



**Université de 20 Août 1955-
Skikda**
Faculté de technologie
Département de génie mécanique



Thèse présentée en vue de L'obtention Du Diplôme de

Doctorat

Spécialité : Mécanique de construction

Option: Mécatronique

Présentée par

Sabrina MAATALLAH

Thème

**Influence de la pollution solide sur les
contacts Élasto-hydrodynamiques
(EHD)**

Présenté devant le jury composé de :

Azzedine BOUZAOUIT	M. C. /A	Université de Skikda	Président
Mohamed Rafik SARI	M. C. /A	Université de Skikda	Rapporteur (Encadreur)
Lakhdar KHOCHEMANE	Professeur	Université de Skikda	Co-Encadreur
BOUCHELAGHEM	Professeur	Université d'Annaba	Examineur
Mahmoud A/AZIZ			
Abdallah HAOUAM	M. C. /A	Université d'Annaba	Examineur
Youcef KHADRI	M. C. /A	Université d'Annaba	Examineur

Année : Février 2016

Résumé

Thème « *Influence de la pollution solide sur les contacts élastohydrodynamiques (EHD)* »

Dans nos jours, il est bien établi que l'influence de la pollution solide de la lubrification sur la dégradation des contacts mécaniques, est reconnue comme l'un des domaines de recherche les plus importants à cause de la présence inévitable des particules solides entre les surfaces en contact. En effet, ces particules indésirables peuvent conduire à une usure prématurée des éléments machines voire une défaillance totale des mécanismes.

L'étude présentée dans cette thèse essaye dans un premier temps de répondre à quelques questions relatives à la présence des particules solides dans les contacts élastohydrodynamiques roulants, en termes d'endommagements manifestés. D'autre part, en se basant sur la méthodologie de surface de réponse, les plans TAGUCHI et l'analyse de variance, une étude statistique de la dégradation des contacts EHD a été réalisée.

Cette étude est d'une très grande importance car elle traite un sujet d'actualité. En effet, la présence des particules solides au niveau des contacts mécaniques est toujours inévitable. Cette modeste contribution montre le rôle que jouent les particules solides polluantes sur la dégradation des contacts mécaniques.

Mots-clés: Contact, Lubrification, Pollution solide, Usure.

Abstract

Title « *Effect of Solid Contamination on Elasto-Hydrodynamic Lubrication Contacts* »

Nowadays, it is well established that the influence of solid contamination of lubrication on the failure of elastohydrodynamic lubrication (EHL) contacts is considered as one of most important research topics due to the inevitable presence of solid particles between the contacting surfaces. In fact, these undesirable particles can lead to the severe wear and consequently to the overall failure of mechanisms.

This research tries on the one hand to give an answer to some questions related to the presence of solid particles in EHL rolling contacts. On the other hand, based on response surface methodology (RSM), Taguchi arrays and analysis of variance (ANOVA), a statistical analysis dealing with the failure of EHL contacts was conducted.

In this research, we present an original investigation because the presence of solid particles in EHL contacts is inevitable. In fact, this contribution shows the main role of the solid contaminants on the failure of mechanical contacts.

Key-Words: Contact - Solid Contamination – Lubrication – Wear – Roughness

ملخص

عنوان الأطروحة (تأثير التلوث الصلب على الاتصالات الإستوهيدروديناميكية EHD)

في هذه الأيام، من المعروف جيدا أن التلوث الصلب في التشحيم له تأثيرا على تدهور الاتصالات الميكانيكية. كما انه من احد المجالات البحث الأكثر أهمية، بسبب تواجد هذا التلوث الذي لا مفر منه بين الأسطح المتلامسة. ولأن هذه الجسيمات الغير مرغوب فيها يمكن أن تتسبب في تآكل قبل أوانه لمكونات الآلات و حتى التوقف التام للمعدات. نحاول في بادئ الأمر من خلال الدراسة المقدمة في هذه الأطروحة أن نجيب على بعض التساؤلات المرتبطة بوجود الجسيمات الصلبة داخل المتلامسات الإستوهيدروديناميكية EHD المتداول و الذي يتجلى من حيث الضرر الحاصل.

من جهة أخرى و استنادا على منهجية سطح الاستجابة (RSM) تحليل التغير (ANOVA) و جداول تاجوشي (Taguchi) قمنا بدراسة إحصائية حول تدهور الاتصالات EHD.

هذه الدراسة ذات أهمية كبيرة، لأنها تتحدث عن موضوع جديد . في الواقع وجود الجسيمات الصلبة في الاتصالات الميكانيكية يبقى لا مفر منه.

هذه المساهمة المتواضعة تبين الدور الذي تلعبها الجسيمات الصلبة في تدهور الاتصالات الميكانيكية.

الكلمات المفاتيح : التلامس- التلوث الصلب- التشحيم – الاحتكاك- التآكل

SOMMAIRE

REMERCIEMENT.....	1
DEDICACE.....	2
NOMENCLATURE.....	3
INTRODUCTION GENERALE.....	5

CHAPITRE I

ÉTAT DE L'ART

I.1. INTRODUCTION.....	8
I.2 DEFINITION D'UN CONTACT.....	8
I.3. LES TYPES DE CONTACTS.....	8
I.3.1. Contact stationnaire.....	9
I.3.2. Contact dynamique.....	9
I.4 CARACTERISTIQUES MECANQUES DES MATERIAUX SOLIDES.....	9
I.4.1. L'élasticité.....	9
I.4.2. La plasticité.....	9
I.5 ETUDES DES CONTACTS MECANQUES.....	10
I.6 SOLLICITATIONS D'UN CONTACT MECANIQUE.....	11
I.6.1 La charge.....	11
I.6.2 La vitesse.....	11
I.6.3 La température.....	12
I.6.4 Ambiance.....	12
I.7.CONTACTS LUBRIFIÉS.....	12

I.7.1. Régime de lubrification limite (ou onctueuse).....	13
I.7.2. Régime de lubrification mixte.....	13
I.7.3. Régime de lubrification hydrodynamique et élastohydrodynamique.....	13
I.8. LA LUBRIFICATION.....	14
I.8.1. Types de lubrification.....	14
I.8.2. Les lubrifiants.....	14
I.8.2.1. Les bases lubrifiantes	15
I.8.2.2. Les huiles	15
I.8.2.3. Les graisses	16
I.8.2.4. Les lubrifiants solides	17
I.8.3. Choix du type de lubrification.....	18
I.9. POLLUTION SOLIDE	19
I.10. L'USURES	23
I.10.1. Forme d'usure	23
I.10.2. Durée de vie d'un mécanisme	25
I.11. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	27
 <u>CHAPITRE II</u>	
<u>NOTION DE STATISTIQUE</u>	
II.1 INTRODUCTION.....	30
II.2 LA STATISTIQUE	30
II.3 PLAN D'EXPERIENCES.....	31
II.3.1. Historique.....	31
II.3.2. Définition d'un plan d'expérience	32
II.3.2.1. Notion d'espace expérimental.....	32
II.3.2.2. Notion de surface de réponse	35
II.4 MODELISATION MATHEMATIQUE.....	36

II.4.1 Le modèle de l'expérimentateur.....	36
II.4.2 Système d'équations.....	37
II.5 METHODES DE REGRESSION	38
II.5.1 Les principaux modèles de régression	38
II.6 CRITERE DES MOINDRE CARRES	39
II.7 ANALYSE DE LA VARIANCE (ANOVA)	40
II.8 MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE EXPÉRIMENTALE.....	43
II.8.1 Choix d'un plan d'expérience	43
II.8.2 Les plans de Taguchi	44
II.9 CONCLUSION.....	46
 <u>CHAPITRE III</u>	
<u>ETUDE EXPERIMENTALE</u>	
III.1 INTRODUCTION	47
III.2 FORMALISME DU PROBLEME	47
III.3 OUTILS EXPERIMENTAUX	48
III.3.1 Dispositif expérimental	48
III.3.2 Matériel utilisé.....	48
III.3.2.1. Les éprouvettes.....	49
III.3.2.1.1 Acier C45.....	51
III.3.2.1.2 Composition chimique.....	52
III. 3.2.1.3 Caractéristiques mécaniques de l'acier C45	52
III.3.2.2 Les Bagues et roulements	52
III.3.2.3 Le lubrifiant.....	53
III.3.2.4 Le polluant.....	53
III.4 PROCEDURE EXPERIMENTALE	54
III.4.1 Etalonnage.....	54
III.4.1.1 Résultats d'étalonnage pour la 1 ^{ère} série d'expériences.....	55

III.4.1.2 Résultats d'étalonnage pour la 2 ^{ème} série d'expériences	58
III.4.2 Déroulement des essais	60
III.4.3 Mesures expérimentales.....	60
III.4.3.1 Mesure des températures.....	60
III.4.3.2 Mesure de la perte de côte.....	62
III.4.3.3 Mesure de la rugosité.....	63
III.5 RESULTATS ET INTERPRETATIONS	63
III.5.1 Evolution de la température du contact.....	63
III.5.2 Evolution de l'usure.....	65
III.5.3 Evolution de la rugosité de surface.....	69
III.6 CONCLUSION.....	71
 <u>CHAPITRE IV</u>	
<u>ETUDE STATISTIQUE ET MODELISATION MATHEMATIQUE</u>	
IV.1 INTRODUCTION	72
IV.2 DEROULEMENT DES EXPERIENCES	72
IV.2.1 Plan des expériences I	73
IV.2.2 Plan des expériences II	74
IV.2.3 Paramètres de sorti (réponses étudiées).....	75
IV.3 RESULTAT ET DISCUSSION.....	75
IV.3.1 Résultat de la série d'expériences I et II.....	75
IV.3.2 Analyse statistique de Taguchi	77
IV.3.3 Traitement des résultats de la série d'expériences I.....	79

IV.3.3.1 Analyse de variance des résultats de la série d'expériences I.....	79
IV.3.3.2 Modélisation mathématique (série des expériences I).....	90
IV.3.4 Traitement des résultats de la série d'expériences II.....	93
IV.3.4.1 Analyse de variance de série d'expériences II.....	93
IV.3.4.2 Modélisation mathématique (série des expériences II).....	97
IV.4 CONCLUSION.....	101
CONCLUSION GENERALE.....	103
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	106
ANNEXE.....	111
LISTE DES FIGURES.....	116
LISTE DES TABLEAUX.....	119
LISTE DES PUBLICATIONS.....	121

Remerciement

Je tiens en tout premier lieu à remercier profondément mon encadreur le Dr Mohamed Rafik SARI pour son aide précieuse et ses constants encouragements et conseils durant toute la période de ma thèse.

Je tiens à remercier également le Pr Lakhdar KHOCHEMANE pour ses conseils.

Un grand remerciement et un profond respect à Mr Nourine MERABET et à Mr Djamel BOUGDAH, qui ont contribué de leurs cœurs lors de la réalisation expérimentale de ma thèse.

Je tiens à remercier également Mme Wahiba BOUTELDJA et Mme Assia ZAROOUR pour leurs aides et leurs conseils bénéfiques.

Une grande estime à ceux qui ont permis à ce travail de voir le jour :

Le directeur de TRC SONATRACH

Le sous-directeur responsable de la formation

Les techniciens SOMIK

*Le chef département de Génie Mécanique université 20 août 1955
SKIKDA*

Mes plus vifs remerciements vont également à :

Dr. Azzedine BOUZAOUIT

Pr. Lakhdar KHOCHEMANE

Pr. Mahmoud A/AZIZ BOUCHELAGHEM

Dr. Abdallah HAOUAM

Dr. Youcef KHADRI

Pour avoir acceptés d'évaluer ma thèse.

Merci pour toutes personnes ayant donnés de l'estime à mon travail.

Dédicace

En premier je remercie Allah tous puissant pour m'avoir donné le courage et la santé pour finir ce travail.

Je dédie cette thèse et ma profonde gratitude à mon père et ma mère, pour l'éducation qu'ils m'ont prodigué; avec tous les moyens et au prix de tous les sacrifices qu'ils ont consentis à mon égard, pour le sens du devoir qu'ils m'ont enseigné depuis mon enfance

A mon respectueux mari qui n'a jamais cessé de m'aider et de m'encourager.

A mes très chers enfants ;

A mes chers frères et sœurs, leurs épouses et époux, et leurs enfants ;

A ma belle-mère, beau-père, mes belles sœurs et beau-frère, et leurs enfants ;

A tous mes collègues ;

Grand merci.

Nomenclature

b_0	Coefficient libre.
b_1, b_2, \dots, b_k	Coefficients linéaire.
$b_{12}, b_{13}, \dots, b_{ik}$	Coefficients d'interaction.
C	Concentration (g/l)
CM	Carrés moyens
DL	Degré de liberté du numérateur
e	Vecteur des écarts.
F	Test de comparaison de variance
F_α	Valeur tabulée de Fisher
F_{1i}	Charge appliquée.
H	Dureté (HRC)
H_0	Hypothèse nulle
H_1	Hypothèse alternative
k	Degré de liberté du dénominateur.
K	Pente (constante d'étalonnage).
(n-k-1)	Degré de liberté
N	Vitesse de rotation (tr/min)
Pc%	Pourcentage de contribution
Q	Charge (Kg)
R^2	coefficient de détermination de la régression
Ra	Moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts (μm)
Rt	Dénivellation la plus importante entre le plus haut sommet d'un pic et le fond le plus bas d'un creux. (μm)
SS_d	Somme des carrés des écarts
W	Usure (mm)
x_i	Représente les paramètres d'entrés (facteurs).
$\{(x_i, y_i), i = 1, \dots, n\}$.	Centre de gravité du nuage de point
Y	Réponse ou grandeur d'intérêt
\bar{y}	Moyenne des observations

\hat{y}_i	Valeurs prédites par le modèle
Y_i	Déformation (flèche).
α	Risque de rejet à tort
α_{p-v}	Coefficient de piezo-viscosité
$(1-\alpha)$	Intervalle de confiance
μ_0	Viscosité dynamique

INTRODUCTION GENERALE

Les progrès réalisés dans les domaines de l'élaboration des aciers, ainsi que dans les domaines de l'usinage, de la lubrification et de la protection contre les pollutions des lubrifiants donnent naissance à de nouveaux niveaux de performances dans la technologie des contacts lubrifiés.

Malgré ces progrès, les avaries des contacts élasto-hydrodynamiques demeurent à nos jours un problème sérieux. Ces avaries affectent les surfaces en contact et conduisent à la rupture voire la défaillance complète des éléments machines.

Un bon fonctionnement du contact élasto-hydrodynamique d'un système mécanique est principalement basé sur une bonne lubrification. Un film d'huile permet d'éviter le contact direct métal-métal des pièces et de réduire l'apparition d'avarie, en diminuant ainsi l'usure et l'échauffement du mécanisme. Il assure également l'évacuation permanente des calories et les débris formés dans le contact au cours du fonctionnement.

Aujourd'hui il est également bien établi qu'une bonne lubrification est assurée essentiellement par un lubrifiant de qualité (c.-à-d. : propreté de l'huile utilisée). Malheureusement, les huiles de lubrification transportent des particules polluantes. Les huiles sont polluées même à l'état neuf. Les polluants peuvent être ingérés du milieu extérieur ou introduits lors des opérations de montage et de maintenance. En effet, ces particules indésirables endommagent les surfaces et conduisent à la fatigue et à la ruine des éléments de machines.

Dans la présente thèse, plusieurs essais sont réalisés afin d'étudier l'influence de la pollution solide sur un contact élasto-hydrodynamique. D'autre part, un certain nombre de paramètres entrant dans le fonctionnement d'un contact EHD, choisis avec plusieurs niveaux de valeurs, est utilisé pour pouvoir donner une réponse plus au moins convaincante à notre problématique. En effet, il s'agit de voir l'effet des paramètres d'un contact E.H.D pollué les plus usuels, à savoir : la dureté des surfaces, la charge transmise par le contact, la vitesse de rotation et la concentration des

polluants, sur les réponses d'intérêt qui concernent la dégradation des contacts mécaniques ; il s'agit bien évidemment de l'usure et de la rugosité des surfaces.

Le travail présenté dans cette thèse s'articule essentiellement autour de quatre chapitres organisés comme suit :

Dans le premier chapitre, un contexte d'étude est élaboré. Il s'agit, de la dégradation des contacts mécaniques sous l'effet de la pollution solide des lubrifiants. Après quelques définitions et notions de base sur les contacts mécaniques, nous abordons les contacts lubrifiés. Par la suite, nous définissons la pollution solide des lubrifiants, les différents types de particules solides et les formes d'usure les plus rencontrés dans les contacts E.H.D. Nous terminons par un aperçu bibliographique sur les différentes études menées dans les domaines de l'élasto-hydrodynamique et de la pollution solide de la lubrification.

Le deuxième chapitre est principalement consacré à la présentation de l'ensemble des outils mathématiques utilisés dans cette étude. Il s'agit, des notions de la statistique telles que:

- La régression ;
- Méthode des moindres carrés ;
- Méthode de surface de réponse ;
- Plans de TAGUCHI.

Dans le troisième chapitre consacré à l'expérimentation, les outils et techniques expérimentales nécessaires à la réalisation des essais de pollution planifiés sont abordés. Dans cette partie, nous étudierons l'évolution de la température, de l'usure et des rugosités de surface pour deux types de fonctionnement :

- Contact lubrifié avec une huile propre ;
- Contact lubrifié avec présence des particules solides polluantes (particules de sable de tailles : 63 μm et 125 μm).

Deux séries d'expériences sont réalisées et présentées au quatrième chapitre. Ces séries sont planifiées suivant les tables orthogonales L_9 de Taguchi. Ce chapitre regroupe les principaux résultats d'une investigation statistique basée sur l'utilisation

de la méthodologie de surface de réponse (RSM) et l'analyse de variance (ANOVA). Les analyses effectuées vont permettre de visualiser les effets des paramètres de fonctionnement les plus dominants sur la dégradation des contacts EHD roulants, ainsi que l'obtention des modèles mathématiques caractérisant la dégradation des surfaces en contact EHD.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale et un certain nombre de perspectives.

I.1. INTRODUCTION :

La présente étude s'intéresse plus particulièrement aux effets de la pollution solide des lubrifiants dans un contact EHD. En effet, dans une première étape, un aperçu sur les contacts EHD, les différents polluants rencontrés (externes et internes) ainsi que les mécanismes d'usures, est donné.

D'autre part une présentation des différentes études menées dans le domaine de la pollution solide des lubrifiants et qui sont en relation avec le thème abordé est explorée.

I.2 DEFINITION D'UN CONTACT :

Nous conviendrons tout d'abord de définir la présence d'un contact entre deux pièces, par exemple deux sphères, lorsque la distance entre les centres de ces sphères est plus petite ou égale à la somme de leurs rayons: $O_1O_2 \leq R_1 + R_2$

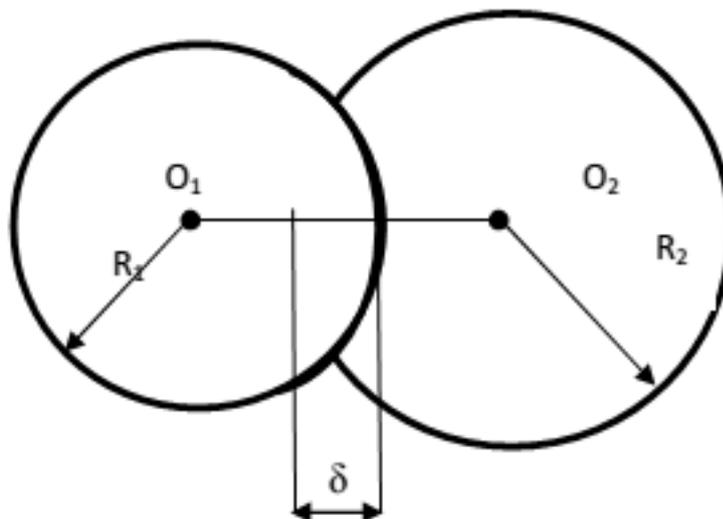


Fig.I.1 Deux sphères en contact.

I.3. LES TYPES DE CONTACTS:

Selon les conditions appliquées à un contact, on peut dire que ce dernier est stationnaire ou dynamique. Dans chaque type de contact, les flux de chaleur se présentent d'une manière tout à fait différente.

I.3.1. Contact stationnaire :

Au niveau de la surface de contact des deux pièces, qui sont soumises à une contrainte F , le transfert des chaleurs thermiques s'effectue aux jonctions, qui sont le siège de haute pression et de température, dues à la dissipation d'énergie mécanique. Ces deux effets entraînent des échauffements locaux.

I.3.2. Contact dynamique :

Dans ce cas, la surface de contact devient une source de chaleur, car elle dissipe l'énergie mécanique due au frottement. On peut noter que la conduction thermique à travers le contact métallique est la même dans les cas stationnaire et dynamique, car on peut faire une comparaison entre la vitesse de glissement et la vitesse de mouvement des électrons.

I.4 CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES MATERIAUX SOLIDES :

I.4.1. L'élasticité :

La théorie de l'élasticité est le comportement des substances qui ont la propriété de se rendre à leurs dimensions et formes initiales lorsque les forces qui produisent les déformations sont supprimées. Dans certaines mesures, nous trouvons cette propriété d'élasticité dans tous les corps solides.

Par exemple, quand on exerce une pression sur un matériau quelconque, celui-ci se déforme. Si la force est suffisamment petite, les déplacements relatifs des divers points du matériau sont proportionnels à la force, nous disons alors que le comportement est élastique.

I.4.2. La plasticité :

Le comportement plastique se caractérise par une déformation permanente sans rupture d'un corps solide qui est soumis à l'action d'une charge. On admet généralement que ces déformations permanentes se produisent au-delà d'un seuil de contrainte appelé seuil de plasticité ou limite d'élasticité.

1.5 ETUDES DES CONTACTS MECANIQUES:

Considérons le contact statique de deux corps chargés par une force normale unique. Les objectifs des études menées sur les contacts mécaniques sont de :

- Calculer l'aire de contact entre solides;
- Calculer la pression de contact entre solides;
- Calculer la distribution des contraintes à l'intérieur des solides.

En utilisant les lois de la mécanique des milieux continus.

Les types de contact entre les surfaces varient avec la géométrie des solides en contact (plan/ plan, cylindre/ plan, sphère /plan, ... etc.). Ils se ramènent aux types suivants (figures I. 2):

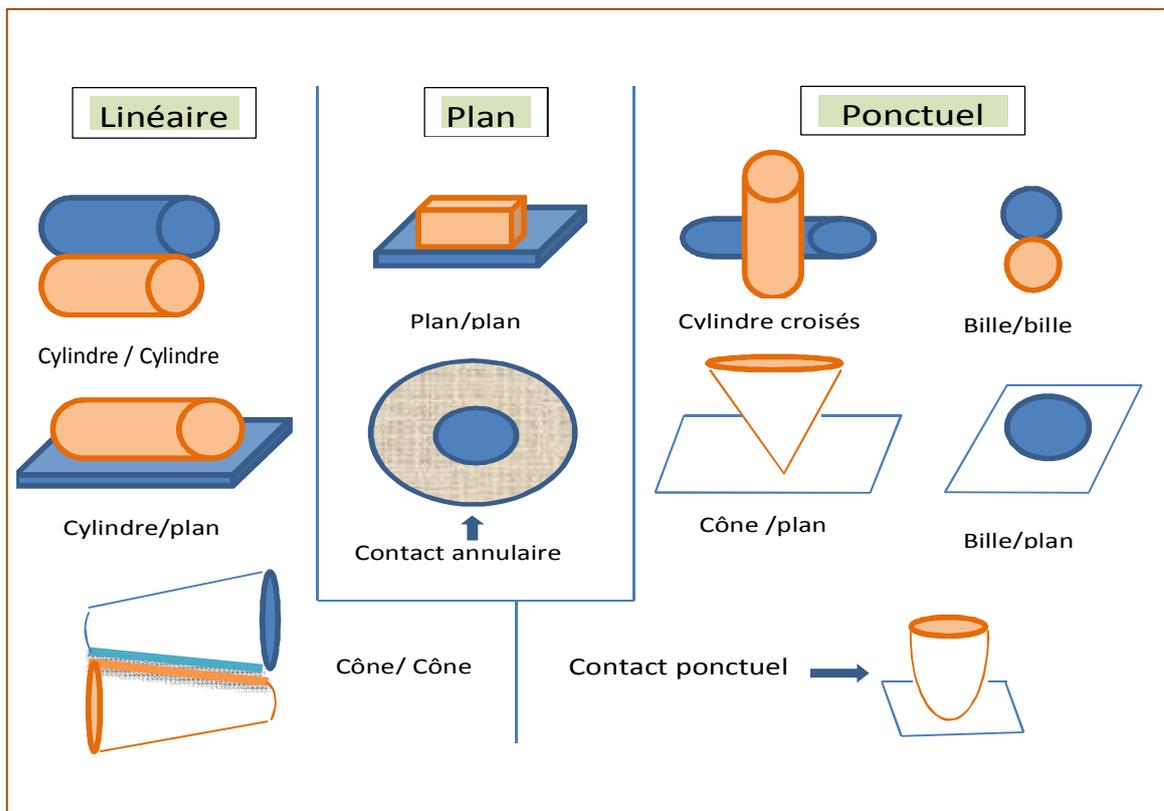


Fig.I.2 Formes de contacts.

I.6 SOLLICITATIONS D'UN CONTACT MECANIQUE:

I.6.1 La charge:

La charge est le facteur déterminant du comportement mécanique des matériaux qui frottent, puisqu'elle régit l'ensemble du réseau de contraintes superficielles au contact: contrainte normale dues aux seules forces d'appui, et contrainte tangentielle correspondant à la résistance au déplacement (coefficient de frottement). Par ailleurs, la charge influe:

- ❖ D'une part sur le comportement du troisième corps et notamment la lubrification, ainsi que l'agressivité des particules abrasives éventuellement présentes à l'interface (contraintes superficielles au contact abrasif / surface).
- ❖ D'autre part sur les possibilités de liaisons d'origine chimique et/ou métallurgique entre les corps (adhésion), qui sont liées à la dégradation des films superficiels, à l'accroissement de l'aire de contact, ainsi qu'à la température (produit P.V).

Le mode de chargement joue un rôle prépondérant sur les modes d'évolution, de vieillissement et d'usure des matériaux.

I.6.2 La vitesse :

Ce paramètre influe principalement sur la température et le coefficient de frottement

- ❖ Température : la quantité de chaleur générée au contact est d'autant plus importante que la vitesse est élevée, sauf, bien sûr, lorsque l'accroissement de la vitesse entraîne un abaissement significatif du coefficient de frottement, comme c'est le cas lors du passage du régime de lubrification onctueux (ou limite) au régime de lubrification hydrodynamique.
- ❖ Coefficient de frottement : l'effet de la vitesse sur le coefficient de frottement est notable en régime lubrifié, ou ce facteur conditionne les possibilités de portance hydrodynamique.

Les frottements à vitesse très lente sont susceptibles d'engendrer des fluctuations du coefficient de frottement, conduisant aux phénomènes de stick slip (avance en saccades).

I.6.3 La température :

L'élévation de ce paramètre, est causée par le frottement et l'ambiance de fonctionnement. Sous des conditions opératoires extrêmes, l'élévation de température dans un contact EHD peut devenir importante. Elle découle de deux sources de chaleur : le cisaillement de la couche mince de lubrifiant et le réchauffement par compression, causé par la variation de pression dans la zone de contact.

I.6.4 Ambiance :

L'ambiance de fonctionnement, qui caractérise l'environnement du contact (incluant bien évidemment le lubrifiant) joue un rôle très important.

I.7.CONTACTS LUBRIFIÉS:

Dans un contact lubrifié, les forces de frottement sont nettement moins importantes que dans un contact sec, car le film d'huile protecteur sépare les surfaces en contact.

La courbe de Stribeck (Figure I.3) sert d'une part à prédire la transition d'une lubrification limite à une lubrification en régime mixte ; d'autre part elle peut également prédire la transition entre une lubrification en régime mixte à une lubrification hydrodynamique et par conséquent à prévoir le régime de lubrification dans lequel un contact particulier fonctionne.

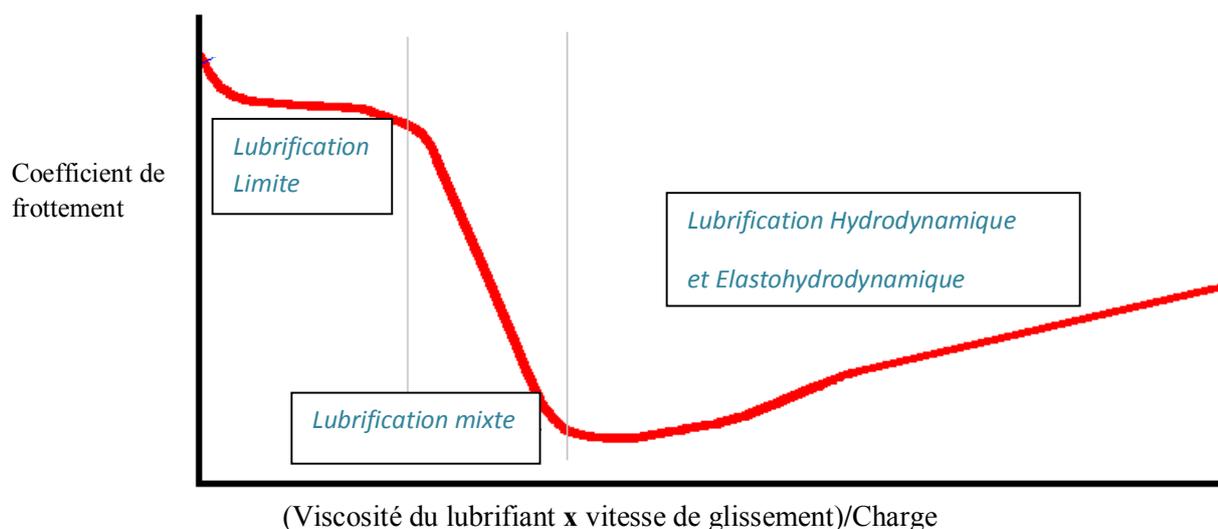


Fig.I.3. Courbe de Stribeck [1]

I.7.1. Régime de lubrification limite (ou onctueuse) :

Un film d'huile visqueux continu ne peut se former en raison des fortes pressions de contact entre les surfaces se déplaçant à faible vitesse (figure I.4.a). Ce régime est dominant durant le démarrage et l'arrêt des mécanismes et au cours de certaines phases transitoires de fonctionnement comme par exemple, les segments-piston-cylindre aux points morts.

I.7.2. Régime de lubrification mixte :

Un film visqueux mince se forme entre les surfaces mais dont l'épaisseur est insuffisante pour séparer totalement les aspérités (figure I.4.b). Il existe chaque fois, un certain nombre de contacts directs métal-métal qui se produisent, ce qui entraîne une augmentation du frottement, des températures de contact et de l'usure adhésive.

I.7.3. Régime de lubrification hydrodynamique et élasto-hydrodynamique :

Dans les régimes suivants, un film d'huile complet est formé (figure I.4.c).

Régime Hydrodynamique :

Un film d'huile visqueux continu s'établit mais la pression générée dans le contact n'induit pas de déformation élastique des surfaces en contact. Ce régime se produit dans les contacts conformes, caractérisés par de larges surfaces de contact et ainsi des pressions faibles. Les paliers hydrodynamiques sont représentatifs de ce type de lubrification.

Régime Élasto-hydrodynamique (EHD) :

Ce régime se produit quand la pression générée dans le film lubrifiant est suffisamment élevée pour provoquer une déformation élastique significative des surfaces en contact. Ces déformations ont une influence importante sur la géométrie du film et peuvent même être plus importantes que l'épaisseur de ce dernier. D'autre part, les propriétés rhéologiques du lubrifiant sont largement affectées par les pressions élevées générées dans le film (la viscosité peut varier de plusieurs ordres de grandeur). C'est typiquement le cas des contacts non-conformes qui sont rencontrés par exemple dans les engrenages, les roulements à rouleaux cylindriques ou aussi les roulements à billes.

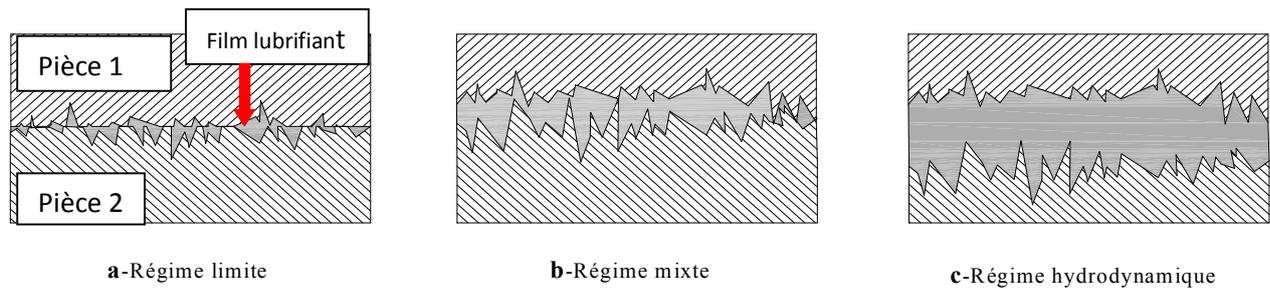


Fig.I.4 Les régimes de lubrification

I.8. LA LUBRIFICATION :

Procédé par lequel la friction entre deux pièces en mouvement est réduite (introduction d'un fluide séparant les deux surfaces). La lubrification a plusieurs fonctions. En effet elle permet de réduire la friction (frottement ou déformation), réduire l'usure des pièces, absorber /atténuer les chocs, réduire/contrôler la température, protéger contre la corrosion, isoler les composantes de la contamination, nettoyer/enlever les contaminants [2].

I.8.1. Types de lubrification :

La lubrification peut se présenter sous plusieurs formes :

- hydrodynamique : séparation de deux surfaces par un film relativement épais, par un mouvement dynamique de la pièce en mouvement.
- hydrostatique : introduction de lubrifiant sous pression entre les surfaces en mouvement (source de pression).
- Elastohydrodynamique : semblable à l'hydrodynamique mais une des surfaces roule (roulement, dent profilée d'engrenage...).

I.8.2. Les lubrifiants :

Les lubrifiants ont pour rôle de réduire les frottements entre les pièces en mouvement. Ils sont obtenus par raffinage des fractions lourdes du pétrole brut.

Les lubrifiants peuvent être liquides ou fluides (huiles), consistants (graisses ou gel de silicone), ou solides (graphite, téflon). Les performances et caractéristiques diffèrent d'un lubrifiant à l'autre, leur seul point commun est qu'ils sont tous composés d'un constituant

principal appelé « base lubrifiante », qui représente 75 à 85% de l'huile ou d'une graisse et qui peut être d'origine pétrolière ou synthétique.

I.8.2.1. Les bases lubrifiantes :

Les bases minérales sont fabriquées à partir du pétrole brut. Elles sont de très loin les plus utilisées, aussi bien dans les applications automobiles qu'industrielles. Ce sont des mélanges d'hydrocarbures ayant subi de nombreuses opérations de raffinage.

Les bases de synthèse sont des produits obtenus par réaction chimique de plusieurs composants. Deux grandes familles de produits sont utilisées pour la formulation des lubrifiants : les esters et les hydrocarbures de synthèse. Ces produits présentent une viscosité remarquablement stable quelque soit la température. Cette propriété est une supériorité majeure sur les bases minérales qui nécessitent l'adjonction d'additifs améliorants de viscosité en plus grande quantité. Leur résistance à l'oxydation est aussi accrue, d'où une plus grande longévité de l'huile qui permet un espacement entre vidange plus important.

A noter qu'il existe aussi des huiles dites de semi synthèse qui s'obtiennent à partir d'un mélange des deux précédentes (généralement 70 à 80% d'huile minérale et 20 à 30% d'huile de synthèse).

I.8.2.2. Les huiles :

Les huiles sont composées d'une base lubrifiante et d'additifs

a) Les additifs des huiles : les additifs sont présents à hauteur de 15% à 25 % dans les huiles finies :

- soit pour renforcer certaines propriétés de l'huile de base ;
- soit pour apporter à l'huile de base des propriétés qu'elle ne possède pas naturellement.

b) les additifs anti-usures : ils renforcent l'action anti-usure qu'exerce un lubrifiant vis-à-vis des organes qu'il lubrifie. Ils agissent en formant un film protecteur, en réagissant directement ou par l'intermédiaire de leur produit de réaction avec les surfaces métalliques.

c) Les additifs antioxydants: Ils ralentissent les phénomènes d'oxydation du lubrifiant et contribuent à l'espacement des vidanges par une meilleure tenue aux hautes températures.

d) Les additifs détergents: Ils évitent la formation de dépôts ou de vernis sur les parties les plus chaudes des moteurs tels que les gorges des pistons. Ils exercent une action détergente, en particulier à l'intérieur des moteurs où ils empêchent que les résidus carbonneux de

combustion ou composés oxydés ne forment des dépôts ou des gommages sur les surfaces métalliques. Les additifs les plus récents sont des polymères de composés basiques azotés qui ne laissent pas de cendres. Les huiles dites détergentes doivent être utilisées avec précaution dans les moteurs anciens car leur capacité à nettoyer les dépôts déjà sédimentés dans les carters (la calamine par exemple) peut entraîner l'obturation des canaux de circulation du lubrifiant.

e) Les additifs dispersants: ils maintiennent en suspension toutes les impuretés solides formées au cours de fonctionnement du moteur : imbrûlés, gommages, boues, suies diesel, dépôts nettoyés par les détergents. Ils empêchent les résidus solides de s'agglomérer et ainsi limitent le risque de dépôt (boues) dans les parties froides du moteur (carter).

f) Les additifs de basicité : ils neutralisent les résidus acides de combustion des carburants, principalement sur moteur diesel, au fur et à mesure de leur formation.

g) Les additifs anticorrosion: Ils empêchent l'attaque des métaux ferreux, attaque due à l'action conjuguée de l'eau, de l'oxygène de l'air et de certains oxydes formés lors de la combustion. Ils forment un film protecteur ou une passivation de la surface à protéger.

h) Les additifs anti-congélation: Ils permettent au lubrifiant de garder une bonne fluidité à basse température (de -15°C à -45°C).

i) Les additifs anti-mousse : le moussage de l'huile peut être dû à la présence d'autres additifs (les additifs détergents agissent dans l'huile comme du savon dans l'eau : ils nettoient le moteur mais ont tendance à mousser) ou le circuit de graissage qui provoque des turbulences lors de l'écoulement du lubrifiant, facilitant ainsi le brassage air-huile et la formation des bulles. Ces additifs ont pour but de limiter la dispersion d'un grand volume d'air dans l'huile.

j) Les additifs d'extrême pression: Ils ont pour but de réduire les couples de frottement et par conséquent économiser l'énergie et de protéger les surfaces des fortes charges. Ils apportent au lubrifiant des propriétés de glissement spécifiques, en particulier aux organes équipés d'engrenages ou de garnitures de friction travaillant dans l'huile (ponts auto bloquants, boîtes de vitesse : manuelles ou automatiques, freins immergés, etc.).

I.8.2.3. Les graisses :

Les graisses sont composées de :

- 70 à 95 % d'huile de base (minérale, synthétique ou végétale) qui sert d'agent lubrifiant ;

- 0 à 10 % d'additifs identiques à ceux cités ci-dessus ;
- 3 à 20 % d'un agent épaississant ou gélifiant qui a pour rôle de donner la consistance au lubrifiant (semi fluide, fluide, mou ou dur) et d'emprisonner l'huile de base et les additifs pour qu'ils ne s'écoulent pas.

Les graisses se distinguent par leur adhérence aux surfaces à lubrifier, leur insolubilité à l'eau, leur résistance au cisaillement et leur durée de vie. En règle générale une graisse ne peut dépasser plus de 300°C (température à laquelle l'huile de base se sépare de l'épaississant). Au-delà, on parle plutôt de pâtes ou vernis à base d'aluminium ou de cuivre. Outre son rôle de lubrifiant (réduction de l'usure mécanique et des pertes d'énergie dues aux frottements), la graisse crée une barrière d'étanchéité vis-à-vis des éléments extérieurs (poussières, eau, solvants, chaleur, etc.).

- **Les graisses silicones** : les silicones sont des polymères à base de composés organiques du silicium, remarquables pour leur stabilité thermique, leur grande inertie chimique et leur caractère d'isolant électrique. Les silicones sont très résistantes vis-à-vis de la chaleur, de l'oxydation et des rayons ultraviolets. Les silicones peuvent se présenter sous forme d'huiles, d'élastomères ou de résines.
- **Les graisses alimentaires** : ces graisses sont spécialement conçues pour un contact fortuit avec les aliments. Les lubrifiants, additifs et gélifiants qu'elles contiennent doivent être conformes aux prescriptions du CNERNA (Centre National d'Étude et de Recherche sur la Nutrition et l'Alimentation).

I.8.2.4. Les lubrifiants solides :

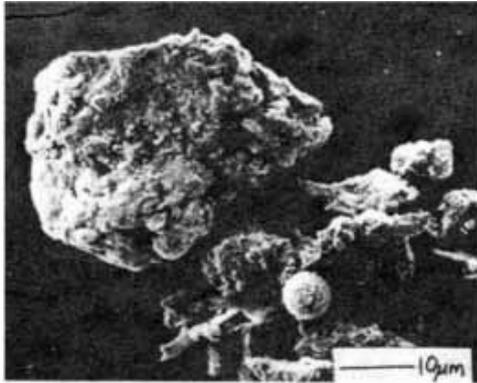
Le graphite et le bisulfure de molybdène constituent les deux lubrifiants solides utilisés dans les conditions extrêmes (vide poussé, températures trop hautes ou trop basses). Le graphite peut être utilisé jusqu'à 400°C en présence d'air et jusqu'à 1900°C en atmosphère inerte. Le bisulfure de molybdène peut être utilisé jusqu'à 450°C, au-delà il devient abrasif. Aux basses températures on utilise les Téflons, nylons et divers polyamides.

I.8.3. Choix du type de lubrification :

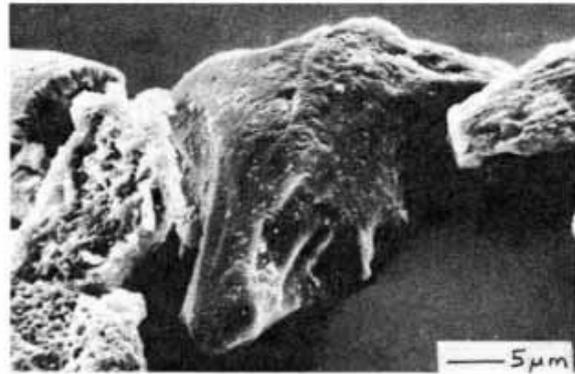
Pour faire le bon choix de lubrification d'un contact mécanique, il faut bien connaître l'utilité de chacun des lubrifiants (huile et graisse), leurs avantages et inconvénients (Tableau I.1).

	Lubrification à l'huile	Lubrification à la graisse
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne pénétration dans le roulement - Bonne stabilité physico-chimique - Refroidissement - Contrôle aisé du lubrifiant : état et niveaux. 	<ul style="list-style-type: none"> - Propreté du mécanisme - Etanchéité plus facile à réaliser - Barrière de protection - Simplicité des montages - Facilité de manipulation - Réduction ou suppression du graissage d'appoint - Possibilités d'utiliser des roulements pré-graissés
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Etanchéité nécessaire du montage - En cas d'arrêt prolongé, mauvaise protection contre l'oxydation et l'humidité - Retard au démarrage lorsqu'une mise en circulation autonome préalable à la rotation est nécessaire 	<ul style="list-style-type: none"> - Coefficient de frottement plus élevé que l'huile. - Évacuation thermique plus faible - Le remplacement (si nécessaire) requiert le démontage du roulement et son lavage. - Pas de possibilité de vérifier un niveau de graisse, donc nécessité d'une retenue de graisse fiable ou bien d'un apport périodique pour compenser les fuites, la pollution

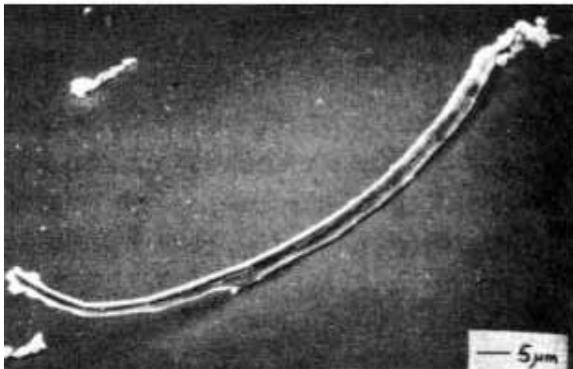
Tab.I.1 Différence entre la lubrification par graisse et la lubrification par huile.



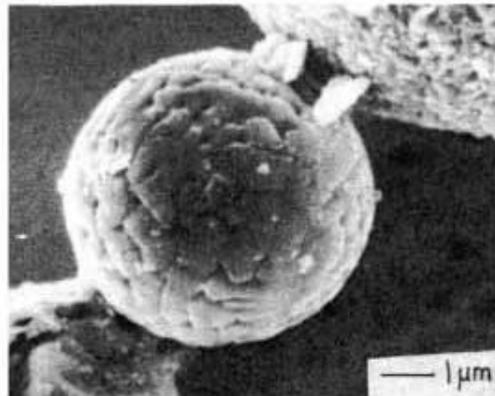
Minéral riche en calcium



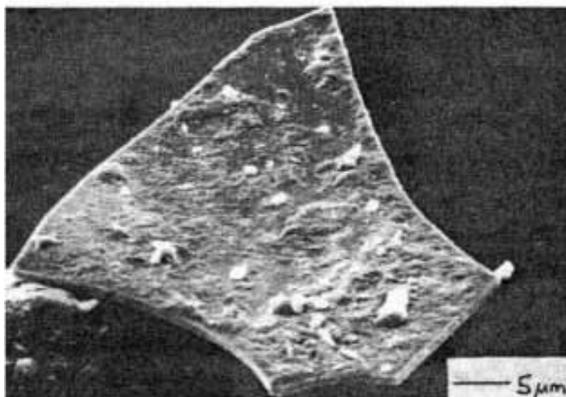
Minéral riche en Silicone



Débris d'usure par coupe



Sphères à base de fer



Pure chrome



particule organique

Fig.I.6 Micrographies des particules dans un lubrifiant inutilisé pour moteur diesel [3].

Ces agrégats de formes très variées influent le mécanisme d'usure. Hunt [4] propose de les classer en sept familles présentées dans le tableau I.2. Il est également possible de déterminer l'origine de ces particules à travers le classement basé sur leurs formes.

Forme	Schémas	Origine
Sphères		agglomération et fusion de débris métalliques d'usure
Ovoïdes déformés lisses (galets)		poussières (quartz, silice...) issues de l'extérieur
Gros morceaux et pavés		particules métalliques produites par la fatigue des surfaces
plaquettes et écailles		particules métalliques produites lors du rodage ou d'une usure dite normale
boucles, copeaux et lamelles		particules produites lors de l'usinage ou par « labourage » de la surface
rouleaux		particules étant à la fois des copeaux et des écailles
brins et fibres		particules non métalliques en général issues d'une atmosphère polluée

Tab.I.2 Classification des particules polluantes selon la forme [4].

Le lubrifiant qui a pour rôle de réduire les frottements et l'usure, transporte malheureusement ces particules polluantes. En effet, les particules très fines arrivent à

passer à travers les filtres et lorsque leur taille est supérieure à celle du film séparateur, elles perturbent ce dernier, rayent et indentent les surfaces.

L'étude ainsi menée concerne la pollution solide des lubrifiants. Selon les propriétés mécaniques des particules, on peut distinguer :

- des particules céramiques dures.
- des particules ductiles.
- des particules fragiles.

- LES PARTICULES CERAMIQUES DURES :

Ces grains sont des carbures qui peuvent provenir d'outils coupants ou abrasifs, tels que : les carbures de bore (B₄C) et les carbures de silicium (SiC). Elles sont obtenues lors de fabrication des pièces mécaniques (roulements, engrenages...etc.).

- LES PARTICULES DUCTILES:

Lors du fonctionnement, des particules ou débris métalliques sont produites par : rodage, usure, fatigue...etc.

- LES PARTICULES FRAGILES :

Les grains de sable connus dans la littérature sous la dénomination SAE Arizona Fine Test Dust (SAE AFTD) sont couramment utilisés pour des tests de pollution sur les contacts élastohydrodynamiques tels que : engrenages et roulements.

Le polluant utilisé est une poussière de sable du Sahara. Dans les immensités désertiques, les sables sont caractérisés par une composition minéralogique et granulaire quasi similaires.

Des Analyses minéralogiques par diffractométrie aux R-X des sables de Boussaâda et d'Ouargla sont représentées dans le tableau I.3. Ces particules simulent le polluant issu du milieu extérieur. Ce sont des particules fragiles essentiellement constituées de quartz (SiO₂, avec plus de 90%) qui est connu pour sa dureté, sa fragilité et qui peut être véhiculé par le vent jusqu'en Europe voire même en Amérique

Origine du sable	Quartz (%)	Calcite (%)	Feldspaths (%)	Argiles (%)	Gypse (%)
Boussaâda	93.5	2.5	1.5	2.5	-
Ouargla	95	2	1.5	1.5	-

Tab.I.3 Analyse minéralogique par diffractométrie aux R-X des sables de Boussaâda et d'Ouargla. [5]

Le Quartz a une dureté de 7 comparé au Diamant avec une dureté de 10 d'après l'échelle de dureté de Mohs des minéraux. Ce dernier a été créé par le minéralogiste allemand Friedrich Mohs en 1822 pour mesurer la dureté relative ou la résistance aux rayures des différents minéraux.

I.10. L'USURE: [6]

Définition :

Selon la littérature technique spécialisée, l'usure correspond à la « perte progressive de matière de la surface active d'un corps, par suite du mouvement relatif d'un autre corps sur cette surface ».

L'usure est une des conséquences du frottement. Elle correspond à une perte d'usage par suite de déformations plastiques, de fracturations, ou d'un enlèvement de matière, d'un ou des corps en glissement.

I.10.1 Forme d'usure :

La plupart du temps, l'usure globale d'un mécanisme est due à plusieurs processus qui agissent simultanément, ces processus provoquent plusieurs formes d'usures résumées dans le tableau I.4.

Forme d'usure	Manifestation	Circonstances d'apparition
Usure par adhésion	Des particules sont transférées d'un corps sur l'autre ; si les matériaux sont de natures différentes, le transfert s'effectue préférentiellement du	Frottement donnant lieu à des liaisons (jusqu'à la soudure) dont la résistance mécanique est supérieure à celle de l'un au moins des matériaux.

	corps le plus tendre, ou le moins tenace, sur le corps le plus dur.	
Usure par sur contraintes : - déformations plastiques - fractures, égrègements	- Modifications géométriques et dimensionnelles (en général sans perte de poids) - Fissurations, décohésion écaillage superficiel, émission de particules.	- Pressions moyennes élevées, ou surpressions locales, entraînant dépassement de la limite d'élasticité - Contraintes anormalement élevées par rapport aux caractéristiques mécaniques des matériaux.
Usure par fatigue des surfaces	Piqûres, cavités, pouvant intéresser des profondeurs de plusieurs dixièmes de millimètres.	Contacts soumis à des chargements cycliques avec des sollicitations de roulement, de chocs, ou de glissement en régime lubrifié.
Usure par abrasion-érosion	-Pertes de poids et/ou de cote -Rayures, sillons cavités... dus à des effets de coupe ou de déformation.	- Abrasion à deux corps : les rugosités, défauts de surface, labourent ou abrasent l'antagoniste; - Abrasion à trois corps : des particules dures et pulvérulentes sont présentes à l'interface ; ces particules sont libres de se mouvoir entre les surfaces ou sont enchâssées dans l'une d'entre elles.
Usure par fretting corrosion	- Coloration des surfaces - Usure par abrasion avec perte de cote.	- Ensembles mécaniques soumis à vibrations ; - Pièces soumises à des mouvements relatifs alternés de faible amplitude.

Tab.I.4 Représentation des différentes formes d'usure.

I.10.2 Durée de vie d'un mécanisme :

Un mécanisme passe normalement par trois phases d'usure successives comme le montre la figure I.7. La courbe d'usure nous permettra de lire la vie d'un mécanisme.

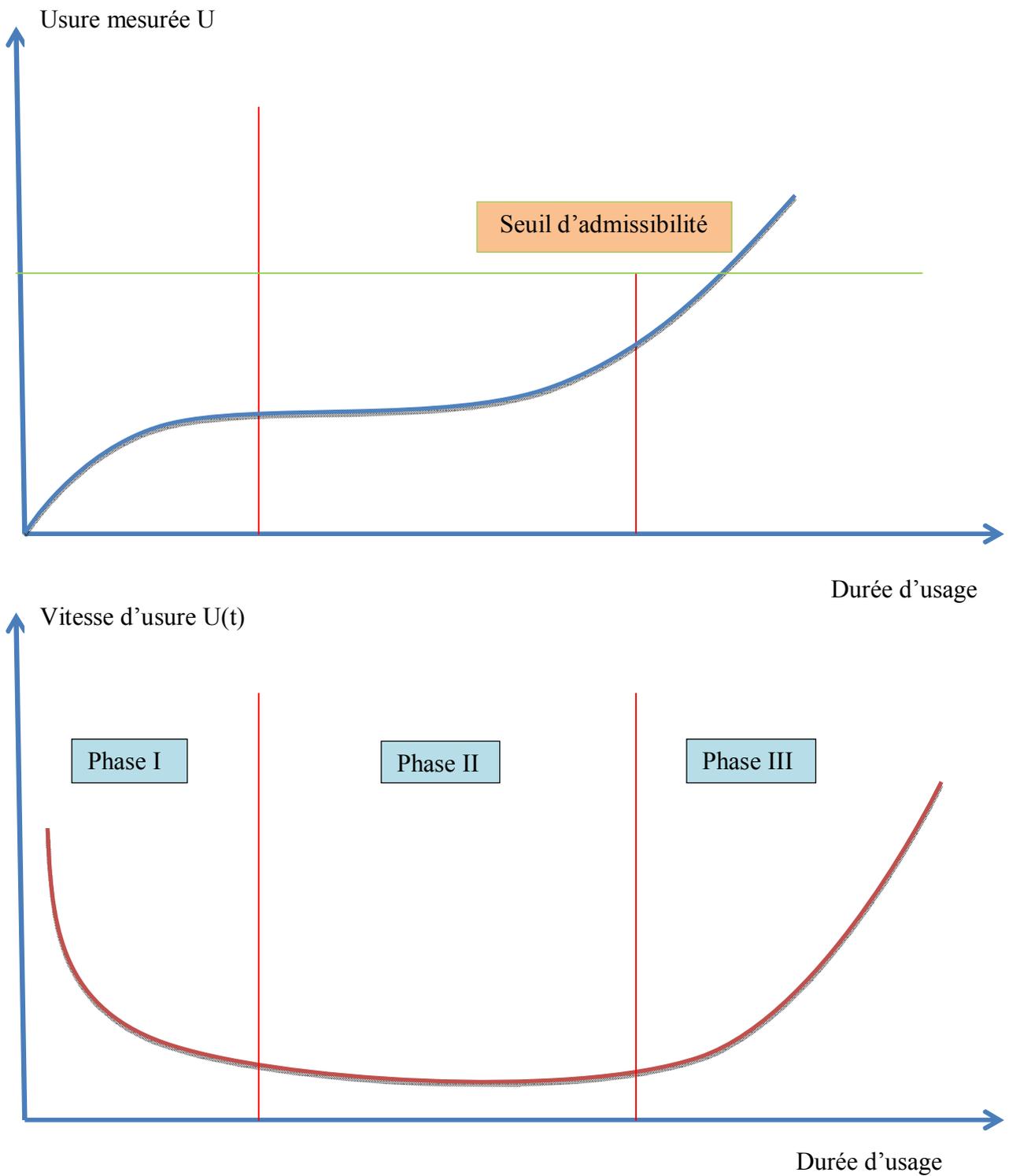


Fig.I.7. Perte de matière par unité de temps

- **La phase I** est constituée de l'abrasion des principales aspérités (rodage) ; les actions sur les grosses aspérités diminuent avec le temps, les pics sont arasés progressivement tandis que les vallées restent intactes. Le taux d'usure et le facteur de frottement baissent, les portées s'améliorent, les films d'huile s'amincissent. Une nouvelle topographie remplace la rugosité originale de la pièce. Si l'usure se ralentit lors de la mise en fonctionnement, on constate une amélioration de l'état de surface, et réciproquement.

- **La phase II** est constituée d'une usure stable, linéaire dans le temps (usure douce) ; la couche superficielle très dure qui semble se former est éliminée peu à peu sous forme de petites écailles. L'usure douce diminue la rugosité, tandis que l'usure sévère l'accroît.

- **La phase III**, dite usure catastrophique, consiste en émissions particulières ; débris engendrant un labourage de la surface la plus tendre et une dégradation rapide ; qui aboutit à la mise hors service du mécanisme.

I.11. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE:

Les contacts élasto-hydrodynamiques subissent au cours de leur fonctionnement des problèmes assez sérieux qui aboutissent à des avaries, perturbant ainsi le bon fonctionnement des mécanismes et diminuent leur durée de vie.

Afin de comprendre les avaries rencontrées dans les contacts EHD, de nombreux travaux ont été menés. Ces travaux permettent de prédire et agir pour remédier et améliorer le fonctionnement des contacts EHD.

D'autre part, l'huile véhiculée dans un contact EHD joue le rôle de remède contre les conséquences du frottement. Malheureusement, l'huile de lubrification peut contenir des particules polluantes. La pollution qui peut être interne ou externe est un problème imposé, il est traité par de nombreux auteurs.

Léonard de Vinci (1452-1519) a probablement été le premier tribologue. Il a en effet étudié le frottement et a introduit la notion de coefficient de frottement et de lubrification [7].

L'entraînement des particules dans un système mécanique est établi au 19^{ème} siècle par Stokes en 1850.

Au début du vingtième siècle (1916), Martin [8] a traité la lubrification des engrenages. Par la suite, Ertel [9] en 1939, puis Grubin [10] en 1949 dans leurs calculs, tiennent compte des effets de piezo-viscosité et de la déformation élastique des dents selon la théorie développée par Hertz en 1881. Les résultats obtenus par Ertel et Grubin sur l'épaisseur du film d'huile sont en accord avec la réalité. En effet, ces études constituent les bases de la théorie EHD.

La distinction claire des différents régimes de lubrification est due aux travaux de Johnson [11] en 1970. D'autre part, une étude sur les régimes d'écoulement non laminaire en films minces a été réalisée par Frêne [12] en 1974. Dans la même année, l'importance des effets thermiques en régime transitoire dans un mécanisme lubrifié a été identifiée par Ezzat et Rohde [13].

La solution numérique complète du contact EHD lisse de type ellipsoïde/plan a été proposée par Hamrock et Dowson [14, 15, 16, 17] entre 1976 et 1977.

En 1979, Hamrock et Dowson [18] ont identifié les régimes de lubrification : iso-visqueux rigide, iso-visqueux élastique, piézo-visqueux rigide, piézo-visqueux élastique.

En 1982, Cusano [19] a mené des travaux dont l'objectif est de montrer l'influence des indents et des défauts de surface sur la traction par glissement des points de contacts EHD.

En 1987, Akl et Kalifha [20] ont effectué une classification des particules, à partir de l'analyse des huiles utilisées lors d'essais sur une machine à galets qui simule un contact hertzien lubrifié.

En 1989, des études menées par Nelias [21] sur des huiles utilisées dans des applications aéronautiques, montrent qu'il y avait une grande diversité de particules polluantes.

Les particules fragiles tel que le sable, s'explodent à l'entrée du contact (zone du convergent). Les particules générées de l'explosion (des fragments) pénètrent dans le contact comme l'a montré Dwyer-Joyce [22] (1992).

De nombreux auteurs ont calculé le champ de pression lié à la présence d'un indent [23, 24, 25]. Ils ont ainsi pu établir le champ de contraintes dans le massif et montrer que l'indent joue le rôle d'amplificateur des contraintes.

L'influence des inclusions, de l'état de surface et des conditions de fonctionnement sur la fatigue des aciers M50 et 100Cr6 dans les contacts ponctuels lubrifiés, a été faite par Nelias et al. [26] (1998). Dans la même période, une étude confirme que les endommagements sont aujourd'hui principalement initiés en surface et non plus dans le volume comme par le

passé. Au cours de l'année 2001, une prédiction des conséquences de l'indentation sur la durée de vie des mécanismes a été faite [27].

En 2004, Dwyer Joyce [28] a donné une vue d'ensemble sur les variations importantes du cycle de vie des particules d'usure dans le contact. En 2005, Pellegrin et Stachowiak [29] ont simulé des particules abrasives tridimensionnelles réelles produites en coupant un corps par un plan d'orientation et profondeur de pénétration aléatoires.

En 2007, Sari et al. [30] ont prouvé que l'utilisation d'un lubrifiant contaminé par des particules polluantes de sable, conduit à une usure importante dans les premiers cycles de fonctionnement et dans les zones à fort taux de glissement. Durant la même année, Emmanuelle Querlioz et al. [31] ont étudié l'influence des rugosités de surface sur la fatigue de contact en roulement. Cette étude montre que la rugosité modifie la pression de contact, ce qui induit des concentrations de contraintes proches de la surface.

En 2009, Sari et al. [32] ont montré l'influence de la pollution solide sur les mécanismes lubrifiés. Dans cette étude, ils ont observé l'effet d'un lubrifiant pollué par du sable sur les surfaces en contact d'une part, et, l'évolution des principales caractéristiques du lubrifiant au cours du temps d'autre part. Les résultats obtenus expriment les raisons de réduction de la durée de vie des mécanismes dans un milieu pollué.

En 2010, Sari et al. [33] ont également étudié les effets de la contamination sur le frottement et l'usure dans un contact EHD lubrifié en glissement pur. Dans ce travail, les résultats obtenus montrent que la présence des particules solides dans le lubrifiant perturbe la séparation entre massifs, ce qui entraîne des fluctuations notables de l'épaisseur du film d'huile et du coefficient de frottement. Dans la même année, Kasai [34] présente une étude sur la réduction du frottement et l'amélioration de la fiabilité de la lubrification des paliers avec des huiles de moteurs automobiles.

En 2015, Bouchireb et Sari [35] contribuent avec une nouvelle étude sur l'effet des particules solides sur les engrenages. Ils ont pu montrer que la présence des particules solides de sable, au niveau des dentures d'engrenages, fait croître considérablement la dégradation.

La plupart des endommagements des mécanismes fonctionnant dans un milieu pollué ont pour origine des indents. Les études réalisées dans ce sujet consistent à indenter une surface soit artificiellement par indenteur, soit naturellement par des polluants et suivre l'évolution

de l'indent jusqu'à rupture. Dans ce contexte, il faut rappeler les travaux menés par Ville et Coulon [36, 37, 38, 39,40, 41, 42] sur l'influence de la pollution solide des lubrifiants sur la durée de vie des mécanismes.

I.12. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, une étude bibliographique est menée sur les contacts élasto-hydrodynamiques, le troisième corps et les polluants solides, ainsi que les types d'usures.

Nous montrons aussi que de nombreux travaux ont été menés dans le domaine de l'élasto-hydrodynamique et de la pollution solide des lubrifiants.

L'étude présentée ici va porter donc sur l'effet de la pollution solide de la lubrification sur les contacts élasto-hydrodynamiques. On s'intéresse plus particulièrement à l'effet d'un lubrifiant pollué par du sable sur la dégradation des surfaces en contact EHD roulant.

II.1 INTRODUCTION :

La statistique demeure un outil indispensable à l'étude de plusieurs phénomènes, lorsqu'ils sont influés par plusieurs facteurs complexes. Dans ce chapitre, les méthodes et formules qui seront utilisées dans l'étude statistique des effets de la pollution solides des lubrifiants sur les contacts EHD, sont explorées.

II.2 LA STATISTIQUE :

La statistique est un domaine des mathématiques qui possède deux parties principales : une théorique et l'autre purement appliquée.

La statistique appliquée est utilisée dans presque tous les domaines de l'activité humaine : ingénierie, management, économie, biologie, informatique,...etc.

En 1982, le statisticien Pierre Dagnelie propose trois grandes tendances de la statistique:

- La statistique qualifiée d'« administrative » ou « gouvernementale » faite dans les instituts de statistique à propos de grands ensembles de données,
- La statistique dite « mathématique » ou « universitaire » faite avec peu de données et qui a pour but la novation,
- Enfin la statistique « appliquée » ou « de terrain » faite dans les instituts de sondage d'opinion ou les facultés de médecine pour des problèmes concrets.

En sciences appliquées (plans expérimentaux) ;

Il existe de nombreux processus et propriétés qui dépend d'un grand nombre de paramètres externes (on parle de facteurs) mais sans que l'on en ait des modèles analytiques.

Lorsque l'on désire connaître la dépendance d'une variable de sortie F d'un tel processus ou propriété, on se trouve confronté à plusieurs difficultés :

- Quels sont les facteurs les plus influents ? ;
- Existe-t-il des interactions entre les facteurs (corrélations) ? ;

- Peut-on linéariser le processus (ou la propriété) en fonction de ces facteurs et le modèle ainsi obtenu est-il prédictif ? ;
- Comment minimiser le nombre de points de mesure du processus (ou de la propriété) pour obtenir le maximum d'informations ? ;
- Existe-t-il des biais dans les résultats des mesures ?

La méthode du plan d'expériences répond à ces questions et peut ainsi être appliquée dans de nombreux processus/propriétés qui vont par exemple des essais de laboratoires à l'évaluation de la qualité des processus industriels les plus complexes.

Ainsi pour l'industrie, une nouvelle définition est posée : un plan d'expériences est une suite d'essais rigoureusement organisés, afin de déterminer avec un minimum d'essais et un maximum de précision, l'influence respective des différents paramètres de conception ou de fabrication d'un produit, afin d'en optimiser les performances et le coût.

II.3 PLAN D'EXPERIENCES :

II.3.1 Historique

· 1925 : Recherche agronomique (Fisher)

Un domaine où les expériences sont longues, coûteuses et dont les résultats sont sujets à variabilités. Il fallait une méthode permettant de tirer d'un nombre d'essais donné, un maximum d'informations crédibles concernant l'influence des facteurs et leur hiérarchisation.

· 1945-60 : Enrichissement par les statisticiens (Box et Hunter).

Ils introduisent les plans fractionnaires à deux niveaux, les plans composites centrés et les modèles de surface de réponse associés.

· 1960 : Approche qualité (Taguchi) : Avec cette approche, il s'agit de :

- Construire la qualité en amont, dès la conception.

- Concevoir des produits performants en moyenne et peu variables autour de cette moyenne.

- Rendre les performances moins sensibles aux conditions d'utilisation, aux aléas de fabrication et au vieillissement (conception robuste).

II.3.2 Définition d'un plan d'expérience : [43]

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles [44]. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt, y , et des variables, x_i . Il faut penser aux plans d'expériences si

l'on s'intéresse à une fonction du type : $y=f(x_i)$

Avec les plans d'expériences, on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse [45]. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur.

La méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle **de l'espace expérimental** et celle de la **modélisation la mathématique** des grandeurs étudiées.

II.3.2.1 Notion d'espace expérimental : [43]

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la **réponse**, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme «variable» on utilisera le mot **facteur**. La réponse dépend donc de un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure 1). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée niveau. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut.

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par $+1$. S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un

espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé l'espace expérimental (Figure II.2).

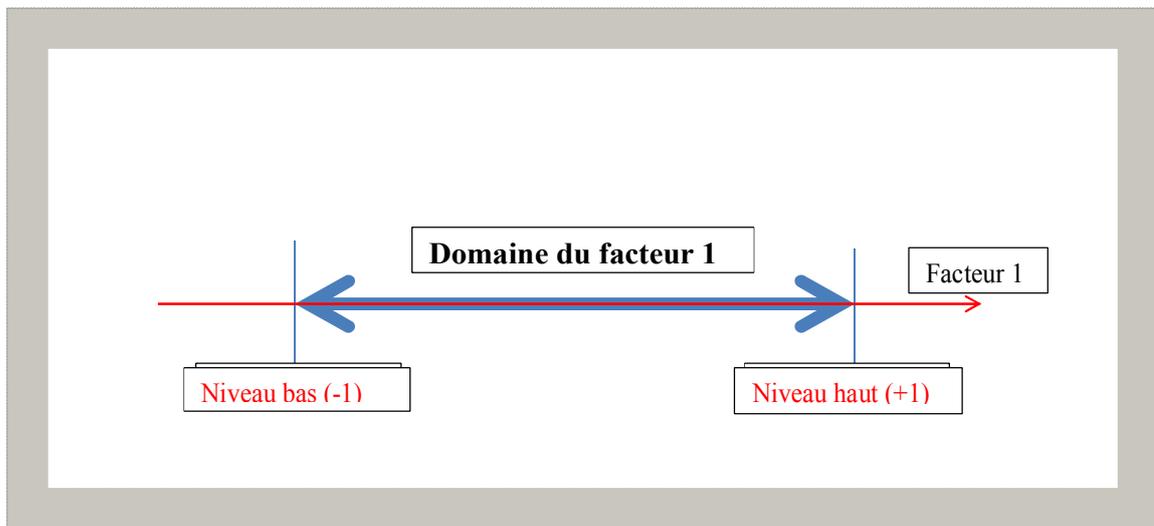


Fig.II.1 : Domaine de variation du facteur 1.

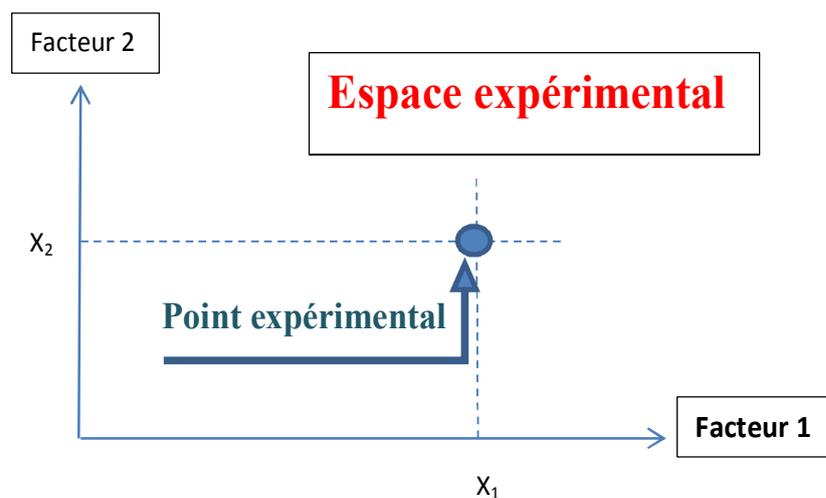


Fig.II.2. Domaine de l'espace expérimental.

Le niveau x_1 du facteur 1 et le niveau x_2 du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (Figure II.2). Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.

Le regroupement des domaines des facteurs définit le «domaine d'étude». Ce domaine d'étude est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies, est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude (Figure II.3).

Cette façon de représenter une expérimentation par des points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude.

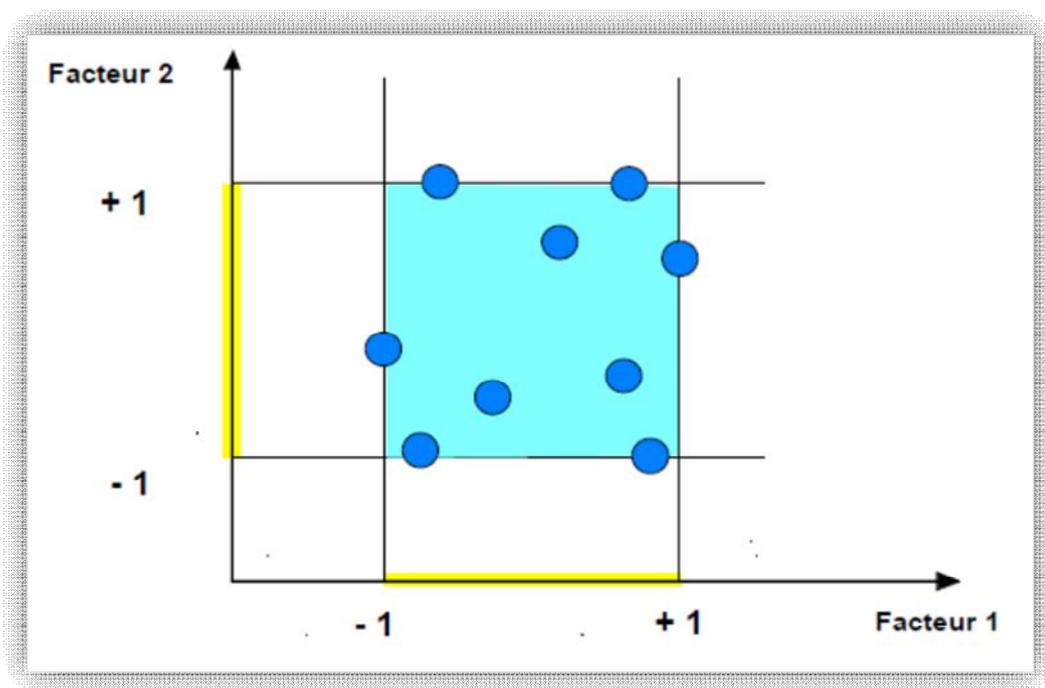


Fig.II.3. Points expérimentaux disposés dans le domaine d'études définies par l'expérimentateur [43].

Les définitions qui ont été données s'appliquent bien aux variables continues. Mais il existe d'autres types de variables. Il y a les variables discrètes comme par exemple des personnes. On peut encore parler d'espace expérimental mais il n'aura pas les mêmes propriétés que l'espace des variables continues. Il y a également les grandeurs ordonnables comme, par exemple, des distances qui peuvent être courtes, moyennes et longues. Là aussi, la notion d'espace expérimental existe toujours mais cet espace possède des propriétés différentes des deux premiers.

II.3.2.2 Notion de surface de réponse : [43]

Les niveaux x_i représentent les coordonnées d'un point expérimental et y est la valeur de la réponse en ce point. On définit un axe orthogonal à l'espace expérimental et on l'attribue à la réponse. La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. Un plan à deux facteurs utilise un espace à trois dimensions pour être représenté : une dimension pour la réponse, deux dimensions pour les facteurs.

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse (Figure II.4).

Le nombre et l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On cherche à obtenir la meilleure précision possible sur la surface de réponse tout en limitant le nombre d'expériences.

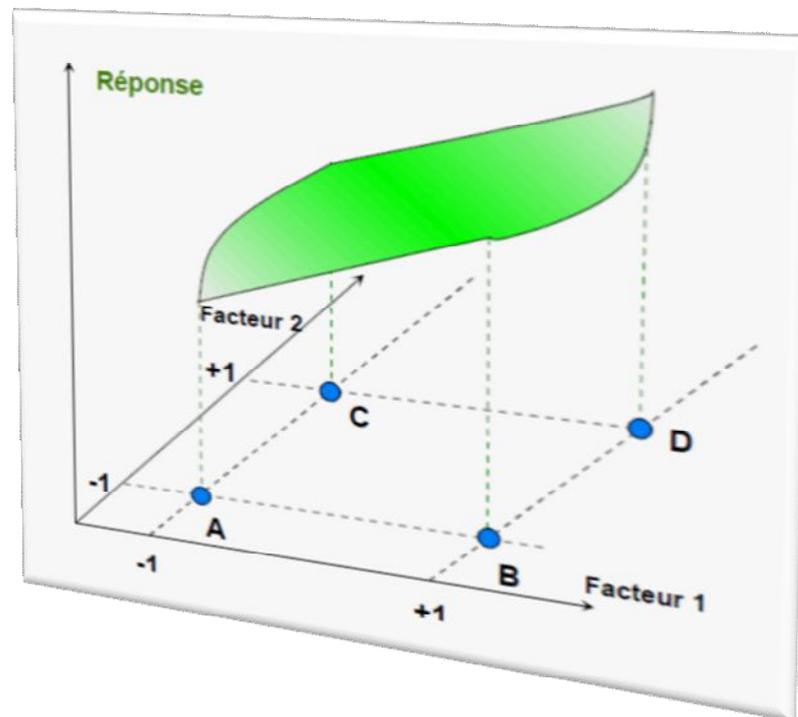


Fig.II.4 Réponses associées aux points du domaine d'étude qui forment la surface de réponse [43].

II.4 MODELISATION MATHEMATIQUE:

Un modèle est le moyen le plus simple permettant de relier des variables à expliquer Y à des variables explicatives X, par une relation fonctionnelle de la forme: $Y = F(X)$

Les modèles statistiques peuvent être regroupés en quatre grandes familles:

- Les modèles linéaires ;
- Les modèles non linéaires ;
- Les modèles non paramétriques ;
- Les modèles bayésiens (du nom de Bayes) peuvent être utilisés dans les trois catégories.

L'objectif principal est de choisir une fonction mathématique qui relie la réponse aux facteurs. On prend un développement limité de la série de Taylor-Mac Laurin. Les dérivées sont supposées constantes et le développement prend la forme d'un polynôme de degré plus ou moins élevé [43] :

$$Y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \dots + \sum b_{ii} x_i^2 + b_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z$$

Où

- y est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée.
- x_i représente le niveau attribué au facteur i par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On suppose même que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression).
- b_0 , b_i , b_{ij} , b_{ii} sont les coefficients du modèle mathématique adopté à priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

II.4.1 Le modèle de l'expérimentateur :

Deux compléments doivent être apportés au modèle précédemment décrit.

Le premier complément est le "**manque d'ajustement**". Cette expression traduit le fait que le modèle à priori est fort probablement différent du modèle réel qui régit le phénomène étudié. Il y a un écart entre ces deux modèles. Cet écart est le manque d'ajustement (**lack of fit** en anglais).

Le second complément est la prise en compte de la nature aléatoire de la réponse. En effet, si l'on mesure plusieurs fois une réponse en un même point expérimental, on n'obtient pas exactement le même résultat. Les résultats sont dispersés. Les dispersions ainsi constatées sont appelées erreurs expérimentales.

Ces deux écarts, manque d'ajustement et erreur expérimentale, sont souvent réunis dans un seul écart, notée e . Le modèle utilisé par l'expérimentateur s'écrit alors :

$$Y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \dots + \sum b_{ii} x_i^2 + b_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z + e$$

II.4.2 Système d'équations :

Chaque point expérimental permet d'obtenir une valeur de la réponse. Cette réponse est modélisée par un polynôme dont les coefficients sont les inconnues qu'il faut déterminer. A la fin du plan d'expériences, on a un système de n équations (s'il y a n essais) à p inconnues (s'il y a p coefficients dans le modèle choisi à priori). Ce système s'écrit d'une manière simple en notation matricielle :

$$Y = bX + e$$

Y est le vecteur des réponses.

X est la matrice de calcul, ou matrice du modèle, qui dépend des points expérimentaux choisis pour exécuter le plan et du modèle postulé.

b est le vecteur des coefficients.

e est le vecteur des écarts.

Ce système possède un nombre d'équations inférieur au nombre d'inconnues. Il y a (n) équations et $(p + n)$ inconnues. Pour le résoudre, on utilise une méthode de régression basée sur le critère des moindres carrés.

II.5 METHODES DE REGRESSION:

Le problème de la régression consiste à rechercher une relation pouvant éventuellement exister entre les x et les y , par exemple de la forme $y = f(x)$. Lorsque la relation recherchée est affine, c'est-à-dire de la forme $y = ax + b$, on parle de régression linéaire. Mais même si une telle relation est effectivement présente, les données mesurées ne vérifient pas exactement cette relation. Pour tenir compte dans le modèle mathématique des erreurs observées, on considère les données $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ comme autant de réalisations d'une variable aléatoire Y et parfois aussi les données $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ comme autant de réalisations d'une variable aléatoire X . On dit que la variable Y est la variable dépendante ou variable expliquée et que la variable X est la variable explicative.

II.5.1 Les principaux modèles de régression [46]:

Le modèle de régression le plus connu est le modèle de **régression linéaire**.

Lorsque le modèle n'est pas linéaire, on peut effectuer une régression approchée par des algorithmes itératifs, on parle de **régression non linéaire**.

Si on s'intéresse au quantile conditionnel de la distribution de la variable aléatoire y sachant le vecteur de variables aléatoires x , on utilise un modèle de **régression quantile**.

Si la variable expliquée est une variable aléatoire binomiale, il est courant d'utiliser une **régression logistique** ou un **modèle probit**.

Si la forme fonctionnelle de la régression est inconnue, on peut utiliser un modèle de **régression non paramétrique**.

Il existe également d'autres types de régression :

- Régression linéaire multiple ;
- Régression polynomiale ;
- Régression logistique ;
- Modèle linéaire généralisé ;

- Modèles de régression multiple postulés et non postulés ;
- Régression circulaire ;
- Régression elliptique ;
- Régression locale.

II.6 CRITERE DES MOINDRES CARRÉS:

Dans le plan (x,y) et à l'aide d'un nuage de n points, on peut représenter les données $\{(x_i, y_i), i = 1, \dots, n\}$. Le centre de gravité de ce nuage peut se calculer facilement : il s'agit du

point de coordonnées : $(\bar{X}, \bar{Y}) = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i\right)$.

La recherche d'une relation affine entre les variables X et Y revient à la recherche d'une droite qui s'ajuste le mieux possible à ce nuage de points. Parmi les droites possibles, on retient celle qui possède une propriété bien particulière. En effet, il s'agit d'une droite qui rend minimale la **somme des carrés des écarts** des valeurs mesurées y_i à la droite $\hat{y}_i = ax_i + b$ tel représentée dans la Fig. II.5. Si ε_i représente cet écart, appelé aussi résidu, le principe des moindres carrés ordinaire (MCO) consiste à choisir les valeurs de a et de b qui minimisent la fonction E :

$$E = \sum_{i=0}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=0}^n (y_i - (ax_i + b))^2$$

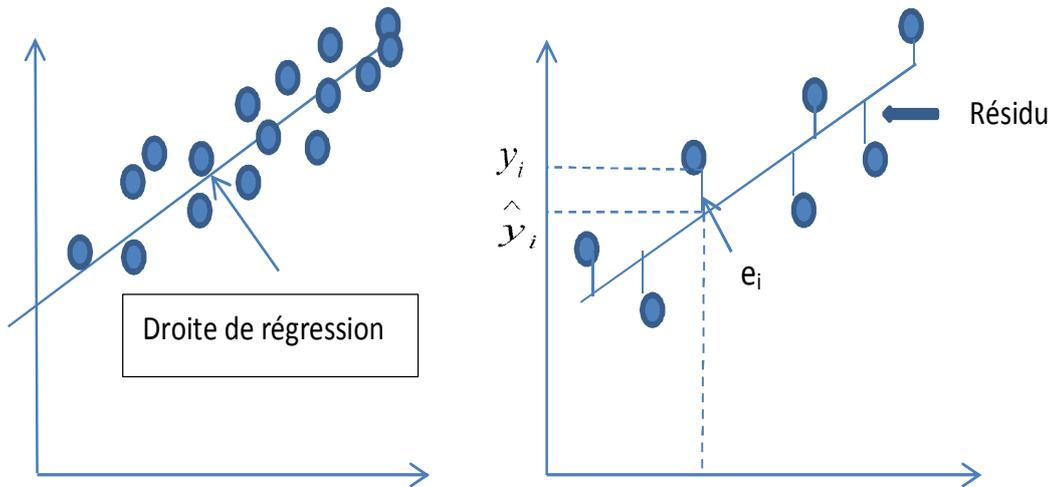


Fig.II.5 Principe des moindres carrés

II.7 ANALYSE DE LA VARIANCE (ANOVA) :

La variance est une mesure du degré de dispersion d'un ensemble de données. On la calcule en tenant compte de la moyenne de l'écart au carré de chaque nombre par rapport à la moyenne d'un ensemble de données.

La variance d'une variable discrète composée de n observations est définie comme suit :

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \text{ avec } \bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i$$

\bar{y} : La moyenne des observations

L'analyse de la variance est un test qui permet d'étudier le comportement d'une variable continue à expliquer en fonction d'une ou de plusieurs variables explicatives catégorielles.

La décomposition de la variance conduit à séparer la part de variance de la variable dépendante expliquée par le modèle de celle due aux résidus [47].

Écart total est :

$$(y_i - \bar{y}) = (\hat{y}_i - \bar{y}) + (y_i - \hat{y}_i)$$

Il est décomposé comme suit :

Ecart total	Ecart expliqué par l'équation de régression	Ecart résiduel (inexpliqué)
$(y_i - \bar{y})$	$(\hat{y}_i - \bar{y})$	$(y_i - \hat{y}_i)$

Avec :

Observations	Moyenne des observations	Valeurs prédites par le modèle ou les estimations de E(Yi).
y_i	\bar{y}	\hat{y}_i

On obtient l'ampleur de chacune de ces dispersions par les sommes suivantes :

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$$

$$SC_T = SC_E + SC_R$$

Avec :

Source de variation	Degrés de liberté	Carrés moyens
SCT = Variance totale (somme des carrés sur le total des données)	n-1	CMT=SCT/ (n-1)
SCE = Variance résiduelle (variance des résidus)	n-(k+1)	CME= SCE/ (nk-1)
SCR = Variance de la régression (calculée sur la distance de la régression à la moyenne E(Y))	K	CMR = SCR/k

Tab.II.1 Evaluation de la qualité de l'ajustement : [48]

La comparaison de la variance attribuable à la régression à la variance résiduelle, s'effectue au moyen du test de Fisher [48-52].

Le test *F* est basé sur le postulat que les données brutes X_i sont normalement distribuées. Ce test semble « robuste » en ce sens que lorsque les données sont seulement approximativement normales et nombreuses, les conclusions du test restent valides. La valeur testée par l'hypothèse est le ratio entre deux sommes de carrés pondérés par leurs degrés de liberté respectif.

Le test F est de la forme :

$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ ou σ_1^2 et σ_2^2 sont deux variances de deux populations

$H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$

$F = S_1^2/S_2^2$, avec S_1^2, S_2^2 deux variance à comparer, si $F > F_{\text{TABULÉ}}$, alors on rejette l'hypothèse nulle.

Signification de la régression :

Soit le modèle à k variables suivant :

$$Y_i = b_0 + b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + \dots + b_k x_{ik} + e$$

Hypothèse :

$H_0 : b_1 = b_2 = \dots = b_k = 0$, Il n'existe aucune contribution des X_j à la réponse

H_1 : au moins l'un des $b_j \neq 0$, au moins une variable, soit X_j , apporte une contribution significative à la réponse.

On calcule :
$$F = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 / k}{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n - k - 1)}$$

Sous l'hypothèse H_0 cette quantité est distribuée selon une loi de Fisher avec (k) et $(n-k-1)$ degrés de liberté.

Règle : rejeter H_0 si $F > F_\alpha$; $k, n-k-1$ et favoriser H_1 .

F_α : valeur critique tabulé du test F .

α : niveau de signification.

Le coefficient de détermination de la régression multilinéaire R^2 :

$$R^2 = SC_R / SC_T \quad \text{avec : } 0 \leq R^2 \leq 1$$

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

(1-R²) représente la part inexpliquée de la variance totale attribuable soit à l'omission de variables, soit à une formulation incorrecte du modèle, soit enfin à l'erreur instrumentale.

Plus la valeur de R² est proche de l'unité, meilleur est l'ajustement.

II.8 MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE EXPÉRIMENTALE :

La méthodologie de la recherche expérimentale permet de :

- Formuler clairement le problème étudié ;
- Fixer les objectifs ;
- Faire la synthèse des connaissances ;
- Lister les facteurs susceptibles d'avoir de l'influence, les réponses et les contraintes ; définir le domaine expérimental d'intérêt ;
- Établir une stratégie expérimentale ou un plan d'expérimentation ;
- Effectuer les expériences ;
- En déduire les réponses aux questions posées.

II.8.1 Choix d'un plan d'expérience :

Pour le succès d'une expérimentation, il faut définir une stratégie d'expérimentation pertinente, et économique en moyens. Pour ce faire, on construit le bon plan d'expérience, adapté au projet permettant de réaliser un nombre minimal d'essais.

Un grand nombre de plans ont été construits pour arriver à cette fin, dont on cite :

- **Les plans factoriels :**

Parmi les différents plans expérimentaux, les plans factoriels sont courants car ils sont les plus simples à mettre en œuvre d'une part, et ils permettent de mettre en évidence très rapidement l'existence d'interactions entre les facteurs d'autre part.

L'hypothèse de base est d'assigner à chaque facteur (normalisé) sa valeur la plus basse (-1) et sa valeur la plus haute (+1). Ainsi, pour k facteurs, on se retrouve avec un ensemble de 2^k valeurs possibles. On trouve aussi :

- Plans factoriels complets.
- Plans factoriels fractionnaires.
- Les plans de Koshal.
- Les plans de Plackett et Burmann.
- Les plans sursaturés.
- Carrés latins.
- Carrés gréco-latins.
- Carrés de Youden.
- Les plans composites.
- Les plans de Doehlert.
- Les plans de Box-Behnken.
- Les plans hybrides.
- Les plans de mélange.
- Les plans booléens.
- Les plans pour simulations numériques.

II.8.2 Les plans de Taguchi :

Méthode Développée dans les années 1950 par Genichi Taguchi (statisticien japonais) et introduite aux USA et en Europe dans les années 1980. Cette méthode est basée sur la méthodologie de surface de réponse (RSM). • Plus d'une décennie de controverse avec les statisticiens pour son idée révolutionnaire (concept de robustesse) et sa Démocratisation des plans d'expériences« Simplification » des plans d'expériences.

Les facteurs peuvent être testés sur plusieurs niveaux : 2, 3, 4 ou 5. Cela a conduit **Genichi Taguchi** à élaborer des matrices factorielles correspondantes. Toutes ces matrices sont orthogonales et par souci d'économie, fractionnaires (ne reprennent qu'une fraction de la totalité des combinaisons possibles).

Dans ce qui suit, notre étude est basée sur l'utilisation d'une table orthogonale de TAGUCHI de type L_9 . En réalité, les principales matrices orthogonales proposées par Taguchi et leurs usages sont récapitulées dans le tableau II.2 :

	Usage	Plan à 2 niveaux	Plan à 3 niveaux	Plan à 2 et 3 niveaux	Plan à 4 et 5 niveaux
Etude des interactions impossibles	Convient bien pour une phase de Screening.	$L_{12}(2^{11})$		$L_{36}(2^{11} \times 3^{12})$	
Etude des interactions limitées	Également pour Screening.			$L_{18}(2^1 \times 3^7)$	$L_{32}(2^1 \times 4^9)$, $L_{50}(2^1 \times 5^{11})$
Etude des interactions possibles	Permettent de définir un modèle précis dans le cadre d'une étude pour surface de réponse le plus souvent.	$L_4(2^3)$, $L_8(2^7)$, $L_{16}(2^{15})$, $L_{32}(2^{31})$, $L_{64}(2^{31})$ $L_{64}(2^{63})$	$L_9(3^4)$, $L_{27}(3^{13})$, $L_{36}(3^{13})$, $L_{81}(3^{40})$	$L_{36}(2^3 \times 3^{13})$, $L_{54}(2^1 \times 3^{25})$	$L_{16}(4^5)$, $L_{64}(4^{21})$, $L_{25}(5^6)$

Tab.II.2 Les-plans-Taguchi et leurs usages

Type de matrices d'expériences de Taguchi :

- Matrice d'expériences L_4 (3 facteurs à 2 niveaux)
- Matrice d'expériences L_8 (7 facteurs à 2 niveaux)
- Matrice d'expériences L_{12} (11 facteurs à 2 niveaux)
- Matrice d'expériences L_{16} (15 facteurs à 2 niveaux)
- Matrice d'expériences L_{32} (31 facteurs à 2 niveaux)
- Matrice d'expériences L_{18} (1 facteur à 2 niveaux et 7 facteurs à 3 niveaux)
- Matrice d'expériences L_9 (4 facteurs à 3 niveaux)
- Matrice d'expériences L_{27} (13 facteurs à 3 niveaux)
- Matrice d'expériences L_{36} (13 facteurs à 3 niveaux)
- Matrice d'expériences L_{16} (5 facteurs à 4 niveaux)
- Matrice d'expériences L_{25} (6 facteurs à 5 niveaux)
- Matrice d'expériences L_8 (4 facteurs à 2 niveaux et 1 facteur à 4 niveaux)
- Matrice d'expériences L_{16} (12 facteurs à 2 niveaux et 1 facteur à 4 niveaux)
- Matrice d'expériences L_{16} (9 facteurs à 2 niveaux et 2 facteurs à 4 niveaux)

- Matrice d'expériences L_{16} (6 facteurs à 2 niveaux et 3 facteurs à 4 niveaux)
- Matrice d'expériences L_{16} (3 facteurs à 2 niveaux et 4 facteurs à 4 niveaux)
- Matrice d'expériences L_{32} (28 facteurs à 2 niveaux et 1 facteur à 4 niveaux)
- Matrice d'expériences L_{32} (25 facteurs à 2 niveaux et 2 facteurs à 4 niveaux)
- Matrice d'expériences L_{32} (22 facteurs à 2 niveaux et 3 facteurs à 4 niveaux)
- Matrice d'expériences L_{32} (19 facteurs à 2 niveaux et 4 facteurs à 4 niveaux)
- Matrice d'expériences L_{32} (16 facteurs à 2 niveaux et 5 facteurs à 4 niveaux)
- Matrice d'expériences L_{32} (13 facteurs à 2 niveaux et 6 facteurs à 4 niveaux)
- Matrice d'expériences L_{32} (10 facteurs à 2 niveaux et 7 facteurs à 4 niveaux)
- Matrice d'expériences L_{32} (7 facteurs à 2 niveaux et 8 facteurs à 4 niveaux)
- Matrice d'expériences L_{32} (4 facteurs à 2 niveaux et 9 facteurs à 4 niveaux)
- Matrice d'expériences L_{36} (11 facteurs à 2 niveaux et 12 facteurs à 3 niveaux)

II.9 CONCLUSION :

Dans ce chapitre on a essayé de donner un aperçu sur la statistique en général et on a exposé également les outils statistiques utilisés dans notre étude, ainsi que le choix du plan statistique adapté à nos expériences.

III.1 INTRODUCTION:

La vie des mécanismes dépend essentiellement de la durée de vie de leurs composants en contact. Dans nos jours, les spécialistes en tribologie basculent leurs études, d'une part vers les matériaux constituant les éléments des contacts mécaniques, et, d'autre part vers l'amélioration de la qualité des lubrifiants et surtout la lutte contre la pollution solide des lubrifiants. En effet, il est bien établi que la présence des particules polluantes dans les lubrifiants est inévitable. Ces particules indésirables arrivent donc à pénétrer dans le contact et quand leur taille est supérieure à l'épaisseur du film d'huile, ils perturbent le fonctionnement, rayent et indentent les surfaces.

Dans ce travail de recherche, nous nous sommes particulièrement intéressés aux effets de la pollution solide des lubrifiants sur la dégradation des contacts élasto-hydrodynamiques roulants.

III.2 FORMULATION DU PROBLEME:

L'influence de la pollution solide sur la durée de vie des contacts EHD, demeure à nos jours un problème d'actualité. Dans un premier temps, on étudiera dans ce chapitre expérimentalement l'évolution de l'usure, de la température et de la rugosité de surface d'un contact E.H.D roulant sous l'effet du polluant sable. Dans une seconde étape, on s'intéressera à la modélisation mathématique de l'usure et de la rugosité de surface, en se basant sur la méthodologie de surface de réponse (RSM) et l'analyse de variance (ANOVA). Pour ce faire, des plans orthogonaux de Taguchi seront utilisés. En effet, il s'agit de deux séries d'expériences. Dans la **première série**, l'usure (W) et la rugosité de surface (R_a) seront explorées en fonction de trois paramètres de variation, à savoir la concentration des particules (C), la charge (Q) et la vitesse de rotation (V). Par contre, l'usure (W) et les rugosités de surface (R_a et R_t) dans la **seconde série** d'expériences seront étudiées en fonction de quatre paramètres de variation, à savoir : la dureté (H), la vitesse de rotation (V), la concentration des particules (C) et la charge (Q).

D'autre part, il convient de mentionner que pour la première série d'expériences, un modèle du "premier ordre-interaction" sera recherché, tandis qu'un modèle du "premier ordre" sera établi pour la deuxième série d'expériences.

L'analyse de variance (ANOVA) et la modélisation mathématique feront l'objet du quatrième chapitre.

III.3 OUTILS EXPERIMENTAUX:

III.3.1 Dispositif expérimental :

Le dispositif d'essai, est pris de telle sorte à répondre au bon déroulement des expériences. En effet, il s'agit d'un dispositif où sont montés en contact un disque en acier rotatif et une éprouvette cylindrique. (Figure III. 1).

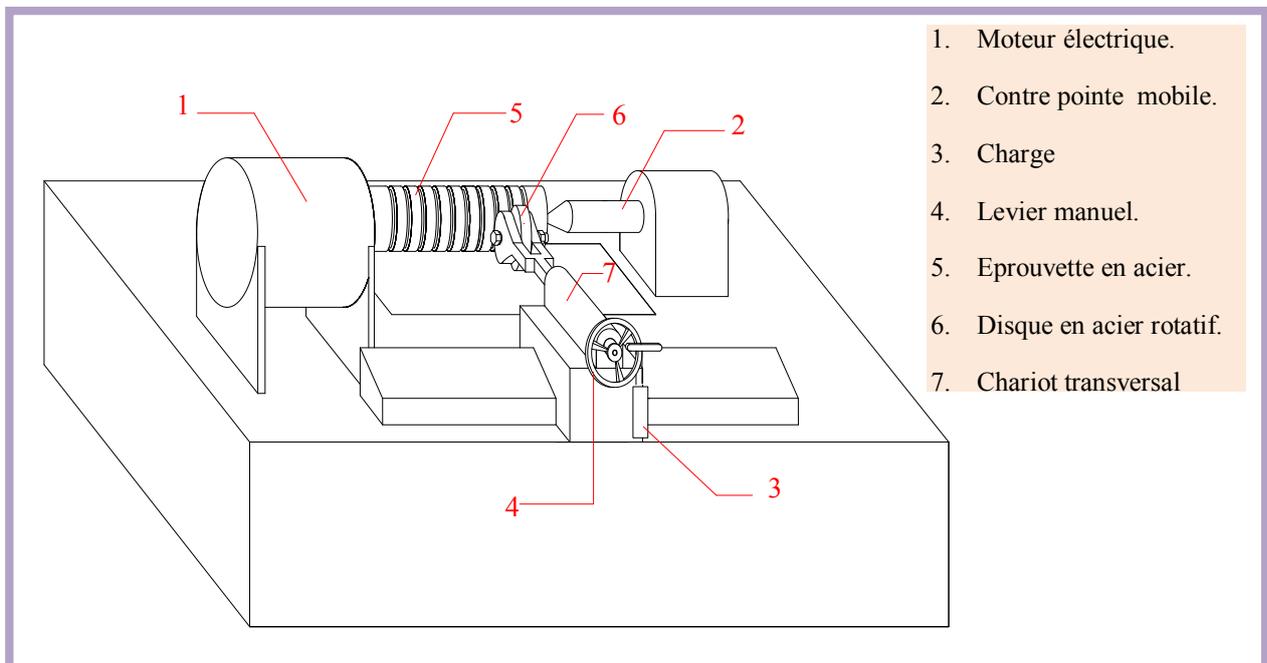


Fig.III.1 Schéma du dispositif d'essai

III.3.2 Matériel utilisé :

Dans le but de réaliser les expériences, on utilisera le matériel suivant :

- Des disques en acier C45;
- Eprouvette cylindrique (pièce en acier C45).
- Huile SAE 90 ;
- Compateur ;

- Des charges ;
- Du sable filtrée à 63 et 125 microns ;
- Un thermocouple infrarouge (pour les mesures de température);
- Un pied à coulisse à lecture digitale pour mesurer la perte de côte;
- Un rugosimètre pour mesurer la rugosité.

III.3.2.1. Les éprouvettes :

La réalisation des éprouvettes a été effectuée sur un tour universelle disponible au niveau de la RTE (Région Transport Est) Sonatrach (Figure III. 2. a et b). Quant aux traitements thermiques des éprouvettes usinées, ils sont réalisés au niveau du SOMIK.

Les éprouvettes sont du type cylindrique, en acier C45, d'une longueur de 240 mm et d'un diamètre de 30 mm. Chaque éprouvette se compose de neuf bandes, séparées entre elles par de petites gorges de 2 mm de profondeur. Les opérations de chariotage, ainsi que la réalisation des bandes cylindriques sur l'éprouvette en acier C45, sont visualisées par les Figures (III.2-a et b).

La Figure III.3-a représente les trois éprouvettes en acier C45 traitées thermiquement au niveau du SOMIC (Société de Maintenance Industrielle de Skikda).

La procédure de réalisation des traitements thermiques est comme suite :

Réalisation de l'éprouvette n°1 :

Température du traitement 850°C, trempe à l'eau avec un revenu à 500°C.

Résultat : Barre d'une dureté moyenne de **59 HRC**.

Réalisation de l'éprouvette n°2 :

Température du traitement 850°C, trempe à l'eau avec un revenu à 200°C.

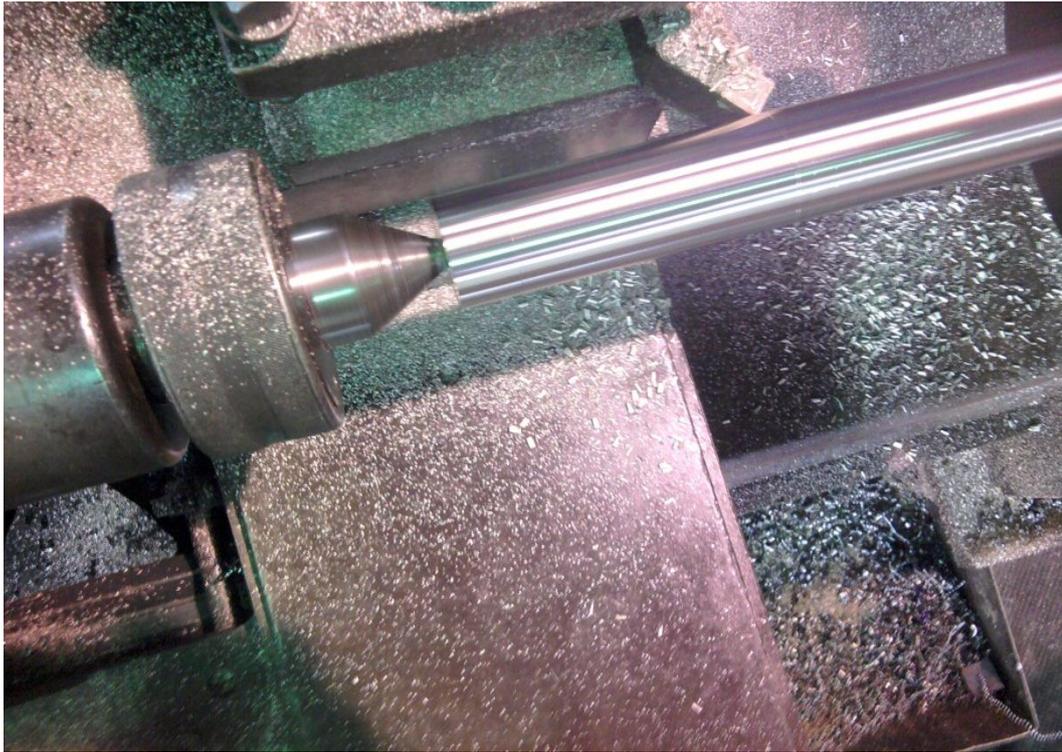
Résultat : Barre d'une dureté moyenne de **55 HRC**.

Réalisation de l'éprouvette n°3 :

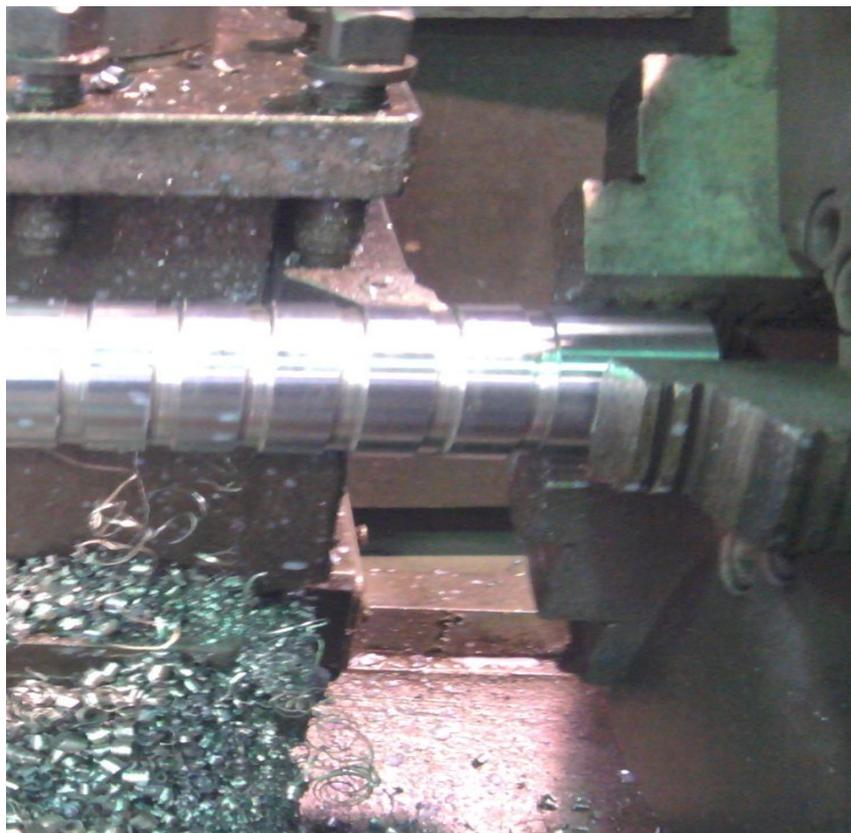
Température du traitement 850°C, trempe à l'huile avec un revenu à 200°C.

Résultat : Barre d'une dureté moyenne de **46 HRC**.

La Figure III.3.-b représente l'éprouvette n°4 en acier C45 sans traitement thermique. Sa dureté est de l'ordre de **34 HRC**.



a. Chariotage de la barre en acier C45



b. Réalisation des bandes.

Fig. III.2. Usinage des éprouvettes.



Photographie (a)



Photographie (b)

Fig. III.3 Photographies des éprouvettes finies (a et b)

III.3.2.1.1 Acier C45 :

C'est un acier utilisé en mécanique générale pour sa bonne usinabilité et ses caractéristiques mécaniques. C'est un acier non allié pour traitement thermique défini essentiellement par sa composition chimique (0.45 à 0.51% de carbone). Il est largement utilisé pour les pièces soumises aux chocs et nécessitant une bonne résistance : axes, engrenages, vis sans fin,

paliers, pignons, boulonnerie, forge (leviers, arbres) ...etc. Il est employé lorsque les caractéristiques mécaniques demandées sont sévères et nécessitent des transformations de structure par traitements thermiques.

III.3.2.1.2 Composition chimique :

Le tableau III.1 donne la composition chimique des échantillons (éprouvettes cylindriques) :

Composés	C	Mo	Cu	Ni	Mn	Cr	P	Si	V	S
% de masse	0.520	0.007	0.082	0.056	0.625	< 0.05	0.009	0.454	< 0.01	0.0345

Tab .III.1 Composition chimique de l'acier C 45 [34]

Méthodes et normes d'essai : Analyse par fluorescence aux rayons X. Carbone et soufre par spectrométrie d'absorption en infrarouge.

III. 3.2.1.3 Caractéristiques mécaniques de l'acier C45:

Les caractéristiques mécaniques sont présentées dans le tableau III.2.

Matériau	Dureté (HRC)	Coefficient de Poisson, ν	Module de Young, E (GPa)	Résistance mécanique équivalente, R_{eq} (N/mm ²)
C45	34	0,3	210	540

Tab.III.2 Caractéristiques mécaniques C45

III.3.2.2 Les Bagues et roulements :



(a)



(b)

Fig. III.4 Photographie des éléments du disque rotatif : (a) bague en acier C45, (b) roulement 100 C6.

Les roulements utilisés sont à une seule rangée de bille, de type 6000 ZZ étanche à la poussière (figure III. 4.a), dont les caractéristiques dimensionnelles sont :

- Diamètre de la bague extérieur : $D = 26$ mm;
- Diamètre de la bague intérieur : $d = 10$ mm;
- Largeur : $L = 8$ mm;

Les bagues sont usinées de sorte à obtenir un diamètre 30 mm. Elles sont montées par assemblage serré sur les roulements et ceci pour construire les disques en acier C45 (Figure III. 4 (b))

III.3.2.3 Le lubrifiant :

Le lubrifiant utilisé pour les essais est une huile extrême pression de type SAE 90. C'est une huile mono grade épaisse qualifiée pour la lubrification des engrenages et roulement. Elle a une viscosité dynamique $\mu_0 = 0.033$ Pa.s à $T_0 = 40^\circ\text{C}$ et un coefficient de piezo-viscosité $\alpha_{p-v} = 18.2 \times 10^{-9}$ Pa⁻¹. Ce type d'huile remplit les fonctions suivantes:

- Lubrifie les paliers d'arbre, les roulements et les engrenages.
- Transfère la chaleur afin de régulariser les températures de fonctionnement des boîtes de vitesses automatiques.
- Possède une excellente tenue au cisaillement.
- N'attaque pas les joints, ni les caoutchoucs.
- Possède un pouvoir antioxydant, anti usure et anti rouille.

III.3.2.4 Le polluant :

Le polluant utilisé dans notre étude est le sable de Sahara connu par sa dureté, sa fragilité, sa richesse en silice, avec 90 % de quartz et qui peut être véhiculé par le vent jusqu'en Europe voire même en Amérique. Le sable a été nettoyé, filtrée à 63 μm et 125 μm puis analysé chimiquement. Les Figures III.5-a et b visualisent la morphologie et la composition chimique du sable respectivement.

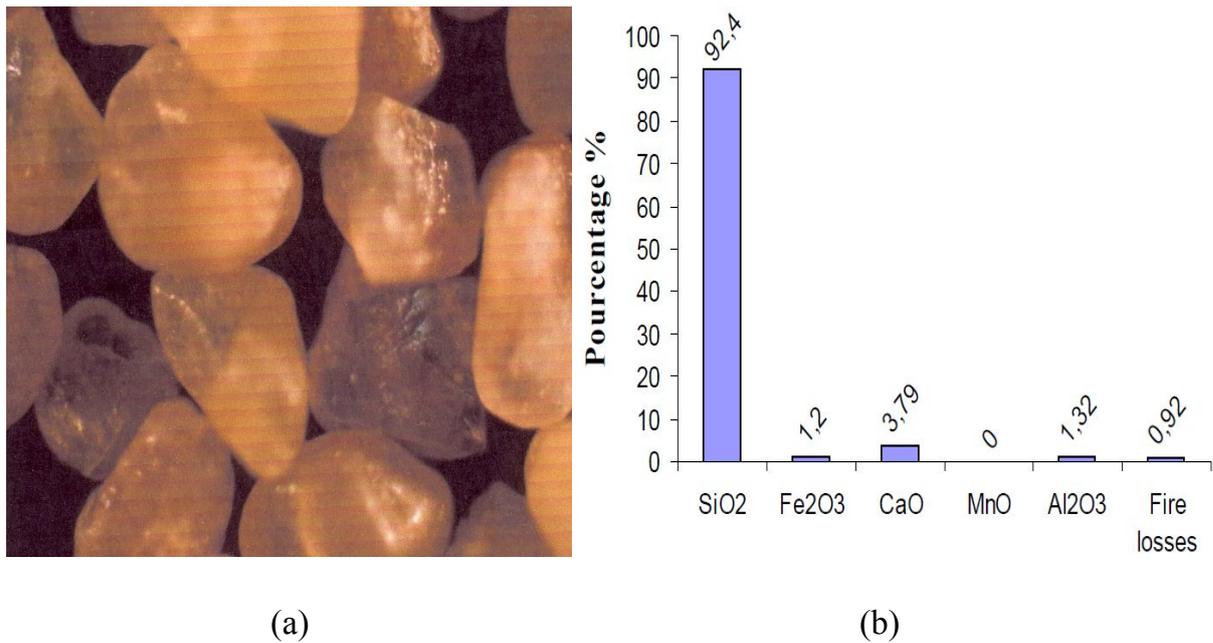


Fig. III.5 Morphologie (a) et composition chimique du sable (b)

Pour les essais, de fines particules de sable, de taille $\leq 63 \mu\text{m}$ et $\leq 125\mu\text{m}$, sont ajoutés à l'huile afin de visualiser les phénomènes de dégradation des contacts E.H.D. La solution polluée est assurée donc par un mélange de (5 ; 7,5 et 10) g de sable avec 1 litre d'huile. Ces essais ont pour but de voir l'effet de la pollution solide de la lubrification sur les systèmes tribologiques.

III.4 PROCEDURE EXPERIMENTALE :

III.4.1 Etalonnage :

L'étalonnage a pour but de déterminer l'effort de contact entre le disque en Acier monté dans le dispositif de maintien et l'éprouvette cylindrique en acier C45 en montage mixte entre le mandrin à trois mors et la contre pointe.

Procédure:

La procédure d'étalonnage se résume dans les étapes suivantes :

- On place l'éprouvette cylindrique et le disque en acier en contact. Il s'agit d'assurer la tangente entre les deux éléments en contact ;

- Le comparateur est placé ensuite sur la face opposée du contact d'une façon à ce qu'il puisse mesurer les déformations de l'éprouvette (Figure III.6);
 - On règle le comparateur à zéro ;
 - On fait suspendre des charges au levier 4.
 - Ces charges influent directement sur le roulement (chargement du roulement).
 - Pour chaque charge, on relève la valeur indiquée sur le comparateur de précision 0,01 mm.
- Le schéma de la figure III.6 représente la déformation Y_1 sous l'effet de la charge F_1

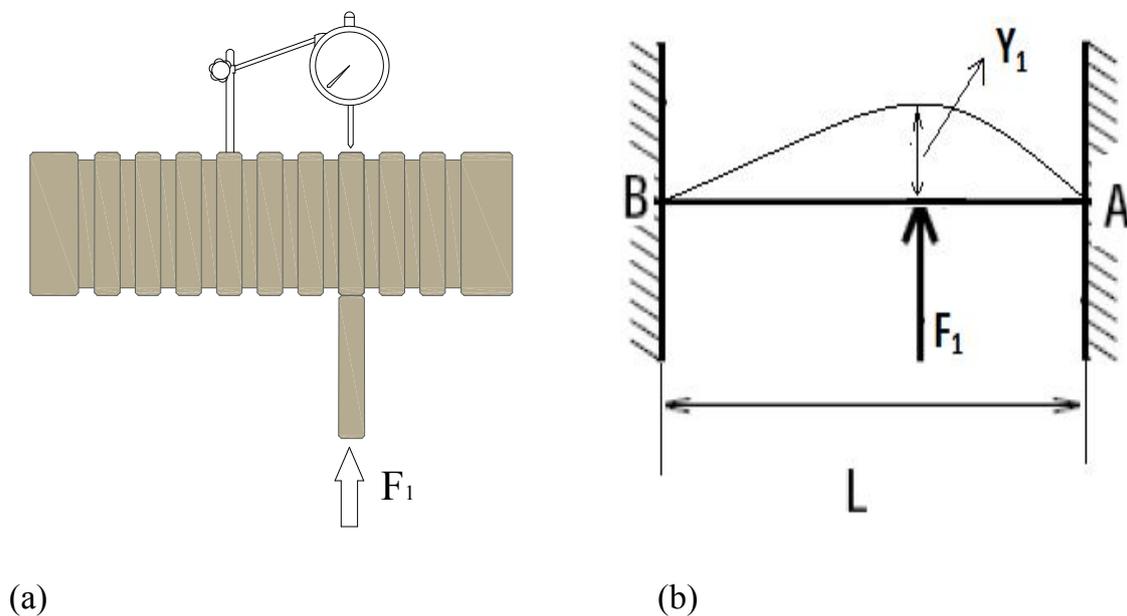


Fig.III.6 Représentation de la méthode d'étalonnage (a) et la déformée Y_1 sous l'effet de la charge F_1 (b)

III.4.1.1 Résultats d'étalonnage pour la 1^{ère} série d'expériences:

Les résultats de mesure de la déformée Y_1 due à l'application de différentes charges, sont visualisés par le tableau III.3.

Charge Q (Kg)	2	3	4	6	7	10	13	15	18
Charge F_1 (N)	19,62	29,43	39,24	58,86	68,67	98,1	127,53	147,15	176,58
Y_1 (mm)	0,015	0,03	0,065	0,095	0,115	0,17	0,2	0,23	0,25

Tab.III.3 Valeurs de la constante d'étalonnage (1^{ème} série d'expérience)

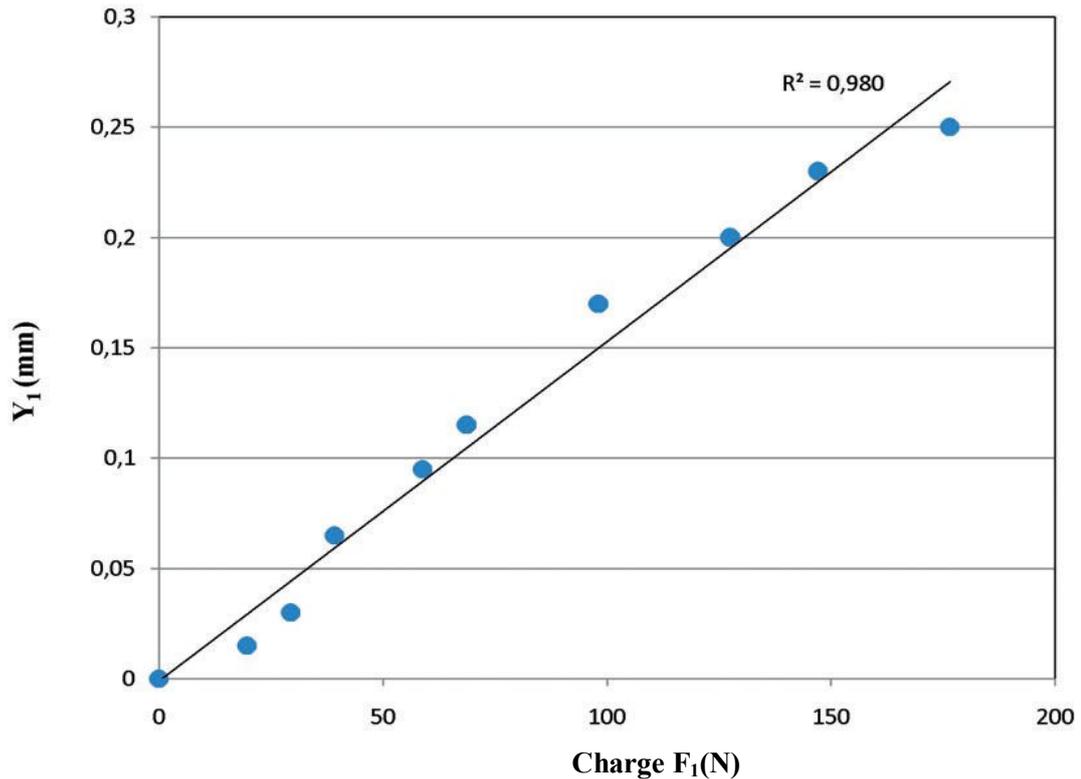


Fig. III.7 Graphe d'étalonnage de l'éprouvette C45 (1^{ème} série d'expériences).

La Figure III.7 montre que la courbe d'étalonnage apparaît comme une droite qui passe par l'origine. L'équation qui caractérise cette droite est de la forme :

$$Y_i = K \cdot F_{1i} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

Y_i : la déformée (flèche).

F_{1i} : la charge appliquée.

K : la pente (constante d'étalonnage).

Pour déterminer la constante K, on fait appel à la méthode des moindres carrés. Cette méthode consiste en ce qui suit :

Considérons la somme des carrés des différences entre les valeurs expérimentales y_1 et celles de la fonction Y aux points correspondants (n nombre des charges appliquées). Cette somme s'exprime par :

$$Z = \sum_{i=1}^n [y_{1i} - y_i]^2 \quad \text{III.2}$$

L'objectif est de trouver la valeur de K qui minimise l'erreur, pour cela on procède comme suit :

$$\frac{\partial Z}{\partial K} = 0 \quad \text{III.3}$$

Tenant compte de l'équation III.3, il arrive:

$$\frac{\partial Z}{\partial K} = 2 \sum_{i=1}^n [K \cdot F_{1i}^2 - y_{1i} \cdot F_{1i}] \quad \text{III.4}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial K} = 0 \Rightarrow - \sum_{i=1}^n K \cdot F_{1i}^2 + \sum_{i=1}^n y_{1i} \cdot F_{1i} = 0 \quad \text{III.5}$$

De l'équation III.5 on obtient :

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n y_{1i} \cdot F_{1i}}{\sum_{i=1}^n K \cdot F_{1i}^2} \quad \text{III.6}$$

L'application de l'équation III. 6 sur les données du tableau III.3 donne: $K=0.00159$

Finalement, l'effort de contact réel (charge réelle) entre les disques d'acier en contact, est donné par:

$$F_1 = Y_1 \cdot (1/K) \quad \text{d'où} \quad F_1 = 628,931 \cdot Y_1$$

III.4.1.2 Résultats d'étalonnage pour la 2^{ème} série d'expériences:

Les valeurs de mesure de la déformée Y_1 due à l'application de différentes charges sont regroupées dans le tableau III.4.

Charge Q(Kg)	Charge * F_1 (N)	Y_1 (mm)								
		Bande 1	Bande 2	Bande 3	Bande 4	Bande 5	Bande 6	Bande 7	Bande 8	Bande 9
1	9,81	0,005	0,008	0,01	0,015	0,025	0,02	0,015	0,01	0,01
2	19,62	0,02	0,042	0,045	0,05	0,055	0,05	0,04	0,03	0,015
3	39,24	0,06	0,07	0,1	0,09	0,09	0,08	0,08	0,07	0,065
5	49,05	0,07	0,1	0,13	0,14	0,12	0,12	0,12	0,1	0,07
8	78,48	0,12	0,14	0,16	0,17	0,18	0,17	0,15	0,13	0,13
12	117,72	0,15	0,21	0,27	0,28	0,29	0,27	0,25	0,2	0,15

* $F_1=Q.g$ ($g=9.81 \text{ m/s}^2$).

Tableau III.4 valeurs de mesure de la déformée (flèche).

D'autre part, la figure III.8-a et b, montre également que la courbe d'étalonnage $Y_1 = f(F_1)$ de chaque bande apparait comme une droite qui passe par l'origine (0,0).

Exemple numérique:

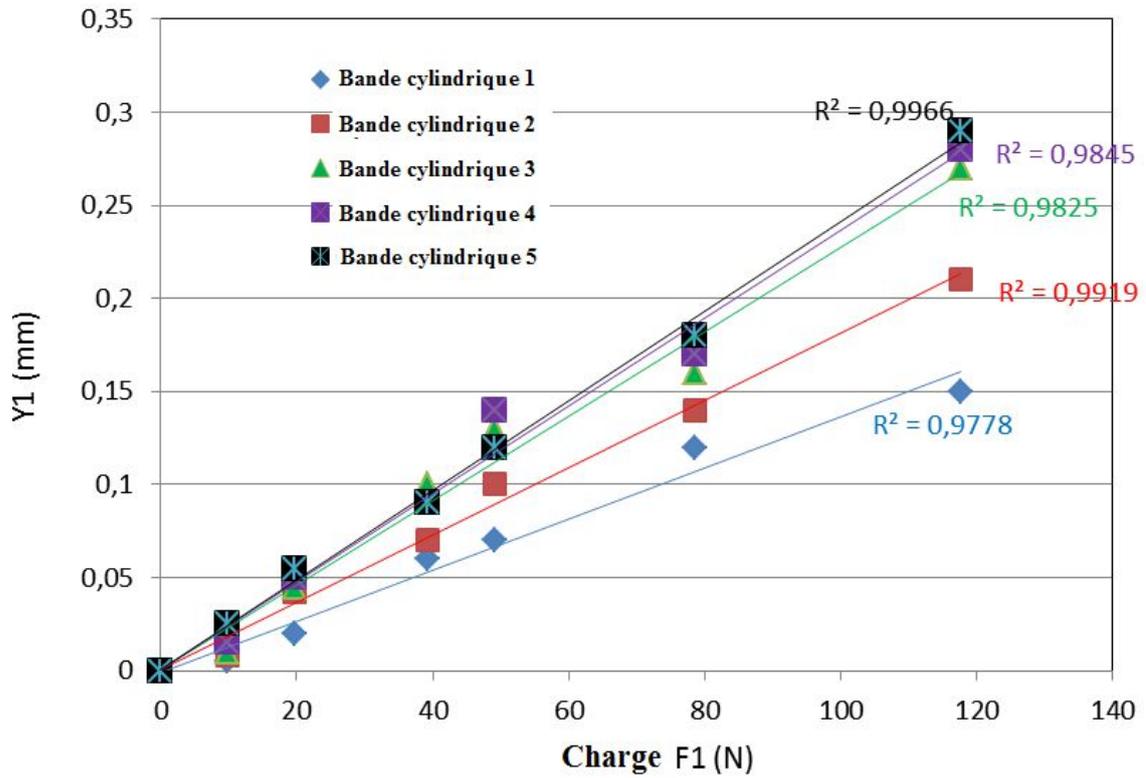
Par application de l'équation III.6, sur les données de la bande 5 (Tableau III.4), on obtient :

$$K=0,00241398$$

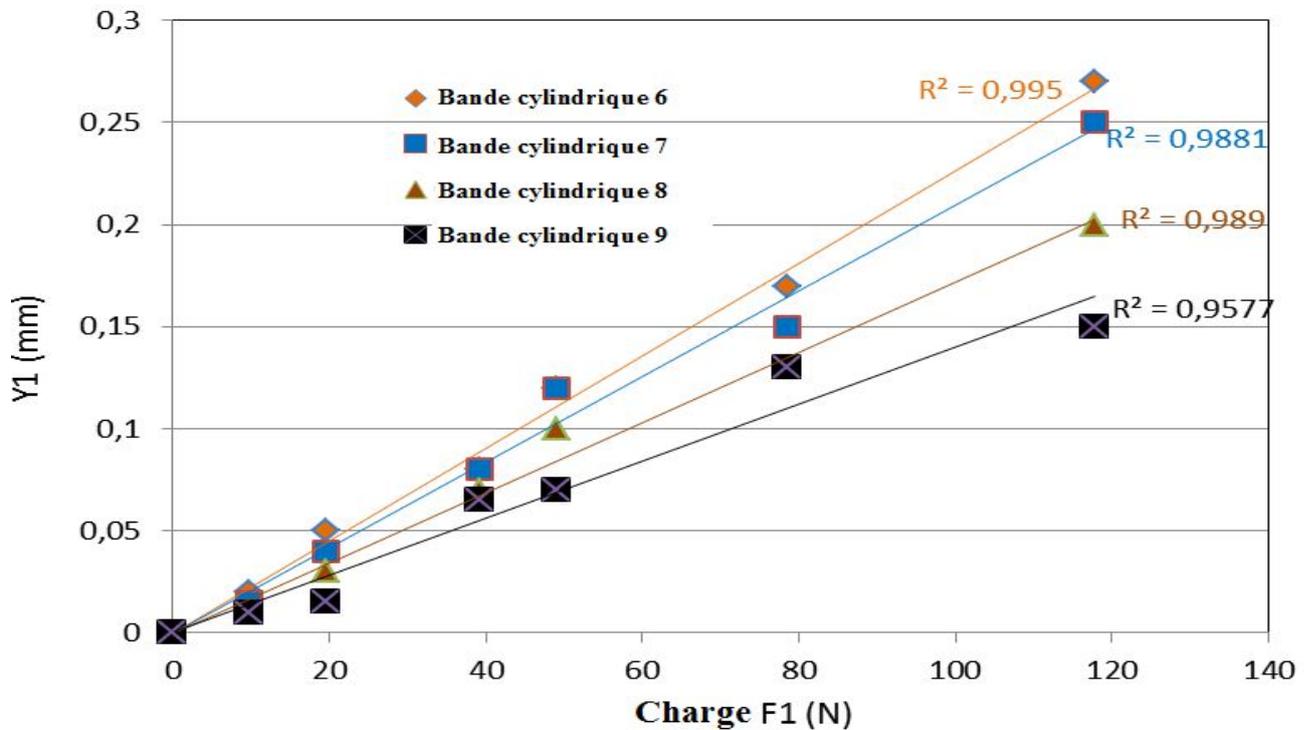
Finalement, l'effort de contact réel (charge réelle) entre les disques d'acier en contact, est donnée par:

$$F_1=Y_1 \cdot (1/K) \quad \text{d'où} \quad F_1=414,254364 \cdot Y_1$$

Les valeurs de la constante d'étalonnage pour les neuf (09) bandes utilisées sont données par le tableau III.5.



a- Graphe d'étalonnage (bandes 1 à 5)



b- Graphe d'étalonnage (bandes de 6 à 9)

Fig. III.8 (a.b) Graphe d'étalonnage de l'éprouvette C45 (2^{ème} série d'expériences).

Numéro de la bande	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Constante d'étalonnage, 1/K	733,944035	552,24734	439,460317	422,687023	414,254364	441,797872	477,802493	580,825175	713,965616

Tableau III.5 Valeurs de la constante d'étalonnage (1^{ère} série d'expériences)

III.4.2 Déroulement des essais:

Avant chaque essai, le bac placé au-dessous du dispositif expérimental est nettoyé. Ce dernier permet de récupérer l'huile après son passage dans le contact. D'autre part, les surfaces en contact sont alimentées par une huile polluée comme le montre la Figure III.9.

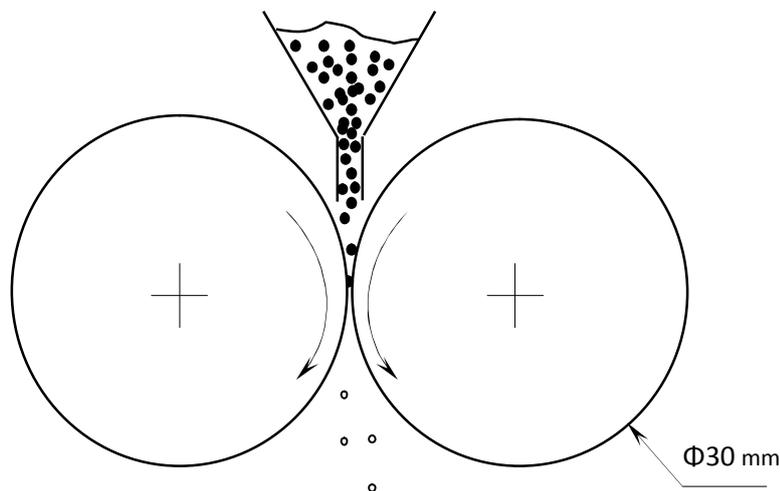


Fig.III.9 Jet d'huile polluée (modèle du contact utilisé).

III.4.3 Mesures expérimentales

III.4.3.1 Mesure des températures

A l'aide d'un thermocouple infrarouge (figure III.10), on mesure les températures au point de contact des surfaces (figure III.11), en fonction du temps. Les mesures ont été effectuées pour les cas suivants :

- Lubrification avec une huile non polluée ;
- Lubrification avec une huile polluée (on utilise comme polluant du sable filtrée à 63 μm) ;

- Lubrification avec une huile polluée (on utilise comme polluant du sable filtrée à 125 μm).

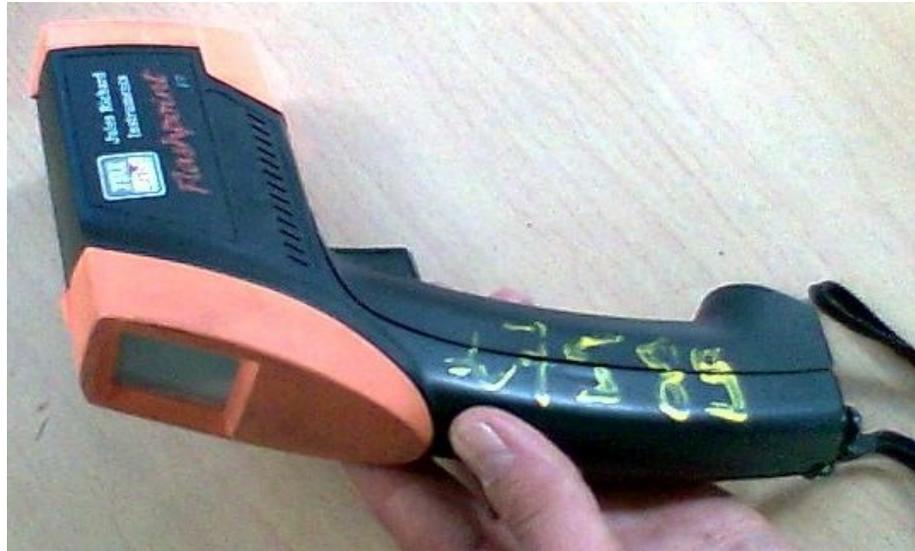


Fig. III.10 Thermocouple infrarouge à visée croisée FT2500

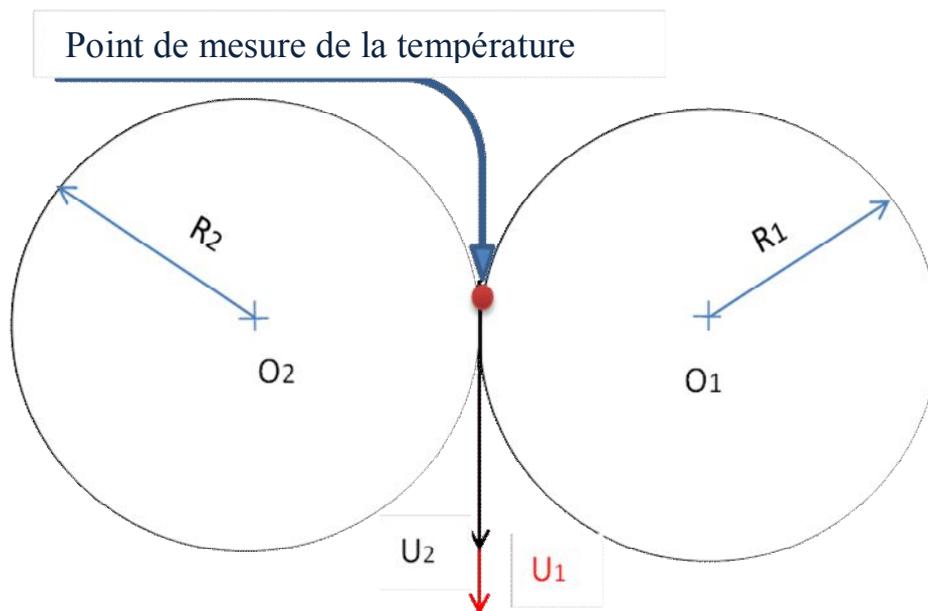


Fig. III.11 point de mesure de la température.

Le FT2500 est un thermomètre infrarouge à visée croisée, permettant de mesurer une surface de diamètre réduit ($\text{\O} 13 \text{ mm}$). Il dispose d'une diode lumineuse qui éclaire la zone mesurée, très utile dans les endroits sombres. Il possède les spécifications techniques suivantes:

- Etendue de mesure : $-32^{\circ}\text{C} +535^{\circ}\text{C}$.
- Réponse spectrale : 8-14 μm .
- Alimentation : pile 9 V.
- Visée laser : double laser croisé
- Affichage : T max, en $^{\circ}\text{C}$.
- Emissivité : fixe à 0.95.

III.4.3.2 Mesure de la perte de côte

Avant chaque essai, on doit d'abord mesurer le diamètre de la bande étudiée de l'éprouvette à l'aide d'un pied à coulisse de précision à lecture digitale (figure III.12). Ce type de pied à coulisse permet une lecture plus simple de la mesure grâce à un affichage direct de la dimension mesurée. Sa manipulation s'effectue avec une seule main grâce à deux boutons de commande.

Avant le lancement de l'essai, on procède à l'étalonnage pour déterminer l'effort de contact entre roulement et éprouvette. Ensuite, la machine est mise en marche de telle sorte à assurer un bon fonctionnement. Il faut s'assurer que le débit d'huile, soit constant et régulier tout au long des essais menés. Après une certaine période de fonctionnement, on arrête l'essai pour mesurer la perte de côte (diminution du diamètre).

Les mesures ont été effectuées pour les cas suivants :

- Lubrification avec une huile non polluée ;
- Lubrification avec une huile polluée (on utilise comme polluant du sable filtrée à 63 μm).
- Lubrification avec une huile polluée (on utilise comme polluant du sable filtrée à 125 μm).

Pour chaque essai, les mesures ont été reproduites en trois endroits différents sur le diamètre de l'éprouvette. La valeur moyenne a été considérée.

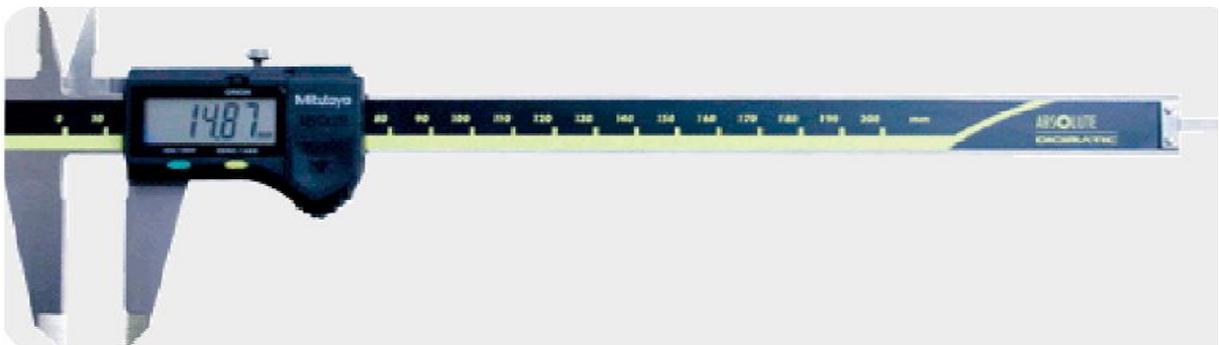


Fig.III.12 Pied à coulisse MITUTOYO 500-181 U.

III.4.3.3 Mesure de la rugosité :

La mesure des états de surface peut être réalisée à l'aide de plusieurs méthodes :

- Par comparaison (échantillons Viso-tactile) ;
- Par mesure (appareils électroniques à capteurs ou appareils optiques).

Dans cette étude, on utilise un rugosimètre à palpeur mécanique tel que présenté dans la (figure III.13).



Fig.III.13 Rugosimètre à stylet de type "MITUTOYO SURFTEST -301".

Le SURFTEST -301 est un appareil portable avec écran graphique LCD tactile et une imprimante intégrée. Il est utilisé pour la mesure des états de surface, les paramètres de rugosité R_a et R_t dans notre cas.

III.5 RESULTATS ET INTERPRETATIONS :

III.5.1 Evolution de la température du contact :

Dans cette partie, on s'intéresse à l'évolution de la température au point de contact entre surfaces frottantes. Les températures pour une vitesse de rotation 250 tr/min et une charge

180 N, sont relevées à l'aide du thermocouple infrarouge. Les résultats sont présentés dans la Figure III.14.

La température est mesurée pour deux types de contact : lubrifié par une huile propre et lubrifié par une huile polluée.

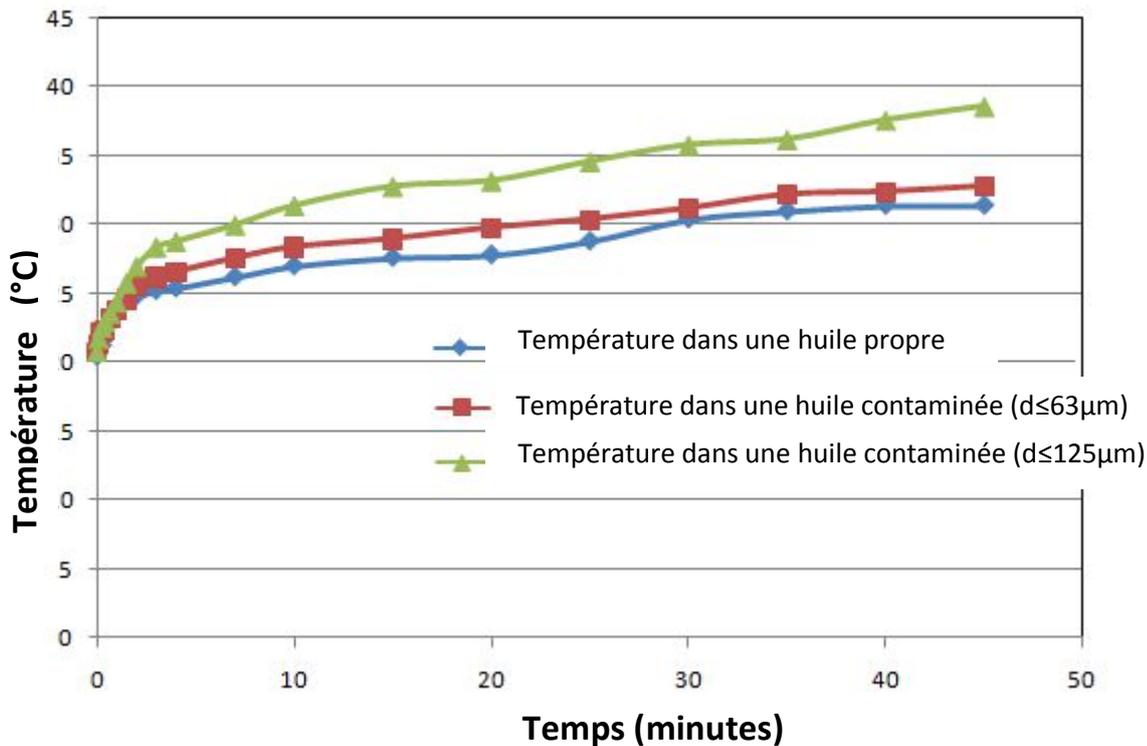


Fig. III.14 Evolution de la température au point de contact en fonction du temps pour une vitesse 250 tr/min et une charge 180 N.

Nous constatons d'après la Figure III.14 exprimant l'évolution de la température au cours du temps, que cette dernière augmente très rapidement de la température ambiante jusqu'à une certaine valeur, puis se stabilise autour d'elle. Cet échauffement important provient des déformations élastiques et plastiques accompagnée de contraintes de frottement dans les massifs.

L'énergie mécanique perdue par frottement, transformée en chaleur, est généralement irrécupérable et parfois très difficile à évacuer. Les aspects thermiques du frottement peuvent avoir des conséquences inattendues. D'après les résultats obtenus, on voit clairement que la température est élevée pour un contact avec présence de particules inférieure à $125 \mu\text{m}$ comparée aux contacts lubrifiés par une huile polluée avec des

particules inférieures à $63\mu\text{m}$ et une huile propre. Malheureusement, malgré le rôle important que joue le lubrifiant dans l'évacuation des calories, on constate que la présence des particules solides dans l'huile lubrifiante, perturbe le bon fonctionnement du contact, favorise le frottement et par conséquent la température augmentera au fur et à mesure que la taille des particules augmente.

III.5.2 Evolution de l'usure :

L'usure est évaluée par la mesure de la perte de cote (diminution du diamètre). En effet, on a effectué trois mesures sur le diamètre. C'est la valeur moyenne qui a été considérée.

On constate d'après les résultats présentés dans la Figure III.15, que l'usure d'un contact roulant (usure de l'éprouvette cylindrique) est d'une part une fonction croissante du temps de fonctionnement pour les trois essais menés, et, d'autre part, elle croit avec l'accroissement de la taille des particules. L'usure la plus douce est observée pour un contact lubrifié avec une huile propre. En effet, l'huile de lubrification agit comme un troisième corps séparant les massifs en contact et par conséquent le frottement se verra diminué, ce qui conduit à une usure faible. D'autre part, il est fortement constaté que la présence des particules solides fait perturber la séparation, favorisant ainsi le frottement et par conséquent l'usure augmente considérablement. Cette dernière est fortement accélérée avec la présence des particules de forte granulométrie dans l'huile de lubrification.

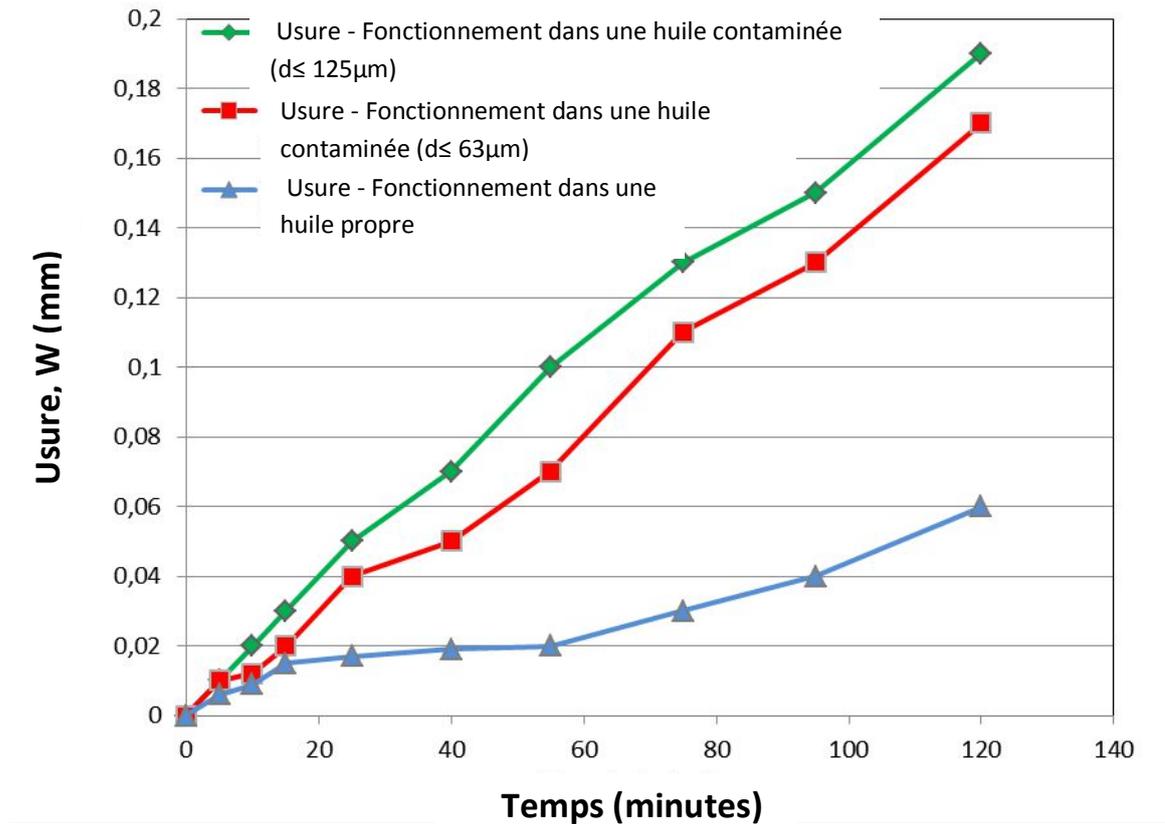


Fig. III.15 Evolution de l'usure en fonction du temps pour une vitesse 250 tr/min et une charge 180 N.

Pour mieux comprendre le phénomène d'usure dû au phénomène de la pollution solide des lubrifiants dans un contact roulant, des photographies et des images micrographiques avant et après fonctionnement, ont été prises à l'aide des microscopes optique et électronique à balayage (MEB). Les Figures III. 16 et III.20-a caractérisent l'aspect du disque d'acier avant fonctionnement, par contre les Figures III.17, 18, 19, 20-b et 20-c visualisent l'aspect du disque pour différentes conditions de fonctionnement. En effet, la Figure III. 17 montre une usure douce pour un fonctionnement avec une huile propre, tandis l'usure est très sévère pour un fonctionnement avec une huile polluée tel que visualisée par la Figure III.18. Dans ce cas, la présence des particules de sable dans le lubrifiant, accélère la dégradation. L'usure observée est donc principalement associée à l'adhésion et l'indentation. Dans un contact roulant, la présence des indents est notable au niveau de la surface. Ces indents constitueront sans doute un site spécifique de fatigue. Les Figures III.19 et III.20-c confirment la présence des indents au niveau des surfaces en contact de roulement pur.

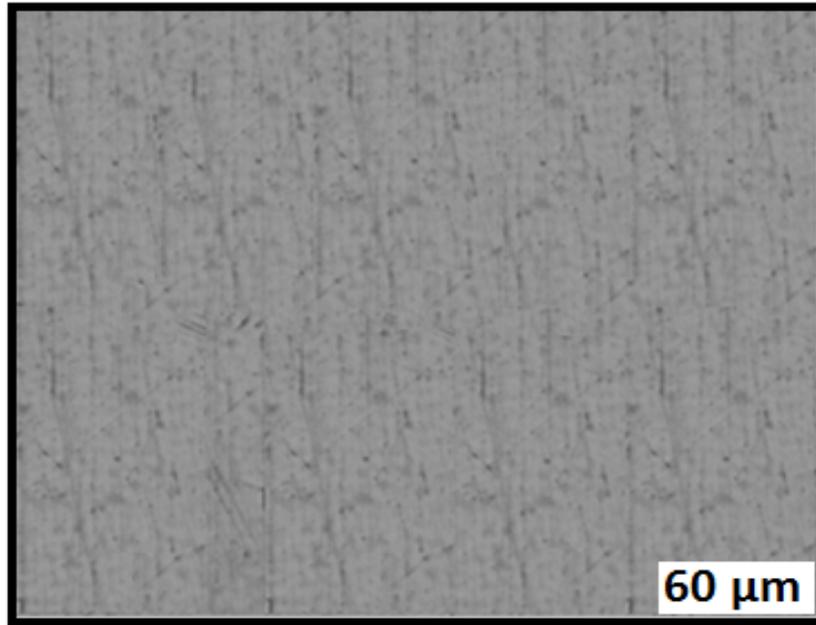


Fig.III.16 Micrographie optique du disque en acier avant fonctionnement.

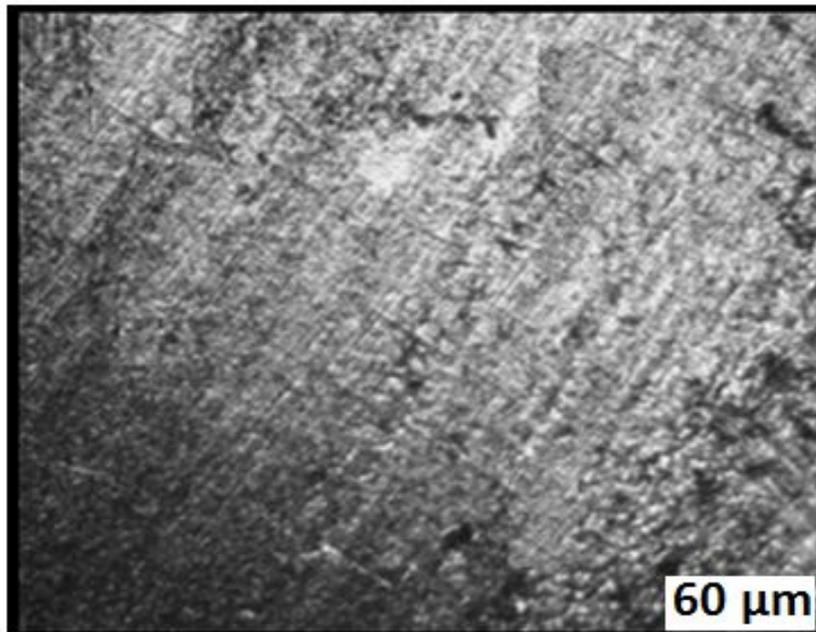


Fig.III.17 Micrographie optique du disque en acier lubrifié avec l'huile contaminée
(particules $\leq 63 \mu\text{m}$, $C=5 \text{ g/l}$, $F_l=180 \text{ N}$ et $V=250 \text{ rpm}$)

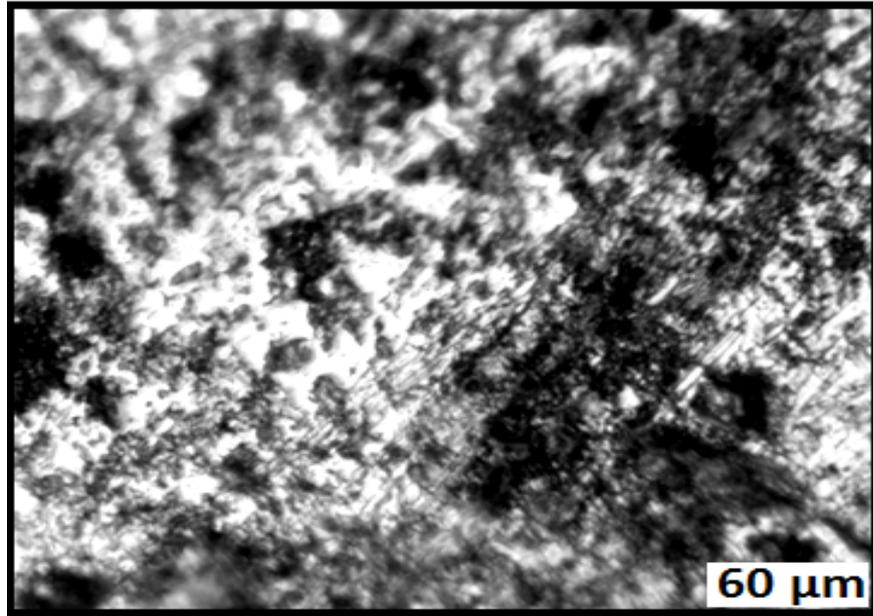


Fig.III.18 Micrographie optique du disque en acier lubrifié avec l'huile contaminée (particules $\leq 125 \mu\text{m}$, $C=5 \text{ g/l}$, $F_l=180 \text{ N}$ et $V=250 \text{ rpm}$)

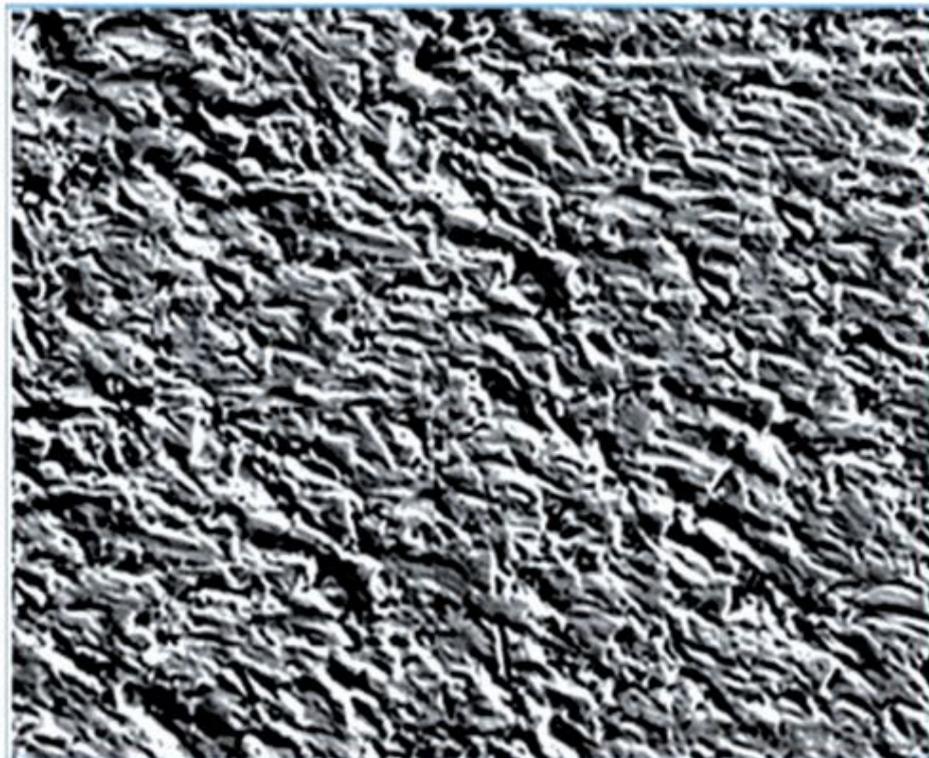


Fig. III.19 Aspect après fonctionnement-images MEB du disque d'acier ($d \leq 63 \mu\text{m}$, $C=5 \text{ g/l}$, $F \cong 100 \text{ N}$ et $V=250 \text{ tr/min}$).

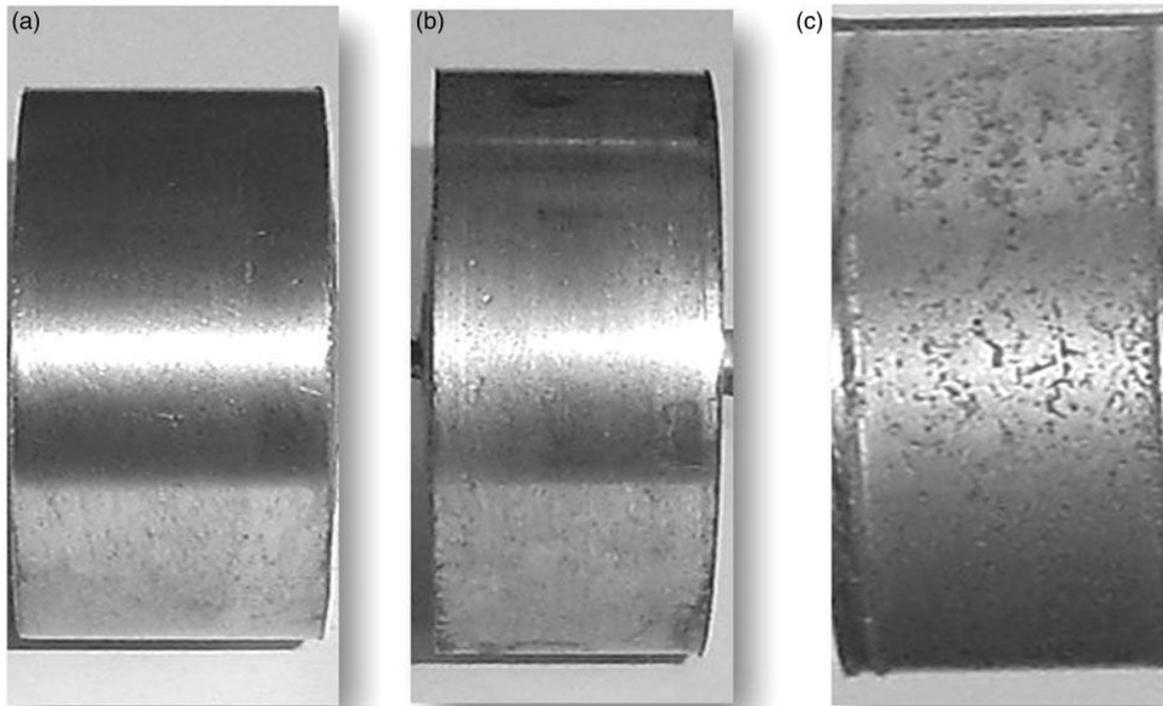


Fig. III.20 Aspect de la surface du disque d'acier: (a) avant fonctionnement ; (b) après fonctionnement dans une huile propre ; (c) après fonctionnement dans une huile contaminée ($d \leq 63 \mu\text{m}$, $C=5 \text{ g/l}$)

III.5.3 Evolution de la rugosité de surface:

Pour mieux visualiser la rugosité de surface sous l'effet de la contamination solide, nous avons réalisées deux types d'expériences. La première concerne un fonctionnement avec une huile propre. La seconde est destinée au fonctionnement avec une huile contaminée. Dans ces expériences, nous nous sommes intéressés à l'évolution des rugosités R_a et R_t . Comme mentionné au paragraphe précédent, la présence des particules solides dans un contact E.H.D, fait croître le frottement et l'usure. Cet accroissement conduit notablement à un mauvais état de surface. En effet, d'après la Fig. 21 (a), il est clairement constaté que les rugosités de surface (R_a et R_t) augmentent considérablement avec la présence des particules polluantes. Afin de différencier entre les cas étudiés, les expériences sont réalisées pour une durée de deux heures et les résultats obtenus sont ensuite comparés aux valeurs des rugosités avant fonctionnement. D'autre part, la Figure 21 (b) montre que la limite des paramètres R_a et R_t est approximativement 8 à 10 fois supérieure à celle observée pour un

fonctionnement avec une huile propre. Les valeurs d'erreurs représentées dans la Figure III.21 (b), sont calculées de la manière suivante :

$$\text{Erreur} = | R_{a,t} \text{ après fonctionnement} - R_{a,t} \text{ avant fonctionnement} |$$

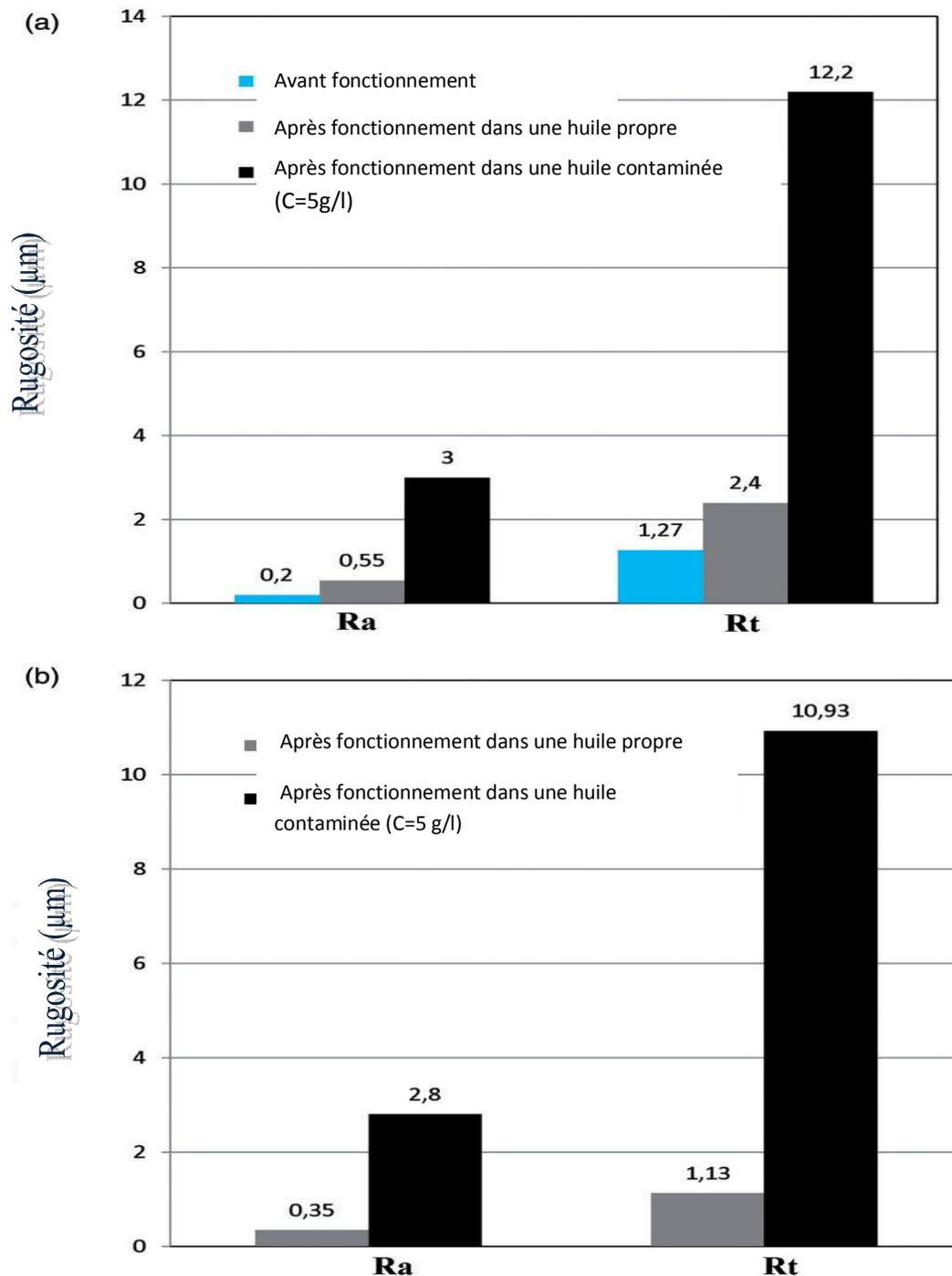


Fig. III. 21 Composantes de la rugosité (Ra et Rt) avant et après fonctionnement ($F \cong 100$ et $V = 250$ tr/min) : (a) évolution de la rugosité ; (b) barre d'erreur.

III.6 CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons présenté les outils et techniques expérimentales nécessaires à la réalisation des expériences planifiées. Dans cette partie, une attention particulière a été dédiée à l'évolution de la température, de l'usure et des rugosités de surface sous l'effet de la pollution solide des lubrifiants. Les résultats visualisés montrent clairement l'impact de la pollution solide sur la dégradation des contacts E.H.D en roulement pur (glissement négligeable).

IV.1 INTRODUCTION:

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié l'influence de la pollution solide des lubrifiants sur la dégradation des contacts mécaniques. En effet, une attention particulière a été dédiée aux effets du polluant sable sur l'évolution de la température, de l'usure et de la rugosité de surface d'un contact EHD roulant. D'autre part, comme il a été également mentionné au chapitre précédent, deux types d'expériences sont planifiés en utilisant les plans orthogonaux L_9 de Taguchi.

Dans la première série des expériences, nous nous sommes donc intéressés aux effets de la concentration des particules (C), de la charge (Q) et de la vitesse de rotation (V) sur l'évolution de l'usure (W) et de la rugosité de surface (Ra). A partir des résultats des expériences planifiées, une analyse de variance (ANOVA) est réalisée et des modèles mathématiques de type "linéaire-interaction" sont déduits.

La seconde série des expériences est principalement consacrée aux effets de quatre paramètres source, à savoir : la concentration (C), la charge (Q), la vitesse de rotation (V) et la dureté (H), sur l'évolution de l'usure et des rugosités de surface (Ra et Rt). Pour les expériences menées dans cette série, une analyse de variance (ANOVA) est également réalisée, ainsi que la déduction des modèles de type linéaire des réponses étudiées.

IV.2 DEROULEMENT DES EXPERIENCE:

La question qui se pose, pourquoi choisir des tables de Taguchi L_9 ?

Tous les chercheurs connaissent très bien que les expériences coûtent très chères et épuisent beaucoup d'effort et de temps. Taguchi a proposé des tables qui permettent aux chercheurs d'économiser le temps et l'argent.

Ces tables sont très utilisées dans l'industrie vu leur simplicité et leur efficacité. En effet, le choix des tables dépend du choix de l'expérimentateur, c'est-à-dire le choix des paramètres d'entrée ou facteurs, ainsi que le choix de leurs niveaux de variation.

Les facteurs étudiés dans nos essais sont illustrés aux tableaux IV.1 et IV.2.

Niveau	Concentration (g/l)	Charge Q(Kg)	Vitesse (tr/min)
1	5	10	200
2	7,5	13	400
3	10	16	640

Tab.IV.1 Niveaux des facteurs de la série d'expériences I

Niveau	Dureté (HRC)	Concentration (g/l)	Charge Q(Kg)	Vitesse (tr/min)
1	46	5	10	200
2	55	7,5	13	400
3	59	10	16	640

Tab.IV.2 Niveaux des facteurs de la série d'expériences II

Après avoir choisi les facteurs et leurs niveaux de variation, nous allons expliquer le déroulement des expériences I et II. En effet, pour les deux plans adoptés, on va utiliser les mêmes moyens expérimentaux comme cités au chapitre III. Chaque éprouvette va donc être soumise à un nombre d'essais bien précis.

IV.2.1 Plan des expériences I:

Le plan Taguchi L_9 adopté pour la 1^{ère} série des expériences (3facteurs X_i , 3niveaux), est visualisé par le tableau IV.3.

Essais	Facteurs codés			Valeurs actuelles		
	X1	X2	X3	C (g/l)	Q (Kg)	V (tr/min)
1	1	1	1	5	10	500
2	1	2	2	5	13	710
3	1	3	3	5	16	1000
4	2	1	2	7,5	10	710
5	2	2	3	7,5	13	1000
6	2	3	1	7,5	16	500
7	3	1	3	10	10	1000
8	3	2	1	10	13	500
9	3	3	2	10	16	710

Tab.IV.3 Plan des expériences I

Avec:

C : concentration des particules (g/l) ;

Q : charge (Kg) ;

V : vitesse de rotation (tr/min).

Dans cette série:

- L'éprouvette en acier C45 de dureté 34 HRC est mise en contact avec des disques en acier C45 (pour ce type de contact, se référer au chapitre III).
- Les solutions polluées sont préparées avec de l'huile SAE 90 et des particules de sable filtré à une taille $\leq 63 \mu\text{m}$. En effet, trois solutions de concentrations différentes sont adoptées : (5 ; 7,5 et 10) g/l.
- Les charges utilisées sont mentionnées au tableau IV.1.
- Les vitesses sont sélectionnées sur le banc d'essai. Elles sont données par le tableau IV.1.

IV.2.2 Plan des expériences II :

Pour ces expériences, une table Taguchi de type L_9 est utilisée (4 facteurs X_i , 3niveaux). Le plan adopté est décrit par le tableau IV.4.

Pour le bon déroulement des essais, le matériel utilisé est:

- Trois éprouvettes en acier C45 de duretés (46 ; 55 et 59) HRC en contact avec des disques en acier C45 (se référer au chapitre III).
- Les solutions polluées sont préparées à partir d'un mélange de l'huile SAE 90 et des particules de sable filtré à une taille $\leq 63 \mu\text{m}$. Les concentrations utilisées sont (5 ; 7,5 et 10) g/l.
- Les charges et vitesses utilisées sont décrites au tableau IV.2.

Essais	Facteurs codés				Valeurs actuelles			
	X1	X2	X3	X4	H (HRC)	C (g/l)	Q (Kg)	V (tr/min)
1	1	1	1	1	46	5	10	200
2	1	2	2	2	46	7,5	13	400
3	1	3	3	3	46	10	16	640
4	2	1	2	3	55	5	10	640
5	2	2	1	1	55	7,5	13	200
6	2	3	3	2	55	10	16	400
7	3	1	3	2	59	5	16	400
8	3	2	1	3	59	7,5	10	640
9	3	3	2	1	59	10	13	200

Tab.IV.4 Plan des expériences II

Avec :

C : concentration des particules (g/l) ;

Q : charge (Kg) ;

V : vitesse de rotation (tr/min) ;

H : dureté (HRC).

IV.2.3 Paramètres de sortie (réponses étudiées):

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'usure (W) et les rugosités de surface (Ra et Rt). En effet, l'usure est mesurée à l'aide d'un pied à coulisse à lecture digitale ; par contre, la rugosité est mesurée en utilisant un rugosimètre à palpeur mécanique de type Mitutoyo SurfTest 301.

IV.3 RESULTATS ET DISCUSSION:

IV.3.1 Résultat des séries d'expériences I et II:

Après réalisation des essais selon les plans orthogonaux L_9 de Taguchi, l'usure (W) et les rugosités (Ra et Rt) sont mesurées. Pour chaque réponse, trois mesures ont été effectuées et

c'est la valeur moyenne qui a été considéré. Les tableaux IV.5 et IV.6 visualisent les résultats de mesure pour chaque plan des expériences adoptées.

N°	Facteurs			Réponses	
	C (g/l)	Q (Kg)	V (tr/min)	W(mm)	Ra (µm)
1	5,0	10	500	0,150	2,20333
2	5,0	13	710	0,160	2,92333
3	5,0	16	1000	0,190	3,03667
4	7,5	10	710	0,180	4,64333
5	7,5	13	1000	0,190	3,94667
6	7,5	16	500	0,180	3,11333
7	10,0	10	1000	0,222	3,10667
8	10,0	13	500	0,190	4,64667
9	10,0	16	710	0,200	4,97000

Tab.IV.5 Résultats de la série d'expériences I

N°	Facteurs				Réponses		
	H(HRC)	C (g/l)	Q (Kg)	V (tr/min)	W (mm)	Ra (µm)	Rt (µm)
1	46	5	10	200	0,092	0,65333	8,5
2	46	7,5	13	400	0,109	0,82333	11,6
3	46	10	16	640	0,11	1,26333	12
4	55	5	13	640	0,062	0,52133	6,7333
5	55	7,5	16	200	0,066	0,55667	6,9667
6	55	10	10	400	0,0904	0,72667	7,6333
7	59	5	16	400	0,058	0,39333	3,3333
8	59	7,5	10	640	0,06	0,44667	5,8667
9	59	10	13	200	0,088	0,70667	7,9667

Tab.IV.6 Résultats de la série d'expériences II

IV.3.2 Analyse statistique de Taguchi :

Dans un premier temps, une analyse de variance (ANOVA) de l'usure et des rugosités (R_a et R_t) pour les deux expériences menées a été faite, dont l'objectif est de mieux comprendre l'impact des paramètres de fonctionnement sur la dégradation des contacts EHD.

Dans une seconde étape, des modèles mathématiques de régression, exprimant la relation entre les paramètres d'entrée et les paramètres de sortie, sont établies :

Pour la série des expériences I: $y_p = f(C, Q, V)$ IV.1

Pour la série des expériences II: $y_p = f(H, C, Q, V)$ IV.2

Pour la 1^{ère} série des expériences, le modèle recherché est de type linéaire-interaction. Il se présente de la manière suivante:

$$y_p = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i,j}^k b_{i,j} x_i x_j \quad \text{IV.3}$$

Par contre, un modèle de type linéaire (1^{er} ordre) est adopté pour la 2^{ème} série des expériences. Ce modèle est de la forme:

$$y_p = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i \quad \text{IV.4}$$

Avec :

b_0 : coefficient libre.

b_1, b_2, \dots, b_k : coefficients linéaire.

$b_{12}, b_{13}, \dots, b_{ik}$: coefficients d'interaction.

x_i : représente les paramètres d'entrée (facteurs).

La régression est-elle significative ?

Le but de notre étude est de trouver la contribution des facteurs variables aux réponses étudiées. Pour cela, il faut que le modèle de régression soit significatif. En effet, il faut vérifier l'hypothèse suivante:

$H_0 : b_1 = b_2 = \dots = b_k = 0$, pas de contribution des facteurs à la réponse.

$H_1 : b_i \neq 0$, donc au moins, un facteur contribue à la réponse.

Pour accepter ou rejeter l'hypothèse nulle H_0 il est nécessaire de calculer F :

$$F = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 / k}{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n - k - 1)} \quad \text{IV.5}$$

Sous l'hypothèse H_0 , F est distribuée selon une loi de Fisher avec k et $n-k-1$, donc on va comparer F avec une valeur critique F_α pour α % sur la table de Fisher.

Si $F > F_\alpha$ on rejette H_0 , alors au moins un facteur contribue à la réponse.

Avec : k est le degré de liberté du numérateur et $(n-k-1)$ étant le degré de liberté du dénominateur.

Pour déterminer la valeur de F_α ou F_{DL_n, DL_d} critique, on utilise la table de Fisher-Snedecor. Le choix de F_α dépend des valeurs des degrés de liberté du numérateur et du dénominateur ;

DL_n ou v_1 (numérateur) : degré de liberté de la variance

DL_d ou v_2 (dénominateur):degré de liberté de l'erreur

$DL_d =$ nombre des expériences réalisées - nombre de coefficients du modèle - 1

Le choix de α commence par la valeur la plus petite vers la plus grande. Une valeur de α petite donne une interprétation plus exacte comme le montre la figure IV.1, $(1-\alpha)$ représente le domaine du niveau de confiance.

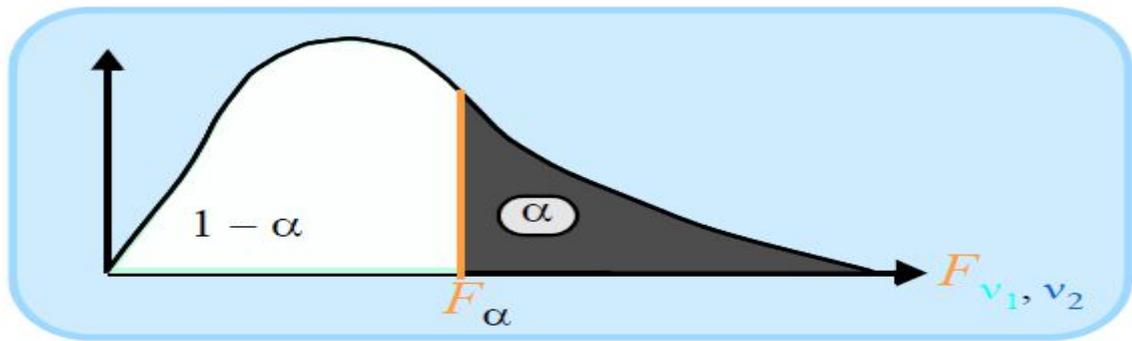


Fig. IV.1 risque de rejet à tort de α

D'autre part, le pourcentage de contribution nous permettra de connaître le degré d'influence des paramètres sur la réponse. Il est donnée par : $P\% = SS_d / SS_T$.

IV.3.3 Traitement des résultats de la série d'expériences I:

IV.3.3.1 Analyse de variance des résultats de la série des expériences I:

Les tableaux IV.7, IV.8 et IV.9 récapitulent les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour l'usure (W) et la rugosité de surface Ra de la série des expériences I.

Source de variation	DL	SS _d	CM	F-test	P (%)
<i>C</i>	1	0,0002816	0,000282	21,1218*	36,2
<i>Q</i>	1	0,0001071	0,000107	8,0319	13,77
<i>V</i>	1	0,0000498	0,0000498	3,7364	6,4
<i>C.Q</i>	1	0,0001867	0,000187	14,0038*	24
<i>C.V</i>	1	0,0000711	0,0000711	5,3315	9,14
<i>Q.V</i>	1	0,0000548	0,0000548	4,1088	7,04
Erreur	2	0,0000267	0,0000133	-	3,43

Tab.IV.7 Résultat de l'analyse de Variance de l'usure W (série d'expériences I)

DL: degré de liberté; SS_d: somme des carrés des écarts; CM: carrés moyens; F-test: test de variance; P: pourcentage de contribution.

* Indique la signification statistique au niveau de confiance (1- α) adopté.

Pour un niveau de signification $\alpha=10\%$ et en utilisant les degrés de libertés $DL_n=1$ et $DL_d=2$ qui représentent le numérateur (pour chaque facteur source) et le dénominateur (erreur) respectivement, la valeur critique tabulée du test F est $F_\alpha(1; 2)=8,53$. En effet, il est bien évident que si la valeur du test F est supérieure à la valeur critique F_α , c'est une indication claire sur la signification statistique du facteur source sur la réponse étudiée.

D'autre part, la contribution, en pourcentage (P%), de chaque facteur source sur la réponse en question, est donnée par la dernière colonne de chaque table ANOVA.

D'après les résultats de l'analyse de variance, comme visualisée dans le tableau IV.7, on constate que la concentration des particules (C) et l'interaction (C.Q) ont un effet très notable sur l'évolution de l'usure. Leurs contributions sont 36,2% et 24% respectivement. La charge appliquée (Q) est le troisième facteur qui affecte l'usure d'un contact roulant avec une contribution de 13,77%, suivi par l'effet de l'interaction (C.V) avec une contribution de l'ordre de 9,17%. Par contre, il est constaté que les effets de la vitesse (V) et de l'interaction (Q.V) sont très faibles. Leurs contributions sont 7,04% et 6,4% respectivement.

Selon les résultats de l'analyse de variance de la rugosité de surface (R_a) tels que représentés par le tableau IV.8, il est bien clair, pour un niveau de signification $\alpha=10\%$ (intervalle de confiance, $1-\alpha=90\%$), que l'interaction (C.Q) est le facteur qui représente le plus grand effet sur la variation totale de la rugosité R_a , ce qui explique 33,94% de contribution. Le second facteur qui affecte R_a est la charge (Q) avec une contribution de 15,31%. Par la suite, vient l'effet de la vitesse (V), la concentration (C) et l'interaction (C.V), avec des contributions de l'ordre de : 11,66 %, 9,89% et 9,16% respectivement. D'autre part, l'interaction (Q.V) présente une contribution très faible sur la variation de la rugosité R_a (P=6,17%).

Source de variance	DL	SS _d	CM	F-test	P (%)
<i>C</i>	1	0,14071	0,140714	1,42909	9,89
<i>Q</i>	1	0,21727	0,217269	2,20663	15,31
<i>V</i>	1	0,16584	0,165842	1,68431	11,66
<i>C.Q</i>	1	0,48254	0,482543	4,90077	33,94
<i>C.V</i>	1	0,13022	0,130223	1,32256	9,16
<i>Q.V</i>	1	0,08799	0,087987	0,8936	6,17
Erreur	2	0,19692	0,098464	-	13,85

Tab.IV.8 Résultat de l'analyse de Variance de la rugosité Ra (série d'expériences I)

Les effets des principaux facteurs source sur les valeurs moyennes de l'usure et de la rugosité sont visualisés dans les Figures IV-2 et IV-3. En effet, il est bien clair que l'usure apparait comme une fonction croissante de la concentration des particules (*C*) et la vitesse de rotation (*V*). D'autre part, il apparait également que la rugosité Ra est une fonction croissante de la concentration (*C*) ; tandis qu'à des vitesses de rotation élevées, la rugosité Ra décroît. On note également que la charge (*Q*) affecte faiblement l'usure et la rugosité Ra.

Afin de mieux visualiser l'effet des paramètres d'entrée (*C*, *Q* et *V*) sur l'évolution de l'usure et la rugosité Ra, des graphiques 3D et de contour sont donnés par les Figures IV.4 à IV.9. Ces courbes permettent d'obtenir les régimes de fonctionnement optimaux. Par exemple, la Fig. IV.4 qui visualise l'effet de la concentration (*C*) et de la charge (*Q*) sur l'évolution de l'usure (*W*) montre que l'usure la plus élevée se produit à des concentrations très élevées.

L'évolution de l'usure en fonction de la concentration (*C*) et la vitesse de rotation (*V*) est visualisée par la figure IV.5. Cette figure montre clairement qu'une usure très sévère peut se produire avec la combinaison de valeurs élevées de la concentration des particules et de la vitesse de rotation.

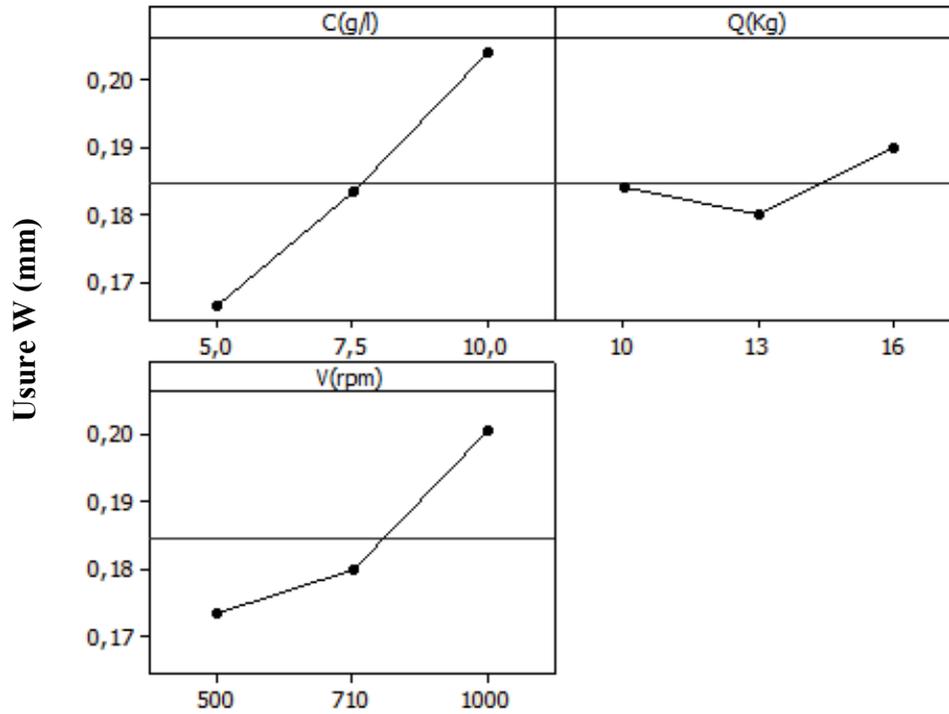


Fig. IV.2 Graphique des effets sur l'usure moyenne W (série d'expériences I)

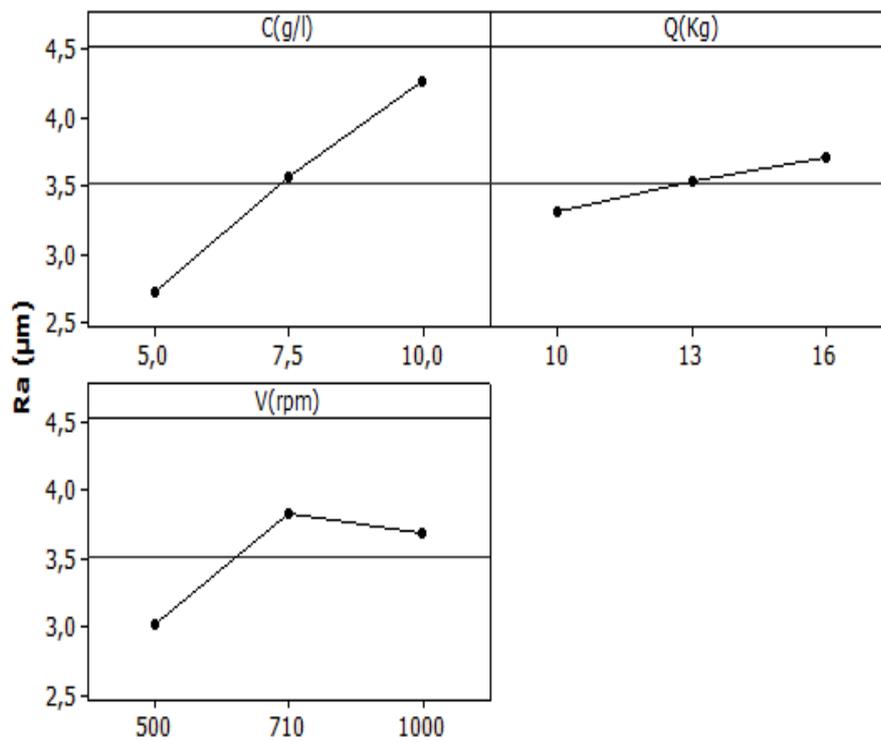


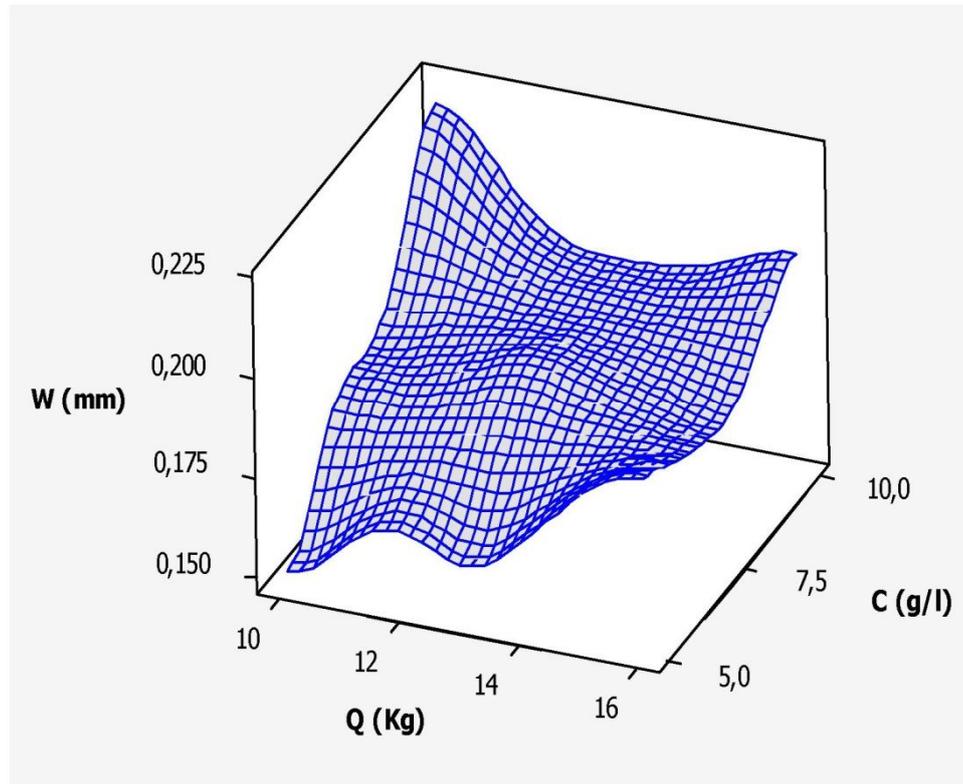
Fig. IV.3 Graphique des effets sur la rugosité moyenne Ra (série d'expériences I)

La Figure IV.6 donne une estimation de l'usure en fonction de la charge appliquée (Q) et la vitesse de rotation (V). Dans ce cas, on constate qu'une faible usure se manifeste avec la combinaison de faibles valeurs de la charge et de la vitesse de rotation.

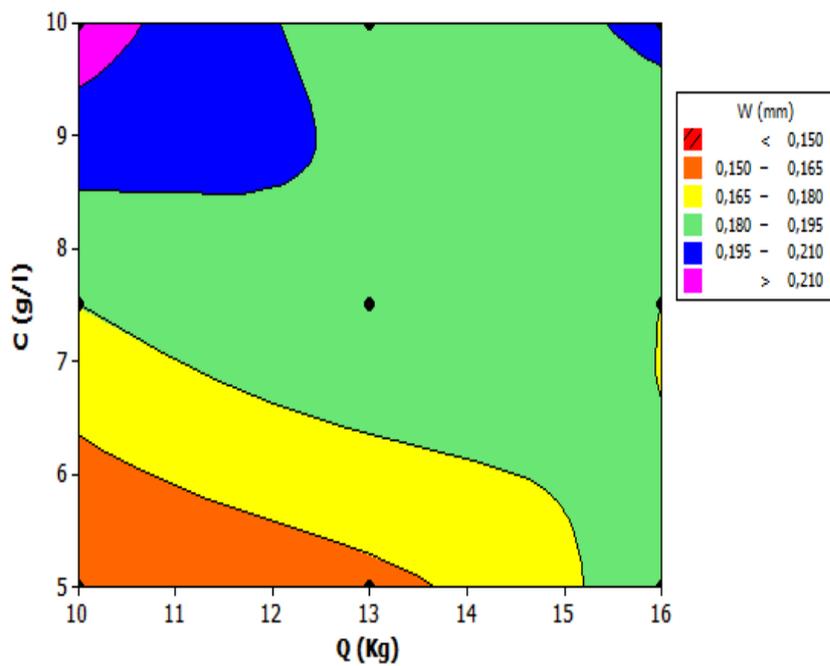
L'effet de la concentration des particules polluantes (C) et la charge (Q) sur l'évolution de la rugosité arithmétique moyenne (Ra) est visualisé par la Figure IV.7. Comme le montre le tableau IV. 8 de l'analyse de variance, le paramètre interaction (C.Q) présente la contribution la plus élevée sur la variabilité totale de la rugosité de surface (Ra), ce qui justifie ainsi le mauvais état de surface qui se produit avec de valeurs élevées de la charge (Q) et de la concentration (C).

La Figure IV.8 montre pour sa part que les valeurs les plus notables de la rugosité (Ra) sont observées pour des valeurs élevées de la concentration (C) ; par contre, de faibles valeurs de la rugosité sont manifestées à des concentrations (C) et des vitesses de rotation (V) très faibles.

Finalement, la Figure IV.9 montre que la combinaison des valeurs les plus faibles de la vitesse de rotation (V) et de la charge appliquée (Q) conduit à une rugosité de surface (Ra) faible.

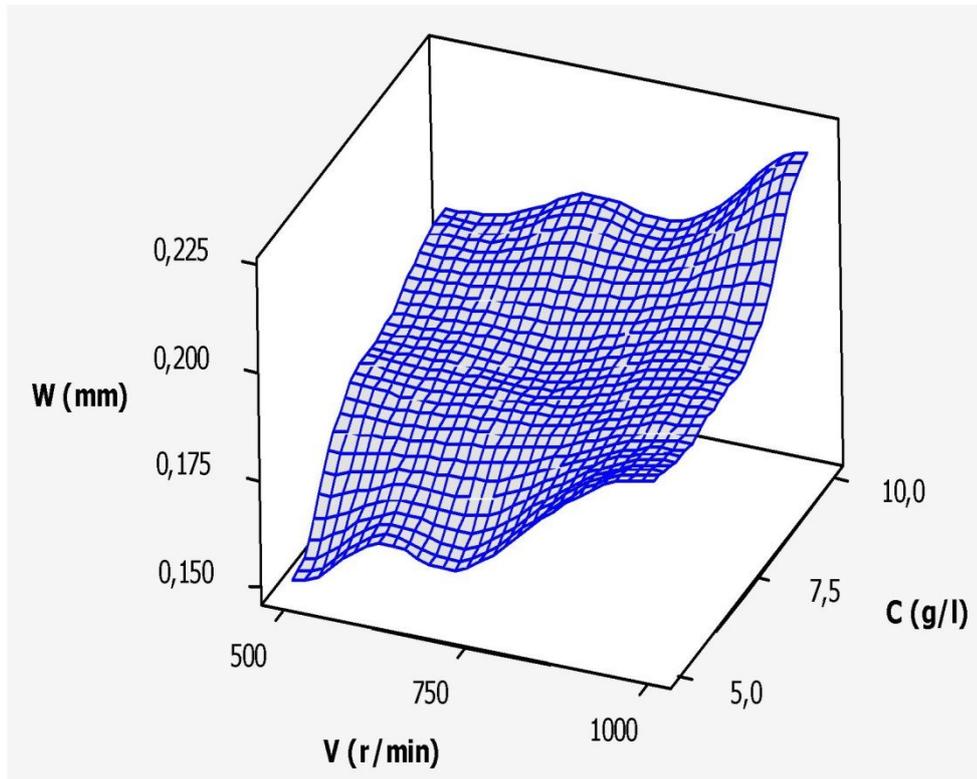


a- Graphique 3D

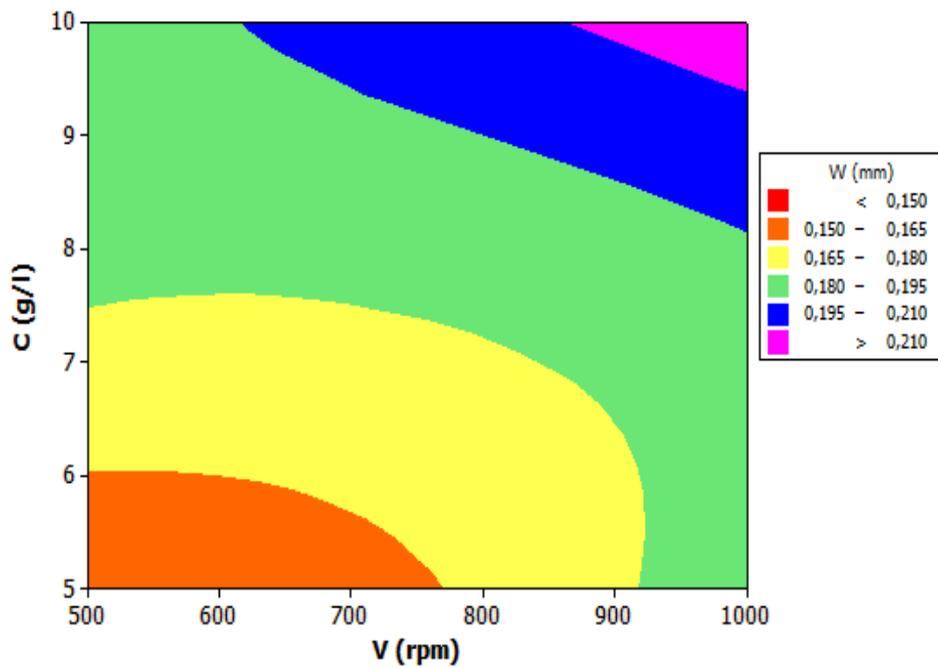


b- Graphique de contour

Fig.IV.4. (a, b) Effet de la concentration des particules et la charge sur l'usure (W) : (V=710 tr/min)

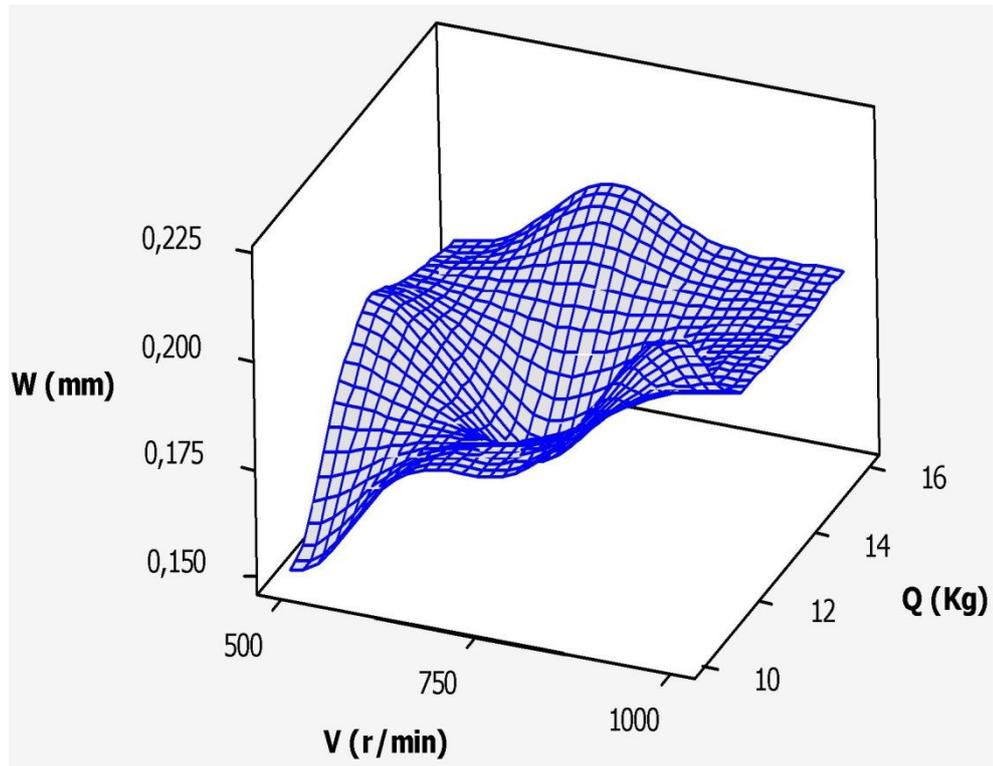


a- Graphique 3D

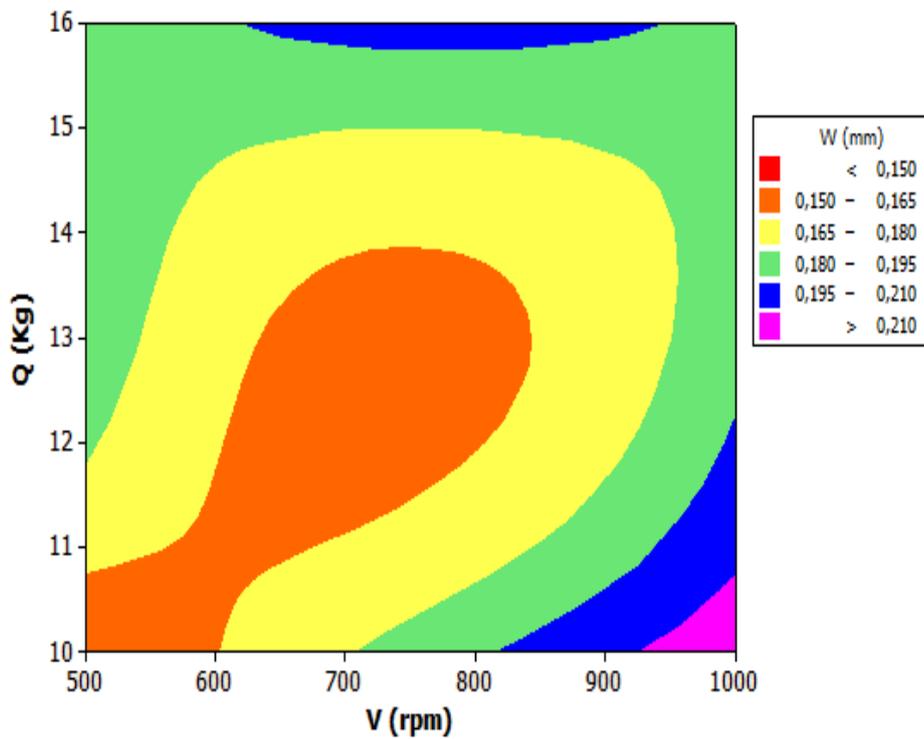


b- Graphique de contour

Fig.IV.5. (a, b) Effet de la concentration des particules et la vitesse de rotation sur l'usure (W) : (Q=13Kg)

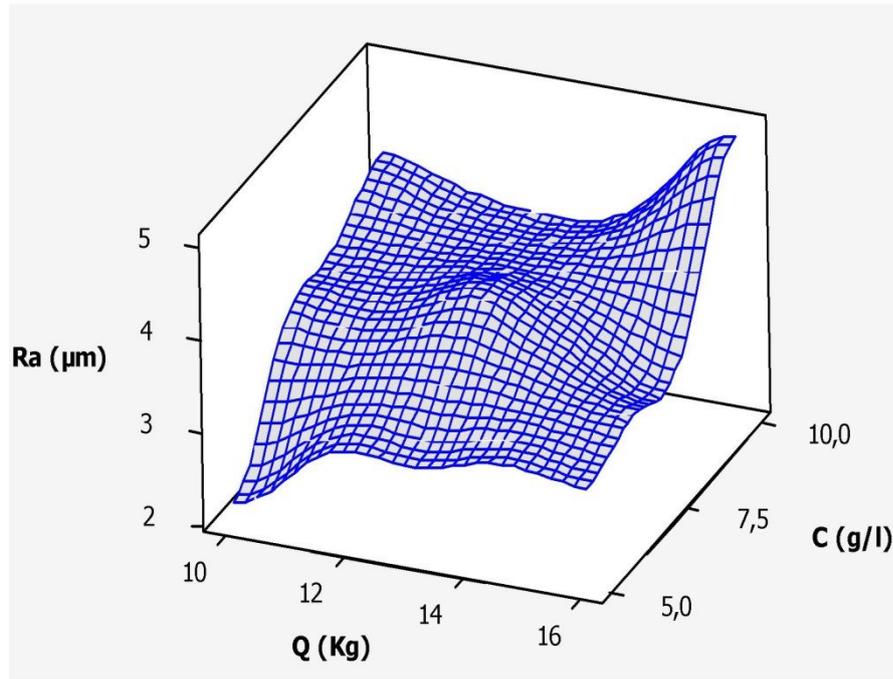


a- Graphique 3D

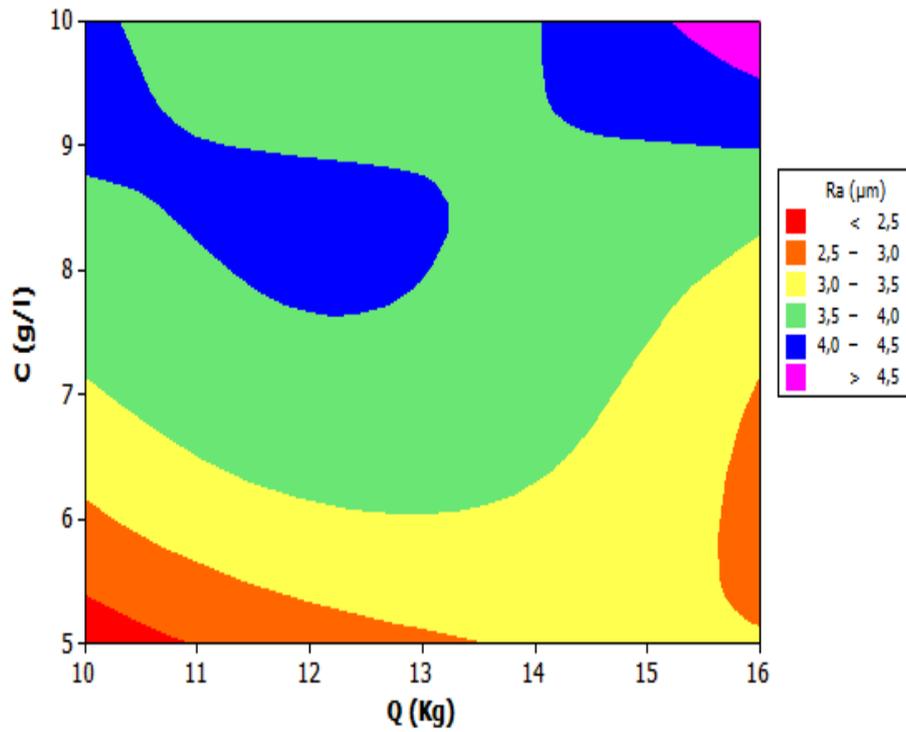


b- Graphique de contour

Fig.IV.6. (a, b) Effet de la charge et la vitesse de rotation sur l'usure (W) :
($C=7,5g/l$)

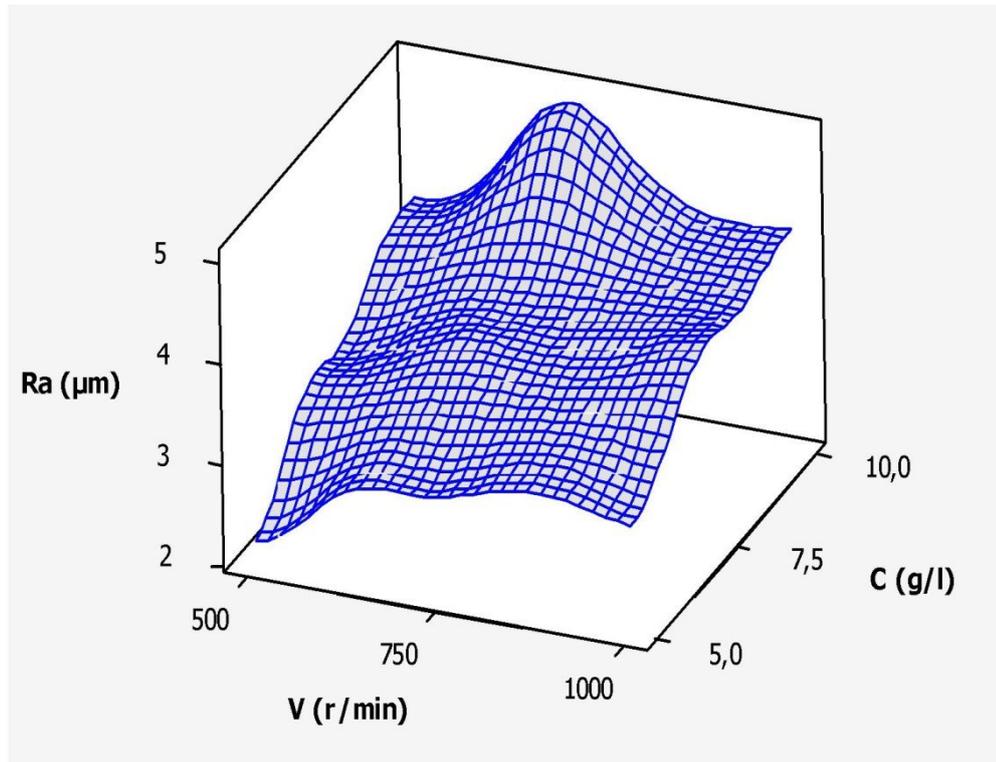


a- Graphique 3D

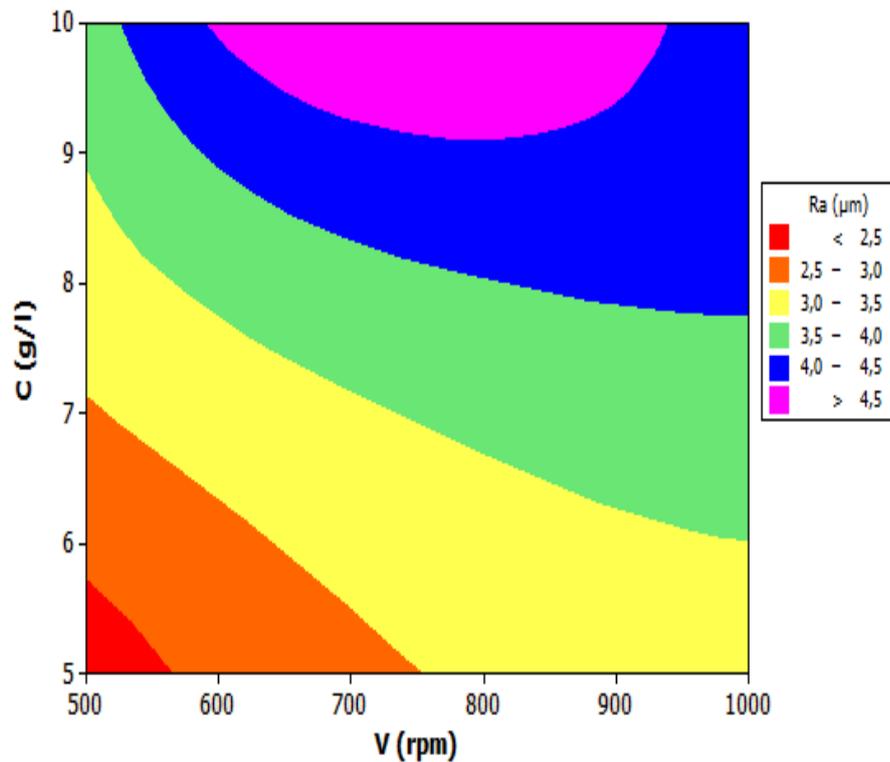


b- Graphique de contour

Fig.IV.7. (a, b) Effet de la concentration des particules et la charge sur la rugosité Ra :
($V=710$ rpm)

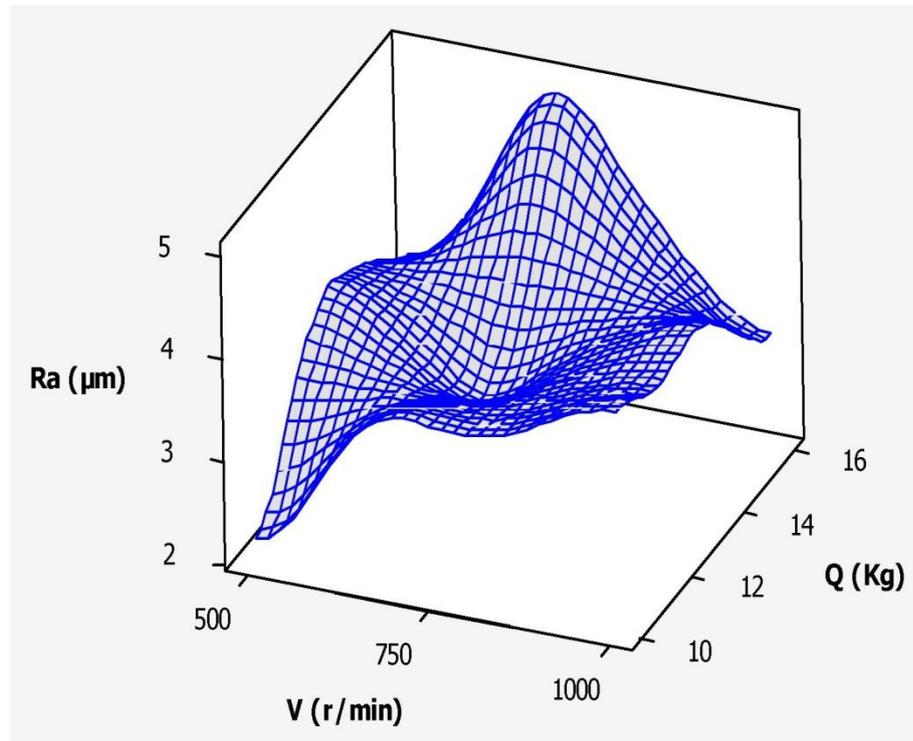


a- Graphique 3D

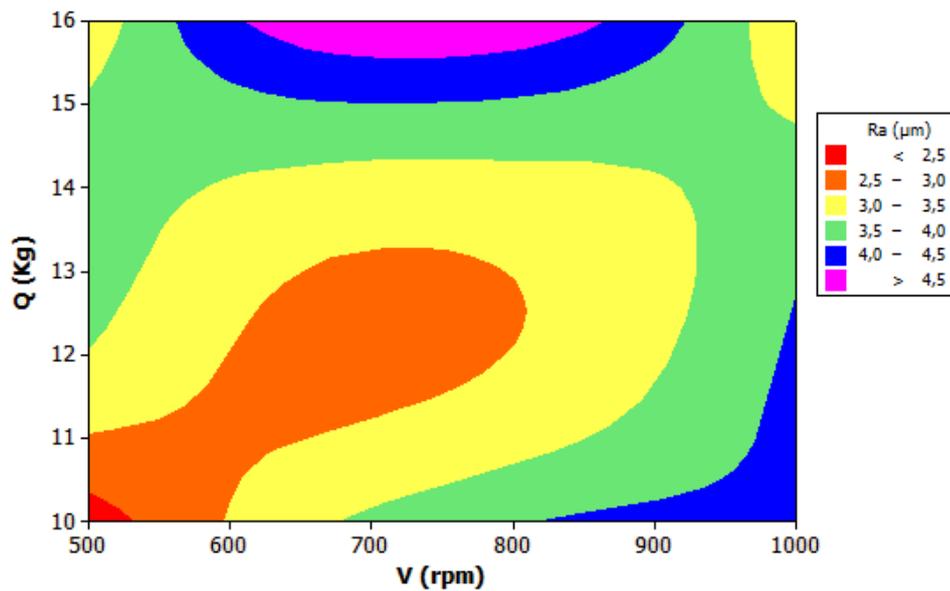


b- Graphique de contour

Fig.IV.8. (a, b) Effet de la concentration des particules et la vitesse de rotation sur la rugosité Ra : ($Q=13\text{Kg}$)



a- Graphique 3D



b- Graphique de contour

Fig.IV.9. (a, b) Effet de la charge et la vitesse de rotation sur la rugosité Ra : ($C=7,5$ g/l)

IV.3.3.2 Modélisation mathématique (série des expériences I):

Dans nos jours, il est bien établi que tous les modèles statistiques développés sont seulement des approximations des phénomènes réels. En effet, plusieurs chercheurs ont concentré leurs efforts à l'identification de modèles qui approximent le mieux les phénomènes physiques réels. Pour atteindre cet objectif, la plupart des scientifiques sont intéressés à la mesure d'un facteur qui caractérise le meilleur ajustement. Ce dernier représente la différence (l'écart) entre un modèle statistique et les données expérimentales.

En partant des données du tableau IV-5, des modèles statistiques caractérisant l'effet de la concentration des particules (C), la vitesse de rotation (V) et la charge appliquée (Q) sur l'évolution de l'usure (W) et la rugosité de surface (Ra) sont établis. Dans cette étude, l'analyse des réponses étudiées à partir de la méthodologie de surface de réponse (MSR) fait intervenir tous les facteurs source avec leurs interactions. En conséquence, les modèles obtenus sont exprimés par les équations suivantes:

$$W \text{ (mm)} = 0.0727052 + 0.0215406 C + 0,00824809 Q - 0.000228279 V - 0.00180699 C.Q + 1,49475.10^{-5}C.V + 1.09351.10^{-5}Q.V \quad \text{IV.6}$$

$$Ra \text{ (}\mu\text{m)} = 1,03421 - 0,481522 C - 0,371534 Q + 0,0131718 V + 0,0918665 C.Q - 0,000639801 C.V - 0,000438258 Q.V \quad \text{IV.7}$$

Afin de bien montrer que les valeurs prédites des réponses étudiées approximent de la plus belle façon les données expérimentales, le coefficient de détermination R^2 est calculé. Ce coefficient est un nombre qui indique comment les données observées s'ajustent aux valeurs prédites par les modèles statistiques. En effet, c'est un paramètre de bon ajustement. Selon le tableau IV.9, on constate que les valeurs de R^2 sont très élevées et tendent vers 1 ($R^2 \cong 1$). Ces valeurs donnent une prédiction efficace et par conséquent on peut admettre que les valeurs prédites et expérimentales sont en excellent accord. Les courbes IV. 10 et IV.11 justifient la bonne concordance entre expérimentation et prédiction.

Modèle	Coefficient de détermination, R^2
Usure, W (mm)	0,992
Rugosité, Ra (μm)	0,962

Tab.IV.9 Coefficient de détermination (série d'expériences I)

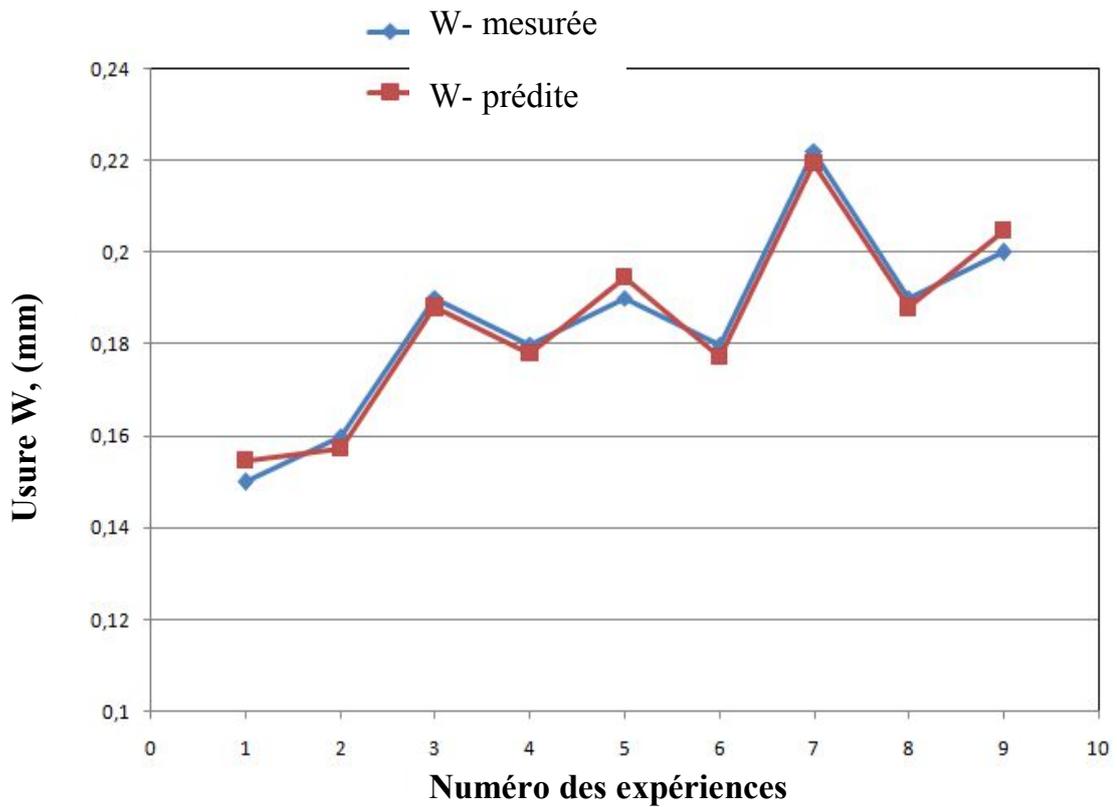


Fig.IV.10 Comparaison entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées de l'usure (W).

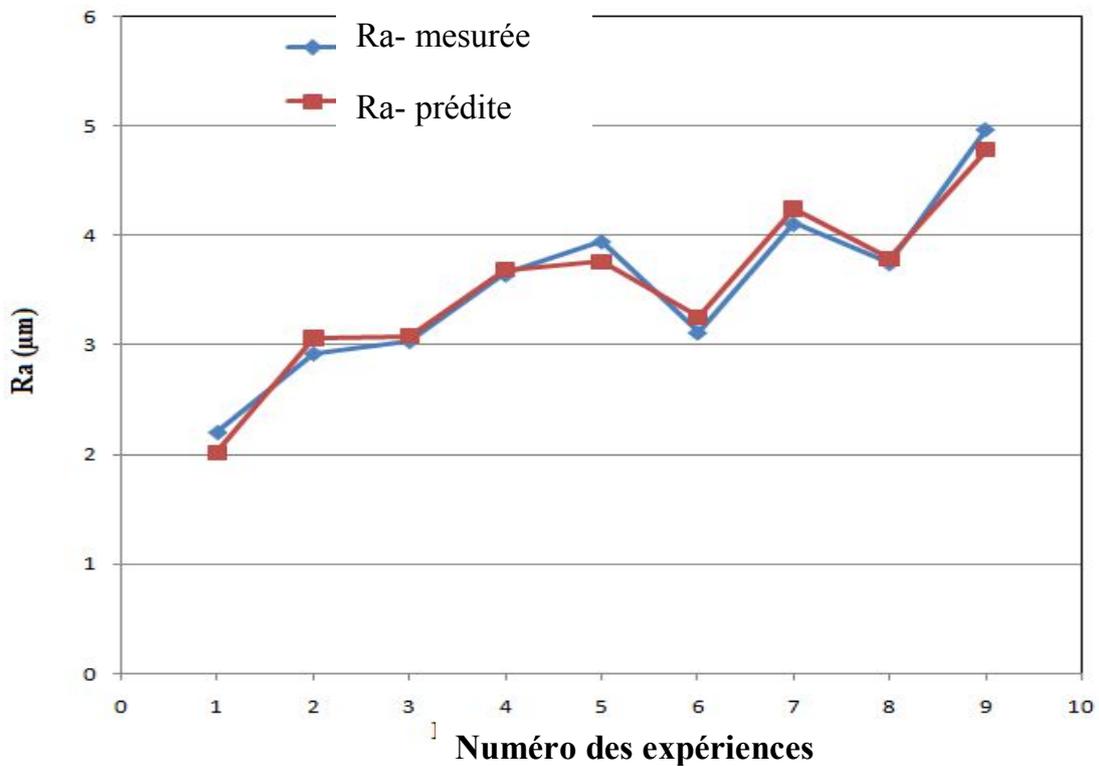


Fig.IV.11 Comparaison entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées de la rugosité Ra.

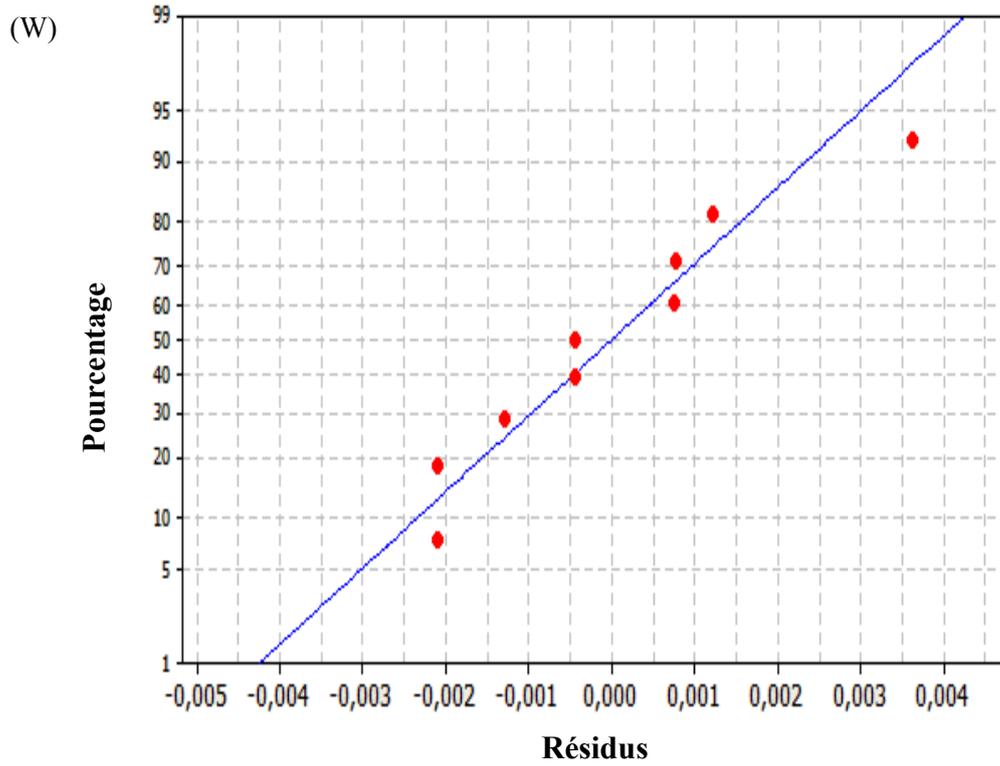


Fig.IV.12 Courbe de la probabilité normale pour l'usure (série d'expériences I)

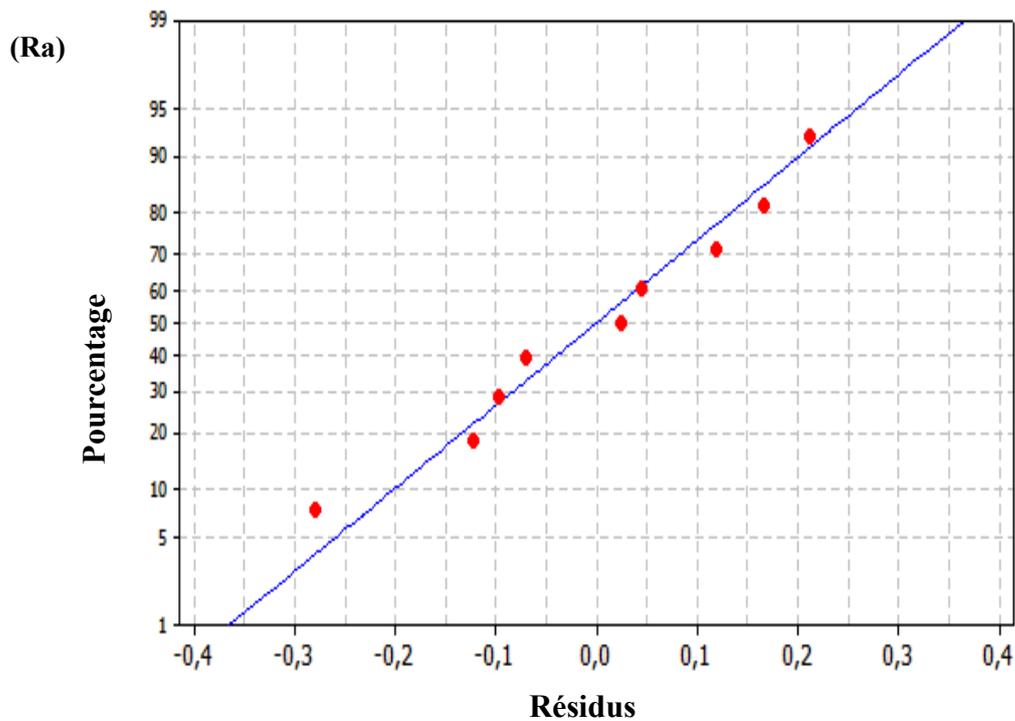


Fig.IV.13 Courbe de la probabilité normale pour la rugosité Ra (série d'expériences I).

D'autre part, d'après Les Figures IV.12 et IV.13 qui montrent les probabilités normales des résidus des modèles RSM (de l'usure (W) et de la rugosité de surface (Ra)), il est clairement visualisé que les résidus s'ajustent presque parfaitement à la ligne droite, ce qui permet de conclure que les erreurs ont une distribution normale et par conséquent les termes des modèles déduits sont significatifs.

IV.3.4 Traitement des résultats de la série des expériences II:

Dans la première série des expériences, l'effet dominant des particules solides sur l'évolution de l'usure (W) et la rugosité de surface (Ra) a été clairement visualisé. Dans la seconde série des expériences, on va essayer d'introduire un quatrième paramètre source, à savoir la dureté H.

IV.3.4.1 Analyse de variance de la série d'expériences II:

Les résultats de l'expérience II vont être traités statistiquement en utilisant l'analyse de variance (ANOVA). En effet, à partir des résultats obtenus, des modèles du 1^{er} ordre de type linéaire seront établis. L'objectif principal est de montrer les paramètres qui ont le plus d'effet sur les réponses étudiées (usure (W) et rugosités de surface (Ra et Rt)).

Dans cette partie, l'analyse de variance est menée à un niveau de signification $\alpha=5\%$ (niveau de confiance, $1-\alpha=95\%$). Les résultats de l'analyse de variance de l'usure (W) et des rugosités de surface (Ra et Rt) sont donnés par les tableaux IV-10, IV-11 et IV-12. Ces tableaux montrent les degrés de libertés (DL), la somme des carrés (SS), le carré moyen (MS), le test F et la probabilité (Prob.). Il est à noter qu'une faible probabilité (Prob. < 0,05) renseigne sur la signification statistique de la source sur la réponse correspondante.

Dans cette analyse, la contribution en pourcentage (P%) de chaque facteur source sur la variabilité totale des réponses est représentée par la dernière colonne des tableaux IV-10-12. Ces valeurs donnent le degré d'influence de chaque facteur sur la réponse étudiée.

Source de variation	DL	SS _d	CM	F-test	Pc (%)
Régression	4	0,0031335	0,0007834	-	-
<i>H</i>	1	0,0021109	0,0021109	28,0198*	66,72
<i>C</i>	1	0,0009728	0,0009728	12,9131*	30,75
<i>Q</i>	1	0,0000118	0,0000118	0,1561	0,37
<i>V</i>	1	0,000038	0,000038	0,5041	1,20
Erreur	4	0,00003013	0,0000753	-	0,95
Total	8	0,0034348	-	-	-

Tab.IV.10 Résultat de l'analyse de Variance de l'usure W (série d'expériences II)

Les résultats de l'analyse de variance de l'usure (Tableau IV. 10) montrent que la dureté (*H*, Pc=66,72%) et la concentration des particules (*C*, Pc=30,75%) sont les paramètres qui ont la plus grande influence sur l'évolution de l'usure. En effet, la présence des particules polluantes dans l'huile lubrifiante avec la décroissance de la dureté de surface font croître notablement l'usure. D'autre part, il est bien clair que la charge (*Q*, Pc=0,37%) et la vitesse de rotation (*V*, Pc=1,2%) n'ont aucun effet significatif sur la variabilité totale de l'usure.

Source de variation	DL	SS _d	CM	F-test	Pc (%)
Régression	4	0,514831	0,514831	19,4238*	-
<i>H</i>	1	0,260298	0,260298	39,2827*	48,08
<i>C</i>	1	0,21232	0,21232	32,0421*	39,22
<i>Q</i>	1	0,024918	0,024918	3,6704	4,60
<i>V</i>	1	0,017295	0,017295	2,6101	3,19
Erreur	4	0,026505	0,006626	-	4,89
Total	8	0,541336	-	-	-

Tab.IV.11 Résultat de l'analyse de Variance de la rugosité Ra (série d'expériences II)

A partir du tableau IV.11, il est clairement observé que la dureté (*H*) et la concentration (*C*) sont les facteurs qui ont le plus grand effet sur l'évolution de la rugosité arithmétique moyenne (*Ra*), ce qui explique 48,08% et 39,22% de contribution respectivement. La charge

(Q , $P_c=4,6\%$) et la vitesse de rotation (V , $P_c=3,19\%$) ont une influence très faible sur la variabilité totale de la rugosité R_a .

Source de variation	DL	SS _d	CM	F-test	Pc (%)
Régression	4	53,4254	13,3564	11,3582*	-
H	1	39,5485	39,5485	33,632*	68,03
C	1	13,6004	13,6004	11,5658*	23,39
Q	1	0,015	0,015	0,0128	0,026
V	1	0,2616	0,2616	0,2224	0,45
Erreur	4	4,7037	4,7037	-	8,09
Total	8	58,1291	-	-	-

Tab.IV.12 Résultat de l'analyse de Variance de la rugosité R_t (série d'expériences II)

Le tableau IV.12 illustre l'analyse de variance de la rugosité de surface R_t . Les résultats obtenus montrent que la dureté (H , $P_c=68,03\%$) est le facteur qui a la plus grande influence sur l'évolution de R_t , suivi par la concentration des particules (C , $P_c=23,39\%$). De cette analyse, il est également bien visualisé que la charge (Q) et la vitesse de rotation (V) n'ont aucune influence d'un point de vue statistique. Leurs contributions sont $0,026\%$ et $0,45\%$ respectivement.

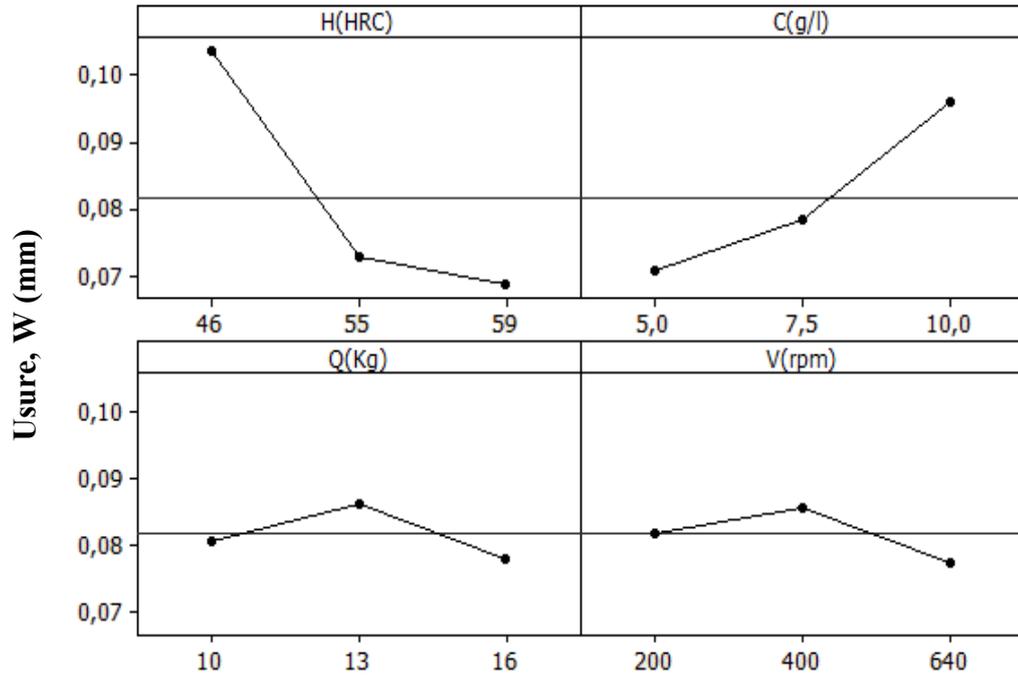


Fig.IV.14 Graphique des effets sur l'usure W (série d'expériences II)

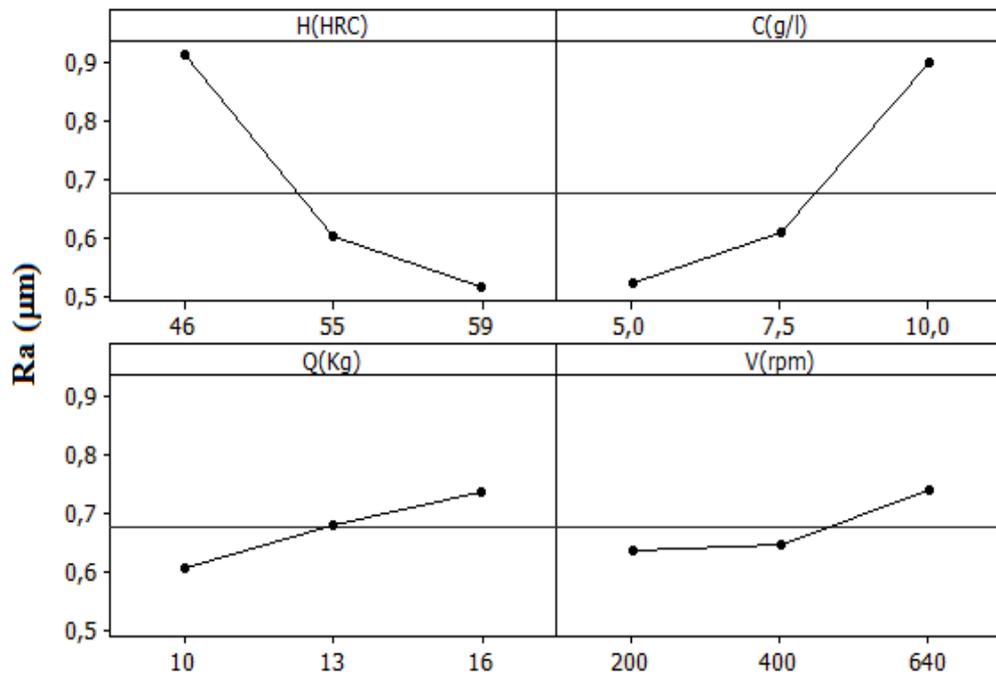


Fig.IV.15 Graphique des effets sur la rugosité Ra (série d'expériences II)

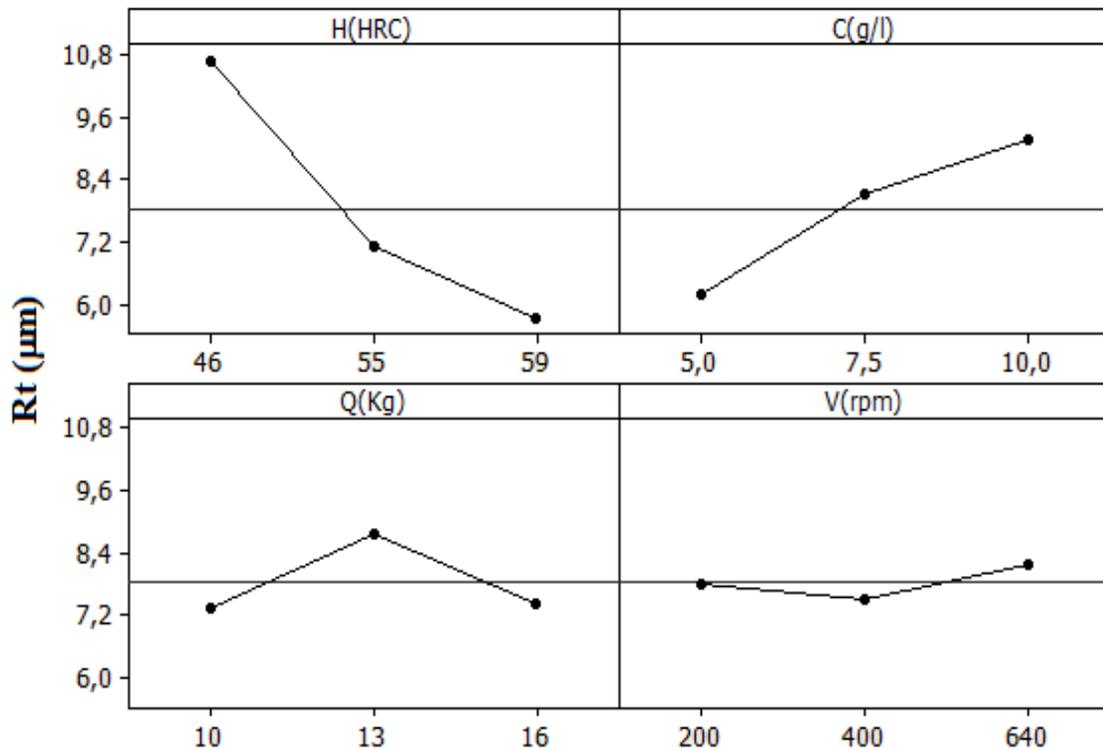


Fig.IV.16 Graphique des effets sur la rugosité Rt (série d'expériences II)

Les Figures IV-14 à 16 illustrent l'effet des facteurs source sur les valeurs moyennes de l'usure et les composantes de la rugosité de surface (Ra et Rt). Il est bien visualisé que toutes les réponses étudiées sont des fonctions décroissantes du paramètre dureté (H), tandis qu'un comportement inverse est observé avec l'accroissement de la concentration des particules (C). En effet, elles sont des fonctions croissantes du paramètre concentration (C). D'autre part, il est clairement démontré que la charge (Q) et la vitesse de rotation (V) n'ont que peu d'effet sur l'évolution des réponses étudiées.

IV.3.4.2 Modélisation mathématique (série des expériences II):

D'après les résultats expérimentaux présentés dans les tableaux IV-6, des équations de régression de l'usure (W) et des rugosités de surface (Ra et Rt) sont développés en utilisant la méthode de régression linéaire. Ces équations sont considérées comme des fonctions linéaires de la dureté (H), la concentration des particules (C), la charge (Q) et la vitesse de rotation (V). En effet, les équations de régression développées sont exprimées comme suit :

$$W = 0,205 - 0,00282 H + 0,00509 C - 0,000047 Q - 0,000011 V \tag{IV.8}$$

$$Ra = 1,40086 - 0,031282 H + 0,0752453 C + 0,00214811 Q + 0,000243707 V \tag{IV.9}$$

$$R_t = 23,2841 - 0,385588 H + 0,602227 C + 0,00166667 Q + 0,000947756 V \quad \text{IV.10}$$

Le coefficient de détermination R^2 , qui caractérise la relation entre les valeurs observées et prédites, est une mesure directe de bon ajustement. En effet, quand la valeur de R^2 s'approche à l'unité ($R^2 \cong 1$, voir tableau IV.13), c'est une indication claire sur l'excellent accord entre expérimentation et prédiction.

Modèle	Coefficient of détermination, R^2
Usure, W	0,9123
Rugosité, Ra	0,951
rugosité, Rt	0,9191

Tab.IV.13 Coefficient de détermination (série d'expériences II)

Les résultats des figures (IV.17-19) représentent également la qualité d'ajustement et justifiant la validité, l'applicabilité et l'efficacité des équations de régression obtenus en comparaison avec les valeurs observées.

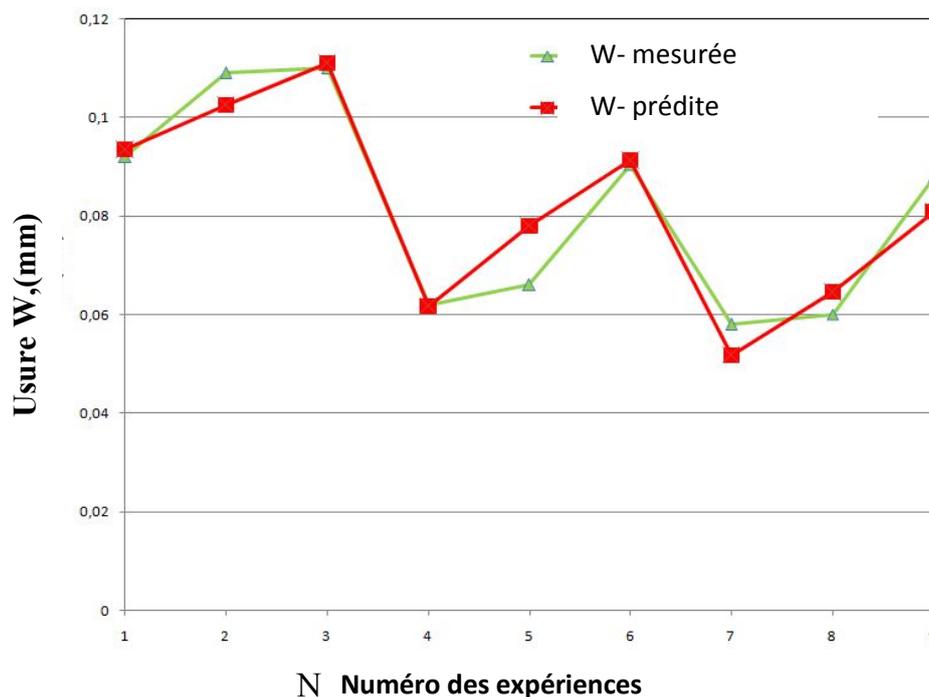


Fig.IV.17 Usure, W - comparaison entre prédiction et expérimentation (série d'expériences II).

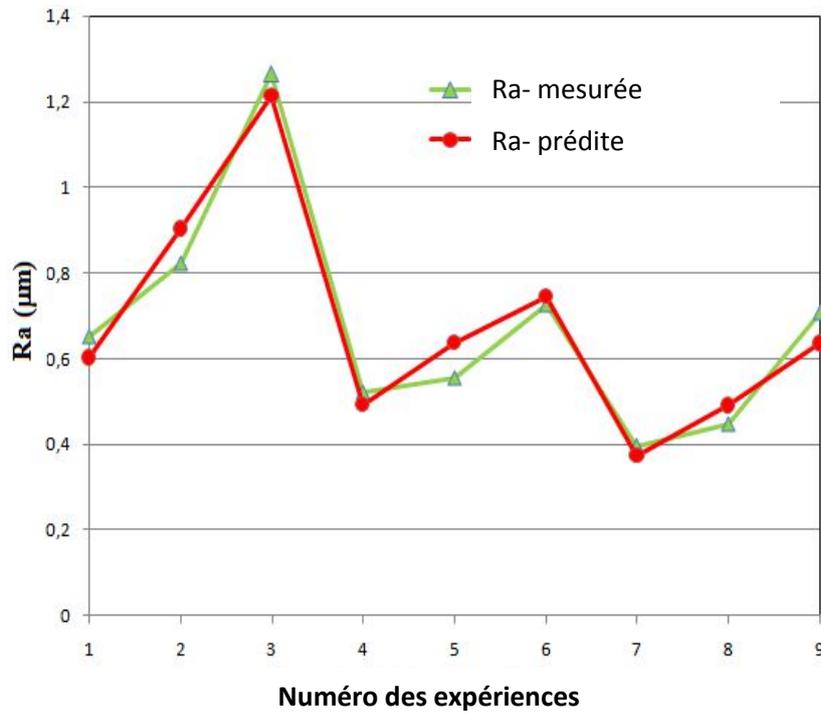


Fig.IV.18 Rugosité, Ra - comparaison entre prédiction et expérimentation (série d'expériences II).

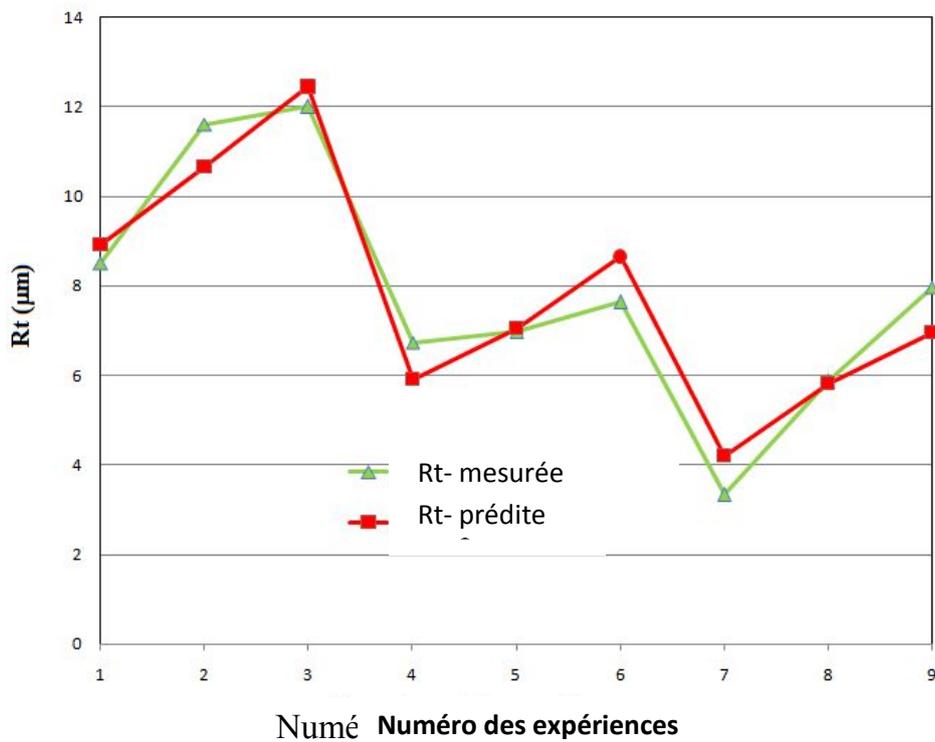


Fig.IV.19 Rugosité, Rt - comparaison entre prédiction et expérimentation (série d'expériences II).

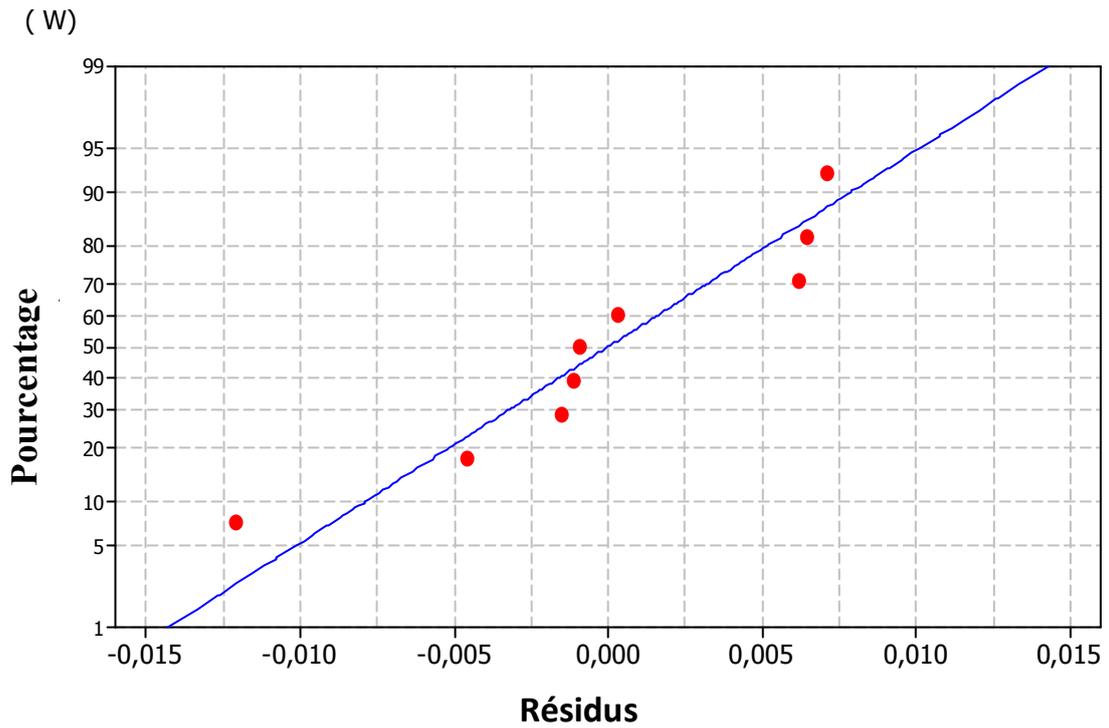


Fig.IV.20 Courbe de la probabilité normale pour l'usure W (série d'expérience II)

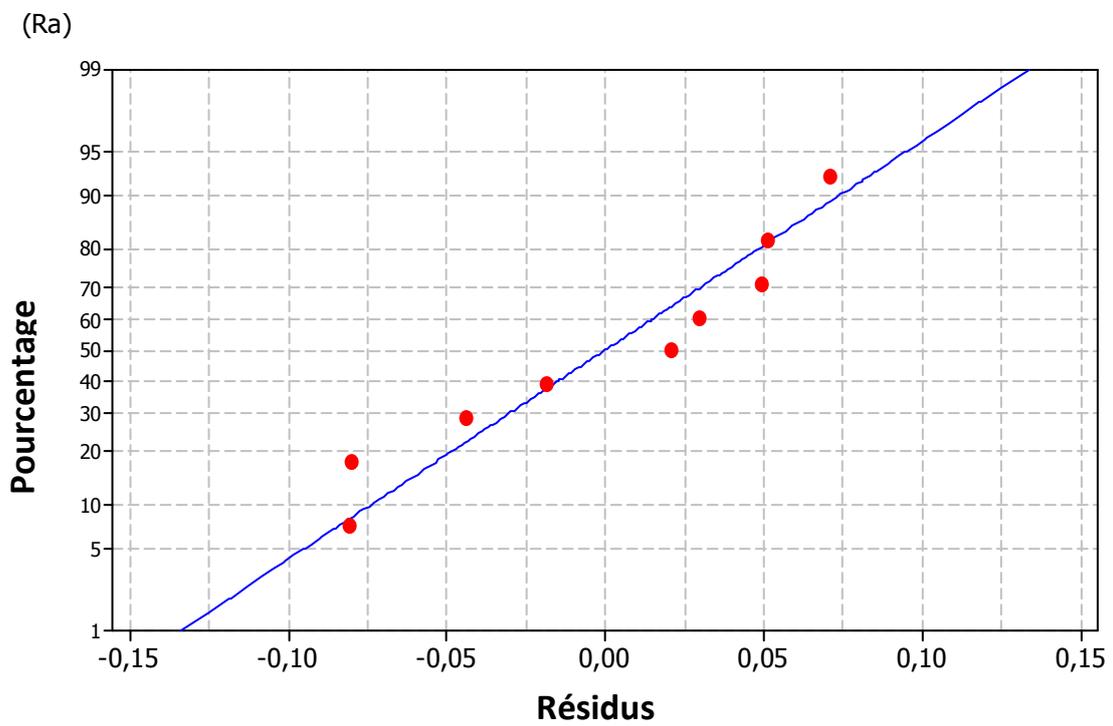


Fig.IV.21 Courbe de la probabilité normale pour la rugosité Ra (série d'expérience II)

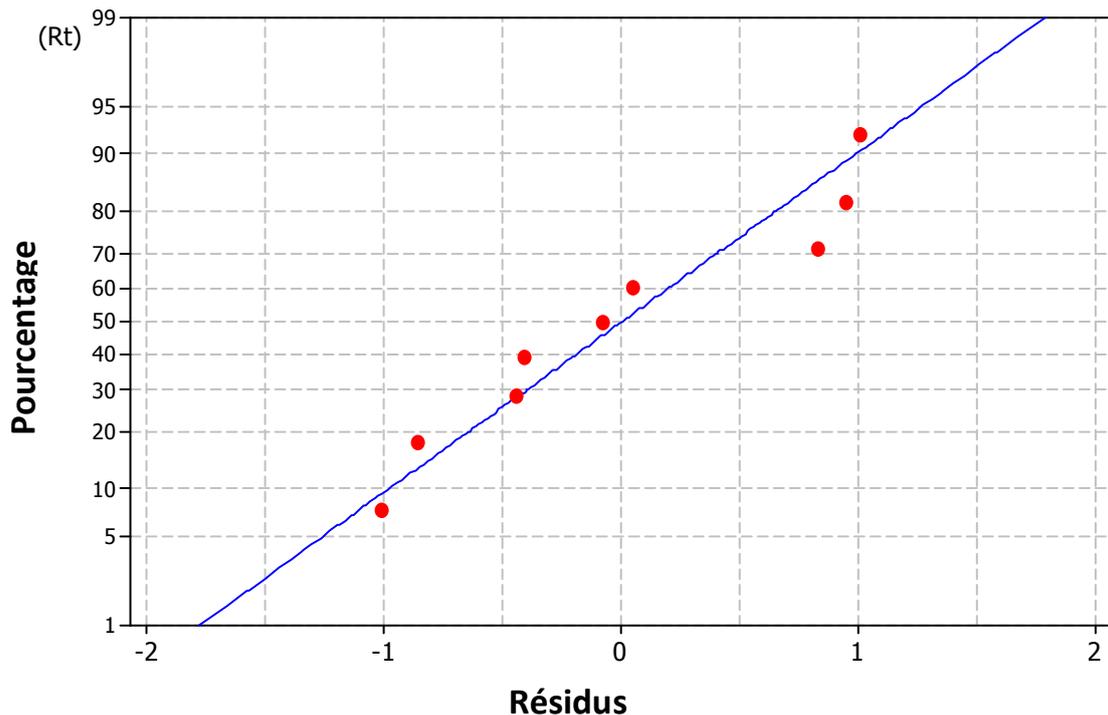


Fig.IV.22 Courbe de la probabilité normale pour la rugosité R_t (série d'expérience II)

Finalement, tel que présenté par les Figures IV.20, IV-21 et IV.22 des probabilités normales des résidus des modèles de l'usure (W) et des rugosités de surface (R_a et R_t) pour la deuxième série des expériences, on constate que les résidus s'ajustent raisonnablement à la ligne droite, ce qui permet de conclure que les erreurs ont une distribution normale et par conséquent les termes des modèles développés sont significatifs.

IV.4 CONCLUSION:

L'investigation statistique menée dans ce chapitre, nous a permis de conclure que :

- Pour le cas de l'expérience I, la concentration des particules polluantes (C) influence notablement sur l'évolution de l'usure (W), tandis que l'interaction concentration-charge ($C.Q$) est le paramètre qui a la plus grande influence sur l'évolution de la rugosité arithmétique moyenne (R_a).
- Pour le cas de l'expérience II, les paramètres : dureté (H) et concentration des particules (C) présentent les plus fortes contributions dans l'évolution des réponses étudiées.
- Par le biais de l'expérience II, on peut déduire que le paramètre dureté (H) présente un remède à la dégradation des contacts EHD sous l'effet de la pollution solide des lubrifiants.

En effet, les résultats obtenus montrent que le paramètre dureté (H) a la plus grande influence sur l'évolution des réponses étudiés.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude avait pour objectif d'étudier expérimentalement l'influence de la pollution solide des lubrifiants sur la dégradation des contacts élasto-hydrodynamiques (E.H.D.) roulants. Pour ce faire, un dispositif qui simule les conditions réelles des engrenages et/ou roulements a été développé. En effet, il s'agit d'un contact entre un disque en acier et une éprouvette contenant plusieurs bandes considérés comme des disques en acier.

Dans une première étape, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'évolution de la température, de la perte de côte (usure diamétrale) et de l'état de surface (rugosités Ra et Rt) au cours du temps sous l'effet de la pollution solide de la lubrification. Le polluant utilisé est le sable du sud algérien, connu pour sa dureté, sa fragilité et sa richesse en silice. Ce type de polluant a été choisi pour simuler l'effet des particules solides qui ont la plus grande dureté.

D'autre part, en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM), des modèles mathématiques du "premier ordre" et du "premier ordre-interaction" d'usure et de rugosité de surface ont été établis. L'analyse de variance (ANOVA) a permis pour sa part de visualiser l'effet des paramètres d'entrée, à savoir la concentration des particules (C), la vitesse de rotation (V), la charge appliquée (Q) et la dureté (H) sur les réponses d'intérêt étudiées (usure et rugosité). Ici, il est intéressant de noter que deux séries d'expériences selon le plan orthogonal L_9 de Taguchi, ont été planifiées.

Les principales conclusions qu'on peut tirer de cette investigation sont :

- La présence des particules solides dans l'huile de lubrification fait croître le frottement, l'usure et par conséquent la température du contact E.H.D. croît rapidement.
- La présence des particules dans un contact E.H.D. conduit à un mauvais état de surface. En effet, les paramètres de rugosité Ra et Rt augmentent considérablement pour un fonctionnement dans un milieu pollué.
- La température, l'usure et la rugosité de surface augmentent au fur et à mesure que la taille des particules augmente.

- L'usure et la rugosité de surface diminuent avec l'accroissement de la dureté des surfaces en contact ; tandis qu'un comportement inverse est observé avec l'accroissement de la concentration des particules polluantes.
- Dans un contact E.H.D., les particules solides créent des défauts majeurs qui seront considérés comme des sites spécifiques de fatigue.
- D'après les photos micrographiques, une usure douce est observée pour un contact lubrifié avec de l'huile propre ; tandis que l'usure s'apparente à de l'adhésion et de l'indentation pour un fonctionnement dans un milieu pollué.
- L'analyse de variance de la première série d'expériences montre clairement que la concentration des particules (C) et l'interaction ($C.Q$) sont statistiquement les facteurs qui ont la plus grande influence sur l'évolution de l'usure. Leurs contributions sur la variation totale de l'usure sont 36.2% et 24% respectivement.
- La première série d'expériences visualise également que le paramètre d'interaction ($C.Q$) est le facteur qui a la plus grande contribution sur la variation totale de la rugosité de surface R_a . Sa contribution est de l'ordre de 33.94%.
- Les visualisations 3D servent principalement à l'obtention des valeurs optimales de la rugosité et de l'usure.
- L'analyse de variance de la deuxième série d'expériences montre que la dureté de surface et la concentration des particules sont les facteurs qui ont plus d'influence sur la dégradation des surfaces en contact (usure et rugosité).
- La méthodologie de surface de réponse (RSM) est un outil puissant pour le développement des modèles mathématiques caractérisant la dégradation des éléments machines dans les milieux hautement contaminés.
- Les valeurs expérimentales et prédites par les deux plans d'expériences de Taguchi montrent une bonne concordance et par conséquent justifient la validité, l'applicabilité et l'efficacité des modèles mathématiques développés.
- Pour les deux séries d'expériences réalisées, des plans orthogonaux L_9 de Taguchi sont utilisés. En effet, 9 essais sont planifiés au lieu de 27 essais pour la première série des expériences et 81 essais pour la deuxième série des

expériences. Comme conséquence, la méthode de Taguchi utilise un design robuste qui permettra d'obtenir les facteurs les plus significatifs à des coûts moindres, un temps d'expérimentation très court et un nombre réduit d'expériences.

La thématique abordée est très intéressante, elle nous a permis de défricher un sujet original et offre par conséquent un certain nombre de perspectives. Dans les travaux futurs, nos efforts seront concentrés autour des axes suivants :

- En premier lieu, la principale question qui se pose est comment déterminer avec précision la charge au niveau du contact étudié. Il est bien établi que la charge varie proportionnellement avec l'aire réelle du contact. En effet, la charge n'est pas stable durant le processus d'usure et décroît avec le décroissement de l'aire du contact. Dans un travail futur, nous essayerons d'établir une corrélation entre la charge transmise et l'usure produite, ce qui permettra sans doute d'exprimer avec précision le comportement de la charge durant le processus d'usure.
- Etudier d'avantage la dégradation des contacts EHD dans les conditions de contamination les plus sévères (présence des particules solides de sable dans l'huile de lubrification). Dans cette partie, on s'intéressera plus particulièrement au comportement des particules polluantes entre les surfaces frottantes afin de mieux comprendre les mécanismes de dégradation.
- Réfléchir sur des moyens efficaces permettant d'optimiser les effets des particules polluantes sur la dégradation des contacts EHD.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:

- [1] **STRIBECK R.**, (1902) "Die Wesentlichen Eigenschaften der Gleit-und Rollenlager" Z.Verein. Deut. Ing. Vol. 46 n°38, pp. 1341-1348.
- [2] **KJER T.**, Particles in new motor oils. *Wear*, 1981, **69**(3), 395–396.
- [3] **LENG J. A., DAVIES J. E.** Ferrographic examination of unused lubricants for diesel engines. *Wear*, 1988, **122**(1), 115–119. [4]
- HUNT T. M.**, Handbook of Wear Debris Analysis & Particle Detection in Liquids. London : Elsevier Applied Science, 1993, 488 p.
- [5] **BENNA Y., BEDJOU. S., GUETTACH B., BRARA A.**, Valorisation des Sables de Dune : Applications aux Sables des Régions de Ouargla et de Boussaada, Algérie – Equipement, pp. 30-34, 2006.
- [6] **CARTIER M., KAPSA P.**, Usure des contacts mécaniques, Techniques de l'Ingénieur, BM5065 à BM5061 (2001).
- [7] **LEONARDO DA VINCI.** Codex Madrid I, 1493, p. 119.(McGraw Hill, Switzerland), available from: <http://kmoddl.library.cornell.edu/ebooks/#leonardol>.
- [8] **MARTIN H. M.**, Lubrication of Gear Teeth. *Engineering* (London), 1916, vol. 102, pp. 119-121.
- [9] **ERTEL A. M.**, Hydrodynamic Lubrication Based on New Principles). *Akad. Nauk SSSR Prikadnaya Matematika I Mechanika*, 1939, vol. 3, n)2, pp. 41-52.
- [10] **GRUBIN A. N., VINOGRADOVA I. E.**, Investigation of the contact of machine components, Moscow : Kh. F. Ketova, 1949, Central Scientific Research Institute for Technology and Mechanical Engineering, vol. 30 (En russe).
- [11] **JOHNSON K. L.**, Regimes of Elastohydrodynamic Lubrication. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1970, vol. 12, pp. 9 – 16.
- [12] **FRENE J.**, (1974) "Régimes d'écoulement non laminaire en films minces – Application aux paliers lisses" Thèse de Doctorat d'Etat soutenue à l'Université Claude Bernard de Lyon le 26 octobre.
- [13] **EZZAT H. A. and ROHDE S. M.**, 1974, "The Transient in Finite SliderBearings" *ASME Journal Of Lubrication Technology*, Vol. 95, pp. 315-321.

- [14] **HAMROCK B. J. & DOWSON D.**, Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts : Part I - Theoretical Formulation. ASME Journal of Lubrication Technology, 1976, Vol. 98, No. 2, pp. 223-229.
- [15] **HAMROCK B. J. & DOWSON D.**, Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts : Part II - Ellipticity Parameter Results. ASME Journal of Lubrication Technology, 1976, Vol. 98, No. 3, pp. 375-383.
- [16] **HAMROCK B. J. & DOWSON D.**, Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts : Part III-Fully Flooded Results. ASME Journal of Lubrication Technology, 1977, Vol. 99, No. 2, pp. 264-276.
- [17] **HAMROCK B. J. & DOWSON D.**, Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts : Part IV - Starvation Results. ASME Journal of Lubrication Technology, 1977, Vol. 99, No. 1, pp. 15-23.
- [18] **HAMROCK B. J. et DOWSON D.**, Minimum Film Thickness in elliptical contacts for different regimes of fluid film lubrication. Proceedings of the Leeds-Lyon Symposium on Tribology, 1979, pp. 22 – 27.
- [19] **CUSANO C. & WEDEVEN L. D.**, The Influence of Surface Dents and Grooves on Traction in Sliding EHD Point Contacts, 1982, ASLE Transactions, Vol. 26, pp. 306-310.
- [20] **AKL E. Y., KHALIFA S. E., FLAMAND L. & BERTHE D.**, Investigation of Wear Debris Associated with Different Stages of Operation in EHD Contact. Second A.S.A.T. Conférence, Caire, 21-23 avril 1987, pp. 671-687
- [21] **NELIAS D.**, Étude du Glissement dans les Roulements à Billes Grande Vitesse de Turbomachine - Influence de la Pollution du Lubrifiant. Thèse Doct. Ing. : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et Univ. Lyon I, 1989. 292 p.
- [22] **DWYER JOYCE R. S., HAMER J. C., SAYLES.R. S. and IOANNIDES.E.**, Lubricant Screening for Debris Effects on Improve Fatigue and Wear Life. Proceeding of 18th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, D. Dowson et al. Editeurs, Amsterdam: Elsevier, 1992, pp. 57-63.
- [23] **XU G., SADEGHI F. & COGDELL J. D.**, Debris Denting Effects on Elastohydrodynamics Lubricated Contacts. ASME Journal of Tribology, 1997, Vol. 119, No. 3, pp. 579-587.

- [24] **XU G., SADEGHI F. & HOEPRICH M. R.**, Residual Stresses Due to Debris Effects in EHL Contacts. Tribology Transactions, 1997, Vol. 40, n°4, pp. 613-620.
- [25] **XU G., SADEGHI F. & HOEPRICH M. R.**, Dent Initiated Spall Formation in EHL Rolling/Sliding Contacts. ASME Journal of Tribology, 1998, Vol. 120, n°3, pp. 453-462.
- [26] **NÉLIAS D., DUMONT M.-L., CHAMPIOT F., GIRODIN D., LORMAND G., VINCENT A., FOUGERES R. & FLAMAND L.** - Influence des Inclusions, de l'État de Surface et des Conditions de Fonctionnement sur la Fatigue des Aciers M50 et 100Cr6 dans les Contacts Ponctuels Lubrifiés. 17e Journées de Printemps, Fatigue de Contact, Société Française de Métallurgie et de Matériaux, Senlis, 27-28 mai 1998, p. 10(1)-10(12).
- [27] **COULON S.**, Prédiction de la Durée de Vie des Contacts Ponctuels Lubrifiés en Présence d'Indentations. Thèse de Doctorat, I. N. S. A. de Lyon, 2001, 202 p.
- [28] **DWYER JOYCE R. S.**, The life cycle of a debris particle, 31st Leeds-Lyon symposium on tribology, Leeds, septembre 2004.
- [29] **DE PELLEGIN D. V., STACHOWIAK G. W.**, Simulation of three-dimensional abrasive particles. Journal of wear, 2005, pp. 208-216.
- [30] **SARI M.R., HAIAHEM A., L. FLAMAND L.**, Effect of lubricant contamination on gear wear, 2007, Tribology Letters, Volume 27, pp. 119-126.
- [31] **QUERLIOZ E., VILLE F., SAINSOT P., LUBRECHT T.**, Influence des rugosités de surface sur la fatigue de contact en roulement, 2007, Congrès Français de Mécanique.
- [32] **SARI M.R., HAIAHEM A., L. FLAMAND L.**, Influence de la pollution solide sur les mécanismes lubrifiés, 2009, Congrès Français de Mécanique.
- [33] **SARI M.R., HAIAHEM A., L. FLAMAND L.**, Effect of lubricant contamination on friction and wear in an EHL sliding contact, 2010, MECHANIKA, Vol. 82, pp. 43-49.
- [34] **KASAI M.**, 2010, "Réduction du frottement et amélioration de la fiabilité de la lubrification des paliers avec des huiles de moteurs automobiles.", Thèse de l'Université de Poitiers, Spécialité Génie Mécanique, Productique, Transport.
- [35] **BOUCHIREB A., SARI M.R.**, Effect of solid particles on gear tooth failure, Journal of Central South University, May 2015, Volume 22, Issue 5, pp 1667-1675

- [36] **VILLE F., NELIAS D.**, An experimental study on the concentration and shape of dents caused by spherical metallic particles in EHL contacts, *STLE Tribology Trans.*, (1999) 231-240.
- [37] **VILLE F.**, Pollution solide des lubrifiants, indentation et fatigue des surfaces. Thèse de Doctorat, I. N. S. A. de Lyon, 1998, 163 p.
- [38] **VILLE F., NELIAS D.**, Influence of the Nature and Size of Solid Particles on the Indentation Features in EHL Contacts. *Tribology Series*, vol. 34, 1998, pp. 399-409.
- [39] **VILLE F., NELIAS D.**, Early Fatigue Failure Due to Dents in EHL Contacts. *Tribology Transactions*, vol. 42, n° 4, 1999, pp. 795-800.
- [40] **COULON S., VILLE F., LUBRECHT A. A.**, An Abacus for Predicting the Rolling Contact Fatigue Life Reduction due to Debris Dent. *Tribology Series*, n° 40, 28th Leeds-Lyon Symposium, 2002, pp.283-294.
- [41] **COULON S., Ville F., LUBERECHE A. A.**, Effect of a Dent on the Pressure Distribution in Dry Point Contacts. *ASME Journal of Tribology*, vol. 124, n ° 1, 2002, pp. 220-223.
- [42] **DIAB Y., COULON S., VILLE F., FLAMAND L.**, Experimental Investigations on Rolling Contact Fatigue of Dented Surfaces using Artificial Defects : Subsurface Analyses. *Tribology Series* n° 41, 29th Leeds-Lyon Symposium, pp. 359-366.
- [43] **GOUPY J.**, LES PLANS D'EXPERIENCES, *Revue MODULAD*, 2006, Numéro 34
- [44] **GOUPY J.**, «Introduction aux Plans d'expériences». Dunod. Paris. 303 pages. (2001).
- [45] **BOX GEORGE E. P., HUNTER WILLIAM G., HUNTER J. S.**, «Statistics for Experimenters» deuxième édition. John Wiley and Sons. New-York. 633 pages. (2005).
- [46] **MANSKI C.**, « Regression », *Journal of Economic Literature* , vol. 29, no 1, mars 1991, p. 34-50
- [47] **COQUILLARD P.**, Master SV UE7 COURS III - 2 -Analyse de variance (ANOVA) I Université NICE
- [48] **KAMOUN A, CHAABOUNI M.M., AYEDI H.F.**, Plans d'expériences et traitements de surface - Méthodologie des surfaces de réponses (MSR), *TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR*, Référence M1429 - 2011
- [49] **GOUPY J.**, Plan d'expérience pour surfaces de réponse. Edition Dunod, Paris (1999).

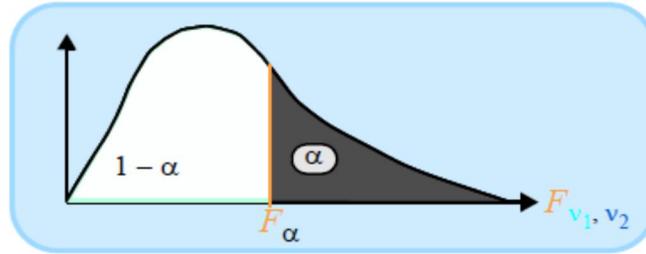
[50] LEWIS G.A., MATHIEU D. et PHAN-TANLUU R. ,Pharmaceutique experimental design. Marcel DEKKER Inc., New York (1999).

[51] MYERS R.H., MONTGOMERY D.C., Response surface methodology. John Wiley, New York (1995).

[52] SARABIA L.A., ORTIZ M.C., Response surface methodology. Chapitre 1.12. Comprehensive Chemometrics : Chemical and biochemical data analysis, BROWN (S.), TAULER (R.) et WALCZAK (B.), Editeurs scientifiques. Ed. Elsevier, Amsterdam (2009).

Tables de Fisher

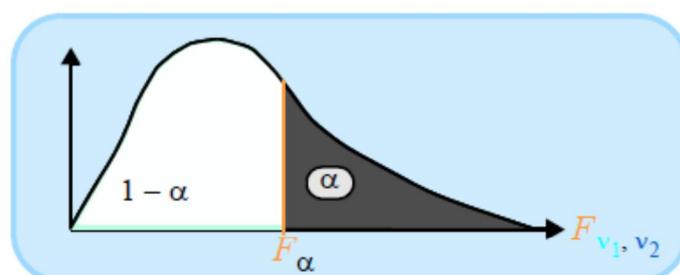
$\alpha = 0,1\%$, v_1 et v_2 donnés \Rightarrow recherche de $P(F_{v_1, v_2} > F_\alpha) = \alpha = 0,1\%$



$v_2 \backslash v_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	4053*	5000*	5404*	5625*	5764*	5859*	5929*	5981*	6023*	6056*	6107*	6158*	6209*	6235*	6261*	6287*	6313*	6340*	6366*
2	998,4	998,8	999,3	999,3	999,3	999,3	999,3	999,3	999,3	999,3	999,3	999,3	999,3	999,3	999,3	999,3	999,3	999,3	999,3
3	167,1	148,5	141,1	137,1	134,6	132,8	131,6	130,6	129,9	129,2	128,3	127,4	126,4	125,9	125,4	125,0	124,4	124,0	123,5
4	74,13	61,25	56,17	53,43	51,72	50,52	49,65	49,00	48,47	48,05	47,41	46,76	46,10	45,77	45,43	45,08	44,75	44,40	44,05
5	47,18	37,12	33,20	31,08	29,75	28,83	28,17	27,65	27,24	26,91	26,42	25,91	25,39	25,13	24,87	24,60	24,33	24,06	23,79
6	35,51	27,00	23,71	21,92	20,80	20,03	19,46	19,03	18,69	18,41	17,99	17,56	17,12	16,90	16,67	16,44	16,21	15,98	15,75
7	29,25	21,69	18,77	17,20	16,21	15,52	15,02	14,63	14,33	14,08	13,71	13,32	12,93	12,73	12,53	12,33	12,12	11,91	11,70
8	25,41	18,49	15,83	14,39	13,48	12,86	12,40	12,05	11,77	11,54	11,19	10,84	10,48	10,30	10,11	9,92	9,73	9,53	9,33
9	22,86	16,39	13,90	12,56	11,71	11,13	10,70	10,37	10,11	9,89	9,57	9,24	8,90	8,72	8,55	8,37	8,19	8,00	7,81
10	21,04	14,90	12,55	11,28	10,48	9,93	9,52	9,20	8,96	8,75	8,45	8,13	7,80	7,64	7,47	7,30	7,12	6,94	6,76
11	19,69	13,81	11,56	10,35	9,58	9,05	8,65	8,35	8,12	7,92	7,63	7,32	7,01	6,85	6,68	6,52	6,35	6,18	6,00
12	18,64	12,97	10,80	9,63	8,89	8,38	8,00	7,71	7,48	7,29	7,00	6,71	6,40	6,25	6,09	5,93	5,76	5,59	5,42
13	17,82	12,31	10,21	9,07	8,35	7,86	7,49	7,21	6,98	6,80	6,52	6,23	5,93	5,78	5,63	5,47	5,30	5,14	4,97
14	17,14	11,78	9,73	8,62	7,92	7,44	7,08	6,80	6,58	6,40	6,13	5,85	5,56	5,41	5,25	5,10	4,94	4,77	4,60
15	16,59	11,34	9,34	8,25	7,57	7,09	6,74	6,47	6,26	6,08	5,81	5,54	5,25	5,10	4,95	4,80	4,64	4,48	4,31
16	16,12	10,97	9,01	7,94	7,27	6,80	6,46	6,20	5,98	5,81	5,55	5,27	4,99	4,85	4,70	4,54	4,39	4,23	4,06
17	15,72	10,66	8,73	7,68	7,02	6,56	6,22	5,96	5,75	5,58	5,32	5,05	4,78	4,63	4,48	4,33	4,18	4,02	3,85
18	15,38	10,39	8,49	7,46	6,81	6,35	6,02	5,76	5,56	5,39	5,13	4,87	4,59	4,45	4,30	4,15	4,00	3,84	3,67
19	15,08	10,16	8,28	7,27	6,62	6,18	5,85	5,59	5,39	5,22	4,97	4,70	4,43	4,29	4,14	3,99	3,84	3,68	3,51
20	14,82	9,95	8,10	7,10	6,46	6,02	5,69	5,44	5,24	5,08	4,82	4,56	4,29	4,15	4,00	3,86	3,70	3,54	3,38
21	14,59	9,77	7,94	6,95	6,32	5,88	5,56	5,31	5,11	4,95	4,70	4,44	4,17	4,03	3,88	3,74	3,58	3,42	3,26
22	14,38	9,61	7,80	6,81	6,19	5,76	5,44	5,19	4,99	4,83	4,58	4,33	4,06	3,92	3,78	3,63	3,48	3,32	3,15
23	14,20	9,47	7,67	6,70	6,08	5,65	5,33	5,09	4,89	4,73	4,48	4,23	3,96	3,82	3,68	3,53	3,38	3,22	3,05
24	14,03	9,34	7,55	6,59	5,98	5,55	5,24	4,99	4,80	4,64	4,39	4,14	3,87	3,74	3,59	3,45	3,29	3,14	2,97
25	13,88	9,22	7,45	6,49	5,89	5,46	5,15	4,91	4,71	4,56	4,31	4,06	3,79	3,66	3,52	3,37	3,22	3,06	2,89
26	13,74	9,12	7,36	6,41	5,80	5,38	5,07	4,83	4,64	4,48	4,24	3,99	3,72	3,59	3,44	3,30	3,15	2,99	2,82
27	13,61	9,02	7,27	6,33	5,73	5,31	5,00	4,76	4,57	4,41	4,17	3,92	3,66	3,52	3,38	3,23	3,08	2,92	2,75
28	13,50	8,93	7,19	6,25	5,66	5,24	4,93	4,69	4,50	4,35	4,11	3,86	3,60	3,46	3,32	3,18	3,02	2,86	2,69
29	13,39	8,85	7,12	6,19	5,59	5,18	4,87	4,64	4,45	4,29	4,05	3,80	3,54	3,41	3,27	3,12	2,97	2,81	2,64
30	13,29	8,77	7,05	6,12	5,53	5,12	4,82	4,58	4,39	4,24	4,00	3,75	3,49	3,36	3,22	3,07	2,92	2,76	2,59
40	12,61	8,25	6,59	5,70	5,13	4,73	4,44	4,21	4,02	3,87	3,64	3,40	3,15	3,01	2,87	2,73	2,57	2,41	2,23
60	11,97	7,77	6,17	5,31	4,76	4,37	4,09	3,86	3,69	3,54	3,32	3,08	2,83	2,69	2,55	2,41	2,25	2,08	1,89
120	11,38	7,32	5,78	4,95	4,42	4,04	3,77	3,55	3,38	3,24	3,02	2,78	2,53	2,40	2,26	2,11	1,95	1,77	1,54
∞	10,83	6,91	5,42	4,62	4,10	3,74	3,47	3,27	3,10	2,96	2,74	2,51	2,27	2,13	1,99	1,84	1,66	1,45	1,00

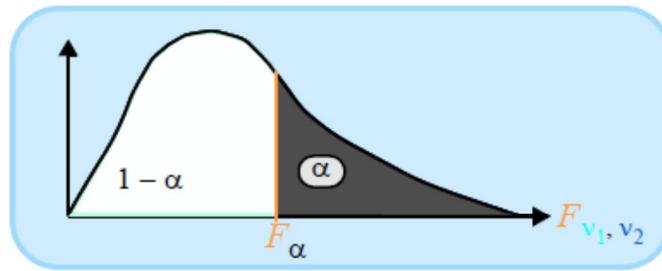
* valeur à multiplier par 100

$\alpha = 1\%$, v_1 et v_2 donnés \Rightarrow recherche de $P(F_{v_1, v_2} > F_\alpha) = \alpha = 1\%$



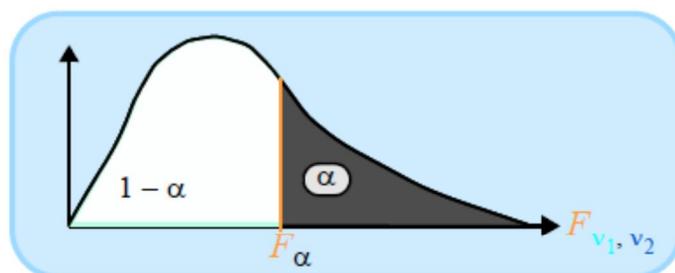
$v_2 \backslash v_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	4052	4999	5404	5624	5764	5859	5928	5981	6022	6056	6107	6157	6209	6234	6260	6286	6313	6340	6366
2	98,50	99,00	99,16	99,25	99,30	99,33	99,36	99,38	99,39	99,40	99,42	99,43	99,45	99,46	99,47	99,48	99,48	99,49	99,50
3	34,12	30,82	29,46	28,71	28,24	27,91	27,67	27,49	27,34	27,23	27,05	26,87	26,69	26,60	26,50	26,41	26,32	26,22	26,13
4	21,20	18,00	16,69	15,98	15,52	15,21	14,98	14,80	14,66	14,55	14,37	14,20	14,02	13,93	13,84	13,75	13,65	13,56	13,46
5	16,26	13,27	12,06	11,39	10,97	10,67	10,46	10,29	10,16	10,05	9,89	9,72	9,55	9,47	9,38	9,29	9,20	9,11	9,02
6	13,75	10,92	9,78	9,15	8,75	8,47	8,26	8,10	7,98	7,87	7,72	7,56	7,40	7,31	7,23	7,14	7,06	6,97	6,88
7	12,25	9,55	8,45	7,85	7,46	7,19	6,99	6,84	6,72	6,62	6,47	6,31	6,16	6,07	5,99	5,91	5,82	5,74	5,65
8	11,26	8,65	7,59	7,01	6,63	6,37	6,18	6,03	5,91	5,81	5,67	5,52	5,36	5,28	5,20	5,12	5,03	4,95	4,86
9	10,56	8,02	6,99	6,42	6,06	5,80	5,61	5,47	5,35	5,26	5,11	4,96	4,81	4,73	4,65	4,57	4,48	4,40	4,31
10	10,04	7,56	6,55	5,99	5,64	5,39	5,20	5,06	4,94	4,85	4,71	4,56	4,41	4,33	4,25	4,17	4,08	4,00	3,91
11	9,65	7,21	6,22	5,67	5,32	5,07	4,89	4,74	4,63	4,54	4,40	4,25	4,10	4,02	3,94	3,86	3,78	3,69	3,60
12	9,33	6,93	5,95	5,41	5,06	4,82	4,64	4,50	4,39	4,30	4,16	4,01	3,86	3,78	3,70	3,62	3,54	3,45	3,36
13	9,07	6,70	5,74	5,21	4,86	4,62	4,44	4,30	4,19	4,10	3,96	3,82	3,66	3,59	3,51	3,43	3,34	3,25	3,17
14	8,86	6,51	5,56	5,04	4,69	4,46	4,28	4,14	4,03	3,94	3,80	3,66	3,51	3,43	3,35	3,27	3,18	3,09	3,00
15	8,68	6,36	5,42	4,89	4,56	4,32	4,14	4,00	3,89	3,80	3,67	3,52	3,37	3,29	3,21	3,13	3,05	2,96	2,87
16	8,53	6,23	5,29	4,77	4,44	4,20	4,03	3,89	3,78	3,69	3,55	3,41	3,26	3,18	3,10	3,02	2,93	2,84	2,75
17	8,40	6,11	5,19	4,67	4,34	4,10	3,93	3,79	3,68	3,59	3,46	3,31	3,16	3,08	3,00	2,92	2,83	2,75	2,65
18	8,29	6,01	5,09	4,58	4,25	4,01	3,84	3,71	3,60	3,51	3,37	3,23	3,08	3,00	2,92	2,84	2,75	2,66	2,57
19	8,18	5,93	5,01	4,50	4,17	3,94	3,77	3,63	3,52	3,43	3,30	3,15	3,00	2,92	2,84	2,76	2,67	2,58	2,49
20	8,10	5,85	4,94	4,43	4,10	3,87	3,70	3,56	3,46	3,37	3,23	3,09	2,94	2,86	2,78	2,69	2,61	2,52	2,42
21	8,02	5,78	4,87	4,37	4,04	3,81	3,64	3,51	3,40	3,31	3,17	3,03	2,88	2,80	2,72	2,64	2,55	2,46	2,36
22	7,95	5,72	4,82	4,31	3,99	3,76	3,59	3,45	3,35	3,26	3,12	2,98	2,83	2,75	2,67	2,58	2,50	2,40	2,31
23	7,88	5,66	4,76	4,26	3,94	3,71	3,54	3,41	3,30	3,21	3,07	2,93	2,78	2,70	2,62	2,54	2,45	2,35	2,26
24	7,82	5,61	4,72	4,22	3,90	3,67	3,50	3,36	3,26	3,17	3,03	2,89	2,74	2,66	2,58	2,49	2,40	2,31	2,21
25	7,77	5,57	4,68	4,18	3,85	3,63	3,46	3,32	3,22	3,13	2,99	2,85	2,70	2,62	2,54	2,45	2,36	2,27	2,17
26	7,72	5,53	4,64	4,14	3,82	3,59	3,42	3,29	3,18	3,09	2,96	2,81	2,66	2,58	2,50	2,42	2,33	2,23	2,13
27	7,68	5,49	4,60	4,11	3,78	3,56	3,39	3,26	3,15	3,06	2,93	2,78	2,63	2,55	2,47	2,38	2,29	2,20	2,10
28	7,64	5,45	4,57	4,07	3,75	3,53	3,36	3,23	3,12	3,03	2,90	2,75	2,60	2,52	2,44	2,35	2,26	2,17	2,06
29	7,60	5,42	4,54	4,04	3,73	3,50	3,33	3,20	3,09	3,00	2,87	2,73	2,57	2,49	2,41	2,33	2,23	2,14	2,03
30	7,56	5,39	4,51	4,02	3,70	3,47	3,30	3,17	3,07	2,98	2,84	2,70	2,55	2,47	2,39	2,30	2,21	2,11	2,01
40	7,31	5,18	4,31	3,83	3,51	3,29	3,12	2,99	2,89	2,80	2,66	2,52	2,37	2,29	2,20	2,11	2,02	1,92	1,80
60	7,08	4,98	4,13	3,65	3,34	3,12	2,95	2,82	2,72	2,63	2,50	2,35	2,20	2,12	2,03	1,94	1,84	1,73	1,60
120	6,85	4,79	3,95	3,48	3,17	2,96	2,79	2,66	2,56	2,47	2,34	2,19	2,03	1,95	1,86	1,76	1,66	1,53	1,38
∞	6,64	4,61	3,78	3,32	3,02	2,80	2,64	2,51	2,41	2,32	2,18	2,04	1,88	1,79	1,70	1,59	1,47	1,32	1,00

$\alpha = 5 \%$, v_1 et v_2 donnés \Rightarrow recherche de $P(F_{v_1, v_2} > F_\alpha) = \alpha = 5 \%$



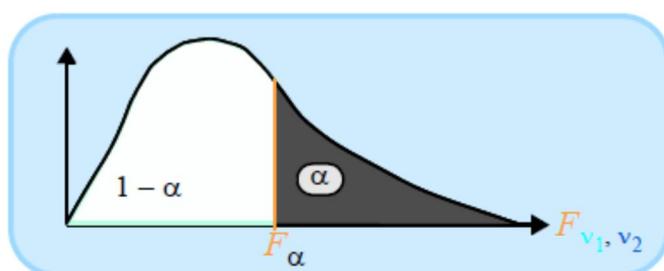
$v_2 \backslash v_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	236,8	238,9	240,5	241,9	243,9	245,9	248,0	249,1	250,1	251,1	252,2	253,3	254,3
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,41	19,43	19,45	19,45	19,46	19,47	19,48	19,49	19,50
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,70	8,66	8,64	8,62	8,59	8,57	8,55	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,91	5,86	5,80	5,77	5,75	5,72	5,69	5,66	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,68	4,62	4,56	4,53	4,50	4,46	4,43	4,40	4,37
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,00	3,94	3,87	3,84	3,81	3,77	3,74	3,70	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,57	3,51	3,44	3,41	3,38	3,34	3,30	3,27	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,28	3,22	3,15	3,12	3,08	3,04	3,01	2,97	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,01	2,94	2,90	2,86	2,83	2,79	2,75	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,85	2,77	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,79	2,72	2,65	2,61	2,57	2,53	2,49	2,45	2,40
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,69	2,62	2,54	2,51	2,47	2,43	2,38	2,34	2,30
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,60	2,53	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,25	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,53	2,46	2,39	2,35	2,31	2,27	2,22	2,18	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,48	2,40	2,33	2,29	2,25	2,20	2,16	2,11	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,42	2,35	2,28	2,24	2,19	2,15	2,11	2,06	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,38	2,31	2,23	2,19	2,15	2,10	2,06	2,01	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,34	2,27	2,19	2,15	2,11	2,06	2,02	1,97	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,31	2,23	2,16	2,11	2,07	2,03	1,98	1,93	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,28	2,20	2,12	2,08	2,04	1,99	1,95	1,90	1,84
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,25	2,18	2,10	2,05	2,01	1,96	1,92	1,87	1,81
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,23	2,15	2,07	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,78
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,20	2,13	2,05	2,01	1,96	1,91	1,86	1,81	1,76
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,18	2,11	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,79	1,73
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,16	2,09	2,01	1,96	1,92	1,87	1,82	1,77	1,71
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,15	2,07	1,99	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,69
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	2,13	2,06	1,97	1,93	1,88	1,84	1,79	1,73	1,67
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,12	2,04	1,96	1,91	1,87	1,82	1,77	1,71	1,65
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,10	2,03	1,94	1,90	1,85	1,81	1,75	1,70	1,64
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,09	2,01	1,93	1,89	1,84	1,79	1,74	1,68	1,62
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,00	1,92	1,84	1,79	1,74	1,69	1,64	1,58	1,51
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,92	1,84	1,75	1,70	1,65	1,59	1,53	1,47	1,39
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,18	2,09	2,02	1,96	1,91	1,83	1,75	1,66	1,61	1,55	1,50	1,43	1,35	1,25
∞	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88	1,83	1,75	1,67	1,57	1,52	1,46	1,39	1,32	1,22	1,00

$\alpha = 10\%$, v_1 et v_2 donnés \Rightarrow recherche de $P(F_{v_1, v_2} > F_\alpha) = \alpha = 10\%$



$v_1 \backslash v_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	39,86	49,50	53,59	55,83	57,24	58,20	58,91	59,44	59,86	60,19	60,71	61,22	61,74	62,00	62,26	62,53	62,79	63,06	63,33
2	8,53	9,00	9,16	9,24	9,29	9,33	9,35	9,37	9,38	9,39	9,41	9,42	9,44	9,45	9,46	9,47	9,47	9,48	9,49
3	5,54	5,46	5,39	5,34	5,31	5,28	5,27	5,25	5,24	5,23	5,22	5,20	5,18	5,18	5,17	5,16	5,15	5,14	5,13
4	4,54	4,32	4,19	4,11	4,05	4,01	3,98	3,95	3,94	3,92	3,90	3,87	3,84	3,83	3,82	3,80	3,79	3,78	3,76
5	4,06	3,78	3,62	3,52	3,45	3,40	3,37	3,34	3,32	3,30	3,27	3,24	3,21	3,19	3,17	3,16	3,14	3,12	3,11
6	3,78	3,46	3,29	3,18	3,11	3,05	3,01	2,98	2,96	2,94	2,90	2,87	2,84	2,82	2,80	2,78	2,76	2,74	2,72
7	3,59	3,26	3,07	2,96	2,88	2,83	2,78	2,75	2,72	2,70	2,67	2,63	2,59	2,58	2,56	2,54	2,51	2,49	2,47
8	3,46	3,11	2,92	2,81	2,73	2,67	2,62	2,59	2,56	2,54	2,50	2,46	2,42	2,40	2,38	2,36	2,34	2,32	2,29
9	3,36	3,01	2,81	2,69	2,61	2,55	2,51	2,47	2,44	2,42	2,38	2,34	2,30	2,28	2,25	2,23	2,21	2,18	2,16
10	3,29	2,92	2,73	2,61	2,52	2,46	2,41	2,38	2,35	2,32	2,28	2,24	2,20	2,18	2,16	2,13	2,11	2,08	2,06
11	3,23	2,86	2,66	2,54	2,45	2,39	2,34	2,30	2,27	2,25	2,21	2,17	2,12	2,10	2,08	2,05	2,03	2,00	1,97
12	3,18	2,81	2,61	2,48	2,39	2,33	2,28	2,24	2,21	2,19	2,15	2,10	2,06	2,04	2,01	1,99	1,96	1,93	1,90
13	3,14	2,76	2,56	2,43	2,35	2,28	2,23	2,20	2,16	2,14	2,10	2,05	2,01	1,98	1,96	1,93	1,90	1,88	1,85
14	3,10	2,73	2,52	2,39	2,31	2,24	2,19	2,15	2,12	2,10	2,05	2,01	1,96	1,94	1,91	1,89	1,86	1,83	1,80
15	3,07	2,70	2,49	2,36	2,27	2,21	2,16	2,12	2,09	2,06	2,02	1,97	1,92	1,90	1,87	1,85	1,82	1,79	1,76
16	3,05	2,67	2,46	2,33	2,24	2,18	2,13	2,09	2,06	2,03	1,99	1,94	1,89	1,87	1,84	1,81	1,78	1,75	1,72
17	3,03	2,64	2,44	2,31	2,22	2,15	2,10	2,06	2,03	2,00	1,96	1,91	1,86	1,84	1,81	1,78	1,75	1,72	1,69
18	3,01	2,62	2,42	2,29	2,20	2,13	2,08	2,04	2,00	1,98	1,93	1,89	1,84	1,81	1,78	1,75	1,72	1,69	1,66
19	2,99	2,61	2,40	2,27	2,18	2,11	2,06	2,02	1,98	1,96	1,91	1,86	1,81	1,79	1,76	1,73	1,70	1,67	1,63
20	2,97	2,59	2,38	2,25	2,16	2,09	2,04	2,00	1,96	1,94	1,89	1,84	1,79	1,77	1,74	1,71	1,68	1,64	1,61
21	2,96	2,57	2,36	2,23	2,14	2,08	2,02	1,98	1,95	1,92	1,87	1,83	1,78	1,75	1,72	1,69	1,66	1,62	1,59
22	2,95	2,56	2,35	2,22	2,13	2,06	2,01	1,97	1,93	1,90	1,86	1,81	1,76	1,73	1,70	1,67	1,64	1,60	1,57
23	2,94	2,55	2,34	2,21	2,11	2,05	1,99	1,95	1,92	1,89	1,84	1,80	1,74	1,72	1,69	1,66	1,62	1,59	1,55
24	2,93	2,54	2,33	2,19	2,10	2,04	1,98	1,94	1,91	1,88	1,83	1,78	1,73	1,70	1,67	1,64	1,61	1,57	1,53
25	2,92	2,53	2,32	2,18	2,09	2,02	1,97	1,93	1,89	1,87	1,82	1,77	1,72	1,69	1,66	1,63	1,59	1,56	1,52
26	2,91	2,52	2,31	2,17	2,08	2,01	1,96	1,92	1,88	1,86	1,81	1,76	1,71	1,68	1,65	1,61	1,58	1,54	1,50
27	2,90	2,51	2,30	2,17	2,07	2,00	1,95	1,91	1,87	1,85	1,80	1,75	1,70	1,67	1,64	1,60	1,57	1,53	1,49
28	2,89	2,50	2,29	2,16	2,06	2,00	1,94	1,90	1,87	1,84	1,79	1,74	1,69	1,66	1,63	1,59	1,56	1,52	1,48
29	2,89	2,50	2,28	2,15	2,06	1,99	1,93	1,89	1,86	1,83	1,78	1,73	1,68	1,65	1,62	1,58	1,55	1,51	1,47
30	2,88	2,49	2,28	2,14	2,05	1,98	1,93	1,88	1,85	1,82	1,77	1,72	1,67	1,64	1,61	1,57	1,54	1,50	1,46
40	2,84	2,44	2,23	2,09	2,00	1,93	1,87	1,83	1,79	1,76	1,71	1,66	1,61	1,57	1,54	1,51	1,47	1,42	1,38
60	2,79	2,39	2,18	2,04	1,95	1,87	1,82	1,77	1,74	1,71	1,66	1,60	1,54	1,51	1,48	1,44	1,40	1,35	1,29
120	2,75	2,35	2,13	1,99	1,90	1,82	1,77	1,72	1,68	1,65	1,60	1,55	1,48	1,45	1,41	1,37	1,32	1,26	1,19
∞	2,71	2,30	2,08	1,94	1,85	1,77	1,72	1,67	1,63	1,60	1,55	1,49	1,42	1,38	1,34	1,30	1,24	1,17	1,00

$\alpha = 25 \%$, v_1 et v_2 donnés \Rightarrow recherche de $P(F_{v_1, v_2} > F_\alpha) = \alpha = 25 \%$



$v_1 \backslash v_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	5,83	7,50	8,20	8,58	8,82	8,98	9,10	9,19	9,26	9,32	9,41	9,49	9,58	9,63	9,67	9,71	9,76	9,80	9,85
2	2,57	3,00	3,15	3,23	3,28	3,31	3,34	3,35	3,37	3,38	3,39	3,41	3,43	3,43	3,44	3,45	3,46	3,47	3,48
3	2,02	2,28	2,36	2,39	2,41	2,42	2,43	2,44	2,44	2,44	2,45	2,46	2,46	2,46	2,47	2,47	2,47	2,47	2,47
4	1,81	2,00	2,05	2,06	2,07	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08
5	1,69	1,85	1,88	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,88	1,88	1,88	1,88	1,87	1,87	1,87
6	1,62	1,76	1,78	1,79	1,79	1,78	1,78	1,78	1,77	1,77	1,77	1,76	1,76	1,75	1,75	1,75	1,74	1,74	1,74
7	1,57	1,70	1,72	1,72	1,71	1,71	1,70	1,70	1,69	1,69	1,68	1,68	1,67	1,67	1,66	1,66	1,65	1,65	1,65
8	1,54	1,66	1,67	1,66	1,66	1,65	1,64	1,64	1,63	1,63	1,62	1,62	1,61	1,60	1,60	1,59	1,59	1,58	1,58
9	1,51	1,62	1,63	1,63	1,62	1,61	1,60	1,60	1,59	1,59	1,58	1,57	1,56	1,56	1,55	1,54	1,54	1,53	1,53
10	1,49	1,60	1,60	1,59	1,59	1,58	1,57	1,56	1,56	1,55	1,54	1,53	1,52	1,52	1,51	1,51	1,50	1,49	1,48
11	1,47	1,58	1,58	1,57	1,56	1,55	1,54	1,53	1,53	1,52	1,51	1,50	1,49	1,49	1,48	1,47	1,47	1,46	1,45
12	1,46	1,56	1,56	1,55	1,54	1,53	1,52	1,51	1,51	1,50	1,49	1,48	1,47	1,46	1,45	1,45	1,44	1,43	1,42
13	1,45	1,55	1,55	1,53	1,52	1,51	1,50	1,49	1,49	1,48	1,47	1,46	1,45	1,44	1,43	1,42	1,42	1,41	1,40
14	1,44	1,53	1,53	1,52	1,51	1,50	1,49	1,48	1,47	1,46	1,45	1,44	1,43	1,42	1,41	1,41	1,40	1,39	1,38
15	1,43	1,52	1,52	1,51	1,49	1,48	1,47	1,46	1,46	1,45	1,44	1,43	1,41	1,41	1,40	1,39	1,38	1,37	1,36
16	1,42	1,51	1,51	1,50	1,48	1,47	1,46	1,45	1,44	1,44	1,43	1,41	1,40	1,39	1,38	1,37	1,36	1,35	1,34
17	1,42	1,51	1,50	1,49	1,47	1,46	1,45	1,44	1,43	1,43	1,41	1,40	1,39	1,38	1,37	1,36	1,35	1,34	1,33
18	1,41	1,50	1,49	1,48	1,46	1,45	1,44	1,43	1,42	1,42	1,40	1,39	1,38	1,37	1,36	1,35	1,34	1,33	1,32
19	1,41	1,49	1,49	1,47	1,46	1,44	1,43	1,42	1,41	1,41	1,40	1,38	1,37	1,36	1,35	1,34	1,33	1,32	1,30
20	1,40	1,49	1,48	1,47	1,45	1,44	1,43	1,42	1,41	1,40	1,39	1,37	1,36	1,35	1,34	1,33	1,32	1,31	1,29
21	1,40	1,48	1,48	1,46	1,44	1,43	1,42	1,41	1,40	1,39	1,38	1,37	1,35	1,34	1,33	1,32	1,31	1,30	1,28
22	1,40	1,48	1,47	1,45	1,44	1,42	1,41	1,40	1,39	1,39	1,37	1,36	1,34	1,33	1,32	1,31	1,30	1,29	1,28
23	1,39	1,47	1,47	1,45	1,43	1,42	1,41	1,40	1,39	1,38	1,37	1,35	1,34	1,33	1,32	1,31	1,30	1,28	1,27
24	1,39	1,47	1,46	1,44	1,43	1,41	1,40	1,39	1,38	1,38	1,36	1,35	1,33	1,32	1,31	1,30	1,29	1,28	1,26
25	1,39	1,47	1,46	1,44	1,42	1,41	1,40	1,39	1,38	1,37	1,36	1,34	1,33	1,32	1,31	1,29	1,28	1,27	1,25
26	1,38	1,46	1,45	1,44	1,42	1,41	1,39	1,38	1,37	1,37	1,35	1,34	1,32	1,31	1,30	1,29	1,28	1,26	1,25
27	1,38	1,46	1,45	1,43	1,42	1,40	1,39	1,38	1,37	1,36	1,35	1,33	1,32	1,31	1,30	1,28	1,27	1,26	1,24
28	1,38	1,46	1,45	1,43	1,41	1,40	1,39	1,38	1,37	1,36	1,34	1,33	1,31	1,30	1,29	1,28	1,27	1,25	1,24
29	1,38	1,45	1,45	1,43	1,41	1,40	1,38	1,37	1,36	1,35	1,34	1,32	1,31	1,30	1,29	1,27	1,26	1,25	1,23
30	1,38	1,45	1,44	1,42	1,41	1,39	1,38	1,37	1,36	1,35	1,34	1,32	1,30	1,29	1,28	1,27	1,26	1,24	1,23
40	1,36	1,44	1,42	1,40	1,39	1,37	1,36	1,35	1,34	1,33	1,31	1,30	1,28	1,26	1,25	1,24	1,22	1,21	1,19
60	1,35	1,42	1,41	1,38	1,37	1,35	1,33	1,32	1,31	1,30	1,29	1,27	1,25	1,24	1,22	1,21	1,19	1,17	1,15
120	1,34	1,40	1,39	1,37	1,35	1,33	1,31	1,30	1,29	1,28	1,26	1,24	1,22	1,21	1,19	1,18	1,16	1,13	1,10
∞	1,32	1,39	1,37	1,35	1,33	1,31	1,29	1,28	1,27	1,25	1,24	1,22	1,19	1,18	1,16	1,14	1,12	1,08	1,00

Listes des figures

Fig. I.1 Deux sphères en contact.....	8
Fig.I.2 Formes de contacts.....	10
Fig.I.3. Courbe de Stribeck.....	12
Fig.I.4 Les régimes de lubrification.....	14
Fig. I.5 Micrographie des particules dans l'huile propre.....	19
Fig.I.6 Micrographie des particules dans un lubrifiant inutilisé pour moteur diesel.....	20
Fig.I.7 Perte de matière par unité de temps.....	25
Fig.II.1 Domaine de variation du facteur 1.....	33
Fig.II.2 Domaine de l'espace expérimental.....	33
Fig.II.3 points expérimentaux disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur.....	34
Fig.II.4 Réponses associées aux points du domaine d'étude qui forment la surface de réponse.....	35
Fig. II.5 Principe des moindres carrés ordinaire	40
Fig.III.1 Schéma du dispositif d'essai.....	48
Fig. III.2.a.b Photographies de la réalisation des éprouvettes.....	50
Fig. III.3 Photographies des éprouvettes finis (a et b).....	51
Fig. III.4 Photographie des éléments a et b (bague, roulement).....	52
Fig. III.5 Morphologie du sable (a) et composition chimique du sable (b).....	54
Fig.III.6 Représentation de la méthode d'étalonnage (à gauche) et la déformé Y_1 sous la charge F_1 (à droite).....	55
Fig.III.7 Graphe d'étalonnage de l'éprouvette C45 (1 ^{ème} série d'expériences).....	56
Fig.III.8. (a.b) Graphe d'étalonnage de l'éprouvette C45 (2 ^{ème} série d'expériences).....	59
Fig.III.9 Jet d'huile pollué (modèle du contact utilisé).....	60
Fig. III.10 Thermocouple infrarouge à visée croisée FT2500.....	61

Fig. III.11 point de mesure de la température.....	61
Fig.III.12 Pied à coulisse MITUTOYO 500-181 U.....	62
Fig.III.13 Rugosimètre à stylet de type "MITUTOYO SURFTEST -301".....	63
Fig. III.14 Evolution de la température au point de contact en fonction du temps pour une vitesse 250 tr/min et une charge de 180 N	64
Fig. III.15 Evolution de l'usure en fonction du temps pour une vitesse 250 tr/min et une charge de 180 N	66
Fig.III.16 Micrographie optique du disque en acier avant fonctionnement.....	67
Fig.III.17 Micrographie optique du disque en acier lubrifier avec l'huile	67
Fig.III.18 Micrographie optique du disque en acier lubrifier avec l'huile contaminé (particules $\leq 125 \mu\text{m}$, $C=5 \text{ g/l}$, $F_l=180 \text{ N}$ et $V=250 \text{ rpm}$).....	68
Fig. III.19 Image SEM des disques en acier après opération avec huile contaminé (particules $\leq 63\mu\text{m}$ et $c=5\text{g/l}$, $F\approx 100\text{N}$, $V\approx 250 \text{ r/min}$).....	68
Fig. III.20 Aspect des surfaces des disques en acier : (a) avant opération;(b) après opération avec huile propre ; (c) après opération avec huile contaminé (particules $\leq 63\mu\text{m}$ et $c=5\text{g/l}$).....	69
Fig.III.21 Rugosité (R_a et R_t) avant et après opération ($F\approx 100\text{N}$, $V\approx 250 \text{ r/min}$) : (a) évolution de la rugosité ; (b) les barres d'erreurs des rugosités après opération.....	70
Fig.IV.1 risque de rejet à tort de α	79
Fig.IV.2 Graphique des effets sur l'usure moyenne W (série d'expériences I).....	82
Fig.IV.3 Graphique des effets sur la rugosité moyenne R_a (série d'expériences I).....	82
Fig.IV.4. (a, b) Effet de la concentration des particules et la charge sur l'usure W ($V=710 \text{ tr/min}$).....	84
Fig.IV.5. (a, b) Effet de la concentration des particules et la vitesse de rotation sur l'usure W ($Q=13\text{Kg}$).....	85

Fig.IV.6. (a, b) Effet de la charge et la vitesse de rotation sur l'usure W (C (7,5g/l)).....	86
Fig.IV.7. (a, b) Effet de la concentration des particules et la charge sur la rugosité Ra ($V=710$ rpm).....	87
Fig.IV.8. (a, b) Effet de la concentration des particules et la vitesse de rotation sur la rugosité Ra ($Q=13$ Kg).....	88
Fig.IV.9. (a, b) Effet de la charge et la vitesse de rotation sur la rugosité Ra ($C=7, 5$ g/l)...	89
Fig.IV.10 Comparaison entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées de l'usure.....	91
Fig.IV.11 Comparaison entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées de la rugosité Ra	91
Fig.IV.12 Courbe de la probabilité normale pour l'usure W	92
Fig.IV.13 Courbe de la probabilité normale pour la rugosité Ra	92
Fig.IV.14 Graphique des effets sur l'usure W (série d'expériences II).....	96
Fig.IV.15 Graphique des effets sur la rugosité Ra (série d'expériences II).....	96
Fig.IV.16 Graphique des effets sur la rugosité Rt (série d'expériences II).....	97
Fig.IV.17 Usure, W - comparaison entre prédiction et expérimentation (série d'expériences II)	98
Fig.IV.18 Rugosité, Ra - comparaison entre prédiction et expérimentation (série d'expériences II)	99
Fig.IV.19 Rugosité, Rt - comparaison entre prédiction et expérimentation (série d'expériences II).	99
Fig.IV.20 Courbe de la probabilité normale pour l'usure W (série d'expériences II).....	100
Fig.IV.21 Courbe de la probabilité normale pour la rugosité Ra (série d'expériences II)..	100
Fig.IV.22 Courbe de la probabilité normale pour la rugosité Rt (série d'expériences II)...	101

Liste des tableaux

Tab.I.1 Différence entre la lubrification graisse et l'huile.....	15
Tab.I.2 Classification des particules polluantes selon la forme.....	21
Tab.I.3 Analyse minéralogique par diffractométrie aux R-X des sables de Boussaâda et d'Ouargla.....	23
Tab.I.4 Représentation des différentes formes d'usure.....	24
Tab.II.1 Evaluation de la qualité de l'ajustement	41
Tab.II.2 Les-plans-Taguchi et leurs usages.....	45
Tab.III.1 Composition chimique de l'acier C 45.....	52
Tab.III.2 Caractéristiques mécaniques C45.....	52
Tab.III.3 valeurs de mesures de la déformation (flèche).....	56
Tab.III.4 Valeurs de la constante d'étalonnage (1 ^{ère} série d'expériences).....	58
Tab.III.5 Valeurs de la constante d'étalonnage (2 ^{ème} série d'expériences).....	60
Tab.IV.1 Niveaux des facteurs de la série d'expériences I.....	73
Tab.IV.2 Niveaux des facteurs de la série d'expériences II.....	73
Tab.IV.3 Plan des expériences... I.....	73
Tab.IV.4 Plan des expériences II.....	75
Tab.IV.5 Résultats de l'expérience I.....	76
Tab.IV.6 Résultats de l'expérience II.....	76
Tab.IV.7 Résultat de l'analyse de Variance de W (série d'expériences I).....	80
Tab.IV.8 Résultat de l'analyse de Variance de Ra (série d'expériences I).....	81
Tab.IV.9 Coefficients de détermination (série d'expériences I).....	90
Tab.IV.10 Résultat de l'analyse de Variance de l'usure W (série d'expériences II).....	94
Tab.IV.11 Résultat de l'analyse de Variance de la rugosité Ra (série d'expériences II)....	94

Tab.IV.12 Résultat de l'analyse de Variance de la rugosité R_t (série d'expériences II).....	95
Tab.IV.13 Coefficient de détermination (série d'expériences II).....	98

Liste des publications

Au cours de cette thèse, deux articles sont publiés dans deux revues internationales.

Article 01:

Titre: Experimental and statistical investigation on the failure of contaminated elastohydrodynamic lubrication contact.

Auteurs: Mohamed Rafik SARI, Sabrina MAATALLAH, Rachid ADJABI and Lakhdar KHOICHEMANE.

Journal: Proceedings of the Institution of MECHANICAL ENGINEERS, Part J: Journal of Engineering Tribology (**Impact factor: 0.92, ISI THOMSON REUTERS**).

Editeur: SAGE Publications (United Kingdom).

Année: Août 2015.

Article 02:

Titre: Effect of Lubricant Contamination on EHL Rolling Contact: Response Surface Methodology.

Auteurs: Sabrina MAATALLAH, Mohamed Rafik SARI and Lakhdar KHOICHEMANE.

Journal: Engineering Transactions (**SCOPUS**).

Editeur: Institute of Fundamental Technological Research Polish Academy of Sciences, Warsaw National Engineering School of Metz Poznan University of Technology

Année: Janvier 2016.