

5/99

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département de Génie Mécanique



الدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

الدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Mémoire

En vue d'obtenir le Diplôme
d'Ingénieur d'Etat en GENIE MECANIQUE

Thème

**ETUDE ET CONCEPTION D'UNE MACHINE
A FROTTEMENTS**

Proposé et dirigé par :

D^r B. DEMRI

Etudié par :

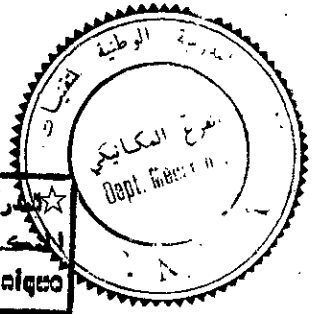
Mr. Chabane
HAMDIDOUCHE

dirigé par :

D^r B. DEMRI
M^{lle} N. AMOR

Année Universitaire 1998/1999

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE, 10 AVENUE HASSEN BADI EL-HARRACH ALGER.



DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

A ceux qui ont donné le meilleur d'eux même pour voir ce jour arrivé

A la mémoire de mon frère Mohamed Amokrane

À toi mon père à qui je dois tout ce bonheur

A toi ma mère, toi qui m'est la plus chère au monde

A mes frères et à mes sœurs

A tous mes amis qui sont pour moi des frères : Rabah, Farida, Nadia,
Rachid, Hachimi, Noredine, Kahina, Said, Mbarek, Nadine.....

REMERCIEMENTS

الطبعة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mon promoteur monsieur Boualem Demri, pour avoir dirigé mes travaux, aussi pour son aide, ses critiques, ses conseils et ses suggestions sur l'élaboration de ce travail.

Aussi, je tiens à remercier ma co-promotrice mademoiselle Amor de m'avoir aidé et pour les conseils qu'elle m'a donné.

Ainsi que monsieur Guergueb d'avoir accepté d'être président de jury, ce qui me fait honneur

Je remercie le D^r A. Benmebarek d'avoir accepté notre invitation.

De même à Mustapha fraiseur de l'atelier mécanique (ENP) de m'avoir aidé dans la réalisation des pièces.

De même à tous les enseignants qui, durant des longues années ont contribué à ma formation.

Mes remerciements vont également à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

intitulé de sujet :
Etude et conception d'une machine à frottements
Etudié par :
HAMDI DOUCHE CHABANE

Proposé et dirigé par :
B. DEMRI et N. AMOR

ملخص

الهدف الاساسي في هذا المشروع هو تصميم و انجاز آلة احتكاك لمخبر البحوث للبيومواد. هذه الآلة، بإمكاننا تحسينها بإضافة لها أجهزة أخرى، يسمح استعمالها الواسع في مختلف الاختبارات.

Résumé :

Le but de ce projet est la conception et la réalisation d'une machine à frottements qui sert d'outil pour le laboratoire de recherche des biomatériaux. La machine pourrait être améliorée en lui associant d'autres appareils de précision comme l'ampèremètre pour permettre une variété d'essais.

Abstract :

The purpose of this project consists to design and realize a friction - machine which will be used in the biomaterial research laboratory. This machine will be améliorated by adding other devices as an ampèremeter to allow a variety of experiment.

Mots clés :

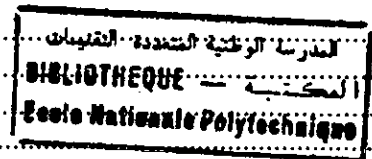
Usure - Machine à frottements - Frottement - Lubrification - Tribologie - Abrasion - Adhésion

Key words :

Usury (wear) - Friction machine - Friction - Lubrification - Tribology - Abrasion - Adhesion

INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I LES FROTTEMENTS ET LUBRIFICATION.....	2
I- LES FROTTEMENTS.....	2
I-1 Introduction.....	2
I-2 définition du frottement.....	2
I-3 lois empiriques du frottement.....	3
I-3-1 lois de léonard De Vinci.....	3
I-3-2 loi d'Amontons et coulomb.....	3
I-4 théories du frottement.....	4
I-4-1 frottement par roulement.....	4
I-4-2 frottement par glissement.....	4
I-5 Données sur les coefficients de frottement.....	8
I-6 énergie de surface.....	9
II LUBRIFICATION.....	9
II-1 Définition.....	9
I-II-2 Régimes de lubrification.....	10
CHAPITRE II USURE.....	11
II-1 Introduction.....	11
II-2 définition d'une usure.....	11
II-3 Types d'usure.....	11
II-3-1 usure adhésive.....	11
Usure sévère:.....	13
Usure modérée:.....	14
Grippage.....	14
II-3-1-1 théories sur l'usure adhésive.....	14
II-3-1-2 la force de frottement.....	15
II-3-1-4 taux d'usure.....	17
II-3-1-5 dimension d'une particule d'usure.....	17
II-3-1-6 comment combattre l'usure adhésive.....	18
II-3-2 usure abrasive.....	18
II-3-2-1 définition.....	18
II-3-2-2 aspects visuels des détériorations d'origine abrasives.....	18
II-3-2-3 théories de l'usure abrasive.....	19
II-2-2-4 dimensions des particules d'usure.....	19
II-2-2-5 formes des grains abrasifs.....	20
II-2-2-6 la charge appliquée.....	20
II-2-2-7 vitesse de glissement.....	20
II-2-2-8 usure par érosion abrasive.....	20
II-2-2-9 comment combattre l'usure abrasive.....	20
II-2-3 usure corrosive.....	21
II-2-3-1 Définition.....	21
II.2.3.2. Comment combattre l'usure corrosive.....	21
II.2.4. Usure par fatigue mécanique.....	21
II.2.4.1 Définition.....	21
II-2-4-2 La fatigue mécanique superficielle.....	22
II-2-4-3 La fatigue thermique.....	22
II-2-4-4 Usure par délaminage.....	22
CHAPITRE III FACTEURS DE L'USURE.....	24

III-1 Introduction.....	24
III-2 Matériau utilisé.....	24
III-3 Propriétés mécaniques.....	24
III-3-1 Traction.....	24
III-3-1-1 Diagramme de l'essai de traction.....	24
III-3-1-2 Contrainte de limite élastique.....	25
III-3-1-3 Résistance à la rupture (à l'extension) (R_c).....	25
III-3-1-4 Allongement pour cent.....	26
III-3-1-5 Module d'élasticité.....	26
III-3-2 Résilience.....	26
III-3-3 La fatigue.....	26
III-3-4 Traitement thermique des surfaces [10].....	27
III-4 conditions opératoires.....	28
III-4-1 la charge.....	28
III-4-2 la vitesse.....	29
III-4-3 la température.....	30
III-4-3-1 température ambiante.....	30
III-4-3-2 facteurs qui causent la production des calories.....	30
III-4-3-3 facteurs qui permettent l'évacuation des calories.....	30
III-4-4 temps de fonctionnement.....	30
III-4-5 mode de contact.....	31
III-4-6 le déplacement.....	31
III-5 Effets observables.....	31
III-5-1 résistance aux déplacement.....	31
III-5-2 Phénomènes thermiques.....	32
III-5-3 Variation de masse.....	32
III-5-4 Transformations géométriques.....	32
III-5-5 Vibrations.....	32
CHAPITRE IV ETUDE DESCRIPTIVE DE LA MACHINE À FROTTEMENT.....	33
IV-1 INTRODUCTION.....	33
IV-2 DÉFINITION DE LA MACHINE.....	33
IV-3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	33
IV-4 LES ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DE LA MACHINE.....	34
IV-4-1 Type de moteur.....	34
IV-4-2 Choix de la vitesse de rotation.....	34
IV-4-3 Étude de la transmission.....	35
IV-4-4 Le disque excentrique.....	36
IV-4-5 La glissière.....	36
IV-4-6 Les billes.....	37
IV-4-7 Les porte échantillons.....	37
IV-4-8 Système d'application de la charge.....	37
IV-4-9 Le bâti.....	38
IV-4-10 Le circuit électrique.....	39
CHAPITRE V CARACTÉRISTIQUES ET ÉTALONNAGE.....	40
V-1 INTRODUCTION.....	40



V-3 MONTAGE DES ÉCHANTILLONS.....	40
V-4 CARACTÉRISTIQUE DE LA MACHINE.....	40
V-5 PROCÉDURE DE DÉTERMINATION DU COEFFICIENT DE FROTTEMENT	42
V-6 MESURE DU TAUX D'USURE	43
CHAPITRE VI PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES ET RÉSULTATS	44
VI-1 INTRODUCTION.....	44
VI-2 LES ÉPROUVETTES (ÉCHANTILLONS).....	44
VI-3 CONDITIONS OPÉRATOIRES.....	44
VI-4 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION	45
CONCLUSION.....	49

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION

Introduction générale

Le phénomène d'usure par frottement est une science en tribologie qui ne cesse de se développer. L'usure se rencontre fréquemment dans notre environnement (usure des pneus d'une voiture), les machines simples ou complexes (moteurs électriques) ou même le corps humain (usure des prothèses articulaires, dentaires).

La tribologie dérive du mot grec "tribo" qui signifie frotter ou gratter, elle est définie comme la science qui étudie le frottement, la lubrification et l'usure. Cette science est gouvernée par des lois empiriques issues des résultats expérimentaux. Plusieurs appareils ont été mis en évidence pour les fins de cette science, mais leurs applications restent restreintes à cause de la pluralité des modes d'endommagement.

Vu que l'usure adhésive est le type d'usure le plus fondamental, notre appareil est conçu pour l'étude de ce type (frottement de deux surfaces planes sans particules érosives).

A fin de cerner le sujet, on a pris la démarche suivante :

Une première partie bibliographique classique, dans laquelle nous avons défini les différents types de frottements et les lubrifications, l'usure et les facteurs de l'usure.

La deuxième partie expérimentale dans laquelle nous avons conçu et réalisé la machine à frottements suivie d'un essai de fonctionnement pour tester notre machine.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I

FROTTEMENTS et LUBRIFICATION

Les frottements et lubrification

I les frottements

I-1 Introduction

Généralement tous les aspects de nos vies sont affectés par les phénomènes de frottement (friction) que ce soit d'une manière positive (marcher, arrêter, faire tourner une voiture, fixer une pièce sur une autre, tenir un objet à la main...) ou négative (grincement d'une porte...). Bénéfiques ou pas, pour être maîtrisés, les frottements doivent être décrits par leurs équations.

I-2 Définition du frottement

Le frottement peut être défini comme la force résistante tangentielle F_t à l'interface commune entre deux corps lorsque, sous l'action d'une force externe F , un corps (B) se déplace ou tend à se déplacer relativement à la surface de l'autre (A) (fig. I-1).

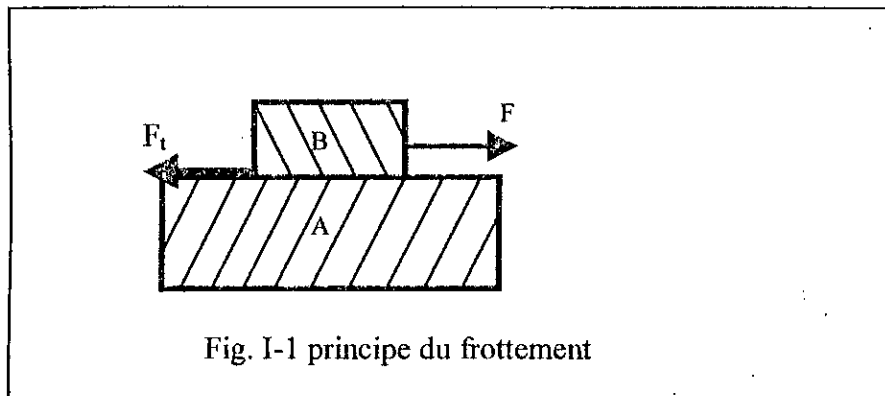


Fig. I-1 principe du frottement

On distingue deux sortes de frottement qui sont : [1]

- **Frottement externe** : c'est le frottement à la surface de contact de deux corps.
- **Frottement interne** : c'est le frottement observé lors du mouvement relatif d'élément de volume dans les solides, les liquides et les gaz.

I-3 Lois empiriques du frottement

Léonard de Vinci (1452-1519), a postulé que la force que l'on doit appliquer pour permettre le glissement d'un corps est proportionnelle à la charge et ne dépend pas de la surface de contact.

Après environ deux siècles, l'ingénieur français Amontons a énoncé en 1699 ces deux lois indépendamment des travaux de Léonard de Vinci. Une troisième loi a été introduite par Coulomb en 1785 qui a postulé que le frottement cinétique est à peu près indépendant de la vitesse de glissement [1].

Mais ces lois sont de nature empirique, et aucune loi fondamentale de la physique n'est violée dans le cas où ces lois ne sont pas respectées.

I-3-1 Lois de Léonard Dé Vinci [2]

1. La force de frottement est indépendante de la surface de contact entre deux corps rigides.
2. La force de frottement F_f est proportionnelle à la force normale F_n qui s'exerce entre les surfaces.

$$F_f = \mu * F_n$$

I-3-2 Loi d'Amontons et Coulomb [2]

1. La force de frottement est fonction de la nature des surfaces de contact et est indépendante de la vitesse relative entre celles-ci.

Remarque : Le coefficient de frottement n'est pas une propriété du matériau mais de l'ensemble du système tribologique (état de surface, matériau, lubrification...)[1].

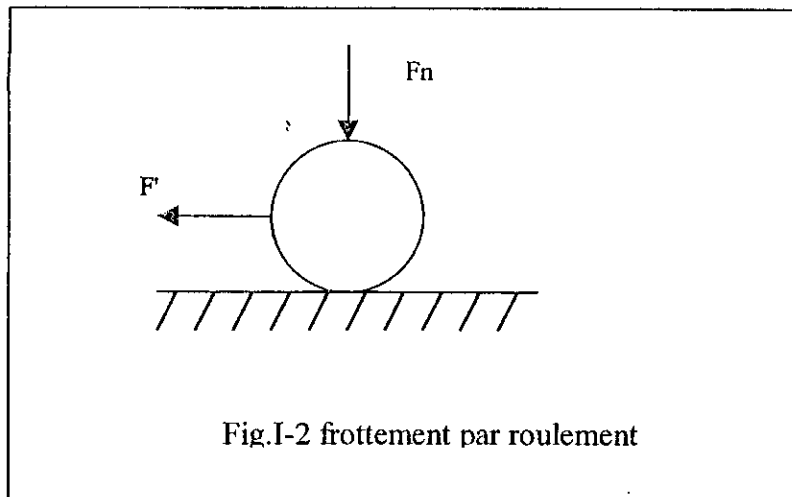
I-4 Théories du frottement

I-4-1 Frottement par roulement [3]

On sait bien qu'il est plus facile de faire rouler un corps que de le faire glisser. Dans le cas du roulement même si la vitesse relative des deux corps est importante, celle des parties en contact est pratiquement nulle.

Dans ce type de frottement, le coefficient de frottement est défini comme le rapport de la force F' appliquée au solide pour le faire rouler et la charge normale F_n (fig. I-2)

$$\mu = F' / F_n \quad (I-1)$$



Les coefficients de frottement de roulement sont très faibles par rapport aux coefficients de frottement de glissement. Chaque fois que l'on veut réduire la force de frottement au minimum, on a intérêt à utiliser le roulement au lieu du glissement.

I-4-2 Frottement par glissement [1]

Le modèle classique du frottement par glissement admet que la force de frottement résulte de deux sources : une force d'adhésion F_{ad} et une force de déformation au niveau des aspérités des surfaces F_{def} . Les aspérités de la plus part des surfaces sont déformées plastiquement sous la charge appliquée jusqu'à ce que la surface de tous les contacts soit suffisante pour supporter cette charge. On a alors :

$$F_n = A * P_0 \quad (I-2)$$

où A est la surface de contact apparente, P_0 la pression de transition élastique - plastique du matériau en contact et F_n la charge normale appliquée.

Si τ est la contrainte de cisaillement (force par unité de surface nécessaire pour cisailer les jonctions formées) et F_f la force de frottement, alors :

$$F_f = (A * \tau) + P_e \quad (I-3)$$

P_e tient compte du terme de la déformation nécessaire au labourage par les aspérités. P_e est généralement négligeable devant le terme $(A * \tau)$.

Des équations (3) et (2) nous aurons :

$$F_f = A * \tau = F_n * \tau / P_0 \quad (I-4)$$

$$\mu = F_f / F_n = \tau / P_0 \quad (I-5)$$

Ce qui montre que le coefficient de frottement est indépendant de la surface apparente de contact et est proportionnel à la charge.

Si on remplace τ par la contrainte critique de cisaillement τ_{\max} du plus tendre des matériaux en contact, le coefficient de frottement par adhésion sera donné par :

$$\mu_{ad} = \tau_{\max} / P_0 \quad (I-6)$$

De cette expression on remarque que pour réduire le coefficient de frottement il suffit de déposer une fine couche d'un métal tendre sur un substrat dur (P_0 élevé) qui supportera des charges importantes avec une faible contrainte critique de cisaillement. D'où l'importance de l'utilisation des fluides lubrifiants.

Ce modèle ne rend pas compte de l'influence de la force tangentielle sur la surface de contact réelle. C'est pour cette raison que le coefficient de frottement, qui devrait être au voisinage de 0.2, puisque pour la plus part des métaux τ_{\max} vaut $1/5p_0$, est généralement au-dessus de 0.5 dans l'air ambiant et même plus grand dans le vide.

La surface d'une aspérité isolée A est égale à F_n/P_0 , mais une force tangentielle F_t est appliquée sur cette aspérité, un écoulement supplémentaire surviendra, et la surface de contact sera alors définie comme suit :

$$A^2 = (F_n/P_0)^2 + \alpha(F_t/P_0)^2 \quad (I-7)$$

$(F_n/P_0)^2$ représente l'aire dérivée du modèle simple ne considérant que l'effet de la charge normale appliquée et $\alpha(F_t/P_0)$ est la contribution de la force de frottement ou de cisaillement.

Si $\tau_f = c * \tau_{\max}$ où τ_{\max} est la contrainte critique de cisaillement et c un paramètre inférieur à l'unité, τ_f est la contrainte critique de cisaillement de la couche superficielle de la masse (film contaminé), alors ce film se cisailera quand $F_t = \tau_f * A$

et

$$\mu = F_f / F_n = (\tau_f * A) / (P * A)$$

$$\mu_{ad} = c \sqrt{\alpha(1 - c^2)} \quad (I-8)$$

où $\alpha = P_0^2 / \tau_{\max}^2$

Le terme P_e qui tient compte de l'effet du labourage n'est pas négligeable dans les processus d'abrasion par des aspérités dures dans un matériau doux.

En considérant une aspérité conique de demi angle θ en contact avec une surface plane plus douce, durant le glissement, seule la surface de front de chaque aspérité est en contact. La projection verticale de l'aire en contact est donnée par :

$$A = n * (\pi * r^2 / 2)$$

Ainsi :

$$F_n = A * P_0 = n * (\pi * r^2 / 2) * P_0 \quad (I-9)$$

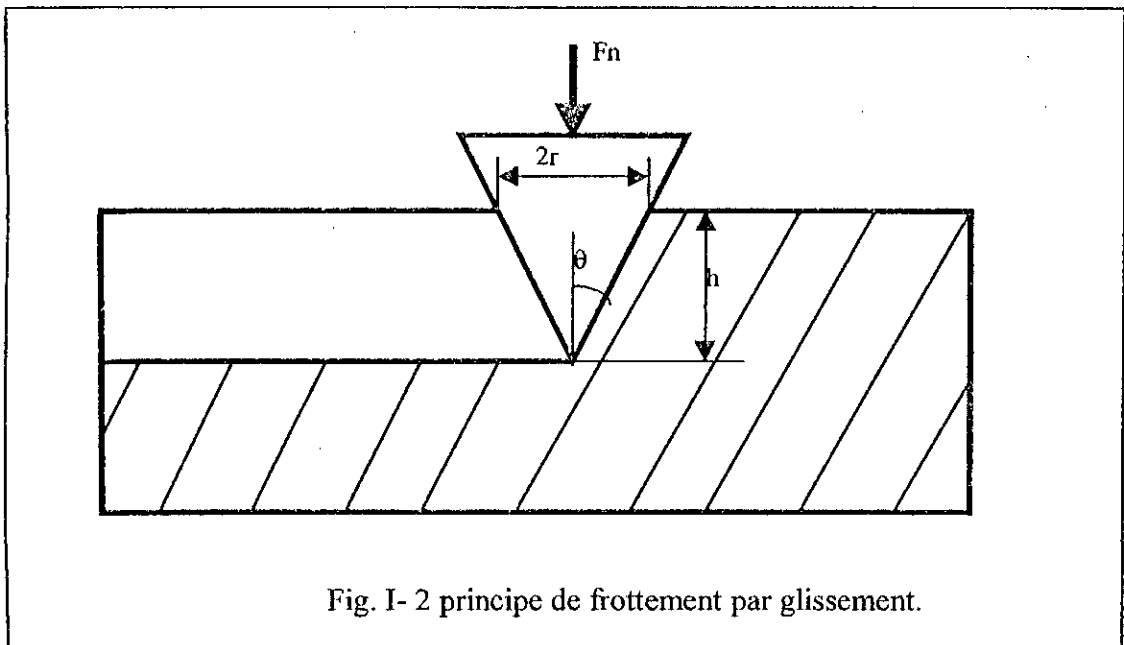
La force de frottement est obtenue en considérant l'aire totale déplacée par l'écoulement plastique projetée horizontalement.

$$F_t = n * r * h * p_0 \quad (I-10)$$

$$\mu_{def} = 2n * r * h * p_0 / (n * r^2 * \Pi * P_0) = 2h / \Pi * r \quad (I-11)$$

$$h / r = \cot g \theta$$

$$\mu = 2 \cot g \theta / 2$$



En pratique l'angle θ est très grand, car les aspérités sont émoussées. Alors, la contribution du labourage au frottement est très faible.

D'autre part la force de frottement peut s'écrire sous la forme :

$$F_f = A_v * \tau_{max} + A_h * P \quad (I-12)$$

A_v , A_h représentent respectivement les projections verticale et horizontale de la surface de contact. A_v est négligeable devant A_h ; par conséquent le terme du labourage est négligeable.

I-5 Données sur les coefficients de frottement [4]

Lorsque deux matériaux sont placés en contact, toute tentative pour faire glisser l'un sur l'autre se heurte à l'opposition d'une force de frottement (fig. I-3). La force F_s qui est juste suffisante pour provoquer le début du glissement relatif est reliée à la force F_n normale à la surface de contact par :

$$F_s = \mu_s * F_n \quad (I-13)$$

Où μ_s est le coefficient de frottement statique.

Une fois que le glissement est démarré, la force limite de frottement décroît légèrement, et on peut écrire :

$$F_k = \mu_k * F_n \quad (I-14)$$

A titre d'exemple le tableau I-1 regroupe des coefficients de frottement de quelques matériaux.

Matériau	Coefficient de frottement μ
Matériaux parfaitement propres dans le vide	$\mu > 5$
Métaux propres dans l'air	0.8 - 2
Métaux propres dans l'air humide	0.5 - 1.5
Acier sur métaux pour paliers (ex : plomb, bronze)	0.1 - 0.5
Acier sur céramique	0.05 - 1.0
Céramique sur céramique	0.05 - 0.5
Polymères sur polymères	0.05 - 0.1
Métaux et céramiques sur polymères	0.04 - 0.4
Lubrification de surfaces des métaux	0.05 - 0.2
Lubrification pour haute température	0.05 - 0.2
Lubrification hydrodynamique	0.001 - 0.005

Tableau I-1 coefficient de frottement de quelques matériaux

I-6 Energie de surface

Les liquides ont une énergie de surface ou mieux une énergie libre de surface, ce qui veut dire que les atomes ou molécules de surface ont une énergie supérieure à celle des atomes ou molécules à l'intérieur du liquide. Cette énergie est responsable des phénomènes de capillarité, de la formation de gouttes et de bulles et du ménisque des liquides. La formation des gouttes est une conséquence du principe physique qui veut que tout système tente d'atteindre l'état d'énergie minimale. Une sphère est la configuration qui possède le moins de surface et donc moins de liaisons libres. Les solides aussi possèdent une énergie de surface.

Les grandeurs importantes pour les frottements ne sont pas les énergies de surface γ_a et γ_b pour les corps a et b qui sont en contact mais l'énergie d'adhésion E_{ad} qui est donnée par :

$$E_{ad} = \gamma_a + \gamma_b - \gamma_{ab} \quad (I-15)$$

où γ_{ab} est l'énergie de l'interface a-b.

L'énergie E_{ad} correspond d'une manière au produit de la force de frottement multipliée par la distance de glissement nécessaire à la séparation des jonctions de contact. Alors de faibles valeurs de E_{ad} sont associées à de faibles valeurs de frottement.

Les métaux ont des énergies de surface relativement hautes. Il en résulte de hauts coefficients de frottement pour des surfaces métalliques.

II Lubrification

II-1 Rôle

Le rôle principal de la lubrification est de réduire le frottement et l'usure des surfaces en frottement en introduisant un film entre les surfaces en contact. Le lubrifiant est aussi utilisé pour :

- refroidir les surfaces de frottement par la réduction de la chaleur générée par friction et de la convection dans la matière.
- enlever les débris générés par le processus d'usure.

II-2 Principaux Régimes de lubrification [5]

Il existe trois régimes de lubrification. Ceux-ci sont donnés par le tableau ci-après.

Régime	Conditions d'essais	Processus de frottement
Limite	Très fin film d'huile dû à : faible vitesse, basse vitesse, charge élevée.	Adhésion et labourage par aspérités (usure sévère)
mixte	Le film d'huile croît en augmentant la vitesse / viscosité.	Le frottement pour cisaillement du fluide et des aspérités décroît en augmentant la réparation des surfaces.
Hydrodynamique	Film de l'huile séparant complètement les surfaces.	La résistance au cisaillement croît avec l'augmentation de l'épaisseur du film.

Tableau II.1 Principaux régime de lubrification.

CHAPITRE II



USURE

Usure

II-1 Introduction

Actuellement la durée du fonctionnement et la fiabilité des machines et mécanismes ne sont guère limitées par des ruptures brutales d'organes provoquées par un défaut de résistance des matériaux.

Le choix et les performances accrues de ces derniers, les méthodes modernes de calcul de la résistance et les techniques de réalisation et de contrôle des pièces éliminent de plus en plus les risques d'incidents graves. Mais les mécanismes sont toujours limités en durée de vie et en performance par les phénomènes d'usure.

II-2 Définition d'une usure [6]

L'usure est définie comme la perte de matière solide par une surface frottante. Elle est généralement dommageable mais elle peut être bénéfique comme dans le cas du rodage.

II-3 Types d'usure [7]

Les détériorations des surfaces dans les mécanismes sont en général dues à des phénomènes isolés ou simultanés dont les principaux sont : usure adhésive, abrasion, corrosion, fatigue mécanique. Il existe des formes d'usure qui sont moins importantes comme la corrosion de contact, l'usure par cavitation, l'usure d'origine électrique...

Le tableau II.1 regroupe ces types d'usure

Types fondamentaux d'usure	
Usure adhésive	Par contact métal-métal, microsoudures, transfert métallique et cisaillement des jonctions par frottement.
a) Sévère	Formation de gros fragments d'usure métalliques.
b) Modérée	Formation de très petits fragments d'oxydes.
Usure abrasive	Rayure d'une surface par aspérités dures ou par des particules véhiculées par un fluide. Si ces particules sont très petites : Erosion/abrasion.
Usure corrosive	Attaque chimique suivie par l'enlèvement des produits de réaction par action mécanique(frottement).
usure par fatigue	Enlèvement des particules détachées par fatigue mécanique superficielle produite par accumulation de contraintes cylindriques.
Types secondaires d'usure	
Usure sous petits débattements (fretting mécanique corrosion)	Enlèvement de matière entre deux surfaces soumises à des vibrations mécaniques.
Erosion par cavitation	Formation de cavités par éclatement (ou implosion de bulles de gaz ou de vapeurs incluses dans un fluide).
Usure d'origine électrique	
a) piquage électrique	Erosion par étincelles.
b) corrosion galvanique	Attaque électrolytique.

Tableau II-1 : classification des types d'usure

II-3-1 Usure adhésive[8]

L'usure adhésive est le type d'usure le plus fondamental, elle est due au cisaillement par frottement de microsoudures ou jonctions qui se forment entre deux aspérités en contact direct métal-métal.

transformation (oxydation, écrouissage...) avant de quitter l'interface. Les débris sont de dimensions 50 fois plus grandes que les particules initiales.

➤ *Grippage [5]*

D'un point de vue pratique, on distingue les conditions de frottement et d'usure «normale», qui correspondent à l'un ou l'autre des mécanismes d'adhésion, d'abrasion, de fatigue ou d'oxydation, et les conditions d'usure catastrophiques qui provoquent une destruction rapide du contact. La transition se manifeste normalement par une augmentation du coefficient de frottement. Ce phénomène est appelé "GRIPAGE". Dans la plus part des cas, il apparaît après une certaine durée de service car l'usure dégrade peu à peu le contact, augmentant progressivement le frottement. Dans la plus part des cas, le grippage apparaît après une forte dégradation.

L'échauffement local du contact favorise en général l'établissement des conditions de grippage. Dans certains cas extrêmes, il peut même provoquer la fusion de l'une ou des deux surfaces.

➤ *Usure modérée : [8]*

Les particules d'usure détachée du contact de très petites dimensions (100Å°) sont constituées d'oxyde métallique. L'usure douce est atteinte lorsque l'équilibre entre le taux de formation de surface métallique libre par contact intermétallique suivi d'un transfert de fragment et le taux de formation d'oxyde est atteint.

II-3-1-1 Théories sur l'usure adhésive [8]

Cocks et Antler ont observé, en se basant sur des essais expérimentaux, que la nature et la forme des particules d'usure ne dépendent pas de la surface en contact. En effet, les particules détachées lors du frottement d'un frotteur hémisphérique sur un plan et celles détachées lors du frottement plan sur plan sont identiques. Lors du frottement il apparaît des coins sur les deux surfaces en contact. Alors le métal transféré des coins suit la déformation plastique qui l'enroule puis le cisaille dans une direction légèrement inclinée par rapport à la direction du glissement.

Les particules d'usure peuvent se produire :

- de petits fragments qui tombent du coin;

- Le point se désintègre en un certain nombre de fragment.
- Le coin se détache en bloc et passe entre les surfaces.
- Le coin transfert est enlevé par frottement ultérieur.

II-3-1-3 La force de frottement [1]

La force de frottement est la somme de la force d'adhésion F_{ad} et la force de déformation F_{df} .

$$F_f = F_{df} + F_{ad} \quad (II-1)$$

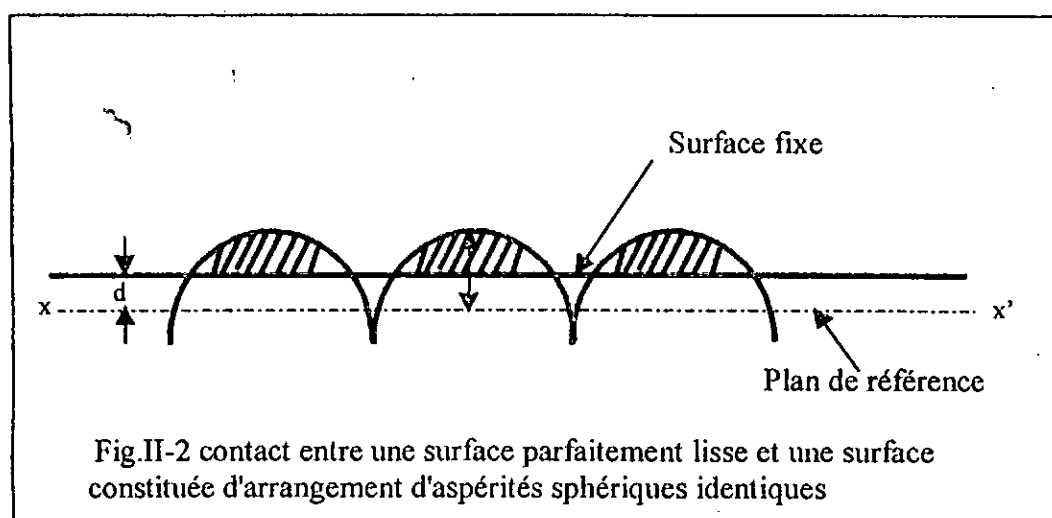
$$F_{ad} = A_r * \tau_c \quad (II-2)$$

F_{ad} est la force de frottement due à l'interaction surface-surface, A_r indique la surface réelle de contact et τ_c représente la contrainte de cisaillement résistant au mouvement relatif.

D'après les lois du frottement, la force de frottement est indépendante de la surface de contact apparente et est proportionnelle à la charge normale appliquée F_n .

Pour être en accord avec ces lois il faut montrer que la surface effective de contact A_r est proportionnelle à la charge F_n et est indépendante de la surface apparente A_{ap} .

Toutes les surfaces de contact effectives ont des aspérités ou plus précisément des collines et des vallées [Arnell et Col 1991] d'après la référence[1]. Considérons un modèle de contact entre deux surfaces: une surface parfaitement lisse et une autre constituée d'un arrangement d'aspérités sphérique identiques toutes de même hauteur z par rapport au plan de référence XX' (fig. 1).



Pour traiter cette surface simplifiée, nous analysons le contact d'une seule sphère avec un plan (fig. 2).

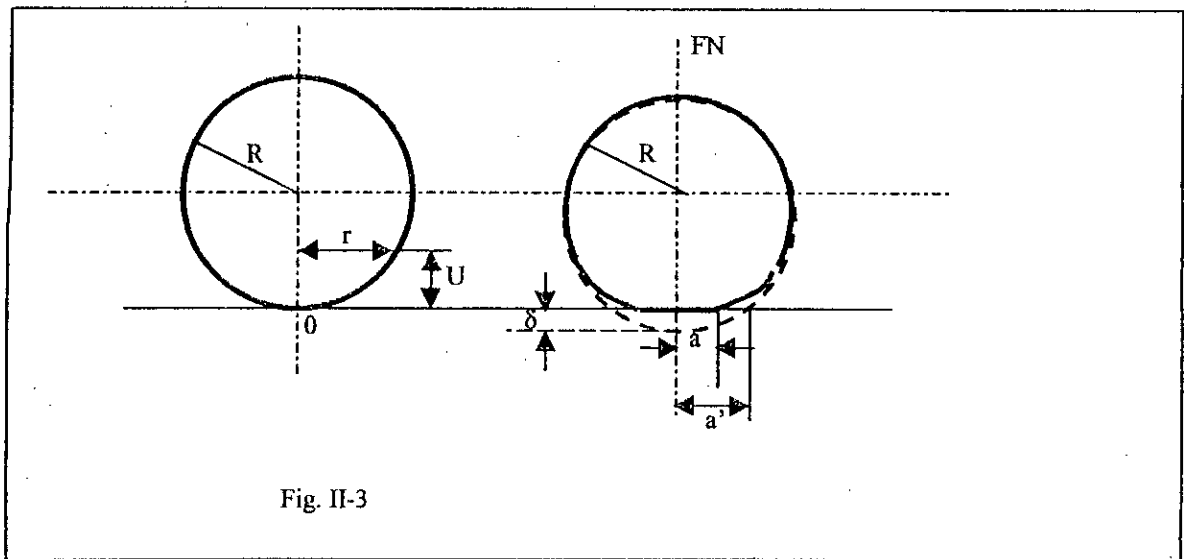


Fig. II-3

$$U = R - (R^2 - r^2)^{1/2} \quad (\text{II-3})$$

Si $R > r$ alors :
$$U = r^2 / 2R \quad (\text{II-4})$$

δ est la somme de l'aplatissement et du déplacement général de la surface dans la surface de déformation.

$$\delta = u + w = (a^2 / 2R) + w \quad (\text{II-5})$$

Au centre de la zone de contact $\delta = a^2 / R$

De la théorie du contact hertzien, le rayon de contact d'une sphère sur un plan est:

$$a = [3F_n * R / 4E]^{1/3} \quad (\text{II-6})$$

Il s'ensuit que :

$$\delta = [F_n^2 / E^2 * R] \quad (\text{II-7})$$

Le résultat exact est :

$$\delta_0 = \frac{3}{4} \left[\frac{F_n^2}{E^2 * R} \right]^{1/3} \quad (\text{II-8})$$

$$F_n = 4/3 E * R^{1/2} \delta_0^{3/2} \quad (\text{II-9})$$

$$a = (R * \delta_0)^2 \quad (\text{II-10})$$

$$A = \Pi * a^2 \quad (\text{II-11})$$

Chaque aspérité également et porte la même charge F_{ni} . $F_n = \sum_{i=1}^n F_{ni}$

En combinant les équations précédentes, nous aurons :

$$A = \left\{ \frac{F_n * 3 * a * \sqrt{n\Pi}}{4E} \right\}^{2/3} \quad (\text{II-12})$$

II-3-1-5 Taux d'usure [8]

J.F.Archad émis l'idée d'une certaine probabilité pour qu'une particule puisse se former à partir d'une jonction entre deux jonctions.

$$V = (\alpha * k * p * l) / 3Hv \quad (\text{II-13})$$

V: taux d'usure en volume.

α : coefficient du type du frottement, il est égal à 1 pour un frottement sec et inférieur à 1 dans un frottement lubrifié.

k: probabilité pour qu'un fragment d'usure se produise.

P, l, Hv : sont respectivement la charge, course de glissement et dureté Vickers.

II-3-1-6 Dimension d'une particule d'usure [8]

Considérant une particule d'usure ayant une forme hémisphérique. Pour que cette particule se détache sous forme de débris d'usure il faut que l'énergie élastique cumulée E_c fournie au fragment soit supérieure à l'énergie d'adhésion du fragment sur sa base E_{ad} .

$$E_c > E_{ad} \quad (\text{II-14})$$

Avec
$$E_c = \frac{v^2 \sigma_y^2 \Pi d^3}{24E} \quad (\text{II-15})$$

et
$$E_{ad} = Wab \frac{\Pi d^2}{4} \quad (\text{II-16})$$

σ_y : limite élastique du matériau le plus tendre.

d : diamètre de la particule.

ν^2 : coefficient de poisson.

E : module de Young.

A_b : énergie d'adhésion des deux matériaux en contact.

Où:
$$W_{ab} = \gamma_b + \gamma_a - \gamma_{ab} \quad (II-17)$$

II-3-1-7 Comment combattre l'usure adhésive

L'usure adhésive peut être réduite :

- En limitant la distribution de pression et/ou vitesse de glissement.
- En assurant un refroidissement convenable des surfaces (emploi d'un fluide réfrigérant, matériaux thermoconducteurs).
- Le choix du couple de matériaux a une influence majeure, car l'utilisation des couples de matériaux ayant de faibles interactions moléculaires entraîne une énergie d'adhésion faible donc le diamètre des particules petit et par conséquent un taux d'usure faible.
- En utilisant des matériaux durs afin de rendre difficile l'arrachement des particules.
- Choix des matériaux non similaires ou non identiques entre eux.

II-3-2 Usure abrasive

II-3-2-1 Définition

L'usure par abrasion est un processus d'usure par déplacement et/ou enlèvement de matière de la surface frottante d'une pièce mécanique sous l'action d'aspérités dures. On distingue deux sortes d'usure abrasive [8]:

- ❖ La première due à l'enlèvement des particules du métal le plus tendre par les aspérités du métal le plus dur. Elle est dite "usure à deux corps"
- ❖ La seconde qui est dite "usure par abrasion à trois corps", est provoquée par des particules dures véhiculées entre les deux surfaces en contact qui sont soit enchâssées dans l'une des surfaces en contact soit, étrangères à ces deux surfaces.

II-3-2-2 aspects visuels des détériorations d'origine abrasives [8]

Les surfaces soumises à l'abrasion présentent des sillons dans le sens du glissement qui peuvent aller de la rayure légère au sillon profond de chariotage.

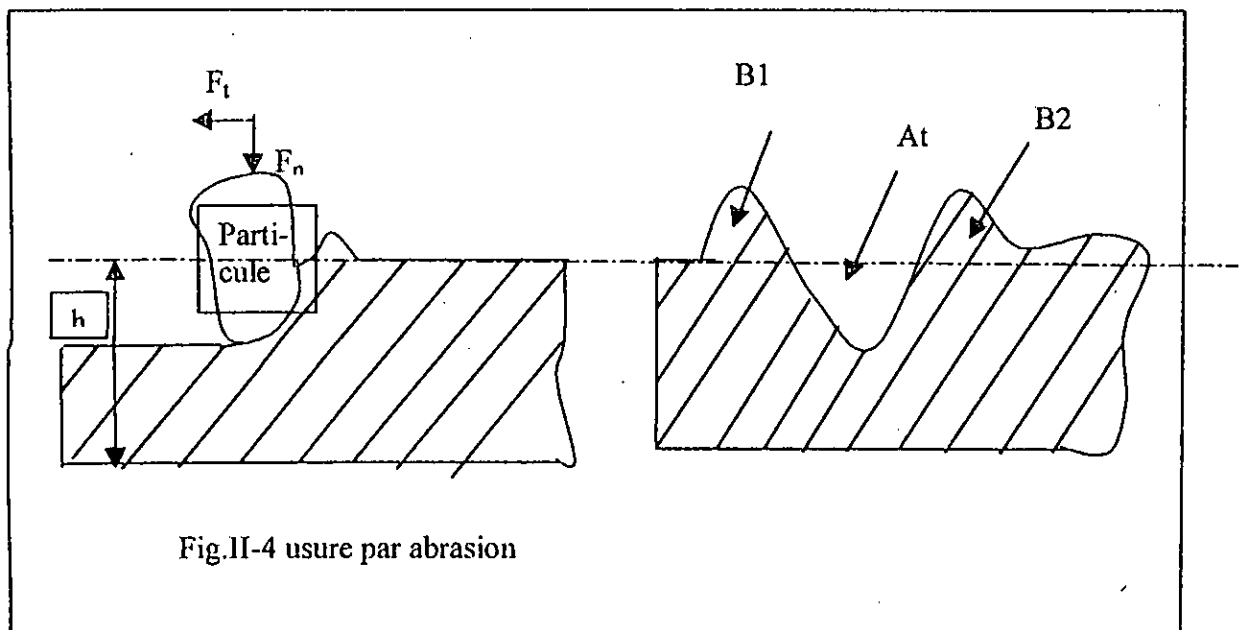
II-3-2-3 Théories de l'usure abrasive [1]

Le taux d'usure en volume par unité de longueur est donné par :

$$dV/L = K_{abr} * p / H_v \quad (\text{II-18})$$

où p est la charge normale appliquée, H_v dureté de la surface la plus tendre et K_{abr} le coefficient d'abrasion qui ne dépend que de la géométrie des particules d'abrasion (pour un cône d'angle θ . $K_{abr} = 2 \cot g\theta / \Pi$).

En se reportant à la figure ci-après on peut mesurer les différents taux par abrasion K^{ab} .



- Taux d'usure abrasive linéaire $K^{ab}_l = H/l$
- Taux d'usure par abrasion volumique $K^{ab}_v = S_{ab} * A_t = \delta V / L$
- Taux d'usure abrasif pondéré $K^{ab}_p = \Delta G / L$
- Taux d'usure par abrasion énergétique $K^{ab}_e = (\Delta V / L) / (L * F_t) = K^{ab}_v / (L * F_t)$

II-3-2-4 Dimensions des particules d'usure

Le taux d'usure d'une surface augmente rapidement avec la grosseur des grains abrasifs puis varie d'autant moins que la dureté du métal est plus grande [8].

II-3-2-5 Formes des grains abrasifs

La forme des grains abrasifs représente une très grande importance sur le taux d'usure, mais moins importante que la dureté de ce grain [8].

II-3-2-6 La charge appliquée

Le taux d'usure est directement proportionnel à la charge appliquée jusqu'à une certaine valeur critique caractérisée par la limite plastique massive de la surface. La relation n'est pas linéaire aux faibles charges pour de très petites dimensions des particules [6].

II-3-2-7 Vitesse de glissement

Le taux d'usure augmente légèrement pour les faibles vitesses (1 à 2m/s) puis devient pratiquement indépendant de la vitesse [6].

II-3-2-8 Usure par érosion abrasive[8]

L'usure érosive est une forme d'usure abrasive due au contact avec un fluide en mouvement relatif contenant des particules solides très dures et très fines. Pour ce type d'usure, le taux d'usure en volume enlevé d'une surface ductile de dureté H_v , par collision d'une particule érosive de masse M , et possédant une vitesse d'approche U s'exprime par :

$$\Delta V = (c * M * U^2 / H_v) * f(\alpha) \quad (II-19)$$

II-3-2-9 Comment combattre l'usure abrasive

Il convient d'empêcher les particules abrasives d'arriver jusqu'aux surfaces de contact et ceci :

- en assurant une bonne étanchéité des organismes (joints efficaces, soufflets élastiques, ...)
- en filtrant les fluides susceptibles de véhiculer des contaminants abrasifs.

Dans le cas de l'abrasion à deux corps, on peut jouer sur l'état de surface en utilisant des procédés d'usinage spéciaux afin de réduire au maximum les aspérités aiguës.

- Choix des matériaux non similaires ou non identiques entre eux.

II-3-3 Usure corrosive

II-3-3-1 Définition

C'est l'enlèvement par frottement mécanique des produits de réaction formés par attaque chimique des surfaces métalliques par des agents chimiques corrosifs contenus dans l'ambiance

Dans le premier stade, les surfaces sont soumises à une attaque corrosive dont la vitesse initialement rapide, puis diminue dans le temps avec la formation d'un film cohérent plus ou moins protecteur sur les surfaces, formé selon les cas d'oxyde métallique, de sels organiques, de soufre, chlorure, phosphate...

Quelques fois l'attaque chimique garde une vitesse de réaction constante. Les produits des réactions étant alors soit des liquides ou des gaz, soit des solides poreux fragiles ou non adhérents [8].

Le second stade de l'usure corrosive consiste en l'enlèvement par frottement des produits de réaction des surfaces. Dans ce cas les surfaces sont dénudées et exposées de sorte que l'attaque chimique se poursuit [8].

II.2.3.2. Comment combattre l'usure corrosive

Ce type d'usure peut être réduit ou même éliminé en utilisant des revêtements des surfaces travaillant en milieu corrosif. Ces revêtements fournissent une barrière entre le métal de base et l'environnement corrosif et peuvent aussi garantir une fonction anti-usure et / ou réduire le frottement. On peut aussi utiliser des lubrifiants en vue de protection de ces surfaces soumises au phénomène de corrosion et le choix des matériaux inoxydables permet d'éliminer complètement ce type d'usure (acier inoxydable, les alliages en titane et en aluminium)

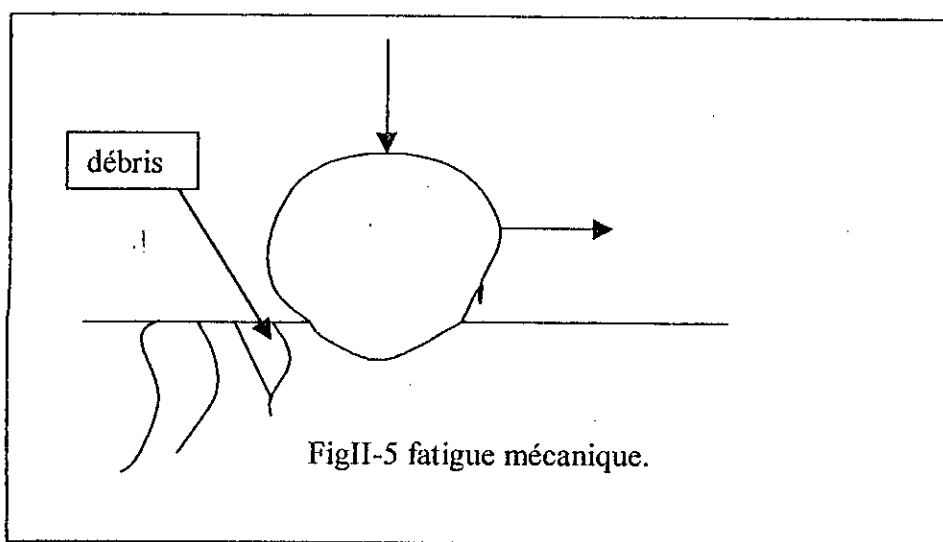
II.3.4. Usure par fatigue mécanique

II.3.4.1 Définition

C'est l'enlèvement de matière des surfaces dures et fragiles frottantes dû aux fissurations causées par des contraintes élevées ou des gradients thermiques élevés sur ces surfaces.

II-3-4-2 La fatigue mécanique superficielle [7]

Les détériorations se produisent essentiellement entre deux surfaces lubrifiées en régime élastohydrodynamique caractérisées par une charge importante entraînant une distraction des contraintes hertziennes et par un mouvement de roulement pur ou de roulement et de glissement combinés. Au début, des fissurations commencent à apparaître sur la surface superficielle puis se développent en forme de « V » d'où la naissance d'un débris d'usure. Fig.(II-5).



II-3-4-3 La fatigue thermique [8]

Elle est d'origine thermique, affecte essentiellement les surfaces dans des matériaux fragiles (céramique, carbures, nitrures, couches trempées cémentées ...) dont la résistance à la traction est faible par rapport à la résistance à la compression ($R_t < R_c / 3$).

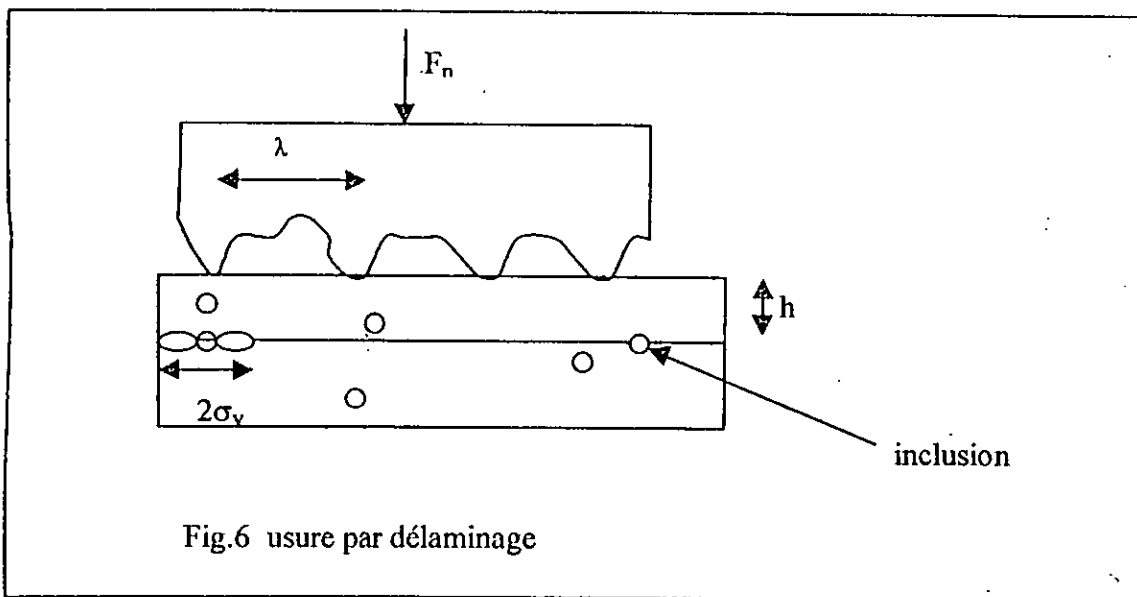
Lorsque celles-ci sont soumises à des gradients thermiques élevés les détériorations se présentent sous formes de fissures superficielles soit de parties uniformément, soit le plus souvent, dirigées perpendiculairement à la direction du glissement.

II-3-4-4 Usure par délaminage [9]

Sous certaines conditions, des fissures de fatigue se forment dans un plan parallèle à la surface de contact, à quelques micromètres de profondeur. Dès qu'une telle fissure atteint une taille critique, une rupture donne naissance à une particule d'usure.

Les fissures se forment en dessous de la surface de contact, car la contrainte de cisaillement σ_y est maximale à une profondeur h de la surface de contact.

Les différents mécanismes peuvent contribuer à la création de fissures, une hypothèse plausible postule que les fissures partent de cavités qui se forment au voisinage d'inclusions non métalliques. La figure ci-après indique schématiquement ce modèle. Une surface rugueuse est dure glisse sur un métal contenant des inclusions non métalliques rigides. Une distance moyenne sépare les aspérités de la surface rugueuse. Chaque contact d'une aspérité avec l'échantillon mou provoque un incrément de déformation par cisaillement, à une profondeur h de dimensions de même ordre que les dimensions des aspérités données par leurs rayons. Des fissures naissent aux cavités situées dans ce plan et croissent à chaque cycle de déformation.



Modèle de l'usure par délaminage: les fissures se développent aux inclusions situées à une profondeur h de la surface.

Le volume enlevé (taux d'usure) est donné par :

$$V = (1/N_{crit}) * F_n * L/H \quad (\text{II-20})$$

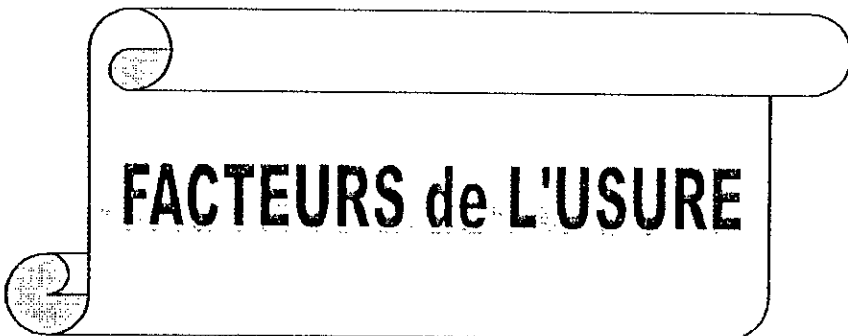
N_{crit} : Nombre de cycle critique.

L : distance de glissement.

H : Dureté.

F_n : charge normale.

CHAPITRE III



FACTEURS de L'USURE

Facteurs de l'usure

III-1 Introduction

Les détériorations causées par les frottements dans les organes de machines dépendent essentiellement du matériau utilisé, de ces propriétés mécaniques, physiques, chimiques, métallographique et traitement de surface...

III-2 Matériau utilisé

Le comportement tribologique et particulièrement l'usure des métaux est déterminée par plusieurs paramètres : dureté, ténacité, résistance à la fissuration, écrouissage, instabilité mécanique, déformation qui dépend étroitement de la microstructure du métal.

Cependant un matériau de microstructure donnée pourra avoir un comportement tribologique différent en fonction du mode d'endommagement dominant (adhésion, abrasion, corrosion....)

Du point de vue pratique, le choix ou l'optimisation d'un métal pour des fins tribologiques doit tenir compte du mode de d'usure auquel le matériau sera soumis pendant le service.

III-3 Propriétés mécaniques[11]

III-3-1 Traction

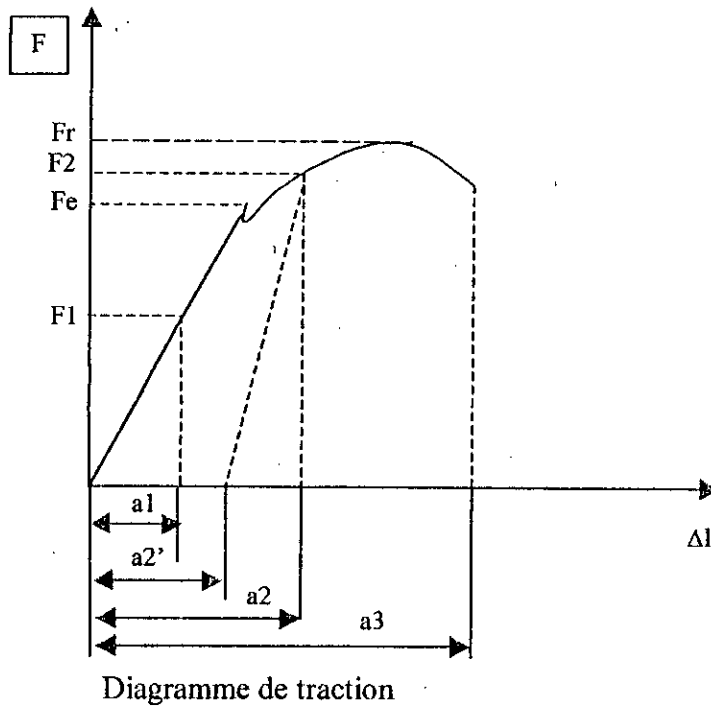
Une pièce est soumise à la traction simple lorsque la résultante des efforts auxquels elle est soumise tend à l'allonger et qu'elle est dirigée suivant son axe.

III-3-1-1 Diagramme de l'essai de traction

- La partie OB correspond à une période de déformation où les allongements sont proportionnels aux charges. C'est la déformation élastique.

- Le point B marque la fin de l'élasticité, la charge correspondante F_e est la charge de limite élastique
- La partie BCDK correspond à une période des grands allongements qui croissent plus vite que les charges

En fin pour un effort F_r la rupture a lieu après l'étranglement de l'éprouvette dans sa partie médiane (striction)



III-3-1-2 Contrainte de limite élastique

C'est le quotient de l'effort de limite élastique F_e exprimé en newtons, par la section initiale de l'éprouvette en mm^2

$$R_e = F_e / S \quad (\text{III-1})$$

III-3-1-3 Résistance à la rupture (à l'extension) $(R_r)_e$

C'est le quotient de l'effort de rupture F_r [N] par la section initiale de l'éprouvette exprimée en mm^2 :

$$(R_r)_e = F_r / S \quad (\text{III-2})$$

III-3-1-4 Allongement pour cent

l'allongement de rupture a_r est égal à la différence des longueurs de l'éprouvette après rupture L' et avant l'essai L_0

$$a_r = L_a' - L_0$$

L'allongement pour cent :

$$A\% = (L' - L_0)100/L_0 \quad (\text{III-3})$$

III-3-1-5 Module d'élasticité

Si a désigne l'allongement de limite élastique, l la longueur initiale de l'éprouvette et F_e l'effort de la limite élastique on a : $i = a/l$ (ou i est appelé allongement relatif élastique).

Le module d'élasticité E est donné par la relation :

$$E = Re'/i = (Fe/S)/(a/l) [N/mm^2] \quad (\text{III-4})$$

III-3-2 Résilience

C'est la résistance d'un corps aux efforts brusques (choc). Un choc est caractérisé par l'énergie qu'il met en jeu. La résilience K est donnée alors par :

$$K = \text{énergie mise en jeu} / \text{section de l'éprouvette}$$

III-3-3 La fatigue

Les essais de traction, compression, choc, dureté ne permettent pas de qualifier les matériaux en vue de toutes leurs applications, car ces essais supposent des efforts simples et constants. Or dans la plus part des applications, les efforts sont variables et les percussions répétées.

III-3-4 Traitement thermique des surfaces [10]

Les traitements thermiques des surfaces ont pour objet de modifier les caractéristiques mécaniques et les propriétés des métaux.

Les différents traitements, leurs modes opératoires et les modifications caractéristiques apportées pour chaque traitement sont représenté dans le tableau suivant :

nom	Mode opératoire	Modification des caractéristiques
trempe	Chauffer la pièce à une température T dite de trempe puis refroidir rapidement par immersion dans un fluide T est supérieur à la température de transformation.	Résistance (Rr) \uparrow Dureté H \uparrow Allongement A% \downarrow Résilience K \downarrow A%: malléabilité
Revenu (Ne s'applique qu'aux aciers trempés)	Chauffer la pièce à une température t inférieur à la température de trempe et la laisser refroidir lentement.	
recuit	Chauffer le métal à une température supérieure ou au moins égale à la température de trempe. Refroidir lentement (dans le four - portes fermées ou dans le sable)	
vieillessement	Laisser le métal à l'air libre pendant plusieurs mois ou le chauffer à 200°C plusieurs centaines d'heures.	Suppression des tensions internes résultant d'un forgeage, d'un usinage à l'outil ou à la meule ou faisant suite à un refroidissement (pièces coulées ou trempées).
cémentation	Opération qui permet de transformer en acier l'extérieur des pièces qui sont en acier doux. Placer les pièces en contact avec du ciment (corps riche en carbone). Chauffer à une température de 900°C, maintenir en température	Les couches externes des pièces étant transformées en acier dur sur une épaisseur de 1mm environ peuvent être trempées et acquérir ainsi une grande dureté(double trempe). L'intérieur, qui reste en acier

	<ul style="list-style-type: none"> • 2à3 h pour le ciment liquide. • 8à10 h pour le ciment solide. 	doux, a une grande résistance.
Malléabilisation (ne s'applique qu'à certaines fontes blanches)	Traitement ayant pour but de donner de la malléabilité et de la résistance aux pièces coulées en fonte blanche. Les pièces sont mises dans des caisses contenant des oxydes de fer (procédé européen), des scories ou des corps neutres (procédé américain). La chauffer à 900°C ou 950°C comprend une chauffe de 36h. Un maintien en température de 72h et un refroidissement de 36h.	<p>Les pièces de formes compliquées sont coulées en fonte blanche</p> <p>Pour les couches minces traitées par le procédé européen, le métal est transformé en acier. Pour les pièces épaisses, traitées par le procédé américain, il se produit un recuit de la fonte.</p> <p>Dans les deux cas le métal est devenu plus résistant, plus résilient et plus malléable.</p>
Nitruration (ne s'applique avantageusement qu'aux aciers et fontes spéciales, contenant de l'aluminium et du chrome)	Durcissement des surfaces des pièces par l'action de l'azote. Mettre les pièces dans une caisse étanche ou arrive un courant de gaz d'ammoniac. chauffer à 520°C entre 60 et 90h puis refroidir lentement	L'épaisseur de la couche durcie est de 0.5 à 1mm. Pour obtenir le durcissement, il est inutile de tremper (dureté bien supérieure à celle des aciers trempés. Ce traitement peut s'appliquer sur des pièces déjà usinées.
Sulfinitation (s'applique à tous les aciers et fontes)	Augmentation de la résistance à l'usure par l'action combinée du soufre, de l'azote et du carbone. Immersion des pièces dans un bain de sels portés à 570°C comprenant du cyanure de sodium et du sulfite de sodium. Tenir là 3 h puis refroidir lentement.	La couche extérieure a une excellente résistance à l'usure sans augmentation de la dureté superficielle. Epaisseur de la couche traitée 0.15 à 0.3 mm. Il est possible de rectifier les pièces après traitement.
Carbonituration (s'applique aux alliages ferreux et plus pratiquement aux aciers).	Chauffer la pièce à une température comprise entre 750 et 850°C, dans une atmosphère comprenant de l'oxyde de carbone (gaz d'éclairage ou carbure d'hydrogène craqué) et du gaz ammoniac. Durée de chauffe : 2 à 3 h Trempe à l'huile pour durcir la surface extérieure.	La couche extérieure est durcie grâce à l'action combinée du carbone et de l'azote. L'épaisseur durcie est assez faible, la résistance à l'usure est grande, une trempe à l'huile étant suffisante.

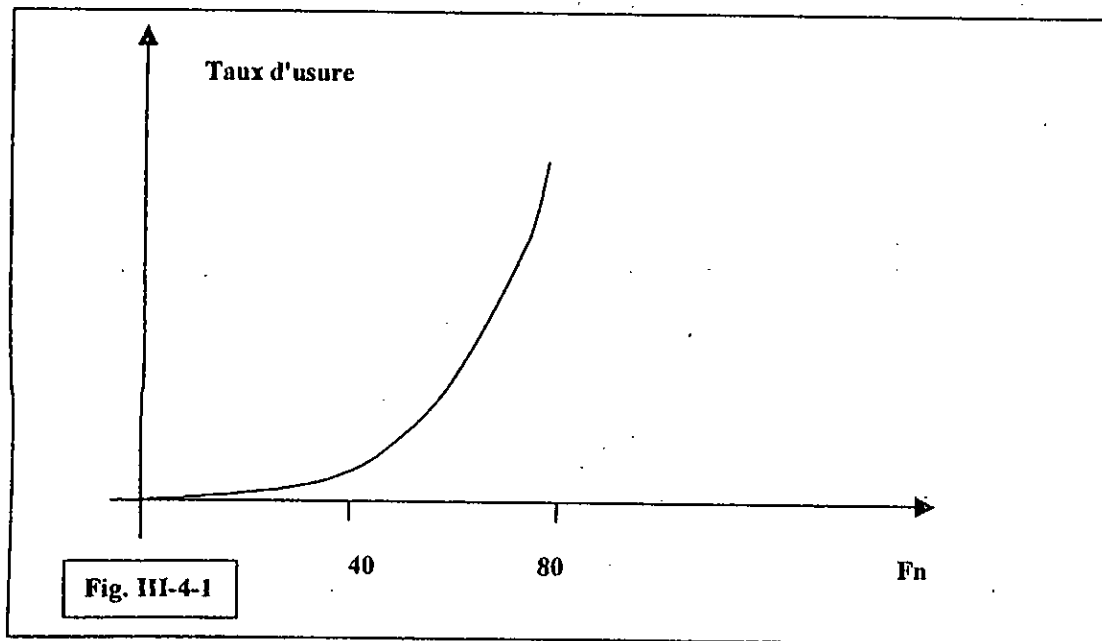
III-4 Conditions opératoires

III-4-1 La charge

C'est la résultante des projections sur la normale en chaque point de contact appliqué avant ou après le début de glissement. Elle peut, dans une expérience donnée, prendre une

valeur constante ou varier de façon progressive. Elle est de l'ordre de 10^{-6} N dans le cas de certains mécanismes (horloge), mais peut atteindre 106N dans le cas de l'industrie routière.

Les spécialistes dans la tribologie admettent qu'en général, l'usure croit proportionnellement à la charge appliquée. A faibles vitesses, l'influence de la charge sur le taux d'usure est représentée sur la fig.IV-1 pour le frottement de polyamide sur acier XC38



III-4-2 la vitesse[12]

Pendant le glissement il y a accrochage entre les aspérités. Il en résulte :

- un dégagement de chaleur
- une détérioration de la couche superficielle d'oxyde.

si la vitesse de déplacement est faible :

- les calories peuvent s'évacuer dans la masse.
- le film d'oxyde a le temps de se former.

Si la vitesse est élevée :

- les calories s'accumulent, la température s'élève.
- le film d'oxyde n'a pas le temps de se former, il y aura contact direct métal-métal, et l'usure devient par conséquent importante.

III-4-3 la température

Lors du frottement de deux corps, l'énergie fournie pour vaincre la résistance au déplacement due au frottement se dégrade en chaleur.

III-4-3-1 température ambiante

Toute augmentation de la température ambiante, se rapporte intégralement sur la température de fonctionnement.

III-4-3-2 facteurs qui causent la production des calories

- Le coefficient de frottement qui dépend de nature et l'état des surfaces en contact
- La vitesse de déplacement.
- La charge appliquée sur les surfaces.

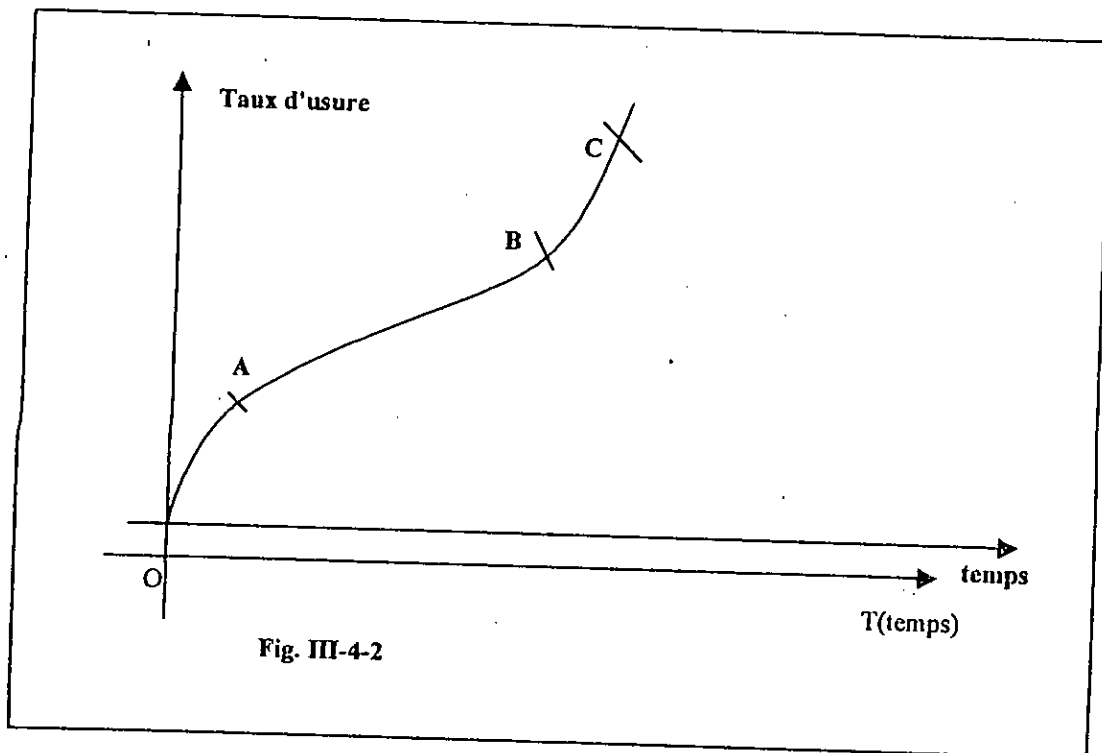
III-4-3-3 facteurs qui permettent l'évacuation des calories

- Caractéristiques des métaux (matériaux).
- Le type, la qualité et le débit du lubrifiant.

III-4-4 temps de fonctionnement

Le temps de fonctionnement est un paramètre important dans l'usure des pièces, pour cela, chaque constructeur prévoit pour sa machine ou pour un de ces organes un temps de fonctionnement déterminé.

La perte de matière d'un matériau au cours du temps est représentée dans la fig. IV-2 où la partie OA montre une évolution rapide de la perte de matière, c'est le rodage ; la partie AB montre l'utilisation normale de l'organe, la perte de matière est faible et régulière, c'est une fonction linéaire du temps. Puis sous l'effet des usures inimitables, les jeux augmentent, la lubrification se fait mal, les efforts deviennent exagérés et le matériau est détérioré. La partie BC traduit cette phase de destruction de l'organe mécanique.



III-4-5 mode de contact

Il existe trois types de contact :

- Contact ponctuel (sphère /plan).
- Contact linéaire (cylindre/plan ou cylindre mâle dans un cylindre femelle)
- Contact surfacique (plan/plan).

III-4-6 le déplacement

Le taux d'usure augmente proportionnellement avec la distance de glissement (il suit une fonction linéaire).

III-5 Effets observables

III-5-1 Résistance au déplacement

La résistance se concrétise par la mesure du couple de roulement, de pivotement ou des forces de frottement dans le cas de frottement par glissement.

Les formes de frottement sont exprimées en fonction du coefficient de frottement; il y en a trois cas :

- Les destructions superficielles sont faibles : le coefficient de frottement est constant.
- Les destructions superficielles sont importantes : le coefficient de frottement évolue aléatoirement au cours de l'essai.
- Le phénomène de glissement saccadé : il existe une différence entre le coefficient de frottement statique et le coefficient de frottement dynamique ce qui provoque l'évolution de celui-ci en fonction du temps sous une allure oscillatoire de relaxation de période et d'amplitude constantes.

III-5-2 Phénomènes thermiques

C'est les détériorations observées sur les surfaces frottées causées par des sollicitations thermiques critiques, ces phénomènes sont, pour l'essentiel les fissurations des surfaces, le changement de couleur qui signifie le changement de phase des matériaux et la fragilisation de ces derniers.

III-5-3 Variation de masse

L'usure est définie par la perte progressive de matière des pièces frottantes. La mesure de l'usure peut être caractérisée par une diminution de hauteur Δ_h (diminution unidirectionnelle), mais la mesure d'usure la plus courante est la perte de masse.

III-5-4 Transformations géométriques

Après une durée de fonctionnement d'une pièce, une variation de masse est observée, mais aussi une déformation géométrique peut apparaître (cas des matériaux tendres).

III-5-4 Vibrations

L'usure par frottement en petits débattements désigne une altération due à des mouvements alternatifs de haute fréquence et de faible amplitude. De tels mouvements proviennent notamment des vibrations émises par une machine ou une installation. Contrairement à l'usure due au glissement, lors du frottement par petits débattements, les débris d'usure ne sont pas évacués du contact. Ils peuvent donc agir comme abrasifs. En plus, la chaleur ne se dissipe que difficilement. Et la déformation plastique des aspérités de surface subit une inversion à chaque demi-cycle, ce qui peut provoquer une dégradation par fatigue.

CHAPITRE IV

ETUDE DISCRIPTIVE de LA MACHINE à FROTTEMENT

Etude descriptive de la machine à frottement

IV-1 Introduction

Notre travail est basé sur : la conception et la réalisation d'une machine qui sert d'outil de laboratoire pour les essais tribologiques. $P=F/S=1\text{Kg}\cdot 10/10^{-4}=105\text{Pa}\approx 1\text{Mpa}$, Pour cela, les éléments constitutifs (machine) doivent être de petites dimensions et de poids minimaux, en garantissant un bon fonctionnement. Les pressions atteintes sont environ de 1Mpa, c'est l'ordre de grandeur des pressions exercées dans les articulations du corps humain.

IV-2 Définition de la machine

La machine sert pour la mesure du coefficient de frottement ainsi que la détermination du taux d'usure entre deux pièces en frottement.

Le principe consiste à frotter deux pièces l'une sur l'autre par la transformation du mouvement rotatif d'un moteur électrique en un mouvement rectiligne oscillatoire du porte-échantillon sur lequel est fixé un échantillon. Le deuxième échantillon est fixé sur un système qui permet l'application d'une charge normale bien déterminée sur la surface de contact des deux échantillons (compression d'un ressort).

IV-3 Principe de fonctionnement

Le principe de base consiste à transformer un mouvement de rotation d'un moteur en un mouvement de va et vient par l'intermédiaire d'un montage bielle manivelle classique.

Ayant un moteur électrique tournant à une vitesse de rotation de $N(\text{tr}/\text{mn})$ réglable à l'aide d'un variateur électrique, en modifiant la tension entre les bornes du moteur, un disque sur lequel est prévu un système d'excentrique est fixé par blocage sur l'axe du moteur afin qu'il reçoive la même vitesse de rotation que celle de l'axe du moteur. Une bielle guidée en translation dans une glissière, est en articulation cylindrique avec le maneton de l'excentrique. Le porte échantillon sur cette bielle reçoit alors un mouvement oscillatoire rectiligne. L'autre échantillon étant fixe sur un autre système immobile sur l'axe du mouvement XX qui permet l'exercice d'une force normale à la surface de contact des deux échantillons (voir schéma de principe).

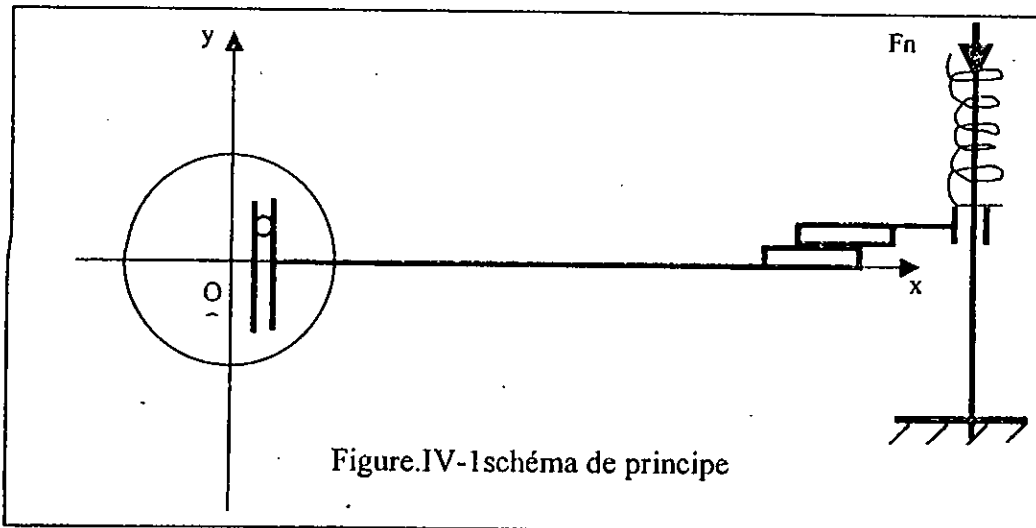


Figure.IV-1 schéma de principe

IV-4 Les éléments constitutifs de la machine

IV-4-1 Type de moteur [13]

Les essais de tribologie en laboratoire sont généralement faits à de faibles charges. Pour cette raison le moteur électrique peut être de petite puissance.

Les caractéristiques techniques du moteur pour notre travail, doivent être confirmés aux données fondamentales de la machine à l'ambiance de l'essai et au réseau électrique d'alimentation. Le moteur utilisé est un moteur de récupération monophasé qui fonctionne sous 220V pour une vitesse de 4000tr/mn.

IV-4-2 Choix de la vitesse de rotation

Les paramètres essentiels sur lesquels nous pouvons jouer pour les essais prévus sur notre machine sont : la charge et la vitesse de glissement relative entre les pièces frottantes (échantillons). Cette vitesse est liée à la vitesse de rotation du moteur. En se rapportant à la figure IV-2, la vitesse de glissement peut être calculée de la manière suivante.

Lorsque le moteur tourne à une vitesse de N [tr/mn], la position du point A par rapport à l'origine 0 est donnée par la somme de la longueur L qui est la longueur de la bielle du point A situé sur l'échantillon jusqu'à l'axe de la rainure de cette bielle et l'abscisse du point de fixation du maneton sur le disque excentrique qui est :

$$r \cos\theta = r \cos \omega t$$

alors:
$$X_a = L + r \cos \omega t \quad (IV-1)$$

La vitesse V_a du point A est donc la dérivée première de X_a par rapport au temps :

$$V_a = dX_a / dt = -r \omega \sin \omega t \quad (IV-2)$$

La vitesse moyenne de glissement (ou du point A) est :

$$\bar{V} = 4r \omega / 60 \dots$$

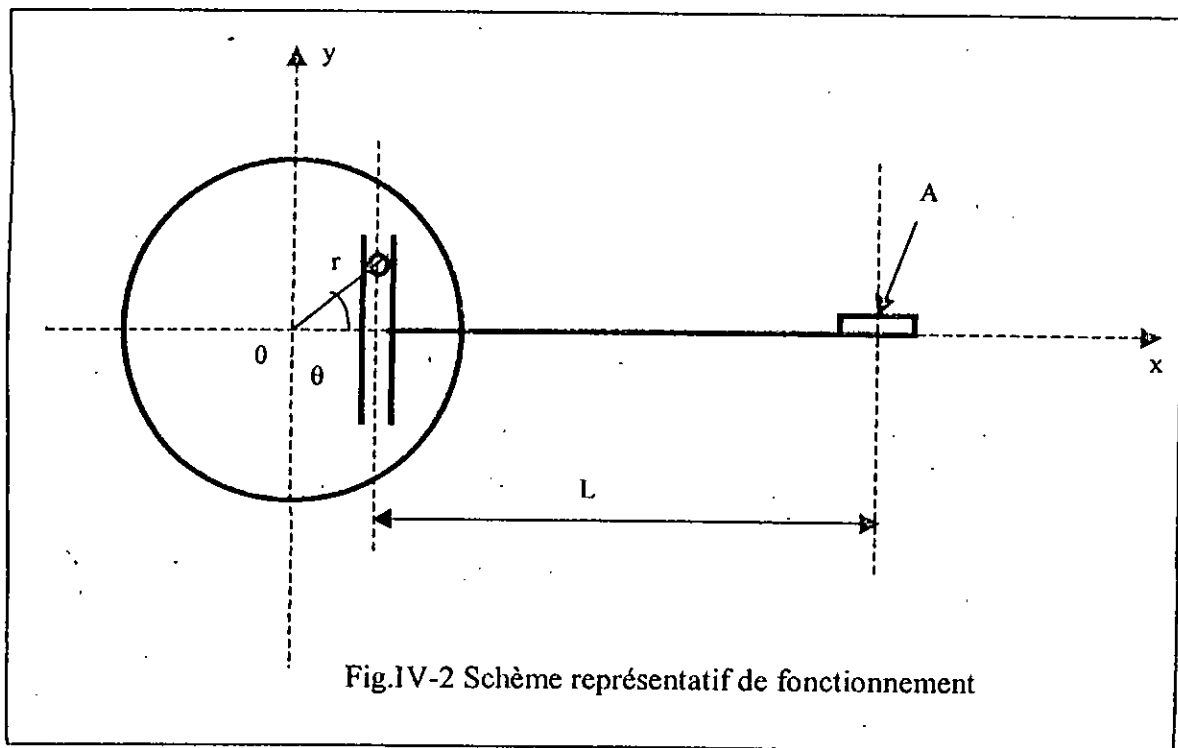
Pour un tour du disque, le point A parcourt une distance de $2L=2(2r)$

Pour N tours il décrit $N \cdot 4r$.

Pour une vitesse de rotation de N [tr/mn], la vitesse moyenne du point A est :

$$\bar{V}_a = 4N \cdot r [\text{mm/mn}] = N \cdot r / 15 [\text{mm/s}] \quad (IV-3)$$

où r est la distance entre la position du maneton et l'axe du disque en mm.



IV-4 -3. Etude de la transmission

La transmission mécanique désigne les mécanismes susceptibles de transmettre l'énergie du moteur aux organes d'exécution des machines, généralement avec un changement des vitesses, et d'après le mode de transmission du mouvement de l'élément menant à l'élément mené, on distingue[3] :

- Les transmissions par frottement : elles sont à contact direct (par friction) ou à liens flexibles (par courroies)
- Les transmissions par engrènement : elles sont à contact direct (roues et pignons dentés) ou à liens flexibles (chaînes et courroies crantées)

Certains facteurs nous permettent de choisir tel ou tel mode de transmission, tels que la résistance, l'encombrement, les conditions de travail, les grandes vitesses linéaires, la machine silencieuse, le bon rendement, la facilité de montage et de l'entretien, la longévité, les frais de l'installation, la limitation des charges et la fiabilité.

Ces facteurs nous incitent aussi à choisir la transmission par frottement (montage par serrage ou blocage du disque élevé les frottements) et un montage par frottement roulant (montage de la bielle dans un cylindre à billes afin de réduire les frottements)

IV-4-4 Le disque excentrique

Le coefficient de frottement et le taux d'usure, dépendent de la distance de glissement relative entre les deux surfaces en contact. Il est donc nécessaire de prévoir un système d'excentrique variable et cela par réglage de la distance entre le centre du disque et le position du maneton

La distance de glissement est donnée par : $L = 2r$

où r représente l'entraxe entre le disque et le maneton

Dans notre cas, on s'est limité à 4 distances de glissements qui sont : 2, 8, 16 et 20mm. Ces quatre distances sont suffisantes pour les échantillons prévus (annexe MF01).

IV-4-5 La glissière

Elle est constituée d'un alésage fixe sur le bâti et d'une partie mobile (un axe) qui reçoit le mouvement du moteur, appelée bielle ou coulisseau. Elle sert de guide afin de permettre la transformation du mouvement rotatif du moteur électrique en un mouvement rectiligne oscillatoire de cette bielle (Annexe MF03).

Les dimensions du coulisseau suivant l'axe du mouvement doivent être supérieures à celles de la partie fixe d'au moins la distance de glissement maximale prévue (20mm) plus un jeu de fonctionnement.

Cette glissière est de forme cylindrique et contient des billes afin de réduire les frottements (dissipation d'énergie) entre celle ci et coulisseau et d'assurer un bon guidage.

IV-4-6 Les billes

On sait qu'il est plus facile de faire rouler un corps que de le faire glisser. Le rôle de l'emploi des billes est d'assurer un roulement du coulisseau dans la glissière afin de réduire les frottements et par conséquent réduire la perte d'énergie.

IV-4-7 Les porte échantillons

Les échantillons sont sous forme de plaques rectangulaires de 1cm² de section environ et de 2mm d'épaisseur. Cette contrainte imposée par les autres essais physico-chimiques, rend difficile leur fixation sur la porte-échantillons. (annexe MF05, MF06)

De ce fait, nous avons conçu un moyen de fixation en faisant un logement sous forme de rainure rectangulaire de profondeur inférieur à l'épaisseur de l'échantillon. Une cale de serrage sert pour tenir l'échantillon contre l'épaule de la rainure.

Le porte échantillon porteur du frotteur est solidaire de la bielle afin qu'il reçoive le mouvement de vas et vient. L'autre porte échantillon sur lequel est fixé l'élément frotteur est lié à un système qui permet l'exercice d'une force normale sur la surface de contact des deux échantillons.

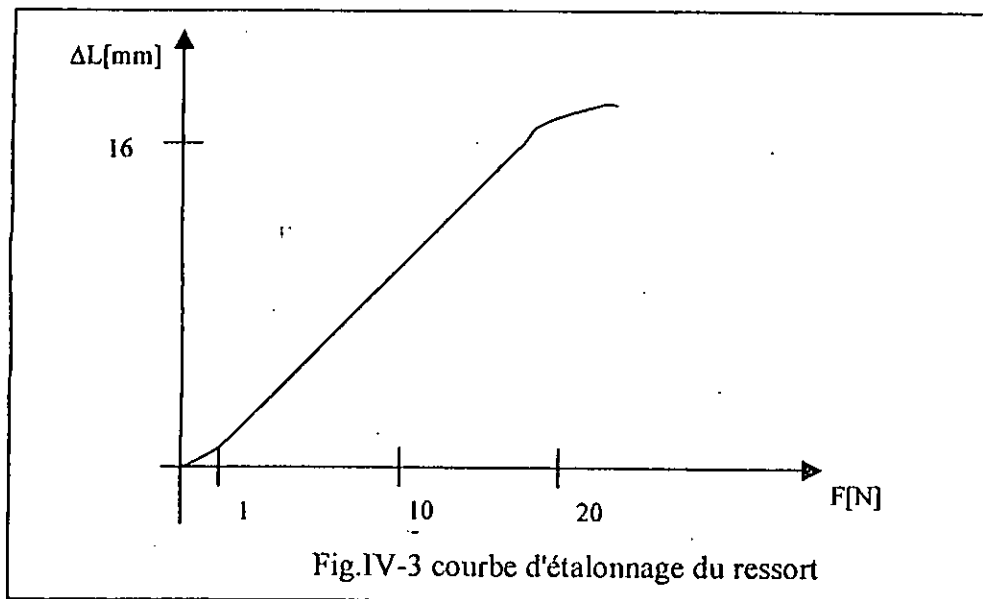
IV-4-8 Système d'application de la charge

Il est constitué d'un ressort monté sur un axe sur lequel se monte librement le porte échantillon supérieur. Deux axes de guidage sont prévus de part et d'autre de l'axe porteur du ressort pour le guidage du porte-échantillon afin de permettre la transmission de la charge appliquée par la compression du ressort à la surface de contact (Annexe MF09).

Le ressort est d'une constante de raideur k , donc pour appliquer une charge $F_n[N]$, il faut comprimer le ressort de $\Delta x[mm]$ tel que :

$$\Delta x = F_n / k \quad (IV-4)$$

La constante de raideur du ressort utilisé pour notre machine est : $k=1.5\text{N/mm}$. La force que l'on doit appliquer au ressort doit être dans le domaine linéaire de la figure IV-3 (1-20N).



IV-4-9 Le bâti

C'est la partie sur laquelle se fixent tous les autres organes constitutifs de la machine.

Théoriquement, elle est soumise seulement aux poids de ces organes, mais un défaut d'alignement des organes mobiles (désaxage du disque excentrique monté sur l'axe du moteur) engendre des débattements qui peuvent faire vibrer toute la machine. Pour cette raison, il faut choisir un matériau relativement lourd.

Vu la disponibilité, le bâti de notre machine est constitué d'une plaque en aluminium de dimensions $45*25*0.5\text{cm}^2$. Le choix de ce matériau se justifie par sa disponibilité et sa solidité (pour ce type d'utilisation).

IV-4-10 Le circuit électrique

La vitesse de glissement est un paramètre opératoire pour les essais tribologiques. Donc notre machine, doit avoir un système de variation de la vitesse de glissement. Notre choix d'un moteur asynchrone permet le changement de la vitesse de rotation de l'axe du moteur par la variation de la tension entre les bornes du moteur. Pour cela, un rhéostat est branché en parallèle avec le moteur. Le montage permet de diviser la tension délivrée par le réseau

(220V) en une tension désirée pour le réglage de la vitesse et la deuxième partie se dissipe dans sa résistance.

La tension aux bornes du moteur est approximativement:

$$V_1 = R_1 * I \quad (IV-5)$$

$$V_2 = (R_2 + R_1)I \quad (IV-6)$$

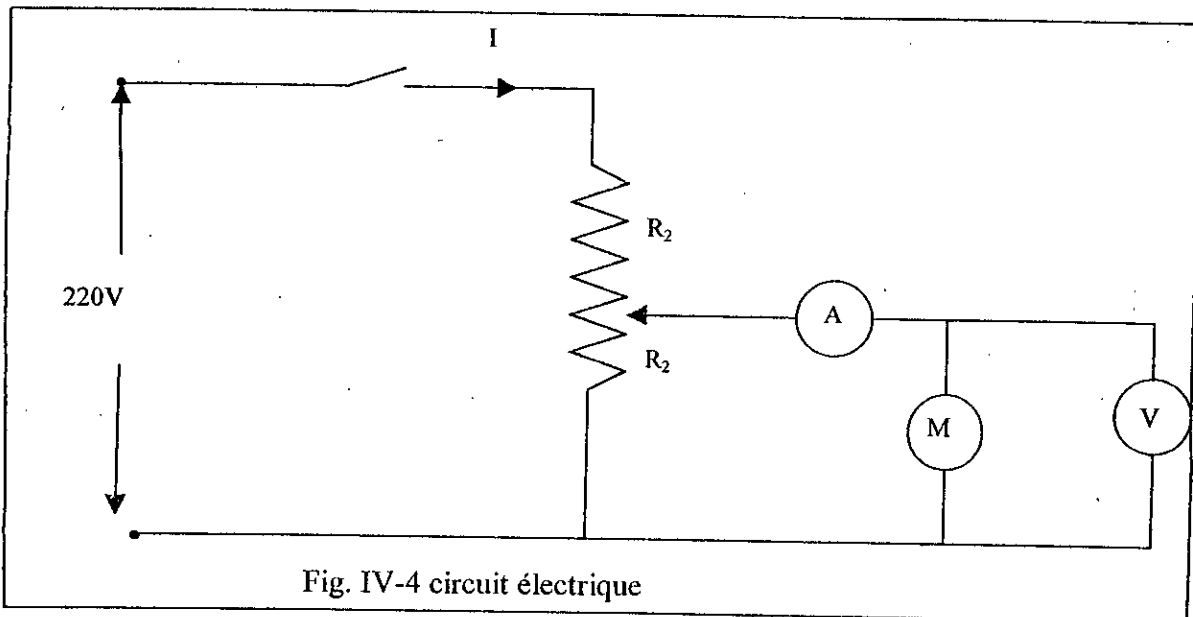
Donc

$$I = \frac{V_2}{(R_1 + R_2)} \quad (IV-7)$$

Ce qui donne :

$$V_1 = \frac{R_1}{(R_1 + R_2)} V_2 \quad (IV-8)$$

Pour la mesure de la force de frottement, il faut procéder par la détermination de la variation du travail donc de l'Ampérage. Pour cela un ampèremètre digital est branché avec le moteur électrique pour déterminer le courant délivré au moteur avant et après le contact des échantillons. (voir le circuit électrique).



CHAPITRE V



ANALYSE FONCTIONNELLE

Caractéristiques et étalonnage

V-1 Introduction

Notre machine comme toutes les machines de laboratoire doit avoir un mode d'emploi afin de faciliter la tâche à son utilisateur. Donc il est nécessaire de donner les caractéristiques de la machine pour permettre le choix des paramètres opératoires (vitesse, charge) et de donner les procédures des essais afin d'obtenir des résultats fiables.

V-3 Montage des échantillons

Les échantillons sont sous forme de plaques rectangulaires de dimensions telles que représentées sur la figure V-1

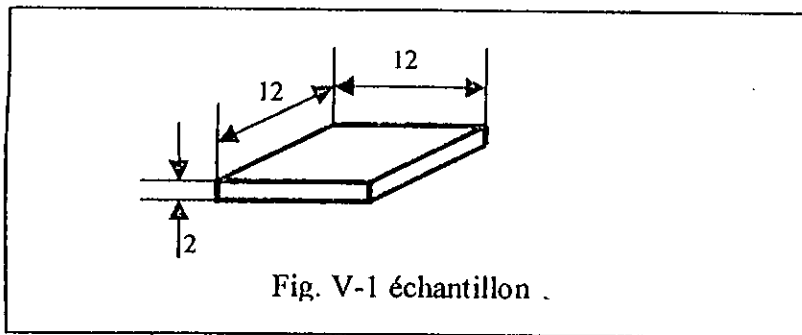


Fig. V-1 échantillon .

Etant donné que les dimensions des échantillons sont très petites, leurs fixations sont difficiles et donc une petite rainure de profondeur juste suffisante pour tenir l'échantillon (1.2mm) et de largeur correspondante aux dimensions de l'échantillon a été réalisée. La fixation est assurée par une cale de serrage et est prévue sur les portes échantillons, plus une cale de serrage. Mais dans le cas des gros frottements, on peut en plus de cela coller les échantillons sur leurs supports.

V-4 Caractéristique de la machine

Les essais prévus sur notre machine sont : la détermination du coefficient de frottement et la perte de matière des pièces frottantes. Pour cela plusieurs paramètres peuvent être variables d'un essai à un autre. Les principaux sont la charge et la vitesse relative de

glissement. Il est donc nécessaire d'étudier les variations de la vitesse en fonction de la tension pour des charges différentes.

Le principe consiste à fixer une charge F_n par la presse, puis varier la tension aux bornes du moteur à l'aide du rhéostat, et par moyen d'un stroboscope on prélève la vitesse de rotation de l'axe du moteur pour chaque tension.

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure (V -2).

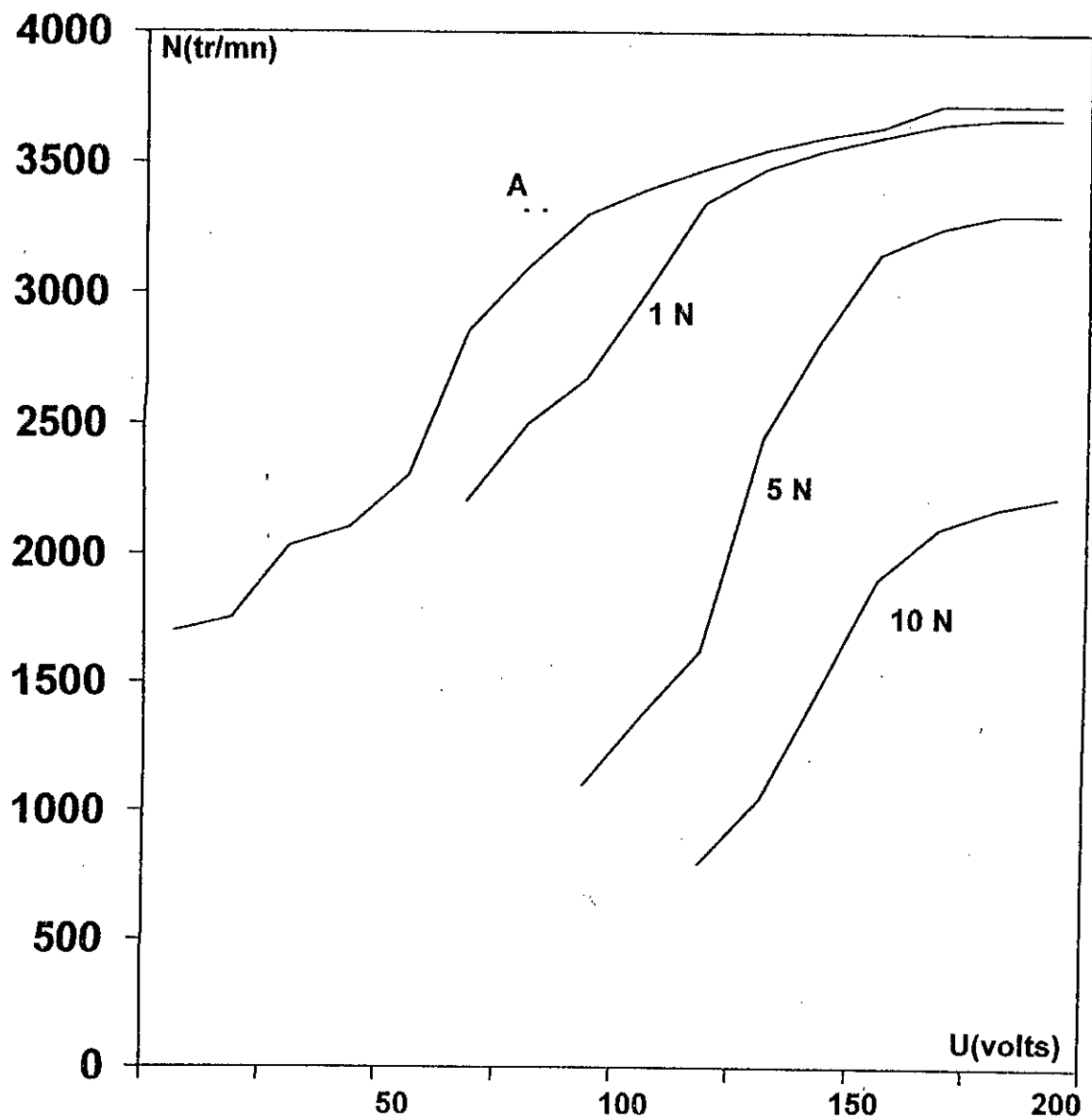


Fig.V-2 variation de la vitesse de rotation du moteur en fonction de la tension pour de différentes charges.

Cette figure montre que la vitesse de fonctionnement à vide atteint 3725 tr/mn sous une tension de 200 volts, alors que la vitesse nominale du moteur est de 4000tr/mn ce qui

explique que la perte par frottement est seulement d'environ 5%. Mais pour de grande charge (10N) la vitesse maximale qu'on peut atteindre est de 2100tr/mn ce qui donne une perte d'environ 50%.

V-5 Procédure de détermination du coefficient de frottement

Pour avoir accès à l'information capitale sur la mesure de la force de frottement, nous pouvons procéder comme suit:

Lors de la mise en marche, si la machine est à vide (pas de contact entre les deux échantillons), le moteur consomme un de courant I_0 . Mais sous l'effet de la force de contact F_n appliquée à la surface de contact des deux échantillons, le moteur travail sous contrainte. Le moteur nécessite alors de délivrer une quantité de courant I_1 supérieur à I_0 pour travailler dans les mêmes conditions.

La puissance dissipée par le frottement des échantillons est donnée par :

$$P = U * I \quad (V-1)$$

L'énergie E est donnée par :

$$E = P * t \quad (V-2)$$

Le travail W qui est défini comme la variation de l'énergie et est donné par :

$$W = \Delta E = U * \Delta I * t \quad (V-3)$$

Le travail mécanique défini comme le produit de le force tangentielle par le déplacement L est égal au travail fourni par le moteur c'est à dire:

$$W = F_t * L = F_t * V * t \quad (V-4)$$

De (3)et (4) on a :

$$F_t = U * \Delta I / V \quad (V-5)$$

$$V = N * r / 15 \quad (V-6)$$

Ce qui donne :

$$F_t = (15U * \Delta I) / (N * r) \quad (V-7)$$

- où: -- U : tension entre les bornes du moteur.
-- ΔI : variation du courant électrique.
-- R : distance entre l'axe du moteur et l'axe du maneton.
-- N : vitesse de rotation du moteur.

Le coefficient du frottement est donné alors par :

$$\mu = F_t / F_n = 15 * U (I_1 - I_0) / (N * r * F_n) \quad (V-8)$$

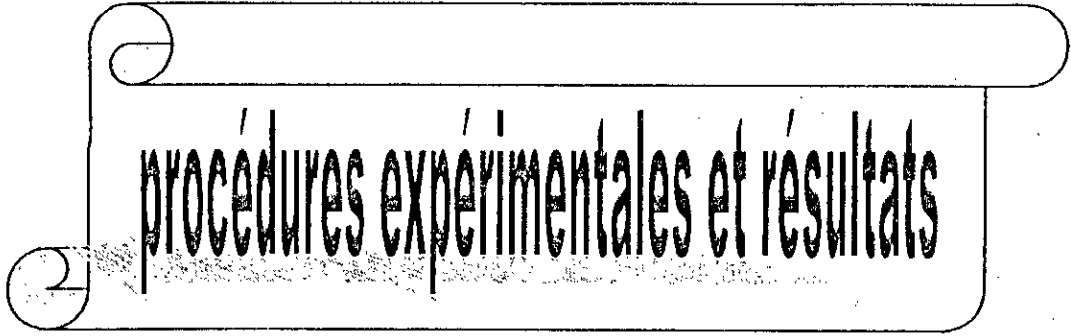
Toutes ces grandeurs sont alors accessibles par de simples mesures électriques ou mécaniques (F_n).

V-6 Mesure du taux d'usure

La perte de matière peut être évaluée par l'une des façons suivantes :

- Mesurer le poids de l'échantillon avant et après l'essai, puis déterminer la quantité de matière enlevée par unité de temps ou par cycle.
- Mesurer la variation de volume de l'échantillon pendant un temps de fonctionnement.

Les conséquences de l'usure ne sont pas seulement la perte de matière, mais aussi les détériorations des surfaces de contact. Pour observer ces détériorations, on fait des observations au microscope.



procédures expérimentales et résultats

Procédures expérimentales et résultats

VI-1 Introduction

Le but principal de cette partie est de tester le fonctionnement de notre machine, puis donner et interpréter les détériorations observées sur les échantillons frottés pour une charge et une vitesse de glissement moyenne fixe pour différentes périodes.

VI-2 Les échantillons

Les éprouvettes sont tirées d'une plaque rectangulaire en acier inoxydable de 2mm d'épaisseurs découpées aux dimensions compatibles à celles des portes échantillons pour assurer leurs fixations (12mm*14mm), puis les échantillons sont lavés à l'eau distillée et nettoyés au papier absorbant puis séchés.

VI-3 Conditions opératoires

- ❖ *La charge* : Elle est fixée à 200 g (2N). Pour éviter tout échauffement du moteur. Ceci nous donné une préssion de 1Mpa.
- ❖ *Distance de glissement* : Le maneton est fixé sur la position $r = 1\text{mm}$, ce qui donne une distance de glissement $L = 2r = 2\text{mm}$.
- ❖ *Vitesse de glissement moyenne* : La tension est fixée à 100V ce qui donne une vitesse de rotation de l'axe du moteur $N = 1900\text{tr/mn}$ (1900cycle /mn) pour une charge de 2N. La vitesse moyenne est égale : $V_{moy} = 2N * L / 60 = 0.12 \text{ m/s}$

Cette vitesse est approximative, car au cours du test de frottement, les surfaces frottantes se dégradent peu à peu et le frottement augmente légèrement, alors le moteur travaille sous une contrainte importante et sa vitesse de rotation diminue. Par conséquent, la vitesse relative moyenne de glissement diminue. Conséquemment pour un temps de fonctionnement de cinq minutes, l'erreur est négligeable.

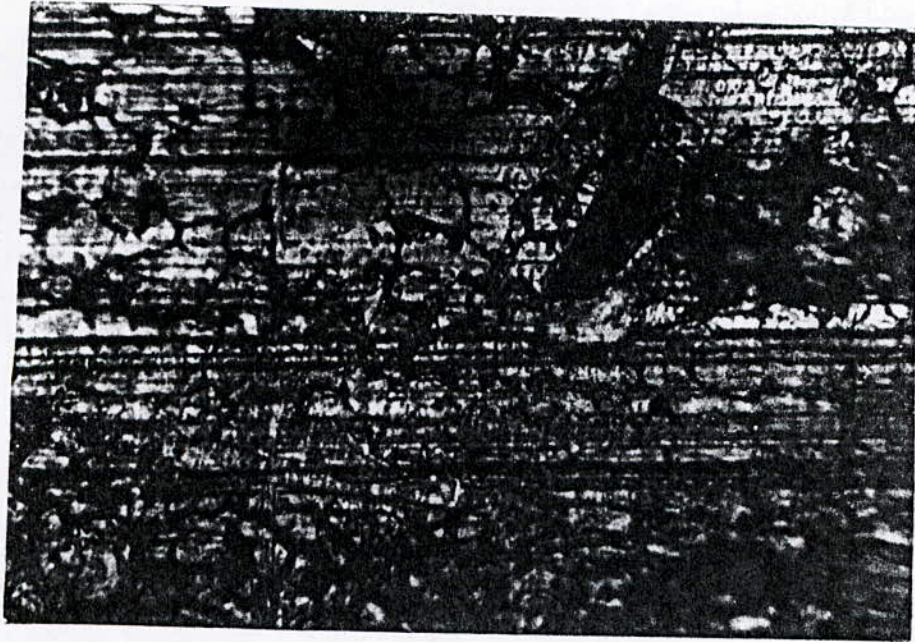


Figure VI-2 Micrographie optique d'un échantillon d'acier inoxydable non frotté
($x=2000$)

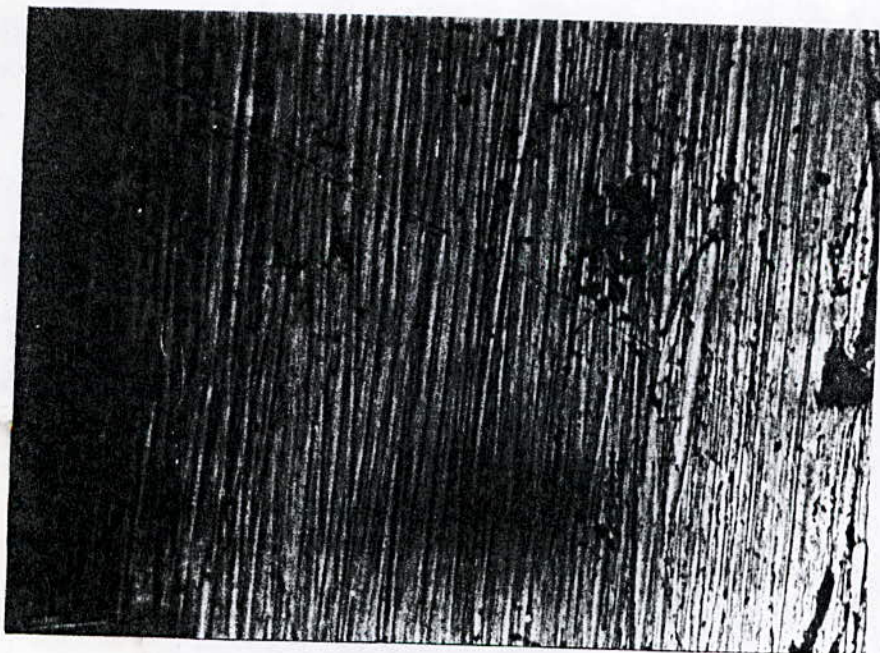


Figure VI-3 Micrographie optique d'un échantillon d'acier inoxydable après 5mn de frottement
($x=800$)

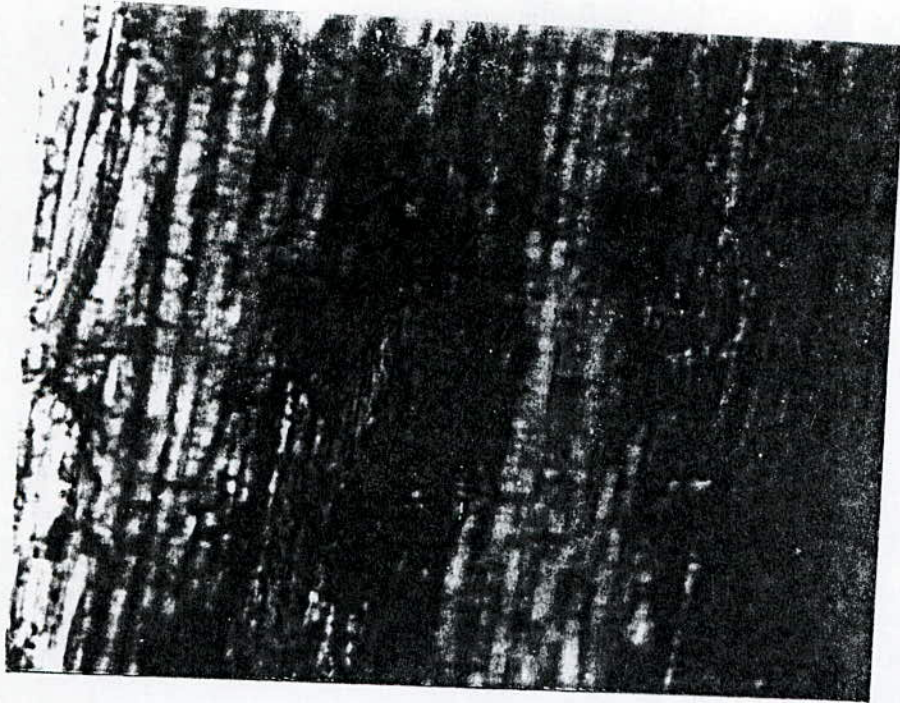


Figure VI-4 Micrographie optique d'un échantillon d'acier inoxydable après 10mn de frottement
(x=800)

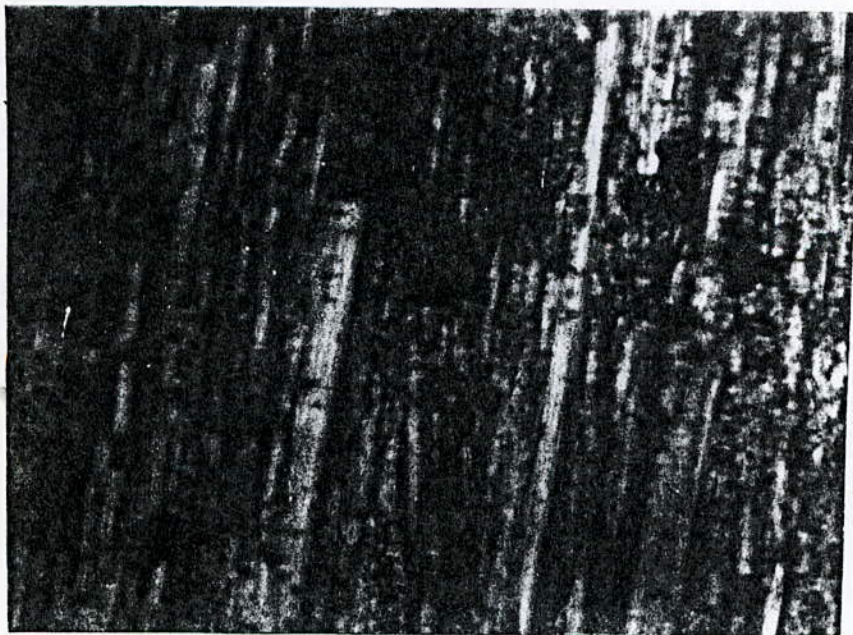


Figure VI-5 Micrographie optique d'un échantillon d'acier inoxydable après 20mn de frottement
(x=800)



Figure VI-6 Micrographie optique d'un échantillon d'acier inoxydable après 2 heures de frottement
(x=800)

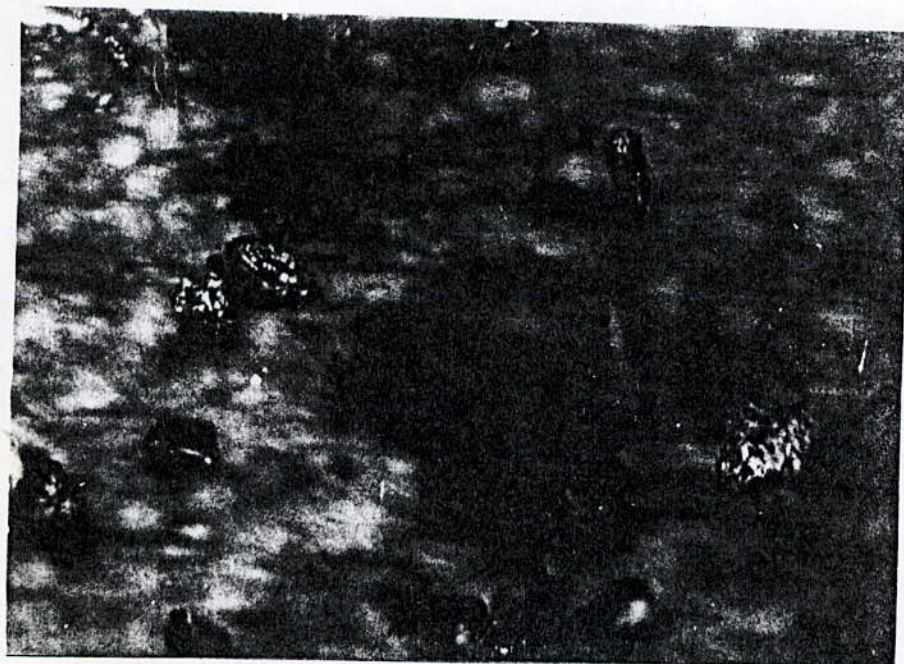
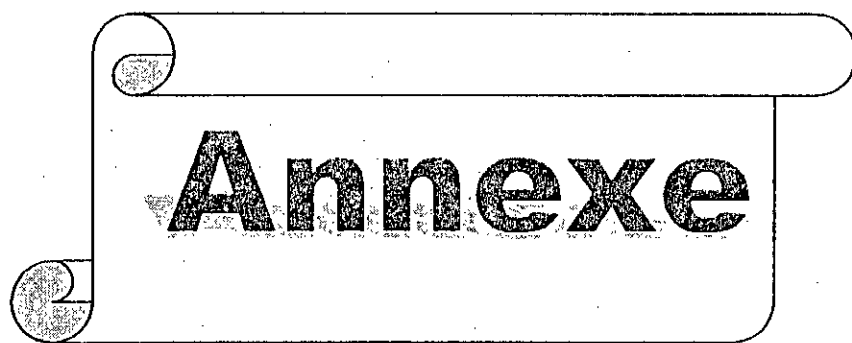


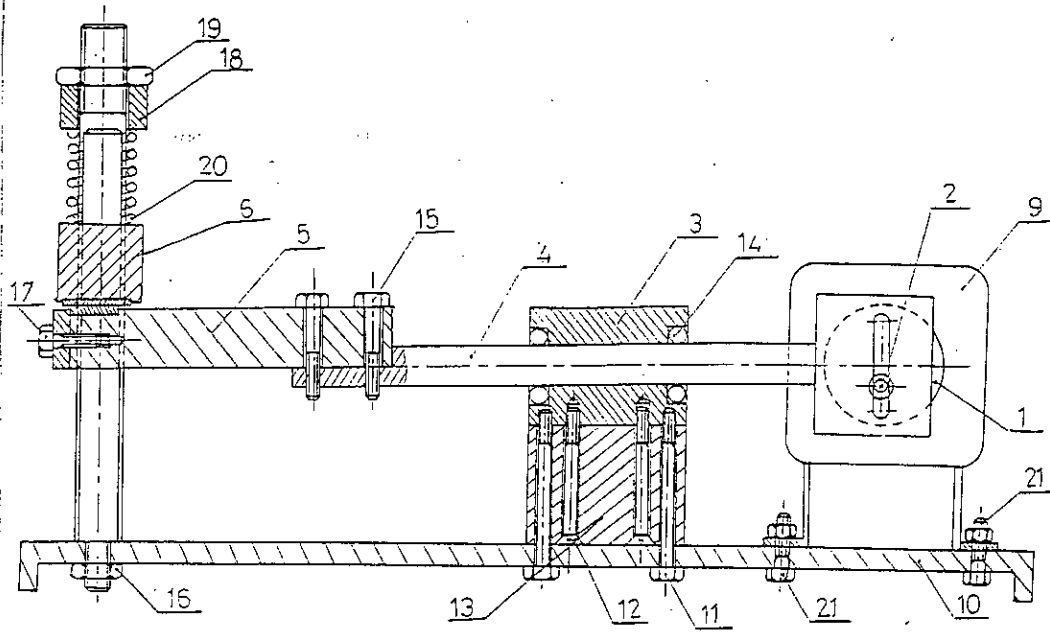
Figure VI-7 Micrographie optique d'un échantillon d'acier inoxydable après 2 heures de frottement
(x=2000)



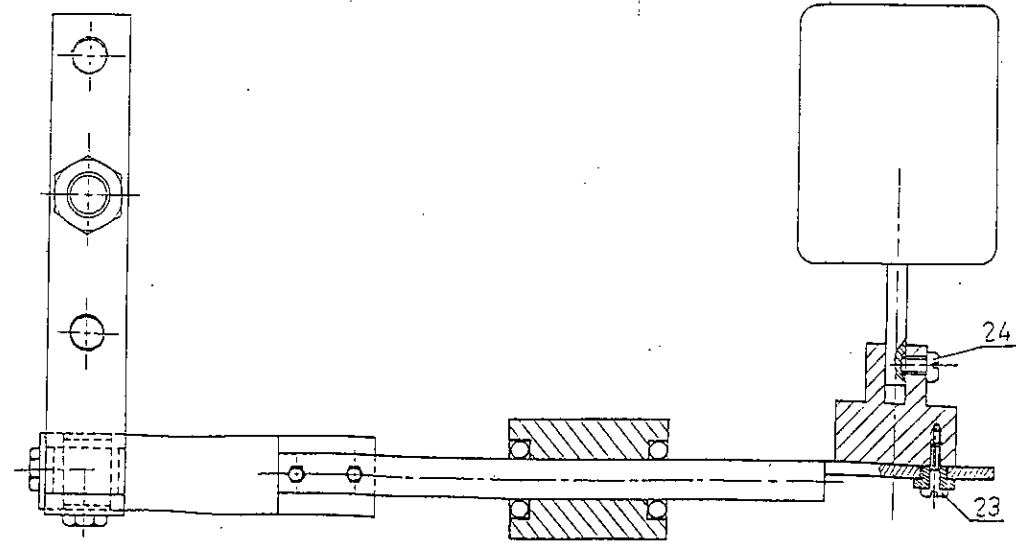
conclusion

A decorative scroll graphic with a black outline, featuring a rolled-up top edge and a circular end on the left side. The word "Annexe" is centered within the scroll.

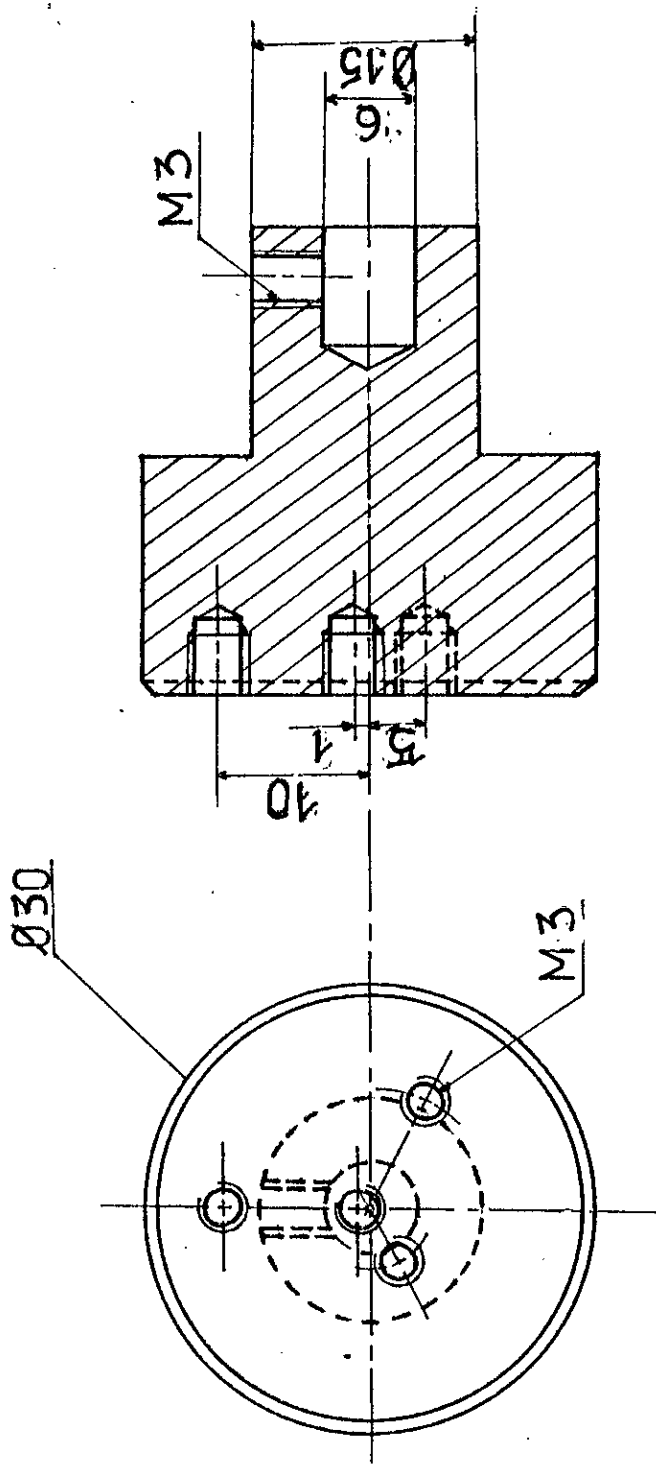
Annexe



Rp	N° dessin	Désignation	Nb	Mat	Observation
01		Disque excentrique	01		
02		Maneton	01		
03		Glissière	01		
04		Bielle	01		
05		Porte échantillon(2)	01		
06		Porte échantillon(1)	01		
07		Axes de guidage	02		
08		Axe	01		
09		Moteur électrique	01		
10		Bâti	04		
11		Vis H,M 3	02		
12		Vis 3F/90	02		
13		Support de glissière	01		
14		Billes $\Phi 6$	18		
15		Vis	02		
16		Ecrou H8	03		
17		Vis H4	02		
18		Bague	01		
19		Ecrou H8	01		
20		Ressort	01		
21		Vis H,M3	01		
22		Vis H4	01		
23		Vis CL3	01		
24		Vis de pression H4	01		

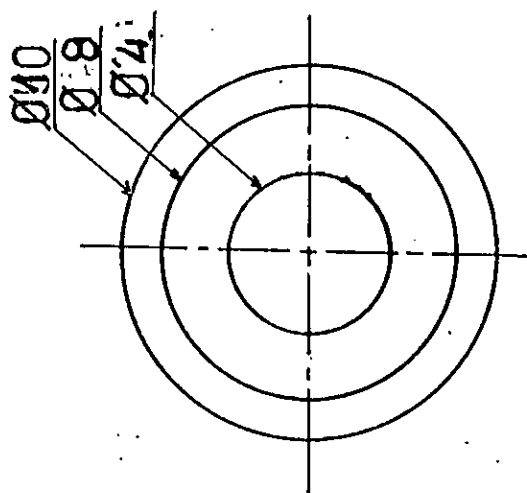
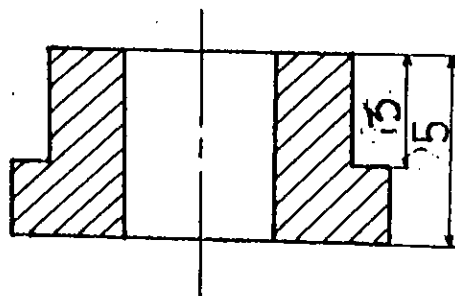


Echelle		Masse		Presses		E.N.P. Dpt Mécanique
3/4						
Etudiant	Hamdidouche					
Promoteur	B.Demri					
Prés Jury	Guergueb					
Examineur	Tazi					
Examineur	Amore					




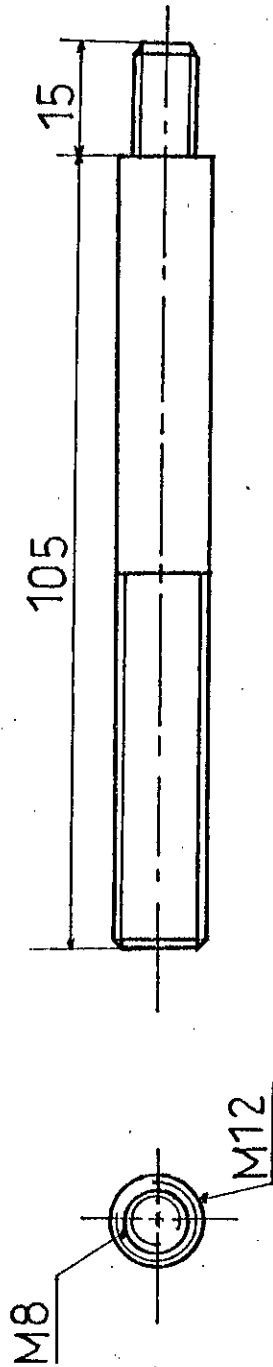
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		Disque excentrique	ENP Dpt. G.Mécanique
2/1				
Étudiant	Hamdidouche			
Promoteur	B.Demri			
Prés.Jury	Guergueb			
Examineur	Tazi			
Examineur	Amore			MF00.01

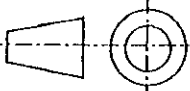


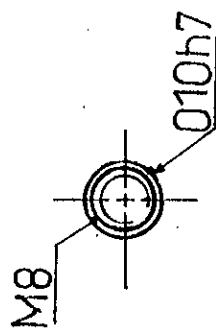
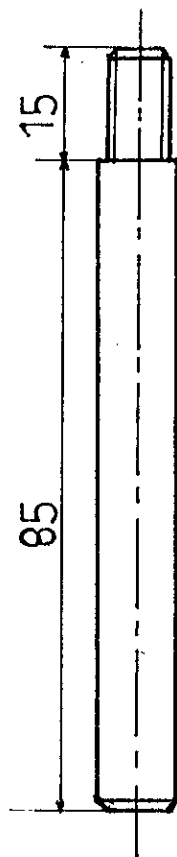
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		Maneton	ENP Dpt. G.Mécanique
5/1				
Etudiant	Hamdidouche			
Promoteur	B. Demri			
Prés. Jury	Guergueb			
Examineur	Tazi			
Examineur	Amore			MF00.02



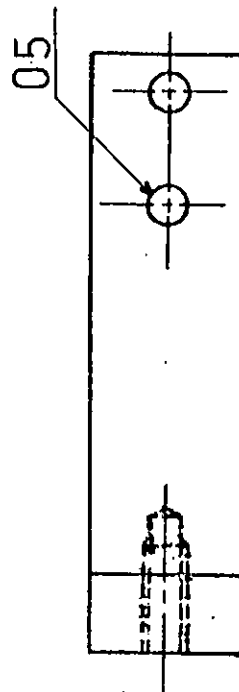
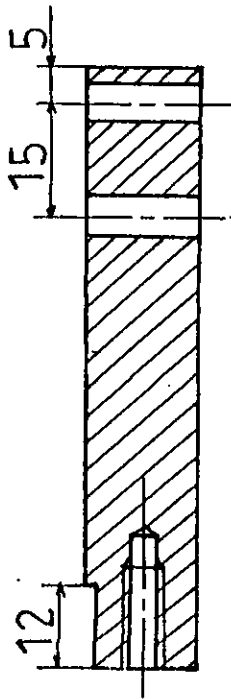
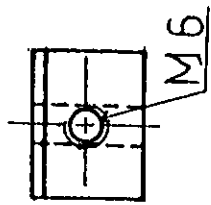
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		Axe	ENP Dpt. G. Mécanique
1/1				
Etudiant	Hamdidouche			
Promoteur	B. Demri			
Prés. Jury	Guergueb			
Examineur	Tazi			
Examineur	Amore			MF00.08



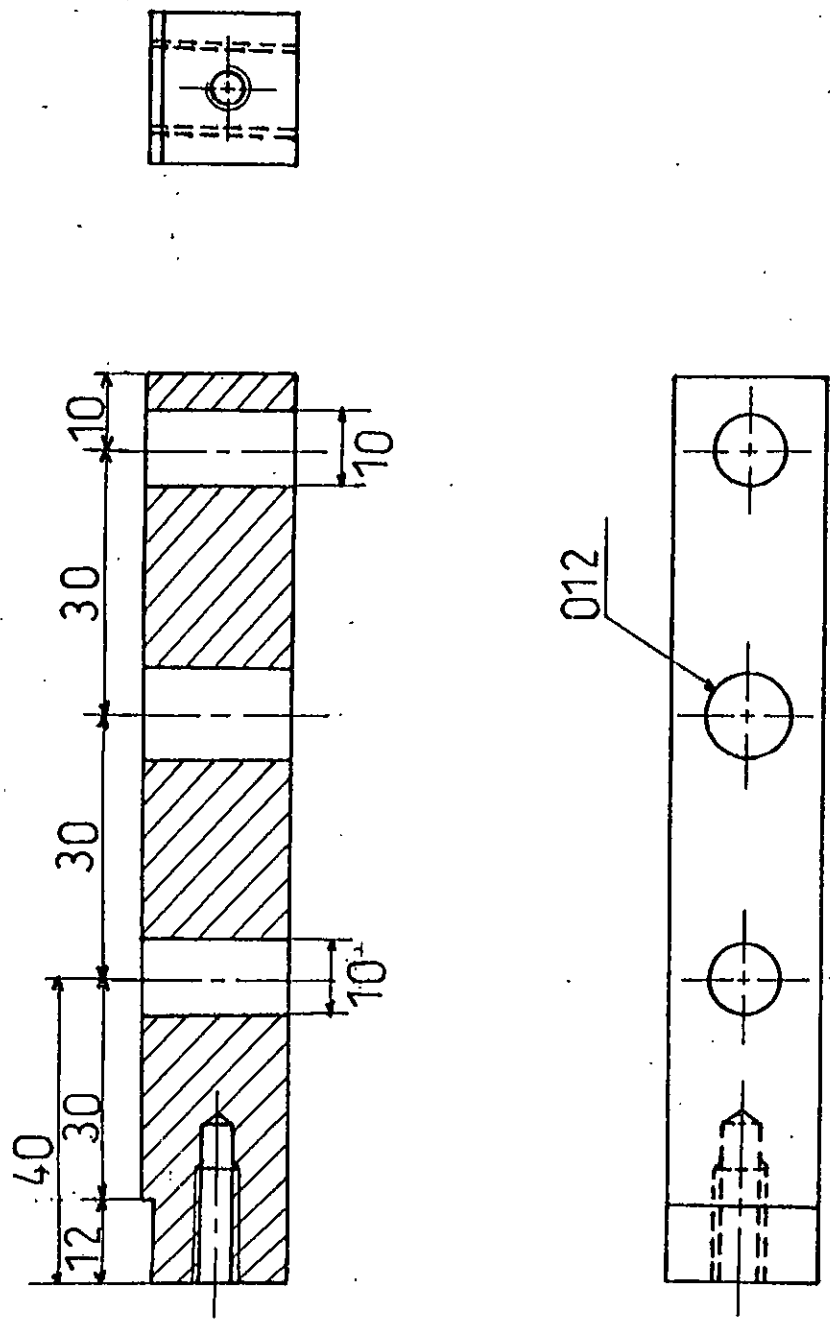
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		Axe de Guidage	ENP Dpt.G.Mécanique
1/1				
Etudiant	Hamdidouche			
Promoteur	B.Demri			
Prés.Jury	Guergueb			
Examineur	Tazi			
Examineur	Amore			MF00.07



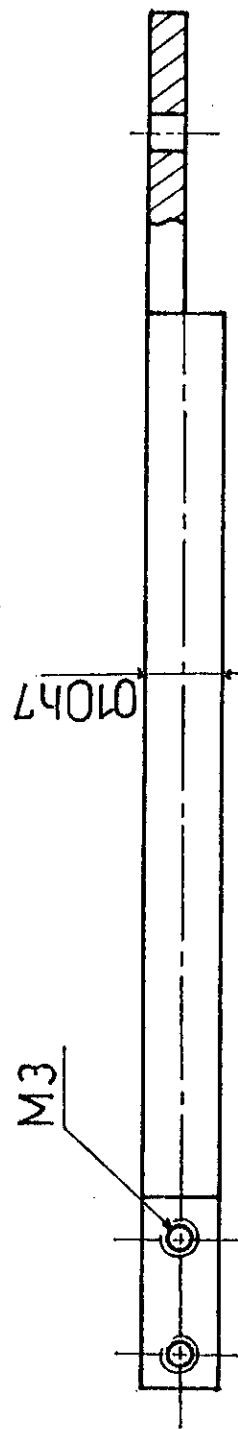
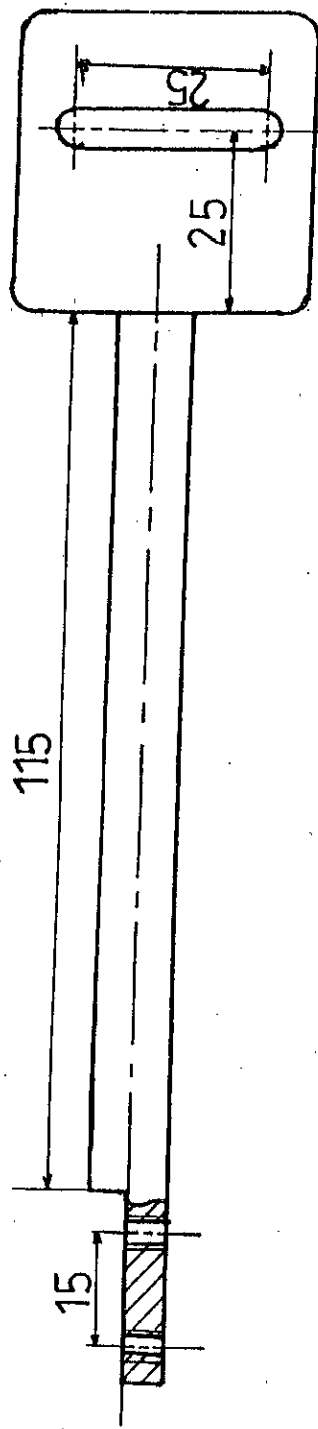
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		Porte Echantillon2	ENP Dpt.G.Mécanique
1/1				
Etudiant	Hamdidouche			
Promoteur	B.Demri			
Prés.Jury	Guergueb			
Examineur	Tazi			
Examineur	Amore			MF00.06



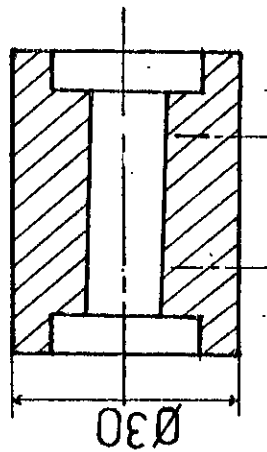
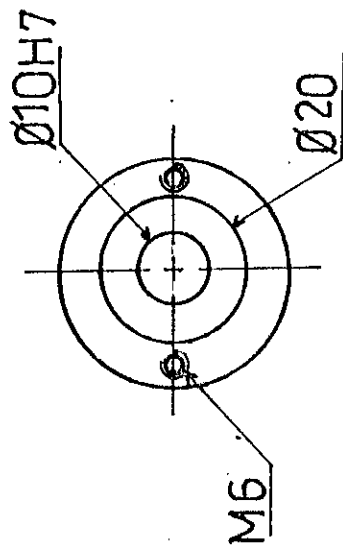
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		<p>porte</p> <p>Echantillon I</p>	<p>ENP</p> <p>Dpt. G. Mécanique</p>
1/1				
Etudiant	Hamdidouche			
Promoteur	B. Demri			
Prés. Jury	Guergueb			
Examineur	Tazi			
Examineur	Amore			MF00.05





ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		Bielle	ENP Dpt. G.Mécanique
$\sqrt{1}$				
Etudiant	Hamdidouche			
Promoteur	B.Demri			
Prés.Jury	Guergueb			
Examineur	Tazi			
Examineur	Amore			MF00.04



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse			Glissière	ENP Dpt. G.Mécanique
$\frac{1}{1}$					
Etudiant	Hamdidouche				
Promoteur	B.Demri				
Prés. Jury	Guergueb				
Examineur	Tazi				
Examineur	Amore				MF 00.03



Bibliographie

Bibliographie

- [1] Matériaux et contacts (une approche tribologique)
Gérald Zemblli et léo vincent
Presses polytechniques et universitaire Romandes 1998 (CH-1015 Lausanne).
- [2] Eléments de machines 9PES Lausanne.
G. Nicolet E. Trottet.
- [3] Journal of Tribology
Published by the American Society of Mechanical Engineers. January 1998.
- [4] Matériaux : Propriétés et applications Edition Dunod paris 1996
M.F Ashby, D.R.H Jones.
- [5] Traité des métaux. Corrosion et chimie de surfaces des métaux.
Dieter Landolt.
- [6] Technique de l'ingénieur (partie tribologie).
- [7] A.Juane. aspect des surfaces frottantes suivant les modes de dégradations et d'usure.
Traitement thermique 208, pp-87-95-1987.
- [8] Les lubrifiants moteur- pertes par frottement et usure.
Institut français du pétrole (1978) édition techip.
- [9] Théories et pratiques industrielles du frottement
J.J Caubet.
- [10] Technologie professionnelle générale pour les mécaniciens.
Les éditions Foucher.
- [11] Y.Bertier. frottement et usure du composite Aluminalon (Al_2O_3 AION).
Influence de la dispersion d'ajouts de BN. Y_3O_3SiC .
Thèse docteur ingénieur E.C.Lyon 1990.
- [12] J.K.Lancaster, D.Play, M.Godet, A.P.Verall et R. Wghorne.
Third body formation and wear of PTFE fibre based bearing, pp.236-246-1980.
- [13] Technique de l'ingénieur (Moteur asynchrone).