

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE METALLURGIE

Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
Filière : MÉTALLURGIE
Spécialité : Génie des Surfaces Métalliques

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Comportement en frottement d'un acier à haute limite élastique
et évaluation des paramètres fonctionnels de surface

Présenté par : BOUCHAREB Sami

Encadrant : LABAÏZ Mohamed Professeur Université BADJI MOKHTAR- ANNABA

Co-encadreur: Mme BOUREBIA Mounira Maître de recherche A URASM Annaba

Jury de Soutenance :

LABAIZ Mohamed	Professeur	BADJI MOKHTAR - ANNABA	Président
LABAIZ Mohamed	Professeur	BADJI MOKHTAR - ANNABA	Encadrant
BOUREBIA Mounira	Maitre de recherche A	BADJI MOKHTAR - ANNABA	Co-encadrant
ASSALA Omar	Professeur	BADJI MOKHTAR - ANNABA	Examineur
BELIARDOUH N.	Professeur	BADJI MOKHTAR - ANNABA	Deuxième examinateur

Année Universitaire : 2019/2020

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A Ma très chère Mère qui a été toujours à mes côtés ;

A Mon Père qui m'a toujours guidé et soutenu ;

En leur souhaitant une longue vie pleine de bonheur et de santé ;

A mes frères et ma soeur

A mes amis auxquelles j'ai partagé les meilleurs moments de ma

vie et mes amis qui ont toujours encouragé ;

Mes collègues de la promotion 2020 de
L'université Badji Mokhtar Annaba

Spécialement les étudiants du département DE Métallurgie et génie des
matériaux

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin et qui me connaissent.

Bouchareb Sami

Remerciements

J'aimerais avant tout remercier « الله »

Je tiens à remercier mes parents qui m'ont soutenu tout le long de ma vie et c'est grâce à eux que je suis arrivé à ce niveau.

*Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur **Pr LABAÏZ** Mohamed pour m'avoir tant apporté durant cette aventure. Je le remercie de m'avoir encadré et soutenu pendant ces mois. Merci de la confiance que tu m'as accordé, de ta grande disponibilité, de ta patience et de tous les conseils que tu as pu me donner.*

*Je remercie vivement mon encadreur de stage à l'URASM/CRTI Mme le **Docteur BOUREBIA** qui a continué à m'aider jusqu'à la fin.*

*Je remercie vivement l'ensemble des membres du jury, en commençant par monsieur **LABAÏZ Mohamed** professeur à l'Université **BADJI MOKHTAR - ANNABA**, pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse. Je remercie Messieurs, **ASSALA Omar** et **BELIARDOUH Nessreddine**, professeurs à l'Université **BADJI MOKHTAR - ANNABA**, pour avoir accepté d'être les examinateurs de cette thèse.*

Je remercie sincèrement toute les enseignants du département de métallurgie et génie des matériaux avec qui j'ai eu un plaisir à suivre ma formation.

J'adresse mes vifs remerciements à tous mes collègues du département de métallurgie.

Et enfin un grand merci tout spécial à ma mère qui partage ma vie et qui endure au quotidien les difficultés et les incertitudes de la vie d'un étudiant chercheur, notamment sa faible disponibilité et son humeur inégale.

SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale1

Chapitre I Recherche Bibliographique

I.1 Introduction3

I.2 Aperçu sur les aciers à haute limite d'élasticité3

I.2.1 Structure et propriétés des aciers HLE4

I.2.2 Différents mécanismes de durcissement des aciers HLE.....4

I.2.3 Avantages des aciers HLE.....5

I.2.4 Les applications des HLE5

I.3 Aperçu sur la Tribologie6

I.3.1 Les frottements.....7

I.3.2 L'usure.....12

I.3.3 Lubrification.....15

I.4 Importance de l'état de surface en tribologie.....17

I.5 La rugosité.....17

I.5. 1 Définition.....18

I.5. 2 Principaux paramètres de rugosité.....18

I.5. 3 Les paramètres fonctionnels.....19

I.6 Conclusion.....21

Chapitre II Matériaux et méthodes expérimentales

II.1 Introduction22

II.2 Caractérisation du matériau.....22

II.2.1 Composition chimique.....22

II.2.2 Etude métallographique.....22

II.3 Caractérisation mécaniques.....24

II.3.1 Essai de traction.....	24
II.3.2 Détermination de la ténacité du matériau.....	25
II.3.3 Micro dureté Vickers.....	26
II.4 Méthodologie expérimentale.....	26
II.5 Préparation des échantillons.....	27
II. 6 Essais de frottement.....	28
II.7 Mesure de rugosité.....	29
II.8 Conclusion.....	30
 Chapitre III : Interprétations des résultats	
III. 1 Introduction.....	31
III.2 Interprétation des résultats de caractérisation.....	31
III.2.1 Observation métallographique.....	31
III.2.2 Essai de traction	32
III.2.3 Essai de résilience.....	33
III.3 Interprétation des résultats des essais de frottement.....	33
III.3.1 Evolution du coefficient de frottement.....	33
III.3.2 Analyse statistique des résultats et modélisation.....	34
III.3.3 Simulation des effets des paramètres d’essai sur le coefficient de frottement	37
III.3.4 Evolution des paramètres de surface au cours des essais de frottement.....	39
III.4 Conclusion.....	43
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	45
Références Bibliographies	46

LISTE DES FIGURES :

Figure.1 Installation des pipelines a) enterrés b) externes

Figure 2.Schéma général de la tribologie

Figure 3. L'interface de contact de deux surfaces en mouvement

Figure 4. Contact entre deux solides en présence de frottement

Figure 5. Valeurs de coefficient de frottement associées à plusieurs situations

Figure 6. Différents types de frottement

Figure 7. Influence de la rugosité sur les frottements

Figure 8.Les différents types d'usure et leurs importances

Figure 9. Mécanisme d'usure par abrasion

Figure 10. a) : usure par adhésion et b) Surface présentant un grippage

Figure 11.L'état de surface présentant une usure par corrosion

Figure 12.a) : Différents mécanisme d'usure par fatigue et b) Modification structurale du a la fatigue

Figure 13. Schéma d'un contact lubrifié

Figure 14. Les différents régimes de lubrification

Figure 15. Etat de surface

Figure 16. Les types de surface selon le procédé de mise en forme

Figure 17. L'écart arithmétique moyen "Ra"

Figure 18. Ecart total "Rt"

Figure 19. Régularité "Rz"

Figure 20.Taux de longueur portante évalué sur la courbe d'Abbott-Firestone

Figure 21. Construction graphique des paramètres "Rk, Rpk, Rvk"

Figure 22. Préparation des échantillons

Figure 23. Microscope optique à haute définition NIKON

Figure 24. Machine de traction

Figure 25. Epreuve de traction normalisée

Figure 26. Mouton pendule de 300 Joules KARLFRANK (Type 53580)

a) schéma de principe b) montage de l'éprouvette

Figure 27. a) Prélèvement des éprouvettes de résilience

b) Epreuve de résilience avec une entaille en V

Figure 28 Schéma de l'expérimentation

Figure 29. Les échantillons après polissage

Figure 30. Tribomètre bille/pion-disque utilisé pour les tests de frottement

Figure 31. Microstructure de l'acier X52 a) traité b) non traité

Figure 32. La courbe de traction (a) Éprouvette non traitée b) Éprouvette traitée

Figure 33 Caractéristiques mécanique des échantillons traité et non

Figure 34. Evolution du coefficient de frottement en fonction des différents essais

Figure 35. Variation du coefficient de frottement en fonction de la distance

Figure 36. a) Courbe des résidus b) courbe de probabilité normale

Figure 37. Courbes des effets pour le coefficient de frottement

Figure 38. Courbes des interactions pour le coefficient de frottement

Figure 39. Evolution du cof en fonction de la vitesse et la charge

Figure 40. Variation du cof en fonction de la charge et de la distance parcourue

Figure 41. Variation du cof en fonction de la vitesse et de la distance parcourue

Figure 42. Topographies des surfaces usées après frottement

Figure 43. Variation de Mr_1 et Mr_2 au cours des essais de frottement

Figure 44. Evolution de "Ra" pour les différents essais

Figure 45. Evolution de "Rk" pour les différents essais

Figure 46. Evolution de "Rpk" pour les différents essais

Figure 47. Evolution de "Rvk" pour les différents essais

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau 1. Propriétés mécaniques des aciers selon la norme API

Tableau 2. Valeurs de coefficient de frottement obtenues pour différents matériaux

Tableau 3. Composition chimique de l'acier X52

Tableau 4. Caractéristiques mécanique de l'acier X52

Tableau 5. Matrice d'expérience

Tableau 6. valeurs mesurées du "cof" pour chaque essai

Tableau 7 Valeurs mesurées de "Mr1", "Mr2" avant et après l'essai de frottement

Tableau 8 Valeurs mesurées de "Ra", "Rpk", "Rk" et "Rvk" avant l'essai de frottement

Tableau 9. Valeurs mesurées de Ra, Rpk, Rk et Rvk après l'essai de frottement

Introduction Générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Aujourd'hui, les constructeurs sont de plus en plus exigeant sur la longévité des équipements. La prédiction de la durée de vie d'un système travaillant sous sollicitation, ainsi que la compréhension des mécanismes du frottement et de l'usure constituent le problème actualité [1]. Par ailleurs, le frottement dépend beaucoup plus des propriétés des couches superficielles que des propriétés volumiques du corps considéré. C'est pourquoi la maîtrise du frottement est souvent la clé de l'amélioration de la longévité d'un système mécanique [2]. La surface joue un rôle important car elle représente non seulement les propriétés physico-chimiques et mécaniques des matériaux mais aussi les caractéristiques géométriques des surfaces en contact. Elle influe sur les propriétés de frottement à sec des matériaux grâce aux forces d'adhésion [3]. La rugosité de surface a une grande influence sur la qualité des surfaces usinées et les propriétés fonctionnelles telles que la surface d'appui, les propriétés de frottement et la résistance à l'usure et à la fatigue [4]. Par conséquent, la surface d'appui est un élément important en contact mécanique qui est influencé par le milieu environnant, en particulier lorsqu'elle travaille sous forte sollicitation. L'objectif de ce travail expérimental est d'étudier l'influence des paramètres d'essai qui sont la charge (P_y), la vitesse (V) et la distance (D) sur le coefficient de frottement, ainsi que d'évaluer le taux de longueur portante après essai. Les plans expérimentaux seront utilisés pour l'organisation des tests.

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

Dans le premier chapitre, est présentée un aperçu sur les aciers hauts limite élastique (HLE) et leurs applications. De plus, les différentes branches de la tribologie en l'occurrence les frottements, l'usure, et la lubrification ont été présentées. Par la suite, une étude bibliographique mettant en relief

l'importance de l'état de surface en tribologie et les différents paramètres de la rugosité a été exposée.

Le deuxième chapitre comprend une description du matériel utilisé dans le travail expérimental, essentiellement les équipements de caractérisation ainsi que l'appareillage de mesure. Le dispositif utilisé dans les essais tribologiques a été présenté. Par ailleurs, une caractérisation du matériau a été effectuée ainsi que la préparation des échantillons destinés pour l'expérimentation.

Le troisième chapitre regroupe l'ensemble des résultats des essais réalisés en tribologie. En outre, les résultats micrographiques acquis pour ce matériau ainsi que l'analyse statistique et le modèle mathématique obtenu pour le coefficient de frottement ont été interprétés. La simulation numérique du comportement du coefficient de frottement dans le domaine d'étude a été commentée. De plus, une analyse de l'évolution des différents paramètres fonctionnels de la rugosité avant et après essai a été expliquée.

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

Chapitre I
Recherche Bibliographique

I.1 Introduction

Le comportement des matériaux apparaît comme un élément essentiel. En effet, selon leur ductilité où leur fragilité, la nature de leur contact diffère énormément, et les lois de frottement et d'usure varient donc aussi. La caractérisation des surfaces et des couches proches de l'extrême surface à une très grande importance en tribologie, c'est pourquoi l'environnement joue un rôle tout à fait essentiel [5]. L'état de la couche superficielle d'une surface et sa micro-géométrie sont les principaux éléments qui définissent sa qualité [6,7], en conséquence la rugosité joue un rôle décisif dans l'évolution des phénomènes de frottement, usure, lubrification et fatigue [8] des contacts mécaniques. De plus l'état de surfaces dépend de la qualité de mise en œuvre de la surface (.....) ainsi que la ductilité du matériau et les caractéristiques mécaniques telle la dureté, la résistance à la rupture....etc. Par conséquent, les aciers à hautes performances également appelés HLE (aciers à Haute Limite d'Elasticité) qui sont reconnus par leurs meilleures propriétés mécaniques et une meilleure résistance à la corrosion par rapport aux aciers au carbone laminé et sont fréquemment utilisés dans des domaines variés de la construction, comme transport pétrolier (structures et conduites sous-marines ~550 MPa), les conduites forcées (~700 MPa), la construction d'engins de levage (~1100 MPa), les coques de sous-marins nucléaires (~1000 MPa), etc [9]. Par conséquent, ce chapitre s'articule autour du comportement de l'état de surface d'un acier HLE lorsqu'elle est soumise à un frottement à sec, faisant intervenir un aperçu sur les aciers HLE, ainsi que le domaine de tribologie en l'occurrence les frottements, l'usure et la lubrification. Les principaux paramètres de rugosité contribuant dans les fonctionnalités des surfaces ont été présentés.

I.2 Aperçu sur les aciers à haute limite d'élasticité

Les aciers à haute limite élastique dits HLE appartiennent au groupe d'aciers à faible teneur en carbone inférieur à 0,25 qui utilisent des éléments d'alliage pour améliorer les caractéristiques mécaniques. Par ailleurs, ces aciers ont d'excellentes caractéristiques mécaniques, associées à leurs très bonnes propriétés de mise en œuvre. De plus, pour une faible quantité de carbone, on peut obtenir une haute résistance. Beaucoup de ces aciers ont une soudabilité comparable ou même meilleure que celle des aciers doux [10,11]. Les aciers à haute limite élastique sont mis en œuvre dans des secteurs aussi divers que le transport pétrolier et de gaz, machines etc.). C'est acier incluent un grand nombre de nuances standards et sont conçus pour fournir des combinaisons spécifiques de propriétés spécifique parmi c'est nuances (X52, X70, X60, X42...etc.).

I.2.1 Structure et propriétés des aciers HLE

Ces aciers sont généralement utilisés à l'état brut de laminage ou après un traitement de normalisation (c'est-à-dire une austénitisation suivie d'un refroidissement à l'air). En raison de leur composition chimique, la trempabilité est relativement faible ; et la transformation au refroidissement (depuis la température de fin de laminage ou depuis la température d'austénitisation dans le cas de la normalisation) se produit entièrement dans le domaine ferrito-perlitique. La microstructure de ces aciers à l'état d'emploi est donc généralement constituée d'un mélange de ferrite et perlite [12], ils sont caractérisés par :

- une haute limite élastique,
- une excellente propriété de résilience à basse température,
- une bonne aptitude à la soudabilité et à la mise en forme.

Plusieurs études ont montré que l'amélioration des caractéristiques mécaniques en particulier la limite élastique, la résilience et la température de transition ductile fragile peut être obtenue par différents mécanismes de durcissement soient par transformation martensitique, par affinement des grains, par la seconde phase (perlite) et par des précipités fins de types NbC, NbN, TiC et VC. La mise en œuvre de ces aciers exige donc une connaissance approfondie des conditions de mise en solution et de précipitation des éléments d'addition au cours des différentes étapes de la fabrication (chauffage avant laminage, laminage, refroidissement après laminage) ou du traitement thermique postérieur éventuel [13] .

I.2.2 Différents mécanismes de durcissement des aciers HLE

Les aciers HLE peuvent être durcis par différents mécanismes à savoir :

- Durcissement par solution solide,
- Par affinement du grain,
- Par précipitation des éléments formant des dispersoïdes,
- Par la seconde phase (la perlite),
- Par écrouissage,
- Par les joints de grains [13].

I.2.3 Avantages des aciers HLE

- ✓ Ils combinent soudabilité améliorée due au très faible niveau de carbone et bonne formabilité, leurs caractéristiques mécaniques facilitent le formage sur presses et sur lignes automatisées.
- ✓ Ils se caractérisent de plus par une bonne tenue à la fatigue et à la résistance au choc.
- ✓ Grâce à leur limite élastique élevée (R_e), ils sont particulièrement adaptés lorsqu'une réduction de poids est recherchée, c'est pourquoi ces aciers s'utilisent fréquemment en remplacement des aciers de Construction [9] .

I.2.4 Les applications des HLE

Les aciers à haute limite élastique sont les plus utilisés dans la construction des pipelines [14]. En raison de leur faible coût. Ces aciers sont habituellement de nuances [15-16] telles que X60, X65, X80, X52, X70, etc.

- Les pipelines

Un pipeline (originaire de l'anglais) est une canalisation formée par un ensemble de tubes en acier soudés bout à bout, destinée à l'acheminement d'un endroit à un autre de matières gazeuses ou liquides ; Ces tubes sont souvent revêtus extérieurement et voir même intérieurement, et presque toujours enterrés sauf dans certaines régions.



Figure.1 Installation des pipelines a) enterrés b) externes

Un pipeline permet l'échange de produits entre raffineries, dépôts pétroliers et installations portuaires. Sa longueur peut varier de quelques kilomètres à des centaines de kilomètres Les principaux systèmes de transport par pipeline concernent :

- Les gazoducs pour le transport du gaz naturel.
- Les oléoducs pour le transport du pétrole et des hydrocarbures liquides.
- Les aqueducs, conduites ou émissaires utilisés pour l'eau douce et l'irrigation [13].

- **Caractérisations des aciers HLE destiné pour la fabrication des pipelines selon la norme API**

Les qualités d'acier couramment utilisées dans la construction des pipelines sont définies dans deux spécifications API [American petroleum Institute] qui sont adaptées depuis 1922 par l'industrie pétrolière américaine.

- Dénommées 5L pour les qualités normales 5L (*), pour les qualités à haute résistance. Ces spécifications sont utilisées d'une façon générale dans le monde entier. Les qualités d'acier les plus employées ont les propriétés mécaniques présentées dans le tableau 1

Tableau 1. Propriétés mécaniques des aciers selon la norme API [9]

Specification API	Grade	Limite élasticité (kg/mm ²)	Résistance à la rupture (kg/mm ²)
5L	A	21	34
5L	B	25	42
5LX	X42	29	42
✓ 5LX	X52	37	47
✓ 5LX	X56	39	52

I.3 Aperçu sur la Tribologie

La tribologie est la science du frottement, d'usure et de lubrification. Le mot tribologie a été créé en 1966(Figure 2). Il vient du mot grec *tribos*, le frottement. C'est la science qui étudie les phénomènes susceptibles de se produire lorsque deux corps en contact sont soumis à des mouvements relatifs [17].

- le frottement constitue la cause primordiale de perte d'énergie et de l'usure.
- l'usure est la cause de perte de matière et des performances mécanique des systèmes.
- la lubrification a pour but de diminuer les frottements des solides en contact et de prédire leur endommagement [18].

La tribologie s'intéresse à la recherche des méthodes qui permettent de décrire le comportement mécanique des contacts. On s'intéresse donc à l'étude des propriétés des surfaces des corps en contact plutôt qu'à leurs volumes. Quatre éléments interviennent au cours des processus tribologiques : les deux corps frottant, le corps crée dans l'interface (3^{ème} corps) et l'environnement. Des interactions entre ces éléments contribuent à dissiper l'énergie de frottement qui correspond à divers phénomènes : la chaleur générée au niveau des surfaces en contact, l'énergie stockée par déformation plastique, les défauts cristallographiques,

l'énergie de surface, vibrations et bruits. Ainsi, la tribologie est une science pluridisciplinaire [19].

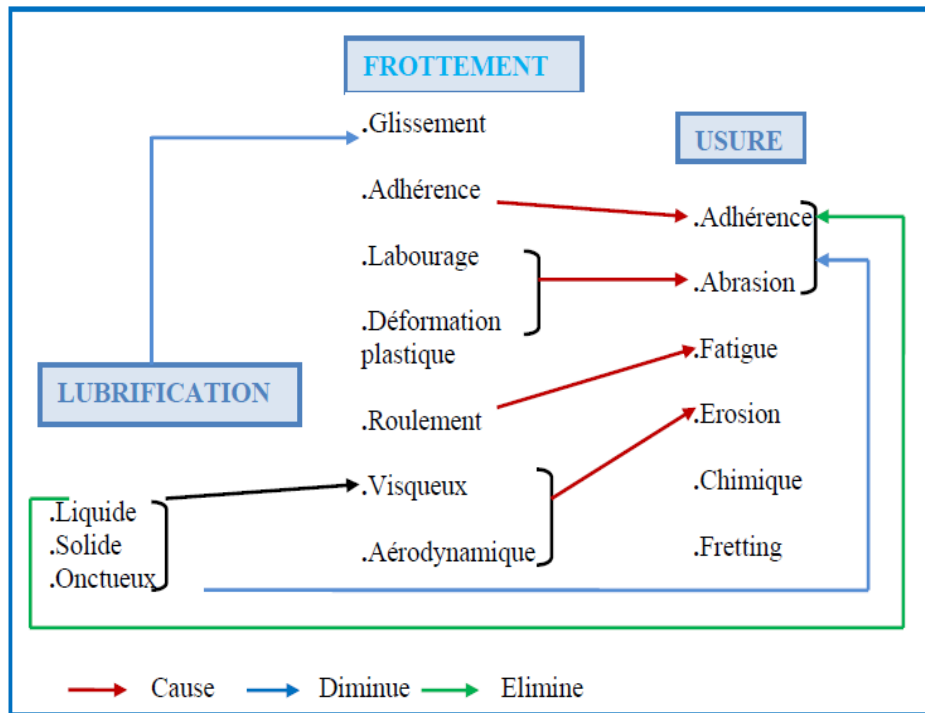


Figure 2. Schéma général de la tribologie [17]

I.3.1 Les frottements

Les phénomènes de frottement contribuent dans de nombreuses applications habituelles et industrielles. Le frottement se définit comme étant une résistance à un mouvement entre des surfaces en contact. Lorsque deux solides en contact sont en mouvement, des frottements s'opposent aux forces de déplacement. Ces derniers se produisent au niveau des irrégularités des surfaces en contact (Figure 3) [18].

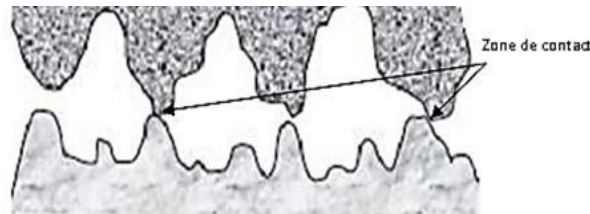


Figure 3. L'interface de contact de deux surfaces en mouvement

On parle du frottement sec lorsque les deux surfaces frottent sans présence d'un lubrifiant. Si le contact entre les deux solides s'effectue en présence des lubrifiants liquides ou visqueux (huiles, graisses) ou des lubrifiants solides (graphite, MoS₂, revêtements métalliques...), le frottement est dit lubrifié [19]. Dans tous les cas, il engendre une résistance au mouvement provoquant la création de contraintes mécaniques superficielles et la dissipation de chaleur, entraînant ainsi l'usure plus ou moins rapide des corps en contact et par conséquent la modification de leurs surfaces (Figure 4) [18].

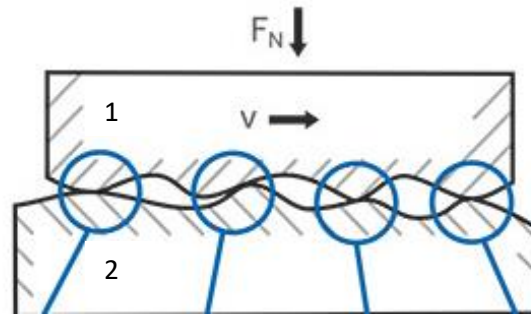


Figure 4. Contact entre deux solides en présence de frottement

Le frottement se présente sous plusieurs aspects :

- mécanique : l'effort tangentiel en sens inverse du déplacement ;
- géométrique : pertes des côtes [20] ;
- énergétique : perte de puissance qui se traduit par une diminution du rendement.

en s'est intéressé à l'étude. Les recherches de Léonard de Vinci entamé vers 1500 sur les mouvements en mécanique l'ont amené à pressentir les notions d'inertie, de moment, de rendement, de frottement, de centre de gravité.

Deux siècles plus tard les lois fondamentales de Léonard de Vinci furent redécouvertes par Amontons et qui s'énoncent ainsi :

- 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 ; le facteur de proportionnalité étant appelé coefficient de frottement, μ
- Elles sont indépendantes de l'aire apparente de contact des surfaces en présence,
- Elles dépendent des matériaux et de l'état de leurs surfaces.

Les lois de Léonard de Vinci et de Guillaume Amontons ont été complétées par Coulomb qui, remarquant la différence réelle mais souvent légère des efforts de frottement statique et dynamique, a admis qu'en outre : ·

- les forces de frottement sont pratiquement indépendantes de la vitesse de glissement des surfaces.

- La surface d'un matériau est le siège des interactions entre le matériau et l'environnement.

En tribologie, la surface ne se limite pas uniquement à la notion d'aire d'appui des corps, mais concerne plus généralement les éléments de contact qui jouent un rôle sur le frottement, c'est – à – dire sur les contraintes mécaniques, les températures, le comportement du troisième corps (lubrifiant, débris d'usure...). Ces éléments sont les propriétés mécaniques, physiques et chimiques des matériaux en présence, les caractéristiques géométriques incluant, par extension, la forme des pièces [21].

La surface d'un système tribologique (deux corps qui sont en contact) a les caractéristiques suivantes [22]:

- le matériau lui - même n'est ni homogène, ni isotrope à l'échelle microscopique : les matériaux métalliques usuels sont polycristallins et parfois bi - ou polyphasés. Les impuretés, les joints de grains, les défauts cristallins, parfois des fissures ou microfissures sont présentes à surface comme au cœur du matériau. Toutes ces caractéristiques ont une incidence majeure aussi bien sur les propriétés mécaniques que sur les propriétés chimiques des surfaces.
- à la surface d'un matériau, il faut considérer qu'il existe, avant l'application du frottement, sur une épaisseur variable de quelques micromètres ou dizaines de micromètres, une couche écrouie résultant de la mise en forme ou des sollicitations mécaniques subies en service dans le cas des composants d'une structure ou d'un système mécanique. La structure métallurgique et les propriétés mécaniques de la couche écrouie peuvent être très différentes des celles du matériau sous-jacent. ·
- de plus, la surface d'un matériau n'est jamais complètement inerte par rapport au milieu au contact où elle se trouve. Des réactions chimiques peuvent avoir lieu, par exemple pour les métaux, une oxydation conduisant à la formation d'une couche de composition chimique et des propriétés mécaniques très différentes des celles de la couche sous –jacent et dont l'épaisseur peut être très faible (couche de passivation des métaux : 5 - 50 nm) ou devenir très importante (couche de rouille sur les surfaces) suivant la nature du couple métal – environnement et de la température [23].

▪ **Force et coefficient de frottement**

Par définition, le coefficient de frottement illustré par la formule (1) est le rapport de la force tangentielle de frottement (F) lorsque les pièces glissent, sur la force normale (N) qui les applique l'une sur l'autre [24].

$$\mu = F/N \quad (1)$$

Le coefficient de frottement varie entre 0 et 10, des valeurs supérieures à 1 ne sont en général rencontrées que dans des conditions très particulières comme sous vide. Les valeurs de coefficient de frottement que l'on peut classiquement obtenir dans diverses situations de frottement. Le tableau 2 présente quelques valeurs de coefficient de frottement attribuées à plusieurs matériaux [19].

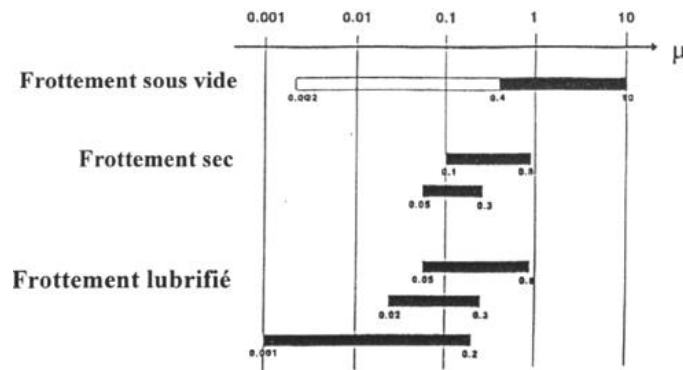


Figure 5. Valeurs de coefficient de frottement associées à plusieurs situations [19]

Tableau 2. Valeurs de coefficient de frottement obtenues pour différents matériaux [19]

Matériau	Coefficient de frottement
Polyéthylène / acier	0,65
Acier inoxydable ferritique / acier	0,53
Carbure de tungstène / carbure de tungstène	0,35
Laiton / laiton	0,24
PTFE / acier	0,18

▪ Les différents types de frottements

Lorsque deux solides A et B sont en contact figure 6a, on peut distinguer deux types de frottement : si A et B glissent l'un par rapport à l'autre, il apparaît un frottement de glissement figure 6b, lorsque A roule sur B figure 6c, on parle de frottement de roulement. Quand un corps se déplace dans un fluide (un gaz ou un liquide), on parle de frottement visqueux ou frottement fluide figure 6d [25]. En générale le contact entre deux corps aux surfaces rugueuses provoque une grande force de frottement qui joue le rôle d'obstacle, et freine le mouvement relatif entre les deux surfaces. La force de frottement (F) est égale à la somme de la force existante pour rompre les adhérences (F_R) et la force de déformation nécessaire pour labourer les aspérités (F_L) [26]. Cette dernière varie avec la variation de la rugosité c'est-à-dire plus la rugosité de surface est faible plus la force (F_L) est faible, ce qui a pour conséquence la diminution de la force de frottement et le mouvement entre les deux corps se fait avec moins d'obstacles et de résistances [27].

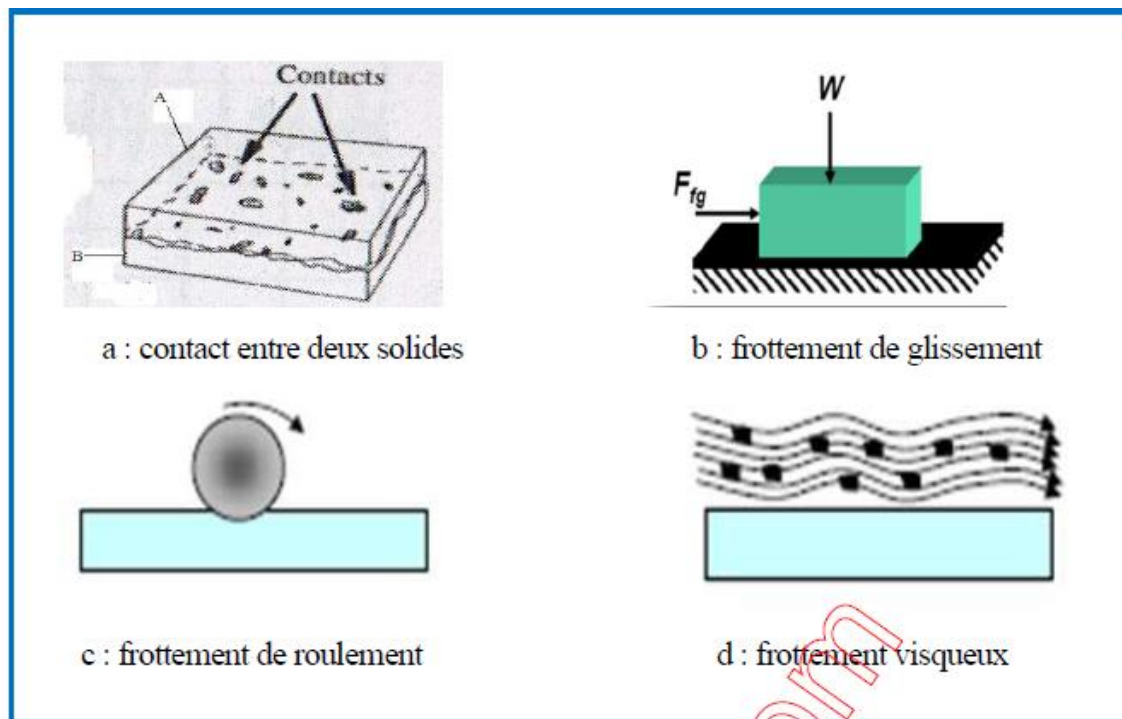


Figure 6. Différents types de frottement [25]

C'est au niveau de la surface d'une pièce que naissent les frottements, les surfaces usinées ne sont jamais parfaites, elles sont marquées par les traces dus aux procédés d'usinage (rugosité) engendrant ainsi des défauts [28]. La qualité de l'état de surface influe considérablement sur la tenue en service des systèmes mécaniques ainsi l'augmentation de la rugosité de surface provoque une élévation des frottements ce qui va nuire aux surfaces de contact, diminuant ainsi les performances du mécanisme (Figure 7).

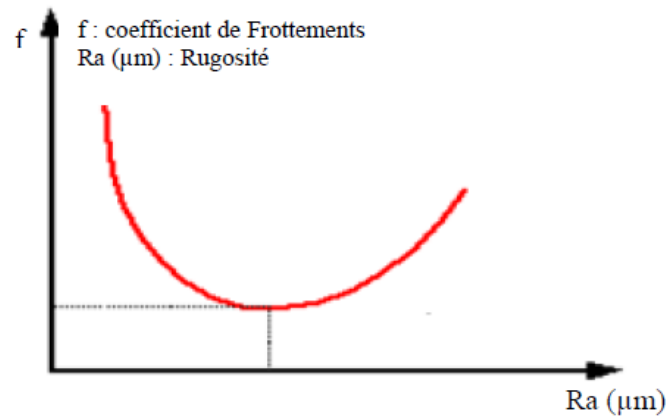


Figure 7. Influence de la rugosité sur les frottements [29]

I.3.2 L'usure

L'usure constitue l'une des causes majeures de la destruction des matériaux et de la diminution des performances des systèmes mécaniques [30]. En effet l'usure des surfaces désigne le phénomène de dégradation des couches superficielles d'un solide sous l'action mécanique du milieu extérieur. Cette dégradation est souvent associée à différents phénomènes (Figure 8) soit chimiques dus à la corrosion, mécanique due au frottement ou électrique dus au phénomène d'arc, elle peut prendre la forme d'une perte de masse, de cote, de forme, ou encore d'une modification de la structure [31].

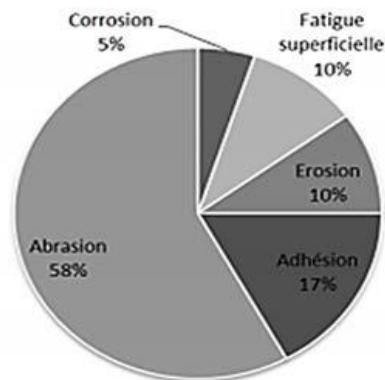


Figure 8. Les différents types d'usure et leurs importances [23]

Il existe plusieurs types d'usures mécaniques parmi eux :

- Usure par abrasion.
- Usure par adhésion.
- Usure par corrosion.

- **Usure par abrasion**

L'usure abrasive est définie comme étant l'usure par déplacement de matière produite par des particules dures ou des protubérances dures. Les particules dures peuvent se trouver encastrées dans l'une des surfaces ou être entre les deux surfaces en mouvement relatif (Figure 9a) [31]. Les surfaces endommagées (Figure 9b) par abrasion présentent des sillons de profondeur variable, parallèles au déplacement.

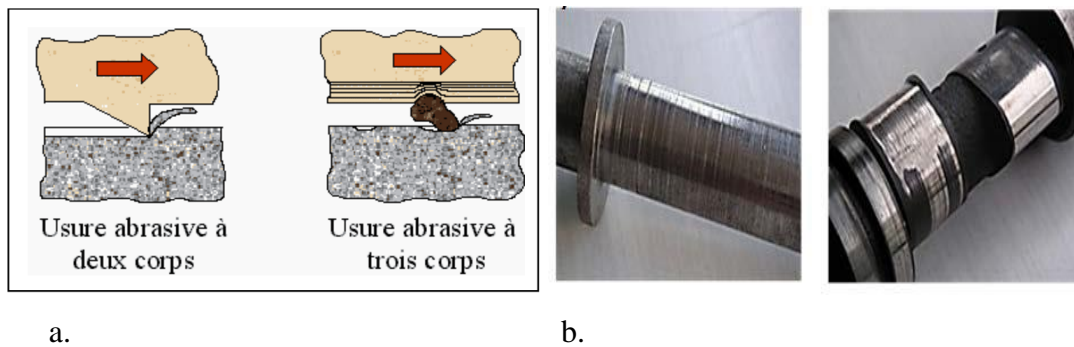


Figure 9. Mécanisme d'usure par abrasion [32]

- **Usure par adhésion**

Le mécanisme d'adhésion est une usure par transfert de matière d'une surface sur l'autre pendant leur mouvement relatif, due à un processus de soudure en phase (Figure 10a) [23]. L'adhésion dépend de l'énergie de surface des matériaux en effet lorsque les pressions de contact sont élevées et que les matériaux ont un travail d'adhésion élevée, il est possible d'atteindre un régime sévère d'adhésion où les surfaces sont soudées. Le mécanisme est alors complètement bloqué, on parle de grippage.

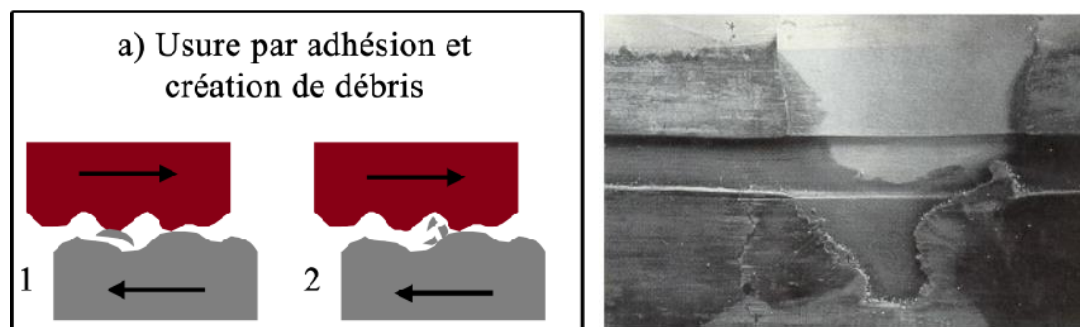


Figure 10. a) : usure par adhésion

b) Surface présentant un grippage

- **Usure par corrosion**

L'usure par corrosion n'est pas directement liée aux mouvements des pièces, mais elle intervient dans les situations où le contact fonctionne en environnement corrosif (Figure 11). L'énergie dissipée dans le contact peut alors activer les phénomènes de corrosion et accélérer

la dégradation des surfaces. L'attaque chimique ou électrochimique est en générale rapide, puis ralentie par la formation de films plus au moins protecteurs qui peuvent passiver les matériaux et stopper au moins provisoirement le processus.

Le processus général de corrosion, des phénomènes de corrosion localisée peuvent se produire tels que la corrosion par piqûres, la corrosion cavernueuse et la corrosion bimétallique ou galvanique. Cette dernière se produit lorsqu'un métal est en contact avec un métal différent et qu'ils sont tous les deux dans une solution corrosive [32].

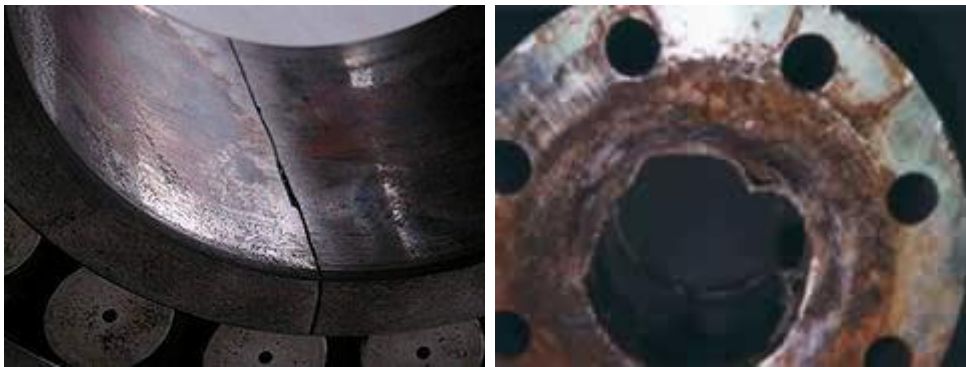


Figure 11.L'état de surface présentant une usure par corrosion

- **Usure par fatigue**

La détérioration des surfaces par fatigue de contact (Figure 12a) se manifeste lorsque les couches superficielles sont soumises à des contraintes répétées ou alternées qui conduisent à l'amorçage des fissures. Ces sollicitations peuvent être d'origine mécanique ou thermique. Les dégradations apparaissent sous forme des piqûres, fissures, écaillage et s'accompagnent par des modifications structurales (Figure 12b).

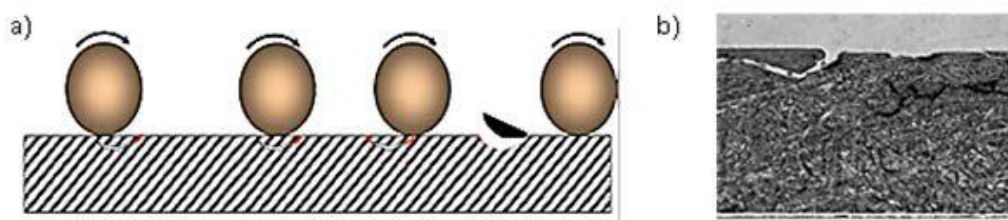


Figure 12.a) : Différents mécanisme d'usure par fatigue [32]

b) Modification structurale dû a la fatigue

- **Loi d'usure**

Si l'usure est un phénomène bien identifié, elle n'a en revanche pas d'unité légale puisque ce n'est pas une grandeur physique, mais un phénomène qui représente la dégradation d'un

contact, entraînant, dans un certain nombre de cas, une perte de fonction. De nombreux auteurs ont proposé des formules empiriques pour décrire l'usure [J.F.ARCHARD,1953].

Loi d'Archard :

$$Q = K * (F * L) / H \quad (2)$$

Q : représente le volume de matière arraché.

K : coefficient d'usure.

F : le chargement normal en newton.

L : distance de glissement en mm.

H : dureté du matériau le plus tendre dans le contact [33].

I.3.3 Lubrification

La lubrification est l'un des moyens les plus efficaces actuellement connus pour réduire le frottement et contrôler l'usure. Cette technique consiste à créer un film mince de liquide, gaz ou solide entre deux surfaces pour faciliter le mouvement, en réduisant le minimum d'énergie et permettant de prévenir les endommagements possible [34]. Or ce film joue un rôle essentielle dans la séparation des aspérités des surfaces en contact facilitant ainsi le mouvement en réduisant les frottements ce qui permet d'éviter la détérioration des couches superficielles et d'augmenter la durée de vie des mécanismes. Ainsi c'est en fonction de l'importance de cette rugosité que vont être définis les régimes de lubrification qui sont au nombre de trois.

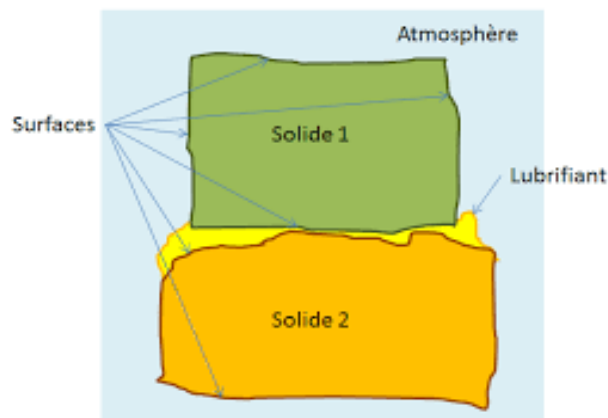


Figure 13. Schéma d'un contact lubrifié

Généralement pour caractériser le régime de lubrification, on utilise le rapport Λ défini par la relation suivante [35] :

$$\Lambda = \frac{h_{min}}{\sigma} \quad (3)$$

h_{min} : hauteur minimale du film au centre du contact

σ : écart type de la rugosité des deux surfaces en contact.

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$$

- Si $\Lambda > 3$, les effets de la rugosité sur le film ne sont pas importants, les surfaces sont totalement séparées donc on se positionne dans le cas d'une lubrification à film épais. Dans ce cas les deux surfaces sont complètement séparées par le film lubrifiant.
- Si $1.5 < \Lambda < 3$, les rugosités commencent à devenir non négligeables, dans ce cas les surfaces sont parallèles, le lubrifiant est introduit sous pression pour assurer la portance et pouvoir séparer les surfaces. Dans ce régime la charge est supportée en même temps par le film lubrifiant et les aspérités en contact.
- Si $\Lambda < 1.5$, les aspérités interagissent les unes avec les autres, le contact métallique est sévère, alors il s'agit d'un régime de lubrification limite. Dans ces conditions de fonctionnement la charge est supportée entièrement par les aspérités des solides en contact, donc le film de lubrifiant est ultime mince d'où l'apparition de frottement et l'usure des surfaces (Figure 14).

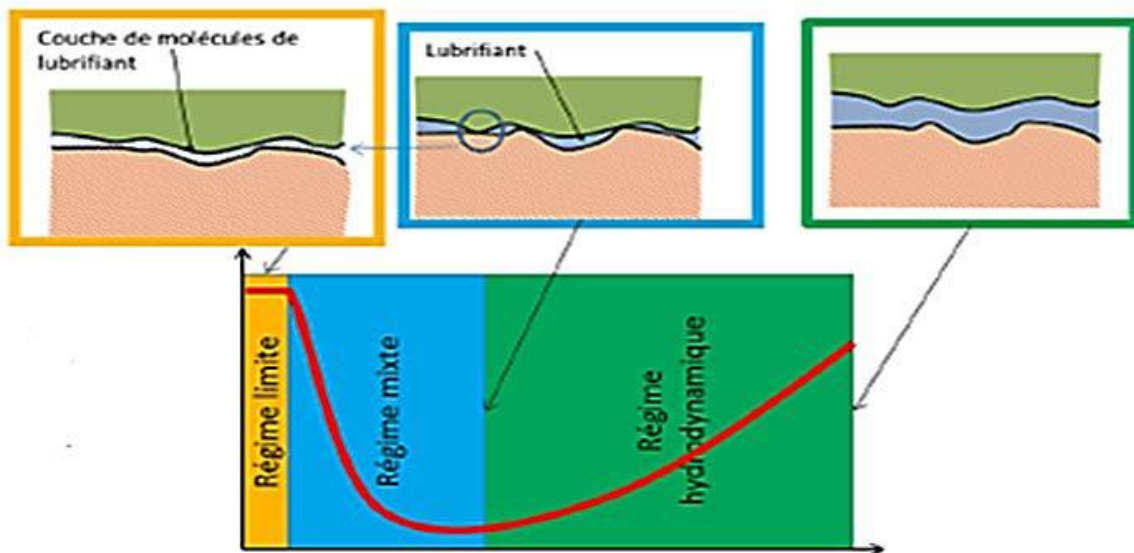


Figure 14. Les différents régimes de lubrification [17]

I.4 Importance de l'état de surface en tribologie

Pour comprendre les phénomènes d'usure nous devons savoir ce qui se passe à la surface du matériau. La surface joue un rôle important en tribologie par le fait qu'une surface mécanique représente non seulement les propriétés physico-chimiques et mécaniques des matériaux en présence mais aussi les caractéristiques géométriques des surfaces en contact. Elle influe sur les propriétés de frottement à sec des matériaux au travers des forces d'adhésion mais aussi sur le comportement du contact en régime lubrifié à travers les phénomènes de mouillage (Figure 15) [3]. La rugosité de surface joue un rôle indispensable car elle détermine l'aire effective de contact ainsi que la distribution des pressions superficielles [36].

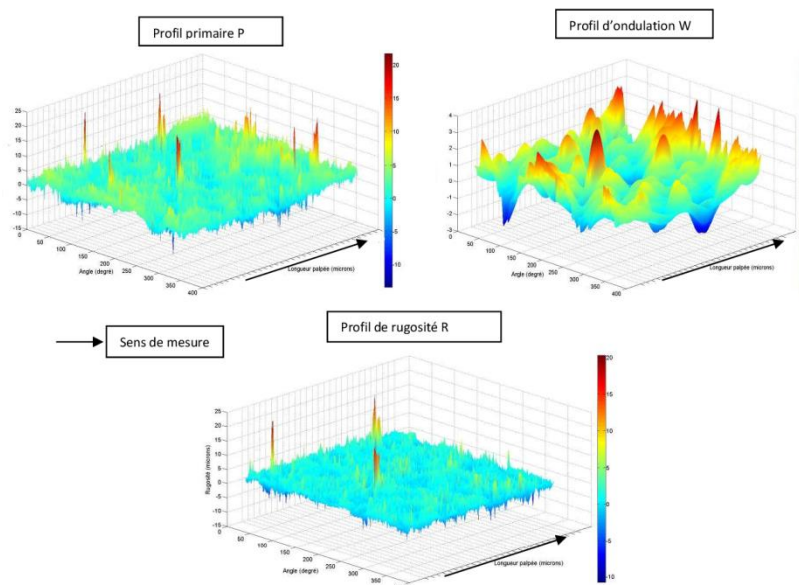


Figure 15. Etat de surface

I.5 La rugosité

La confusion est souvent faite entre le degré de propreté et la rugosité d'une surface, il important de rappeler que ces deux notions sont différentes et totalement indépendantes l'une de l'autre.

- la propreté est une caractéristique chimique.
- la rugosité est une caractéristique physique

La rugosité peut être considérée comme un élément complémentaire du degré de soins (état de propreté) ou comme l'élément essentiel de contrôle, suivant la nature des traitements ou revêtements postérieurs [37].

I.5. 1 Définition

La rugosité est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière (Figure 16) [38].

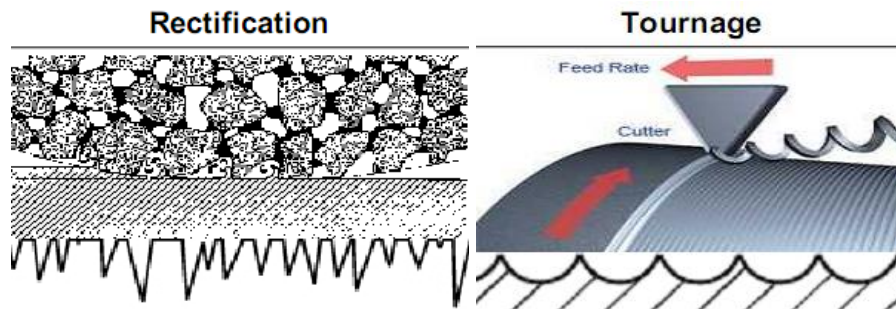


Figure 16. Les types de surface selon le procédé de mise en forme [39]

I.5. 2 Principaux paramètres de rugosité

Un grand nombre de critères sont définis dans la normalisation pour caractériser une rugosité. En pratique, dans un profil et sur une longueur considérée, seuls trois d'entre eux sont retenus:

- Écart moyenne arithmétique "**Ra**": c'est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts, entre les pics et les creux. Le paramètre "Ra" mesure la distance entre cette moyenne et la ligne centrale. On admet couramment que cette notion synthétise approximativement les différents paramètres intéressants de la rugosité.

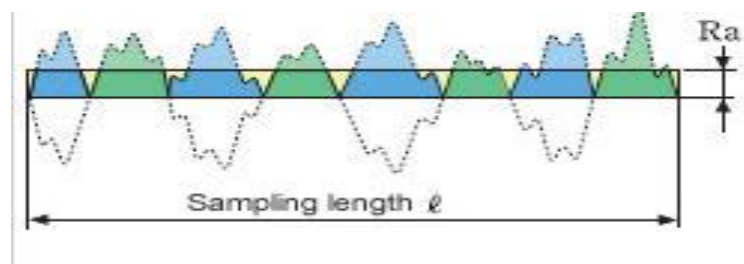


Figure 17. L'écart arithmétique moyen "Ra"

- Écart total "**Rt**": Ce paramètre représente la dénivellation la plus importante entre le plus haut sommet d'un pic et le fond le plus bas d'un creux (Figure 18).

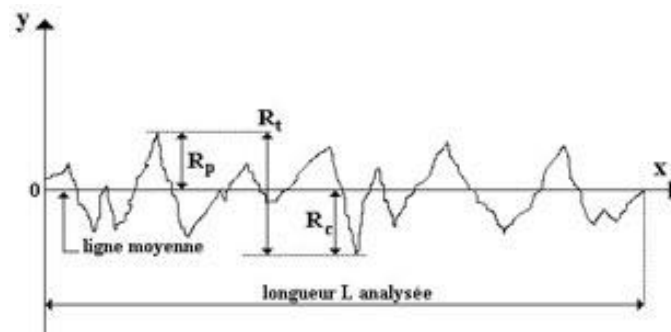


Figure 18. Ecart total "Rt"

-Régularité "Rz": Le paramètre "Rz" équivaut à la moyenne des écarts totaux de rugosité "Rt" observés sur 5 longueurs [40].

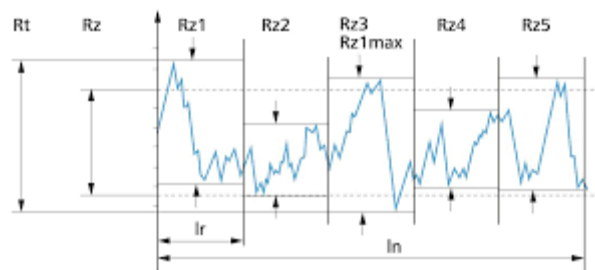


Figure 19. Régularité "Rz"

I.5. 3 Les paramètres fonctionnels

• Taux de longueur portance "Rmr"

Le taux de longueur portance "Rmr" (bearing ratio) est le rapport entre la longueur portante d'un profil de rugosité coupé à la profondeur P et la longueur d'évaluation à partir du pic le plus haut. Ce taux est estimé (%) sur la courbe d'Abbott-Firestone (Figure 20).

$$Rmr(\%) = \frac{100}{L} \sum_{i=1}^{i=n} b_i$$

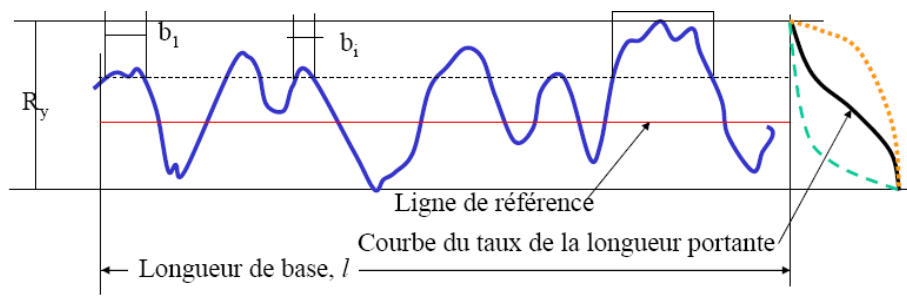


Figure 20. Taux de longueur portance évalué sur la courbe d'Abbott-Firestone [41]

Cette courbe permet de prévoir le comportement à l'usure des surfaces travaillant sous charge dynamique nécessitent des propriétés particulières en termes de résistance à la charge élevée, frottements réduits, tenue à l'usure et dans de nombreux cas une bonne capacité de rétention de fluide (huile), on peut distinguer 3 zones (Figure 21) [42].

- Zone de rodage : permet de caractériser la partie de la surface qui s'use pendant le rodage représenté par le critère de rodage " R_{pk} " désignant les pics saillants qui risquent d'être éliminés pendant les premières heures de fonctionnement de la pièce. Moins ce critère est important et plus le temps de rodage d'un moteur sera limité dans le temps.
- Zone de fonctionnement : définit la quantité de matière disponible à l'usure pendant le fonctionnement de la pièce, indiqué par le critère de fonctionnement " R_k ", plus cette quantité est disponible, plus un moteur fonctionnera longtemps.

Zone de lubrification : détermine les creux disponibles pour retenir un lubrifiant nécessaire pour maintenir le bon fonctionnement, elle est évaluée par le critère de lubrification " R_{vk} ". L'absence ou la disparition des creux entraînera des pertes énergétiques et du grippage sur un moteur [42].

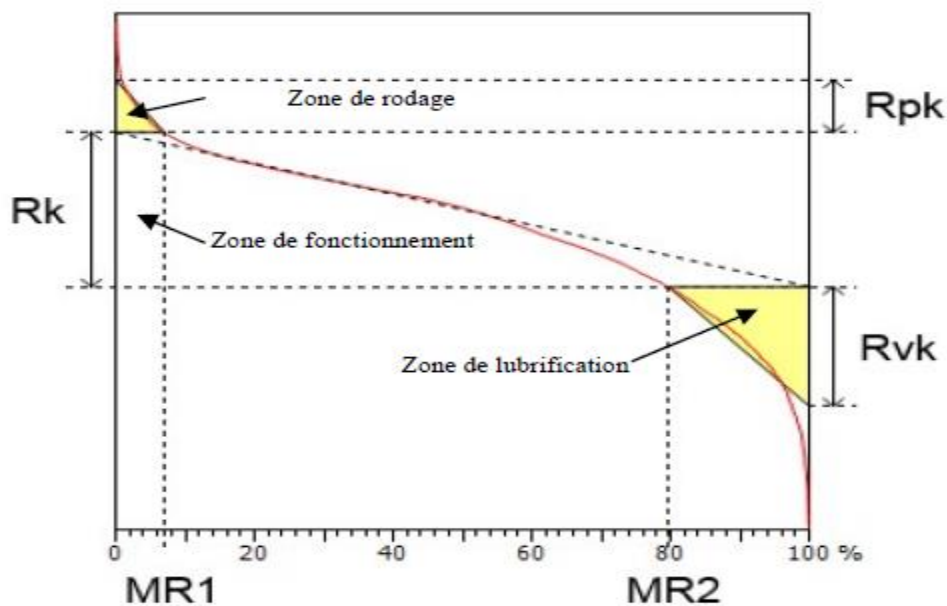


Figure 21. Construction graphique des paramètres " R_k , R_{pk} , R_{vk} " [5]

I.6 Conclusion

D'après la recherche bibliographique, on peut conclure que la tribologie regroupe trois axes principaux qui sont les frottements, l'usure et la lubrification. En effet, il a été constaté selon la recherche que le frottement dépend de plusieurs facteurs tels que le matériau, et l'état de surface. Les principaux paramètres de rugosité contribuant dans les fonctionnalités des surfaces ont été présentés.

Chapitre II
Matériaux et techniques expérimentales

II.1 Introduction

Ce travail expérimental a été proposé dans le cadre du projet de l'équipe de recherche sur la déformation et mise en forme au niveau de l'Unité de Recherche Appliquée en Sidérurgie et Métallurgie (URASM/ CRTI, Annaba). Le stage effectué dans cette unité de recherche m'a permis de manier des équipements et de réaliser des essais dans le cadre du thème proposé. Dans ce chapitre, une présentation des moyens et des méthodes expérimentales seront exposées afin d'évaluer les paramètres suivants : le coefficient de frottement "cof", la rugosité arithmétique Ra, le taux de portance (Mr1 et Mr2), et les paramètres fonctionnels (Rpk, Rk, Rvk). La caractérisation chimique et mécanique du matériau sera présentée. Les machines pour essai de traction et résilience ainsi que le banc d'essai de frottement seront exposés. Les plans adoptés pour l'expérimentation et les différentes opérations réalisées seront énoncés ainsi que les appareils de mesure de la micro-dureté, et la rugosité.

II.2 Caractérisation du matériau

Le matériau choisi pour ce travail expérimental est un acier HLE micro allié selon la norme API 5 L X52, destinées pour la fabrication des tubes hélicoïdaux pour le transport de gaz et de pétrole. Des échantillons ont été prélevés au niveau des ateliers TSS au complexe d'El-Hadjar. Ils ont été fabriqués selon les normes API, de grade 5L X.

II.2.1 Composition chimique

Les éléments chimiques ont été déterminés par analyse spectrophotométrie sur machine type « **SPECTRO Rp 212** » au niveau de l'URASM, complexe de El-Hadjar à Annaba et dont le

Teneur des éléments en %													
C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V	Nb	Al	Cu	Sn	Ni	Ti
0,15	1,33	0,26	0,005	0,007	0,014	0,008	0,001	0,008	0,025	0,035	0,003	0,012	0,003

résultat de l'analyse est consigné sur le Tableau 3.

Tableau 3. Composition chimique de l'acier X52

II.2.2 Etude métallographique

La préparation des échantillons pour observations métallographiques passe par les étapes suivantes :

- Découpage des échantillons

La quantité de métal à prélever, l'endroit et le sens de prélèvement sont en fonction du type d'observation à effectuer et de l'enchaînement des essais ultérieurs. Le découpage se fait par les méthodes d'usinage classiques ou par tronçonnage, oxycoupage ou méthodes apparentées. Les effets perturbateurs du découpage sont avant tout d'ordre thermique et d'ordre mécanique (*écrouissage*), l'effet thermique affectant le métal sur plusieurs millimètres de profondeur. Il est important de noter que, même par meulage ou tronçonnage sous eau, la température superficielle, sur 0,01 mm de profondeur par exemple peut largement dépasser 200°C et par conséquent, affecte le nombre de structures instables et même induire des microfissures très superficielles.

- Polissage

Les échantillons sont passés successivement sur différents papiers dont les grains ont une finesse décroissantes (120, 180, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2000). Puis, on utilise une toile sur laquelle on dépose des diamants artificiels de taille maîtrisée (3 μm et 1 μm), soit en pulvérisant un aérosol, soit en étalant une pâte. Avec un peu d'alumine (Al_2O_3) (Figure 22).



Figure 22. Préparation des échantillons

Les échantillons ont subi une opération de nettoyage puis rincé avec de l'eau afin d'éliminer toute trace d'impureté. L'attaque chimique utilisée pour ce matériau est le Nital 5% (5ml d'acide nitrique + 100ml d'éthanol pur), durée d'attaque 20s à 30s (à T° ambiante). Ensuite, les échantillons sont lavés avec l'eau distillée et bien séchés avec un séchoir.

- Observation métallographique

L'observation microstructurale a été réalisée sur un microscope optique universel de type NIKON LV150N (Figure 23) qui permet l'observation des échantillons préparés avec un grossissement qui varie de 100 à 500.



Figure 23. Microscope optique à haute définition NIKON

II.3 Caractérisation mécaniques

II.3.1 Essai de traction

- **Machine d'essai**

L'essai de traction a été réalisé sur deux types d'éprouvettes (traitée thermiquement et brute). Ces éprouvettes ont été préparées dans les ateliers de mécanique (TSS) au complexe d'El-Hadjar sur une machine de traction universelle de type « ZwickRoell » ayant une capacité maximale de chargement de 600 KN (Figure 24). Vu la nature du matériau et la géométrie des éprouvettes ; la vitesse de déplacement du vérin a été fixée à 8 1/s.

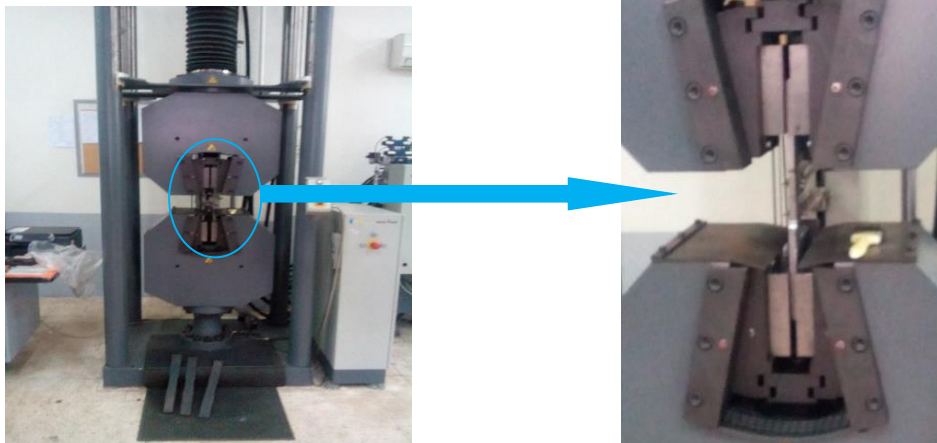


Figure 24. Machine de traction

- **Eprouvette d'essai de traction**

Les éprouvettes sont prélevées des tubes de la même coulée, dans le sens longitudinal d'une virole des tubes d'après la norme API 5 L, puis elles sont aplaties avec une presse hydraulique et usiné au laboratoire d'essai mécanique de l'entreprise Arcelor-Mittal (T.S.S) sur une fraiseuse selon la forme finale normalisée (Figure 25). Les résultats des essais de traction pour l'éprouvette non traitée et traitée sont consignés sur le tableau 4.



Figure 25. Éprouvette de traction normalisée

Tableau 4 Caractéristiques mécanique de l'acier X52

Essai	Rm(Mpa)	Re (Mpa)	Fm(KN)	E(Gpa)	A%
Éprouvette non traitée	458,4	367,9	219,49	132	36,13
Éprouvette traitée	549,4	395	215,60	155	32,48

II.3.2 Détermination de la ténacité du matériau

La ténacité du matériau est déterminée par le biais de l'essai de résilience. Il s'agit de déterminer l'énergie de rupture K_v en fonction de la température qui permettra de déterminer soit la ténacité JIC ou bien le facteur d'intensité de contrainte critique KIC. Les essais de choc ont été réalisés sur un mouton pendule FRANK 53580 (Figure 26) correspondant à la norme DIN51222. Les éprouvettes de résilience sont prélevées d'une virole d'un tube dans le sens transversal et préparées selon la norme ISO 6892-1 :2016 avec une entaille en V (Figure 27). L'essai s'est déroulé sous une température ambiante de 25°C.

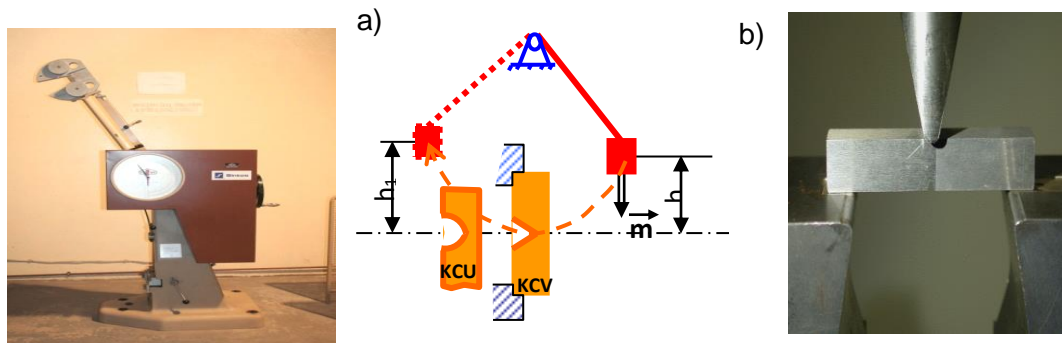


Figure 26. Mouton pendule de 300 Joules KARLFRANK (Type 53580)
 a) schéma de principe b) montage de l'éprouvette

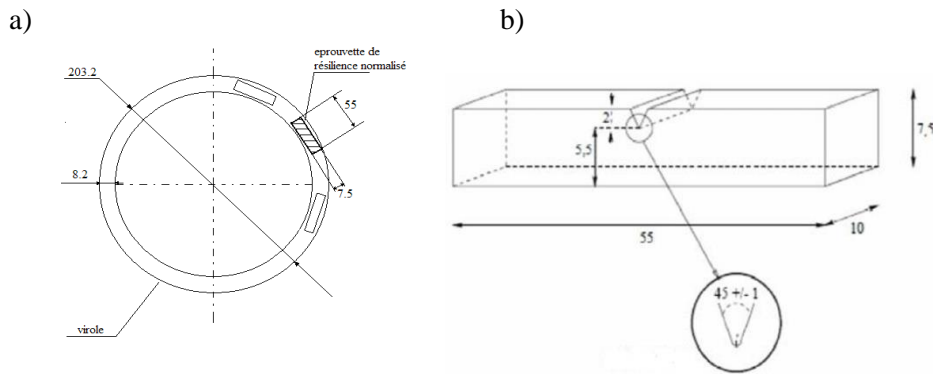


Figure 27 a) Prélèvement des éprouvettes de résilience
b) Eprouvette de résilience avec une entaille en V

II.3.3 Micro dureté Vickers

La dureté superficielle a été mesurée avec un micro-duromètre de type Matsuzawa (MXT70) présenté sous une charge de 500g grammes forces. La dureté Vickers Hv est le rapport (1) entre la charge appliquée et la surface projetée de l'empreinte rémanente:

$$HV \approx 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

- F est la charge appliquée en (N)
- d est la moyenne des diagonales de l'empreinte en (mm).

La dureté superficielle mesurée équivaut à 207.1 Hv

II.4 Méthodologie expérimentale

Afin, de rendre commode le déroulement des essais et organiser leur disposition, la méthode des plans d'expériences a été adoptée. Cette technique permet de minimiser le nombre d'expériences tout en ayant le maximum de renseignements ce qui aide à minimiser le temps et d'économiser la matière première. Par conséquent, pour la réalisation des essais de frottement les plans complets 2^3 à trois facteurs et à deux niveaux chacun (-1, 1) ont été sélectionnés [43]. Par ailleurs, les facteurs considérés pour ces essais sont : La distance parcourue "D" codée (X1), la vitesse de glissement "V" codée (X2) et la charge appliquée "Py" codée (X3). Dans l'expérimentation (Figure 28) ces facteurs constituent les paramètres d'entrées et le coefficient de frottement "cof" représente la réponse de sortie. Ainsi, huit (08) expériences sont envisagées conformément aux combinaisons indiquées dans le tableau 5.

Le modèle mathématique postulé est un modèle polynomial du premier degré avec des interactions.

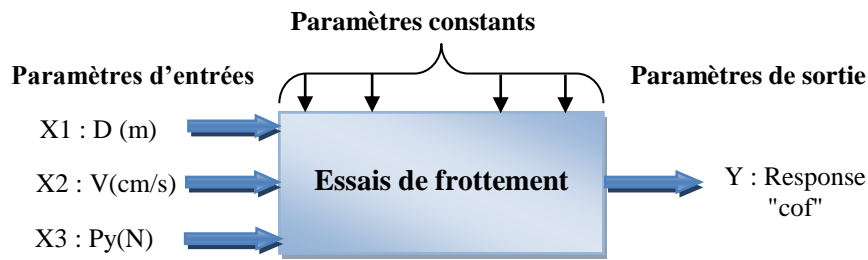


Figure 28 Schéma de l'expérimentation

Tableau 5. Matrice d'expérience

Test N°	Distance parcourue D (X1)	Vitesse de glissement V (X2)	Charge appliquée Py (X3)
E1	-1	-1	-1
E2	+1	-1	-1
E3	-1	+1	-1
E4	+1	+1	-1
E5	-1	-1	+1
E6	+1	-1	+1
E7	-1	+1	+1
E8	+1	+1	+1
Niveau - 1	10 m	2 cm/s	1 N
Niveau +1	50 m	5 cm/s	10

II.5 Préparation des échantillons

Pour les essais de frottement huit (08) échantillons ont été préparés préalablement conformément aux plans complets 2^3 . Après découpage avec une tronçonneuse métallographique, les échantillons ont subi un polissage mécanique (polisseuses manuelles) avec du papier abrasif de granulométries croissantes : P320, P400, P600, P800, P1200 et P4000 (Figure 29).

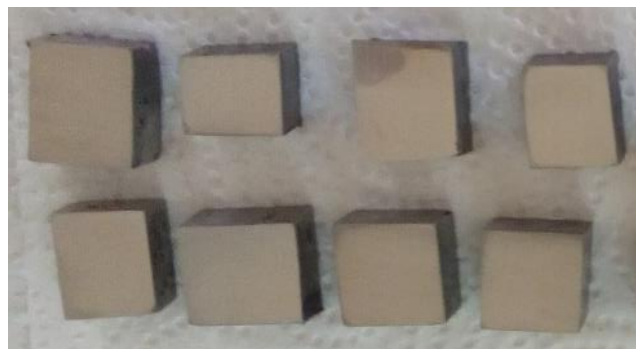


Figure 29. Les échantillons après polissage

II. 6 Essais de frottement

Tous les tests tribologiques ont été effectués au niveau de l'école supérieure des mines et métallurgie, Annaba à l'aide d'un tribomètre type bille/pion-disque, CSM Instrument indiqué par la figure 30 selon la norme ASTM G99 -95. Les essais de frottement ont été réalisés à température ambiante à l'air avec une bille d'acier 100C6. Le coefficient de frottement a été enregistré automatiquement pendant le test en utilisant le logiciel d'acquisition des données Tribox 4.49. Les résultats de chaque essai ont été enregistrés dans le tableau 6.

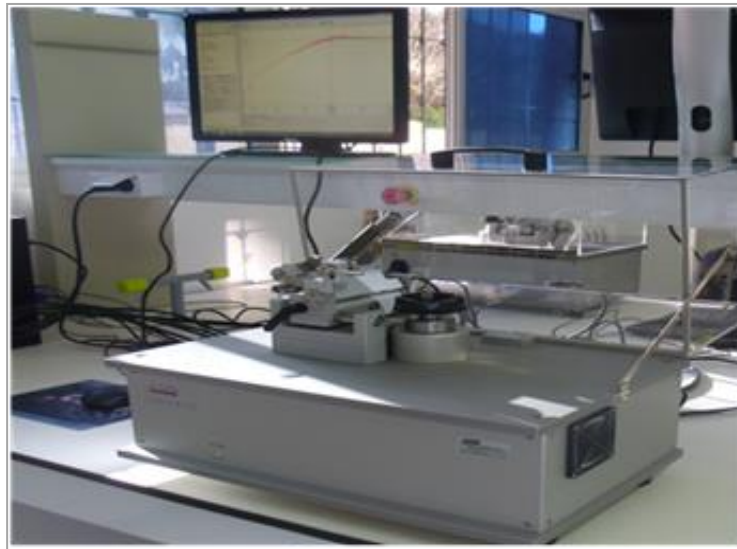


Figure 30. Tribomètre bille/pion-disque utilisé pour les tests de frottement.

Le traitement numérique par le logiciel Minitab de la réponse ("cof") selon la matrice d'expérience (tableau 6) a permis le développement d'un modèle mathématique mettant en évidence une corrélation entre la réponse étudiée "cof" et les trois paramètres considérés lors des essais de frottement (D, V, Py).

Tableau 6. valeurs mesurées du "cof" pour chaque essai

N° d'essai	Charge appliquée Py (N)	Vitesse de glissement V (cm/s)	Distance parcourue D (m)	Cof
E1	1	2	10	0.468
E2	1	2	50	0.554
E3	1	5	10	0.420
E4	1	5	50	0.613
E5	10	2	10	0.315
E6	10	2	50	0.765
E7	10	5	10	0.418
E8	10	5	50	0.328

II.7 Mesure de rugosité

Des mesures de rugosité ont été réalisées à l'aide d'un profil mètre 3D à source laser Cyber-Technology CT100 avant et après essai de frottement et les résultats sont consignés sur les tableaux 7, 8 et 9.

Tableau 7. Valeurs mesurées de "Mr1", "Mr2" avant et après l'essai de frottement

N° d'essais	Mr1 AVF (%)	Mr2 AVF (%)	Mr1 APF (%)	Mr2 APF (%)	Taux d'amélioration	Taux de réduction
E1	9.48	86.61	9.81	84.01	3.48	3.00
E2	9.66	86.77	9.94	82.82	2,89	4.55
E3	10.83	88.58	9.76	85.55	-9.87	3.41
E4	8.81	86.53	12.90	81.43	46.42	5.98
E5	9.33	86.19	10.41	80.94	11.57	6.09
E6	10.49	87.87	11.4	83.41	8.67	5.07
E7	9.54	87.24	14.78	86.91	54.92	0.37
E8	10.29	87.27	10.32	62.63	0.29	28.23

Tableau 8. Valeurs mesurées de "Ra", "Rpk", "Rk" et "Rvk" avant l'essai de frottement

N° d'essais	Ra (µm)	Rvk (µm)	Rk (µm)	Rpk (µm)
E1	0.09	0.16	0.28	0.14
E2	0.04	0.07	0.16	0.06
E3	0.09	0.14	0.31	0.08
E4	0.12	0.17	0.34	0.24
E5	0.05	0.09	0.14	0.07
E6	0.1	0.15	0.29	0.12
E7	0.09	0.16	0.28	0.13
E8	0.04	0.04	0.11	0.05

Tableau 9. Valeurs mesurées de Ra, Rpk, Rk et Rvk après l'essai de frottement

N° d'essais	Ra (µm)	Rvk (µm)	Rk (µm)	Rpk (µm)
E1	0.08	0.18	0.25	0.1
E2	0.12	-0,08	0,13-	0,05
E3	0.1	0.27	0.3	0.13
E4	0.19	0.52	0.45	0.37
E5	0.28	0.79	0.71	0.38
E6	0.13	0.42	0.32	0.24
E7	0.34	0.51	0.89	0.75
E8	0.21	0.91	0.29	0.21

II.8 Conclusion

La méthodologie des plans complets 2^3 utilisée pour ce travail expérimental a permis :

- L'évaluation du coefficient de frottement en fonction des paramètres de l'essai qui sont la charge appliquée "Py", la vitesse "V" et la distance parcourue "D",
- La modélisation du coefficient de frottement dans le domaine d'étude.
- D'apprécier l'évolution du taux de longueur portante ("Mr1" et "Mr2") et la rugosité ("Ra") ainsi que les paramètres fonctionnels ("Rpk" ; "Rvk", "Rk") pour les différents essais de frottement réalisés,

Tous les équipements qui ont servis durant le travail expérimental ont été exposés ainsi que le plan expérimental utilisé pour l'essai de frottement. Les étapes de préparation des éprouvettes, ainsi que la réalisation de l'essai de frottement, et le modèle mathématique obtenus a été présenté. Dans le chapitre suivant, les résultats seront interprétés.

Chapitre III
Résultats et discussions

III. 1 Introduction

Le frottement dépend beaucoup plus des propriétés des couches superficielles que des propriétés volumiques du corps considéré. C'est pourquoi la maîtrise du frottement est souvent la clé de l'amélioration de la longévité d'un système mécanique [44]. L'objectif de ce travail expérimental est d'étudier le comportement de la surface au frottement à sec afin de trouver une corrélation entre les paramètres du test de friction dans ce cas la vitesse (V), la distance parcourue (D); la charge appliquée (P) et le coefficient de frottement. De plus une investigation est effectuée portant sur l'évolution du taux de longueur portante après l'essai. Les tests de friction ont été réalisés en adoptant la méthodologie des plans complets 2^3 avec trois facteurs à deux niveaux (min, max) chacun. Ainsi, des échantillons en acier X52 ont été utilisés pour l'expérimentation et des mesures de rugosité ont été effectuées avant et après le test. Une caractérisation structurale et mécanique du matériau a été réalisée. Une analyse statistique des résultats ainsi qu'une modélisation du coefficient de frottement au moyen des plans complet 2^3 a été effectuée. Par ailleurs, une investigation sur l'évolution des taux de longueur portante et des paramètres fonctionnels a été établie.

III.2 Interprétation des résultats de caractérisation

III.2.1 Observation métallographique

La morphologie de la structure du matériau (Figure 31) montre l'apparence d'une structure martensitique à grains fins en comparaison avec l'état non traité, qui révèle la présence de ferrite et perlite.

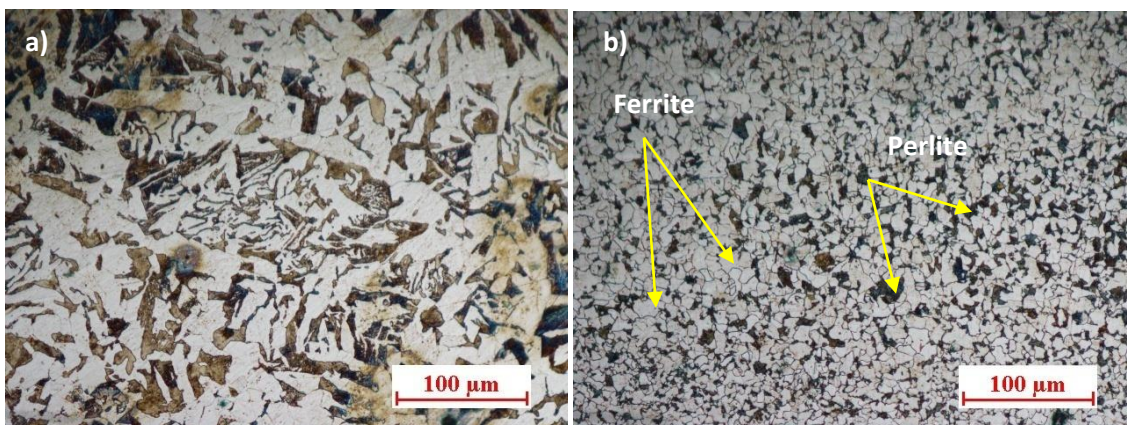


Figure 31 Microstructure de l'acier X52 a) traité b) non traité

III.2.2 Essai de traction

Les courbes indiquées sur la figure 32 montrent une augmentation de la résistance maximale "Rm" pour l'éprouvette traitée par rapport à l'éprouvette non traitée indiquant que le matériau est plus résistant. De plus, il est constaté un accroissement de la limite élastique "Re" ainsi que le module de Young signe que le matériau est plus dur et rigide (Figure 33). En contre partie l'allongement diminue ce qui implique que le matériau est devenu fragile ceci peut être expliqué par l'effet des traitements thermiques (trempe + revenu).

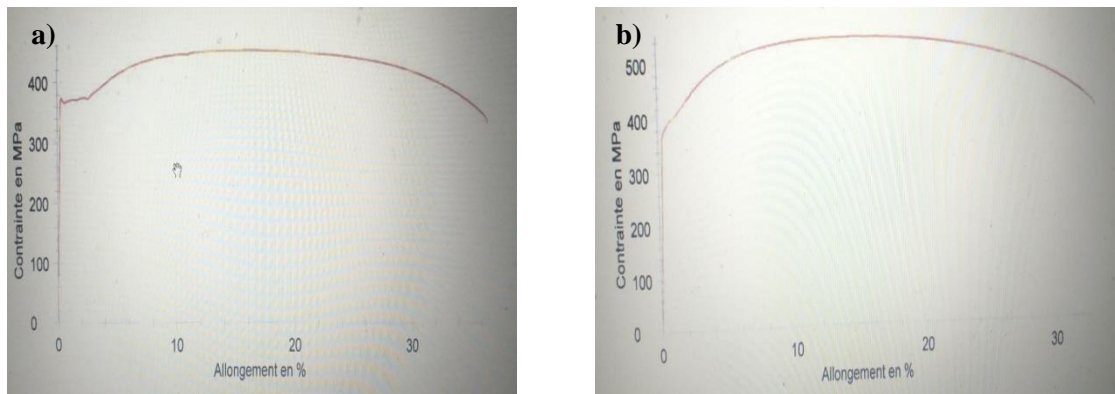


Figure 32. Courbe de traction a) Éprouvette non traitée b) Éprouvette traitée

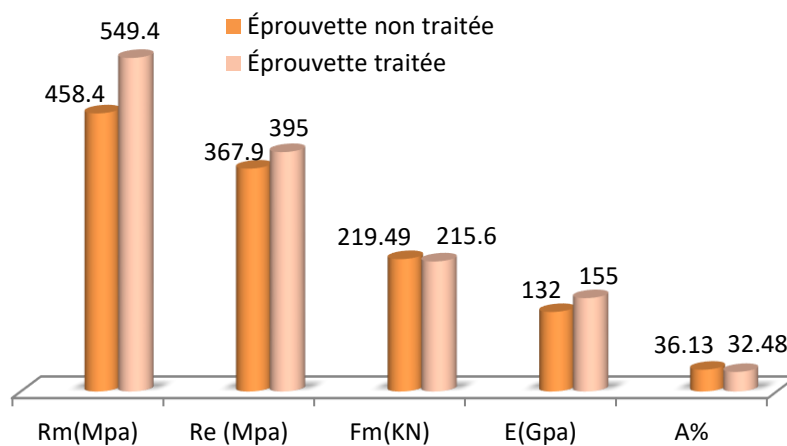


Figure 33. Caractéristiques mécanique des échantillons traités et non traités

III.2.3 Essai de résilience

Les résultats des essais de résiliences montrent une diminution de l'énergie absorbée pour les éprouvettes traitées qui équivaut à 8.8 J par rapport aux éprouvettes non traitées où $W = 11.8J$ ce qui confirme que le matériau est devenu plus fragile. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que les traitements thermiques engendrent une structure lamellaire très dur et par conséquent fragile.

III.3 Interprétation des résultats des essais de frottement

III.3.1 Evolution du coefficient de frottement

L'évolution du coefficient de frottement moyen "cof" pour chaque essai présentée sur l'histogramme (Figure 34) montre que le coefficient "cof" atteint la valeur maximal 0.765 pour l'essai 6 où "Py" et "D" sont à leurs niveaux maximal et "V" et à son niveau le plus faible. Cependant ce coefficient enregistre une valeur minimale de 0.315 pour l'essai 5 où la charge "Py" est à son niveau maximum et la vitesse "V" et la distance parcourue "D" sont à leurs niveaux le plus faible. Par ailleurs, l'analyse des courbes illustrées sur les figures 35a et 35b présente la variation du coefficient de frottement pour le couple tribologique X52/100C6 en fonction de la distance parcourue. Ces courbes indiquent clairement l'existence de trois phases, la première phase débute par une période de rodage pendant laquelle le coefficient augmente rapidement pour atteindre une valeur maximale avec la présence d'une déformation plastique des aspérités de surface. La deuxième période montre une diminution du coefficient de frottement. Ceci est dû probablement au troisième corps, qui sous l'effet de l'usure par friction sur la piste d'usure de l'acier joue un rôle similaire à celui d'un lubrifiant solide. Lors de la troisième période, le coefficient de frottement se stabilise et sa valeur reste constante quelle que soit la distance parcourue [46].

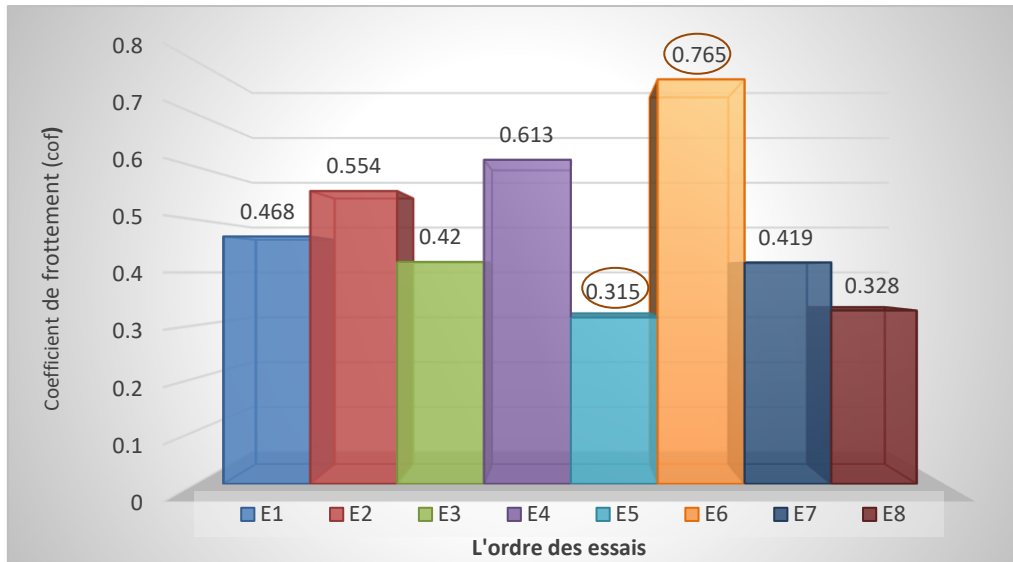


Figure 34. Evolution du coefficient de frottement en fonction des différents essais

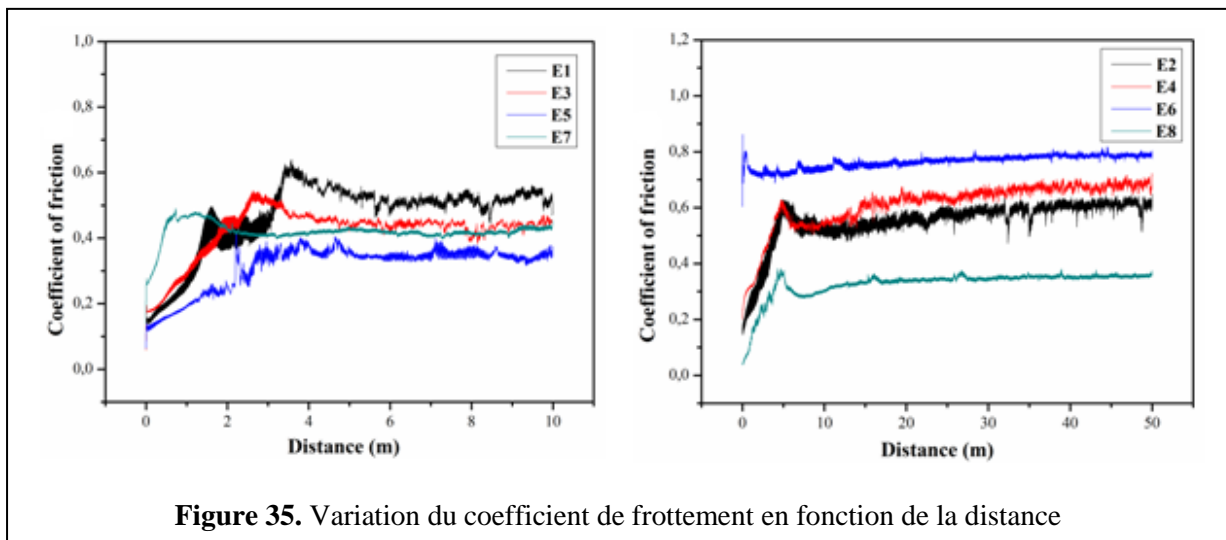


Figure 35. Variation du coefficient de frottement en fonction de la distance

III.3.2 Analyse statistique des résultats et modélisation

L'analyse statistique de la réponse en l'occurrence le coefficient de frottement a montré que les résidus semblent dispersés de façon aléatoire autour de zéro (figure 36a), de plus ils semblent suivre une ligne droite (Figure 36b) ceci montre que le modèle explique bien les résultats expérimentaux.

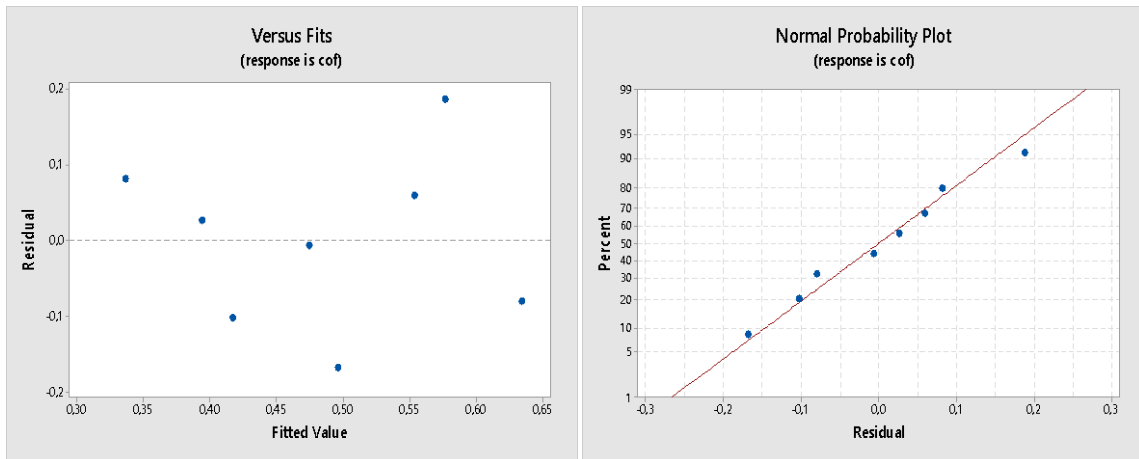


Figure 36 a) Courbe des résidus b) courbe de probabilité normale

L'effet des différents paramètres utilisés dans cette essai (P_y , V , D) illustré sur les courbes de la figure 37 montre qu'une longue distance parcourue donne un coefficient de frottement plus élevé qu'une **coute** distance, par contre une grande vitesse et une charge élevée produisent un coefficient de frottement plus faible qu'une vitesse prise à son minimum ainsi que la charge. D'où, il ne semble pas y avoir de grande différence dans l'ampleur des effets, la distance étant le plus grand suivi de la vitesse, et de la charge.

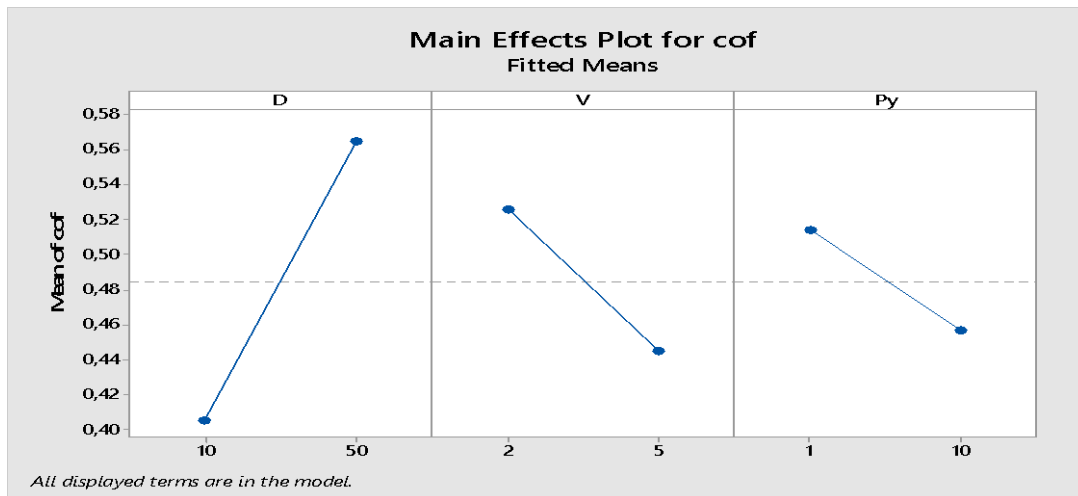


Figure 37.Courbes des effets pour le coefficient de frottement

Concernant l'interaction entre les différents paramètres de l'essai (figure 38), il apparait clairement que l'interaction entre la vitesse et la distance parcourue est très significative où le graphique indique que la diminution du coefficient de frottement lorsque la distance passe de 50 à 10 dépend de la vitesse appliquée. Lorsque la vitesse est élevée, le changement du "cof" est moindre que lorsque la vitesse est minimale. Tandis que, l'interaction entre la charge et la

distance montre que le passage d'une distance de 10 à 50 pour une charge min ou max le "cof" augmente. Par ailleurs, l'interaction entre la vitesse et la charge appliquée indique que la réduction du coefficient de frottement quand la vitesse converge de 2cm/s à 5 cm/s dépend de charge. Au niveau minimale de la charge le "cof" est presque stable que lors de l'application d'une charge élevée où il ya une diminution significative du coefficient de frottement.

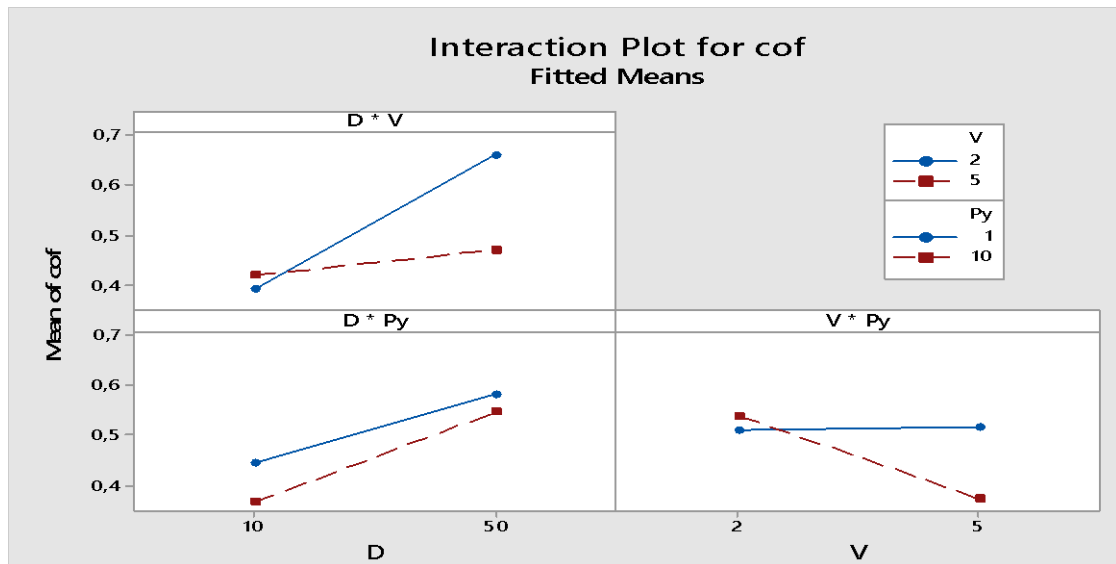


Figure 38 Courbes des interactions pour le coefficient de frottement

Les résultats de mesure du coefficient de frottement obtenus après les essais réalisés selon la méthodologie des plans complet ont été traités par le logiciel Mini Tab ce qui a permis d'estimer l'effet des paramètres d'essai ((Py, D et V) et leur interactions vis-à-vis du coefficient de frottement, ceci au moyen d'un modèle mathématique illustré par l'équation (1). Ce modèle mathématique a abouti à des courbes indiquant la variation de "cof" en fonction des paramètres de l'essai ainsi que leurs interactions.

$$\begin{aligned} \text{cof} = & 0,5466 - 0,0018 D - 0,0365 V - 0,0503 Py + 0,0015 D*V + 0,0022 D*Py \\ & + 0,0116V*Py - 0,0006 D*V*Py \end{aligned} \quad (1)$$

III.3.3 Simulation des effets des paramètres d'essai sur le coefficient de frottement

Les courbes de simulation obtenues par le modèle illustrant la variation du coefficient de frottement « cof » en fonction de la vitesse et la charge (Figure 9) montrent qu'une vitesse maximale associée à une forte charge engendre une diminution du "cof" qui tend vers une valeur de 0.38 ce qui peut s'expliquer par l'effet de charge importante qui augmente la surface de contact induisant la formation d'une couche protectrice des oxyde de fer à la surface [3] ce qui est visible sur la topographie de la figure (12a). Par contre pour une faible charge, l'effet de la vitesse est peu significatif et induit une augmentation du "cof" qui varie entre 0.49- 0,51. Ce phénomène est dû à la rupture des aspérités, ces dernières forment des débris durs frottant entre les deux surfaces de contact causant l'accroissement du coefficient de frottement [2] qui est cohérent avec l'allure du sillon sur la figure 12b. Concernant l'évolution du "cof" en fonction de la charge (P_y) et la distance parcourue (D) (Figure 10) il est remarqué l'influence de la distance où quelque soit la charge appliquée le cof augmente pour atteindre une valeur supérieure à 0,55 pour une distance $D=50m$. Ceci s'explique par le fait qu'au fur et à mesure que la bille avance les débris adhèrent à sa surface provoquant une adhésion de la matière au bord du sillon visible sur la topographie (Figure 12 c). En revanche, le coefficient de frottement diminue à sa valeur minimale $cof < 0,4$ pour une distance $D=10m$ et une charge de 10N (figure 12d). La variation du "cof" en fonction de la vitesse et de la distance parcourue (Figure 11) montre l'effet significatif de la distance où il est constaté qu'une faible vitesse combinée à une longue distance $D=50m$ provoque une augmentation importante du "cof" qui atteint une valeur de 0,7 sous l'effet d'une charge de 10N. Ceci est confirmé par la topographie indiquée sur la figure 12e qui est marquée par une profondeur et une largeur importantes du sillon. Alors qu'en diminuant la distance $D=10m$ pour $V=2cm/s$, on remarque une diminution du coefficient de frottement qui converge vers une valeur inférieure à 0,4 (figure 12f).

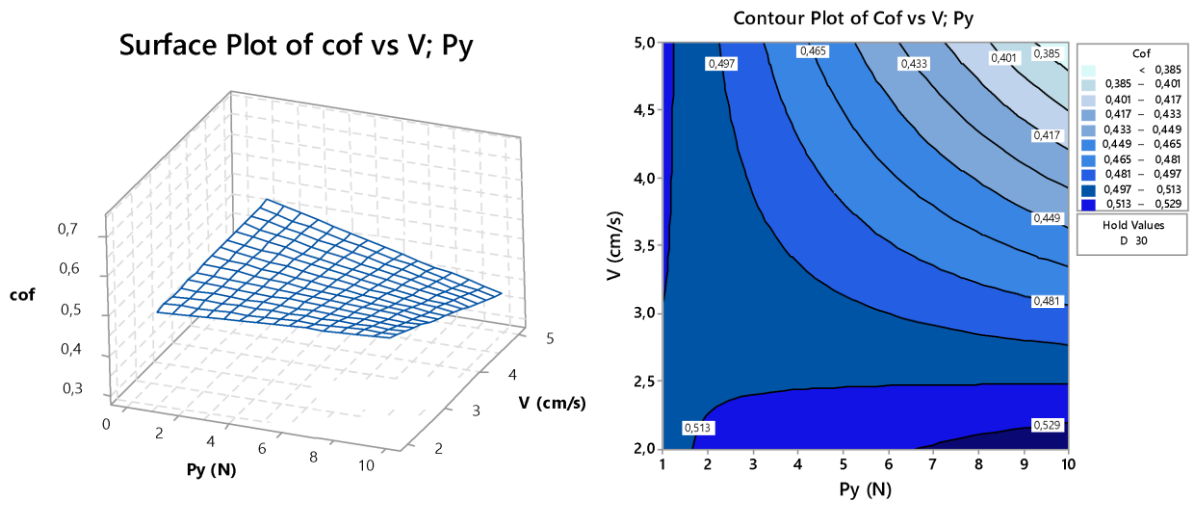


Figure 39. Evolution du cof en fonction de la vitesse et la charge

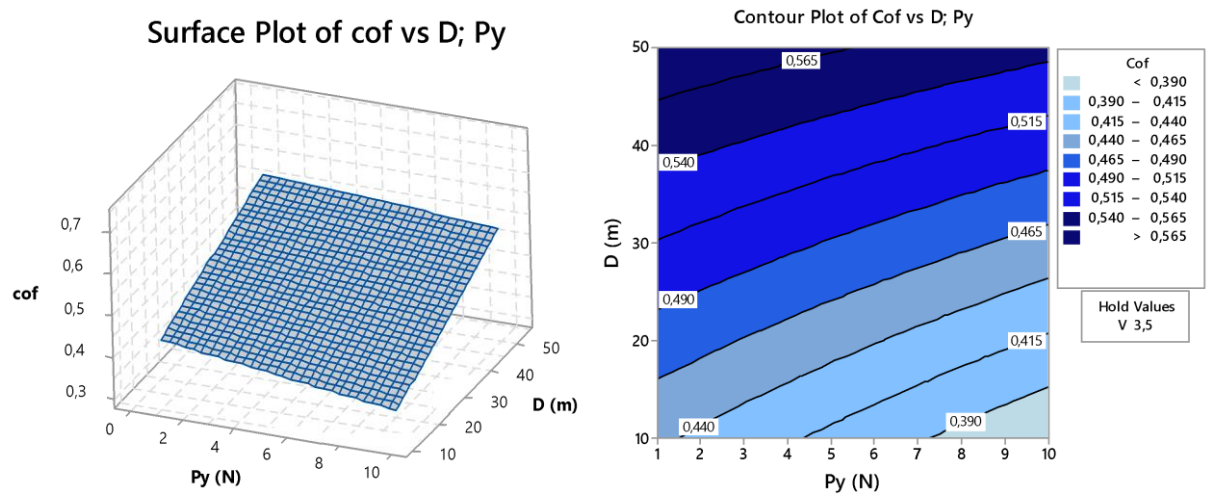


Figure 40. Variation du cof en fonction de la charge et de la distance parcourue

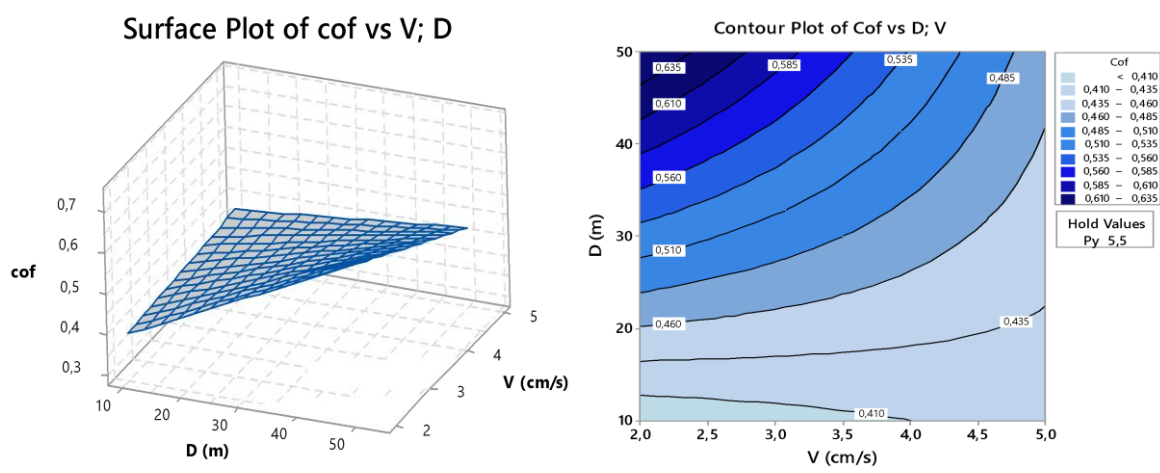
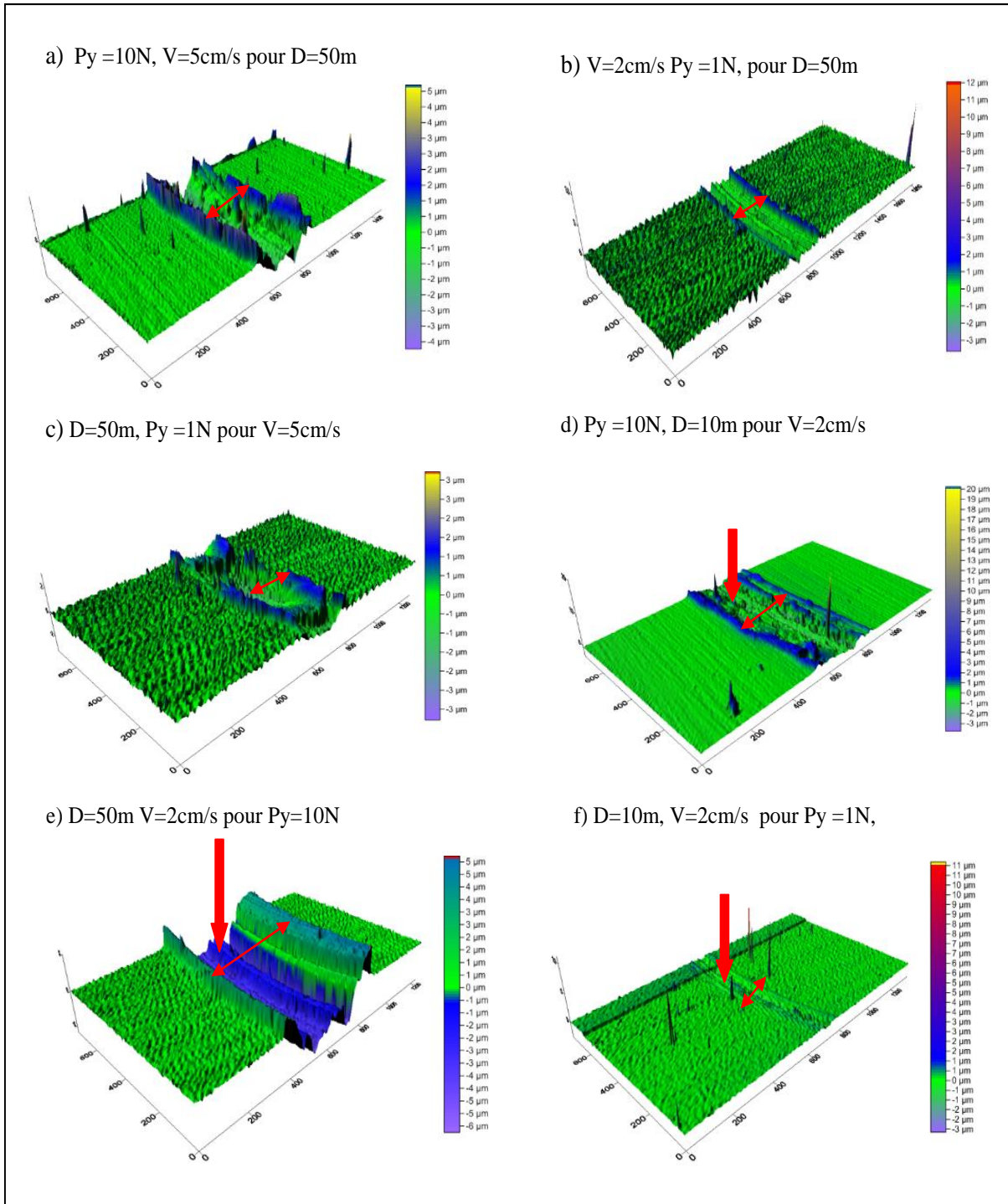


Figure 41. Variation du cof en fonction de la vitesse et de la distance parcourue



III.3.4 Evolution des paramètres de surface au cours des essais de frottement

- Taux de longueur portante

L'évolution des taux de longueur portante Mr_1 et Mr_2 pour les différents essais réalisés sont illustrés sur la figure (43) où il est constaté une amélioration du paramètre Mr_1 allant de 0.29% à 54.92%.

Cette amélioration peut s'expliquer par le phénomène de rodage, par conséquent l'effet de charge permet l'aplatissent les pics saillant d'où il ya nivellement de la surface ce qui augmente la surface portante. Par contre, il est observé une réduction du paramètre Mr2 au cours du fonctionnement, ce phénomène peut s'expliqué par l'influence de la distance parcourue sous l'effet de charge et la vitesse où pour D=10m le taux de réduction varie entre 0.37% et 6.09% alors que pour D= 50m le taux de longueur portante Mr2 diminue avec un taux de réduction qui varie entre 4.55% à 28.23%. De plus au delà d'une certaine distance l'épaisseur de la couche protectrice diminue pour ce rompre et le détachement des débris provoque une dégradation de la surface d'ou diminution de la longueur portante.

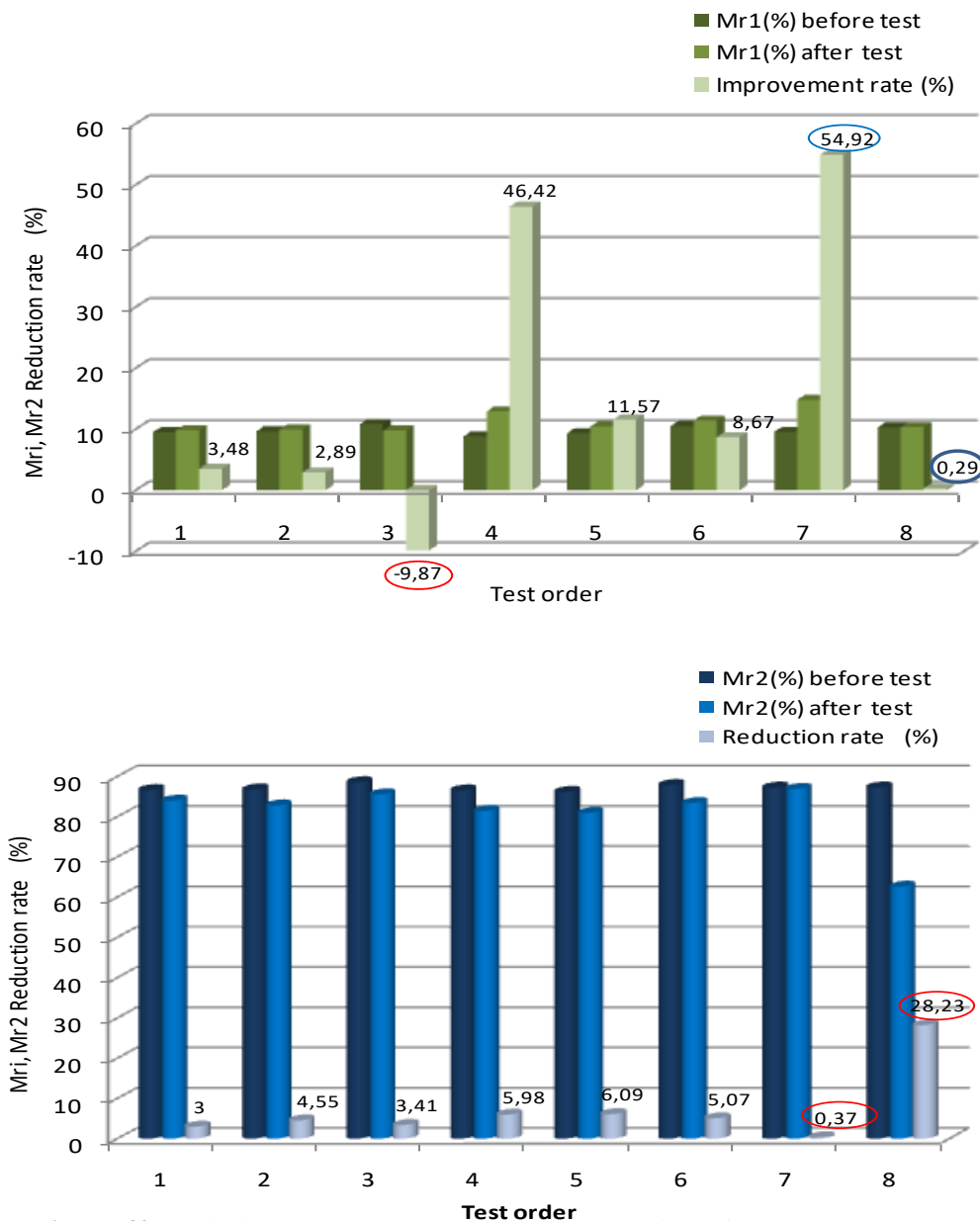


Figure 43. Variation de Mr1 et Mr2 au cours des essais de frottement

- Moyenne arithmétique Ra

La rugosité "Ra" varie selon les régimes adoptés pour chaque essai (Figure 44) où elle atteint sa valeur maximale $Ra = 0,34 \mu\text{m}$ dans l'essai N° 7 où l'effet de la charge et de la vitesse semble important. Cependant, sa valeur minimale $Ra = 0,08 \mu\text{m}$ a été constaté lors de l'essai N°1 où les trois paramètres de l'essai sont à leur niveau minimal.

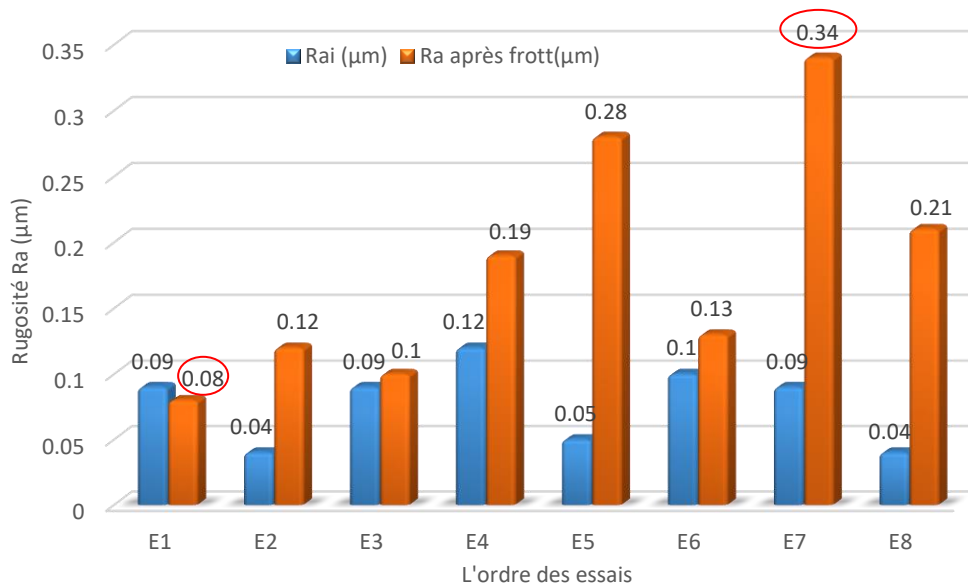


Figure 44. Evolution de "Ra" pour les différents essais

- Paramètres fonctionnels

L'évolution des paramètres fonctionnels, "Rk", "Rvk" et "Rpk" illustrée respectivement sur les Figures 45, 46 et 47 lors des essais de frottement indique que le critère de fonctionnement "Rk", atteint son maximum qui équivaut $0,89 \mu\text{m}$ ce qui est bénéfique, car plus la quantité de matière est disponible pendant le fonctionnement de la pièce, plus cette dernière résistera longtemps. Par ailleurs, le critère de rodage "Rpk" a enregistré sa valeur minimale qui vaut $0,1 \mu\text{m}$ lors de l'essai N°2, ceci permet de minimiser le temps de rodage, alors que le critère de lubrification "Rvk" croît jusqu'à une valeur de $0,91 \mu\text{m}$ pour l'essai N°8 (Figure 47). En effet, plus ce critère augmente plus les creux disponibles pour retenir un lubrifiant augmentent, ce qui est indispensable pour maintenir le bon fonctionnement des surfaces en contact.

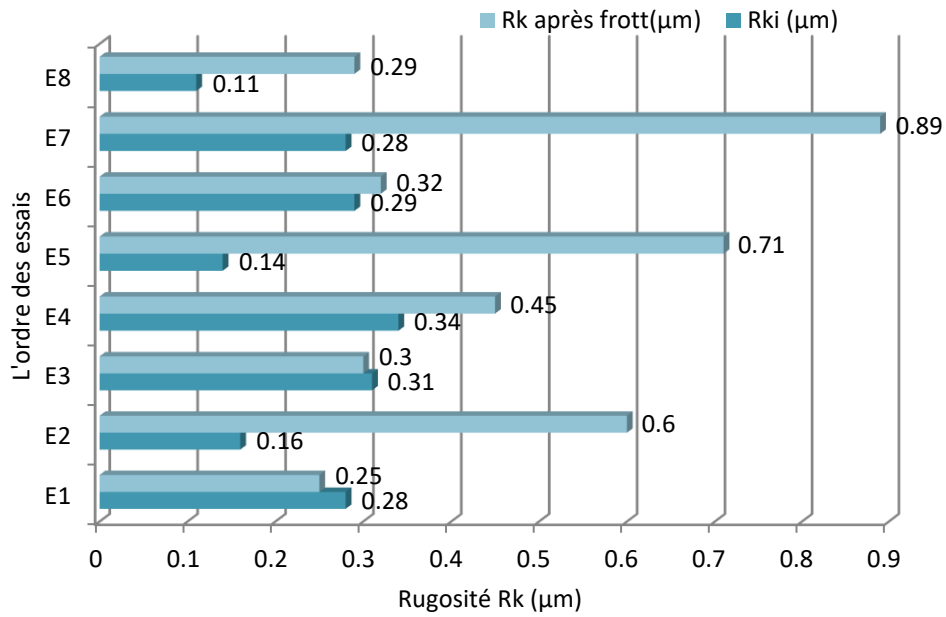


Figure 45. Evolution de "Rk" pour les différents essais

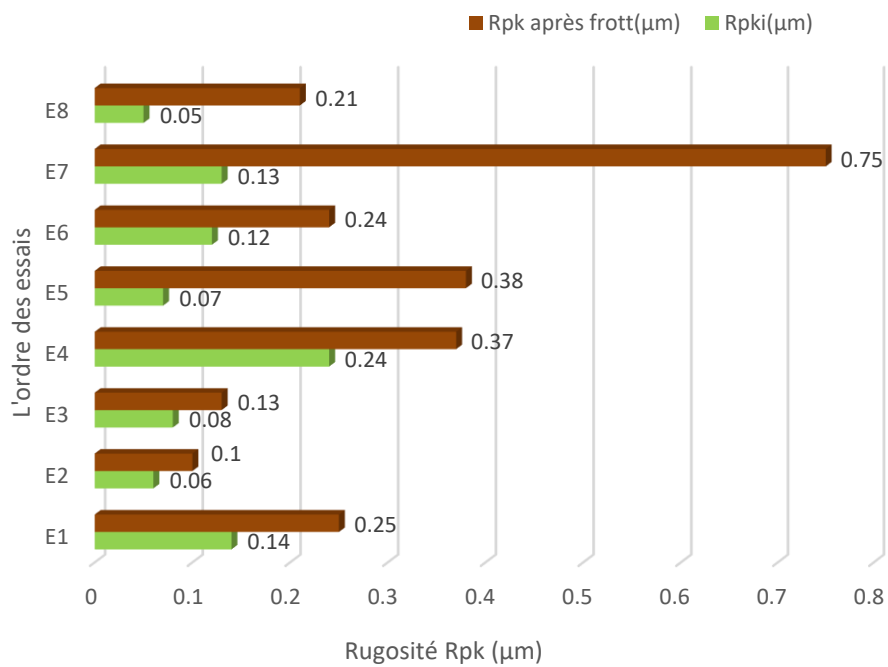


Figure 46. Evolution de "Rpk" pour les différents essais

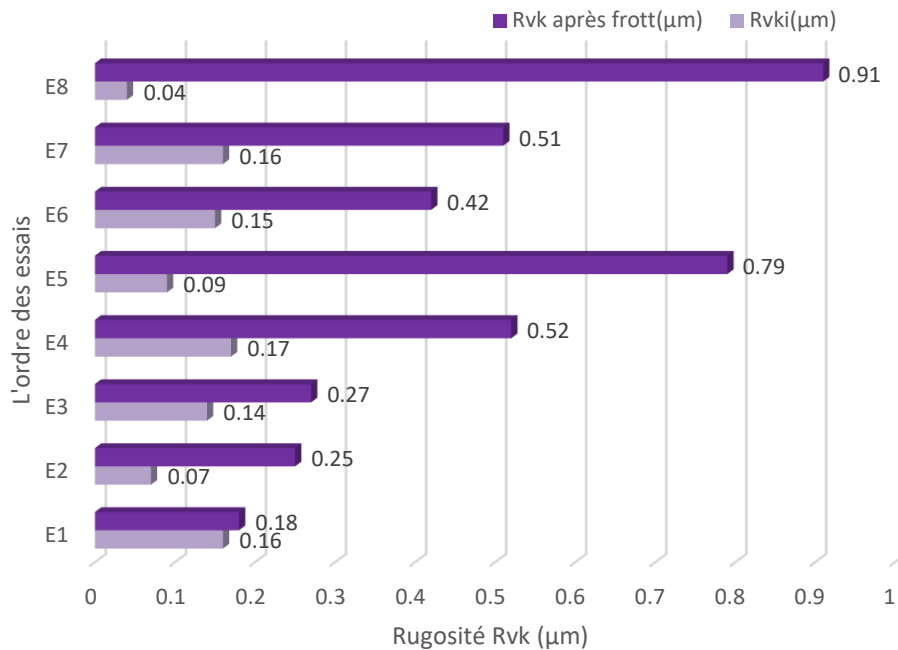


Figure 47. Evolution de "Rvk" pour les différents essais

III.4 Conclusion

A travers ce travail expérimental qui consiste à évaluer le coefficient de frottement en fonction des paramètres du test de friction, à savoir la vitesse (V), la distance parcourue (D) ; la charge appliquée (P), les conclusions suivantes ont pu être tirées :

- L'évolution du coefficient de frottement lors des essais de frottement passe par trois périodes : rodage, transition et stabilisation du coefficient de frottement ;
- La méthodologie des plans complets d'ordre 2^3 adoptée lors des essais a permis d'évaluer l'effet des paramètres d'essais (P_y , V , D) sur la réponse étudiée, en l'occurrence le coefficient de frottement ;
- L'influence significative de la distance ($D=10m/ 50m$) où une distance $D = 50m$ induit une augmentation importante du "cof" qui atteint une valeur de 0,66 ;
- Le modèle mathématique a permis la prédiction de la réponse envisagée "cof" dans le domaine d'étude.
- Une amélioration du taux de longueur portante $Mr1$ avec un taux allant de 0.29% à 54.92% en période de rodage pour un parcours $D=10m$.

- Une réduction du taux de longueur de portante Mr_2 avec un taux qui varie entre 4.55% à 28.23% pour $D=50m$.
- La rugosité de surface "Ra" ainsi que les paramètres fonctionnels ("Rpk", "Rk") augmentent lors de l'emploi des deux paramètres ("Py", "V") à leurs niveaux maximums ;
- Le paramètre "Rvk" converge vers son maximum lorsque les trois paramètres d'essai tendent vers leur maximum.

- Conclusion Générale

C'est au niveau de la surface que se produisent les phénomènes de frottements, de grippage, où les couches superficielles sont fortement influencées par la qualité de finition de la surface ainsi que les conditions de fonctionnement telles que la température et les sollicitations. La prédiction du coefficient de frottement d'un matériau dans un domaine d'étude prédéfini constitue un moyen d'évaluation efficace qui permet de connaître les conditions de travail qui peuvent minimiser le frottement et donc de préserver l'état de surface et augmenter sa durée de vie.

Les résultats obtenus dans ce travail expérimental reposent sur des essais de frottement qui ont été réalisés sur des échantillons en acier X52. Par ailleurs, la méthodologie des plans complets 2^3 a été suivie lors de la réalisation des essais, ce qui a permis d'observer l'influence des paramètres d'essai (D, V, Py) sur la réponse étudiée ("cof"). Ces plans peuvent contribuer à l'établissement des modèles mathématiques, permettant la prédiction des réponses de sortie dans un domaine envisagé avec un minimum d'essai.

Au regard des résultats expérimentaux, il a été constaté que le coefficient de frottement peut être réduit quand les paramètres d'essais sont convenablement choisis. L'évolution de la rugosité "Ra" et des paramètres de fonctionnels ("Rpk", "Rk", "Rvk") contribuent à apprécier respectivement la qualité de l'état de surface et les propriétés tribologiques, en offrant la possibilité de choisir les paramètres d'essai le plus adéquat. La simulation numérique présentée par les courbes d'isoréponses a contribué à l'analyse des effets des paramètres d'essai (facteurs d'entrée) sur la réponse étudiée ("cof").

Au final, les résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire ont permis de mieux estimer le comportement au frottement d'une surface en acier HLE (X52). Par ailleurs, le choix des paramètres d'essais est important pour garantir une minimisation du coefficient de frottement et un état de surface acceptable afin d'assurer le bon fonctionnement des surfaces des pièces en contact. Les résultats de ce travail permettent d'ouvrir la voie vers des recherches plus exhaustives et les perspectives suivantes :

- L'étude du comportement d'un acier HLE soumis au frottement lubrifié ;
- Investigation sur l'évolution du taux d'usure dans les cas d'un frottement sec et lubrifié pour le même matériau.
- Appliquer cette démarche pour d'autres matériaux.

Références Bibliographies

- [1] Michel Barquins (1994), tribologie la science pour comprendre et maîtriser le frottement et l'usure, N°764.G. Eason, B.
- [2] Olivier BARRAU, Etude du frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud, Thèse de doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, Spécialité Sciences et Génie des Matériaux, 2004.
- [3] Etcheverry Bernard (2006). Adhérence mécanique et tribologie des revêtements composites NiP Talc multifonctionnels à empreinte écologique réduite, École doctorale Matériaux Structure Mécanique.
- [4] René Kamguem, (2013).inspection automatique et sans contact de la rugosité des pièces usinées, école de technologie supérieure université du Québec.
- [5] M. Bourebia, Effet de la rugosité sur les performances d'un système mécanique- approche par fractale, Thèse de doctorat , Université Badji Mokhtar, Annaba (2017)
- [6] Renouf. M (2010), Techniques d'analyses et d'observation appliquées à la tribologie / Référence 42466210 Réf TRI2800.
- [7] Hans Jörg. M, Bergmann. E, Gras. R, Analyse et technologie des surfaces: couches minces et tribologie, 2003, ISBN 2880744547 URL <https://books.google.fr/books>.
- [8] Noël Brutinière (2015). Introduction à la Tribologie, Institut Pprime-Futuroscope, Poitiers, France
- [9] Mémoire de fin d'étude en Master, Intitulé : Etude du Comportement Electrochimique de l'acier X52. Présenté par: Mr. Mechouche (2018-2019).
- [10] D.J NAYLOR "Review of international activity on microalloyed engineering steels", Iron making and Steel Making 1989, vol 16, N° 4
- [11] MARK GRUMBACH "Aciers d'usage général", techniques de l'ingénieur, (1991)
- [12] P.S.Rothman, W.T.Toung, Pipelines, Edition Robert Baboian, (2005).
- [13] BOUGHABA WALID Etude comparative du comportement à la corrosion de deux aciers HLE avec l'étude de l'influence de la température dans H2SO4, Mémoire de fin d'étude de Master, Université Badji Mokhtar, (2003)

- [14] Y. Berger, « Corrosion et inhibiteurs des puits et collectes », Edition Technip, Paris, (1981).
- [15] J.MGray. And Poutremoli, Métallurgical options for API grade X70 and X80 line pipe. In international conference: pipe technology (1987)
- [16] Chunming Wang, Xingfang W. jie lie, Transmission electron microscopy of martensite, austensite, islands in pipeline steel X70. Materials science and engineering. (2006).
- [17] Gérald Zambelli, Léo Vincent, Matériaux et contacts, presse polytechniques universitaire romandes CH-1015 Lausanne, 1998.
- [18] Kane Malal, Contribution à l'étude de l'influence de la rugosité et des effets non newtoniens dans les contacts sévères lubrifiés, institut national des sciences appliquées de Lyon (2003).
- [19] S. Dagdag, *Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse* (2005)
- [20] M. Cartier, P. Kapsa, Usure des contacts mécaniques - Problématique et définitions. Techniques de l'Ingénieur, 2001. BM5065: p. 1 - 10.
- [21] M. Cartier, P. Kapsa, Usure des contacts mécaniques - Eléments de tribologie. Techniques de l'Ingénieur, 2001. BM5066: p. 1 - 13.
- [22] M. Ridlova, Comportement en trib-ocorrosion des aciers inoxydables AISI 321 et DUPLEX 22-05 en environnements aqueux. Thèse de doctorat, 2003, Ecole Centrale Paris.
- [23] Claudiu Constantin IONESCU, Caractérisation des mécanismes d'usure par tribocorrosion d'alliages modèles Ni – Cr, thèse de doctorat, 2012.
- [24] R.D. Malucci. Characteristics of films developed in fretting experiments on tinplated contacts, IEEE Trans Components Packag Technol 24(3). pp. 399 407, 2001.
- [25] Source internet, <http://fr.wikipedia.org/wiki/frottement>.
- [26] A.Cornet et J.P Deville physique et ingénierie des surfaces EDP sciences. Strasbourg (1998).
- [27] Tourab Mouhamed, Influence des paramètres du régime de galetage sur les fonctions

- finales de rugosités et de dureté de surface des aciers, Thèse de magister, Université Badji Mokhtar, (2003)
- [28] M. Bourebia, Influence des procédés d'usinage sur les rugosités de surface et leurs répercussions sur un contact mécanique, Thèse de magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, (2010)
- [29] Lacheze Vladimir, DAS, Noël, (2015). Les Frottements secs et visqueux.
- [30]Gérald Zambelli, Léo Vencent (1998).Matériaux et contact, Une approche tribologique, Presses Polytechniques et Universitaires, Romandes.
- [31]J. Blouet, Usure, Techniques de l'Ingénieur (1978), B585, p 1 – 34.
- [32]Notions de tribologie,[http://58consmecca.free.fr/Cours%202a%20Pdf/contact _ tribologie.pdf](http://58consmecca.free.fr/Cours%202a%20Pdf/contact_tribologie.pdf).
- [33] Mémoire de fin d'étude en Master, Intitulé : Etude du comportement tribologique d'un disque de frein. Présenté par: KASDI Yacine et SAOUDI Liamine (2018-2019).
- [34] René Gras (2008). Tribologie principes et solution industrielles » l'usinage nouvelle, Dunod, Paris.
- [35] Pierre. S (2009), Influence de la rugosité en fatigue de contact – rôle durodage, Thèse de Doctorat, Ecole polytechnique, INSA Lyon, France, p33.
- [36] SJ Shaffer (2013). Introduction to the Basics of Tribology, Tribology 101 Bruker- TMT.
- [37] Martin Benjamin, publié sur [http://www .iFrance.com/espace-prepa/](http://www.iFrance.com/espace-prepa/)
- [38] [www.technique-ingenieur.fr/.../Introduction aux traitements de surface par impact](http://www.technique-ingenieur.fr/.../Introduction%20aux%20traitements%20de%20surface%20par%20impact). Référence M1640 publié décembre 2000.
- [39] Etude des produits et des outillages STS IPM, 2009-jgb-états-de surface.odt.
- [40] All Cut instruments, principe de la mesure, www.mesures.com [www.all Cut biz](http://www.allcut.biz). [41] Cornet A, Deville J.P, (1998). Physique et ingénierie des surfaces EDP Sciences, P 327- 330.
- [42] Norme ISO 13565-2: Méthode Caractérisation des hauteurs par la courbe de taux de longueur portante (courbe d'Abbott), available at: [http://www.mip2.insa-lyon.2015.fr/Etats de surface/méthodes](http://www.mip2.insa-lyon.fr/Etats%20de%20surface/méthodes).
- [43] Maurice Pillet, plans of experiments by the Taguchi method, 2001; Organization edition, 1997, ISBN 2-7081-2031-X.

[44] Olivier BARRAU, Study of friction and wear of hot tool steel, Doctoral thesis, National Polytechnic Institute of Toulouse, Specialty in Materials Science and Engineering, (2004).

[45] Soumaya Meddah¹, Hacene Chadli², Mounira Bourebia¹, Alex Montagne³, Alain Iost³, Mohamed Labaiz and Ahlem Taleb, Dry sliding wear performance of an annealed TiNi alloy with different nickel contents, *Mater.Res.Express* 7 (2020) 036508.

[46] Mounira Bourebia, Effect of heat treatment on surface hardness and tribological behavior of XC38 steel—Approach by the experiments plans, *Mater.Res.Express* 6 (2019) 076568.