel il doit chercher les solutions d'optimisation et d'amélioration du processus d'usinage. Le premier objectif de ce travail sera d'établir par l'utilisation des méthodes statistiques, en l'occurrence, les plans d'expériences permettant de produire un modèle mathématique de prédiction afin de déterminer les conditions de coupe optimales pour aboutir à une qualité de surface caractérisée par une rugosité "Ra" minimale lors d'une opération de tournage. Le deuxième objectif permet de mettre l'accent sur l'interaction (qualité de surface/corrosion) par l'examen d'échantillons façonnés par trois types de procédés.

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

Dans le premier chapitre nous présentons une étude bibliographique mettant en relief la présentation de différents procédés d'usinage en particuliers par enlèvement de matière, l'importance de l'état de surface dans les mécanismes, et une partie consacrée à la corrosion (définition, cause et types).

Le deuxième chapitre comprend une description du matériel utilisé dans le travail expérimental, essentiellement les machines, Les différentes caractéristiques du matériau traité, et l'appareillage de mesure. Les techniques expérimentales choisies ainsi que la méthodologie suivie, ont été présentés, la modélisation des réponses de sortie, la dernière partie de ce chapitre comprend la préparation des différents échantillons par tournage, rectification et polissage.

Le troisième chapitre est consacré à l'essai de corrosion (description de matériels, les méthodes utilisées, la présentation et l'interprétation des résultats obtenus).

Le mémoire s'achève par une conclusion générale avec perspectives et des références bibliographiques.

Chapitre I
Etude Bibliographique

I.1 Introduction

Le comportement et la durée de vie d'un système mécanique, dépendent des caractéristiques des surfaces et en particulier celles travaillant par contact. La surface d'un corps solide est souvent très sollicitée lors de la transmission de la puissance dans la structure mécanique, 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. L'état de surface constitue un facteur important qui influe sur les performances du système mécanique d'où le choix judicieux des paramètres de fabrication. Ce chapitre présente une partie bibliographique qui regroupe l'étude des différents procédés de fabrication en particulier par enlèvement de matière, la caractérisation de l'état de surface et la présentation de la dégradation de la surface métallique dans un milieu corrosif.

I.2 Structure mécanique et matériaux

La structure mécanique d'un système fait référence à l'organisation et à la disposition des éléments mécaniques qui le composent, ainsi qu'à la manière dont ils interagissent pour réaliser une fonction spécifique. Elle s'intéresse à la façon dont les pièces sont assemblées, les connexions entre elles et les mécanismes internes qui permettent le bon fonctionnement du système.

Les matériaux jouent un rôle crucial dans la construction des structures mécaniques, car ils déterminent les propriétés physiques et mécaniques d'un système. Différents matériaux présentent différentes caractéristiques, telles que la résistance, la rigidité, la ductilité, la ténacité, la durabilité, la conductivité thermique, la conductivité électrique, etc. Une variété de matériaux utilisés tels que les céramiques, les composites, les alliages à base de Fer comme, la fonte et l'acier, ce dernier est le plus employé dans la fabrication des pièces mécanique en raison de sa robustesse et sa résistance. Cependant, les pièces en acier peuvent également être sujettes à différentes forme d'agression comme la corrosion qui peuvent affecter leur intégrité. Ce qui nécessite pour un fonctionnement adéquat et une durée de vie assez importante, des surfaces des pièces bien préparées. Les éléments de machines sont obtenus par différents procédés de mise en forme, dont le procédé par enlèvement de matière est le plus utilisé en

raison des apports techniques et économiques qu'il offre. Néanmoins, la qualité de surface qu'il présente dépend de certains paramètres technologiques du processus employé.

I.3 Généralités sur les procédés d'usinage

Les procédés d'usinage jusqu'à maintenant gardent leur importance dans le secteur industriel, en effet un procédé d'usinage est une méthode qui permet d'enlever la matière d'une pièce brute pour la transformer en une pièce finie avec des dimensions précises et une surface de qualité, Toutefois, il y a plusieurs principes d'usinage et tous varient en fonction des chaînes de relation « pièce-machine-outil » et du repère d'axes.

Les pièces mécaniques produites par différents procédés présentent des nuances très différentes dans leur état de surface. Ces différences permettent une identification aisée des surfaces obtenues par différents procédés. En raison de ses propriétés uniques, l'état d'une surface obtenue par n'importe quel procédé peut être comparé à d'autres surfaces qui est réalisée par le même procédé avec des méthodes simples telles que la mesure de la taille moyenne de ses irrégularités à l'aide des normes actuelles et des techniques de mesure modernes. En effet plusieurs études ont examiné les effets des opérations d'usinage sur les surfaces de pièces constituées de divers matériaux. Ce phénomène est provoqué par la formation de trois zones de déformation plastique : la zone primaire selon le plan de cisaillement des copeaux, la zone secondaire entre le copeau et la face d'attaque de l'outil et la zone tertiaire entre la face en dépouille de l'outil et la nouvelle surface usinée. Cette dernière conserve également une certaine profondeur de déformation. Dans certaines conditions, des arêtes de coupe se forment et il a été rapporté que sa nature instable laisse parfois des débris sur la surface, affectant la finition de la surface. Les zones de déformation lors de la coupe sont très importantes pour les propriétés de la surface nouvellement usinée. Ces zones sont influencées par des facteurs tels que les conditions de coupe, la géométrie de l'outil, le coefficient de frottement à l'interface copeau/face de dépouille de l'outil et le matériau de l'ébauche et de l'outil [1].

Les procédés d'usinage par enlèvement de matière sont extrêmement variés (fraisage, tournage, rectification, etc.) et leur distinction se fait suivants trois critères essentiels:

- La date de leurs apparitions; les procédés traditionnels et les non traditionnels.
- Les phénomènes physiques correspondant ; procédés par coupe, par abrasion, et procédés physico-chimique.

- Le type des machines et les outils utilisés.

I.3.1 Usinage par coupe

Le principe de ce procédé consiste à obtenir la forme finale par arrachements de petits morceaux de matière (copeaux), qui est réalisé par l'action d'un outil Coupant à titre d'exemple (tournage, fraisage). [2]

I.3.1.1 Tournage

Le tournage est parmi les procédés d'usinage les plus utilisés consiste à l'obtention des pièces de forme cylindriques ou coniques par enlèvement de matière avec des outils coupants sur une machine appelées (tours).

La pièce usinée est animée d'un mouvement de rotation dit mouvement de coupe et l'outil est animé d'un mouvement de translation appelé mouvement d'avance qui permet de définir le profil de la pièce [3].

I.3.1.1.1 Opérations de tournage

Ils existent deux familles d'opérations de tournage:

- Les opérations de tournage extérieur ;
- Les opérations de tournage intérieur.

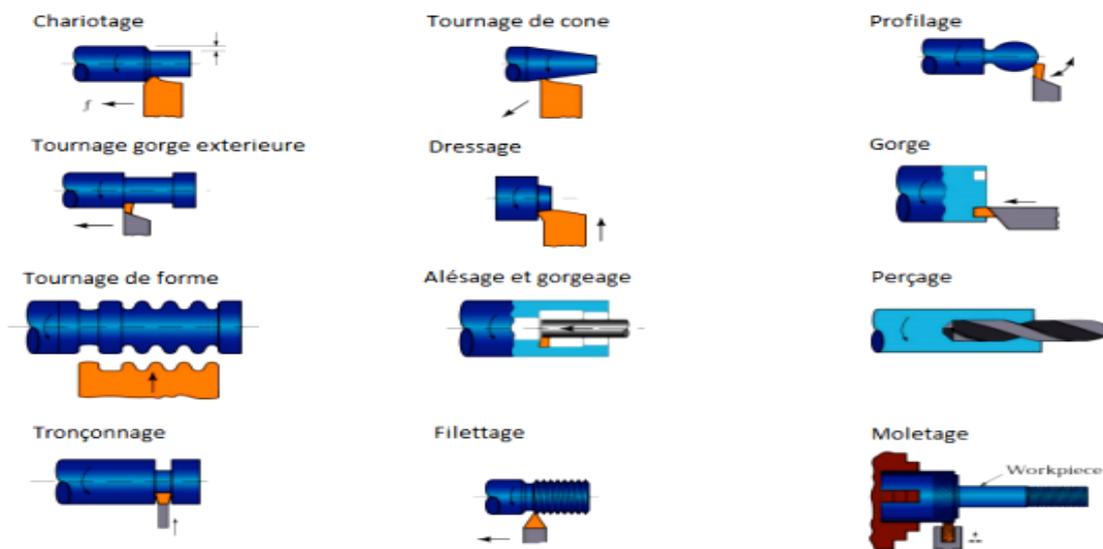


Figure I.1 Opérations de tournage

I.3.1.1.2 Matériaux utilisés pour les outils

- **L'acier rapide**

L'acier rapide (HSS - High Speed Steel), qui est un acier fortement allié, est très employé pour la production d'outils de coupe. Les caractéristiques qui le rendent intéressant sont sa dureté d'environ 65 HRc et sa ténacité qui lui confère une bonne longévité.

- **Les carbures métalliques**

Les carbures métalliques. Rentrant dans cette catégorie les alliages composés de tungstène (60-90%), titane et tantale (1-35%) et de cobalt ou nickel (5-15%), mais aussi d'autres matières en plus faibles quantités comme le molybdène ou le vanadium. La fabrication du métal dur est réalisée par frittage, on en fait le plus souvent des plaquettes qu'on fixe sur le corps de l'outil par brasage ou avec une vis. Certains outils de petites dimensions sont fabriqués entièrement en métal dur [3].

I.3.1.1.3 Conditions de coupe

Avant de réaliser une opération de tournage, il est nécessaire de bien choisir les conditions de coupe pour obtenir un bon résultat (précision, état de surface ...).

Il y a plusieurs critères qui permettent de définir les conditions de coupe notamment :

- Le type de la machine (mécanisme, gamme des vitesses,...)
- La puissance de la machine
- La matière de l'outil (ARS, carbure...)
- La matière usinée (acier, aluminium...)
- Le type de l'opération (perçage, chariotage, surfaçage...)
- L'utilisation éventuelle de lubrification (destiné à refroidir ou/et à diminuer le frottement)[4].

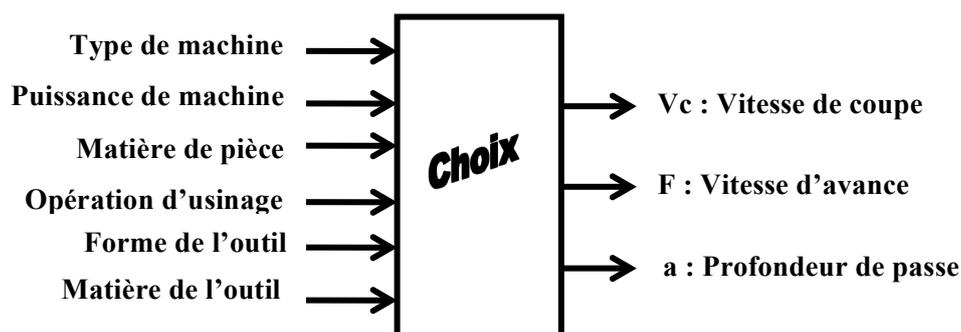


Figure I.2 Les choix de paramètres de coupe

I.3.2 Usinage par abrasion

Dans ce procédé l'enlèvement de matière se fait par l'action d'un grand nombre de grains abrasifs. Exemple (rodage, la rectification, polissage)[2].

I.3.2.1 Rectification

La rectification est un processus de finition où la mise en forme se fait par enlèvement de matière par un phénomène d'abrasion (au moyen d'une meule), Cette opération lui confère sa côte définitive (le plus souvent exprimé en microns). Contrairement à l'usinage traditionnel (enlèvement de copeaux par outils coupants), la rectification permet l'usinage de précision dimensionnelle élevé grâce aux principes de l'abrasion. L'analyse du processus de rectification peut se décomposer en différentes approches, issues des trois sous-systèmes pouvant être isolés dans l'environnement du procédé : la meule, la pièce et les grains.(fig I.3)

La rectification s'effectue sur une machine outil conçue à cet effet : la rectifieuse. Il s'agit de rectifier donc, d'uniformiser la surface volume de façon à éliminer la friction quelle pourrait engendrer en entrant en contact avec une autre pièce [5].

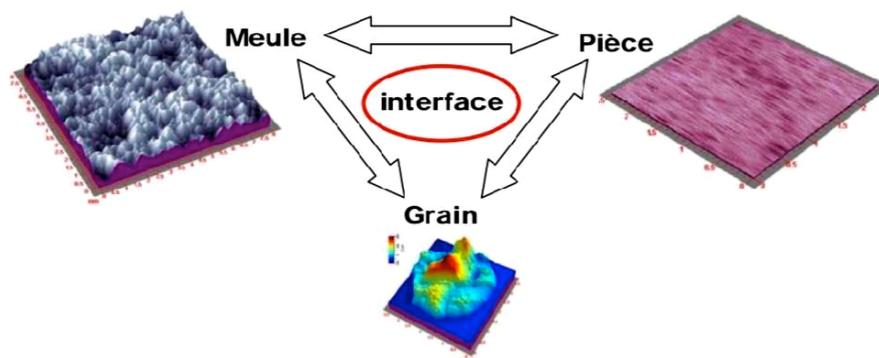


Figure I.3 Environnement du processus de rectification

I.3.2.1.1 Procédés de rectification

a) Rectification plane

La rectification plane est l'expression technique qui rapporte à l'usinage des surfaces planes, profilées ou asymétriques d'une pièce tenue en place sur un plateau magnétique de la table, et

qui passe et repasse sur la meule en rotation, elle consiste en un meulage horizontal de façon à éliminer à plusieurs reprises des couches de matériaux allant de 20 à 40 μm [5].

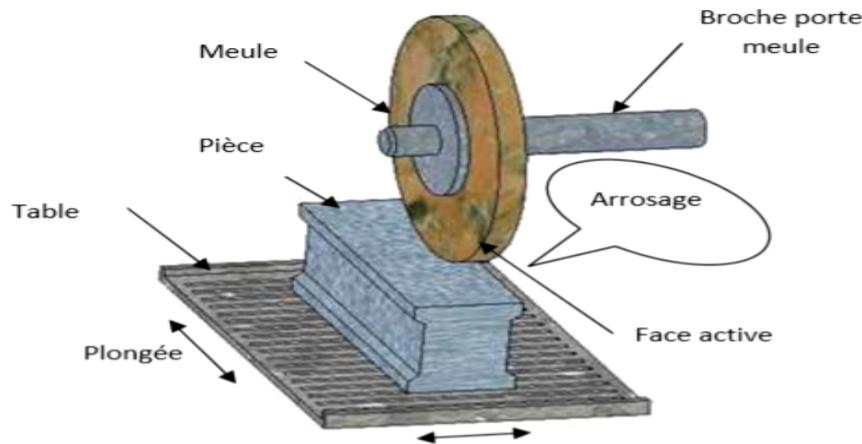


Figure I.4 Rectification plane

b) Rectification cylindrique

Elle sert à rectifier les surfaces cylindriques. Lorsqu'il faut rectifier la périphérie d'une pièce à fin d'obtenir des dimensions précises et un fini de qualité, on fait appel à la rectifieuse cylindrique (voir figure I.5)[5].

Il y a deux genres de machines qui conviennent pour la rectification cylindrique:

- Rectifieuse à points.
- Rectifieuse sans points.

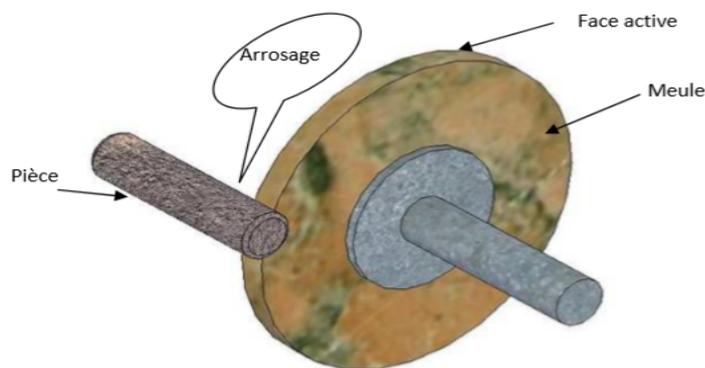


Figure I.5 Rectification cylindrique

I.3.2.1.2 Outil de rectification (Meule)

Les principales caractéristiques qui différencient les meules sont :

- La forme
- Les dimensions
- La spécification

- **Différents types de meules**

- Standard: Corindon à base de Al₂O₃ (fritté, normal, semi-supérieur, supérieur, monocristallin, à billes creuses...)
- Nitrure de Bore Cubique (abréviation: CBN. Le nom commercial donné par General Electric en 1969: Borazon)
- Diamant

- **Forme de meule**

La forme du meule dépend des travaux aux quels elle est destinée (rectification intérieurs, extérieurs, cylindrique ou bien plane)

Les meules les plus courants sont:

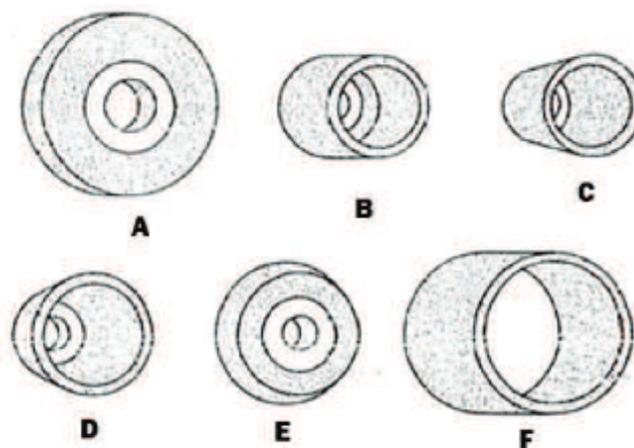


Figure I.6 Formes de meule

A: meule plate

B: meule tambour ou à boisseau droit

D: meule assiette

E: meule conique ou à biseau

F : meule cylindrique ou couronne [6].

- **Abrasifs**

L'abrasif est l'outil effectif, le liant servant de support. Pour juger les propriétés d'une meule

On utilise 4 groupes d'abrasifs synthétiques:

- Le corindon (oxyde d'aluminium)
- Le carbure de silicium
- Le diamant
- Le nitrure de bore [2].

I.3.2.2 Polissage

Le polissage est un procédé de finition permettant de retirer, par abrasion, les défauts, rayures ou aspérités de la pièce. Poussé à son plus haut niveau de finition, nous obtenons des états de surface de grande qualité (**effet miroir**) [7].

I.3.2.2.1 Outil de polissage

Un outil de polissage est un outil portant de nombreux points de coupe. Il est constitué de grains abrasifs représentant les points de coupe et maintenus ensemble par une matrice de liant et séparés par des pores (Voir Figure I.7). L'abrasif étant une substance capable d'user, de polir par frottement, on peut le définir comme un corps dur cristallisé susceptible, par une action mécanique, de découper des copeaux dans un corps moins dur que lui. Il est ainsi caractérisé par ses propriétés mécaniques, sa stabilité physico-chimique, sa forme et ses dimensions. Il n'y a que les abrasifs et les machines de hautes précisions qui permettent le polissage aux tolérances serrées et l'obtention des états de surface hautement finis, exigés par l'industrie. Il est important de mentionner que la dureté, la taille et la forme des particules, mais aussi la vitesse de rotation, la pression et la nature du liant, sont autant de facteurs qui influencent l'efficacité des abrasifs [8].

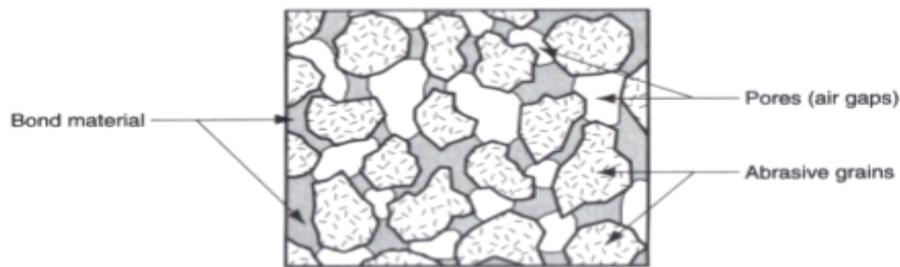


Figure I.7 Structure d'un outil abrasif de polissage

I.3.2.2.2 Principe de polissage

Le polissage proprement dit implique un frottement contrôlé de l'abrasif contre la surface de la pièce avec une vitesse et une pression appropriées, il commence généralement avec des abrasifs plus grossiers pour enlever les défauts et les rugosités plus importantes. Ensuite, des abrasifs plus fins sont utilisés pour affiner la surface et obtenir une finition plus lisse. Pendant le polissage, il est important de maintenir la de utilisé un lubrifiant ou un liquide de refroidissement pour éviter une surchauffe qui pourrait endommager la pièce ou affecter la qualité de surface. Le polissage peut être réalisé manuellement, automatique ou semi automatique [8].

I.4 Etat de surface

I.4.1 Importance

Le terme "état de surface" englobe en général l'aspect géométrique et physico-chimique de la surface [9].

On appelle états de surface les irrégularités des surfaces dues au procédé d'élaboration de la pièce (usinage, moulage, etc.). Ils sont, le plus souvent, mesurés avec des appareils à palpeur à pointe de diamant, appelés profil mètres, qui relèvent le profil de la surface, (Tolérances et écarts dimensionnels, géométriques). Dans le bureau d'étude l'état de surface est un élément très important car il représente la cotation d'une pièce indiquant la fonction, la rugosité, la géométrie, et l'aspect des surfaces usinées [10].

I.4.2 Défauts d'état de surface

La capacité d'une pièce à remplir une fonction donnée dépend de nombreux facteurs, dont les caractéristiques de son état de surface. L'état de surface est caractérisé par la géométrie microscopique de la surface, qui joue un rôle important des fonctions spécifiques telles que le frottement, le roulement, le glissement, l'étanchéité, et parfois même l'aspect. Afin d'inspecter

la pièce. Les caractéristiques de la surface doivent être quantifiées et définies sur le contour de la surface [11].

La norme NF E 05-515 distingue six ordres de défauts de surface, du plus grand au plus petit:

1. Écart de forme (échelle macroscopique) : défaut de planéité, de rectitude, de circularité.
2. Ondulation (échelle macroscopique) : l'écart entre les crêtes est compris entre 0,5 et 2,5mm
3. Stries et sillons (défauts périodiques ou pseudopériodiques, échelle microscopique) l'écart entre les crêtes est inférieur ou égal à 0,5 mm.
4. Défauts localisés (échelle microscopique) : marque d'outil, arrachement, fente, piqûre
5. Structure cristalline (échelle méso-scopique).
6. Réseau cristallin (échelle nano-scopique)

I.4.3 Les types de défauts de surface

Il existe 4 ordres pour caractériser l'état de surface, (au plus l'ordre augmente au plus les Défauts étudiés sont petits) [12].

Ordre 1 : défauts de (forme/positon) est représenté par la ligne moyenne. Ce sont des défauts dus à des écarts de forme (rectitude, cylindricité, etc.) et de position (perpendicularité, parallélisme, etc.). Provenant de la déformation de la pièce pendant et après l'usinage, des défauts de bridage, de la flexion des éléments de la machine, d'un mauvais guidage des éléments mobiles ou de l'usure des organes de la machine-outil.

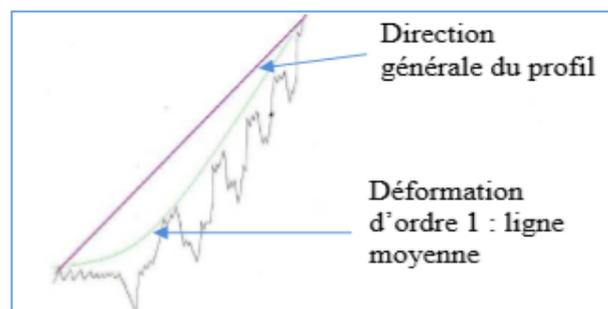


Figure I.8 Défauts d'ordre 1

Ordre 2 : défauts macrographiques, ondulation :

Défauts plus petits. Ayant l'aspect général d'une ondulation, et provenant de l'avance par tournage ou en fraisage, de vibrations de basse fréquence de la pièce ou de l'outil.

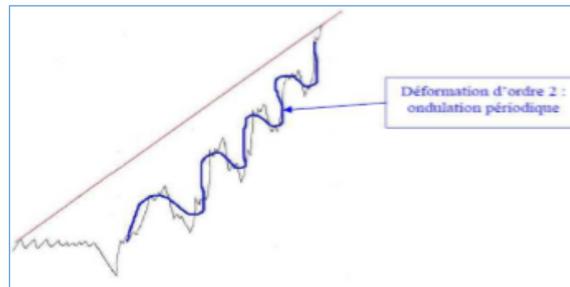


Figure I.9 Défauts d'ordre2

Ordre 3: Défauts micrographiques, rugosité: Stries et sillons dus à l'avance de l'arête coupante de l'outil, ou à l'avance par tour de la pièce, ou à des vibrations haute fréquence.



Figure I.10 Défauts d'ordre3

Ordre 4: arrachement de matière. Fentes et piqûres dues à des marques d'outil ou à des vibrations haute fréquence

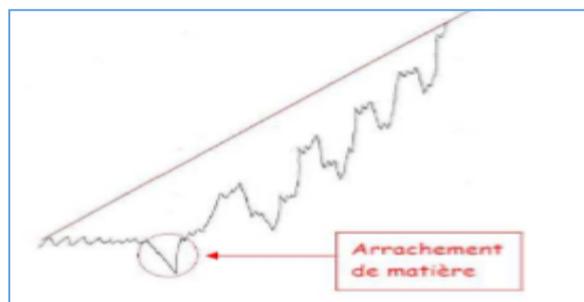


Figure I.11 Défauts d'ordre4

L'ensemble des défauts de 3ème et 4ème ordre constituent la rugosité de la surface.

I.4.4 Paramètres de rugosité

Les paramètres d'état de surface sont :

- MM : Ligne moyenne indiquant la direction générale du profil
- L : Longueur de base servant de mesure et de calcul des paramètres de rugosité
- YP : Hauteur d'un pic par rapport à MM
- YV : Profondeur d'un creux par rapport à « MM »
- Rp, Rv (ou Rm) : Hauteur, Profondeur maxi des pics et creux, par rapport à « MM »
- RT : Rti (ou Ry) Ecart max sur la longueur d'évaluation, ($Ry=Rp+Rm$)
- Rtm: Moyenne des Rti sur la longueur totale d'évaluation
- Ri : Profondeur élémentaire de la rugosité
- R : Profondeur moyenne de la rugosité (moyenne Ri sur la longueur d'évaluation)
- Rmax : Profondeur maximum de la rugosité
- Rz : Hauteur des irrégularités sur 10 points (moyenne des valeurs absolues des 5Yp et 5Yv les plus grands, sur 5 segments d'évaluation consécutifs).
- Ra : Moyenne arithmétique des écarts de profil par rapport à la ligne moyenne, représente la valeur moyenne des distances des pointes successives.
- Si : Pas de saillies locales du profil
- Smi : Pas des irrégularités du profil (moyenne des Smi sur la longueur de base).

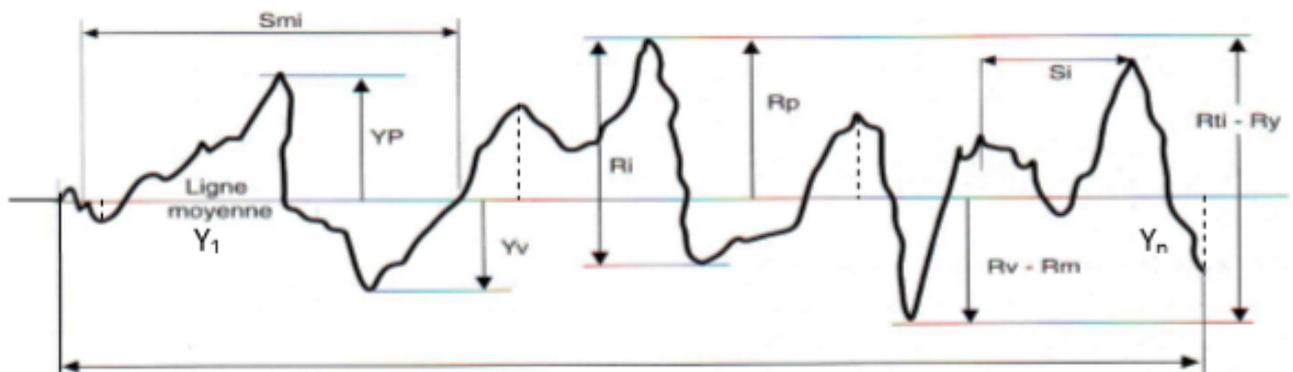


Figure I.12 Paramètres de rugosité

I.4.5 Rôle et Fonction de surface

Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.) [2].

Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication

La surface fonctionnelle d'une pièce peut remplir 16 fonctions

Surface de contact avec une autre pièce :

- Frottement de glissement lubrifié (FG),
- Frottement à sec (FS),
- Frottement de roulement (FR),
- Frottement fluide (FF),
- Résistance au matage (RM),
- Étanchéité dynamique avec ou sans joint (ED),
- Étanchéité statique avec ou sans joint (ES),
- Ajustement fixe avec contrainte (AC),
- Adhérence, collage (AD) ;
- Surface libre, indépendante :
- Générée par la coupe d'un outil (OC),
- Résistance aux efforts alternés (EA),
- Résistance à la corrosion (RC),
- Destinée à recevoir un revêtement, peinture (RE),
- Destinée à recevoir un dépôt électrolytique (DE),
- Mesure (ME),
- aspect (AS).

I.4.6 Relation entre la qualité de surface et la corrosion

La qualité de surface d'un matériau peut avoir un effet significatif sur son comportement dans un milieu corrosif. Lorsqu'une surface présente des imperfections telles que des fissures, des rayures, des porosités ou des dépôts, ces zones peuvent servir de sites préférentiels pour l'initiation et la propagation de la corrosion. Les défauts de surface peuvent également piéger l'humidité, les contaminants et les produits corrosifs, augmentant ainsi la vitesse de corrosion.

Donc une surface propre et uniforme est essentielle pour minimiser les risques de ce phénomène.

I.5 Corrosion

I.5.1 Introduction

Comme tous les matériaux de construction, l'acier parmi les matériaux métalliques qui tend à se dégrader superficiellement lorsqu'il est exposé à des milieux corrosifs comme le sol, l'air et les environnements marins. En effet, le phénomène de la corrosion touche pratiquement toutes les réalisations de l'ingénieur, des plus grandes au plus petites: production de l'énergie, construction, transport, secteur médical, l'électronique, etc. Dans les pays industrialisés les conséquences de la corrosion ne résident pas seulement dans le coût économique (gaspillage de matière première, énergie et temps) [13] [14].



Figure I.13 Phénomène de corrosion

I.5.2 Définition

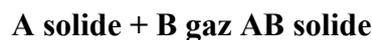
Le nom « corrosion » vient du latin « corroder » qui signifie ronger ou attaquer. En effet, la corrosion est une dégradation du matériau ou de ses propriétés (physicochimiques, mécaniques, etc.) par interaction chimique avec le milieu environnant. Cette définition admet que la corrosion est un phénomène nuisible car il détruit l'état de surface d'un 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.) [14].

I.5.3 Les types de corrosion

Selon la nature de l'environnement avec lequel le matériau interagit, la corrosion peut être classée en trois catégories principales : chimique, biochimique, électrochimique

I.5.3.1 Corrosion chimique

Il s'agit d'une réaction hétérogène entre la phase solide (métal) et la phase gazeuse. Le processus d'oxydoréduction de la corrosion chimique se déroule dans le domaine atomique avec le milieu ambiant en l'absence d'électrolyte. Donc la corrosion purement chimique donc ne fait 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 H₂S 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 [15].

I.5.3.2 Corrosion biochimique (bactérienne)

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 [15].

I.5.3.3 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 appel 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'oxydoréduction.

- 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 [15].

I.5.4 Forme de corrosion

Au point de vue morphologique, la corrosion peut être divisée en deux grandes formes: localisée et uniforme (généralisée).

I.5.4.1 Corrosion uniforme

C'est l'aspect de corrosion le plus rencontré dans la pratique, mais c'est l'aspect aussi le moins dangereux, car le métal est attaqué sur toute la surface et avec la même vitesse de corrosion. Les causes peuvent être chimiques, électrochimiques ou encore mécaniques. L'attaque de la surface sera très importante si cette dernière est rugueuse. A l'échelle macroscopique on ne

distingue pas les lieux cathodiques des lieux anodiques, la surface entière du métal est simultanément cathode et anode. La corrosion non uniforme est celle qui n'est pas répartie sur toute la surface [16].

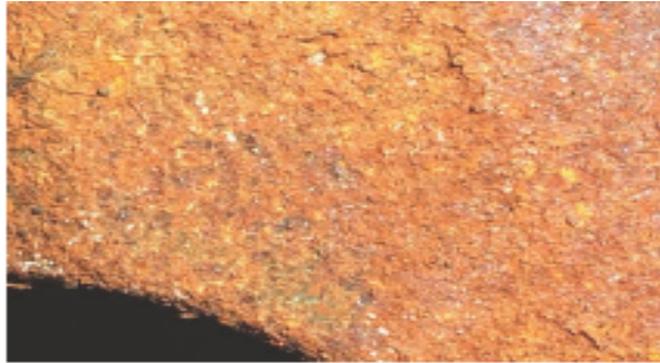


Figure I.14 Corrosion uniforme

I.5.4.2 Corrosion localisée

La corrosion localisée est la forme la plus insidieuse. Elle survient sur une partie du métal qui représente un lieu spécifiquement anodique, clairement distingué, dont la surface est très faible devant le reste de la structure métallique qui constitue la zone cathodique. En effet, pour une perte de poids minimale, ce type de corrosion peut être catastrophique. En pratique, la corrosion localisée provient d'une hétérogénéité du matériau ou de l'environnement. Elle pose souvent plus de problème que la corrosion uniforme [17].

Les différents types de la corrosion localisée sont :

a) Corrosion inter granulaire (inter cristalline)

C'est une attaque sélective aux joints de grains, souvent, il s'agit de phases qui ont précipitées lors d'un traitement thermique [18]. Donc le produit de corrosion se trouve aux joints de grains. L'attaque du métal s'effectue en profondeur, le long des joints de grains, ce qui conduit à une microfissure, alors la surface ne présente aucune altération

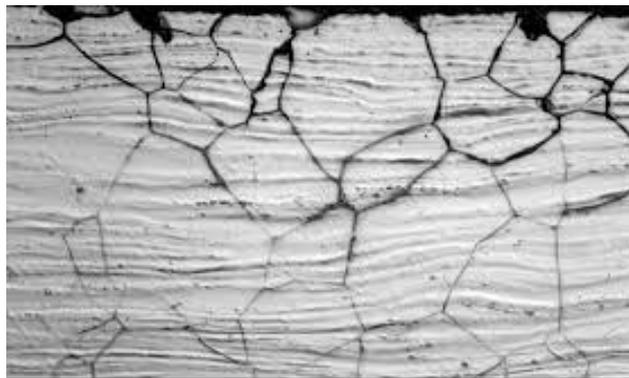


Figure I.15 Corrosion inter granulaire

b) Corrosion par piqûres

La corrosion par piqure caractérisé par une attaque très localisée qui se traduit à la surface du métal par la formation de trous étroits, et qui peuvent progresser rapidement en profondeur. L'origine des piqûres est liée à la présence d'hétérogénéité, qui en surface, détermine la formation de piles locales. Bien que la quantité du métal corrodé soit faible, ce type de corrosion est très dangereux car il se produit en profondeur et peut conduire à la perforation des tôles même épaisses. L'hétérogénéité de la surface est due à des défauts du film passif qui favorisent la mise à nu locale du métal, il en résulte la formation d'une micro-pile entre le métal mis à nu qui joue le rôle d'anode, donc se corrode et le métal passif qui constitue la cathode. Les défauts du film passif ont pour origine la présence d'inclusions dans le métal d'ions agressifs tels que les chlorures provenant de la solution et absorbés à la surface métallique ou une cause extérieure liée à l'utilisation du matériau (rayures) [15].

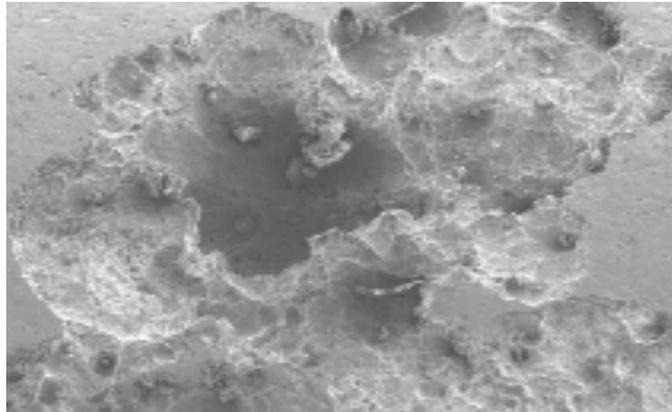


Figure I.16 Corrosion par piqure

c) Corrosion sous contrainte (C.S.C)

Il s'agit d'un type de corrosion tout à fait général qui se produit sous l'action commune d'une contrainte mécanique et d'un milieu corrosif. En l'absence de la contrainte, le phénomène ne se produit pas. La C.S.C se manifeste sous la forme de fissures qui peuvent être intergranulaires, soit transgranulaires. Les contraintes peuvent être, d'origine interne, provenant des opérations de mises en forme et des traitements thermiques, ou d'origine externe, qui résultent des conditions d'utilisation.

Les facteurs qui influent sur la C.S.C sont les contraintes, la nature du milieu environnant, le temps, l'état de surface et la température [15].

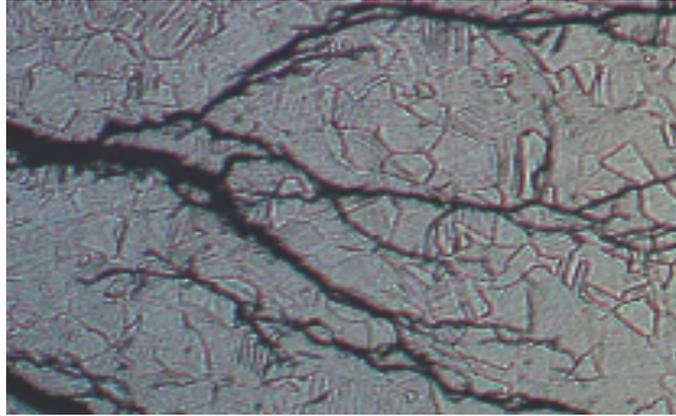


Figure I.17 Corrosion sous contrainte

d) Corrosion par crevasse (caverneuse)

Elle peut apparaître lorsqu'une pièce métallique est au contact d'un électrolyte dont le renouvellement n'est pas assuré : interstices entre matériaux de même nature, dépôts divers, sous matériau isolants, etc. Le processus de développement de la corrosion par crevasse (caverneuse), n'est pas fondamentalement différent de celui de la corrosion par piqûres. Cependant, la cinétique et la morphologie de l'attaque sont toutes autres. Celle-ci s'étend en largeur à la surface de l'interstice ou sous le dépôt, et non pas en profondeur comme pour les piqûres[14].

e) Fragilisation par l'hydrogène

L'hydrogène est un élément qui peut aisément diffuser dans les métaux et altérer leurs propriétés mécaniques. Ce phénomène a des conséquences pratiques considérables car il a de multiples occasions de pénétrer dans les aciers (élaboration, décapage, soudage, dépôts galvaniques, utilisation en milieu humide, hydrogène sulfuré, etc.) et il en résulte parfois, des ruptures catastrophiques immédiates ou différées selon les moyens de s'en prémunir[14].



Figure I.18 Fragilisation par l'hydrogène

f) Corrosion érosion

Elle est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de matière. Elle a souvent lieu sur des métaux exposés à l'écoulement rapide de fluide (air, eau, etc.). La plupart des métaux et alliages y sont sensibles, en particulier les métaux mous (cuivre, plomb, etc.) ou ceux dont la résistance à la corrosion dépend de l'existence d'un film superficiel (aluminium, aciers inoxydables) [17].



Figure I.19 Corrosion par érosion

g) Corrosion galvanique

Se connue aussi sous le nom de corrosion bimétallique, elle est causée par la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux et que le métal le moins résistant se détériore.

h) Corrosion sélective

Est l'oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse.

I.5.5 Les causes de 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[15].

I.5.6 Les facteurs de corrosion

Les phénomènes de corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs classés en quatre groupes principaux [14].

Tableau I.1 les facteurs principaux de corrosion

Facteurs de milieu corrosif	Facteurs métallurgique	Facteurs définissent les conditions d'emploi	Facteurs dépendant du temps
-Concentration du réactif	-composition de l'alliage	-Etat de surface	-vieillessement
-Teneur en oxygène	-Procédés d'élaboration	-Forme des pièces	-Tensions mécaniques
-pH du milieu	-Impuretés	-Emploi d'inhibiteur	-Modification des revêtements
-Température	-Traitement thermique	-Procédés d'assemblage	Protecteurs
-Pression	-Traitement mécanique		

I.5.7 Influence de la corrosion sur le fonctionnement d'une structure mécanique

L'effet de la corrosion sur le fonctionnement des pièces dans une structure mécanique peut être significatif et peut avoir plusieurs conséquences négatives :

-Réduction de la résistance mécanique : La corrosion peut entraîner une détérioration des propriétés mécaniques des matériaux, tels que la réduction de la résistance à la traction, de la ductilité et de la ténacité. Cela peut rendre les pièces mécaniques plus fragiles et plus susceptibles de se déformer, de se fissurer ou de se rompre sous des charges normales de fonctionnement.

-Altération des dimensions et des tolérances : La corrosion peut entraîner une modification des dimensions des pièces, ce qui peut avoir un impact sur leur ajustement et leur fonctionnement. Par exemple, une corrosion uniforme sur une surface peut entraîner une diminution de l'épaisseur de la pièce, ce qui peut affecter son ajustement avec d'autres pièces ou interférer avec les mécanismes de mouvement prévus.

-Augmentation de la friction et de l'usure : Les dépôts de corrosion ou les surfaces rugueuses résultant de la corrosion peuvent entraîner une augmentation de la friction entre les surfaces en contact, ce qui peut augmenter l'usure des pièces. Cela peut entraîner une détérioration prématurée des surfaces de frottement, une perte d'efficacité du mouvement et une diminution de la durée de vie des pièces.

-Problèmes de fonctionnement : La corrosion peut entraîner des problèmes de fonctionnement des pièces mécaniques. Par exemple, dans les systèmes de transmission, la corrosion des engrenages, des arbres ou des roulements peut entraîner des accrocs, des bruits anormaux ou une perte de puissance transmise. De même, dans les systèmes de fluides, la corrosion des canalisations, des vannes ou des pompes peut provoquer des fuites, une diminution du débit ou une obstruction des conduits.

-Réduction de la durabilité et de la fiabilité : La corrosion affaiblit les matériaux et peut réduire la durée de vie des pièces mécaniques. Des pièces corrodées ont une résistance réduite et sont plus susceptibles de se dégrader ou de se casser prématurément. Cela peut entraîner des pannes imprévues, des coûts de maintenance élevés et des temps d'arrêt prolongés des équipements [19].

I.5.8 Méthodes électrochimiques de mesure de la corrosion

Toutes les méthodes électrochimiques d'analyse de la vitesse de corrosion sont des méthodes indirectes basées sur l'étude des relations entre l'intensité du courant traversant la surface de l'électrode étudiée et son potentiel électrochimique. Les principaux avantages de ces méthodes par rapport aux méthodes non électrochimiques sont: le temps de mesure relativement court et la possibilité d'établir un suivi de la vitesse instantanée de corrosion. Elles permettent de plus une analyse des mécanismes des réactions de corrosion [20].

Les deux méthodes suivantes sont les plus utilisées

I.5.8.1 Méthode des droites de Tafel

Il s'agit en fait d'une méthode d'extrapolation basée sur l'équation $I=f(E)$ de Butler-Volmer. Par conséquent, les hypothèses nécessaires à l'établissement de cette équation sont à l'origine des limites liées à l'exploitation de cette technique.

Si on représente la courbe de polarisation en coordonnées $\log I=f(E)$ (fig I.20), l'intersection des droites anodique et cathodique, extrapolées au potentiel de corrosion, donne la densité de courant de corrosion i_{corr} [17].

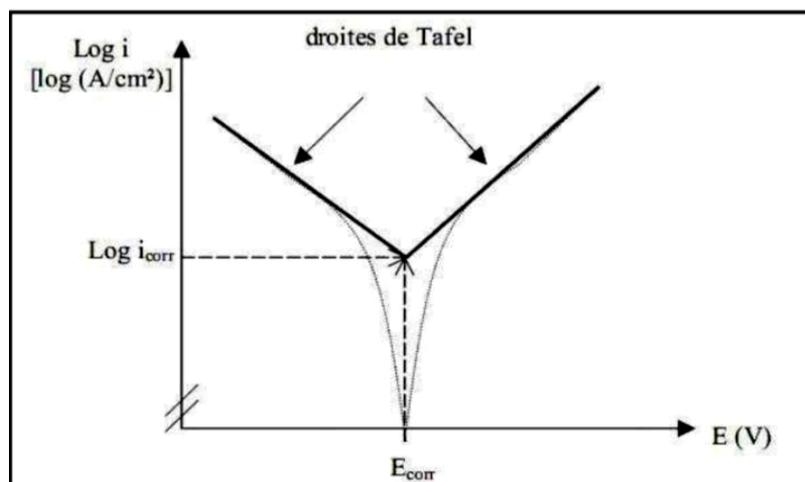


Figure I.20 Détermination du courant de corrosion par la méthode des droites de tafel

I.5.8.2 Spectroscopie d'impédance électrochimique

Les méthodes électrochimiques classiques présentent l'inconvénient de négliger certaines composantes caractéristiques de l'interface métal/solution et de ne pas pouvoir séparer et analyser les étapes élémentaires d'un processus complexe. C'est le cas en particulier des

termes capacitifs ou selfiques de la double couche électrochimique. D'autre part, ni la méthode de Tafel, ni celle de Stern et Geary ne permettent de déterminer directement la contribution de la résistance de la solution à l'évaluation des courants de corrosion. L'impédance électrochimique est la réponse de l'interface à un signal sinusoïdal (i ou E), surimposé à un signal continu et le système métal/solution peut alors être assimilé à un circuit électrique.

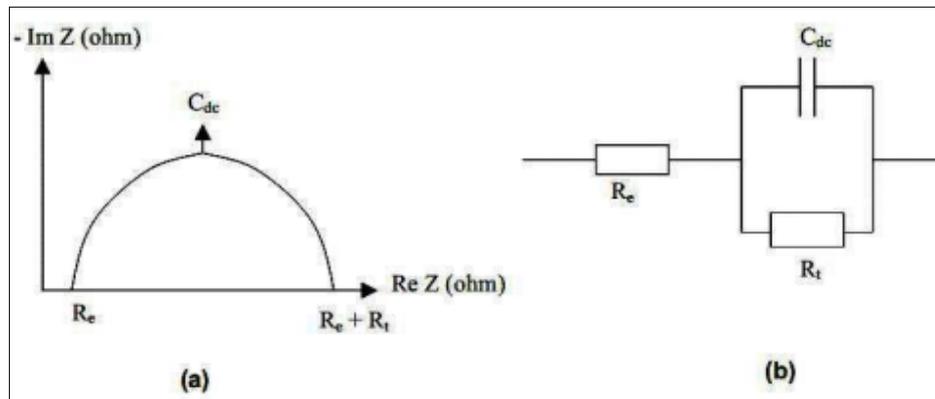


Figure I.21 Détermination de la résistance de transfert par spectroscopie d'impédance

Les principales applications en laboratoire de cette technique d'étude restent l'estimation de la résistance de polarisation et l'étude des mécanismes élémentaires de corrosion, mais la spectroscopie d'impédance électrochimique permet également de séparer les différentes composantes, à savoir la résistance d'électrolyte (R_e) et la résistance de transfert (R_t), qui peut être différente de la résistance de polarisation. La détermination du courant de corrosion s'effectue alors à partir de cette relation[17].

$$I_{\text{corr}} = \frac{B}{R_t} \text{ avec } B = \frac{b_a \times b_c}{2.3(b_a + b_c)} \dots \quad (I.1)$$

Les mesures d'impédance sont intéressantes car elles peuvent permettre d'explicitier les mécanismes de corrosion. Toutefois, elles nécessitent un appareillage spécifique (analyseur de fonction de transfert) et leur exploitation est toujours plus délicate que pour la méthode précédente.

I.6 Conclusion

A partir de la recherche bibliographique, on peut conclure que la qualité de surface joue un rôle important dans le bon fonctionnement et la durabilité d'un système mécanique surtout

dans un environnement agressif. Les procédés de fabrication des surfaces ont été présentés et argumentés. Par ailleurs, la dégradation superficielle des surfaces dans un milieu corrosif a été exposée et explicitée en mettant l'accent sur ses conséquences sur le fonctionnement des pièces dans la structure mécanique. Dans les prochains chapitres, des travaux d'expérimentation et de simulation seront développés et nous proposons d'examiner l'effet de la qualité de surface produite par usinage (tournage, rectification et polissage) sur le comportement dans un milieu corrosif.

Chapitre II

Matériels et Techniques Expérimentales

-Préparation des échantillons-

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, en particulier dans un environnement corrosif.

Dans ce chapitre, les moyens de préparation des échantillons (machines-outil, outil), les équipements de caractérisations ainsi que l'appareillage de mesure sont exposés. Pour la réalisation de l'expérimentation, nous avons utilisé 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). Le paramètre de sortie envisagé est la rugosité "Ra". La finition des surfaces des échantillons a été réalisée par les opérations suivantes:

- Par tournage au moyen du régime optimal obtenu lors de la préparation de la pièce, opération très utilisée, connu pour sa grande productivité, disponibilité de l'outillage, et qui est relativement économique.
- Par rectification, opération très utilisée permettant d'assurer une grande qualité de surfaces
- Par polissage, offrant une meilleure finition de la surface

II.2 Equipements utilisés

II.2.1 Matériau

Le matériau utilisé pour cette étude expérimentale est le C50, c'est un acier non allié en raison de son teneur de manganèse qui est inférieure à 1% [21].

II.2.1.1 Composition chimique

L'analyse chimique du matériau a été réalisée au niveau du 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

C	Mn	Si	P	S	Ti	Ni	Cr	Mo	V	FE%
0.50	0.61	0.24	0.006	0.006	0.001	0.006	0.02	0.001	0.003	98.5

II.2.2 Mesure de la Dureté

Les mesures de dureté ont été réalisées sur un duromètre (figure II.2) au niveau de department de métallurgie, Les résultats obtener sont:

- HB=330 kgf/mm²
- HV=317.28 kgf/mm²



Figure II.2 Duromètre

II.2.3 Machine-outil

Le tour qui a servi pour effectuer les essais est un tour à charioter et à fileter, modèle 1A616 de puissance 5,5 kW (figure II.3).



Figure II.3 Tour 1A616

Tableau II.2 Caractéristique du tour 1A616

Avance mm/tr	Vitesse de rotation tr/min	Puissance de la machine KW
0,037- 052	9-1800	5,5

I.5.7 Outils de coupe

Les outils utilisés lors la finition de la pièce sont:

- Outil de tronçonnage pour réalisée les gorges (figure II.4. a)
- Outil à charioter à plaquette en carbure métallique (figure II.4. b)



a) Outil à tronçonner b) outil à charioter

Figure II.4 Outils de coupe

II.3 Méthodologie expérimentale

*Méthode de plan d'expérience

L'objectif est de voir la variation de la qualité de surface obtenues en fonction de trois paramètres de régime de coupe (N, f, a). Ces derniers représentent les paramètres d'entrée du système MODOP selon la figure (II.5). Au moyen d'un modèle mathématique de Box Behnkende trois facteurs qui sera établie, la réponse du système en l'occurrence la qualité de surface est représentée par "Ra, l'étude comprenait un total de 15 essais comme le montre le tableau II.3.

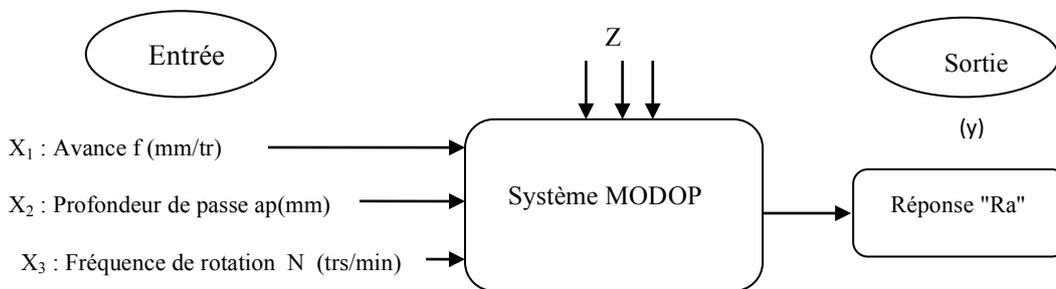


Figure II.5 Modèle de fonctionnement des paramètres de l'essai

Z: paramètres constants: température, montage.....etc.

Tableau II.3 Matrice de Box-Behnken pour trois facteurs

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

Ce type de plans d'expériences, possède la propriété de séquent alité et permet de:

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

II.4 Préparation de la pièce

L'étude à été menée sur une pièce cylindrique préparé selon les plans de Box Behnken par tournage sur un tour qui indiquée sur la figure (II.3), au sein du Département de mécanique dans l'université Badji Mokhtar Annaba de longueur L=358mm et diamètre D= 32mm en 17 paliers (15 paliers d'essai, un palier sera établie par régime optimal et l'autre de réserve), de largeur 13 mm séparée par des gorges de diamètre 30mm et 6mm de largeur.

La figure II.6 illustre le dessin de définition de pièce

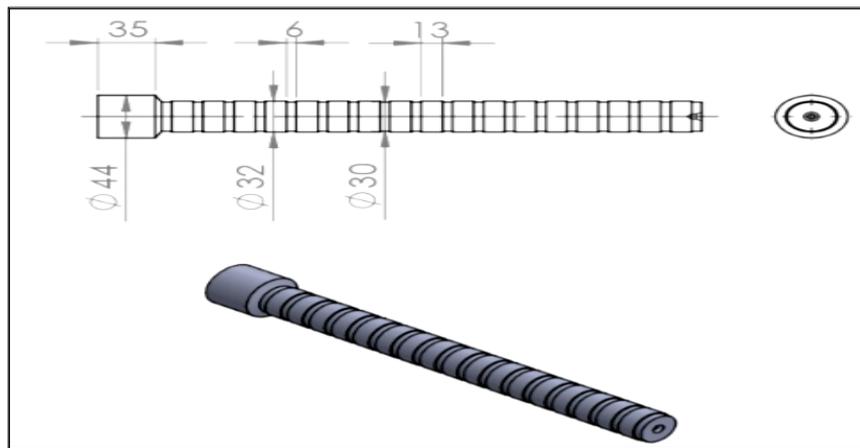


Figure II.6 Dessin de définiton de la pièce

II.4.1 Montage de la pièce

Au cours d'expérience (opération de tournage, réalisation des gorges), afin de garantir la rigidité du système. La pièce est maintenue sur un montage mixte

$$L^{0.75} / D \leq 2$$

La pièce : $L=358\text{mm}$, $D= 32 \text{ mm}$ $L^{0.75} / D = 358^{0.75} / 32 = 2.57$, donc le système est semi rigide

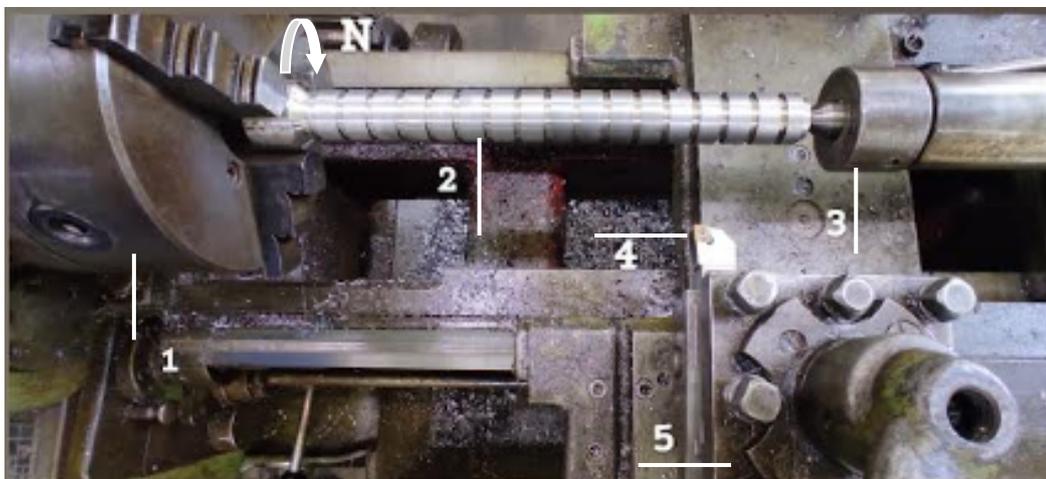


Figure II.7 Montage de la pièce 1-mandrin 2-pièce 3-contre pointe 4-outil de coupe 5-porte outil

II.4.2 Choix de vitesse de coupe

Les valeurs de la vitesse de coupe sont:

Vitesse de coupe $V_{cmin}=80$ (m/min), $V_{cmoy} = 110$ (m/min) et $V_{cmax}=160$ (m/min) [22].

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

$$N = \frac{1000v_c}{\pi D}$$

$N_{min}=796$ (tr/min), $N_{moy}=1094$ (tr/min) et $N_{max}= 1592$ (tr/min);

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

$N_{min}= 710$ (tr/min), $N_{moy}=1120$ (tr/min) et $N_{max}=1400$ (tr/min).

II.4.3 Régime de coupe

Le régime de coupe a été choisi en fonction du matériau à usiner, de l'outil et des caractéristiques de la machine outil

-Profondeur de passe $a : (0, 5 - 1.2)$ mm

-Avance $f : (0, 065- 0, 148)$ mm/tr

-Vitesse de rotation $N: (710- 1400)$ tr/mn

La Matrice des essais est présentée sur le tableau II.4

Tableau II.4 matrice des essais

Facteurs	Paramètres	Niveaux		
		-1	0	+1
X1	N(tr/mn)	710	1120	1400
X2	f(mm/tr)	0,065	0,11	0,148
X3	ap(mm)	0,5	0,85	1,2

La matrice d'expériences de Box-Behnken à trois facteurs et trois niveaux (tableau) prévoit 15 combinaisons consignées dans le tableau II.5.

Tableau II.5 Matrice d'expériences

N°	ap	N	f
1	1,2	710	0,11
2	1,2	1120	0.065
3	1,2	1120	0.148
4	1,2	1400	0.11
5	0,85	710	0.065
6	0,85	710	0,148
7	0,85	1120	0,11
8	0,85	1120	0,11
9	0,85	1120	0,11
10	0,85	1400	0.065
11	0,85	1400	0.148
12	0,5	710	0.11
13	0,5	1120	0.065
14	0,5	1120	0,148
15	0,5	1400	0,11

II.4.4 Mesure de rugosité

Pour la mesure de rugosité nous avons opté pour le critère (Ra), pour cela nous avons utilisé un rugosimètre2D type TR220



Figure II.8 Rugosimètre 2D TR220

Les valeurs moyennes des rugosités Ra mesurées pour chaque palier et correspondant à chaque régime sont présentées dans le tableau II.6.

Tableau II.6 Les valeurs de Ra correspondantes aux régimes

N°	ap	N	f	Ra(moy)
1	1,2	710	0,11	1,04833333
2	1,2	1120	0.065	1.391
3	1,2	1120	0.148	4.03633333
4	1,2	1400	0.11	1.25733333
5	0,85	710	0.065	1.931
6	0,85	710	0,148	3.51433333
7	0,85	1120	0,11	1.45166667
8	0,85	1120	0,11	1.31833333
9	0,85	1120	0,11	1.05966667
10	0,85	1400	0.065	1.137
11	0,85	1400	0.148	3.601
12	0,5	710	0.11	1.663
13	0,5	1120	0.065	1.94666667
14	0,5	1120	0,148	3.214
15	0,5	1400	0,11	1.29866667

La rugosité "Ra" varie dans l'intervalle suivant :

- Ra min =1.04 μ m correspondant au régime N=710 tr/min, f= 0.11 mm/tr, ap=1.2 mm
- Ra max=4.03 μ m correspondant au régime N=1120 tr/min, f= 0.148 mm/tr, ap=1.2 mm

II.4.5 Traitement des données

Les étapes permettant le traitement des données et l'obtention du modèle sont illustrées sur l'organigramme de la figure II.9.

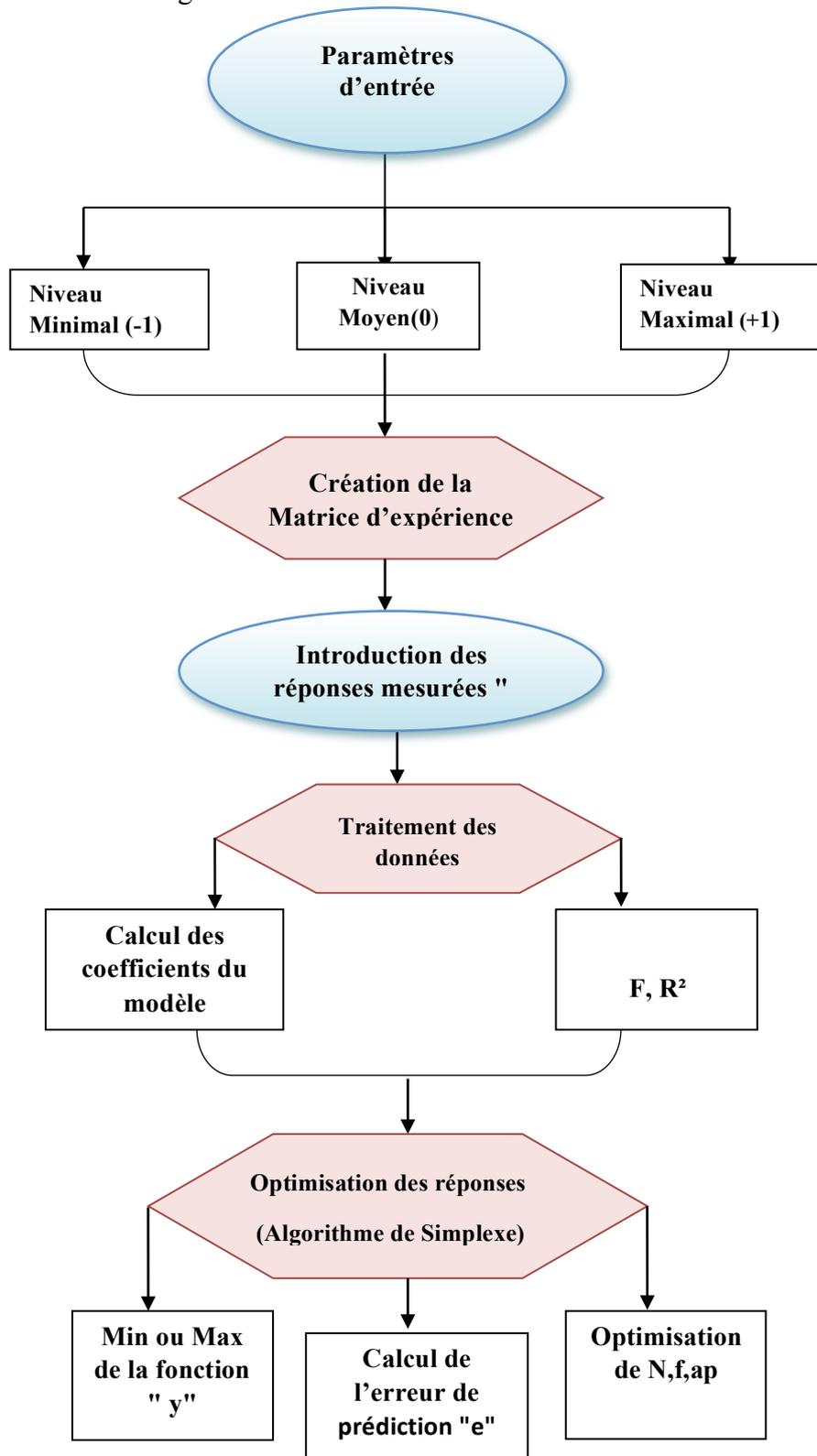


Figure II.9 organigramme fonctionnel

Le traitement de matrices des essais relatives au paramètre de sortie "Ra" par les plans de Box-behnken , fonctionnant sous Matlab, est illustré respectivement sur le tableau II.7.

Tableau II.7 Traitement de matrice des essais

	Facteur N°1	Facteur N°2	Facteur N°3	Réponse
Essai N°1 :	0.5	710	0.11	1.663
Essai N°2 :	1.2	710	0.11	1.048
Essai N°3 :	0.5	1400	0.11	1.298
Essai N°4 :	1.2	1400	0.11	1.257
Essai N°5 :	0.5	1120	0.065	1.946
Essai N°6 :	0.5	1120	0.148	3.214
Essai N°7 :	1.2	1120	0.065	1.391
Essai N°8 :	1.2	1120	0.148	4.036
Essai N°9 :	0.85	710	0.148	3.514
Essai N°10 :	0.85	1400	0.065	1.137
Essai N°11 :	0.85	710	0.065	1.931
Essai N°12 :	0.85	1400	0.148	3.601
Essai N°13 :	0.85	1120	0.11	1.451
Essai N°14 :	0.85	1120	0.11	1.318
Essai N°15 :	0.85	1120	0.11	1.059

Génération du modèle mathématique :

$$1.276+(-0.048625)*x1+(-0.10788)*x2+(0.995)*x3+(0.1435)*x1x2+(0.34425)*x1*x3+(0.22025)*x2*x3+(0.07075)*(x1)^2+(-0.03025)*(x2)^2+(1.3)*(x3)^2+e$$

Test de Qualité :

Test de Fisher: 1.23041, R²: 0.996975

Réponse Optimisée :

Facteur N°1: 1.2, Facteur N°2: 1400, Facteur N°3: 0.148

Réponse Optimisée: 4.16299 ± 0.251466

• **Le modèle mathématique**

Après traitement des données un modèle mathématique de second ordre est obtenue qui indiqué par l'équation (II.1) permet de décrire la relation entre les paramètres de sortie (rugosité Ra) et paramètres d'entrées (régime de coupe N, ap, f), ce modèle est capable de prédire les résultats de rugosité Ra :

$$Ra=1.276+(-0.048625)*x1+(-0.10788)*x2+(0.995)*x3+(0.1435)*x1x2+(0.34425)*x1*x3+(0.22025)*x2*x3+(0.07075)*(x1)^2+(-0.03025)*(x2)^2+(1.3)*(x3)^2+ e \quad (II.1)$$

Le coefficient de détermination R^2 a été calculé à 0.99, indiquant une forte corrélation entre les résultats modélisés et expérimentaux, par conséquent le modèle peut être considéré comme représentatif des résultats obtenus, étant donné que le coefficient est proche de 1

Le régime optimal qui en découle pour la valeur minimale de la rugosité $R_{amin}=0.83 \mu\text{m} \pm 0.16 \mu\text{m}$ est :

$N=1400 \text{ tr/min}$; $f=0.083 \text{ mm/tr}$; $a_p=1.09 \text{ mm}$

Le régime qui en découle pour la valeur maximale de la rugosité $R_{amax}=4.16 \mu\text{m} \pm 0.25 \mu\text{m}$ est :

$N=1400 \text{ tr/min}$; $f=1.148 \text{ mm/tr}$; $a_p=1.2 \text{ mm}$

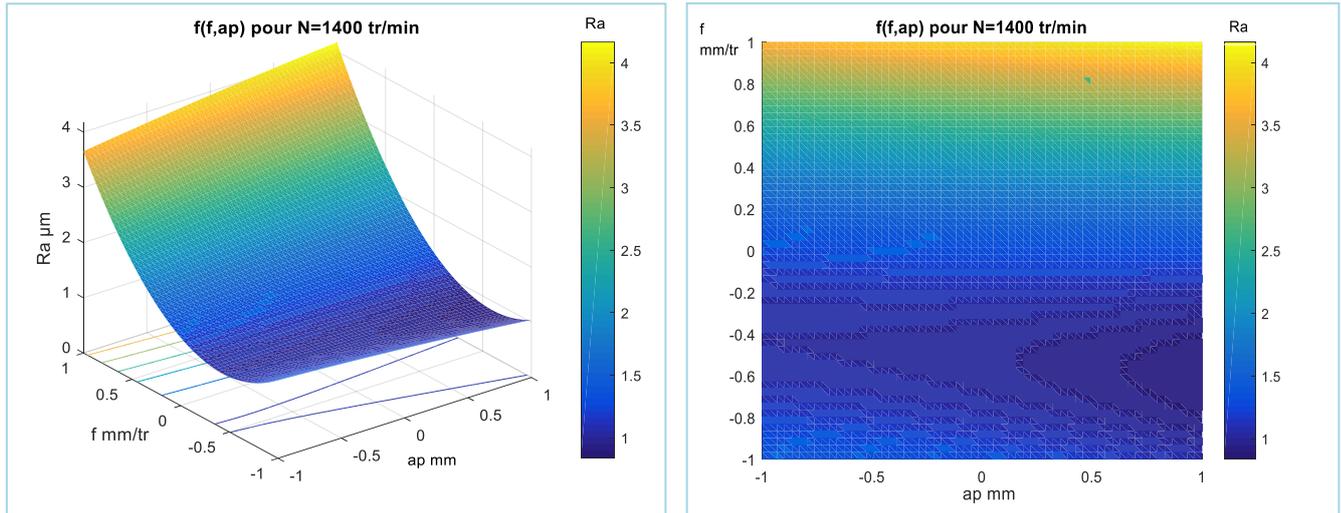
- **Validation de modèle**

Les paramètres ($a_p=1,09\text{mm}$; $f=0,083\text{mm/tr}$; $N=1400\text{tr/min}$) qui ont prédit la rugosité minimale ont été utilisés. Les résultats prévus par le modèle pour la rugosité étaient de $0,83\pm 0,16 \mu\text{m}$, tandis que la rugosité mesurée expérimentalement pour ces paramètres était de $1,08 \mu\text{m}$. Cette résultat nous permis de constater et d'observer qu'il ya une erreur de $0.1 \mu\text{m}$ ce qui permis de confirmer le modèle de prédiction est valide.

II.5 Résultats et interprétation

*Effet des paramètres de coupe sur la rugosité "Ra"

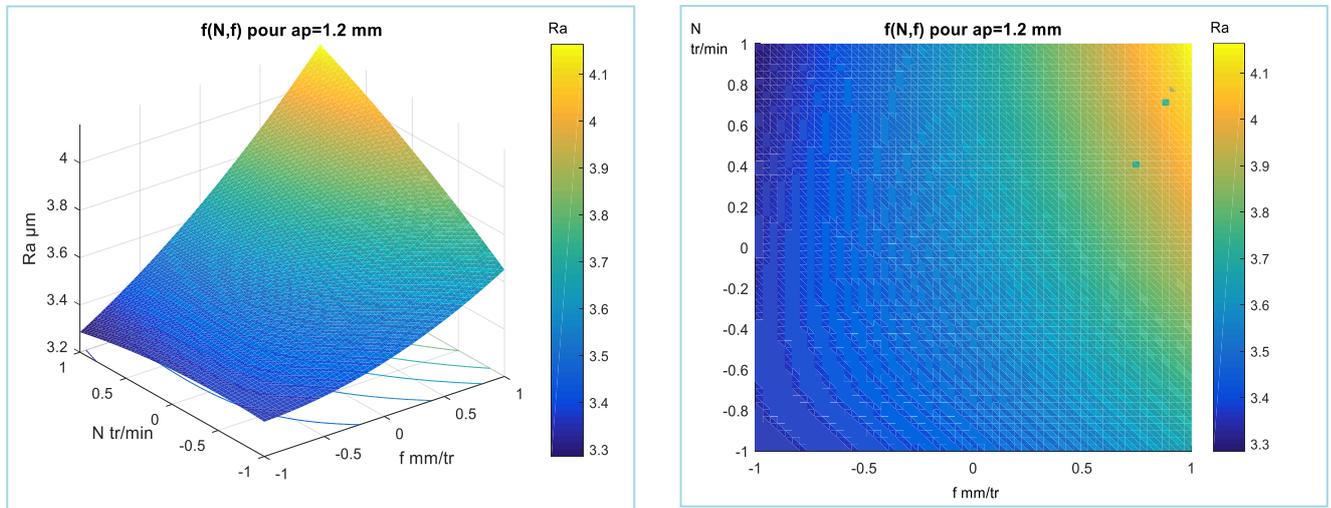
Le modèle mathématique a permis d'obtenir les courbes 3D et les courbes d'iso-réponses, illustrant la variation de la rugosité "Ra" en fonction des paramètres des régimes de coupe (N , f et a_p). Les courbes représentées sur la figure (II.10) montrent la variation de la rugosité «Ra» en fonction de l'avance « f » et la profondeur de passe « a_p » pour $N=1400 \text{ tr/min}$. On remarque que la variation de l'avance " f " admet une influence significative sur la rugosité, lorsque sa valeur diminue la rugosité s'améliore. On constate que la profondeur de passe « a_p » n'a aucune influence sur la rugosité, pour cela la valeur $a_p=1.2$ a été fixée afin d'estimer l'effet de la fréquence de rotation et l'avance ce qui est montré dans la figure (II.11).



a) Courbe 3D

b) Courbes d'isoréponses

Figure II.10 Variation de Ra en fonction de ap et f pour N=1400tr/min



a) Courbe 3D

b) Courbes d'isoréponses

Figure II.11 Variation de Ra en fonction de N et f pour ap=1.2mm

Les courbes représentées sur la figure (II.11), montrent la variation de la rugosité «Ra» en fonction de l'avance «f» et la vitesse de Rotation «N» pour $ap=1,2$ mm, on observe toujours que l'avance "f" a un effet significatif sur la rugosité. Pour les faibles valeurs de l'avance, la vitesse de rotation n'a aucune influence sur "Ra", à l'inverse elle a un effet important pour les valeurs élevées de l'avance.

II.6 Préparation des échantillons

La préparation des échantillons est réalisée par deux opérations, le dressage avec l'outil à dresser sur la figure (II.12) et le tronçonnage avec l'outil à tronçonner figure (II.13) pour trois échantillons.



Figure II.12 Opération de dressage



Figure II.13 Opération de tronçonnage



Figure II.14 Les échantillons

Les trois échantillons (figure II.14) ont été réalisés avec le régime optimal :

$N=1400$ tr/min ; $f=0.083$ mm/tr ; $a_p=1.09$ mm.

Un échantillon sera rectifié et l'autre fini par polissage.

II.6.1 Opération de polissage

Le traitement par polissage effectué au sein de département de la métallurgie. Au moyen d'une polisseuse qui indiqué sur la figure (II.15) avec un papier abrasif de différentes granulométries 120, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200,2400 figure (II.16)



Figure II.15 Polisseuse



Figure II.16 Papiers abrasifs

II.6.2 Opération de rectification

L'opération de la rectification est réalisé dans (Les AMM) au complexe d'EL-Hadjar sur une rectifieuse plane qui indiqué dans la figure (II.17) d'un moteur de type 4AA50B4Y3 avec 90W de puissance.

Le régime de coupe adopté est:

Avance de table = 10 à 25 m/min

Nmeule = 1350trs/min

a (profondeur de passe)= 0.1mm



Figure II.17 Rectifieuse plane

II.6.3 Mesure de rugosité des échantillons

Les mesures des rugosités (R_a) ont été effectuées par un rugosimètre modèle RT-10 comme indiqué sur la figure (II.18), sur trois points de chaque pastille avec 120° , en prenant une longueur d'évaluation ($L=4,0$ mm) et une longueur de coupure de ($\lambda=0,8$ mm). Les valeurs moyennes de chaque échantillon ont été calculées et sont indiqués dans le tableau II.8.



Figure II.18 Rugosimètre RT-10

Les valeurs des différentes rugosités pour chaque procédé indiqués dans le tableau II.8.

Tableau II.8 les valeurs de rugosité pour chaque procédé

Tournage (régime optimal)	Rectification	Polissage
0.960 μm	0.427 μm	0.043 μm

II.7 Conclusion

La réalisation de la partie expérimentale a été scindée en trois étapes:

- La première étape englobe, le choix du matériau, la préparation de la pièce selon les plans d'expériences de Box behnken et la mesure de rugosité
- La deuxième étape enclave le traitement des données et l'interprétation des résultats
- La troisième étape a été consacrée à la préparation des échantillons suivant trois procédés d'usinage (tournage, rectification, polissage)

L'expérimentation menée au moyen des plans de Box-Behnken a permis d'atteindre un modèle mathématique de prédiction et d'optimisation des régimes permettant d'aboutir à une bonne qualité de surface (rugosité " R_a " minimale). Par ailleurs, le modèle offre la possibilité

de montrer l'influence des différents paramètres du régime de coupe (N , f , a_p) sur la réponse de sortie "Ra". Le prochain chapitre sera consacré à l'essai de corrosion sur les échantillons ainsi préparés.

Chapitre III
Essai De Corrosion

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'essai de corrosion via les méthodes électrochimiques (Tafel et spectroscopie d'impédance électrochimique), sur trois échantillons réalisés par différents procédés que nous avons considéré dans le deuxième chapitre: un échantillon réalisé par tournage avec les paramètres optimaux de rugosité minimale, le deuxième fini par polissage avec du papier abrasif et le troisième rectifié sur une rectifieuse plane. Le travail consiste en la comparaison de l'effet de la qualité de surface réalisée par les procédés sus mentionnés sur la tenue à la corrosion. L'essai de corrosion est réalisé au sein de département de métallurgie.

III.2 Matériels utilisés et conditions de travail

La réalisation de l'essai est effectuée avec un potentiostat galvanostat de marque Gamry (type 600+), ainsi qu'une cellule à trois électrodes (électrode de référence Ag/AgCl, contre électrode en platine et l'électrode de travail) et une solution de chlorure de sodium (NaCl) avec 3.5% de concentration, comme illustré sur la figure (III.1).

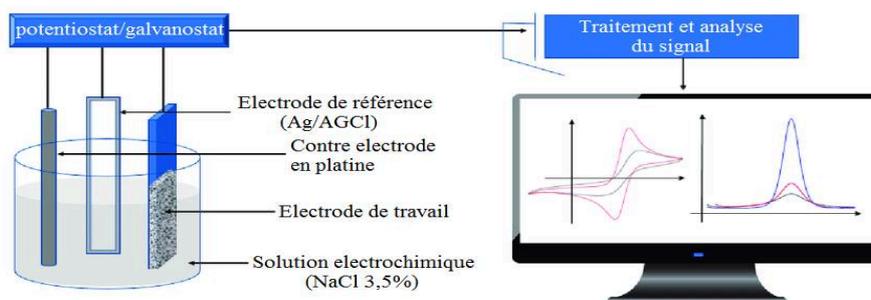


Figure III.1 Schéma et équipements d'essai de corrosion

Chaque échantillon est immergé dans la solution et soumis à un potentiel de circuit ouvert (OCP) pendant une durée de 1 heure. Ce qui permet de réaliser le test de Tafel et d'impédance électrochimique (EIS).

III.3 Résultats

La figure III.2 illustre les échantillons après l'essai de corrosion

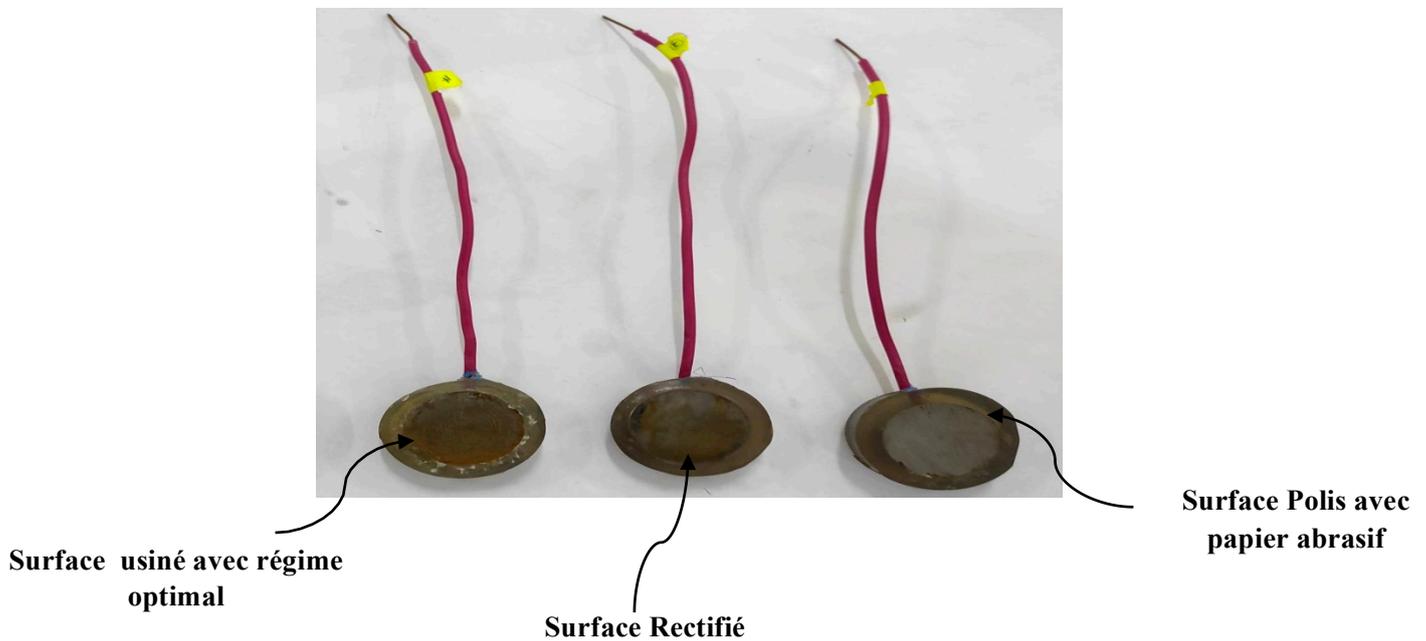


Figure III.2 Echantillons après l'essai de corrosion

III.3.1 Traitement par "tafel"

La méthode de tafel sert à déterminer le courant et le potentiel de corrosion du métal dans la solution, le traitement est effectué avec Gamry Framwork et EC-lab

III.3.1.1 Graphe de Tafel

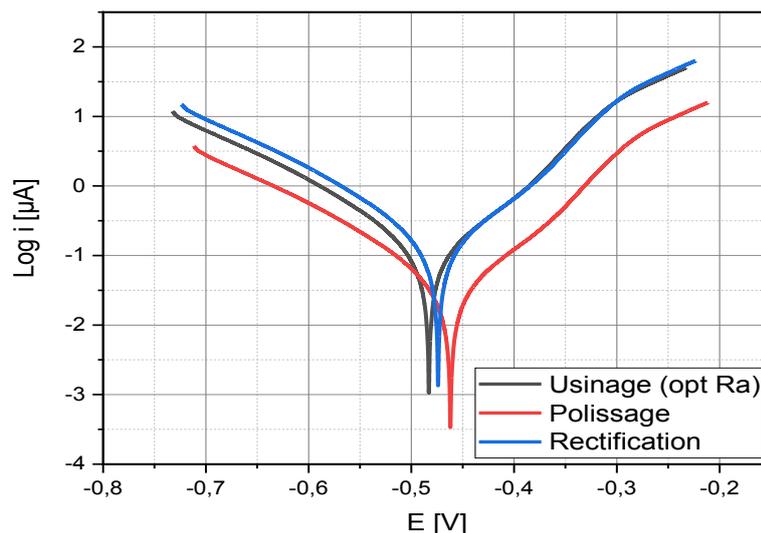


Figure III.3 Graphe de Tafel

Les paramètres obtenus à partir de ces graphiques sont consignés sur le tableau III.1.

Tableau III.1 Le courant I (μA) et le potentiel E (mV) des échantillons

Procédés	Courant i (μA)	Potentiel E (mV)
Polissage	26.33	-461.899
Usinage avec régime optimal	83.277	-482.83
Rectification	104.842	-473.824

III.3.2 Traitement par "spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS) "

La méthode de spectroscopie d'impédance électrochimique permet de déterminer directement la contribution de la résistance de la solution et de la pièce à l'évaluation des courants de corrosion.

III.3.2.1 Graphe EIS

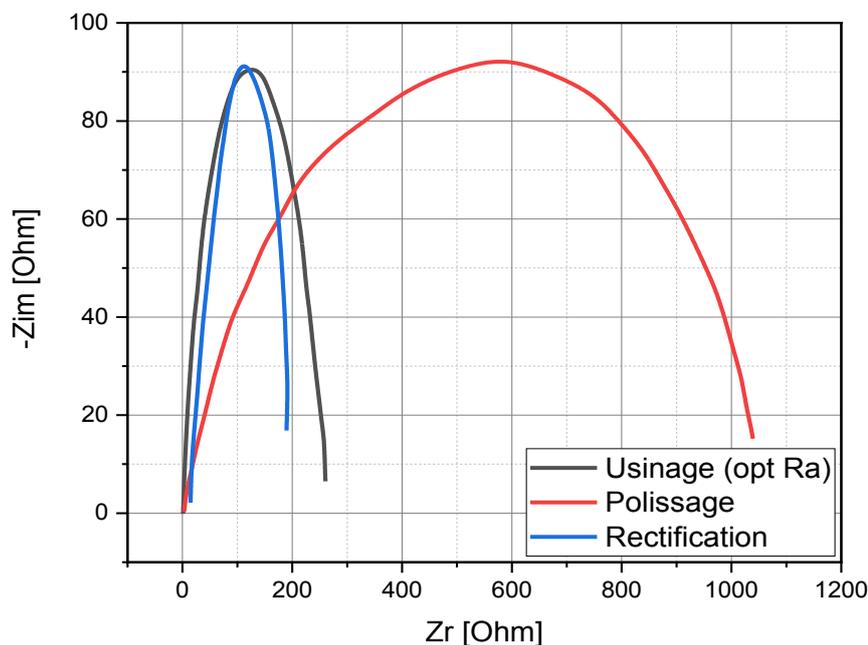


Figure III.4 Graphe de spectroscopie d'impédance électrochimique

Les paramètres obtenus à partir de ces graphiques sont indiqués sur le tableau III.2.

Tableau III.2 Les valeurs de résistance de la solution et d'échantillon

Procédés	Résistance de la solution R sol (Ohm)	Résistance de l'échantillon R ech (Ohm)
Polissage	3.04	1038.03
Usinage avec régime optimal	1.13	260.51
Rectification	14.86	189.72

III.4 Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus par la méthode de tafel et de spectroscopie d'impédance électrochimique, Il ressort que:

- La zone gauche (domaine anodique) des graphes de tafel retrace l'oxydation du matériau ($Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$) où la valeur du courant la plus grande est $i=104.83\mu A$, ce qui est traduit par une faible résistance $R_{ech}= 189.72\Omega$, par les graphiques de EIS. Ce résultat montre que la corrosion la plus intense s'est manifestée sur la surface traitée par rectification. Ceci s'explique par la présence d'une densité importante de sillons occasionnés par le passage de la meule (usinage très fin par micro-outils) comme présentée sur la figure III.5. Ces sillons rapprochés l'un à l'autre, ont pour effet d'augmenter la surface réelle exposée à la corrosion.

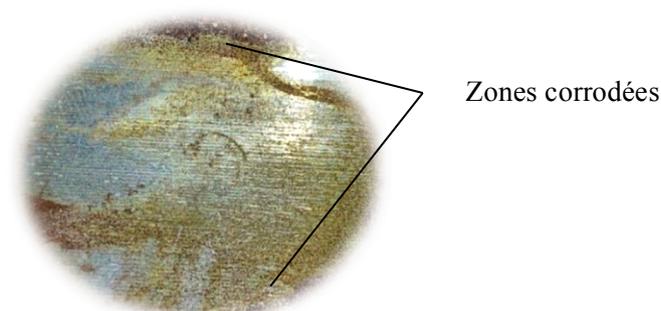


Figure III.5 Echantillon rectifié

- La surface traitée par tournage (dressage) avec le régime optimal correspondant à la rugosité $Ra=0.960$, présente une meilleure résistance à la corrosion que le cas de rectification. En effet, le courant enregistré est $i=82.277\mu A$ et la résistance à la corrosion est $Rech=260.51\Omega$. La corrosion est moins prononcée en raison de la diminution de la surface réelle exposée au produit chimique (voir figure III.6).

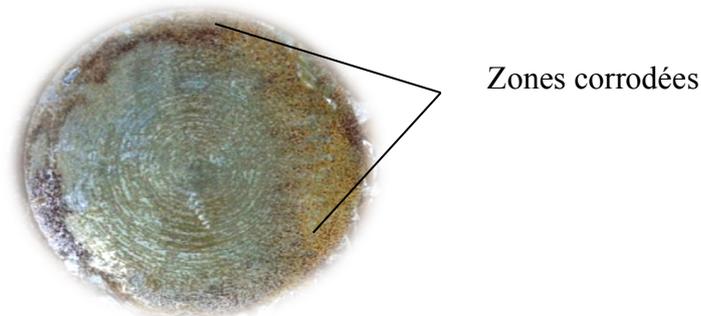


Figure III.6 Echantillon tourné

-L'échantillon fini par l'opération de polissage offre le meilleur résultat (la moins corrodé), en raison de l'absence de micro défauts en surface (voir figure III.7). Ainsi, la surface réelle d'exposition à l'oxydation est la plus réduite.

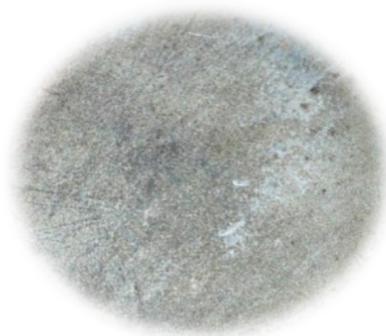


Figure III.7 Echantillon polis

III.5 conclusion

A partir des résultats de l'essai de corrosion, on peut conclure que la surface préparée par polissage offre une meilleure résistance à la corrosion ($Rech=1038.03\Omega$). A l'inverse, celle finie par rectification supporte mal l'agression du milieu corrosif ($Rech=189.72\Omega$).

Relativement au cas de la rectification, la surface produite par tournage a connu une bonne résistance.

Conclusion Générale

Ce travail revêt un caractère expérimental au cours duquel, des échantillons en acier C50 ont été examinés où l'effet de la qualité de surface sur le comportement dans un milieu corrosif a été mis en relief. Une synthèse bibliographique a été présentée, en vue de montrer l'importance des procédés d'usinage en mettant l'accent sur les procédés par enlèvement de matière ainsi que la corrélation de la qualité de surface et la résistance à la corrosion. Dans un premier temps, l'expérimentation a été menée au moyen d'une méthodologie basée sur des plans de Box-Behnken contribuant à la formulation des modèles mathématiques et des simulations numériques (courbes 3D et d'isoreponse). Ce qui a permis d'évaluer l'effet des conditions de coupe sur la qualité de surface réalisée par l'opération de tournage caractérisée par la rugosité "Ra". Dans un second temps, des tests de corrosion ont été opérés par les méthodes électrochimiques (tafel et spectroscopie d'impédance) sur trois échantillons. Les échantillons ont été préparés en premier lieu par tournage avec le régime optimal établi, par la suite un échantillon a été fini par polissage avec des papiers abrasifs et l'autre par rectification. Les mesures de l'intensité du courant et de l'impédance sur les échantillons soumis, ont permis de mettre en valeur la capacité de résistance des surfaces à la corrosion.

Les résultats obtenus dans ce travail se résument en ce qui suit :

- Le traitement par les plans d'expériences de Box-Behnken, a permis d'exprimer les paramètres de régime de coupe les plus favorables ($N=1400$ tr/min ; $f=0.083$ mm/tr ; $a_p=1.08$ mm), permettant d'obtenir des surfaces de bonne qualité (soit $Ra_{min}=0.83 \mu m \pm 0.16 \mu m$) lors de l'opération sur tour.
- La vitesse d'avance "f" influe fortement sur la qualité de la surface réalisée, en effet on a enregistré une augmentation de la rugosité "Ra" pour des valeurs élevées de "f" et inversement.
- A partir les graphes de tafel et de spectroscopie d'impédance, il apparaît que la surface réalisée par l'opération de tournage avec le régime optimal offre une meilleure résistance à la corrosion par rapport à celle finie par rectification. La surface réalisée par polissage admet plus de résistance comparativement aux deux surfaces précédentes. Ce résultat peut être expliqué par le fait que le polissage permet de niveler les rugosités et obtenir des surfaces parfaitement lisses et suffisamment réduites, ce qui augmente considérablement le passage du courant et réduit ainsi la résistance électrique de l'échantillon lors de la réaction d'oxydation.

Au final, ce travail nous a permis d'approfondir nos connaissances sur le phénomène de corrosion et de comprendre le comportement de la surface dans un milieu corrosif. Il constitue également une ouverture vers des investigations plus approfondies.

En perspectives, il serait intéressant de continuer cette étude, laquelle pourrait s'articuler sur les points suivants:

- Réaliser l'essai de corrosion sur échantillons préparés par l'opération de tournage avec une variété de rugosités de surface
- Effectuer une analyse de la topographie des surfaces afin d'apporter plus d'explication aux effets de la corrosion.
- Exposer des méthodes et des moyens de lutte contre la corrosion.
- Réaliser les essais avec différents type de matériau.

Références

- [1] M.Gaceb , S.Brahmi, Etude de l'influence de l'état de surface sur la tenue à la fatigue d'un acier XC48, Laboratoire de Fiabilité des Equipements Pétroliers et matériaux, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes, algeria.
- [2] Bourebia Mounira, Mémoire de magister "Influence des procédés d'usinage sur les rugosités de surface et leurs répercussions sur un contact mécanique» Université Badji Mokhtar- Annaba, 2010.
- [3] <http://www.lyrfac.com/soutiens/knbase/pdf/tournagemecanique.pdf>
- [4] M.Madani, R. Ghouini, Mémoire de master "Amélioration des Paramètres Technologiques de Coupe en Tournage", Université kasdi Merbah-Ouargla, 2011.
- [5] Hamdi Amine, Mémoire de magister "Superfinition des surfaces par le procédé de toilage" Institut d'optique et mécanique de précision, Université Ferhat Abbas-Sétif 2011.
- [6] Florea Florian, Réalisation d'opérations de rectification, 1998.
- [7] <https://stm24.fr/>
- [8] Migan Emmanuel, "Etude du polissage des granits: pratique industrielles, fin de surface et émission de poussière", Ecole technologique supérieure, Université du Québec, 2015.
- [9] René Kamguem, "inspection automatique et sans contact de la rugosité des pièces usinées", Ecole de technologie supérieure, Université du Québec, 2013.
- [10] Boulanger Jacques, Tolérences et écarts dimentionnels, géométriques d'états de surface, sous la direction Eric Felder, BM 74 technique de l'ingénieur janvier 2000.
- [11] Claude Barlier, René Bourgeois Ingénierie et mécanique: Conception et dessin, 7^{eme} edition, 2011.
- [12] Dr.Bensaada Said, Etats de surface, 2019 P-98.
- [13] Ashort introduction to corrosion and its control .corrosion in the metal and its prevention .national corrosion service .NpL.2003 P1-9.
- [14] Dr.Bensabra Hahkim, cours de corrosion, Université de jijel, 2016.
- [15] Dr. Bensaada Said, Cours de corrosion.
- [16] J. Benard, A. Michel, J. Philibert et J.Talbot, Métallurgie Générale, Masson Editeurs, 1969.
- [17] Nebbar Mohamed, Mémoire de Magister, "Etude de la tenue à la corrosion de l'acier N80 et évaluation de l'efficacité d'un inhibiteur de corrosion", Université Mohamed Khider-Biskra, 2010.

- [18] Ghelani Leila, Thèse pour obtenir le grade de docteur, "Tenue à la corrosion des revêtements composites Ni/SiC électrodéposés sur le substrat en acier", Université de Batna 2-Mostefa Ben Boulaid, 2018.
- [19] R.winston Revie, Herbert H.Uhlig, Corrosion and Corrosion Control, An introduction to Corrosion Science and Engineering, 4th Edition, 2008.
- [20] Zhand Jianguo, Thèse de doctorat, "Etude de la corrosion de structures métalliques de grandes dimensions par les mesures d'impédance électrochimique. Application au contrôle de l'état de corrosion des armatures de béton" Ecole centrale Paris, 1987.
- [21] Dupeux Michel, Science des matériaux, 3^{ème} édition, Dunod, Paris, 2004, 2008, 2013.
- [22] Diertich.R, Nicolas.M, Gentillon.S, Précis d'usinage, Edition Nathan/AFNOR, 5^{ème} édition, 1991.