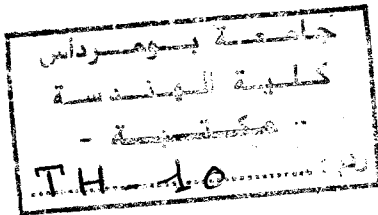


MINISTERE DE L'INDUSTRIE ET DE L'ENERGIE

INSTITUT NATIONAL DES INDUSTRIES MANUFACTURIERES



BOUMERDES

3657-09-02

THESE DE MAGISTER

EN GENIE INDUSTRIEL

OPTION : MAINTENANCE DES EQUIPEMENTS

PAR

BELKACEM BENLOKRICHI

Thème:

ETUDE DU COMPORTEMENT DES PIECES RESTAUREES PAR
RECHARGEMENT ET CONTRIBUTION A L'AUGMENTATION DE LA LONGEVITE
DES MACHINES .

Soutenu le :28/06/1995

Devant la commision d'examen:

Président :	Mr	ZAHZAM M.	Maitre de conférences
Rapporteur :	Mr	BEZZAZI B.	Maitre de conférences
Examineurs:	Mrs	ZAOUI M.S	Maitre de conférences
		BOUDI Y.	Chargé de cours
		LAIMECHE R.	Chargé de cours

357

MINISTERE DE L'INDUSTRIE ET DE L'ENERGIE

INSTITUT NATIONAL DES INDUSTRIES MANUFACTURIERES

BOUMERDES

THESE DE MAGISTER
EN GENIE INDUSTRIEL
OPTION : MAINTENANCE DES EQUIPEMENTS

PAR
BELKACEM BENLOKRICHI

Thème:

**ETUDE DU COMPORTEMENT DES PIECES RESTAUREES PAR
RECHARGEMENT ET CONTRIBUTION A L'AUGMENTATION DE LA LONGEVITE
DES MACHINES .**

Soutenu le :28/06/1995

Devant la commision d'examen:

Président :	Mr	ZAHZAM M.	Maitre de conférences
Rapporteur :	Mr	BEZZAZI B.	Maitre de conférences
Examineurs:	Mrs	ZAOUI M.S	Maitre de conférences
		BOUDI Y.	Chargé de cours
		LAIMECHE R.	Chargé de cours

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

DEDICACES

Je dédie ce travail à mon regretté Père

à ma Mère

à mon épouse

à ma fille NADIA

REMERCIEMENTS

Ce présent travail a été réalisé aux ateliers de fabrication mécaniques et au laboratoire de résistance des matériaux de l'Institut National des Industries Manufacturières.

Je tiens à exprimer ma très vive gratitude et reconnaissance à Mr SOKOLOV pour m'avoir dirigé et conseillé au début de ce travail, ainsi que pour ses conseils et son entière disponibilité.

Je remercie très vivement Mr BEZZAZI pour m'avoir accepté et dirigé pour la concrétisation de ce travail, ainsi, que pour son soutien moral et ses précieux conseils.

Je suis également reconnaissant à Mr ZAHZAM pour l'intérêt qu'il a bien voulu me témoigner en acceptant de présider le jury.

Je remercie sincèrement Mr BOUDI d'avoir bien voulu s'intéresser à ce travail et de faire partie du jury.

Je tiens personnellement à remercier Mr ZAOUÏ pour l'intérêt qu'il a bien voulu me témoigner en acceptant d'examiner ce travail et de faire partie du jury.

Je suis également reconnaissant à Mr LAIMECHE pour ses excellents conseils et pour son dynamisme.

Je suis très reconnaissant à Melle ARAR "l'artiste" pour son magnifique talent, d'avoir illustré la thèse par ses exceptionnels schémas.

Mes remerciements vont à l'équipe du CVI Rouiba, métallurgistes et métrologues, particulièrement MM. AMRAOUI et NEHMAR.

Mes remerciements s'adressent à Mr BELKACEM Rachid de l'INMC pour sa précieuse collaboration en matière de reprographie et reliure, ainsi qu'à Mr TINIAKOV pour ses précieuses traductions.

Mes remerciements vont aussi à toute l'équipe du département des sciences de l'ingénieur, ainsi qu'au personnel de garde de l'INIM.

Je ne peux présenter ce travaux sans exprimer mes remerciements à Mr BENZAID pour son entière disponibilité et ses excellents dessins.

Je remercie mon épouse, pour sa patience, et son soutien à toutes les étapes de ce travail, ainsi que pour sa contribution indirecte pour sa concrétisation .

Enfin un petit clin d'oeil à ma petite Nadia, qui a contribué , pour m'avoir autorisé à utiliser son petit bureau.

SOMMAIRE

Remerciements	
Introduction	1
Principaux symboles utilisés	3
A-Importance du travail	5
B-Buts recherchés	6
CHAPITRE I :	
ETUDE THEORIQUE DES DIFFERENTS TYPES D'USURE	
I-1-Généralités	8
I-2-Historique du frottement et de l'usure	8
I-3-Etude de la longévité des mécanismes des équipements	10
I-3-1-Facteurs motivant la mise hors d'usage et l'usure des machines	10
I-4--Classification de l'usure	11
I-4-1-L'usure adhésive	14
I-4-1-1-Aspects théoriques de l'usure adhésive	14
I-4-1-2-Dimensions des particules d'usure :théorie énergétique	15
I-4-1-3-Modèles d'usure adhésive	16
I-4-1-4-Mesures à préconiser pour éviter l'usure adhésive	16
I-4-2-L'usure abrasive	17
I-4-2-1-Mécanisme d'abrasion	17
I-4-2-2-Aspects théoriques de l'usure abrasive	18
I-4-2-3-Aspects métallurgiques de l'usure abrasive:cas	
des aciers	19
I-4-2-3-Influence des différents facteurs sur l'usure	21
a-Caractéristiques de l'organe	21
b-Conditions d'exploitation	21
c-Frottement et lubrification	21
1-5-Modes de dégradations des surfaces	22
I-5-1-Dégradations sous l'effet de l'usure adhésive	22
I-5-2-Dégradation sous l'effet de l'usure abrasive	23
I-6-Paramètres influençants l'usure	23
I-6-1-Influence de la géométrie de l'abrasif	23
I-6-2-Influence de la charge normale	25

I-6-3-Influence de la vitesse de glissement	26
I-6-4-Influence de la structure du métal	27
I-6-4-1-Loi de Hall-Petch	
I-6-4-2-Cas des matériaux hétérogènes	28
I-6-5-Influence de la dureté	28
I-6-5-1-Cas des métaux purs	28
I-6-6-Influence de la température de fusion	29
I-6-7-Influence des traitements thermiques	29
I-7-Comportement des plastiques au frottement:cas des PTFE	30
I-8-Méthodes d'étude de l'usure	31
I-8-1-Caractérisation micro géométrique des surfaces	31
A-Méthode optique	32
B-Méthode mécanique	32
C-Méthode analytique	32
D-Technique avancée	33
E-Méthode radioactive	33
F-Technique d'irradiation	33
I-8-2-Moyens de génération de l'usure	33
I-8-2-1-Les machines d'essai d'usure et de frottement	33
a-Principe de fonctionnement	33
I-8-2-2-Configuration cinématique des machines d'essai d'usure et de frottement	34
a-Plaquette/Disque	34
b-Disque/disque	34
c-Frotteur/Cylindre	34
d-Cylindre/cylindre	34

CHAPITRE II:MODES DE DEGRADATIONS DES SURFACES USEES ET METHODES DE RESTAURATION

II-1-Modos de dégradation des surfaces	35
II-1-1-L'adhésion	36

II-1-2-L'abrasion	
II-1-3-La fatigue de surfaces	36
II-1-4-L'érosion	36
II-1-5-La corrosion mécanique	37
II-2-Classification des traitements et revêtements des surfaces usées	37
II-2-1-Traitements avec transformation structurale	37
II-2-1-1-Transformation structurale d'origine mécanique	37
II-2-1-2-Transformation structurale d'origine thermique	37
II-2-1-3-Traitements thermochimiques avec diffusion	38
II-2-1-3-1-Traitement avec diffusion de métalloïde	38
II-2-1-3-2-Traitement avec diffusion des métaux	38
II-3-Méthode utilisée	38
II-3-1-Le rechargement	38
II-3-1-1-Principe du rechargement	38
II-3-1-2-Principe du soudage	39
II-3-1-3-Effet de l'opération de soudage sur les aciers	40
II-3-1-4-Zone fondue	40
II-3-1-5-Zone affectée par la chaleur (Z.A.C.)	41
II-3-1-6-Modifications thermiques en fonction du nombre de passes	41
II-3-1-7-Cycles thermiques de soudage	42
II-3-2-Choix des conditions de soudage	42
II-3-2-1-Diagramme T.R.C.S.	42
II-3-2-2-Détermination simplifiée des conditions de soudage	43
II-4-Usinage des couches rechargées	44
II-4-1-Caractéristiques des outils	44
II-4-2-Géométrie des outils	44
II-4-3-Paramètres d'usinage	45

CHAPITRE III:ETUDE EXPERIMENTALE

III-1-Méthodologie de l'étude	46
III-2-Méthode générale	46
III-2-1-Principe de la méthode	46

III-3-Conditions des essais	47
III-3-1-Les matériaux antagonistes	48
III-3-2-Programme expérimental	48
III-3-2-1-Justification du choix du PTFE	48
III-3-2-1-1-Caractéristiques principales du PTFE	48
III-3-3-Définition des surfaces frottantes de la première série d'essais	49
III-3-4-Paramètres retenus	49
III-3-5-Conditions expérimentales	50
III-3-6-Deuxième série d'essais	51
III-3-6-1-Variables d'action retenues	51
III-4-Procédure expérimentale	51
III-5-Dispositif expérimental	52
III-5-1-Description du dispositif expérimental	
III-5-2-Description du dispositif de mesure et mode opératoire	52
III-5-3-Etalonnage du dispositif	53
III-5-3-1-Etalonnage du dynamomètre	54
III-5-3-2-Tarage du ressort sur le dispositif de mesure et du dynamomètre	55
III-6-Matériau utilisé	56
III-6-1-Composition chimique	56
III-6-2-Caractéristiques mécaniques	56
III-6-3-Préparation des surfaces de frottement	57
III-6-4-Caractérisation mécanique et métallographique des couches rechargées	58
III-6-4-1-Dureté des couches rechargées	58
III-6-4-2-Examen macrographique	59
III-7-Matériau antagoniste	64
III-8-Traitement des résultats	64
III-8-1-L'usure linéaire	64
III-8-2-L'intensité d'usure	65
III-9-Mode opératoire pour effectuer un essai	66
III-9-1-Post-opérations	66

III-9-2-Préparation des échantillons	67
III-9-2-1-Les pièces cylindriques en rotation	67
III-9-2-1-1-Les pièces du type MR (non rechargées)	67
III-9-2-1-2-Les pièces traitées	67
III-9-2-1-3-Les pièces rechargées	67
III-9-3-Les frotteurs	67
III-9-3-1-Les frotteurs en PTFE	67
III-9-3-2-Les frotteurs en acier	67
III-10-Résultats et discussion des essais	68
III-10-1-Essais préliminaires	68
III-10-2-Etude de l'influence de paramètres d'usure	68
III-10-2-1-Cas des frotteurs en PTFE	68
a-Influence de la durée de l'essai sur l'usure	
a-1-Evaluation du coefficient d'amélioration	71
a-2Conclusion	72
b-Influence de la vitesse de glissement	73
b-1-Evaluation du coefficient d'amélioration	75
c-Influence de la force appliquée	76
c-1-Evaluation du coefficient d'amélioration	78
III-10-2-2-Cas des frotteurs en acier	79
III-10-2-2-1-Cas d'un couple: frotteur acier sur surface acier	79
III-10-2-2-2-Cas d'un couple: frotteur acier sur surface rechargée (RB)	80
a-Etude de l'influence de la fréquence de rotation	81
b-Etude de l'influence de la longueur de glissement	83
c-Etude de la force appliquée	89
CONCLUSION GENERALE	93
Bibliographie	94
Annexes	99

INTRODUCTION

Tous les mécanismes comportent des systèmes sujets à l'usure ,par exemple arbres, vilebrequins,axes.Les avaries dues à l'usure rencontres dans ces mécanismes limitent leur longévité.

Il est donc important d'étudier ces avaries afin de prévoir leur comportement d'une part et améliorer leur fiabilité d'autre part, ou les entretenir selon le besoin.

Dans ce travail, nous nous limiterons aux avaries dans les contacts des surfaces par adhésion et par abrasion tels que énumérés ci-dessus.

Ces avaries ont fait l'objet d'une littérature abondante, mais les mécanismes qui les gouvernent ne sont pas encore totalement explicites, car ils sont très complexes. Au cours de ce travail, nous présentons un état de la question, par simulation d'un arbre en rotation frottant sur des pièces plastiques et métalliques (PTFE,acier XC 42)*.

Le chapitre I, comprend l'étude bibliographique de l'usure, deux types d'usure sont largement détaillés: l'usure adhésive et l'usure abrasive. Nous examinons l'influence des paramètres influants notamment ceux liés aux matériaux antagonistes, à l'environnement et aux conditions d'exploitation.

Dans le chapitre II, une revue bibliographique des différents types de dégradations liés à l'usure ainsi que les différents modes de dégradations et de restaurations.

La méthode de rechargement à l'arc électrique largement utilisée a été retenue. Une étude analytique du principe de soudage, de la métallurgie de soudage a été exposée.

Dans le chapitre III, nous présentons une méthode expérimentale d'essai d'usure, cette dernière nous permet de classer les intensités de l'usure pour différentes conditions d'essais et pour différents types de surfaces rechargées .

Dans la première série d'expérimentation nous avons examiné l'étude du comportement à l'usure d'un matériau étalon: (le PTFE) matériau largement utilisé dans les pièces de frottement, à travers son comportement, nous le corrélons avec l'intensité de l'usure des surfaces frottantes, et ce avec des conditions d'essais identiques (géométrie, dynamique et cinématique).

Une deuxième partie d'expérimentation destinée à éprouver des pièces rechargées à l'arc électrique, avec électrode à enrobage basique. Le matériau antagoniste est de l'acier (XC 42).

*PTFE:polytétrafluoréthène (Téflon).

PRINCIPAUX SYMBOLES UTILISES

SYMBOLES	DESIGNATION
dP	usure pondérale
W	usure linéaire
I	intensité de l'usure
t	temps
L	longueur de glissement
V_a	vitesse de glissement
N	fréquence de rotation
HB	dureté Brinell
HV	dureté Vickers
Re	limite élastique
R	résistance à la rupture
KCU	résilience sur éprouvette à entaille en U
A	allongement en %
d	diamètre de l'éprouvette
γ	masse volumique
f	coefficient de frottement
E	module de Young
ν	coefficient de Poisson
ν	taux d'usure
a_{fr}	coefficient caractérisant le type de frottement
Δ_{min}	usure minimale
Δ_{ini}	usure initiale

SYMBOLES	DESIGNATION
Δ_{max}	usure maximale
$tg\alpha$	vitesse de l'usure
T	durée de fonctionnement
K	coefficient d'usure
P	charge normale appliquée
Ee	énergie élastique
Ea	énergie d'adhésion
dp	diamètre d'une particule
σ_e	limite élastique
Wab	énergie d'adhésion de deux matériaux
V	volume d'usure
ε	résistance d'usure
Tf	température de fusion
Z.A.C	zone affectée par la chaleur
En	énergie nominale
P.T.F.E	polytétrafluoréthène

A-Importance du travail

L'usure des surfaces de frottement constitue la cause majeure des défaillances des équipements industriels atteignant parfois 40% de l'ensemble des défaillances, contre seulement 8 à 10% celles dûes à la fatigue [43].

L'histogramme suivant donne le pourcentage de pièces avariées par type de surface .

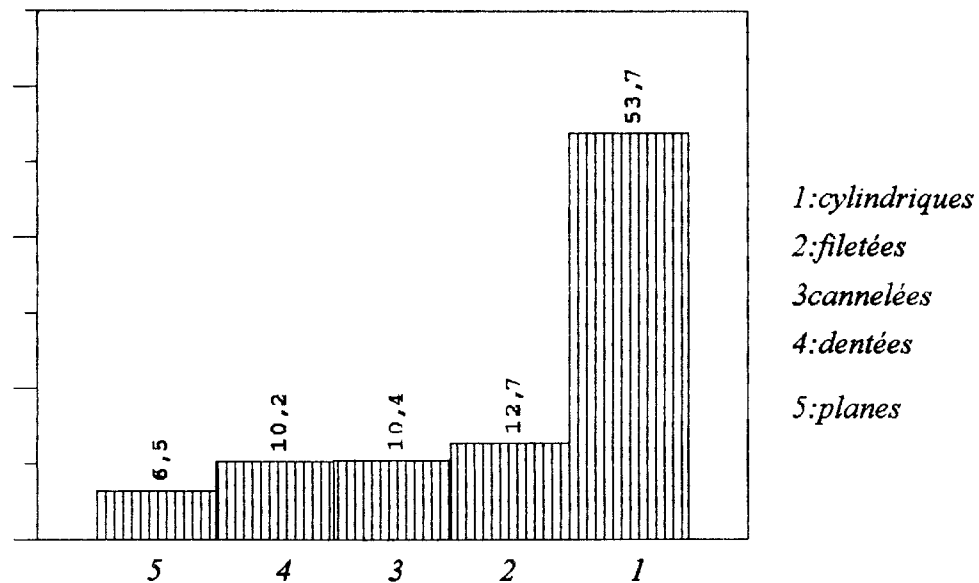


Fig.I-1: Histogramme des types de surfaces avariées

La remise en état des pièces affectées par l'usure est généralement incompatible avec les conditions de fonctionnement prévues par le constructeur, ceci est dû à la non conformité des matériaux utilisés et des méthodes mise en oeuvre, ce qui prolongerait les indisponibilités des équipements et l'arrêt des chaînes technologiques entraînant des pertes considérables .

A titre d'exemple, en Grande Bretagne l'usure cause annuellement une dépense de 500 millions de livres [48] .

B- Buts recherchés

Un double objectif est attribué à notre présente étude :

1. Le premier objectif est de définir un critère de choix relatif à une méthode de rechargement des surfaces usées, qui est basée sur l'évaluation de son pouvoir abrasif, cette démarche peut s'insérer dans un processus technologique de revêtement des surfaces, afin d'y effectuer le contrôle systématique et en fixer des valeurs réglementaires permettant ainsi d'élaborer des exigences pour chaque cas concret.

2. Le deuxième objectif est purement scientifique et pédagogique, et se résume en l'élaboration d'un équipement de laboratoire de tribologie pouvant contribuer à la recherche sur des thèmes ayant trait à l'usure et au frottement.

CHAPITRE I

**ETUDE THEORIQUE DES DIFFERENTS TYPES
D'USURE**

CHAPITRE I: ETUDE THEORIQUE DES DIFFERENTS TYPES D'USURE

I-1- Généralités

On définit l'usure comme perte progressive de matière de surface active de deux corps par suite du mouvement relatif de l'un par rapport à l'autre.

L'usure est avant tout un problème d'interface, la résistance à l'usure d'un matériau dépendra plus des propriétés de sa surface que des propriétés volumétriques du solide considéré.

En milieu industriel, l'usure peut être considérée comme le principal agent pouvant influencer sur la longévité des éléments mécaniques ainsi que sur la longévité de l'équipement lui même.

Les différentes classifications des mécanismes d'usure traduisent la complexité des transformations que peuvent subir les surfaces métalliques. Les différents critères de choix des matériaux pour telles ou telles applications industrielles montrent qu'il n'est pas possible de définir un essai universel de caractérisation des matériaux en vue de ces applications.

Les essais d'usure sur machine sont imprécis longs et coûteux ,pour cela nous proposons dans cette étude une méthode de laboratoire pouvant contribuer à l'évaluation du pouvoir abrasif des surfaces d'arbres rechargées et traitées et aider ainsi à résoudre certains problèmes industriels.

I-2- Historique du frottement et de l'usure

L'usure a d'abord été traitée en annexe du frottement ,phénomène qui est beaucoup plus facile à mesurer :

- Vers 1500,Léonard de Vinci fit les premières expériences du frottement
- Vers 1700 ,Amontons établit,le premier la loi du frottement
- Vers 1800,coulomb redécouvrit la loi d'amontons tombée dans l'oubli
- Beauchamp Taylor découvrit le régime fluide et en 1886,Reynolds établi les lois de la lubrification en régime hydrodynamique.

Les études systématiques ne sont entreprises que depuis une soixantaine d'années.

Bowden et Tabor, firent les premières recherches modernes sur le frottement et l'usure, leurs travaux portent sur les phénomènes d'adhérence.

Grubin établit les équations du régime élasto-hydrodynamique, Kragelski approfondit les phénomènes d'usure par fatigue.

Rehbinder, travailla sur les énergies mises en jeu dans l'apparition des surfaces neuves.

Rabinowicz se distingua par ses travaux sur le frottement et l'usure, où l'énergie libre des surfaces a été mise en jeu.

Suh, auteur de la théorie récente d'usure par délamination.

Borsoff et Talian se distinguèrent respectivement dans les domaines des engrenages et roulements.

Block, découvrit l'importance de la température instantannée lors du frottement.

Godet se distingua par ses recherches théoriques.

Caubet dans les applications industrielles, en particulier les traitements de surfaces.

En bref, le frottement et l'usure ont été étudiés et approfondis par plusieurs auteurs d'une renommée internationale, ils ont mis en oeuvre les bases théoriques et expérimentales relatifs au frottement, usure et lubrification.

I -3- Etude de la longévité des mécanismes des équipements

I -3-1- Facteurs motivant la mise hors d'usage et l'usure des machines

Le problème de la durée de vie des machines est d'une importance capitale aussi bien pour la conception de nouvelles machines que pour l'exploitation interne de celles qui sont déjà en service.

La notion de "longévité" des machines englobe l'étude, la conception, la technologie de fabrication, l'usure et la détermination, ainsi que les méthodes d'exploitation et de remise en état des machines.

C'est grâce aux investigations sur l'usure et en prenant en considération l'expérience acquise, que le constructeur pourra établir les bases d'études d'une machine à rendement élevé, de durée de service prolongée et à réparation à moindre coût.

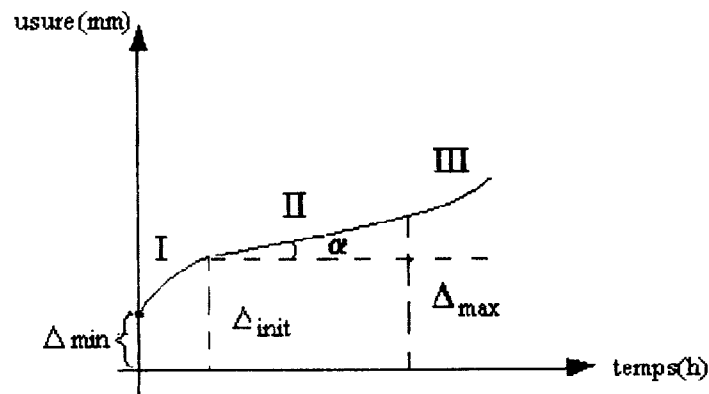


Fig.I-1: courbe caractéristique de l'usure d'un assemblage

Le caractère de croissance de l'usure dans un assemblage mobile de machine travaillant en régime de service constant est représenté sur la figure ci-dessus (fig.I-1).

Suivant l'axe des abscisses il est rapporté le temps en heures, et suivant l'axe des ordonnées l'usure en mm. Ici Δ_{min} , Δ_{ini} , Δ_{max} représentent respectivement la valeur de l'usure minimale, initiale et maximale

Le secteur I, appelé période initiale de travail de l'assemblage est le temps pendant lequel l'assemblage nouvellement conçu s'use plus rapidement qu'à l'ordinaire. Ce secteur représente le rodage et la vitesse d'usure se réduit alors progressivement .

Le secteur II représente la période d'exploitation normale de l'équipement pendant laquelle la vitesse d'usure croit d'une façon régulière, il est caractérisé par une valeur constante de α , inclinaison de la courbe.

La grandeur T représente la durée de fonctionnement d'un assemblage entre deux réparations, elle est exprimée en heures, soit:

$$T = \frac{\Delta_{\max} - \Delta_{\min}}{\text{tg}\alpha} \quad (1)$$

Où $\text{tg}\alpha$ est la grandeur indiquant la vitesse d'usure de l'assemblage, on la détermine généralement pendant l'essai de la machine par voie expérimentale.

Le secteur III représente la période d'usure rapide, celle-ci a lieu dans le cas où, en présence d'une usure maximale de l'assemblage, celui-ci continue à fonctionner.

I-4- classification de l'usure

On définit l'usure comme l'enlèvement de matière d'une surface rigide par suite d'une action mécanique, son impact économique est très important étant donné que ça détermine le temps de fonctionnement de la plus part des organes mécaniques.

Les types d'usure peuvent aller de l'usure douce régulière et contrôlable (usure normale) à la détérioration brutale, entraînant la mise hors service de la machine.

L'usure est classée en quatre types fondamentaux:

- 1-Adhésive
- 2- Abrasive
- 3 Corrosive
- 4 Par fatigue

D'autres types d'usure classées comme secondaires tels que:

Les corrosions de contact.

Les usures d'origine électrique.

L'Erosion par cavitation.

Ces classifications sont résumées dans le tableau (I-1)

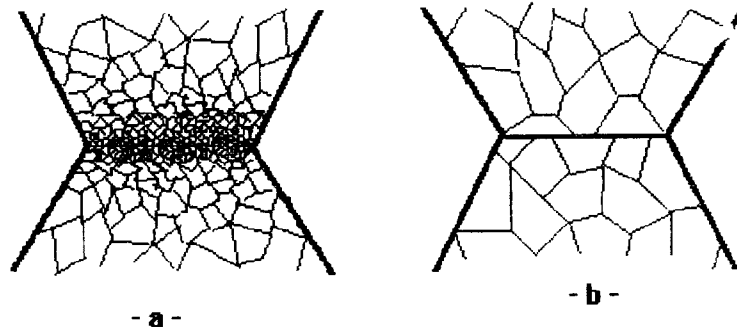
Tableau-1 Classification de l'usure [27]

Types fondamentaux d'usure	
<p><u>Adhésive</u> A) sévère B) modérée</p>	<p>Par contact métal-métal, micro soudure, transfert métallique et cisaillement des jonctions par frottement. Formation de gros fragments d'usure métallique , formation de petits fragments d'oxydes.</p>
<p><u>Abrasive</u></p> <p><u>Corrosive</u></p> <p><u>Par fatigue</u></p>	<p>Rayage d'une surface par des aspérités dures ou par des particules véhiculées par un fluide. Si ces particules sont très petites : <u>érosion abrasive</u>.</p> <p>Attaque chimique suivie par l'enlèvement des produits de réaction par action mécanique (frottement).</p> <p>Enlèvement de particules détachées par fatigue mécanique superficielle produite par accumulation de contraintes cycliques.</p>
Types secondaires d'usure	
<p>corrosion de contact</p> <p>érosion par cavitation</p> <p>d'origine électrique</p> <p>piquage électrique</p> <p>corrosion galvanique</p>	<p>Enlèvement de matière entre deux surfaces soumises à des vibrations mécaniques.</p> <p>Formation de cavités par éclatement (ou implosion) de bulles de gaz ou de vapeurs incluses dans un fluide.</p> <p>Erosion par étincelle</p> <p>Attaque électrolytique.</p>

I-4-1- L'usure adhésive

C'est le type d'usure la plus fondamentale, elle est due au cisaillement par frottement des microstructures ou jonctions qui se forment entre deux aspérités en contact direct: métal-métal .

En effet, lorsque les deux surfaces sont en mouvement relatif, l'énergie thermique dissipée par frottement liée aux très hautes pressions ponctuelles suffit pour provoquer un écoulement plastique localisé du métal et souder les aspérités en contact "les jonctions ou ponts " sont appelés points chauds [17], elles peuvent être selon [13] des soudures chaudes ou froides comme le présente la figure suivante .



a) soudure chaude ou métallique

b) soudure froide ou joint adhésif

Fig.I-3: jonctions entre deux aspérités dues à l'usure adhésive

I-4-1- Aspects théoriques de l'usure adhésive théorie d'ARCHARD[22]

L'intensité de l'usure adhésive en volume v est exprimée par la relation:

$$v = \alpha \frac{K P.L}{3 H_v} \quad (2)$$

où α : coefficient caractérisant le type de frottement

$\alpha = 1$ pour frottement sec à très faible vitesse

$\alpha < 1$ pour frottement lubrifié

k : coefficient d'usure caractérisant la probabilité pour qu'un fragment d'usure soit produit par une jonction donnée(usure sévère)

usure douce $K = 10^{-5}$

frottement bien lubrifié $K = 10^{-6}$ à 10^{-7}

le nombre **3** représente le facteur de force

où

P : la charge normale appliquée

L : longueur de glissement

Hv : dureté du matériaux le plus tendre

I-4-1-2- Dimensions des particules d'usure

Théorie énergétique de RABINOWICZ [13]

Le diamètre moyen des particules arrachées après adhésion a été calculé considérons une particule hémisphérique, pour que cette particule se détache sous forme de fragment d'usure, il faut que l'énergie élastique **Ee** cumulée fournie au fragment soit supérieure à l'énergie d'adhésion **Ea** du fragment sur sa base, soit:

$$Ee > Ea \quad (3)$$

$$\text{comme } Ea = \frac{v^2 s^2}{2.E} \quad (4)$$

où

d-diamètre de la particule

v- coefficient de Poisson

E-module d'élasticité longitudinal

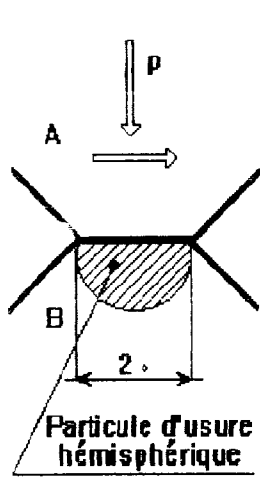
Wab-énergie d'adhésion des deux matériaux en contact

La condition limite pour qu'une particule se détache est donnée sous la forme suivante:

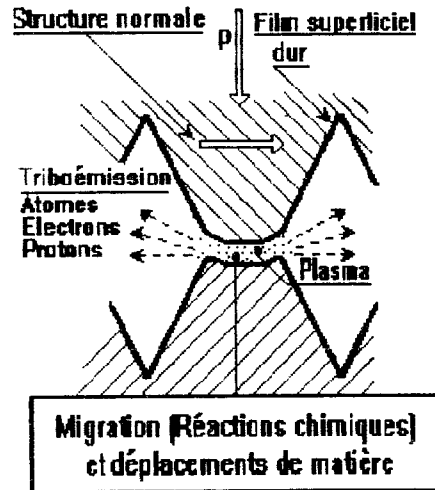
$$d = 60000 Wab/Hv \quad (5)$$

1-4-1-3 Modèles d'usure adhésive

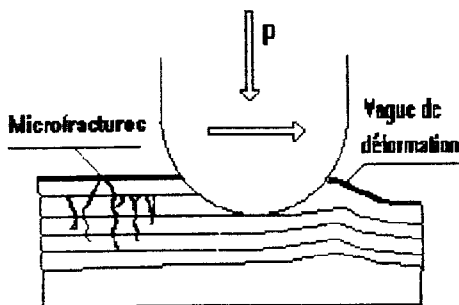
- Modèle de ARCHARD et de RABINOWICZ (Fig. A)
- 2-Modèle de THIESSEN (Fig.B)
- 3-Modèle de KRAGELSKY(Fig.C)
- 4-Modèle de SUH (Fig.D)



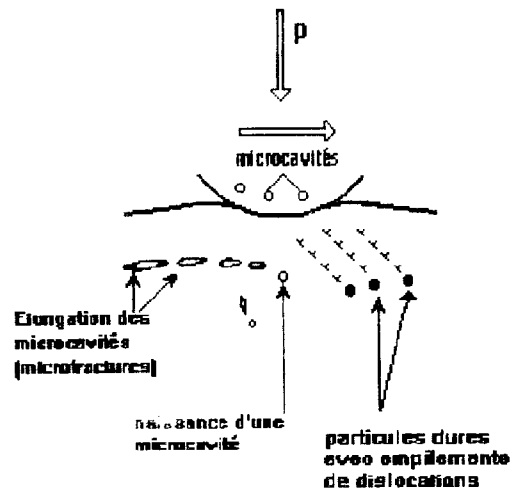
A . Modèle de Archard et de Rabinowicz.



B . Modèle de Thiessen.



C . Modèle de Kragelsky.



D . Modèle de Suh.

Fig.1-4: Modèles d'usure adhésive

I-4-1-4- Mesures à préconiser pour éviter l'usure adhésive

- Limiter la distribution des pressions, des contacts et des vitesses lors de la conception d'un mécanisme ou d'une machine .

- Assurer un refroidissement adéquat.

- Choisir des couples de matériaux à faible interaction ou à fort taux d'usure.

- Interposer entre les matériaux un film autolubrifiant à faible résistance au cisaillement.

I-4-2- L'usure abrasive

Deux processus d'abrasion des surfaces de frottement sont à distinguer

1. l'abrasion à deux corps due aux aspérités des surfaces .

2. l'abrasion à trois corps, provoquée par des particules d'usure.

I-4-2-1- Mécanismes d'abrasion

Les aspérités du matériau dur où les grains abrasifs peuvent être assimilés à des outils de coupe élémentaires (fig-I-5a) dont la plus part possèdent des angles de coupe négatifs, provoquant ainsi une abrasion par déformation plastique (défonçage ou labourage mécanique) et par enlèvement de matière par cisaillement et formation de micro-copeaux de coupe (FigI-5-b)

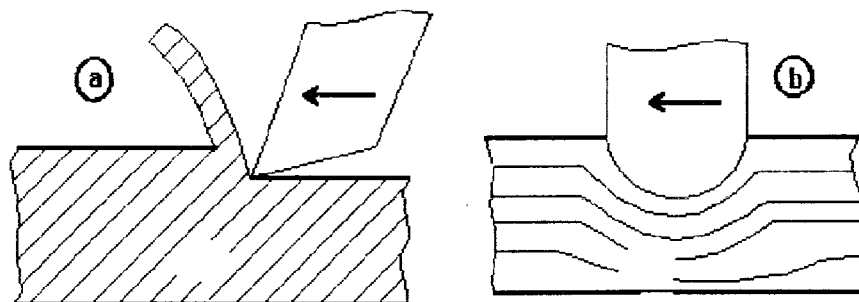


Fig.I-5: mécanismes de l'abrasion

La plupart du volume de métal du sillon abrasif éliminé de la surface sous forme de particules d'usure par rapport à celle affectée par la déformation plastique est relativement faible 10 à 20% en moyenne [27]. Cette répartition est affectée par de nombreux paramètres et plus particulièrement par:

-la dureté relative de la surface abrasée et de l'abrasif, lorsque la dureté de la surface rayée approche celle de l'abrasif $[(H_{\text{métal}} / H_{\text{abra}})=0,8 \text{ à } 1,3]$, celui-ci s'émousse. Si l'angle de la partie active de l'abrasif est très aigu, l'effet de coupe est marqué.

Au contraire, si elle est arrondie et polie la majeure partie de l'abrasion sera constituée par des sillons plastiques, très peu de matériau se trouvant enlevé (Fig: I-5). Pour les matériaux non métalliques fragiles, l'abrasion provoque de larges fractures le long de la trace d'usure et l'usure par effritement des surfaces peut devenir 10 fois plus élevée que celle de la surface métallique ductile de dureté correspondante.

1.4-2-2 Aspects théoriques de l'usure abrasive

En théorie, on suppose que la surface la plus dure est recouverte d'aspérités, sous forme de cône, sa génératrice forme un angle θ avec la surface dont elle est issue, l'expression du volume de matériau enlevé est proposée par KRAGELSKI [23] sous forme d'expression suivante

$$V = \frac{\text{tg}\theta}{\pi} \frac{L.H}{P} \quad (5)$$

Cette expression est similaire à celle donnée par ARCHARD [22] où

le rapport $\frac{\text{tg}\theta}{\pi}$ est remplacé par $\frac{K}{3}$

Plusieurs auteurs [13,23,30] s'accordent pour considérer que l'usure abrasive, d'une surface métallique peut s'exprimer par la relation simplifiée de l'intensité d'usure, qui est donnée sous la forme suivante:

$$\frac{dV}{dl} = K_{\text{abr}} \frac{P}{H_v} \quad (6)$$

avec $\frac{dV}{dl}$: désignant l'intensité d'usure en volume par unité de longueur de glissement.

P: force appliquée

H_V : dureté de la surface la plus tendre

K_{abr} : coefficient d'abrasion, fonction de la géométrie des grains abrasifs.

La résistance à l'usure ε est l'inverse de l'intensité d'usure, et s'exprime par la relation suivante:

$$\varepsilon = \frac{dl}{dV} \quad (7)$$

1-4-2-3- Aspects métallurgiques de l'usure abrasive; cas des aciers [39].

La résistance à l'usure des aciers recuits est similaire à celle des métaux purs, elle est proportionnelle à leur dureté. Pour chaque type d'acier trempé, la relation résistance à l'usure-dureté est encore linéaire mais possède une pente plus faible comme le représente la figure (1-7).

La résistance à l'usure abrasive des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés augmente avec la teneur en carbone, indépendamment de celle des autres éléments d'alliage. Ainsi, pour un acier constitué uniquement de ferrite et de cémentite, la résistance à l'usure croît proportionnellement avec la teneur en cémentite. Mais la structure de l'acier est aussi très importante, une structure perlitique étant supérieure à une structure sphéroïdale.

Ainsi, dans les aciers hypoeutectoides, la résistance à l'abrasion augmente, d'une part, avec la teneur en perlite, donc en carbone, et d'autre part, lorsque la distance interlamellaire moyenne de la perlite diminue.

Pour les métaux purs à l'état recuit, la résistance à l'usure ε est proportionnelle à la dureté des surfaces.

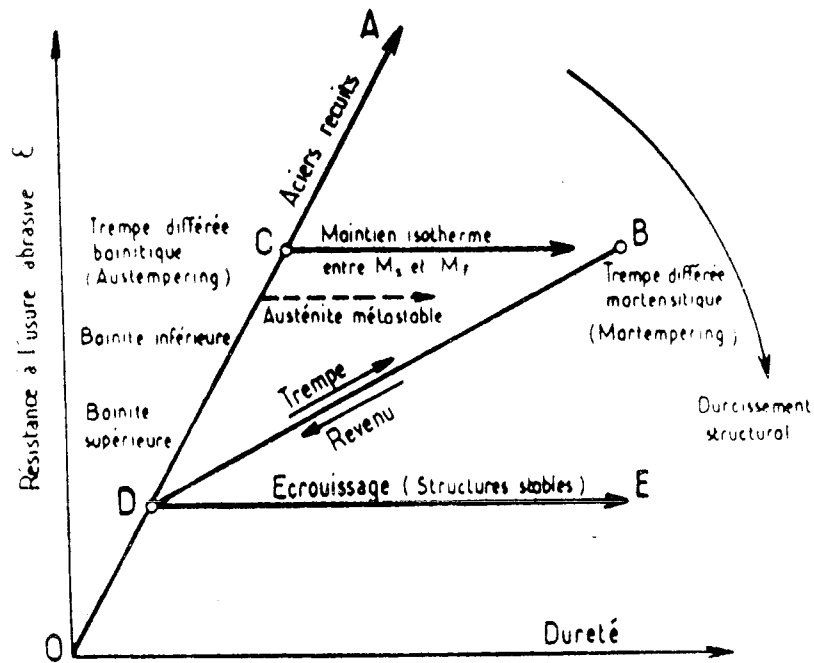


Fig.I-6 Variation de la résistance à l'usure abrasive en fonction de la dureté [39]

La linéarité de l'expression $\varepsilon = f(Hv)$ est vérifiée lorsque l'abrasif est nettement plus dur que le métal abrasé, jusqu'à une valeur $H_{\text{métal}}/H_{\text{abrasif}}$ de l'ordre de 0,5 à 0,6. Au delà l'abrasif commence à s'emousser et la résistance à l'usure abrasive augmente très vite [31].

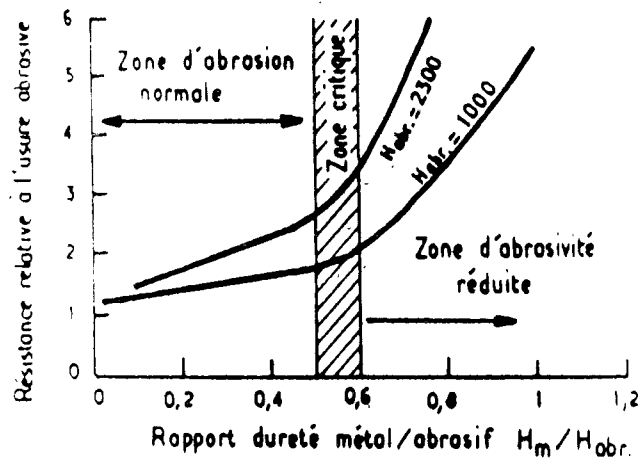


Fig.I-7: Relation résistance relative à l'abrasion rapport dureté métal/dureté abrasif :cas des aciers perlitiques et martensitiques d'après [31]

Lorsque le rapport atteint et même dépasse l'unité, l'abrasion ne cesse pas, les surfaces présentent seulement un aspect plus poli. Il semble que le critère de cessation d'abrasion soit en fait l'égalité des limites élastiques du métal et de l'abrasif.

Les études de [31,32,33] vérifient la linéarité entre la résistance à l'usure ε des métaux purs et leur module d'élasticité longitudinal E.

La résistance à l'abrasion suit l'ordre inverse des distances interatomiques, les interactions sont plus fortes si les atomes sont plus serrés, donc la résistance à l'usure abrasive est plus grande pour un métal plus lourd.

I-4-2-3 Influence des différents facteurs sur l'usure

L'usure est fortement influencée par trois paramètres

a- Caractéristiques de l'organe

b- Conditions d'exploitation

c- Frottement et lubrification

a- sont liées aux matériaux antagonistes, à leurs propriétés physiques et mécaniques, et aux surfaces frottantes, à leurs caractéristiques et aux traitements subis.

b- sont représentées par la cinématique et la dynamique des charges appliquées, ainsi que par le temps et la température. Le montage et le rodage des surfaces frottantes peuvent affecter la durée de service d'une machine.

c- dépendent des caractéristiques intrinsèques du lubrifiant et des conditions de lubrification.

I.5- Modes de dégradations des surfaces et procédés de remise en état.

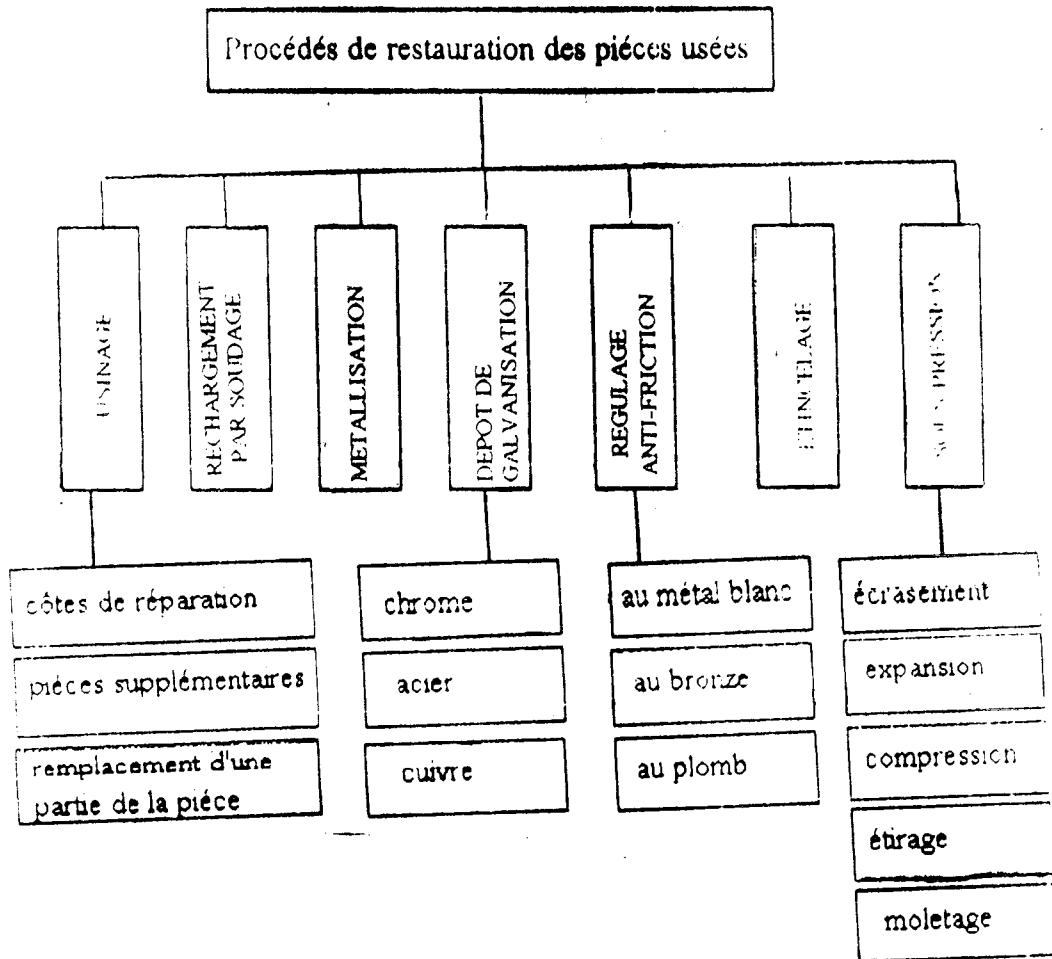


Fig.I-8 : modes de dégradation des surfaces et méthodes de remise en état [43]

I-5-1 Dégradation sous l'effet de l'usure adhésive

- adhésion et cisaillemen,
- fatigue du matériau,
- formation d'alliage et mise en solution réciproque des métaux.
- fissuration des couches superficielles, cas des surfaces friables.
- Oxydation qui fournit le film d'oxyde protecteur

I-5-2 Dégradation sous l'effet de l'usure abrasive

- déformation élastique pour des charges faibles,
- déformation plastique pour des charges élevées,
- micro-usinage,
- effritement des matériaux fragiles.

I-6: Paramètres influençant l'usure

L'usure est avant tout un problème d'interface, la résistance à l'usure d'un matériau dépendra plus des propriétés de sa surface que des propriétés volumiques du solide considéré .

La résistance à l'usure est souvent mise en relation avec des propriétés mécaniques (dureté et tenacité) [13,14] .Les études [12,14] confirment la relation entre usure et dureté, [13]. Dans une autre étude, il a été constaté que c'est la dureté et la tenacité qui sont les plus importantes. L'auteur a montré en particulier que l'importance de chaque paramètre est relative, lorsque le cisaillement (usure adhésive et abrasive) à l'interface est prédominant.

I-6-1: Géométrie de l'abrasif

La forme de la partie active a une incidence sur l'effet de coupe si les angles sont très aigus. Dans le cas de surfaces arrondies et polies, l'abrasion sera constituée par des sillons plastiques. Une particule anguleuse relativement tendre est plus néfaste (abrasive) qu'une particule très dure mais arrondie.

Selon la géométrie du contact, sphère-plan, cône-plan [35] évalue la pression moyenne

P correspondant au début de la plasticité comme étant le produit d'un coefficient de proportionnalité C_0 et la limite élastique du matériau.

Le coefficient C_0 est la limite élastique du matériau.

Le coefficient C_0 est lié à la géométrie du contact

$$\begin{array}{ll} \text{coin: } C_0 = 0,91; & \text{Cône } C_0 = 0,5 \\ \text{sphère: } C_0 = 1,1; & \text{Cylindre } C_0 = 1,5 \end{array}$$

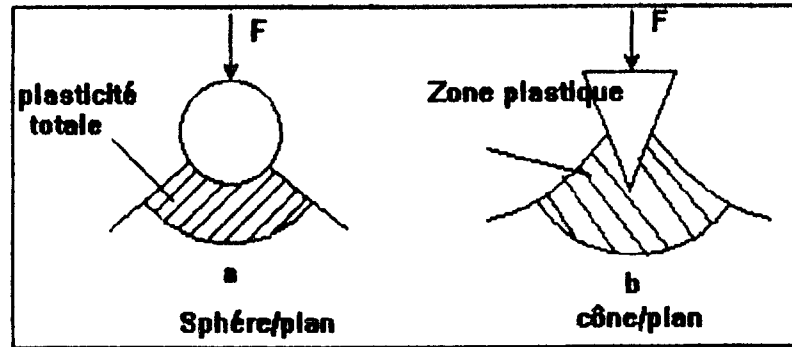


Fig I-9: Déformation d'un contact

Une étude [23] sur l'acier, le cuivre et l'aluminium a montré que le taux d'usure d'une surface métallique augmente rapidement avec la grosseur des grains abrasifs jusqu'à une valeur critique, ensuite il varie d'autant moins que la dureté du métal est grande (Fig.I-10)

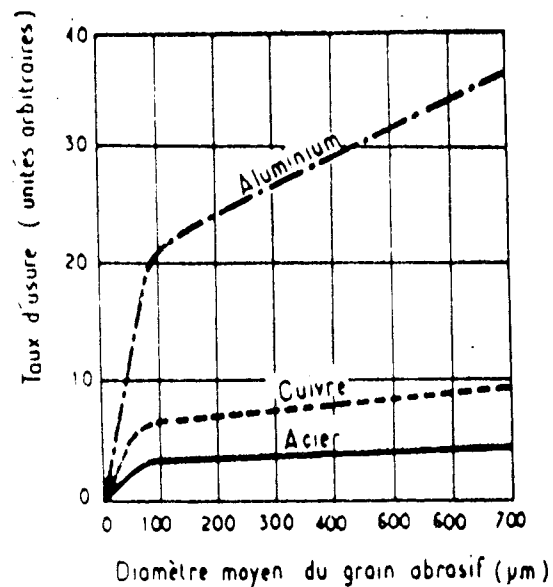


Fig.I-10: Influence de la dimension du grain abrasif sur le taux d'usure

Pour deux couples de matériaux d'aciers et dans quatre milieux d'essai de lubrification différents .

- 1- Sans additif
- 2- 3,5% $C_6 H_5CHO$

- 3- 5% $HO C_9 H_6 N$
- 4- 2,5% $Cu(ScN)_2$

Les travaux de [34] montrent l'évolution de l'intensité de l'usure en fonction de la grosseur moyenne des particules abrasives.

I-6-2 Influence de la charge normale

L'intensité d'usure est directement proportionnelle à la charge normale jusqu'à une valeur critique, caractérisée par la déformation plastique massive de la surface ou par l'effritement de l'abrasif.

Des études montrent en plus le caractère non linéaire du taux d'usure aux faibles charges et pour les petites dimensions des particules [27].

Dans la même étude, [34], en gardant la même vitesse de glissement et les milieux de lubrification, la fig. I-11 montre l'évolution de l'intensité de l'usure en fonction de la charge normale appliquée.

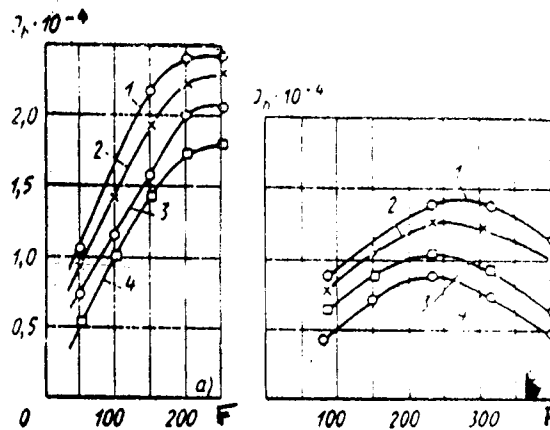


Fig.I-11- :Evolution de l'intensité d'usure en fonction de la charge normale

Pour cinq matériaux différents et pour un couple palier-tourillon la figure I-12 représente l'évolution de l'intensité d'usure du tourillon et du palier en fonction de la pression appliquée [34].

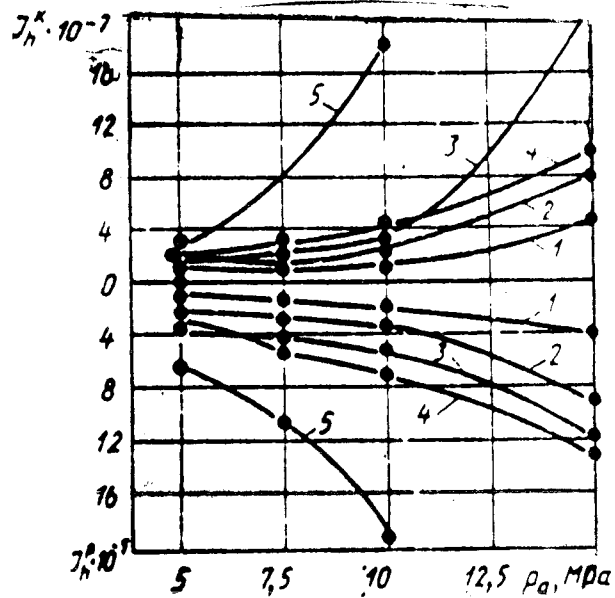


Fig -I-12: Evolution de l'intensité d'usure en fonction de la pression appliquée

I-6-3- Influence de la vitesse de glissement

Plusieurs auteurs, s'accordent à noter que la vitesse de glissement a un caractère proportionnel sur le taux d'usure, légère variation pour les faibles vitesses (1 à 2 m/s), puis devient pratiquement indépendante de la vitesse [27], ou comme les montrent les figures I-13 et I-14, résultat des travaux [34], pour les mêmes matériaux que les figures I-11 et I-12, le caractère de proportionnalité souligné par les travaux [27] est bien vérifié.

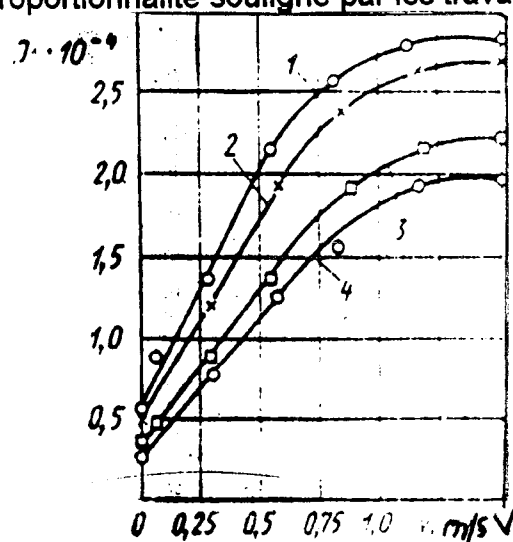


Fig.13: Evolution de l'intensité d'usure en fonction de la vitesse de glissement

Dans le même ordre d'idée, cinq matériaux de tourillons et de paliers sont éprouvés à l'usure en variant la vitesse de glissement, le résultat trouvé par [34] est représenté par la figure suivante:

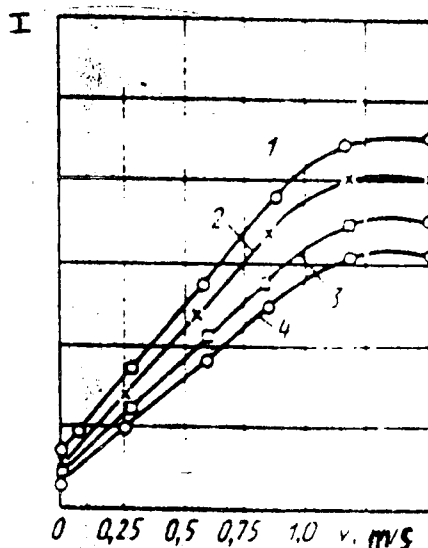


Fig.I-14: Evolution des intensités d'usure d'un couple tourillon/palier lisse en fonction de la vitesse de glissement

I-6-4- Influence de la structure du métal

Lorsqu'une structure est constituée d'une phase sphéroïdale dure dispersée dans une matrice plus tendre (cémentite sphéroïdale dans ferrite des aciers, particules de carbure métallique dans métal).

I-6-4-1- Loi de HALL-PETCH

La résistance à l'usure e est inversement proportionnelle à la racine carrée de l'espacement moyen des particules d .

$$e = K/\sqrt{d} \quad (8)$$

I-6-4-2- Cas des matériaux hétérogènes

Il a été vérifié que la résistance à l'usure abrasive des matériaux hétérogènes est égale à la somme des résistances de chacun des constituants pondérés par leur concentration volumique respectives.

I-6-5 Influence de la dureté sur l'abrasion

Une expérience effectuée par TABOR [17], sur le comportement d'une bande de tôle d'acier, montre que le résultat est fonction de la dureté et ce, sous l'action d'une pointe abrasive dont la dureté est comprise entre celle des extrémités de la surface à étudier. Les duretés de la tôle éprouvée sont obtenues par un traitement thermique judicieux, de manière à présenter une variation de dureté à peu près continue par toute sa longueur. Ceci doit être vérifié par des essais de dureté Vickers.

Si on note par H_p la dureté de la pointe de la pyramide en diamant et H_s celle de la surface éprouvée, alors on constate que la pointe de dureté H_p ne raye la surface de dureté H_s que si la relation suivante est vérifiée.

$$H_p > 1,2 S \quad (9)$$

Donc pour une valeur inférieure, la rayure par abrasion n'est pas significative .

Cas des métaux purs

Des études confirment, dans le cas des métaux purs, que la résistance à l'abrasion (cas de l'usinage au papier abrasif) est proportionnelle à leur dureté. Des modèles sont proposés, en accord avec cette constatation en supposant que tout le volume sollicité par un grain est abrasé [37].

I-6-6- Influence de la température de fusion

Dans certaines conditions de frottement les températures atteignent la valeur (1000°C) par conséquent les abrasifs perdent leur dureté initiale. En se basant sur ce phénomène, des études [35] élucident certaines constatations.

1- L'oxyde de plomb, dont la température de fusion $T_f = 880^\circ\text{C}$ raye facilement la surface du bronze (Cu 65%, Sn 35%), avec une température de fusion $T_f = 720^\circ\text{C}$, et une dureté Brinell de 460 HB, mais ne raye pas des métaux moins durs tels que;

- a- Le Nickel ($T_f 1452^\circ\text{C}$, 60 HB)
- b- Le Paladium ($T_f 1555^\circ\text{C}$, 30 HB)
- c- Le Molybdène ($T_f 2470^\circ\text{C}$, 100 HB)

D'autre part un autre matériau plus mou, l'oxyde de Zinc (Zn $T_f 1975^\circ\text{C}$, 200 HB) arrive à rayer le quartz ($T_f 1700^\circ\text{C}$, 1100 Hv).

Donc compte tenu de ces constatations contradictoires, il y a lieu de faire les réflexions suivantes:

- 1- L'abrasion ne peut être décrite simplement, pour des corps ductiles, par une relation volume abrasé-dureté
- 2- Des considérations énergétiques, rhéologiques et géométriques sont implicites.

I-6-7- Influence des traitements thermiques

Il paraît que la trempe classique augmente la résistance à l'usure alors que le revenu la diminue. Les traitements isothermes, tels que la trempe différée martensitique et la trempe bainitique, en améliorant la tenacité des aciers, conduisent à dureté égale, à de meilleurs résultats que la trempe classique. Le durcissement par écrouissage préalable des aciers ne conduit à aucune amélioration de leur résistance bien que des travaux confirment l'inverse.

RABINOWICZ [37] donne les caractéristiques structurales des métaux ferreux et leurs effets sur les caractéristiques tribologiques (tableau-I-2)

Tableau-I-2:Caractéristiques des constituants structuraux des métaux ferreux et leurs effets sur les performances tribologiques

structure des constituants	constituant	Dureté Hv	effet des structures des constituants sur la résistance à l'usure
Ferrite	-Fer α Fer faibl. allié	50-135 100-270	faible dureté et faible résistance à l'usure
Austénite	-Fey	150-200	faible dureté et bonne résistance à l'usure sous les chocs
Perlite	lamellaire globulaire	190-230 160-190	bonne résistance à l'usure faible
Martensite	dans l'acier	800-900	une grande dureté et bonne résistance en fonction du %de C
Carbure	cémentite carbure complexe	1000à 1150 1300 à 1300	très bonne résistance en fonction de la nature morphologique

I-7-Comportement des plastiques au frottement : cas des P.T.F.E

Le frottement entre métal et plastique provoque une forte adhésion à l'interface, le plastique ou le métal sont cisailés et les deux corps échangent des particules [58]

Par rapport aux métaux, le module d'élasticité des polymères rigides (tel que le PTFE) est faible et extrêmement sensible aux variations de température.

La théorie moderne attribue la friction dans les polymères à deux mécanismes

- l'adhésion,
- la déformation.

L'adhésion est produite par les atomes de surface qui forment entre eux des liaisons de forte énergie, la force requise pour rompre ces liaisons sera la force de frottement.

Le mécanisme de déformation se produit lorsqu'une surface molle est labourée par une autre plus dure .

De nombreuses investigations ont été conduites dans le but d'établir l'importance relative de ces mécanismes dans la friction des polymères rigides, les principales particularités qui ont été énoncées pour le comportement de ces matériaux sont les suivantes:

-l'aire de contact dépend non seulement de la charge, mais aussi de la géométrie de la surface [56,57,58];

-la déformation des surfaces en contact constitue une part non négligeable du processus de friction et donne la forme de l'hystérésis viscoélastique [58,59,70];

-la friction des polymères rigides dépend de la vitesse de glissement et de la température d'une manière qui reflète ses propriétés viscoélastiques [71].

-la force de frottement des polymères rigides est interprétée comme la contribution de deux forces ; elle est donnée par la somme additive suivante:[71]

$$F = F_a + F_d$$

Pour les PTFE la composante d'adhésion : $F_a = 0$;

-l'importance relative de ces deux composantes est fortement influencée par quelques facteurs tels que: l'environnement , la nature des surfaces en contact, la charge appliquée, la vitesse de glissement, la température [71].

I-8- Méthodes d'étude de l'usure

I-8-1- Caractérisation microgéométrique des surfaces

Une surface réelle présente des défauts microgéométriques qui peuvent être analysés conventionnellement et ou fonctionnellement.

Du point de vue conventionnel ,ces défauts sont classés selon l'échelle d'analyse: écart de forme, ondulation, rugosité, et défaut cristallographique .D'un point de vue fonctionnel, ces défauts doivent être examinés à l'échelle d'utilisation, la géométrie du contact entre les surfaces pour en déduire les perturbations que leur présence provoque sur le comportement du contact.

Les défauts sont des variations de la hauteur d'une surface par rapport à une référence. Pour simplifier, cette variation on la considère comme aléatoire et stationnaire .

Dans un contact mixte, il existe des interactions entre les rugosités des surfaces, ces zones d'interaction sont des sites privilégiés pour des modifications physico-chimiques de la surface.

Plusieurs moyens d'analyse et de mesure peuvent à priori rendre compte et quantifier ces zones d'interaction ou surfaces frottantes .

A- Méthode optique

A l'échelle macroscopique qui consiste à évaluer l'usure soit directement sur la surface, soit un des répliques en matière plastique, réplique qui permet de juger l'évolution de l'usure en fonction du temps.

A l'échelle microscopique, avec un faible grossissement permettant de faire des observations sur les destructions des systèmes cristallins, le cheminement des craquelures, la forme et le volume des particules arrachées, l'épaisseur des couches superficielles.

B-Méthode mécanique

Par déplacement d'une fine aiguille d'un profilomètre sur la surface, afin de quantifier sa topographie, les déplacements sont amplifiés de 20 à 100 fois, et ainsi on peut analyser d'une façon précise le nombre et l'importance des aspérités, leur forme, leur contour moyen de la surface et son évolution en cours d'essai.

C- Méthode analytique

Basée sur la centrifugation des particules en suspension dans le lubrifiant .

Les analyses chimiques ou spectrographiques permettent de doser des traces des matériaux et de déterminer l'organe ayant subit l'usure par frottement.

Méthode des pesées : consistant à peser avant et après l'essai de frottement.

Mesure d'une longueur.

Inconvénients des mesures classiques

La mesure de l'usure par métrologie classique nécessite un certain nombre de conditions dans le démontage de la pièce, ce qui implique une perte de temps et de manque à gagner.

D- Technique avancée

Avantages des méthodes avancées : (radioactives)

Les méthodes radioactives permettent de s'affranchir du démontage, de la température de la pièce, et compte tenu de leur grande sensibilité diminuent de façon très significative la durée des essais : Technique d'irradiation pour fines usures.

E-Technique d'irradiation

- 1 - Par neutron, dans un réacteur nucléaire,
- 2 - Par des particules chargées à l'aide d'un accélérateur.

La 2^{ème} méthode c'est l'activation superficielle par des particules chargées. Cette méthode est la plus employée, car elle représente de nombreux avantages parmi lesquelles on cite:

- activation possible des pièces de grande dimensions
- maintien de la surface d'irradiation et de l'épaisseur du matériau actif (de l'ordre du micron-mètre à $2 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}$)
- faible activité à manipuler.
- sensibilité dans un liquide ($5\mu\text{g/l}$)

I-8-2-Moyens de génération de l'usure

I-8-2-1- Les machines d'essais d'usure et de frottement

a-Principe de fonctionnement

Le principe de base de ces machines d'essais consiste à faire frotter deux pièces, l'une d'entre elle est en principe immobile. Les informations recueillies à l'issue de ces essais donnent une première idée sur le comportement en service des matériaux, des surfaces élaborées et des lubrifiants. Il est toutefois difficile d'établir des constats directs qualitatifs et quantitatifs entre les résultats de laboratoires et ceux obtenus en service (sur site).

I-8-2-2-Configuration cinématique des machines d'essais d'usure et de frottement

Durant les essais d'usure et de frottement, et en fonction de la machine d'essai utilisée, on pourra faire intervenir un nombre plus ou moins élevé de variables, tel que

- Le temps, la vitesse, la charge appliquée etc.....

Suivant la cinématique et la géométrie, nous avons des machines simples:

(fig I-15)

- a-Plaquette sur disque
- b-Disque sur disque
- c-Frotteur (pion) sur cylindre
- f-Cylindre sur cylindre

Dans nos essais nous avons utilisés le type (c) .

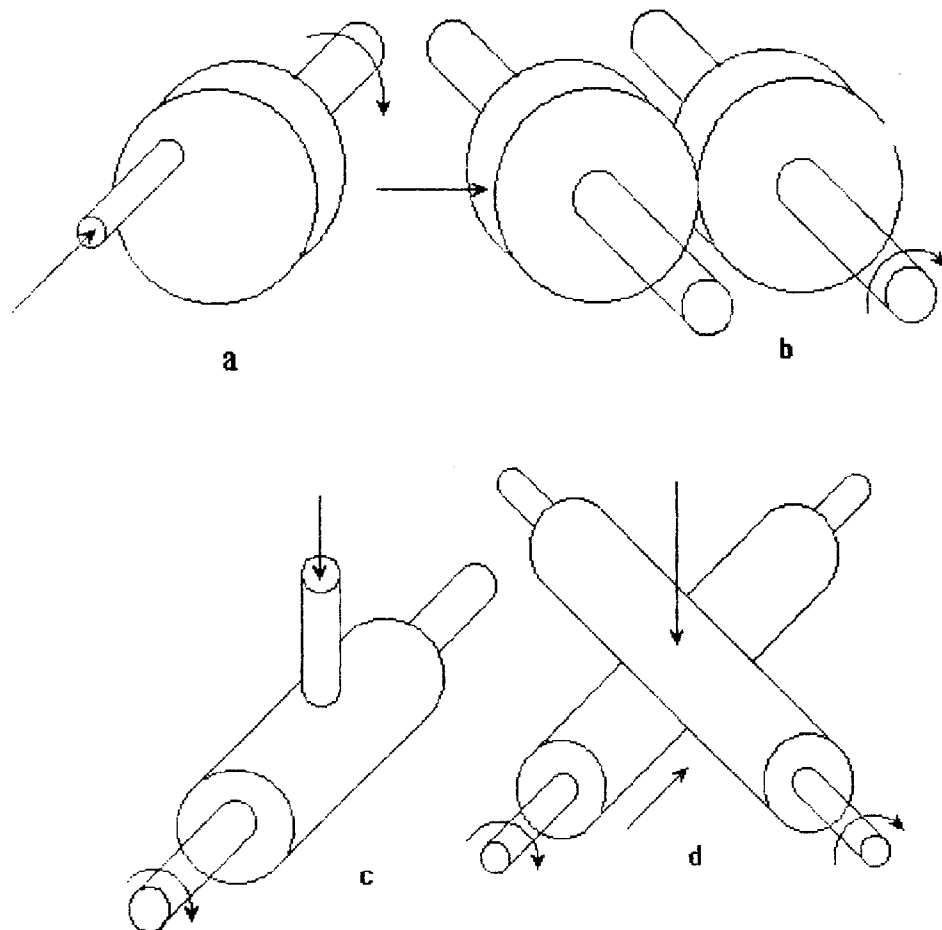


Fig.I-15: Configuration cinématique de machines d'essais d'usure

CHAPITRE II

MODES DE DEGRADATIONS DES SURFACES USEES

ET METHODES DE RESTAURATION

CHAPITRE II : MODES DE DEGRADATIONS DES SURFACES USEES ET METHODES DE RESTAURATION

I- INTRODUCTION

Dans ce deuxième chapitre, nous présentons les différents types de dégradations rencontrées en milieu industriels et les préconisations éventuelles, la méthode de rechargement à l'arc électrique a été retenue dans notre étude et a fait l'objet d'une explication suffisante pour la mettre en application. Les paramètres retenus sont extraits de tableaux spécifiques (voir annexe 2, 3,4,5) et ont fait l'objet d'essai de vérification.

II -1- Modes de dégradation des surfaces

La dégradation des surfaces par usure est l'un des problèmes industriels les plus usuels, en dehors de la fatigue et de la corrosion, qui conduisent au remplacement des pièces dans l'industrie. Ce phénomène constitue 30 % des avaries dans les applications mécaniques. Il s'agit d'un processus de dégradation très général qui englobe de nombreux mécanismes et qui fait appel à des lois de comportement très diverses (résistance à l'écaillage, tenue à la fatigue, tenue à l'oxydation et à la corrosion,...). L'analyse nécessite une approche pluridisciplinaire, relevant de la physique du solide, de la chimie physique, de la métallurgie et de la mécanique de contact.

II-1-1- L'Adhésion

L'Adhésion, apparaît dans le cas du glissement de deux surfaces en condition peu ou pas lubrifiées et quand la pression est suffisante pour provoquer une déformation plastique des aspérités de surface, et dépend dans une large mesure de l'affinité chimique des constituants des deux surfaces antagonistes. A la différence de l'abrasion, ce phénomène peut être sujet à de brutaux changements de régime dont le cas extrême est le grippage. Sur le plan métallurgique, le processus d'adhésion dépendra dans une large mesure des paramètres liés au matériau : limite d'élasticité, résistance à l'oxydation, microstructure, affinité chimique des éléments d'alliage pour ceux de la surface

II-1-2- L'Abrasion

L'Abrasion , correspond à la pénétration de particules dures dans la surface d'un matériau, avec la formation de sillons, déplacement de matière et création de micro copeaux.L'abrasion est un phénomène constant en fonction du temps dont l'amplitude est modifiée, au niveau du matériau, par la dureté, le coefficient n, le pourcentage, la taille et la répartition des phases dures. Ce phénomène est amplifié par l'agressivité de l'atmosphère avec la génération de particules d'oxydes qui peuvent être considérées comme des abrasifs.

II-1-3- Fatigue de surface

L'endommagement par fatigue de surface résulte de l'application répétée d'efforts de compression et de cisaillement lorsque deux pièces en contact ont un mouvement relatif de roulement pur ou de roulement de glissement. Il en résulte une plastification des zones de concentration maximale de contraintes qui, selon les conditions géométriques et mécaniques du contact, seront en surface ou en sous couche. Cette plastification conduira à l'amorçage de fissures et à la formation de piqûres ou d'écaillages. Ce phénomène dépend des paramètres géométriques et mécaniques du contact, de la structure métallurgique des surfaces (contraintes résiduelles, dureté superficielle, taux inclusionnaire), du lubrifiant et de la compatibilité chimique des matériaux antagonistes.

II-1-4- Erosion

L'érosion et la cavitation correspondent au bombardement d'une surface par des particules solides, en milieu liquide ou gazeux dans le premier cas et par des particules gazeuses en milieu liquide dans le deuxième cas. L'énergie cinétique et l'angle d'impact des particules sur la surface sont des paramètres essentiels.

Dans le cas de l'érosion, il y a selon l'angle d'impact effet de coupe ou effet de chocs et les critères métallurgiques à prendre en compte seront différents (dureté, écrouissabilité ou ténacité). Dans le cas de la cavitation, l'éclatement répété des bulles au contact de la surface avec création d'ondes de chocs entraînant une dégradation qui débute comme pour la fatigue de surface.

II-1-5- Corrosion "mécanique"

La corrosion de contact est provoquée par le mouvement relatif de faible amplitude entre deux surfaces antagonistes (150 μm environ) qui entraîne successivement des adhésions locales avec plastification des aspérités, un écrouissage superficiel, la propagation de fissures par fatigue avec émission de débris, l'oxydation des particules émises et leur déplacement dans le contact. Ce phénomène dépendra de la dureté superficielle des antagonistes, de leur affinité chimique et de leur oxydation et à la corrosion.

II-2- Classification des traitements et revêtements (voir annexes 6A, 6B, 6C)

II-2-1- Traitements avec transformation structurale

Ces traitements ont comme finalité d'augmenter la dureté superficielle des matériaux et d'introduire un état de contraintes de compression en surface. Ces transformations structurales peuvent être d'origine mécanique ou thermique.

II-2-1-1- Transformation structurale d'origine mécanique

Dans ce cas l'écrouissage obtenu par différents procédés (galetage, grenailage...) crée dans les zones superficielles une consolidation du matériau ou y induit des transformations structurales. De tels traitements sont appliqués essentiellement sur les aciers (industrie automobile, pièces d'usure) les superalliages et les alliages de titane (industrie aéronautique). Leur but essentiel est l'amélioration de la tenue à la fatigue mécanique ou de la résistance à l'usure abrasive.

II-2-1-2- Transformation structurale d'origine thermique

Les traitements avec transformations structurales d'origine thermique sont appliquées essentiellement aux aciers dans le but d'augmenter la résistance au frottement et à la fatigue de contact. Que ce soit la trempe par induction, par impulsion, par irradiation laser ou par faisceau d'électrons. Ces divers traitements ont l'avantage de réduire les déformations induites par traitement thermique, d'aller dans le sens des économies d'énergie puisque le chauffage est plus localisé, enfin d'avoir un matériau tenace dans sa masse et aussi dur que possible en surface.

II-2-1-3- Traitements thermo-chimiques avec diffusion

Ce traitement dont la finalité est la diffusion d'un élément métalloïde ou liquide ont pour conséquence soit d'augmenter la dureté superficielle et d'induire un état de contraintes de compression en surface, soit d'élever la teneur superficielle en éléments d'alliage (Cr, Al par exemple). Dans le premier cas, c'est la résistance à l'usure et à la fatigue de surface qui est améliorée, dans le second cas, c'est la résistance à l'oxydation et à la corrosion à haute température.

II-2-1-3-1- Traitement avec diffusion de métalloïde (C,N,C+N,B)

Ces traitements utilisent la voie liquide (bain de sel), la voie solide, la voie gazeuse et plus récemment le bombardement ionique. Ce type de traitement reste largement employé, notamment dans l'industrie automobile, mécanique et aéronautique.

II-2-1-3-2- Traitement avec diffusion de métaux :

Ces traitements utilisent surtout la voie liquide et la voie solide pour obtenir sur des profondeurs de 20 à 100 μm des enrichissements en éléments d'alliages tels que le chrome, l'aluminium et le silicium. il représentent 90% de revêtements employés dans l'aéronautique [3] (superalliages, alliages de titane) pour améliorer la résistance à l'oxydation et à la corrosion à haute température.

II-3- Méthode utilisée

II-3-1- Le rechargement

II-3-1-1- Principe du rechargement

L'opération de rechargement est considéré comme un procédé connexe du soudage qui consiste à recouvrir de métal tout ou une partie d'une pièce métallique.

Deux buts sont à envisager:

- remplacer un fragment de métal usé ou cassé, il s'agit alors d'un simple soudage entre la pièce à réparer et un métal d'apport ressemblant le plus possible au métal de base .
- recouvrir une partie de la pièce d'un métal différent ayant des propriétés particulières (anti-usure, anti-corrosion etc....).

La couche rechargée étant en général plus dure et moins élastique que le métal de base, il peut s'en suivre des tensions au niveau de la zone de contact.

Le principe physique du processus de remise en état par rechargement consiste à appliquer sur la surface usée une couche de métal en mettant en fusion le matériau d'addition et de la surface à recharger. Le rechargement s'opère par fusion où la source principale de chaleur est engendré par amorçage de l'arc électrique.

Le rechargement n'est qu'une application du soudage, donc il obéit aux mêmes lois que ce dernier, beaucoup d'études ayant trait au soudage ont été menées [51,52,61,68] ,on essaye de présenter dans ce qui suit l'essentiel sur le soudage afin d'aboutir à un choix judicieux des paramètres de rechargement (soudage) .

II-3-1-2 -Principe du soudage

Si l'on porte deux électrodes à un potentiel différent et qu'on fait le contact, un courant passera vu le contact, la résistance est grande et il y a une élévation de température par effet JOULE;c'est l'amorçage .

L'opération de soudage est caractérisée par un apport important et localisé de chaleur sur la pièce à recharger.

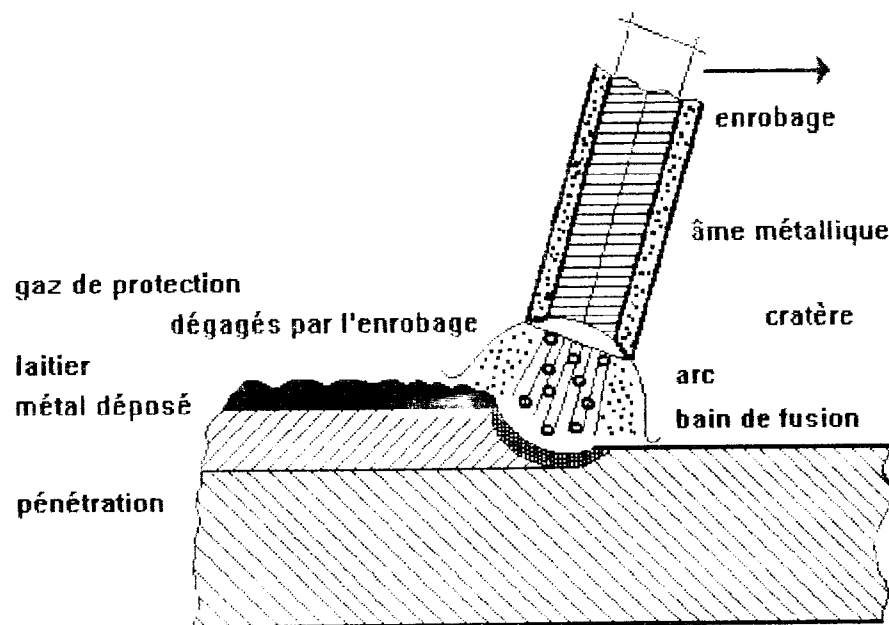


Fig II-1: Schéma de principe du soudage à l'arc électrique

II-3-1-3- Effet de l'opération de soudage sur les aciers

La conduction des calories vers les différents points du métal de base, situés dans la zone affectée par la chaleur appelée: (Z.A.C.) crée des cycles thermiques constituée par:

- Un chauffage très rapide jusqu'à une température comprise entre la température initiale et celle du début de fusion de celui-ci suivant la distance de la zone fondue.

- Un refroidissement qui succède immédiatement au chauffage et qui est plus ou moins rapide tout en étant toujours situé un temps très court.

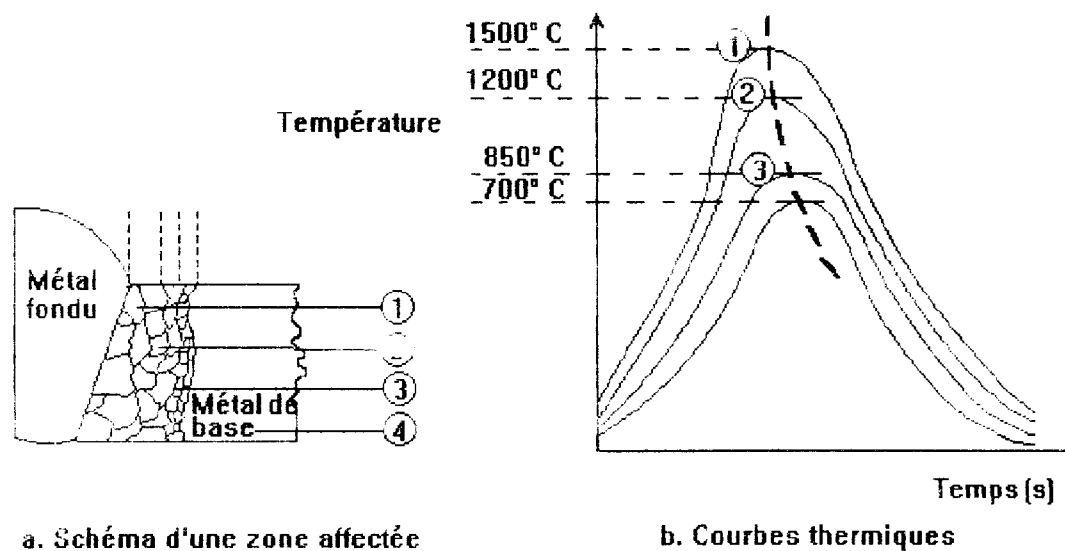


Fig II-2: schéma de principe du refroidissement de différents points de ZAC

II-3-1-4- Zone fondue

Les constituants structuraux des soudures (brutes de solidification) n'ont pas toujours une morphologie comparable aux divers produits de décomposition de l'austénite, que l'on rencontre dans les aciers de traitement thermique.

L'institut international de soudure cité par [46] retient trois types de constituants pour une couche rechargée à l'arc électrique.

1- ferrite aux joints de grains (ferrite pro-eutectoïte): le réseau de ferrite pro-eutectoïte et les joints des grains austénitiques.

2- Constituants lamellaires et l'austénite inter lamellaire se transforment ultérieurement en carbures ou en martensite (M+A).

3- ferrite aciculaire: les grains austénitiques primaires sont allongés préférentiellement dans le sens du refroidissement. D'autres études attribuent à C.Bonet dans "Soudage et technique" cité par [45] retient d'autres constituants bainite granulaire, constituant M+A, constituant subperlitique.

II-3-1-5- Zone affectée par la chaleur (Z.A.C.)

II-3-1-6- Modifications thermiques en fonction du nombre de passes

Pour le cas des rechargements multipasses, chaque passe a le temps de se refroidir presque complètement avant le dépôt de la passe suivante; les cycles thermiques de chaque passe sont pratiquement indépendants les uns des autres, mais l'action thermique atténuée des passes postérieures peut modifier la structure de la Z.A.C. (fig II-3).

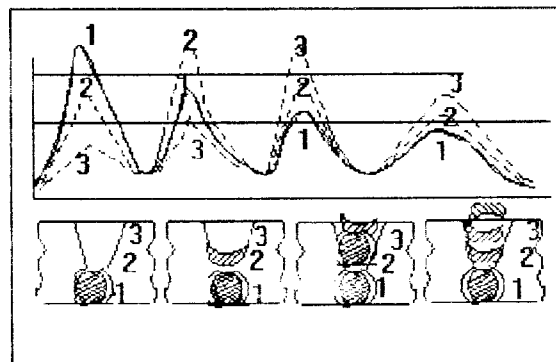


Fig.II-3:Modifications dues à l'action thermique

II-2-1-7- Cycles thermiques de soudage

La durée de refroidissement dans la zone fondue et la Z.A.C. est un facteur très important vu que les risques de transformation structurale défavorable (structure martensitique) en dépendent ce paramètre est fonction des conditions de soudage.

- énergie nominale E_1
- température initiale des pièces
- procédé utilisé
- de l'électrode

Ceci est synthétisé par la figure suivante:

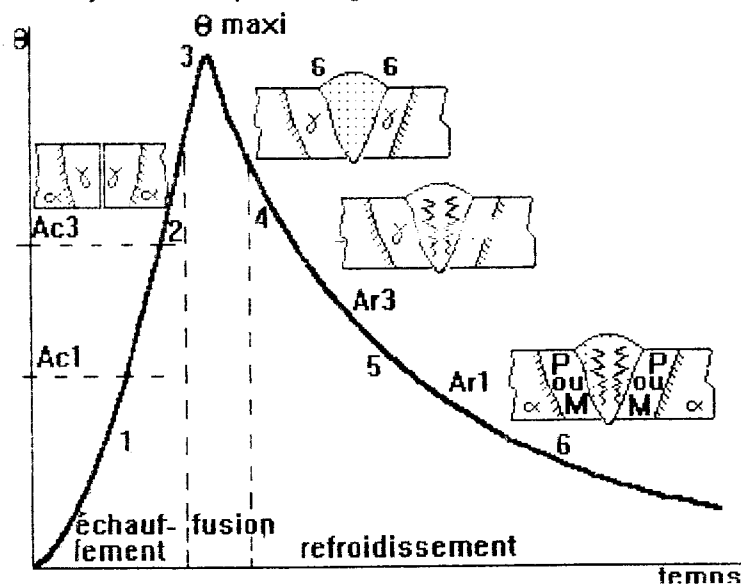


Fig.II-4: Cycle thermique et transformation structurales [46]

II-3-2 Choix des conditions de soudage

II-3-2-1 Diagramme de transformation au refroidissement continu sous l'effet des cycles de soudage(ou diagramme TRCS).

Le diagramme permet pour un acier donné de relier la microstructure formée élément essentiel de la métallurgie du soudage, au cycle thermique subi par la zone affectée par la chaleur, et plus particulièrement la durée de refroidissement (800° à 500°)

Ce diagramme nous indique pour un acier donné

- le type de structure de la ZAC après l'opération de soudage, la dureté moyenne de la couche rechargée et la durée de refroidissement .

Ces différents paramètres sont fonction de l'énergie de soudage mise en jeu et de la température initiale (t_0) à laquelle s'effectue l'opération .

Plusieurs cas peuvent se poser :

-les paramètres de refroidissement sont imposés ,il faut respecter la dureté maximale de la couche rechargée ,liée à l'existence d'une structure type F+C ,deux variables seront possibles :

-l'énergie de soudage et la température initiale des pièces avant l'opération de rechargement .

-l'énergie de soudage est pratiquement imposée par le procédé et par le mode opératoire .

II-3-2-2-Determination simplifiée des conditions de soudage

Une formule simplifiée donnant la durée de refroidissement ,qui sera par la suite utilisée en utilisant le diagramme TRCS .

$$\Delta(850,500)=K*E_d \quad (10)$$

où E_d est l'énergie de soudage (Kj/cm)

L'Energie nominale de soudage E_n est donnée par la formule :

$$E_n=(U*I)/V \quad (11)$$

U: la tension de soudage Volts

I: l'intensité de soudage

V: la vitesse de soudage cm/s

L'énergie équivalente E_q est donnée par la relation suivante :

$$E_q=E_n*K^n \quad (12)$$

Pour les électrodes enrobées n varie de 0,70 à 0,85

TABLEAU II-1: valeur du coefficient K (soudage)

to	20	50	100	150	200
K	0,314	0,419	0,515	0,647	0,834

II-4-Usinage des couches rechargées

II-4-1-Caractéristiques des outils

Les couches rechargées ont été usinées avec des outils à base de carbure de titane et de cobalt, conventionnellement, il est représenté par (T15K6) annexe II-3.

I-4-1-Géométrie des outils

La géométrie de l'outil a été élaborée conformément aux recommandations données en annexe II-3, les angles caractéristiques retenus sont données par le tableau suivant:

Tableau II.2: Caractéristiques géométriques des outils de coupe

Angles en (°)	Ebauche	finition	rayon bec mm
γ	-5	10	0,5
ϕ	32	38	0,5
ϕ_1	15	15	0,5
α	10	12	0,5
λ	5	0	0,5

II-4-3 - Paramètres d'usinage

Pour les conditions d'usinage on utilise les recommandations données sur l'annexe II-3-4, elles se résument par les valeurs suivantes:

Trauche:

$p=2\text{mm}$

$A_v=0,23\text{ mm/tr}$

$V_c=80\text{ m/mn}$

Finition :

$p=0,5\text{ mm}$

$A_v=0,11\text{ m/mn}$

$V_c=90\text{ m/mn}$

CHAPITRE III

PARTIE EXPERIMENTALE

III-1 - Méthodologie de l'étude

Le travail entrepris a pour but de modéliser le processus d'usure et d'étudier l'influence relative des principaux paramètres cinématique-longueur et vitesse de glissement, dynamique-l'effort normal appliqué .

Nous nous sommes attachés à classer les caractéristiques tribologiques (usure pondérale, usure linéaire et intensité de l'usure respectivement pour chacune des surfaces frottantes retenues.

Deux campagnes d'investigation expérimentales ont été effectuées

-une première campagne "comparative " dans laquelle le couple métal/PTFE, a été testé et les résultats montrent une nette supériorité relative du rechargement type RB.

-une deuxième campagne d'expérimentation ayant pour but d'éprouver les surfaces rechargées dans des conditions similaires d'application à savoir avec un matériau antagoniste XC42.

III-2 Méthode générale

III-2-1 Principe de la méthode

Le principe général de la méthode consiste à évaluer "l'intensité d'usure" pour différents types de surfaces rechargées,avec des conditions d'essai d'usure appropriées .

III-3- Conditions des essais

Les essais sont effectués conformément au tableau suivant :

Tableau III-1: Conditions des essais

Repère	Définition	Paramètres d'action lors des essais		
		Durée de l'essai t en (mn)	Force normale appliquée F en (N)	Vitesse de glissement V en (m/s)
		N° des essais		
NR	Surface non rechargée, brute d'usinage	9	10	13
NRT	Surface non rechargée, et traitée	11	12	14
RB	Surface rechargée à l'arc électrique, avec électrode basique	15	17	18
RR	Surface rechargée à l'arc électrique, avec électrode rutil	16	19	29
RF	Surface rechargée à l'arc électrique sous flux gazeux (argon)	20	21	23
Paramètres mesurés		Relations entre paramètres d'action et paramètres mesurés		
L'usure linéaire W exprimée en (10 ⁻⁵) m		W=f(t)	W=f(F)	W=f(V)
L'intensité d'usure I .10 ⁻⁷		I=f(t)	I=f(F)	I=f(V)

NR non rechargée

NRT non rechargée et traitée

RB rechargée à l'arc électrique avec électrode à enrobage basique.

RR même rechargement avec électrode à enrobage rutil.

RF rechargement sous flux gazeux.

III-3-1 Les matériaux antagonistes

Le matériau antagoniste considéré comme étalon "le polyfluoréthène" utilisé dans la première série d'expérimentation nous permet à partir de la mesure de l'usure du frotteur de trouver une corrélation significative avec la nature de la surface rechargée pour chacune des surfaces traitées, les résultats des essais sont rapportés à la valeur de référence de la surface non rechargée .

Dans la deuxième série d'expérimentation et voulant se rapprocher des conditions réelles d'utilisation nous avons utilisé l'acier identique à celui utilisé pour les pièces destinées à être rechargées .

III-3-2- Programme expérimental: essais d'usure

III-3-2-1 Justification du choix d'un matériau spécifique: le PTFE:

Le choix du PTFE est dicté par les contraintes suivantes :

- propriétés chimiques exceptionnelles stabilité remarquable ,liaisons chimiques fortes d'une faible adhérence avec d'autres substances;
- matériau anti-adhésif et anti-friction, très faible coefficient de frottement
- faible cohésion donc usure limitée.

III-2-1-1- Caractéristiques principales PTFE

Conformément au programme expérimental, et dans le but d'étudier l'usure linéaire et l'intensité d'usure, plusieurs surfaces ont été retenues.

Deux frotteurs d'essai dont la perte de poids constitue la base de calcul de l'usure massique et l'usure linéaire, nous permettant ainsi par la suite d'évaluer l'intensité de l'usure.

Dans cette première campagne d'essais le PTFE est utilisé comme matériau étalon compte tenu de ses caractéristiques particulières.(Tableau.III-2)

Tableau III-2 Caractéristiques du PTFE

type	densité (g/cm ³)	limite de rupture	coeff.vis c	E kgf/cm ²	dureté HB	coef.co nd	coeff dilat
F4K20	2,2	1,3	40	3,1.15	5,0	1,0	70

III-3-3 Définition des surfaces frottantes pour la première série d'essais

Les pistes (surfaces frottantes) sont constituées des types de surfaces suivantes

- 1-NR- Surface brute d'usinage (non rechargée et non traitée).
- 2-NRT-Surface brute d'usinage , traitée thermiquement.
- 3-- Surface rechargée par soudage à l'arc
 - 3-1 RR- Surface rechargée avec électrode à enrobage rutile.
 - 3-2 RB- Surface rechargée avec électrode à enrobage basique.
 - 3-3 RF- Surface rechargée sous flux gazeux (argon).

Les frotteurs sont en polytétrafluoréthène (PTFE)

III-3-4 Paramètres retenues

Les paramètres retenus sont donnés par le tableau suivant

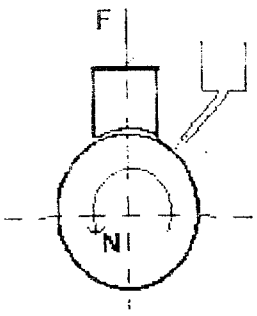
Tableau III-3 Conditions des essais

Variables	Valeurs des variables						Constante s
t(mn)	0	10	20	30	40	50	50
L(m)	0	158,3	316,5	474,8	633	791	791
F(N)	0	65,3	196,2	261,5	392,4	458	98,2
P(MPa)	0	1,81	5,45	7,26	10,90	12,72	2,72
N(tr/mn)	0	71	112	280	450	900	112
V(m/s)	0	0,167	0,264	0,659	1,060	2,120	0,26

III-3-5 Conditions expérimentales

Les conditions expérimentales sont résumées par le tableau suivant

Tableau III-4: Conditions expérimentales

Essais mécaniques	
Essais N°	
Caractéristiques géométriques	$F=45\text{mm}$; $l=125\text{mm}$; $S_c=(10 \times 4)\text{ mm}^2$
Matériaux des surfaces frottantes	Acier XC 45 NR NRT RB RR RF
Lubrifiant abrasif Débit d'amenée (gt/mn)	débit : 40 gt/mn concentration abrasif : 1,5%
Temps (mn)	0-10-20-30-40-50
Longueur de glissement (m)	0-158,3-316,5-474,8-633-791
Charge appliquée (N)	0-65,3-196,2-261,5-392,4-458
Vitesse de glissement (m/s)	0-0,167-0,264-0,659-1,060-2,120
Fréquence de rotation (tr/mn)	0-71-112-280-450-900

III-3-6- Deuxième série

Les pistes sont constituées en acier XC 42 utilisé comme référence et en surface rechargée avec électrodes basique retenue suite aux résultats de la première partie d'expérimentation.

Par contre pour se rapprocher des conditions réelles d'utilisation nous avons utilisé comme matériau antagoniste (les frotteurs) le même matériau de base acier XC 42.

III-3-6-1 - Variables d'action retenues

Les variables d'action retenues sont:

- Durée de l'essai t en minutes (mn)
- Charge normale appliquée F en newtons (N)
- Vitesse relative de glissement V_g en mètre par seconde (m/s)
- Dureté superficielle vickers H_v

Ces variables d'action, nous ont permis d'étudier et de représenter graphiquement l'usure linéaire et l'intensité d'usure, afin d'illustrer leurs influences.

II-4- Procédé expérimental

Les expériences sont réalisées sur un tour équipé d'un dispositif d'essai de frottement type "Cylindre-plan".

Un dynamomètre étalonné nous permet de mesurer l'effort de frottement, d'autre part l'effort normal est appliqué grâce à un ressort de compression, préalablement étalonné. Les pertes de poids des frotteurs sont déterminées par pesées au $(1/1000)^e$.

Relativement à d'autres types d'essais d'usure, la détermination du critère intrinsèque d'usure "l'intensité d'usure" est rapide. Une surface brute d'usinage considérée comme référence, nous permettra de faire un classement des différentes surfaces rechargées en fonction du type de rechargement et de son traitement respectif, comparativement à la valeur de la référence initiale.

III-5- Dispositif expérimental (fig III.1)

Le dispositif d'essai d'usure devant équiper le tour afin de réaliser les essais d'usure des surfaces rechargées est représenté sur la figure suivante

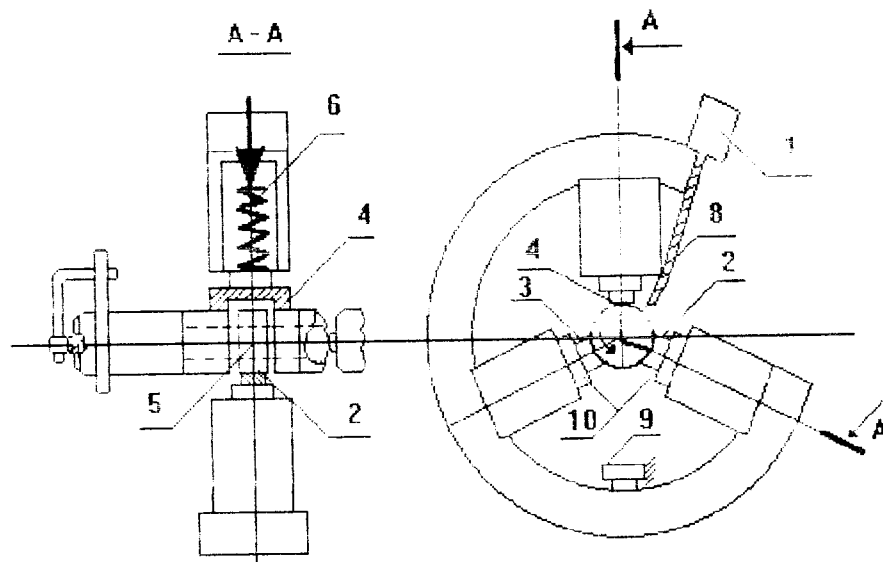


Fig.III.1 :Schéma de principe du dispositif expérimental

III-5-1- Description du dispositif expérimental

Deux frotteurs de travail 2 et 3 sont fixes sur des pièces porte éprouvettes 10, l'ensemble est assemblé à un étrier rigide, la surface de frottement est placée sur le même étrier, l'échantillon d'appui 4 sert au maintien de la pièce 5, simulant un arbre rechargé en rotation.

Les frotteurs 2 et 3, ainsi que l'échantillon 4 sont préalablement rodés.

Les frotteurs sont préréglés et centrés relativement à la surface intérieure de l'étrier grâce à un gabarit spécial.(Fig.III.2)

La mise en charge nécessaire est assurée par la pression d'un ressort de compression 6 préalablement étalonné.

Un appui 9 évite la rotation de l'étrier durant l'essai. Un comparateur à cadran mesure en continu la valeur de l'effort de frottement.

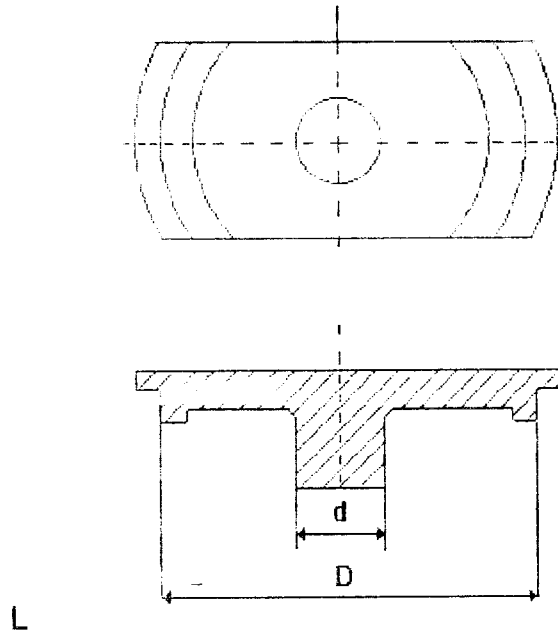


Fig.III.2 :Gabarit pour le préréglage des arbres dans l'étrier

III-2-1- Description du dispositif de mesure et mode opératoire

Un dynamomètre en forme de U est fixé rigidement (fig.III.3), des charges statiques sont appliquées au point A, un comparateur à cadran au $1/1000^{\circ}$, logé et fixé par une vis appropriée donne les déformations de la partie supérieure du dynamomètre. La charge est limitée à 10 Kg, les indications du comparateur sont consignées dans le tableau III.5

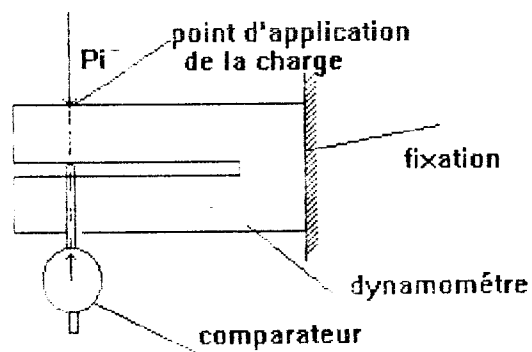


Fig.III.3 :Schéma de principe du système de mesure

II-5-3-Etalonnage du dispositif de mesure

III-5-3-1-Etalonnage du dynamomètre

La fiabilité des mesures effectuées au banc d'essai suppose un étalonnage judicieux des capteurs d'effort.

Un dynamomètre est utilisé pour la mesure des efforts ainsi qu'un ressort de compression pour l'application de la charge sur les frotteurs.

Tableau.III-5 : Valeurs d'étalonnage du dynamomètre

N Essai	Charge (N)	(Direct, indicateur comparateur				(Indirect) indicateur comparateur			
		1ère	2ème	3ème	Moy	1ère	2ème	3ème	Moy
1	0	0	0	0	0	1	0,5	0	0,5
2	10	7	7	7,5	7,17	8,5	8	8	8,17
3	20	15	15	15	15	16	16,5	16	16,17
4	30	22,5	22	22	22,17	24	23	24	23,67
5	40	30	30	30	30	31	30	30,5	30,5
6	50	38	37,5	38	37,83	38	38	38	38
7	60	45	45	45	45	46	45,5	46	45,83
8	70	52,5	52,5	52,5	52,5	53	52,5	53,5	53
9	80	61	60	62	61	61	60	61,5	60,83
10	90	68	67	69	68	68	67,5	69	68,17
11	100	75	74,5	77,5	75	75	74,5	77	75,5

$$y = -0,211 + 0,756x \quad r^2 = 1,000$$

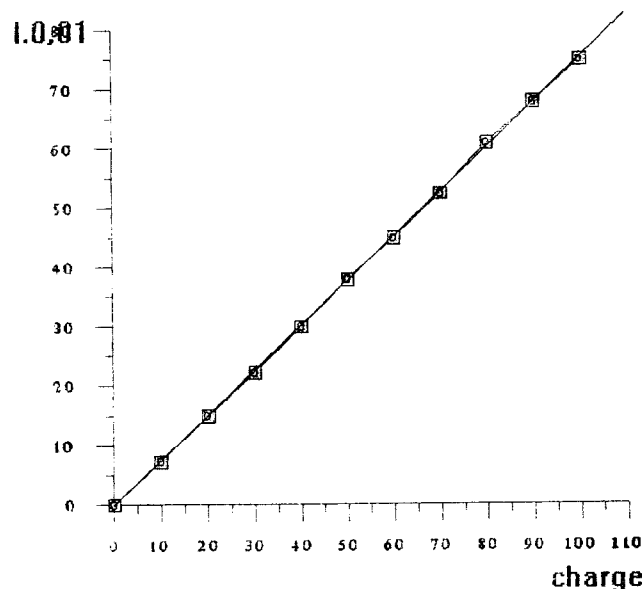


Fig.III.4: Courbe d'étalonnage du dynamomètre

III-5-3-2- Tarage du ressort et du dynamomètre sur le dispositif de mesure

On place le dispositif de mesure d'usure sur le tour, le dynamomètre muni d'un comparateur (1/1000) est fixé rigidement sur le système porte-outil, l'ensemble est rigidement fixé autour.

L'opération de tarage consiste à appliquer l'effort sur le ressort par rotation du chapeau de douille qui comprime le ressort, le raccourcissement est mesuré par un comparateur A, la déformation du dynamomètre par l'intermédiaire de l'échantillon d'appui est mesurée par un deuxième comparateur B.

Le tableau suivant donne les résultats des trois séries de mesure en charge et en décharge.

Tableau.III.6: Résultats du tarage du ressort

N° Essai	Déplacement (mm)	Indication directe				Indication indirecte			
		1ère	2ème	3ème	Moy	1ère	2ème	3ème	Moy
1	0	0	0	0	0	2	1	1,5	1,5
2	1	4,5	4	4,5	4,33	6	6	7	6,33
3	2	10	9	9,5	9,5	11	10	11	10,67
4	3	14,5	14	14,5	14,33	16	16	16	16
5	4	20	19	20	19,67	21	20	21	20,67
6	5	25	24	25	24,67	26	25	26	25,67
7	6	30	29	30	29,67	31	30	30,5	30,5
8	7	35	34	35	34,67	36	35	35,5	35,5
9	8	40,5	39	40	39,83	41	41	41	41
10	9	44,5	44	44	44,17	46	45	45	45,33
11	10	50	49	50	49,67	50	49	50	49,67

Afin de faciliter la conversion (équivalence) du déplacement en effort nous avons élaboré le tableau suivant

Tableau III.7. Correspondance déplacement - effort

d(mm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F(N)	0	65,3	130,18	196,2	261,5	327	392,4	458	523,2	556	654

III-6-Matériau utilisé

La surface de frottement est en acier XC 42, le choix de ce dernier est justifié par sa large utilisation en construction mécanique. Ses bonnes caractéristiques mécaniques et ses conditions d'emploi nécessitent souvent une finition par rectification des surfaces trempées.

Les tableaux III.8 et III.9, présentés ci-dessous donnent la composition chimique et les caractéristiques mécaniques de l'acier XC 42 utilisé dans nos essais [16].

III-6-1- Composition chimique

La composition chimique de l'acier utilisé est donnée par le tableau suivant :

Tableau:III.8: Composition chimique en %

C	Mn	Si	P et Smax
0,40 - 0,45	0,50 - 0,80	0,10 - 0,40	0 035

C: carbone Mn: Manganèse Si: Silicium P: Phosphore S: Soufre

III-6-2- Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques de l'acier utilisé sont données par le tableau suivant

Tableau III.9: Caractéristiques mécaniques

Valeurs des caractéristiques mécaniques	Re (N/mm ²)	HB Hv ₅	R (N/mm ²)	A %	KCU daJ/cm ²
Théoriques [16]	70 - 685	>200	860- 1010	11	4
Expérimentales	594	295	914	12	/

Re limite élastique HB dureté Brinell Hv dureté Vickers R Résistance à la rupture
A allongement en % KCU Résilience sur éprouvette à entaille en forme de U

Les éprouvettes d'essais ont été usinées à partir de poutres laminés cylindriques (fig.III.5)

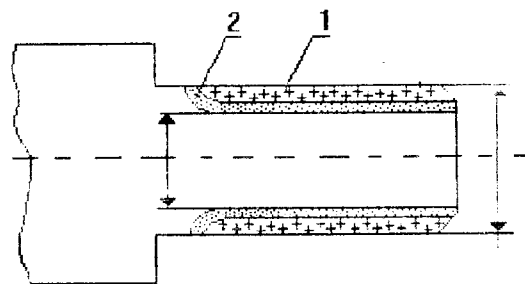
III-6.-3- Préparation des surfaces de frottement

Elles ont d'abord été ramenées à un diamètre de 45mm et ont ensuite subies un revêtement par rechargement à l'arc électrique sous différentes conditions.

Les éprouvettes sont ensuite usinées au tour puis rectifiées .

Pour une meule donnée, il n'a été possible de varier que la profondeur de passe, les autres paramètres, notamment la vitesse de la meule et la vitesse de la pièce étaient fixées sur la rectifieuse utilisée.

Les opérations de rectification ont été effectuées dans le cas où les vitesses de la meule et la pièce sont en opposition.



1- métal d'apport
2-substrat

fig. III.5: Epreuve d'essai

V_m (m/s)	V_t (m/s)	V_{tm} (mm/s)	P (mm)
30	13	7,7	0,03

V_m vitesse de la meule

V_{tm} vitesse transversale de la table

V_t vitesse de la table

P profondeur de passe

III-6-4- Caractérisation mécanique et macrographique des couches rechargées

III-6-4-1- Dureté des couches rechargées

Ces essais sont effectués conformément à la norme relative aux soudures (NF A81 460)

Les essais de dureté Vickers sont effectués sous une charge de 5 daN (HV5). On effectue au moins 5 essais et on prendra en considération la moyenne des trois plus hautes valeurs .

III-6-4-2- Examens macrographiques

Le but de ces essais est d'examiner l'hétérogénéité due à la répartition thermique des couches rechargées ,pour ce faire nous avons examiné

- 1-le métal de base (non affecté par le cycle thermique),
- 2-la zone fondue (gros grains orientés),
- 3-la zone de liaison (frontière de la fusion),
- 4-la zone affectée par la chaleur ($t > AC1$,teinte relativement sombre).

Ces différentes zones sont présentées par la figure suivante

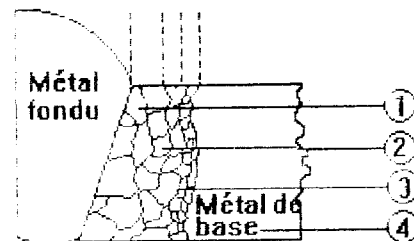


Fig.III.6:Différentes zones examinées

III-6-4-3- Examens micrographiques

III-6-4-3-1- Principe de la micrographie

La micrographie ou métallographie microscopique permet de mettre en évidence les constituants des produits métallurgiques (métaux purs, solutions, eutectiques, etc...)

Cette technique consiste à examiner au microscope par réflexion une surface polie et attaquée chimiquement.

III-6-4-3-2- Préparation des échantillons :

Les échantillons sont issus de pièces rechargées, une première opération de débitage est effectuée à la scie mécanique à ruban, puis ébavurées au touret afin d'enlever les copeaux dangereux durant l'opération suivante de polissage; cette opération a pour but d'avoir une surface super finie, les grosseurs des grains du papier abrasif avec lequel on effectue le polissage varie de par décroissant de la grosseur du grain de 100 jusqu'à 1200. Les échantillons seront ensuite parfaitement polis à la pâte diamantée afin de conférer à la pièce une surface "miroir", indemne de toute rayure visible au microscope pouvant erroné les analyses.

Une attaque chimique de cette surface polie, à l'aide du réactif comprenant 5% de $\text{HNO}_3 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ permet de révéler la structure et d'analyser les éléments constitutifs.

Les attaques chimiques sont effectuées à température ambiante et les temps d'attaque sont déterminés expérimentalement. Pour tout les échantillons une immersion rapide dans le suivi d'un rinçage à l'eau, puis d'un séchage à l'air comprimé donne de bons résultats à l'examen micrographique .

III-6-4-3-3- Examens au microscope optique

Une fois, la microstructure révélée, on effectue l'examen micrographique sur un microscope AXIOMAT IAC. Microscope inversé à lumière réfléchié avec chambre photographique pouvant grossir 2000 fois le sujet examiné.

Le microscope est constitué d'un objectif (système de lentilles à courte distance focale qui donne de l'objet une première image réelle et agrandie, et d'un oculaire (système de lentilles à distance focale plus grande) qui donne de l'image précédente, une image définitive agrandie virtuelle ou réelle (oculaire de projection).

L'échantillon est supporté par une plate forme qui se déplace dans trois directions perpendiculaires, le déplacement vertical sert à la mise au point, les deux autres mouvements à une exploration méthodique de l'échantillon.

La qualité d'un microscope est couramment définie par son grossissement rapport du diamètre apparent de l'image fournie par l'instrument au diamètre apparent de l'objet vu à l'oeil nu. Au cours de l'observation photographique, on utilise le grandissement de l'appareil (rapport des dimensions linéaires de l'image de l'objet).

L'agrandissement s'obtient en faisant le produit de l'agrandissement de l'oculaire. L'éclairage se fait par réflexion avec une lampe à incandescence à filament gros et court fonctionnant à basse tension (12v). La surface éclairée est brillante et l'éclairage est dit à fond clair. C'est la méthode la plus classique utilisée pour l'observation des métaux au microscope métallographique. Elle permet de voir les grains d'un métal, pour connaître la composition de l'échantillon et les proportions des composants. Dans cette méthode l'éclairage est perpendiculaire à la surface et les rayons sont donc réfléchis perpendiculairement. Les grains lisses apparaissent en clair, alors que les frontières (ou joints), qui sont des interruptions dans la surface lisse, sont foncés. Ils sont donc plus visibles et permettent d'apprécier la taille des grains. Par contre, les parties sombres sont trop foncées pour révéler leurs détails.

III-1-6-4-3-4- .Résultats des analyses micrographiques

Eprouvette type RR



fig.III.11: Métal de base

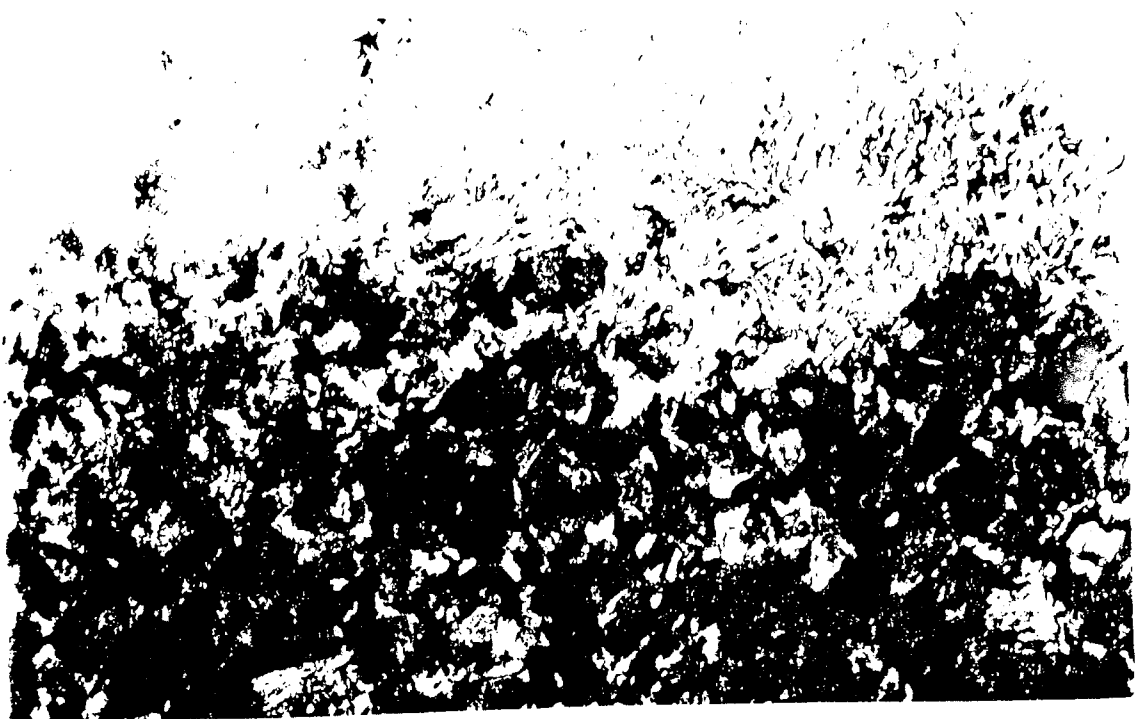


Fig III.12: Zone affectée par la chaleur

Eprouvette type RB

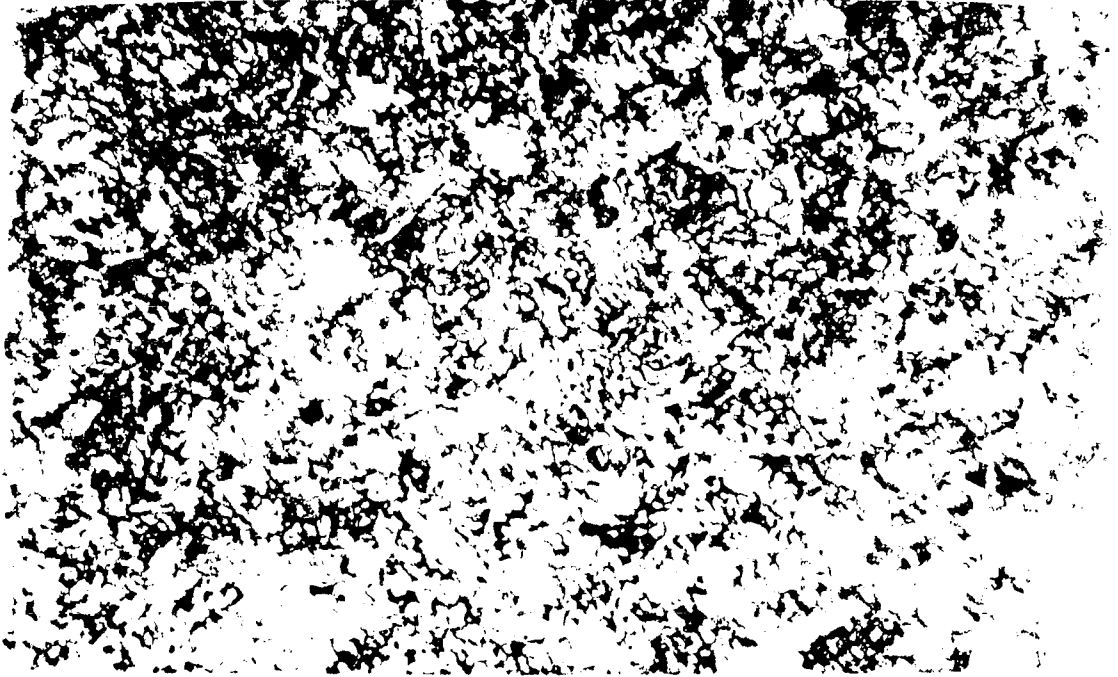


Fig.III.13:Métal de base

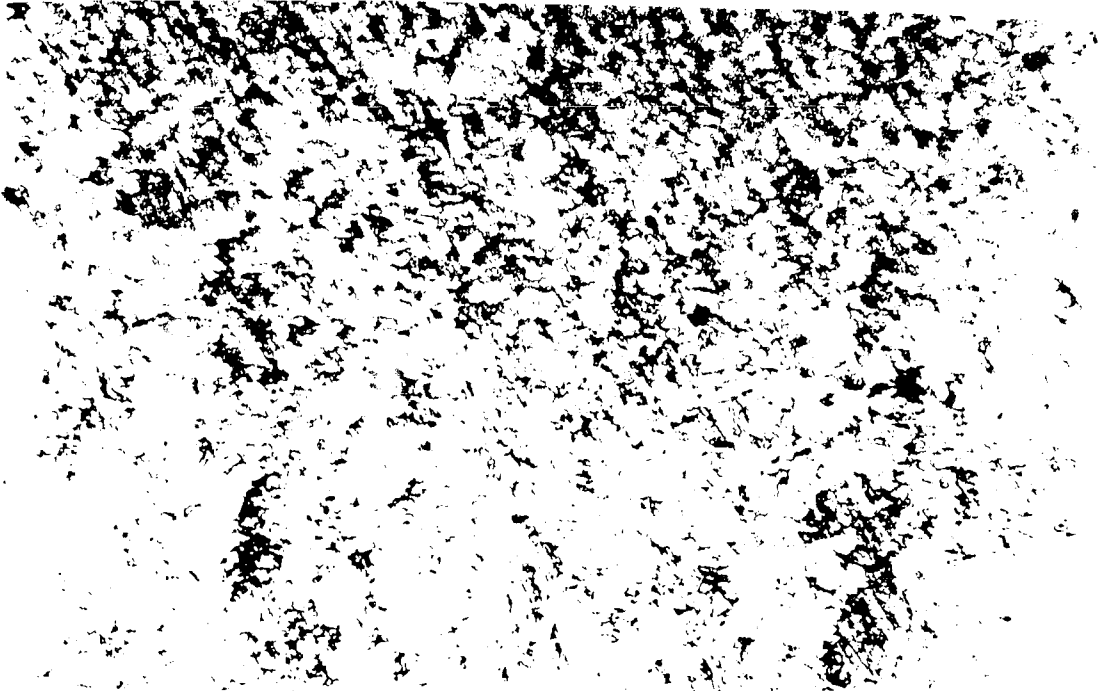


Fig: III.14 : Zone affectée par la chaleur

Eprouvette type RF



Fig.III.15 :métal de base

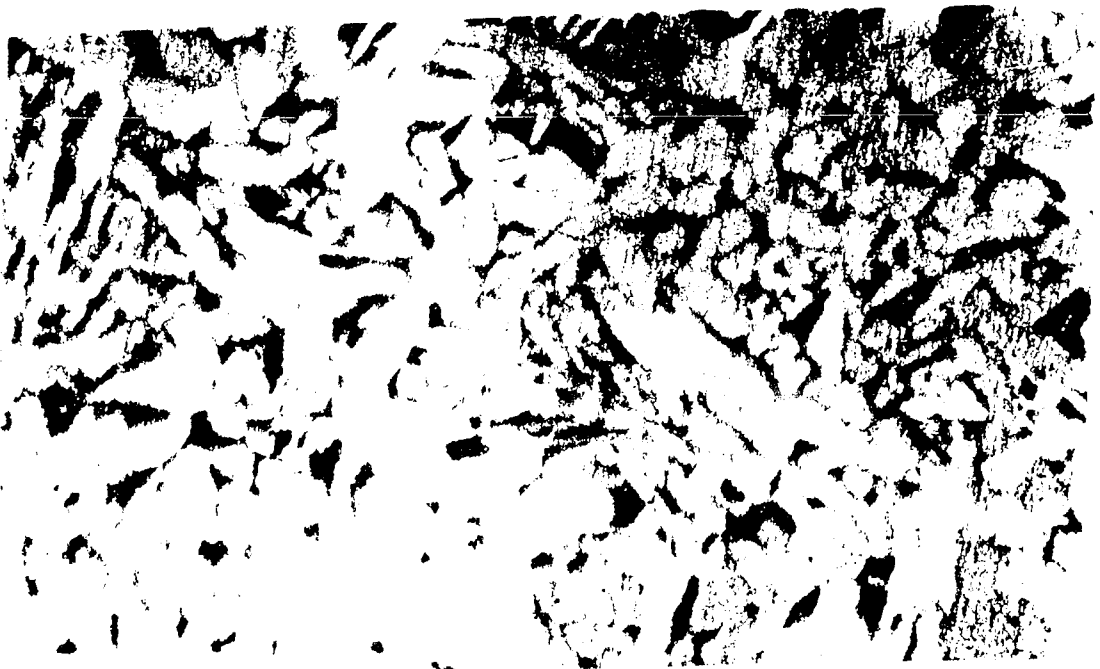


Fig.III.16 :Zone affectée par la chaleur

III-7-Matériau antagoniste; les frotteurs

Les frotteurs constitués en plastique fluoré "le polyfluoréthène", constituent le matériau antagoniste sujet à l'usure durant la première série d'expériences par frottement sur des surfaces cylindriques en rotation, préalablement rechargées et traitées conformément au protocole expérimental .

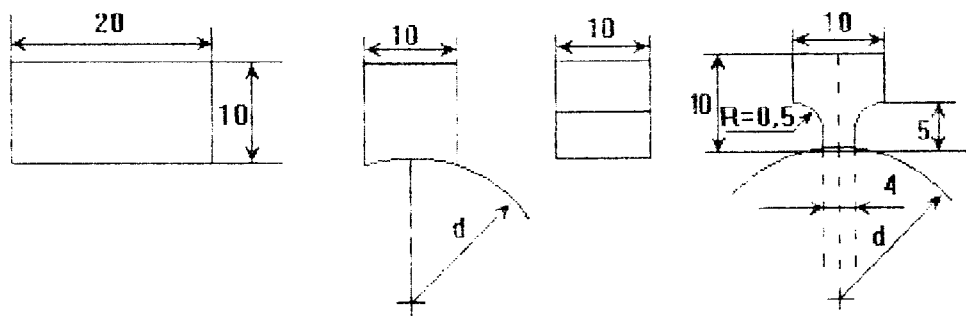


Fig17a: pièces d'appui

Fig 17b: pièces d'usure

Fig.III.17 :frotteurs

III.8. Traitement des résultats

III.8.1.Calcul de la résistance à l'usure

La résistance à l'usure peut être calculée en fonction des paramètres caractérisant le travail par rapport à l'état de surface ,à la charge appliquée ,aux propriétés mécaniques et aux conditions de travail [23]

L'intensité d'usure peut être linéaire, massique et énergétique ,respectivement on les désigne par: l_h , l_g , l_w

En posant

γ densité du matériau usé

S aire de la surface de contact

F force de frottement

L désigne la longueur de glissement pendant le temps t , elle peut être déterminée par l'expression suivante

$$L = pdNt$$

(8)

où d diamètre de la pièce rechargée en rotation (mm)

N fréquence de rotation en (tr/mm)

V volume de matière enlevée lors de l'usure des surfaces de frottement.

h hauteur (épaisseur) usée

l'intensité d'usure massique peut être exprimée par les relations

$$I_g = g \cdot I_h \quad (9)$$

$$I_w = I_h \cdot S \cdot F \quad (10)$$

$$I_h = h/L = V/L \cdot S \quad (11)$$

Par conséquent et sur la base de (9 , 10 , 11) on peut exprimer sous une forme exploitable l'intensité massique

$$I_g = dP/S \cdot L \quad (12)$$

où dP est la perte de poids ou usure pondérale des frotteurs .

l'intensité énergétique est transformée en

$$I_w = V/F \cdot L \quad (13)$$

Les caractéristiques de l'usure ne possèdent pas d'unité de mesure ,d'où leur utilisation pratique en vue de la comparaison de la résistance à l'usure des couples de frottement .

Le dispositif expérimental est équipé pour mesurer les forces de frottement par rapport à la charge normale, une balance nous permet de déterminer la perte de poids à 0,001 près de la pièce éprouvette

iii.8.1.1.L'usure linéaire W est exprimée en mètre ,elle est donnée par le rapport de la perte moyenne de poids de deux pièces éprouvettes ΔP_{moy} ,sur le produit de l'aire de la surface de contact A et par la densité du matériau éprouvé γ

$$W = \frac{\Delta P_{moy}}{S \cdot \gamma} \quad (14)$$

ou : ΔP_{moy} : perte de poids moyenne exprimée en (kg),

S l'aire de la surface de contact en (m^2) .

g densité des frotteurs en polyfluoréthène exprimée en (kg/m^3)

III.8.1.2. L'intensité d'usure I est exprimée par le rapport de l'usure linéaire W sur la longueur de glissement L

$$I = \frac{W_{\text{moy}}}{L} \quad (15)$$

où

i l'intensité d'usure

W usure linéaire en (m)

III-9-Mode opératoire pour effectuer un essai

Pour effectuer un essai sur machine on suit les opérations suivantes

On place la pièce rechargé dans les mors du tour, la vitesse de rotation N est préalablement sélectionnée. on règle les éprouvettes (frotteurs) sur le dispositif d'essai à l'aide d'un gabarit spécial afin d'avoir une concentricité précise entre le dispositif et la pièce en rotation.

On manoeuvre la mise en charge par la rotation de la pièce moletée, comprimant ainsi le ressort étalonné, le raccourcissement est indiqué par un comparateur.

- On vérifie ensuite le contact et la position exacte du dispositif de mesure de l'effort de frottement, et ce, grâce a un dynamometre et un comparateur .

- On ouvre le robinet de lubrification et on commence l'essai par l'enclenchement d'un chronomètre.

III.9.1 Post-opérations

- On met à l'arrêt la machine et le chronomètre

- On actionne le robinet d'arrêt de la lubrification, puis on cesse l'application de la charge, le dispositif d'essai est dégagé pour ensuite démonter les portes éprouvettes et les nettoyer soigneusement puis peser, la différence de poids de deux mesures successives donne la perte de poids qui représente l'usure pondérale, dans nos calculs, on tiendra compte de la valeur moyenne des pertes de poids des deux frotteurs.

- Durant l'essai, on a relevé les valeurs de la force de frottement qui sont représentées par les déviations du comparateur et représentant les déformations du

dynamometre préalablement étalonné ,ces valeurs seront par la suite traitées pour déterminer la valeur du coefficient de frottement.

II.9.2. Préparation des échantillons

III.9.2.1. Les pièces cylindriques en rotation: simulant l'arbre rechargé en rotation ces pièces sont issues de la même barre cylindrique d'acier **XC 42**.

III.9.2.1.1 Les pièces du type **NR (non rechargées)** sont usinées sur un tour, puis mises à dimension finale par rectification.

III.9.2.1.2. Les pièces traitées

Les pièces destinées au traitement thermique, type (**NRT**) non rechargées et traitées, sont chauffées superficiellement au chalumeau jusqu'à approximativement **800-850°C**, le refroidissement rapide ultérieur assure l'opération de trempe de la couche superficielle, les pièces subissent un revenu de détente vers **180-200°C**

III.9.2.1.3. Les pièces rechargées

III-9-2.2. Les frotteurs

Les pièces sont découpées soigneusement puis ajustées a dimensions finales, après montage, elles sont préalablement rodées ,afin de leur donner une forme circulaire, et par conséquent d'avoir une surface de contact optimale.

III- 10-Résultats et discussion des essais

III-10-1- Essais préliminaires

Des essais préliminaires de reproductibilité ont été menés afin de vérifier le bon fonctionnement des appareils de mesures du banc d'essai.

Un programme expérimental a été préétabli. Ensuite des essais de comportement à l'usure de plusieurs types de surfaces ont été effectués.

Afin de quantifier l'intensité d'usure les surfaces d'arbre préalablement rechargées ont été soumises aux frottements par un matériau spécifique "le PTFE".

Les résultats seront comparés aux valeurs de référence d'un arbre brut d'usinage . La surface rechargée puis éprouvée peut faire l'objet de plusieurs essais, sans risque de détérioration de la qualité de sa surface d'usinage.

III-10-2- Etude de l'influence des paramètres d'usure

a)- Cas des frotteurs en PTFE

Trois séries d'essais ont été menées ,afin d'étudier l'effet des paramètres principaux d'usure

- la durée de l'essai
- la vitesse de glissement
- la force normale appliquée

Cinq familles de surfaces frottantes ont fait l'objet de ces essais(voir tabl- III- 3)

Les résultats des tableaux suivants représentent la valeur moyenne de l'usure linéaire W et de l'intensité d'usure I , et cela pour des valeurs moyennes de perte de poids de deux frotteurs éprouvés dans des conditions d'essai similaires .

Le traitement des résultats est effectué grâce à un logiciel "cricket graph"

b)-Cas de la surface de référence

Cette pièce est obtenue directement par usinage et rectification, sans subir aucun revêtement ni traitement ultérieur.

Cette série d'essais va nous servir de valeurs "de référence" dans le but de comparer les différents modes de rechargement en prenant en compte comme critère l'intensité d'usure, qui sera ensuite déterminée pour chacune des surfaces, et sous différentes conditions d'essais.

c)-Cas des surfaces traitées

Des surfaces rechargées ayant subies une trempe superficielle font l'objet dans ce présent essai, à des mesures d'usure par frottement de pièces en polyfluoréthène, les conditions cinématique (N) et dynamiques (P) sont similaires à ceux du premier essai.

III-10-2-1- Influence de la durée de l'essai sur l'usure

Les résultats suivants représentent la moyenne des valeurs mesurées

Tableau- III- 9- Résultats des essais d'usure pour des variations de t ou L

L(m)	t(mn)	N.R.		N.R.T.		R.B		R.R		R.F.	
		W10 ⁻⁵	I.10 ⁻⁷	W10 ⁻⁵	I.10 ⁻⁷	W10 ⁻⁵	I.10 ⁻⁷	W10 ⁻⁵	I.10 ⁻⁷	W10 ⁻⁵	I.10 ⁻⁷
158,3	10	10,1	7,1	54,18	38,40	252	178	194,7	138	202,2	143,2
316,5	20	22,7	8,0	72,45	25,6	338,9	128	199,7	71	195,9	68,3
474,8	30	22,1	5,2	75,6	17,8	296,1	70	205,4	49	201	47,4
633	40	17,0	3,0	93,24	16,5	365,4	65	226,2	40	195,9	34,4
794	50	15,8	2,2	98,28	13,9	337,1	48	257,7	37	188,4	26,7

NR: non rechargé

RR: rechargé avec électrode rutile

NRT: non rechargé et traité

RF: rechargé sous flux gazeux

RB: rechargé avec électrode basique

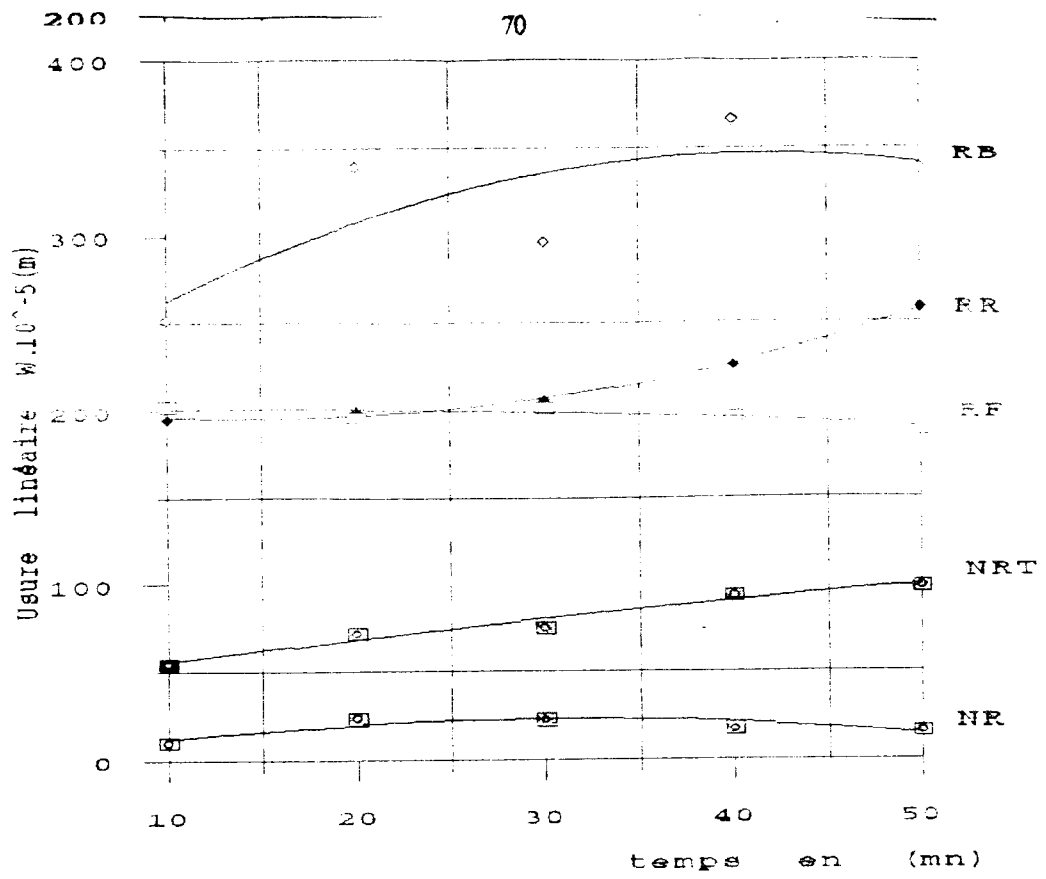


Fig- III- 18- Evolution de l'usure linéaire en fonction du temps

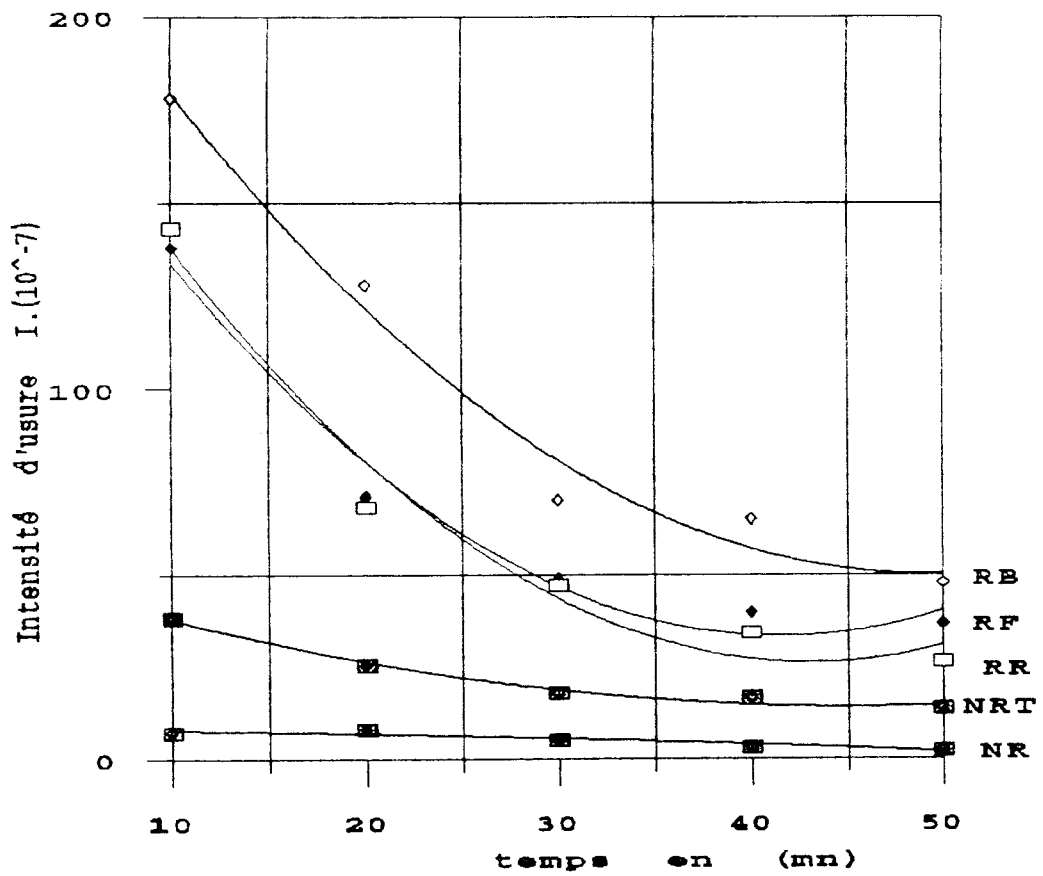


Fig- III- 19- Evolution de l'intensité d'usure en fonction du temps

Conclusion

On remarque pour une surface type NR que l'usure linéaire est minimale, une valeur maximale pour la surface de type RB, et elle est approximativement constante pour une surface type RF.

Pour chacune des surfaces, la courbe usure/temps est identique à la courbe classique de l'usure représentée dans le chapitre I (fig- I- 1); cette courbe présente les trois zones ; l'usure est accélérée.

Les courbes sont lissées avec des fonctions polynomiales grâce à un logiciel "Cricket Graph".

Les courbes des intensités d'usure intimement liées aux premières, mais en sens inverse présentent le même ordre de grandeur que les premières, à savoir une intensité d'usure minimale pour les surfaces NR, et maximale pour les surfaces de type RB.

III- 10-2-1-1- Evaluation d'un coefficient d'amélioration

Afin d'évaluer l'amélioration de la valeur de l'intensité d'usure, une série d'essais est effectuée, avec des conditions de pression et de vitesse constante.

$$P=2,72 \text{ MPa} \quad \text{ou} \quad F=98,2 \text{ N}$$

$$V=0,26 \text{ m/s} \quad \text{ou} \quad N=112 \text{ tr/mn}$$

Les valeurs de l'intensité d'usure présentées dans le tab- III- 9 sont rapportées aux valeurs de la surface de référence (non rechargée).

Tableau N°III- 10- valeurs comparatives de l'intensité d'usure pour différentes surfaces

longueur L (m)	NR	NRT	RB	RR	RF
158,3	7,1 1	5,4	25,07	19,43	20,17
316,5	8,0 1	3,2	16	8,87	8,54
474,8	5,2 1	3,42	13,46	9,42	9,11
633	3,0 1	5,5	21,67	13,33	11,47
794	2,2 1	6,31	21,82	16,81	12,14
moyenne K_a	1 (référence)	4,77	19,60	13,57	12,29

Les valeurs du coefficient d'amélioration de l'intensité d'usure K_a présentées ci-dessus montrent comparativement aux valeurs de référence de la colonne (N R), une nette augmentation des valeurs de l'intensité d'usure, notamment pour la surface rechargée avec des électrodes à enrobage basique, ceci est confirmé par les analyses métallographiques, qui présentent une homogénéité de la structure. En revanche les surfaces rechargées sous flux gazeux se placent en seconde position.

Les résultats montrent aussi une légère amélioration des surfaces trempées superficiellement, l'analyse de ces surfaces présente une hétérogénéité relative probablement due au mode de chauffage qui est pratiquement non maîtrisable.

Afin d'illustrer le degré d'amélioration des différentes surfaces rechargées, des histogrammes regroupant le mode de rechargement et la valeur de K_a (degré d'amélioration), sont présentés sur la fig- III- 20- a.

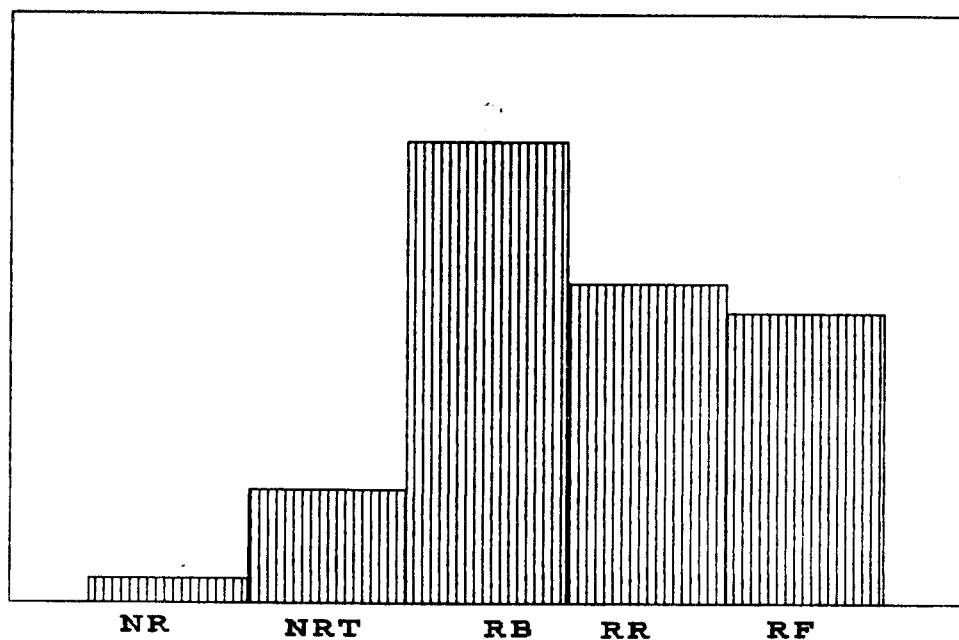


Fig-III- 20- a- Histogramme montrant l'augmentation de l'intensité d'usure pour chaque type de rechargement

III-10-2-2-Influence de la vitesse de glissement sur l'usure linéaire et l'intensité d'usure

Tableau-III-11- Résultats des essais d'usure pour des variations de N ou V

N(tr/m)	V(m/s)	N.R.		N.R.T.		R.R		RB		R.F.	
		W10 ⁻⁵	l.10 ⁻⁷	W10 ⁻⁵	l.10 ⁻⁷	W10 ⁻⁵	l.10 ⁻⁷	W10 ⁻⁵	l.10 ⁻⁷	W10 ⁻⁵	l.10 ⁻⁷
71	0,167	59,85	42,4	172,62	122	189	134	269,8	149	134,2	95
112	0,284	78,75	27,9	214,2	76	236,2	84	321,9	114	102,7	36
280	0,659	100,80	23,8	265,23	63	264,6	62	200,3	47	129,8	31
450	1,060	116,55	20,6	345,85	61	259,6	46	348,4	62	123,5	22
900	2,120	125,37	17,8	415,80	59	286,6	41	279,1	39	69,3	10

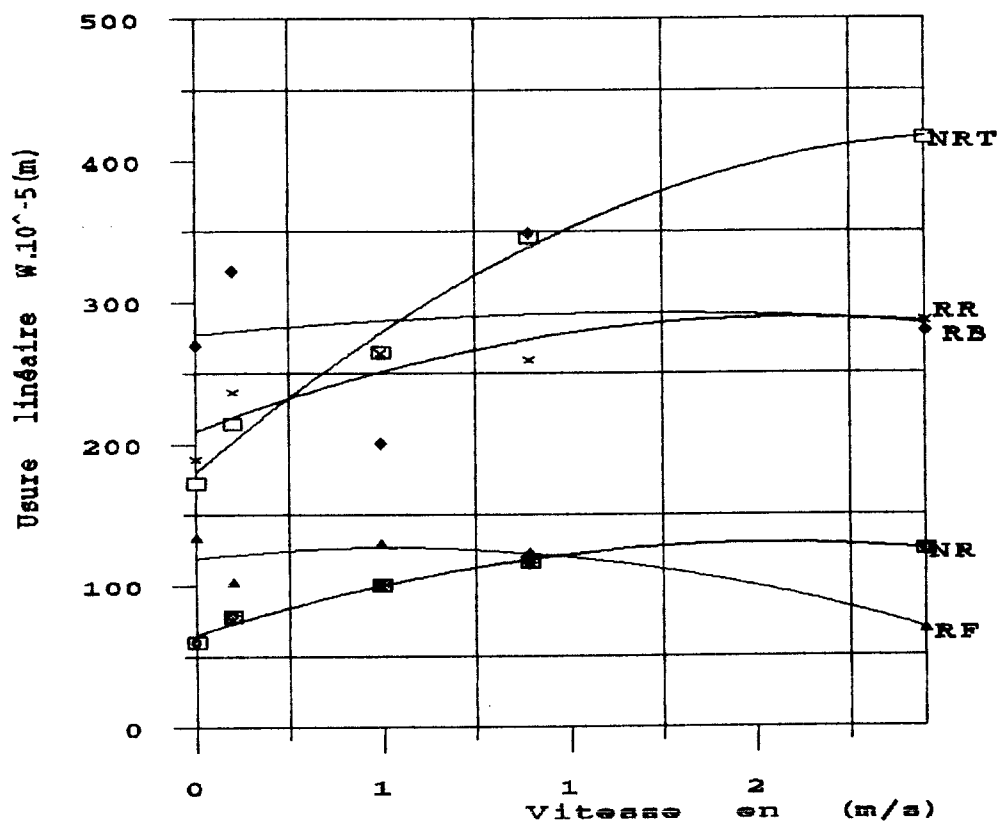


Fig- III- 20- Evolution de l'usure linéaire en fonction de la vitesse

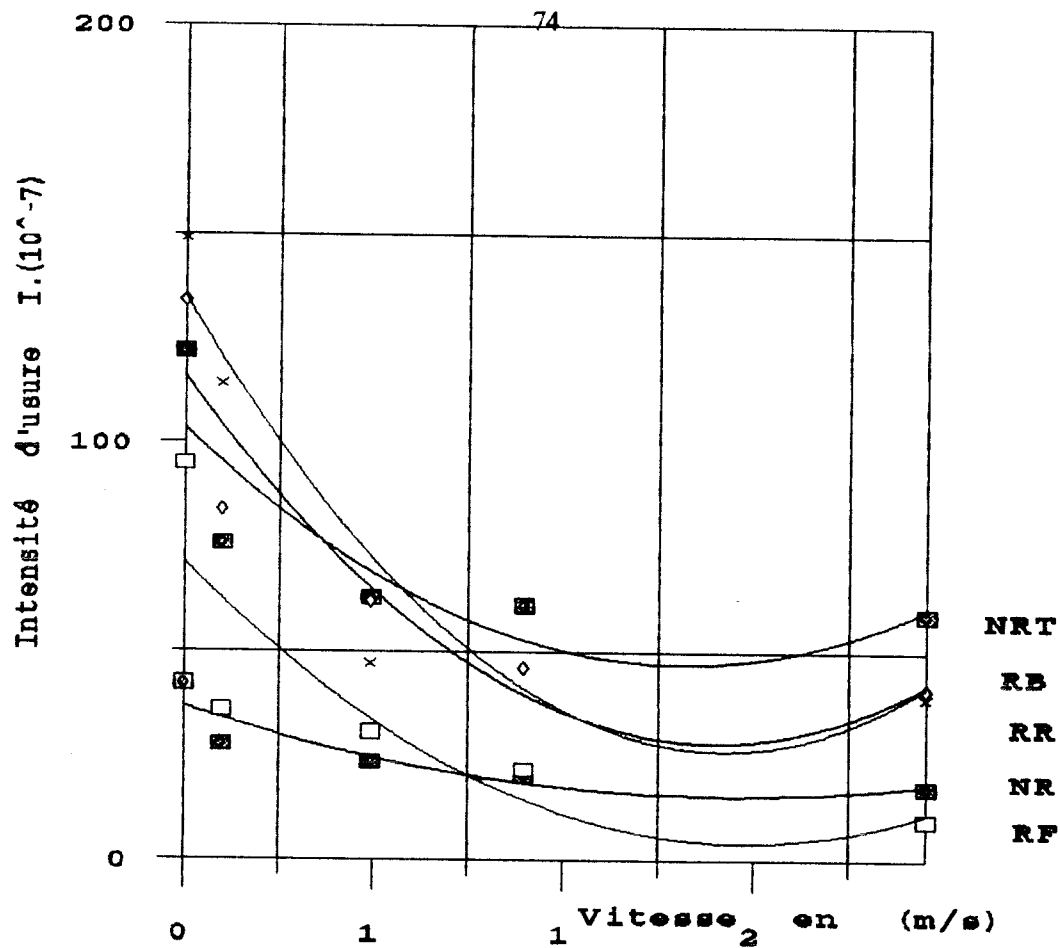


Fig-III- 21- Evolution de l'intensité d'usure en fonction de la vitesse

Conclusion

Dans cette série d'expériences on remarque que l'usure linéaire pour la surface type NRT présente une valeur maximale ,d'autre part l'inclinaison de la courbe est très prononcée relativement aux autres ,cette pente n'est autre que la vitesse d'usure ,d'autre part la surface type RF présente une usure minimale ,en revanche l'allure classique de la courbe d'usure est vérifiée pour l'ensemble des surfaces sauf pour le type RF .

III-10-2-2-1 - Evaluation d'un coefficient ⁷⁵ d'amélioration

A partir des valeurs du tableau 9 obtenues lors des essais d'usure, on se propose de calculer le rapport entre les valeurs des intensités d'usure de différentes surfaces rechargées et la valeur de la surface de référence (non rechargée).

Les valeurs obtenues sont consignées dans le tableau suivant

Tableau- III- 2 - valeurs comparatives de l'intensité d'usure pour des conditions d'essais à des vitesses variables

Vitesse (m/s)	NR	NRT	RR	RB	RF
0,167	42,4	2,88	3,16	3,51	2,24
0,264	27,9	2,79	3,01	4,08	1,29
0,659	23,8	2,65	2,60	1,97	1,30
1,060	20,6	2,96	2,23	3,00	1,07
2,120	17,8	3,31	2,30	2,19	0,56
moyenne Ka	1 référence	2,34	2,66	2,95	1,29

Conclusion

On constate que le coefficient d'amélioration d'usure par rapport à la surface de référence est relativement bas comparé à la première série d'essais .

On relève un coefficient variant de $K=1,29$ à $2,95$ contre une valeur de $K=4,77$ jusqu'à $19,60$, au point de vue classement des surfaces en fonction de leur intensité d'usure, la surface type NR garde la valeur minimale durant les deux essais.

III-10-2-3-Influence de la force appliquée sur l'usure linéaire et l'intensité d'usure

Tableau- III-13- Résultats des essais d'usure pour des variations de F ou P

P (MPa)	F(N)	N.R.		N.R.T.		R.B		R.B		R.F.	
		W10 ⁻⁵	l.10 ⁻⁷	W10 ⁻⁵	l.10 ⁻⁷	W10 ⁻⁵	l.10 ⁻⁷	W10 ⁻⁵	l.10 ⁻⁷	W10 ⁻⁵	l.10 ⁻⁷
1,81	65,3	5,67	4	56,70	40,1	429,5	346,5	127,3	90,1	153,7	109
2,45	196,2	6,93	2,45	70,56	16,7	525,4	192,0	132,3	48,8	446,0	158
7,26	261,5	21,42	5,1	83,16	19,6	613,0	144,7	203,5	48,0	701,2	166
10,90	392,4	15,75	2,8	89,46	15,8	754,7	133,6	207,9	36,8	258,9	46
12,72	458	14,49	2,2	119,0	16,9	793,8	112,4	206,6	29,3	319,4	45

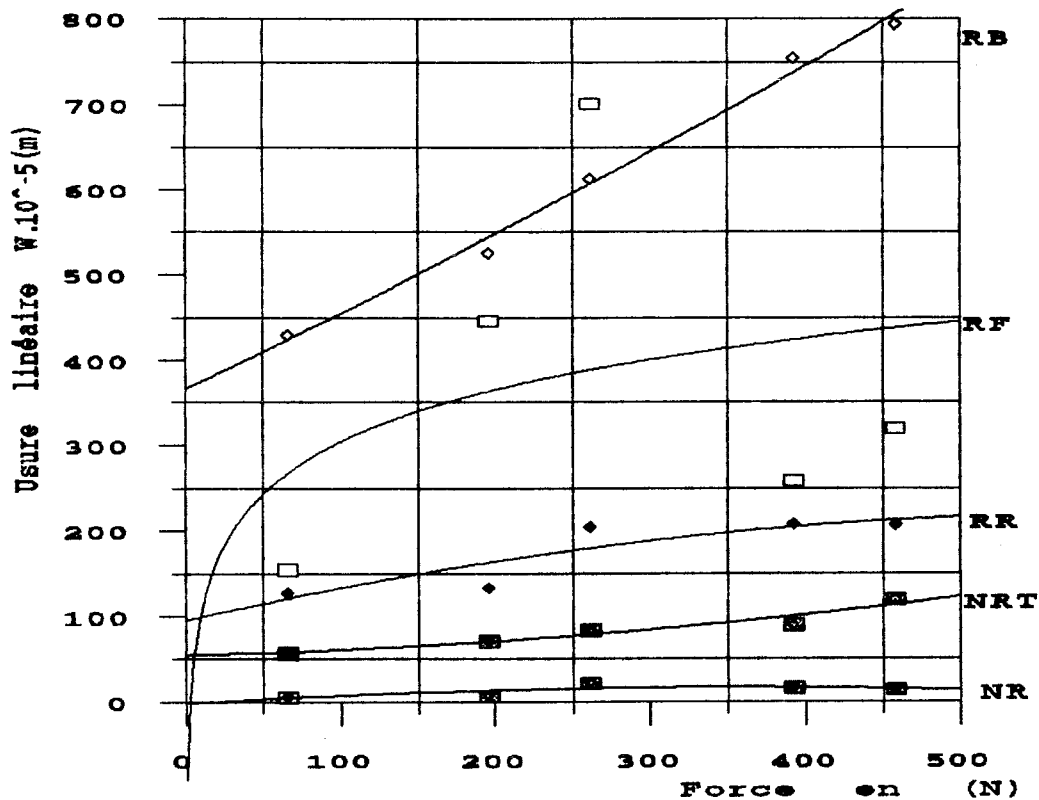


Fig- III- 22- Evolution de l'usure linéaire en fonction de la force appliquée

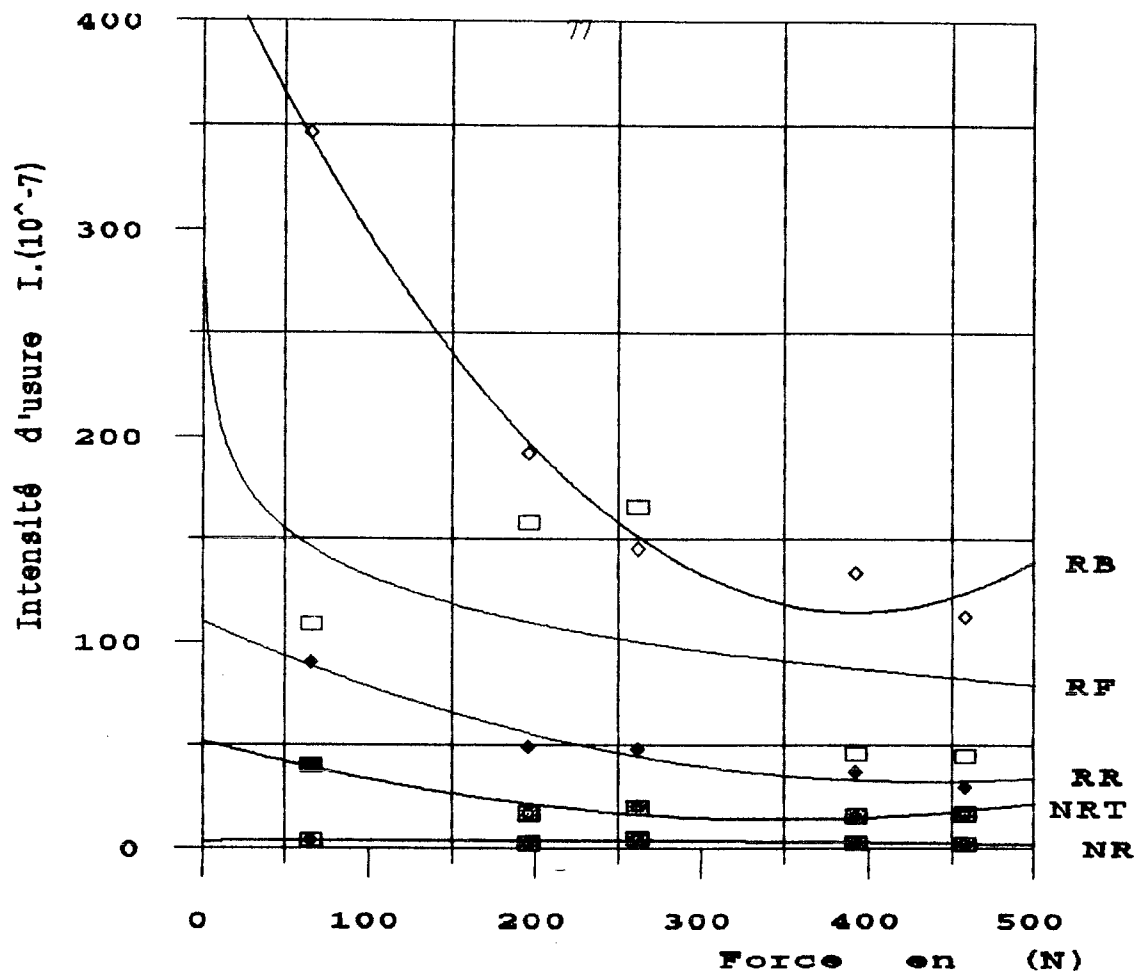


Fig- III- 23- Evolution de l'intensité d'usure en fonction de la force appliquée

III- 10-2-3-1- Evaluation du coefficient d'amélioration

On calcule à partir des valeurs du tableau 11 le coefficient d'amélioration de l'intensité d'usure ,représentant le rapport de l'intensité d'usure de la surface considérée sur celui de la surface de référence (NR).

Les valeurs sont consignées dans le tableau suivant

Tableau- III-14 - valeurs comparatives de l'intensité d'usure pour des conditions d'essais à des force variables .

Force (N)	NR	NRT	RB	RR	RF
65,3	4* 1**	10,02	86,5	22,52	27,25
196,2	2,45 1	6,81	78,7	19,92	64,5
261,5	5,1 1	3,84	28,37	9,41	35,55
392,4	2,8 1	5,64	47,7	13,14	16,43
458	2,2 1	7,68	51,09	13,32	20,45
moyenne Ka	1 (référence)	6,80	58,47	15,66	32,84

* Valeur de l_1 pour une surface NR

** Coefficient pour la valeur de référence

Conclusion

Dans cette série d'essais on remarque que le coefficient d'amélioration est nettement supérieur aux deux séries précédentes ,ceci est probablement dû à la variation de la charge appliquée ,l'importance de la charge provoque une déformation plastique des couches superficielles,et par conséquent accélère le volume d'usure.

On remarque en outre ,juste avant la fin de l'essai l'apparition de fissures caractéristiques de fatigue de ces dernières .

Essais d'évaluation

Afin d'évaluer l'usure linéaire et l'intensité d'usure pour le cas d'un frottement métal-métal. Nous avons procédé à une série d'expérimentations, dans le but de calculer le coefficient de résistance à l'usure pour le cas de deux surfaces frottantes (acier XC 42 et surface rechargée à l'arc électrique avec électrode basique, les résultats obtenus confirment une nette supériorité de ces dernières, les résultats des essais seront présentés dans le paragraphe qui suivra.

Pour ces essais, nous avons considéré le cas où les matériaux antagonistes sont métalliques. Les essais sont définis dans le tableau III.15

Tableau- III-15 Définition des essais

N° essai	Désignation tableau	Variable d'action	Matériau frotteur	Matériau arbre
1	1A	N	XC42	XC 42
2	1B	N	-	RB
3	2A	L	-	RB
4	2B	L	-	XC
5	3A	F	-	XC
6	3B	F	-	RB

Tableau-III-16- (1AF)

N° essai	t (mn)	N (tr/mn)	L (m)	dP _f .10 ⁻⁶	W _f .10 ⁻⁶	I _f .10 ⁻⁹
1	15	71	150	11	38,86	0,26
2	30	112	474	19	67,14	0,14
3	45	280	1777	78	275,62	0,15
4	60	450	3807	90	318,02	0,08
5	75	900	9517	125	441,70	0,05
6	90	1400	17767	150	530,03	0,03
7	105	1800	26650	151	533,57	0,02

Tab III-17-(1AA)

N° essai	t (mn)	N (tr/mn)	L (m)	dP _a .10 ⁻⁶	W _a .10 ⁻⁶	I _a .10 ⁻⁹
1	15	71	150	7	0,699	0,466
2	30	112	474	8	0,798	0,168
3	45	280	1777	20	1,996	0,112
4	60	450	3807	23	2,296	0,060
5	75	900	9517	31	3,094	0,030
6	90	1400	17767	38	3,793	0,020
7	105	1800	26650	40	3,993	0,015

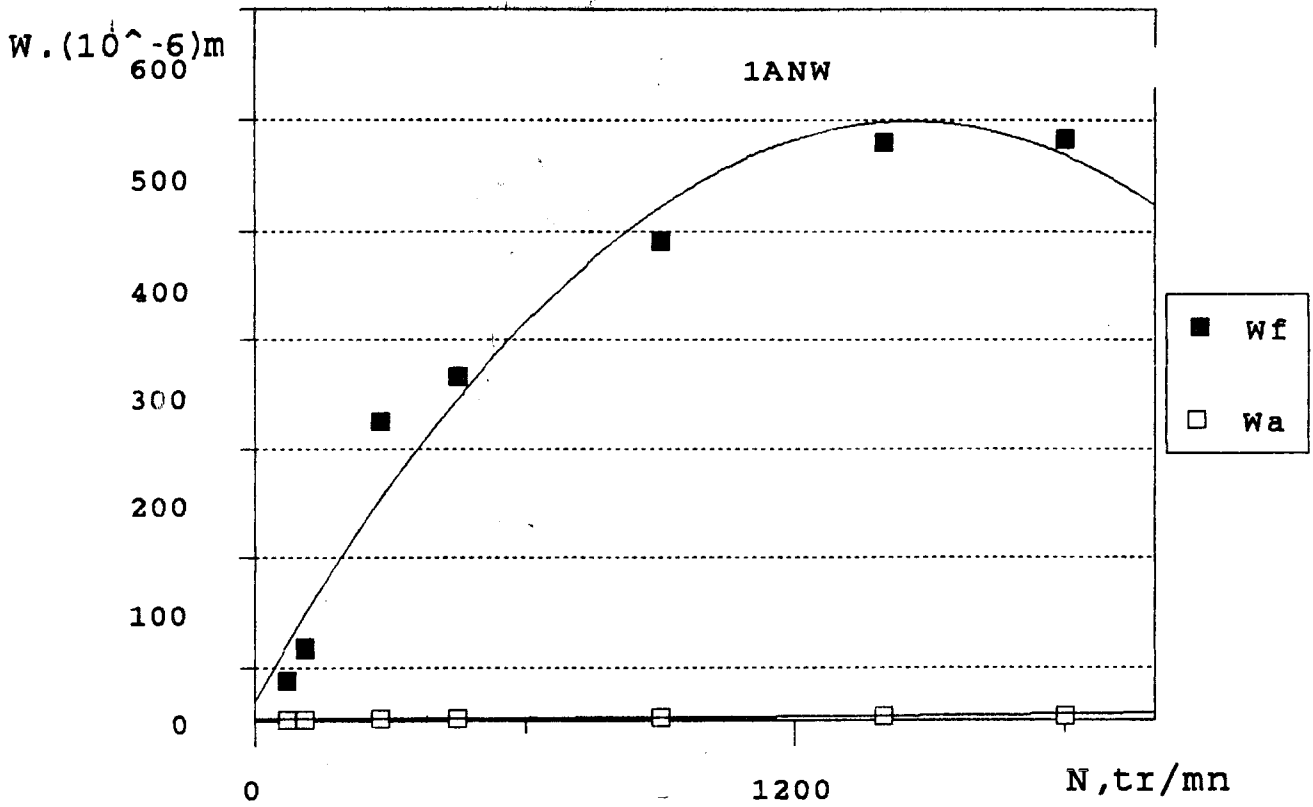


Fig.III-24-Evolution de l'usure linéaire en fonction de la vitesse de rotation

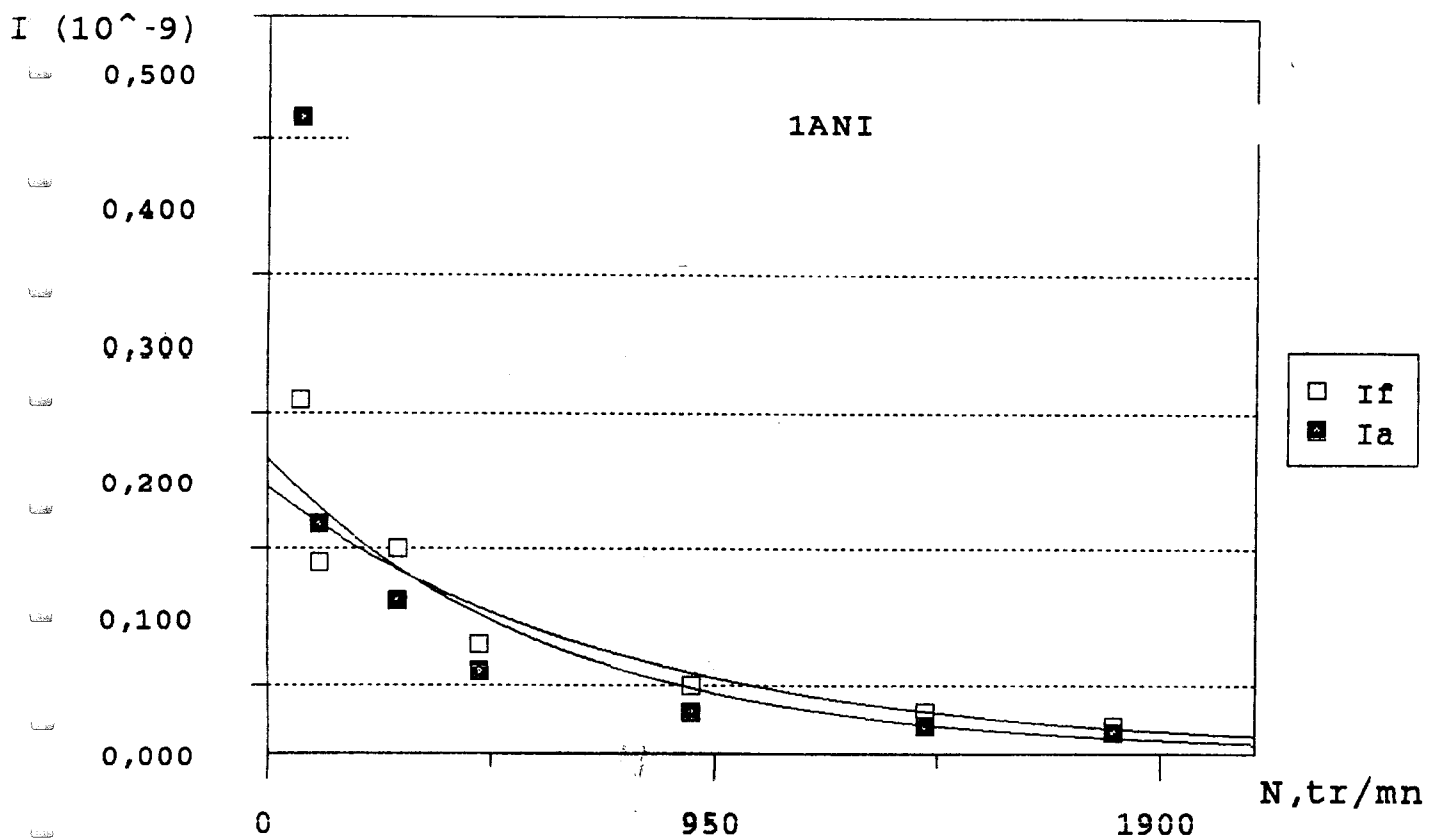


Fig.III-25-Evolution de l'intensité d'usure en fonction de la vitesse de rotation

Tableau -III-18 (1BF)

N° essai	t (mn)	N (tr/mn)	L (m)	dP _f .10 ⁻⁶	W _f .10 ⁻⁶	l _f .10 ⁻⁹
1	15	71	150	12	41	0,27
2	30	112	474	20	70	0,15
3	45	280	1777	82	289	0,163
4	60	450	3807	95	334	0,088
5	75	900	9517	131	464	0,049
6	90	1400	17767	158	557	0,031
7	105	1800	26650	160	560	0,021

Tab-III-19 (1BA)

N° essai	t (mn)	N (tr/mn)	L (m)	dPa	W _a .10 ⁻⁶	l _a .10 ⁻⁹
1	15	71	150	27	2,65	1,77
2	30	112	474	30	3,03	0,64
3	45	280	1777	76	7,59	0,43
4	60	450	3807	87	8,72	0,23
5	75	900	9517	118	11,76	0,12
6	90	1400	17767	144	14,41	0,081
7	105	1800	26650	152	15,17	0,057

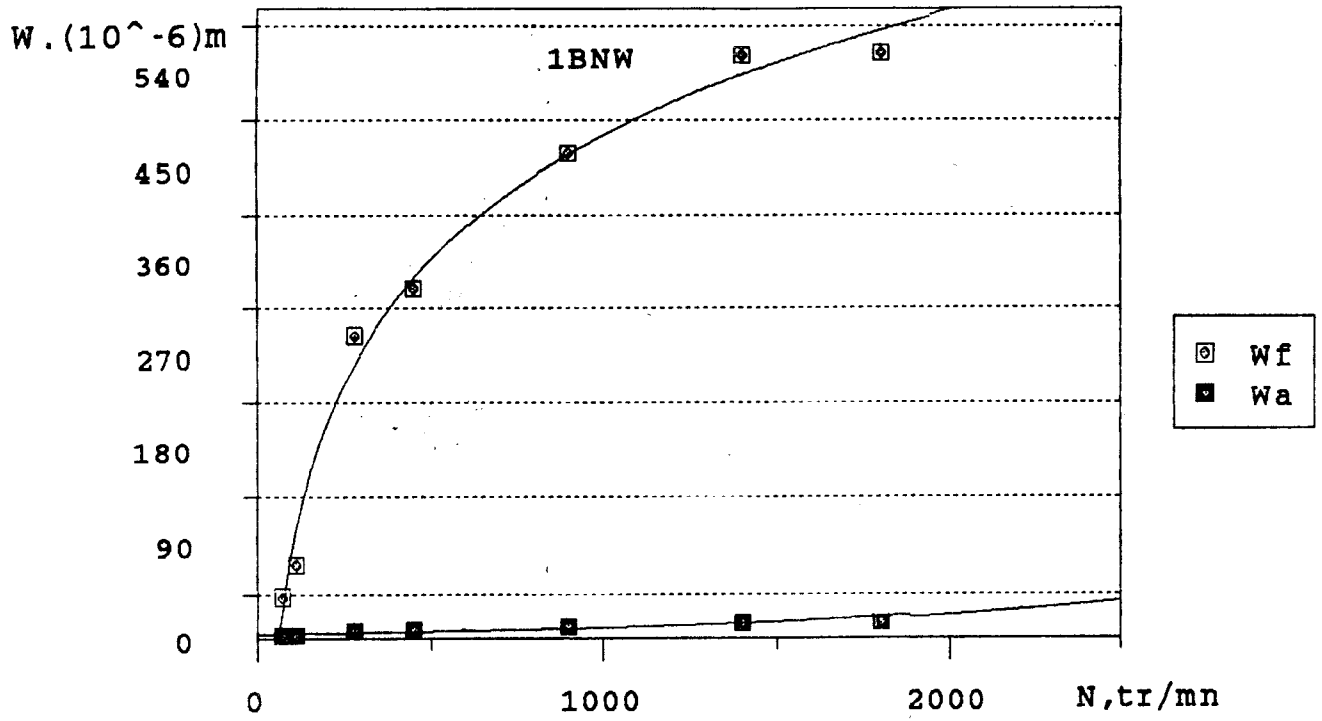


Fig.III-26-Evolution de l'usure linéaire en fonction de la vitesse de rotation

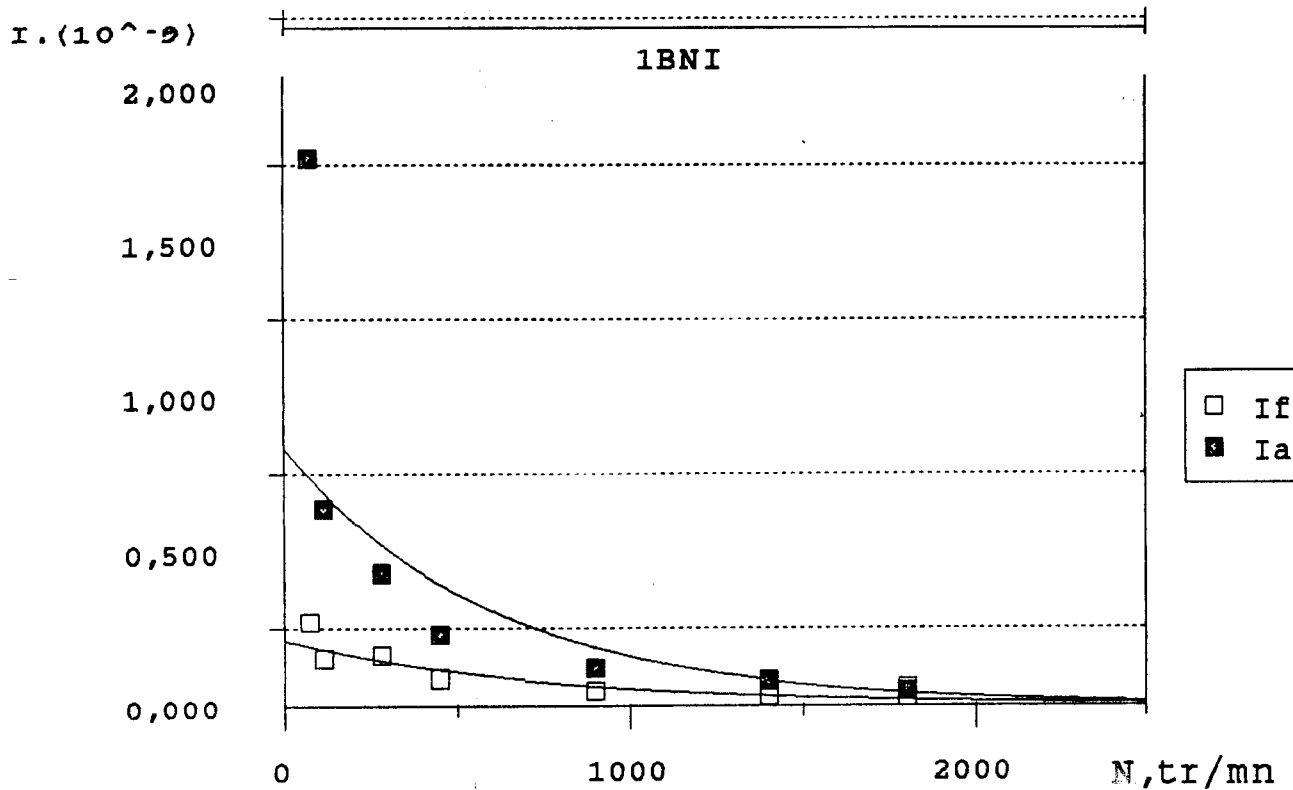


Fig.III-27-Evolution de l'intensité d'usure en fonction de la vitesse de rotation

Tab-III-20(2AA)

N° essai	t (mn)	L (m)	dPa.10 ⁻⁴	Wa10 ⁻⁴	la.10 ⁻⁷
	15	954	5	0,499	0,523
2	30	1907	7	0,699	0,366
3	45	2861	12	1,198	0,418
4	60	3815	18	1,797	0,471
5	75	4715	28	2,795	0,592
6	90	4768	45	4,492	0,942
7	105	5722	70	6,987	1,221

Tab-III-21 (2AF)

N° essai	t (mn)	L (m)	dPf.10 ⁻⁴	Wf.10 ⁻⁴	If.10 ⁻⁶
1	15	954	20,5	72,44	7,59
2	30	1907	28,2	99,65	5,22
3	45	2861	47,5	167,84	5,87
4	60	3815	70,5	249,12	6,53
5	75	4715	115,2	407,07	8,63
6	90	4768	181,3	640,64	13,44
7	105	5722	268,5	948,76	16,58

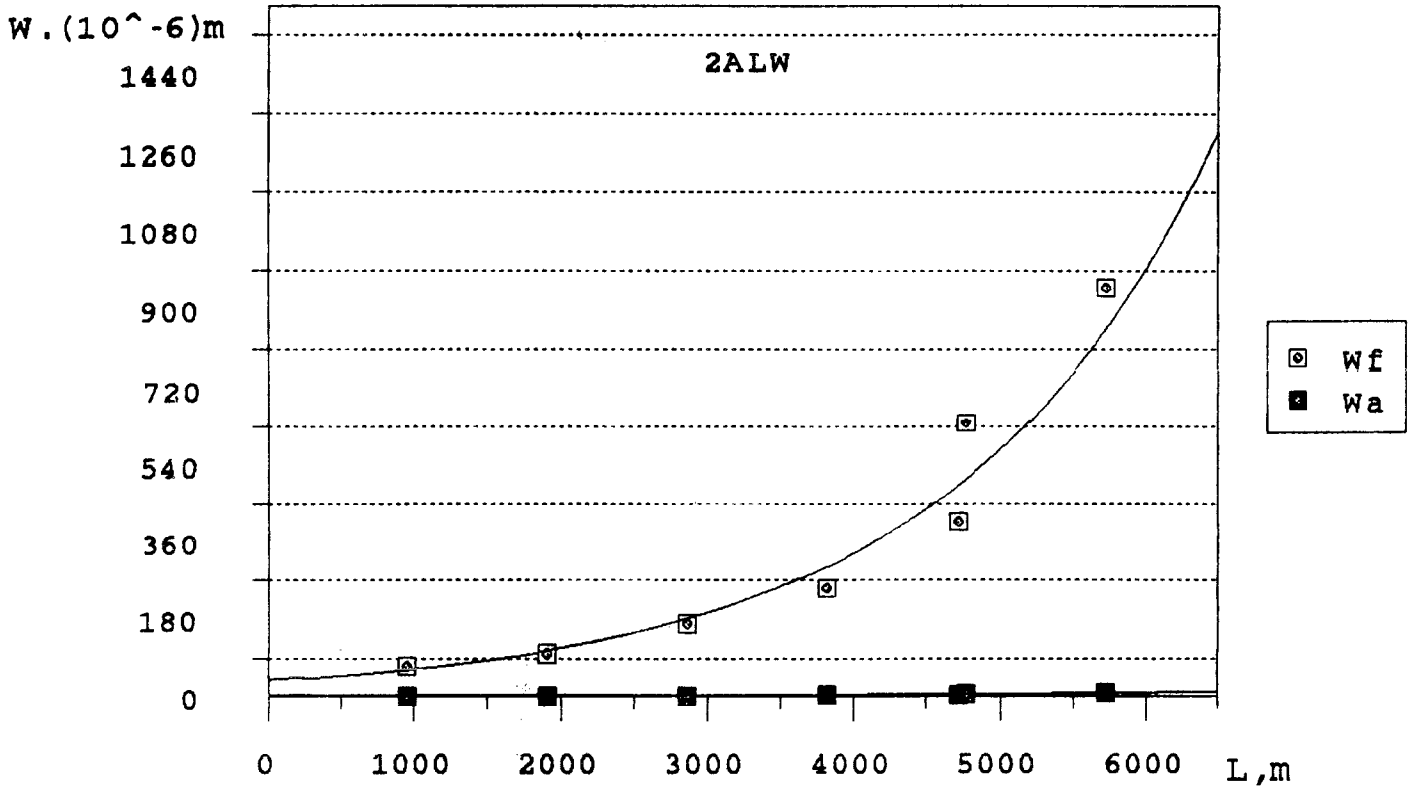


Fig.III-28-Evolution de l'usure linéaire en fonction de la longueur de glissement

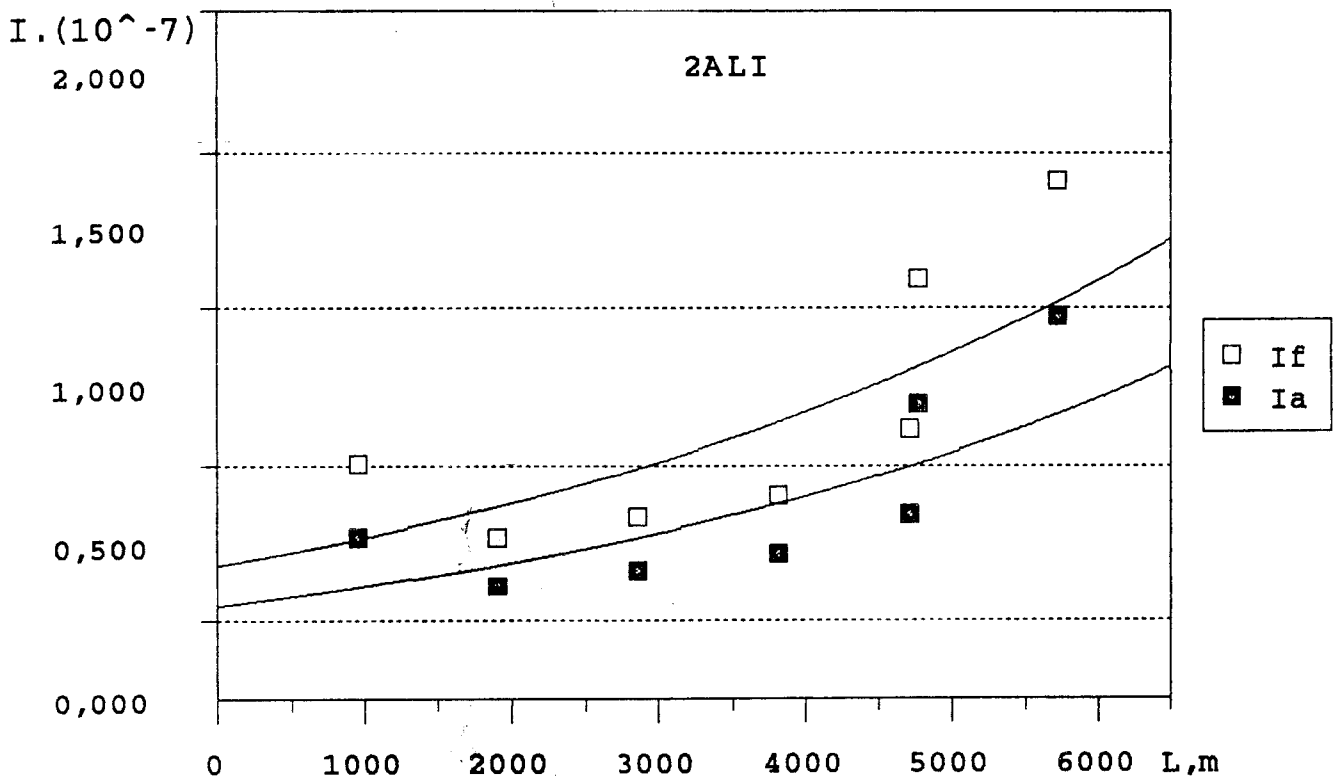


Fig.III-29-Evolution de l'intensité d'usure en fonction de la longueur de glissement

Tab-III-22(2BA)

N° essai	t (mn)	L (m)	dPa.10 ⁻⁴	Wa.10 ⁻⁴	la.10 ⁻⁷
1	15	954	18	1,747	1,831
2	30	1907	25	2,446	1,282
3	45	2861	42	4,192	1,465
4	60	3815	63	6,289	1,648
5	75	4715	98	9,782	2,075
6	90	4768	158	15,722	3,297
7	105	5722	245	24,456	4,274

Tableau III-23(2BF)

N° essai	t (mn)	L (m)	dPf.10 ⁻⁴	Wf.10 ⁻⁴	lf.10 ⁻⁹
1	15	954	22	79,96	8,28
2	30	1907	30	108,61	5,69
3	45	2861	50	182,95	6,39
4	60	3815	74	271,54	7,12
5	75	4715	128	442,70	9,41
6	90	4768	198	698,29	14,64
7	105	5722	294	1034,15	18,07

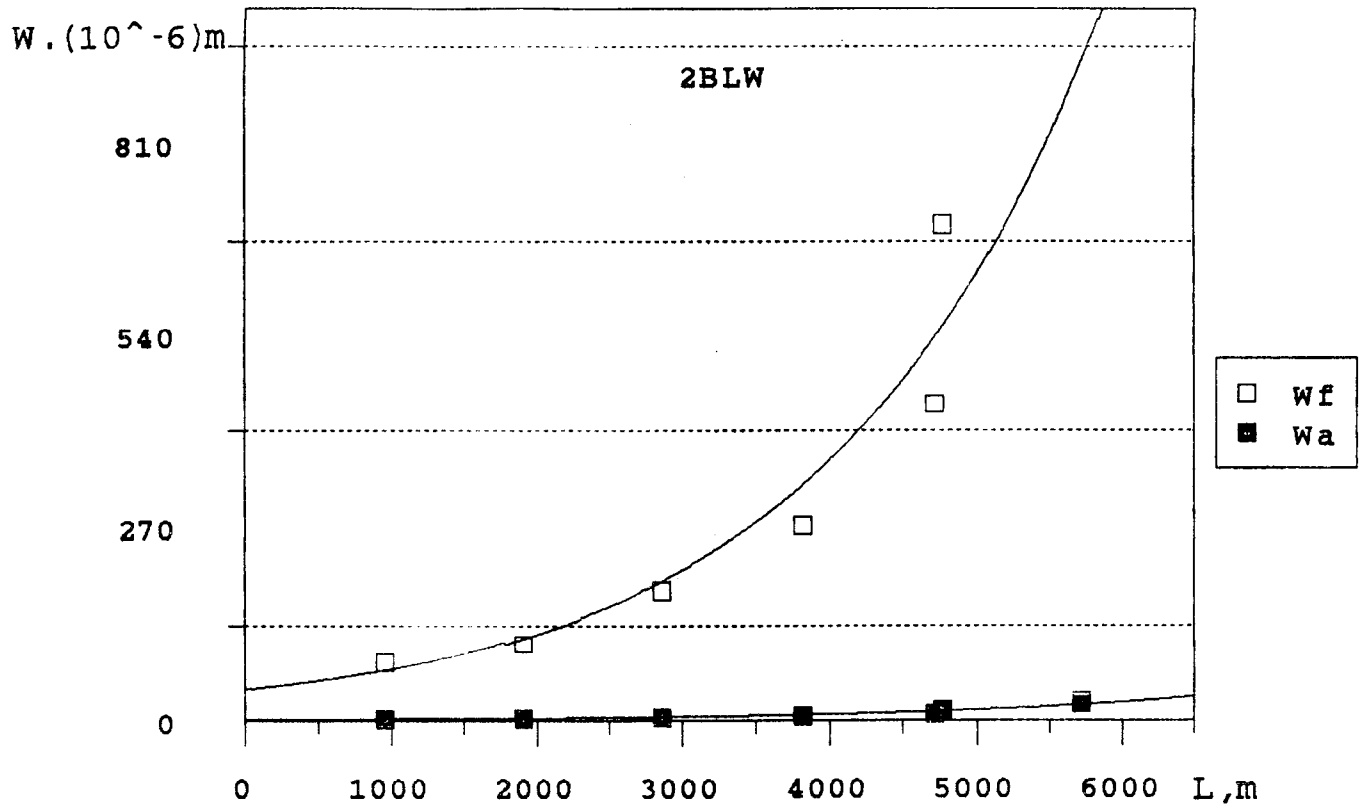


Fig.III-30-Evolution de l'usure linéaire en fonction de la longueur de glissement

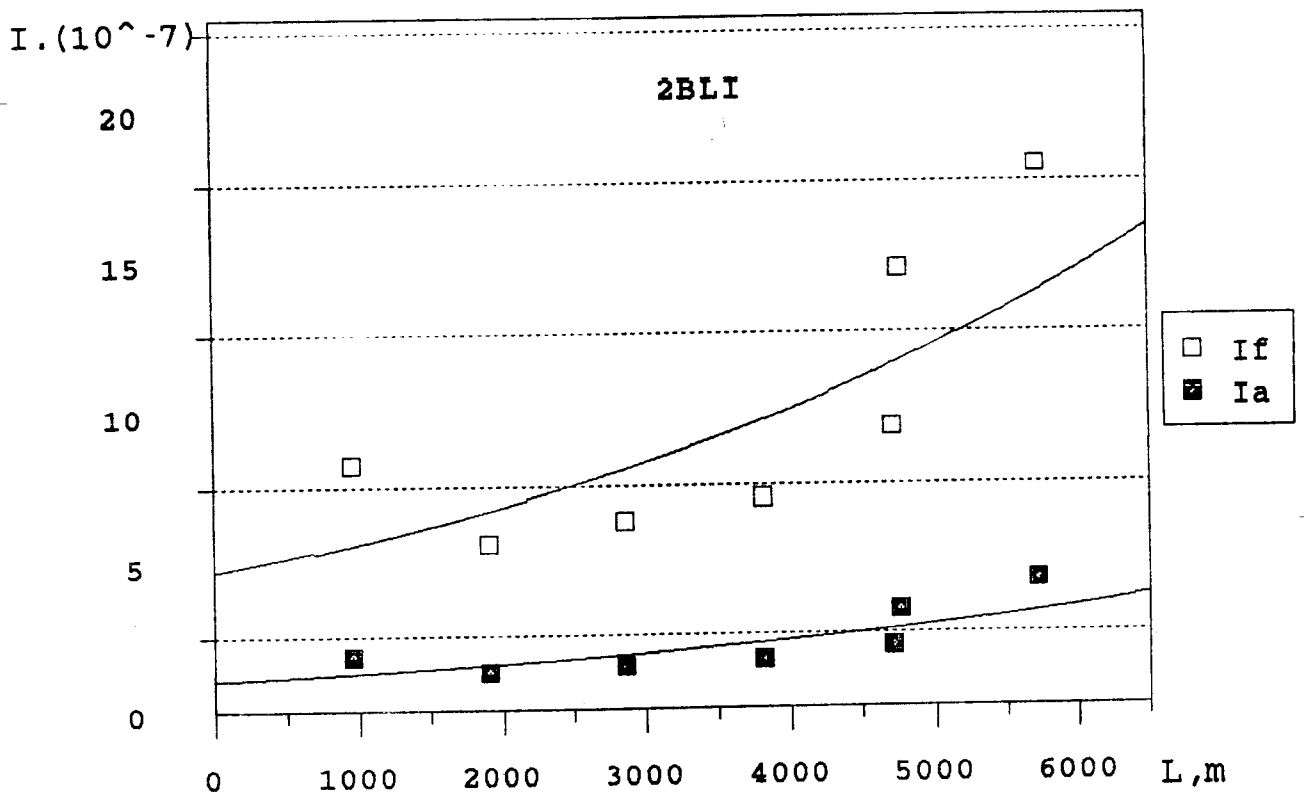


Fig.III-31-Evolution de l'intensité d'usure en fonction de la longueur de glissement

Tab-III-24(3AF)

N° essai	t (mn)	F(N)	dPf.10 ⁻⁴	Wf.10 ⁻⁴	lf.10 ⁻⁷
1	15	65,3	6	21	0,0222
2	30	130,18	15	53	0,0278
3	45	196,2	26	92	0,0321
4	60	261,5	40	141	0,0370
5	75	327	54	191	0,0400
6	90	392,4	85	300	0,0630
7	105	458	110	389	0,0680

Tab-III-25(3AA)

N° essai	t (mn)	F(N)	dPa.10 ⁻⁶	Wa.10 ⁻⁶	la.10 ⁻⁸
1	15	65,3	2,45	0,245	0,025
2	30	130,18	5,35	0,534	0,028
3	45	196,2	10,9	1,007	0,035
4	60	261,5	18,6	1,857	0,047
5	75	327	22,7	2,667	0,048
6	90	392,4	33,7	3,364	0,070
7	105	458	46,2	4,612	0,080

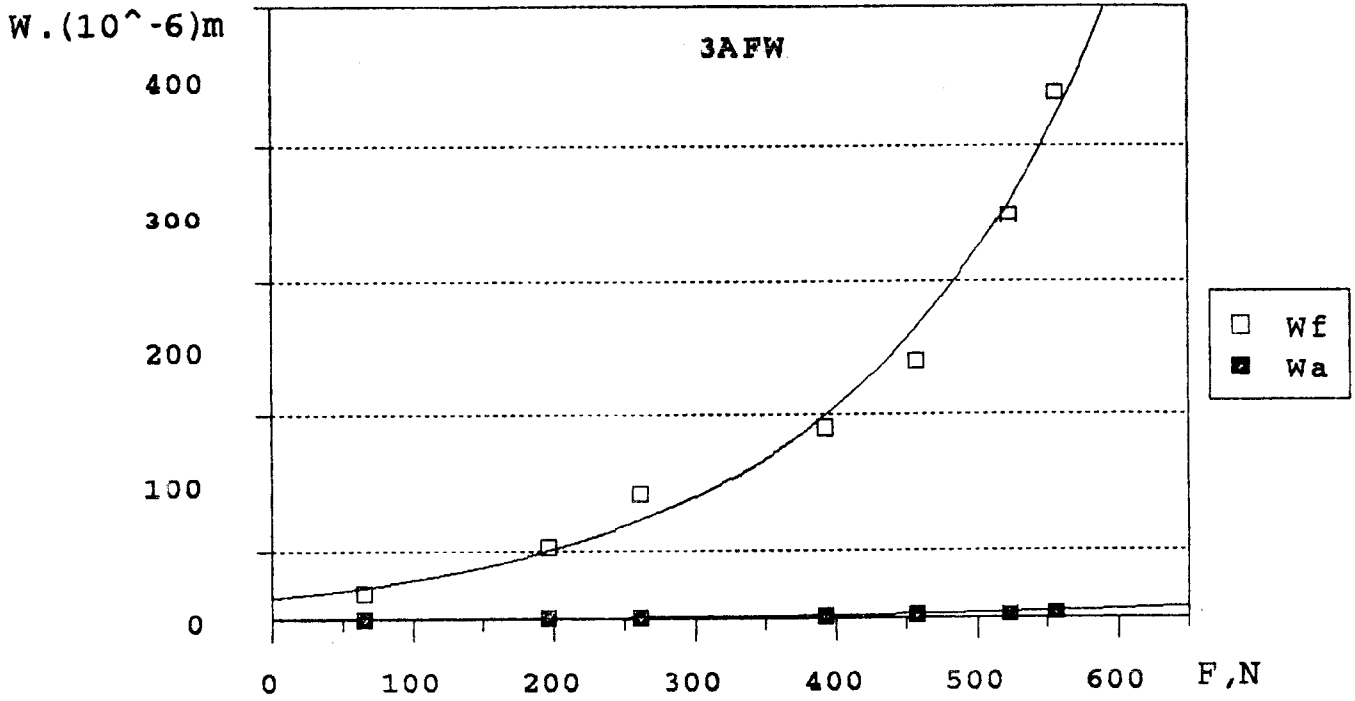


Fig.III-32-Evolution de l'usure linéaire en fonction de la force appliquée

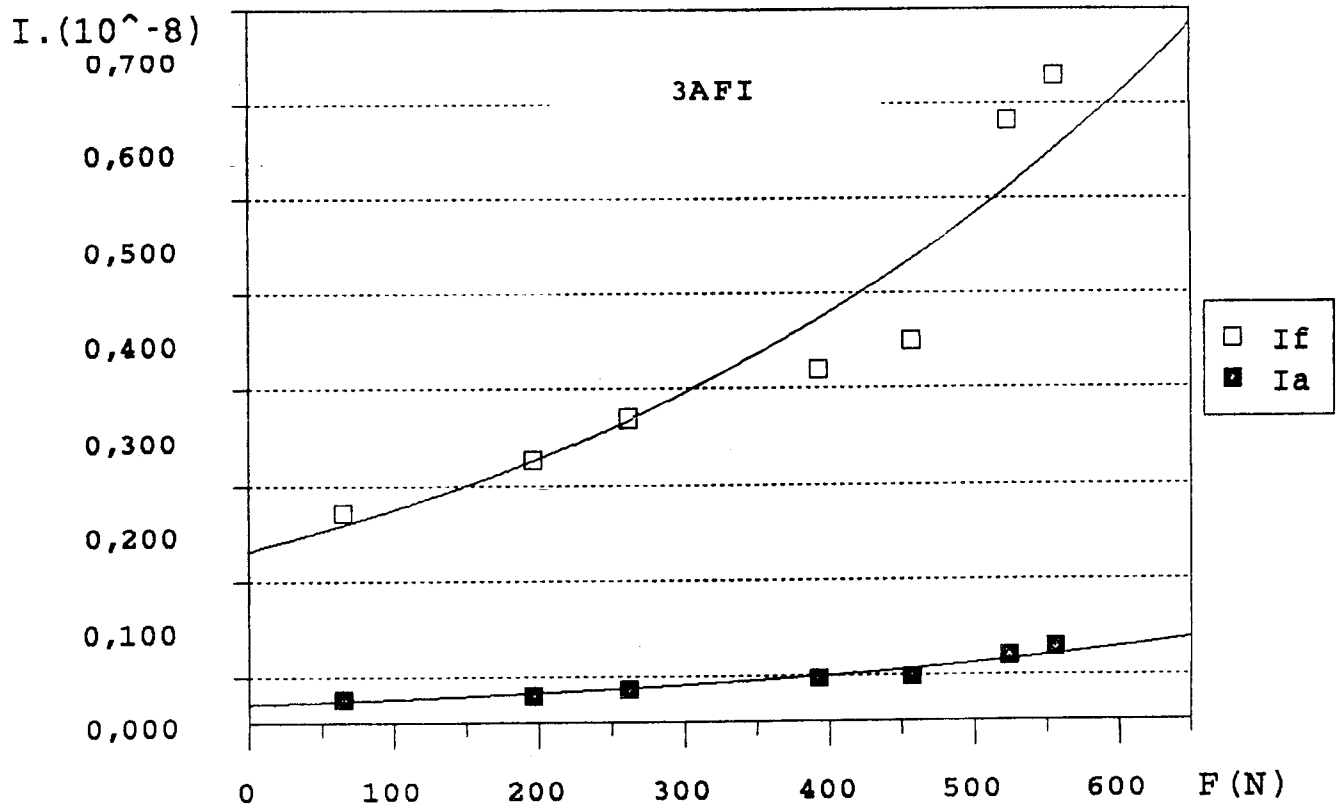


Fig.III-33-Evolution de l'intensité d'usure en fonction de la force appliquée

Tab.III.26(3BF)

N° essai	t (mn)	L (m)	dPf.10 ⁻⁴	Wf.10 ⁻⁴	If.10 ⁻⁷
1	15	954	4	14	0,015
2	30	1907	13	46	0,024
3	45	2861	29	102	0,036
4	60	3815	37	131	0,034
5	75	4715	51	181	0,038
6	90	4768	81	286	0,060
7	105	5722	125	442	0,077

Tab.III.27. (3BA)

N° essai	t (mn)	L (m)	dPa.10 ⁻⁴	Wa.10 ⁻⁴	la.10 ⁻⁶
1	15	954	10,43	1,041	0,109
2	30	1907	22,78	2,274	0,119
3	45	2861	46,41	4,633	0,161
4	60	3815	79,20	7,906	0,207
5	75	4715	96,66	9,648	0,205
6	90	4768	143,49	14,234	0,300
7	105	5722	196,72	19,637	0,343

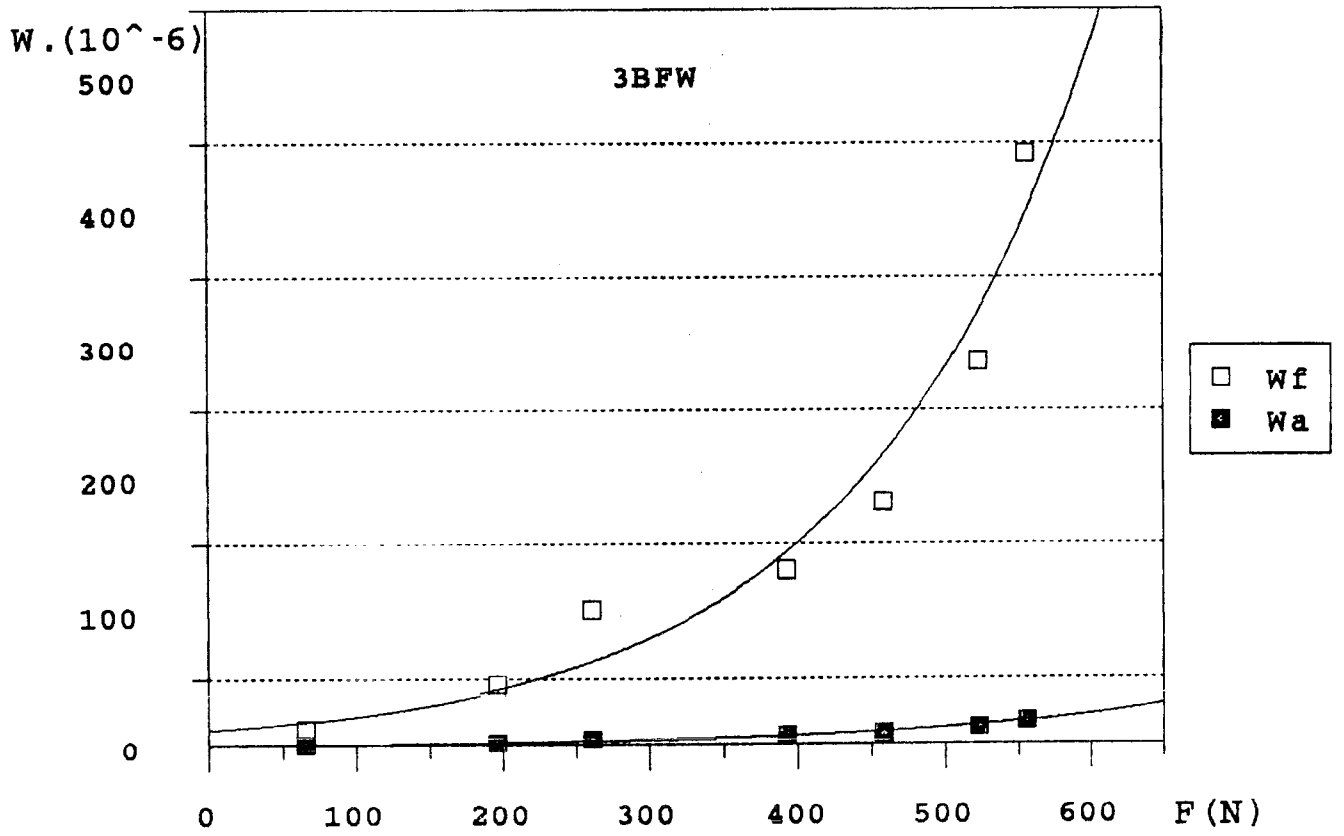


Fig.III-34-Evolution de l'usure linéaire en fonction de la force appliquée

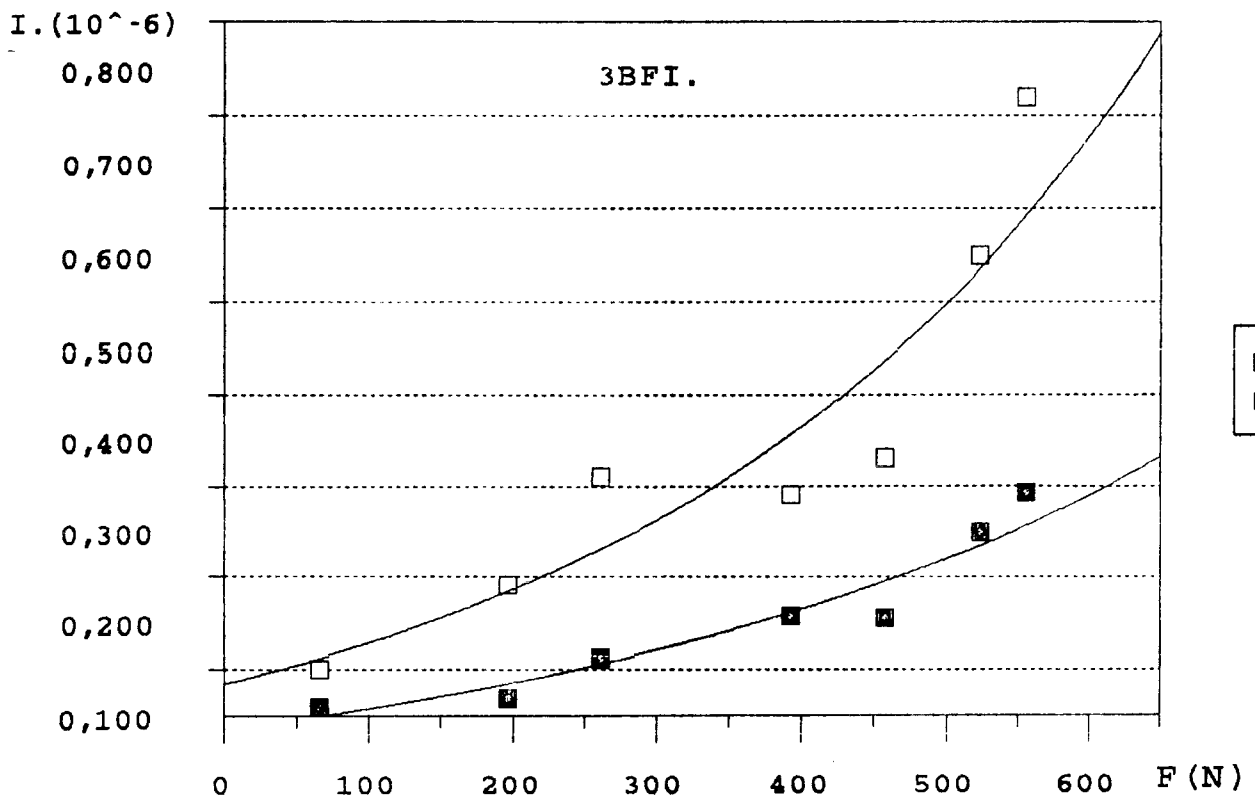


Fig.III-35-Evolution de l'intensité d'usure en fonction de la force appliquée

CONCLUSION GENERALE

Pour l'élaboration de notre travail nous avons mis au point un dispositif d'essai d'usure. Ce dernier nous a permis de tester des surfaces frottantes:non rechargées et rechargées avec différentes méthodes

- à l'arc électrique avec électrode à enrobage rutile
- à l'arc électrique avec électrode à enrobage basique
- sous flux gazeux (argon).

Les résultats obtenus ont prouvé qu'hormis les caractéristiques mécaniques qui paraissent importantes,nous constatons aussi que les paramètres de soudage et la microstructure des surfaces rechargées jouent un rôle très important dans l'étude de l'usure des pièces.

Les résultats des essais effectués ,montrent à travers les courbes le danger que présentent les charges ou les pressions exagérées lors du fonctionnement des machines.Si certains seuils sont dépassés l'intensité d'usure augmente excessivement et les surfaces frottantes peuvent être d'une manière irréversible avariées .

Ce phénomène montre l'intérêt du rodage qui s'effectue avec une montée en charge progressive et non brutale de façon que l'aire de contact accroît de façon progressive sans produire de dommage préjudiciable au bon fonctionnement ultérieur de la machine

Les résultats obtenus dans l'ensemble de nos essais montrent une supériorité de la surface type RB,cette dernière présente une corrélation significative avec la dureté ,cela est en concordance avec les résultats bibliographiques .En revanche ,les résultats obtenus ne peuvent prétendre à une certaine quantification chiffrée et précise des caractéristiques tribologiques des surfaces frottantes,mais ,en outre ,se limite uniquement à une mesure relative d'un critère intrinsèque au couple de matériaux

-surface frottante/surface frottée .

La deuxième série d'essais s'est effectuée avec le même dispositif mais avec changement de nouvelles éprouvettes devant être rechargées compte tenu des limites de la balance utilisée .

Ces essais permettent de donner des éléments de réponse concernant le comportement à l'usure des pièces mécaniques ,avec l'utilisation de paramètres d'usure aussi proches de la réalité .Ceci permettra éventuellement aux utilisateurs d'en exploiter les résultats trouvés .

BIBLIOGRAPHIE

- [1] LEVEQUE,R. "Les traitements et revêtements de surface"
Bulletin n°4, Dec1983
- [2] MAGNEE,A. "Traitements modernes de surface contre l'usure"
Seminaire-Liege-Févr1987.
- [3] LEVÊQUE,R "L'amélioration de la résistance à l'usure par le couple matériaux traitement superficiel"
Rev. Traitement thermique Nov 1986
- [4] PASTOR,H., LECOMTE,J.C "Les matériaux face aux mécanismes de l'usure"
Bull CEM N°5, Mars 1984*
- [5] BERAUD,C., BERTHIER, Y, COLOMBIE,C., VINCENT, L.,GODET, M.
"Usure par petits débattements: formation et rôle protecteur du troisième corps"
Bull. CEM n°5, mars1984
- [6] DUBOIS,M., JOSSE, P. GASPARD, C., MAGNEE, A.
"Etude des interactions contraintes-dureté-microstructure d'acier résistant à l'usure"
Bull. CEM N°17, mai 1984
- [7] NISSET, M. DE MUZERE, R., DOYEN, R.
"Rechargement d'alliage de cobalt résistant à l'usure par les procédés feuillard à l'arc submergé et électrolag"
Bull CEM n° 17 mai1989
- [8] FELDER, F., COUTU, L.
"Aspects thermomécaniques de l'usure des matrices en forgeage à chaud de l'acier"
Bull. CEM N°4 Dec1978
- [9] VETZ, H., SOMMER,K "Investigation of the effect of surface temperature in sliding contact-wear, 43 *1977*, 355-358
- [10] DAWSON, P,A " Le grenailage de précontrainte et ses effets sur les caractéristiques d'usure des matériaux"
- [11] BOUCHER,A., ODIN,G.
"Application du procédé plasma arc semi transféré à la réalisation de rechargements durs résistants à l'usure"
Bull. CEM. N°5. mars 84

- [12] RYBAKOV, V. "Le soudage et le coupage des métaux"
p.231-238
- [13] RABINOWICZ, E. "Fifty years on tribology"
London 1987
- [14] PAGE, F.F, SAWYER, GR., ADOWOYE, O.
Proc. Brit cert. soc., 1978
- [15] LAWN, B.R "WEAR-96" p.300. 1976
- [16] LEMASSON, G., BLAIN, L. "Matériaux de construction mécanique"
p.19 Edition Dunod.
- [17] BOWDEN, F.P and TABOR, D. 1964
The friction and lubrication of solids
Clarendon Press, OXFORD
- [18] HOLM R (1958) Electric contact handbook
Springer, Berlin
- [19] ALIOUCHE, D. "Contribution à l'étude des mécanismes de frottement des étoffes"
Thèse D.N.T, MULHOUSE 1991
- [20] ERNST, H., MERCHANT, ME "Conference on friction and surface finish
MST p. 76, 1940
- [21] BURWELL, J.T and STRANG, CD (1952)
" On the empirical law of adhesion wear"
Journal of applied physics, Vol 23 n°1
- [22] ARCHARD, J.F. "Contact and rubbing of flat surfaces"
Journal of applied physics V 24 n°8
- [23] KRAGELSKY, I. 1965 "Friction and wear"
Butterworth, London
- [24] SALKIN "Apport de la métallurgie du soudage dans l'évolution des matériaux"
Soudage et technique p.267-275, Juillet, Août 1984
- [25] LAKHTINE, I
"Métallographie et traitements thermique des métaux"
p. 256-257, Edition mir, Moscou
- [26] LEFEVRE, R "Transformation de surfaces" p. 176-176

- [27] AYFL, J.
"Les différentes formes tribologiques d'usure des surfaces métalliques" p.91-111
- [28] COOKS, M- "The formation of wedges of displaced metal between sliding metal surfaces"
Wear, 1965 p.85-92
- [29] AUTLER, M "Process of metal transfer and wear"
Wear, 1964 p181-203
- [30] MOORE, M.A. "A Review of two body abrasive wear"
Wear, 1971 p. 1-17
- [31] RICHARDSON, R. "Abrasive wear engineering"
208, 1969, p.479
- [32] KRUSHCHOV, M.M. et KRICHEV, M.A
"Friction and wear in machinery," *IZD. moscou 60 n°889-893*
- [33] GILTROW, J.P.
"A relation ship between abrasive wear and the cohesion energie of material"
Wear, 15, 1970 p. 71-78
- [34] IKRAMOV, YA. "Méthodes d'estimation de l'usure abrasive" 1987, p.243-245
- [35] LAMY, B. "Mécanique des surfaces " p.27-28
Thèse d'état, France
- [36] KRUCHEV, M.M "Conference on lubrication and wear"
institut of mech.eng. London, 1957
- [37] RABINOWICZ, E. "Friction and wear of materials"
J, Wiley, 1965
- [38] ANGUS. H.T, "Wear" Vol 54, p.33-78, 1979
- [39] HURRICKS, P.L "Some metallurgical factors controlling the adhesive and abrasive wear resistance of steels"
A review wear, 26,1973, p.285-304
- 40] "Abrasive wear" *SAE information report journal 965, 1966*
- [41] BERNARD, J. "Matériaux et usure pour les industries métallurgiques"
28 Journées des aciers, 1989

- [42] CAUBET, J.J "Théorie et pratique industrielle du frottement"
Dunod, Paris, 1964
- [43] KERCHENBAUM, Y., YUODOLOVITCH, M.
"Réparation et montage des équipements des champs de pétrole"
édition "école supérieure de moscou"
- [44] DOBROVOLSKI, V, "Eléments de machines"
Edition, MIR p.476
- [45] KHOUDI KH, MI "Réparation des machines textiles"
Edition moscou, 1991
- [46] VARISELLAZ, R "Le Soudage" *Dunod*
- [47] BLOUET, J Techniques de l'ingénieur, 2-1978
- [48] ABDI, S Thèse de Magister *E.N.P.A*
- [49] KRAGELSKY, I.V "L'usure des machines "
Edition moscou, 1984
- [50] GARRET GG; WRIGHT GJ; HENDERSON JL; EUIS T
"Preliminary assessment of the factors responsible for the abrasive-wear resistance "
I.M.M Vol 86 N° 11 p 455-462
- [51] MIZUGUCHI S
"Rechargement multicouche avec un alliage de fer à forte tenue en chrome"
- [52] RAYSK et All
"Caractérisation de la microstructure d'un rechargement dur par soudage de carbure de tungstène"
Rev, Journal of Science letters
Vol 7, N°7 p. 775-777, 1988
- [53] P. POULOUKHINE, et All
"Technologie des métaux" pp. 286-289
Edition MIR, MOUSCOU 1967
- [54] R.F KING, D.TABOR
Proc. Roy. Soc London A223 p-225-, 1954

- [55] F.P BOWDEN; D.TABOR
 "The friction and lubrication of solides"
OXFORD London 1950
- [56] J.F ARCHARD
 "Elastic deformation and the laws of friction"
Proc-Roy Soc, London-A243 p. 190-195
- [57] J.F ARCHARD
 "Single contacts and multiple encounters"
J.App.Phy. N° 32- p 1420, 1961
- [58] D.TABOR
 "Friction adhesion and Bounday lubrication of polymers"
 Advances in polymer friction and wear *Vol 5A p.5-28*
Plenum Press- N.Y and London- 1974
- [59] J.J.BIKERMAN
 "The nature of polymer friction"
 Advances in polymer friction and wear-*Vol 5A p.149-165*
Plenum press N.Y and London 1974
- [60] BOCQUET J; MENNELG; MONTAGUST JL
 "Contribution à l'étude de l'usure de cylindre dans le domaine des trains à profilés".
Rev. métallurgie, 1986
Vol 83 N°10 p 793-750
- [61] HIGGINS J
 "The maintenance repair of mining equipment"
Aust. Weld J. Vol 31 N°4 pp.9, 1986
- [62] LESGOURGUES ,J.
 The application of the RBD process
AGARD Conf., 1986 p20
- [63] SOYRIS V.
 "Structures et propriétés mécaniques des soudures en acier austénitique inoxydable."
These, doctorat Montpellier
- [64] HIRONAKA S. SKIYA A
 " Friction properties of fluorinated compound"
Vol 36 N°4 p.343-346

- [65] KORINEK.P
 "Nouvelle génération de polymères fluorés : le teflon AF"
Matériaux et technologie, Vol 79 N° 3-4
p. 41-43, 1991
- [66] BERRAGER G; TAWFIK S; FCUZIN P; LEMAITRE C
 "Influence de l'état de surface et des traitements de surface dans la tenue
 à l'usure d'acier soumis aux sollicitations thermomécaniques et physico-chimiques subies
 au cours du laminage"
Rapport université de Compiègne, 1984
- [67] OHRINER EK; WADAT; WHELAN EP
 "The chemistry and structure of wear-resistant"
Rev. Metallurgical transactions, Vol 22 N° 5 p 983-991 U.S.A, 1991
- [68] RACHETTE P.
 "Elaboration de rechargements métalliques et composites par plasma d'arc transféré :analyse
 de procédé et étude tribologique.
These D.I 1987 France
- [69] ARCHARD JF, ROWIN RA
 "Metallurgical phase transformation in the rubbing of steels"
Proceedings of the Royal society of London
Vol 418 N° 1855 pp 5-424
- [70] A.R SAVKOOR
 "Adhesion and deformation friction of polymer on bad solids"
Advances in polymer friction and wear Vol 5A p.69-123
Plenum Press -N.Y and London - 1974
- [71] M.J.SCHICK
 "Friction and lubrication of synthétique fibers"
 Part 1 : effect of gride surface rough new and speed on fiber friction
Text-Journ- N°43 p. 111-117, 1973
- [72] L.H LEE
 "Effect of surface energetics on polymer friction and wear"
Advances polymer friction and wear - Vol 5A
Plenum N°400 London, 1974

ANNEXES

Annexe II.1:nomenclature des procédès de soudage

2:durabilité de l'acier XC 42 après rechargement

3,4:recommandations pour paramètres d'usinage

5:recommandations pour paramètres de rectification

6A:procédé de rechargement thermochimique

6B: **traitement haute énergie**

6C: **traitement plasma**

III.1:évolution de l'état de surface en fonction de la longueur **type NR**

III.2: **type RB**

NOMENCLATURE DES PROCÉDÉS DE SOUDAGE
en fonction des sources d'énergies utilisées

1. ÉNERGIE THERMO-CHIMIQUE (1)

- 1.1. Soudage aux gaz (combustion gazeuse).
- 1.2. Soudage par aluminothermie.

2. ÉNERGIE ÉLECTRO-THERMIQUE (1)

2.1. Arc électrique

- 2.1.1. Arc électrique entre les pièces à souder.
 - 2.1.1.1. Soudage à l'arc des goujons.
 - 2.1.1.2. Soudage à l'arc par décharge de condensateurs.
 - 2.1.1.3. Soudage à l'arc tournant par champ magnétique radial.
- 2.1.2. Arc électrique entre électrodes.
 - 2.1.2.1. Soudage à l'arc entre électrodes de carbone.
 - 2.1.2.2. Soudage à l'arc à l'hydrogène atomique.
 - 2.1.2.3. Soudage au plasma à l'arc soufflé.
- 2.1.3. Arc électrique entre électrode réfractaire et pièces à souder.
 - 2.1.3.1. Soudage à l'arc au charbon (avec ou sans atmosphère protectrice).
 - 2.1.3.2. Soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène (TIG).
 - 2.1.3.3. Soudage à l'arc tournant par champ magnétique axial (électrode annulaire).
 - 2.1.3.4. Soudage à l'arc tournant par dispositif mécanique.
 - 2.1.3.5. Soudage au plasma à l'arc transféré.
- 2.1.4. Arc électrique entre électrode fusible et pièces à souder.
 - 2.1.4.1. Soudage à l'arc avec électrode nue.
 - 2.1.4.2. Soudage à l'arc avec électrode enrobée.
 - 2.1.4.3. Soudage à l'arc avec électrode couchée.
- 2.1.5. Arc électrique entre fil-électrode et pièces à souder.
 - 2.1.5.1. Soudage à l'arc avec fil-électrode nu (sans protection).
 - 2.1.5.2. Soudage à l'arc avec fil-électrode enrobé (2).
 - 2.1.5.3. Soudage à l'arc avec fil-électrode fourré (2).
 - 2.1.5.4. Soudage à l'arc avec fil-électrode en atmosphère inerte (MIG).
 - 2.1.5.5. Soudage à l'arc avec fil-électrode en atmosphère active (3).
 - 2.1.5.5.1. sous gaz carbonique
 - 2.1.5.5.2. sous vapeur d'eau.
 - 2.1.5.5.3. sous mélanges gazeux (combustibles ou non).
 - 2.1.5.6. Soudage à l'arc avec fil-électrode enrobé par apport magnétique ou mécanique (2).
 - 2.1.5.7. Soudage à l'arc sous flux électro-conducteur avec fil-électrode.
 - 2.1.5.8. Soudage à l'arc au plasma avec fil-électrode.

2.2. Résistance électrique.

- 2.2.1. Soudage avec électrodes résistantes (apport de chaleur par effet joule au sein des électrodes).
- 2.2.2. Soudage en bout par résistance pure.
- 2.2.3. Soudage en bout par étincelage.
- 2.2.4. Soudage par résistance par points, par bossages, à la molette.

2.3. Soudage par induction (électromagnétique).

- 2.4. Soudage (par hystérésis) diélectrique.
- 2.5. Soudage électrique sous laitier (4).

3. ÉNERGIE MÉCANIQUE.

- 3.1. Soudage à froid.
- 3.2. Soudage par percussion.
- 3.3. Soudage par explosion.
- 3.4. Soudage par friction.
- 3.5. Soudage par ultrasons.

4. ÉNERGIE DE RADIATION.

- 4.1. Soudage au laser.
- 4.2. Soudage par infrarouge.
- 4.3. Soudage par image d'arc.
- 4.4. Soudage par faisceau d'électrons.

5. ÉNERGIE THERMIQUE NON SPÉCIFIÉE (1).

- 5.1. Soudage au fer à souder.
- 5.2. Soudage à la forge.
- 5.3. Soudage à l'air chaud (matières plastiques).
- 5.4. Soudage par éléments chauffants (matières plastiques).
- 5.5. Soudage par diffusion.

(1) avec apport éventuel d'énergie mécanique.

(2) le procédé pouvant comporter l'intervention d'une atmosphère active (par exemple gaz carbonique).

(3) le procédé pouvant comporter l'intervention d'un léger apport de flux incorporé au fil-électrode ou introduit sous toute autre forme.

(4) l'apport de chaleur étant essentiellement dû à l'effet joule.

Annexe II.2

**Durabilité des échantillons en acier XC42
avec différents types de rechargement**

Rep	Type de rechargement	Epais. mini (mm)	Résistance à la fatigue limite d'endurance		Résistance comparative à l'usure et %	
			x10MPa	%	Résistance	%
01	a/ Epreuve etalon en acier XC42 normalisé, non rechargé.	---	2,0 ÷ 2,5	100	100	1
	b/ Non rechargé + trempe courant HF.	---	4,5 ÷ 5,0	170 ÷ 200	250	2,5
Rechargement manuel à l'arc électrique:						
02	a/ YoNi 13/55	0,5	1,9	76 ÷ 87 92 ÷ 105 108 ÷ 128	210	2,1
	b/ OZn-300	0,5	2,3		160	1,6
	c/ LkZ-70	0,5	2,7		440	4,4
Rechargement automatique sous flux:						
03	flux AN 348 A:					
	a/ avec fil SV 08A	0,5	2,0	80 ÷ 90	110	1,1
	b/ avec fil 13Hg 2Cr	0,5	2,6	104 ÷ 118	120	1,2
04	Rechargement à électrode vibrante avec = régimes	---	---	30 ÷ 60	---	---
05	Chromage lisse	0,15	2,0	80 ÷ 90	600 ÷ 700	6 ÷ 7
06	Chromage poreux	0,15	1,8	72 ÷ 82	900 ÷ 1000	9 ÷ 10
07	Revêtement électrolytique aciérage	0,15	1,9	76 ÷ 87	60	0,6
08	Métalisation : préparation par grenailage	---	---	130	---	---

Recommandations paramètres d'usinage pour rechargement

Type de rechargement	Matériau de la partie active de l'outil	Paramètres géométriques de l'outil (angles de coupe) (°)							Régime de coupe				
		γ	ϕ	ϕ_1	α	λ	Rayon au sommet	V1 m/min	S1 mm/tr	P mm			
A électrode vibrante fil Hn-65Γ -fil Cb-08	Bk 6M												
	T15 K6	11	27÷28	14÷15	10	13	1	40	0,1				
	Bk-8 UM-332	-5 10	32 38	15	10 12	5 0	0,5	80 90	0,23 0,11				
A l'arc sous flux AM-384A fil 30XΓCA	T5K10	5	45	45	8	5	1						
	T5K10	-5	45	45	8	5	1						
Au gaz C ₀₂ avec refroidissement fil 30XΓCA	T5K10	5-10	25	15	8-10	0	1	47,5	0,3	0,6÷0,7			
	T15K6 T30K4	-3	30÷32	15	10	5		45 50	0,2 0,1	0,5			
Vilebrequins sous flux AM384A fil 30XΓCA	I3K6	-15	90	30	8	4	1						
	T30K4	0	60	30	5	-5	1,5						
Acierage tendre 250-290HV dur 480-520 HV	T30K4	0	45	30	5	15	1	20÷50	1÷1,2	0,2÷0,3			
	T30K4	0	45	30	5	15	1	20÷50	0,2÷0,3				

Recommandations paramètres d'usinage pour rechargement

Méthodes de rechargement	dureté du revêtement	Effort de repassage N	Rayon de l'outil à repasser mm	Avance mm/tr	Vitesse m/min	Angle d'inclinaison de l'outil (°)	Rugosité de surface Ra (µm)		microdureté	
							Avant	Après	Avant	Après
1/ A l'arc electrode vibrante fil Hm-65J	HRC, 51,5 : 59	460 580	4,9 4,0	0,07	54,5 50	32 33	1,0 ± 0,8	0,2 : 0,16	509,7	885
2/ fil Cb-08	HRC 8 35,39	290 500	4,4 3,7	0,11	66 63	30 39	1,6 : 1,25	0,2 : 0,16	341	572
3 Sous flux AH 348A allié par graphite et FeCr	HRC 6 54 : 58	470 580	4,8 4,0	0,07	50	34 33	1,0 : 0,8	0,16 : 0,125	547,8	946
4/ Sous flux céramique AHK 18	41,5 : 45	510 590	4,4 3,8	0,07	50	28 34	1,25 : 1,0	0,4 : 0,32	417,6	724
5/ Acierage dur	HV 520 : 560	510 670	4,6 3,7	0,07	44	27	1,0 ± 0,8	0,2 : 0,16	523,6	774
Acierage tendre	290 : 330	30,5	4,6	0,11	63	36	1,6 : 1,25	0,1 : 0,08	312,8	514

NB: Au numérateur- repassage
Au dénominateur- durcissement

Recommandations: Paramètre de rectification

Mode de revêtement de la surface	Nuance de la meule	Régime de la coupe			
		Vmeule m/s	Vpièce m/min	Profondeur P mm/passe	Avance longitudinale mm/tr
Rechargement à l'arc à électrode vibrante: Fil H: 65I	AC M25K6-100	30	20 ± 25	0,01 : 0,02	1 : 1,5
Fil C h 08 Rechargement sous flux:	b25CM2K	30	20 : 25	0,01 : 0,02	1 : 1,5
AK-348A allié au FeCr et Graphite. Acierage:	b25CM2K5	30	30	0,01	1,5 : 3
tendre HV: 250 : 290	b25CM2K b25CM2K	30	20 : 25	0,02 : 0,03 0,02 ± 0,03	1 : 1,5
dur HV: 480 : 520	ACM25K6-100	30	20 ± 25	0,01 ± 0,02	1 : 1,5

NB: Au numérateur: Ebauche
Au dénominateur: Finition

Tourage des surfaces rechargées:

a) dureté < 41,5 : 46 HRC_A : T15K6; T5K10; BK6; BK8.

b) dureté > 46 : 61,5 HRC_A (fil 30X1 CA: 65I ; IH 60M; BK 3M et BK 6M (λ négative).

Annexe .II.6A

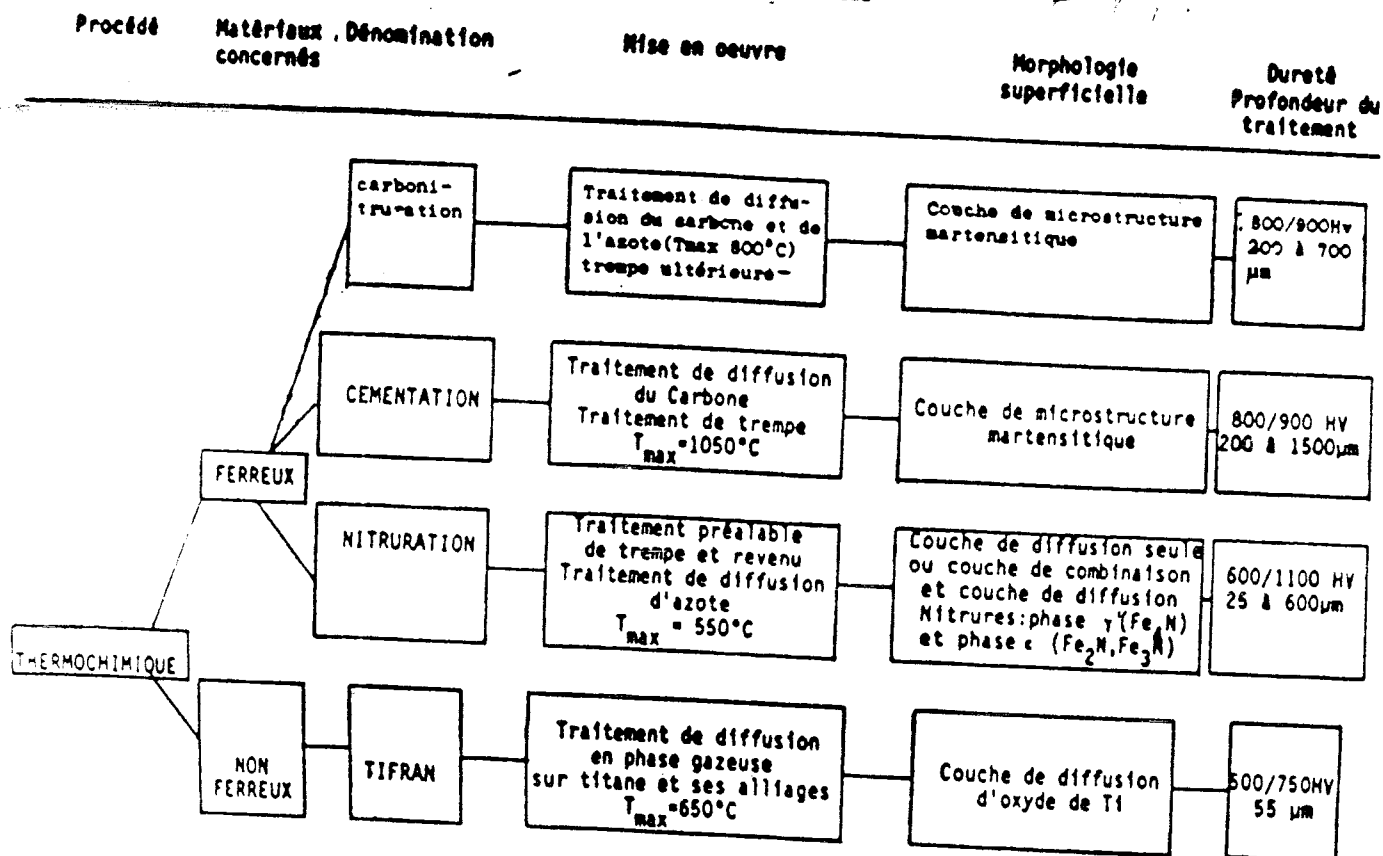


TABLEAU II

Annexe .II.6B

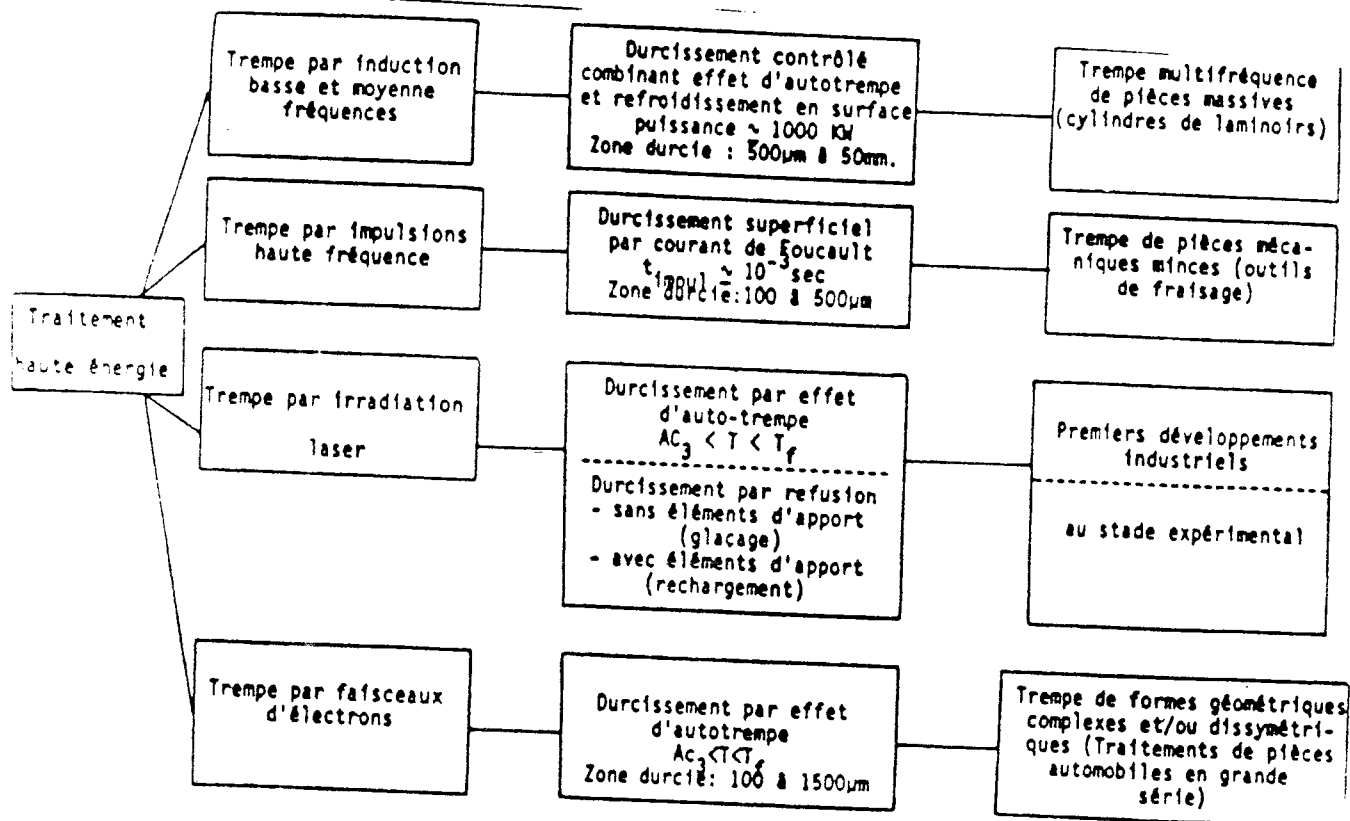
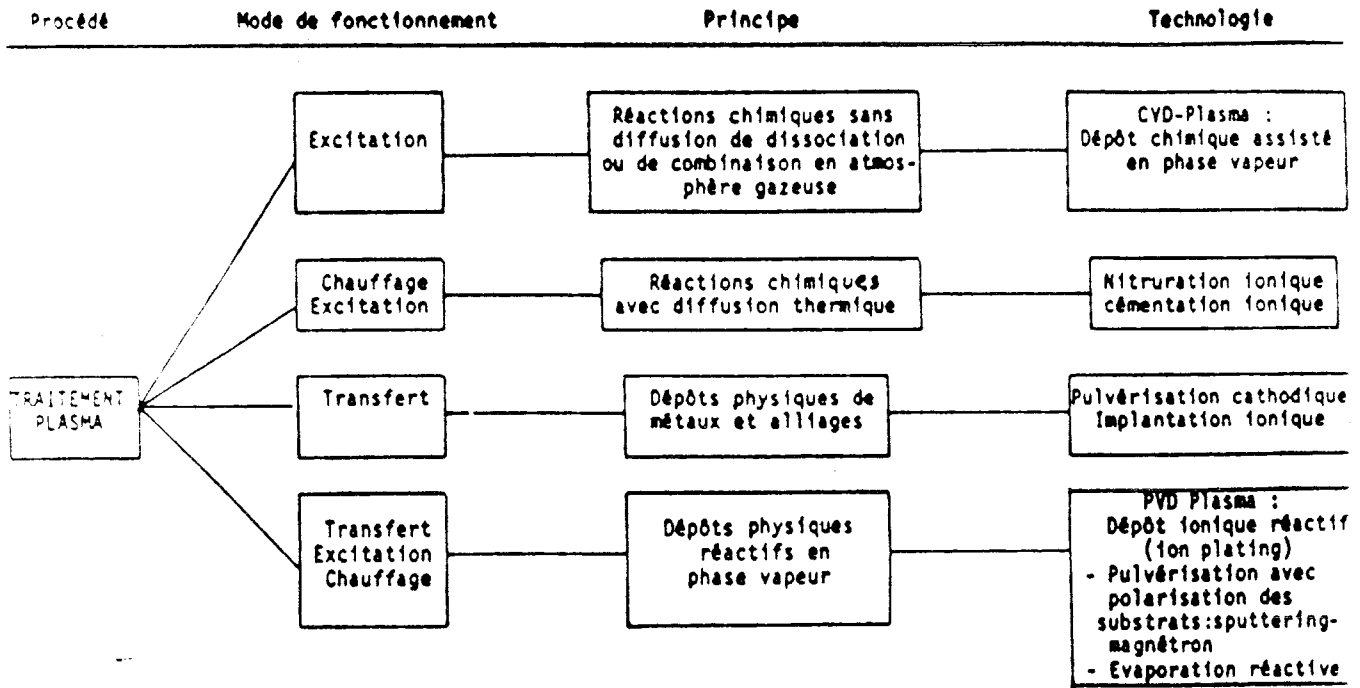


TABLEAU I

Annexe JL5C



Evolution de l'état de surface en fonction de la longueur

surface type NR

L=2861m L=5722m

DATE : 28.03.95
 NAME: ENIM
 OBJECT: ARBRE

*
 Mahr NO: 010
 T 1 RHTF 50

PROG: B2
 LT 17.50 MM
 LM 12.50 MM
 LC 2.50 MM

R PROFIL
 LC 2.50 MM
 VER 5.00 YM
 HOR 2500.0 YM

Perthen



Feinprüf
 RT 9.27 YM
 RN 7.00 YM
 RA 1.32 YM

perthograph

mikrograph

milligraph

 SNVI-CUI-ROUIBA
 DIR: TECHNIQUE
 DPT: CONTROLE
 SCE: METROLOGIE

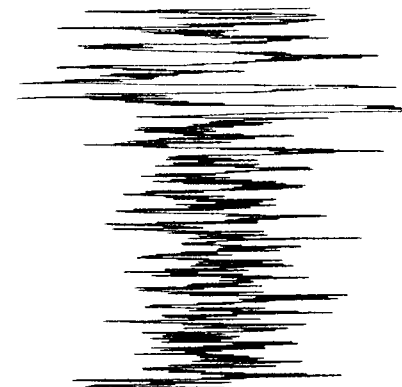
DATE : 28.03.95
 NAME: ENIM
 OBJECT: ARBRE

*
 NO: 008
 T 1 RHTF 50

PROG: B2
 LT 17.50 MM
 LM 12.50 MM
 LC 2.50 MM

R PROFIL
 LC 2.50 MM
 VER 5.00 YM
 HOR 2500.0 YM

Perthen



Mahr
 RT 31.4 YM
 RN 20.8 YM
 RA 5.35 YM

perth

mikrograph

milligraph

perthograph

Evolution de l'état de surface en fonction de la longueur

Surface type RB

L=2861m

L=5722m

DATE : 28. 03. 95
 NAME: ENIM
 OBJECT: ARBRE
 *
 NO: 013
 T 1 RHTF 50

Perthen
 PROG: B2
 LT 17.50 MM
 LM 12.50 MM
 LC 2.50 MM

makrograph

R PROFIL

LC 2.50 MM
 VER 5.00 VM
 HOR 2500.0 VM

Feinprüf



milligraph

BT 3.35 VM
 RZ 3.32 VM
 RA 0.41 VM

hr

graph

DATE : 28. 03. 95
 NAME: ENIM
 OBJECT: ARBRE
 *
 NO: 011
 T 1 RHTF 50

Mahr
 PROG: B2
 LT 17.50 MM
 LM 12.50 MM
 LC 2.50 MM

perthograph

R PROFIL

Perthen
 LC 2.50 MM
 VER 5.00 VM
 HOR 2500.0 VM

Feinprüf



milligraph

milligraph

BT 5.30 VM
 RZ 4.52 VM
 RA 0.55 VM