

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Université M'Hamed Bougara-Boumerdes**  
**Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie**



**Département Transport et Equipements des Hydrocarbures**

**Mémoire de fin d'études**  
**En vue de l'obtention du diplôme de**

**Master**

**Domaine** : Sciences et Technologies

**Filière** : Hydrocarbure

**Option** : Génie mécanique-Mécanique des chantiers pétroliers

Présenté par :

BOUMENKAR Soufiane

THEME

**Etude bibliographique du frottement et de l'usure des corps solides et étude technique des freins mécanique à bandes des treuils de forage pétrolier**

Soutenu publiquement le 30 / 06 / 2024

Devant le jury :

	Nom et Prénom	Grade	Université/Affiliation
Président de jury	BENBRIK Abderrahmane	Prof.	UMBB
Examinateur	GACEB Mohammed	Prof.	UMBB
Examinateur	SABER ELKHIER	M.A.B	UMBB
Encadreur	GUEBLI Abdelhamid	Docteur (ex M.C.B)	UMBB

Boumerdes 2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## Remerciement

Tout d'abord, merci à Dieu qui m'a généreusement comblé de ses bénédictions et m'a facilité le chemin jusqu'au bout.

Ensuite, je remercie mes chers parents pour leurs sacrifices, leur assistance morale et matérielle et leur soutien matériel, ainsi que mes chers frères et tous mes amis.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous les professeurs qui m'ont aidé tout au long de mes études universitaires, en particulier mon encadreur, M. GUEBLI Abdelhamid, qui m'a aidé tout au long de la rédaction de mon mémoire de fin d'études. Je tiens à le remercier pour ses conseils précieux et continus, sa patience, et ses encouragements, tout en appréciant beaucoup ses connaissances et son savoir.

Je n'oublie pas de saluer mes camarades de du groupe MACP 19, avec lesquels j'ai passé cinq belles années, qui se sont écoulées comme des heures.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## ملخص

الهدف من هذه الأطروحة هو إجراء بحث في المؤلفات حول الأسس النظرية والعملية للتلامس والاحتكاك وتآكل الأجسام الصلبة .

أولاً، ركز البحث الببليوغرافي في هذه الأطروحة على التعاريف والمفاهيم الأساسية المتعلقة بعلم التريبولوجي وموضوعات دراسته (التلامس والاحتكاك والتآكل والتشحيم للأجسام الصلبة - المواد وأجزاء الآلات) .

ثم، في الفصول الثلاثة الأولى، تم تطوير هذا البحث الببليوغرافي فيما يتعلق بالجوانب التالية: المعايير التي تحدد الاحتكاك والعمليات التي تصاحبه، وظاهرة الاحتكاك نفسها وتآكل الأجسام الصلبة .

وأخيراً، ركزت الرسالة على الدراسة الفنية لمكايح الأشرطة الميكانيكية لرافعات التنقيب عن النفط وحسابها الميكانيكي، مع الأخذ بعين الاعتبار الاحتكاك بين الحافات والوسادات لهذا النوع من المكايح .

**الكلمات المفتاحية:** تريبولوجي، الاحتكاك، التآكل، مكايح الشريط الميكانيكية.

## Résumé

Le but principal assigné à ce mémoire est la réalisation d'une recherche bibliographique concernant les fondements théoriques et pratiques du contact, du frottement et de l'usure des corps solides.

En premier lieu, dans ce mémoire, la recherche bibliographique a porté sur des définitions et notions de base concernant la tribologie et ces objets d'étude (contact, frottement, usure et lubrification des corps solides-matériaux et pièces de machines).

Puis, dans les trois premiers chapitres, cette recherche bibliographique a été développée concernant les aspects suivants : les paramètres déterminant le frottement et les processus qui l'accompagnent, le phénomène de frottement proprement dit et l'usure des corps solides.

Enfin, le mémoire de fin d'étude a porté principalement sur l'étude technique des freins mécaniques à bandes des treuils de forage pétrolier et leur calcul mécanique, tenant compte du frottement entre les jantes et les patins de ce type de frein.

**Mots clés :** Tribologie, Frottement, Usure, Freins mécaniques à bands.

## Abstract

The objective of this thesis is to carry out bibliographical research into the theoretical and practical foundations of contact, friction and wear of solid bodies.

Firstly, in this thesis, the bibliographical research focused on definitions and basic notions concerning tribology and its objects of study (contact, friction, wear and lubrication of solid bodies-materials and machine parts).

Then, in the first three chapters, this bibliographical research was developed with regard to the following aspects: the parameters determining friction and the processes that accompany it, the phenomenon of friction itself and the wear of solid bodies.

Finally, the thesis focused on the technical study of mechanical band brakes for oil drilling winches and its mechanical calculation, taking into account the friction between the rims and pads of this type of brake.

**Keywords:** Tribology, Friction, Wear, Mechanical band brakes.

## Table des matières

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 : DEFINITIONS ET NOTIONS FONDAMENTALES DE LA TRIBOLOGIE</b>	
INTRODUCTION.....	4
1.1. DEFINITIONS ET NOTIONS DE BASE RELATIVES A LA TRIBOLOGIE .....	4
1.2. ELEMENTS D'ANALYSE DES SYSTEMES TRIBOLOGIQUES .....	5
1.3. ETAT DES SURFACES DES CORPS SOLIDES.....	7
1.3.1. Structure et Propriétés physico-mécaniques et physico-chimiques des couches superficielles des corps solides .....	9
1.3.2. Etat geometrique (macro et micro geometrie) des surfaces des corps solides et ses parametres (caracteristiques).....	14
1.4. CONTACT DES CORPS SOLIDES (PIECES DE MACHINES) .....	22
1.4.1. Modes de contact des corps solides .....	22
1.4.2. Aires de contact des corps solides .....	22
1.4.3. Pressions de contact des corps solides .....	24
1.5. TYPES DE CONTACT EN FONCTION DU DEGRE DE SATURATION DU CONTACT ET DU TYPE DE DEFORMATION .....	25
<b>CHAPITRE 2 : FROTTEMENT DES CORPS SOLIDES .....</b>	
INTRODUCTION.....	29
2.1. GENERALITES SUR LE FROTTEMENT .....	29
2.1.1. Définition et importance du frottement .....	29
2.1.2. Types de frottement.....	30
2.2. LOIS ET CARACTERISTIQUES DU FROTTEMENT EXTERNE.....	33
2.2.1. Lois et caractéristiques du frottement de glissement sec (et onctueux) .....	33
2.2.2. Lois et caractéristiques du frottement de roulement .....	36
2.2.3. Valeurs types du coefficient de frottement (facteur de frottement) .....	36
2.3. MECANISME DU FROTTEMENT ENTRE SURFACES METALLIQUES.....	38
2.3.1. Surface réelle de contact .....	38
2.3.2. Déformation des aspérités .....	38
2.3.3. Nature du frottement solide.....	39
2.4. FACTEURS INFLUENÇANT LE FROTTEMENT .....	40
2.4.1. La nature des corps en contact .....	40
2.4.2. L'état de surface résultant du procédé de fabrication .....	40
2.4.3. Le procédé et le degré de lubrification.....	40

2.5.	VOIX DE DIMINUTION DU COEFFICIENT DE FROTTEMENT .....	41
	CONCLUSIONS .....	41
	<b>CHAPITRE 3 : USURE DES CORPS SOLIDES .....</b>	
	INTRODUCTION.....	43
3.1.	DEFINITION ET SIGNIFICATION DE L'USURE.....	43
3.2.	MECANISMES ET TYPES D'USURE .....	44
3.2.1.	Mécanismes de l'usure.....	44
3.2.2.	Types d'usure.....	46
3.3.	PHASES D'USURE DES PIECES DE FROTTEMENT DE MACHINES.....	49
3.3.1.	La phase de rodage.....	49
3.3.2.	La phase de marche normale.....	50
3.3.3.	La phase de vieillissement .....	50
3.4.	CARACTERISTIQUES DE L'USURE.....	50
3.4.1.	La vitesse d'usure .....	51
3.4.2.	Les intensités intégrales d'usure .....	51
3.4.3.	La résistance à l'usure (tenue à l'usure).....	52
3.4.4.	Caractéristiques opérationnelles d'évaluation de l'usure.....	54
3.5.	INFLUENCE DE DIVERS FACTEURS SUR LE COEFFICIENT DE FROTTEMENT ET L'INTENSITE D'USURE .....	54
3.5.1.	La température.....	54
3.5.2.	La charge .....	55
3.5.4.	Gradient des propriétés mécaniques et paramètres de construction .....	58
3.5.5.	Les matériaux lubrifiants [MIK 77].....	59
3.6.	VOIES ET MOYENS DE REDUCTION DE L'USURE DES MATERIAUX .....	61
3.6.1.	Utilisation des propriétés protectrices des films d'oxydes.....	61
3.6.2.	Le choix des matériaux du couple de frottement .....	63
3.6.3.	Séparation des surfaces de frottement par des pellicules de polymères (téflon, polyamides et autres) .....	64
3.6.4.	Autres moyens de lutte contre le frottement et l'usure tenant compte des conditions d'exploitation des éléments de machines .....	65
3.7.	L'USURE ET DIFFERENTES FORMES DE MAINTENANCES .....	69
	CONCLUSION .....	70
	<b>CHAPITRE 4 : ETUDE DU FROTTEMENT ET DE L'USURE DES FREINS MECANIQUES A BANDES DES TREUILS DE FORAGE PETROLIER.....</b>	
	INTRODUCTION.....	71
4.1.	APERÇU SUR LE TREUIL DE FORAGE ET SES COMPOSANTS .....	71

4.1.1. Généralités sur le treuil de forage .....	71
4.1.2. Présentation de l'ensemble arbre - tambour de manœuvre et d'autres éléments tournants du treuil de forage .....	73
<b>4.2. DESCRIPTION GENERALE DES FREINS MECANQUES PRINCIPAUX DU TREUIL DE FORAGE .....</b>	<b>75</b>
<b>4.3. ETUDE MECANIQUE DU FREIN MECANIQUE A BANDES D'UN TREUIL DE FORAGE.....</b>	<b>79</b>
4.3.1. Moments et forces agissants sur le frein mécanique à bandes au cours du freinage .....	79
4.3.2. Variations de la pression de contact entre les patins et les jantes .....	84
4.3.3. Transformation de l'énergie dans le frein mécanique à bande .....	85
<b>4.4. USURE ET ENTRETIEN GENERAL DES FREINS MECANIQUE A BANDE .....</b>	<b>86</b>
<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>88</b>
<b>CONCLUSIONS GENERALES .....</b>	<b>90</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>.....</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>.....</b>

## Liste des figures

Fig 1.1. Schéma d'un contact tribologique .....	5
Fig 1.2 Déformation des matériaux dans le cas d'enfoncement du poinçon sphérique .....	10
Fig 1.3 Couches superficielles d'un corps solide métallique .....	11
Fig 1.4 : Variation de la micro-dureté suivant la profondeur .....	13
Fig 1.5. Schéma de la géométrie de la surface d'un corps solide . .....	15
Fig 1.6 : Profil de surface .....	17
Fig 1.7 : Schéma en vue de calcul du rayon de courbure d'une aspérité .....	20
Fig 1.8 : Courbe de la surface d'appui (surface portante) . .....	21
Fig I.9 : modèle mécanique de contact de deux corps solides ayant des surfaces planes rugueuses au cours du frottement .....	22
Fig.1.10 : Schéma d'interaction d'une aspérité avec le corps antagoniste plus dur.....	24
Fig 1.11 : Schéma de contact d'aspérités de différentes dimensions .....	26
Fig 1.12 : Schéma de contact des aspérités dans le cas de pénétration .....	27
Fig 1.13 : Schéma de contact d'une surface rugueuse avec une surface lisse . .....	27
Fig 2.1: Schéma de frottement (dans le cas de glissement) de corps solides .....	29
Fig 2.2 Schémas de frottement immédiat (a) et de frottement médiat (b).....	31
Fig 2.3 : Frottement médiat .....	32
Fig 2.4 : Variation de la force de frottement T en fonction du déplacement X . .....	35
Fig 2.5 : Déformation plastique des aspérités .....	39
Fig 3.1 : Types d'interaction des surfaces de frottement . .....	44
Fig 3.2 : Allure de la courbe d'usure en fonction de temps .....	49
Fig 3.3 : Schémas d'usure .....	50
Fig 3.4 Influence de la charge N sur l'intensité d'usure linéaire unitaire $i_h$ de différents matériaux (contact de matériaux de même nuance) : .....	62
Fig 3.5 schémas de développement de l'effritement de surface sur le chemin de roulement .	62
Fig.4.1 Schéma de construction du treuil de forage Oil Well 840 E.....	73
Fig 4.2 : Ensemble arbre- tambour et d'autres éléments du treuil OIL WELL 840 E .....	74
Fig. 4.3 vue générale d'un frein mécanique à bande d'un treuil de forage .....	76
fig.4.4 : schémas de freins à bandes de forage : .....	77
Fig.4.5 : Schéma de calcul des forces agissantes sur les éléments du frein .....	81
Fig.4.6 : Caractéristiques de différents types de freins .....	83
fig.4.7 Efforts sur un élément de bande .....	84

fig.4.7 Efforts sur un élément de bande .....	83
Fig.4.8 Distribution de pression de contact la surface de frottement .....	85

## Liste des Tableaux

Tableau I.1. Eléments de description d'une situation tribologique et de son évolution en cours de fonctionnement.....	7
Tableau II.1. Quelques valeurs du coefficient de frottement de roulement avec et sans influence de la lubrification.....	36
Tableau II.2. Valeurs du coefficient de frottement en fonction des matériaux et de l'état des surfaces des corps en contact.....	37

## INTRODUCTION GENERALE

Dans beaucoup d'ouvrages consacrés aux éléments de machines [DOB 71, NIC 86, IOC 88 et autres], on affirme d'une manière ou d'une autre, qu'au cours de l'élaboration des projets de construction (conception, calculs de dimensionnement, essais et fabrication de prototypes) des machines, équipements et appareils on doit prendre toutes les dispositions nécessaires et suffisantes pour satisfaire aux diverses exigences assignées à ces dispositifs (aptitude au travail, fiabilité, durabilité, aptitude à la fabrication, etc.). A cette fin tous les éléments (pièces) de ces équipements doivent satisfaire aux divers critères (indicateurs ou propriétés) assurant ces exigences. Parmi les principaux critères d'aptitude au travail, fiabilité et durabilité, que doivent satisfaire tous les éléments de machines on rapporte, en premier lieu, la résistance (volumique et superficielle) et la rigidité nécessaires et suffisantes. Certains éléments doivent satisfaire aussi, en fonction de leurs conditions de travail, aux critères de résistance à l'usure, tenue aux vibrations, à la chaleur, et autres. Pour satisfaire à ces critères, il est nécessaire d'effectuer à différentes étapes de la construction (projet, essais de prototypes, fabrication) des équipements des calculs appropriés de résistance (volumique et superficielle), rigidité, etc, des éléments. Ces exigences s'appliquent aussi aux machines et équipements pétroliers qui doivent posséder de hautes performances [GUE 23].

Le choix, la mise en œuvre et le contrôle des éléments de machines, introduits dans la réalisation d'un mécanisme, font appel à plusieurs connaissances professionnelles de l'ingénieur, en particulier aux principes de la mécanique des corps solides, aux propriétés technologiques des matières, aux applications des théories de la résistance des matériaux, de l'élasticité, de la mécanique des fluides, de la thermodynamique, de l'électricité sans oublier les problèmes de fabrication des pièces ou les conditions de montage. La synthèse de ces notions permet généralement de trouver des solutions acceptables sous une forme rationnelle et surtout économique. L'évolution actuelle des méthodes d'investigation, tant théorique que pratique, tend à augmenter les connaissances sur les divers facteurs influençant directement les sollicitations, le comportement et la durée de vie des éléments de machines. La précision des résultats s'améliore constamment en introduisant les interactions entre toutes les pièces composantes et les parties annexes [NIC 86]. Les problèmes tribologiques interviennent pratiquement dans tous les éléments de machines, les théories et les méthodes complémentaires de contrôle. Ces notions complètent celles de toutes les branches citées précédemment en particulier la mécanique des corps solides et la résistance des matériaux classique. La tribologie comprend l'étude du contact de corps solides compte tenu des frottements, des déformations et de l'usure des composants [NIC 86].

La tribologie est la science du frottement et des processus qui l'accompagnent. La tribologie en tant que discipline scientifique englobe les études théoriques et expérimentales des processus physiques (mécaniques, électriques, magnétiques, thermiques), chimiques, biologiques et autres, liés au frottement [KHE 89].

Il est évident que le contact des corps, ainsi que le frottement et l'usure de ces corps ont existé et se sont manifesté depuis la genèse de l'univers. L'historique de la tribologie montre que les termes de frottement, d'usure étaient connus depuis l'antiquité, cependant la tribologie

n'a acquis sa spécificité qu'au cours du 20ème siècle. Grâce à d'imminents savants et chercheurs, la tribologie a connu un grand essor pendant le 20ème siècle, et beaucoup d'autres spécialistes et chercheurs continuent le développement de cette discipline et ses composantes (la tribotechnique, la tribométrie et autres) pendant ces premières décennies du 21ème siècle.

Le frottement externe des corps solides est un phénomène très important et complexe de la nature. C'est le phénomène de résistance au déplacement relatif de deux corps solides en contact. Suivant les situations, le frottement peut être utile ou nuisible. En effet sans le frottement nous ne pourrions pas marcher, nous n'aurons aucun moyen de transport et rien ne s'opposerait à la force centrifuge ; d'autre part on estime que 10 à 30 % des ressources énergétiques mondiales sont perdues au travail lié au frottement [GRA 08].

Le phénomène d'usure est le processus de destruction et détachement du matériau de la surface d'un corps solide pendant le frottement et/ou l'augmentation de sa déformation permanente, se manifestant à travers le changement progressif des dimensions et/ou de la forme de ce corps. Le phénomène d'usure, ou son résultat (l'usure) est l'une des conséquences du frottement. On estime que 2/3 des défaillances dans le domaine de l'industrie mécanique sont dues à l'usure [GRA 08].

La lubrification est l'action du matériau lubrifiant, dont le résultat est la réduction de l'usure, de la dégradation des surfaces et de la force de frottement.

Ainsi on peut affirmer que le frottement détermine le rendement, la fiabilité et la durabilité des machines. Pour cela la résolution des problèmes de réduction du frottement et de l'usure dans les liaisons mobiles des machines est une tâche d'actualité. Dans certains cas on cherche l'augmentation du frottement, au niveau des freins par exemple. Cependant la résolution des problèmes cités exige des ingénieurs et des chercheurs des connaissances complexes et interdépendantes sur les fondements théoriques du contact, du frottement, de l'usure et de La lubrification (graissage) ; sur les méthodes d'ingénieurs de calcul et d'essais des matériaux tribotechniques et des liaisons de frottement, l'élaboration des matériaux de construction et des lubrifiants efficaces pour ces liaisons, ainsi que de nouveaux principes de leurs conception et fabrication [GRA 08].

Tenant compte de ces affirmations et de beaucoup d'autres affirmations similaires contenues dans les divers ouvrages cités comme références, mais surtout des acquis actuels concernant l'approche des problèmes tribologiques, on peut affirmer que les ingénieurs et les chercheurs en génie mécanique doivent acquérir, entre autres, un minimum de connaissances sur les fondements théoriques et pratiques du contact, du frottement, de l'usure et du graissage afin d'aborder la résolution rationnelle des problèmes tribologiques.

Ainsi, tenant compte de cette dernière exigence, mais aussi du volume recommandé à un MFE de Master, en accord avec le promoteur, nous avons fixé comme but principal de ce mémoire la réalisation d'une recherche bibliographique concernant les fondements théoriques et pratiques du contact, du frottement et de l'usure des corps solides, qui sera suivie par l'étude de cas du frottement et de l'usure des freins mécaniques à bande des treuils de forage pétrolier.

La structure de ce MFE comprend principalement les 4 chapitres suivants :

Chapitre 1 : Définitions et notions fondamentales de la tribologie

Chapitre 2 : Frottement des corps solides

Chapitre 3 : Usure des corps solides

Chapitre 4 : Etude du frottement et de l'usure des freins mécaniques à bands des treuils de forage pétrolier

**CHAPITRE 01**  
**DEFINITIONS ET NOTIONS FONDAMENTALES**  
**DE LA TRIBOLOGIE**

### INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons considérer quelques définitions et notions de base de la tribologie qui vont nous servir d'introduction pour passer à l'étude du frottement et de l'usure des corps solides (matériaux, pièces de machines) faisant l'objet de ce mémoire. Ensuite, en particulier nous allons considérer l'état des surfaces des corps solides (pièces de machines, échantillons des matériaux de construction), qui est un facteur influant sensiblement sur le contact, le frottement et l'usure de ces corps. En outre nous allons considérer quelques notions de base relatives au contact des corps solides, qui a un grand rapport avec le frottement et l'usure de ces corps.

#### 1.1. DEFINITIONS ET NOTIONS DE BASE RELATIVES A LA TRIBOLOGIE

On rencontre diverses définitions relatives à la tribologie et à ses objets d'étude. Nous allons citer quelques-unes de ces définitions, qui ne sont pas normalisées, mais qu'on rencontre dans différents ouvrages et documents.

**La tribologie** est la science du frottement et des processus qui l'accompagnent. La tribologie en tant que discipline scientifique englobe les études théoriques et expérimentales des processus physiques (mécaniques, électriques, magnétiques, thermiques), chimiques, biologiques et autres, liés au frottement [KHE89].

**La tribologie** est la discipline regroupant les sciences et technologies qui s'intéressent aux interactions entre surfaces en contact, à leurs causes, à leurs effets et aux moyens de les amplifier ou de les réduire. La tribologie traite les problèmes de contact, de frottement, d'usure et de lubrification [GRAS 08].

**La tribotechnique** représente la science d'application de la tribologie lors de la conception, la fabrication et l'exploitation des systèmes tribologiques. L'utilisation des connaissances sur le processus d'usure représente une partie importante de la tribotechnique [KHE 89].

##### Notion de contact tribologique

Dans le cas le plus général, un contact tribologique est composé de 4 éléments principaux (fig. 1.1) :

- Les 2 premiers solides soumis à des torseurs dynamique (forces et moments) et cinématique (vitesse), limités par des couches superficielles à caractéristiques spécifiques (souvent mal définies tant des points de vue géométriques que physico-chimiques), et qui évoluent en cours de fonctionnement :
- Le milieu inter-facial ou 3ème corps ;
- L'environnement (milieu ambiant).

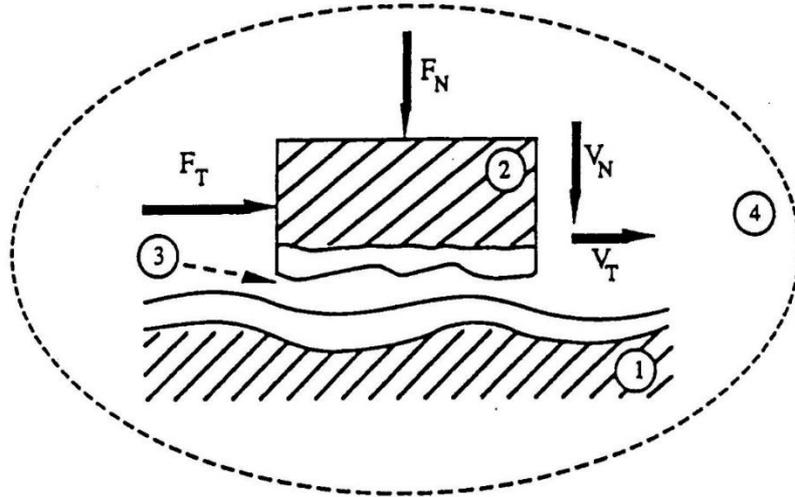


Fig 1.1. Schéma d'un contact tribologique [GRA 08]

### Notion de frottement des corps solides

C'est le phénomène de résistance au déplacement relatif de deux corps solides en contact.

Le frottement des corps solides est un phénomène très important et complexe de la nature.

### Notion de L'usure des corps solides

L'usure des corps solides est le phénomène (le processus) de destruction et détachement du matériau de la surface d'un corps solide pendant le frottement et/ou l'augmentation de sa déformation permanente, se manifestant à travers le changement progressif des dimensions et/ou de la forme. Le phénomène d'usure est l'une des conséquences du frottement.

### Notion de système tribologique

Un système tribologique ou "tribosystème" est un ensemble composé d'éléments en interaction statique ou dynamique organisé en fonction d'un but : transmission d'énergie, étanchéité dynamique ou statique, freinage, guidage, etc. [CZI 78]...

## 1.2. ELEMENTS D'ANALYSE DES SYSTEMES TRIBOLOGIQUES

L'univers de la tribologie est très vaste, les situations tribologiques sont extrêmement variées. On ne dispose pas, à l'heure actuelle, de théorie générale prenant en compte cette variété des situations, la complexité des problèmes, la multiplicité des paramètres qui interviennent et dont l'influence variable est régie le plus souvent par des lois non linéaires.

Pour faire face à la multiplicité des situations et des paramètres, il est utile de se fixer un cadre d'analyse qui permettent de s'assurer de la prise en compte des facteurs les plus critiques [GRA 08].

L'analyse tribologique des systèmes, décrite ci-après [GRA 08], a été élaborée afin d'atteindre la connaissance la plus précise possible des paramètres caractérisant un tribosystème en adoptant la démarche suivante :

- 1 - Identification des différents contacts qui interviennent dans le mécanisme.
- 2 - Extraction, pour chacun des contacts, des paramètres fonctionnels ou variables opérationnelles. Ces paramètres seront quantifiés ou évalués de la manière la plus précise possible. Au cours du fonctionnement, ces paramètres sont en général affectés par des facteurs d'influence qui peuvent complètement modifier les valeurs initiales. Il sera donc nécessaire d'une part d'identifier ces facteurs (par exemple, évolution de la température, présence d'humidité, de courants ou de charges électriques, de vibrations, ...), et d'autre part d'évaluer l'intensité de leur influence.
- 3 - Identification des effets résultants générés par le fonctionnement et évaluation de leur influence sur le contact. On appréciera notamment dans quelle mesure ces effets peuvent modifier les paramètres d'entrée, car un système tribologique est un système bouclé dans lequel les paramètres de sortie interagissent fortement sur les paramètres d'entrée. Un échauffement peut en effet conduire à des dilatations différentielles et à une réduction des jeux fonctionnels dans un glissement sec ; il engendrera une perte de viscosité du lubrifiant en situation lubrifiée... cette phase correspond à la phase d'analyse des modes de défaillance et de leur criticité, pratiquée classiquement en qualité.
- 4 - Détection des processus physiques ou physico-chimiques qui peuvent se produire dans le contact et conduire à l'endommagement des surfaces. Il s'agit d'une phase fondamentale car elle est déterminante dans les orientations du choix des matériaux constitutifs des surfaces du contact.

Un tribosystème se caractérise par un ou plusieurs contacts, par lesquels transiteront les efforts, la chaleur, éventuellement l'électricité, et qui devront accommoder les gradients ou variations de vitesse entre deux composants.

À la base d'un système tribologique, on trouve le contact. Dans le cas le plus général, un contact tribologique est composé de quatre éléments principaux ; c'est le quadruplet tribologique [GRA 08] (voir figure 1.1).

Définir une situation tribologique consiste à présenter les principaux éléments qui la décrivent, les effets qu'ils peuvent produire et préciser les principaux modes d'usure conduisant à l'endommagement des surfaces (voir tableau I.1).

Pour décrire une situation tribologique et son évolution en cours de fonctionnement, on peut s'appuyer sur un ensemble de paramètres présentés dans le tableau I.1, où sont regroupés les éléments principaux caractérisant cette situation [GRA 08].

**Tableau I.1** - Eléments de description d'une situation tribologique et de son évolution en cours de fonctionnement [PIE 64].

Variables opérationnelles	Phénomènes observés	Mécanismes d'endommagement
Mode de contact	Résistance au déplacement	Adhésion
État de surface	Vibrations	Abrasion
Torseur dynamique	Phénomènes thermiques	Érosion (cavitation)
Torseur cinématique	Transformations superficielles	Déformation
Ambiance (avec lubrification, température)	Transformations structurales	Fatigue de contact (Fretting-fatigue)
Matériaux	Perte de matière	Corrosion (tribocorrosion)

**La première colonne** du tableau précédent comprend les paramètres principaux, ou variables opérationnelles, définissant la situation tribologique initiale. Ils précisent les conditions initiales de l'expérimentation ou de l'utilisation.

**La deuxième colonne** regroupe les phénomènes les plus communément observés, décrits et commentés dans la littérature spécialisée, qui peuvent se manifester lors du fonctionnement et éventuellement modifier rapidement les conditions initiales.

**La troisième colonne** comprend les processus mécaniques ou physico-chimiques les plus couramment admis qui peuvent conduire à l'endommagement des surfaces.

Ces processus sont regroupés en six familles fondamentales, chacune pouvant être reliée à un mécanisme de base qui est à l'origine de l'endommagement. Il existe des variantes ou subdivisions de ces grandes familles qui font l'objet de noms spécifiques, mais qui le plus souvent peuvent se résoudre à partir de ces mécanismes de bases.

Tous ces éléments d'analyse d'un système tribologique, cités dans le tableau précédant seront considérés à fur et à mesure du développement de ce mémoire. Mais, en particulier nous allons considérer avec plus de détails l'état des surfaces et le contact des corps solides qui sont des facteurs influant sensiblement sur le frottement et l'usure de ces corps.

### 1.3. ETAT DES SURFACES DES CORPS SOLIDES

Selon d'innombrables références, l'état des surfaces des corps solides (échantillons des matériaux, pièces de machines) est l'un des principaux facteurs déterminant les interactions de ces corps en contact au cours du frottement externe et de l'usure.

La surface d'un corps solide peut être définie comme étant la partie extérieure servant d'interface entre le volume et l'environnement. La surface d'un corps solide (pièce) concerne toute l'épaisseur du matériau où les effets des sollicitations externes se font sentir. Cette épaisseur se divise en plusieurs couches superficielles relativement minces, possédant des propriétés différentes des propriétés analogues du matériau de base.

Le terme état de surface d'un corps englobe :

- L'état physico-mécanique et chimique de la surface, déterminé par les propriétés physiques, chimiques, mécaniques des couches superficielles ;
- L'état géométrique de la surface, caractérisé par les écarts entre la forme géométrique réelle du corps et la forme géométrique idéale donnée par le dessin de définition.

Pour comprendre la nature physique de l'interaction des corps solides lors du frottement externe et de l'usure, il faut avoir une bonne conception sur les propriétés physiques, chimiques, mécaniques et géométriques de ces surfaces (de ces couches superficielles). Ces propriétés dépendent dans une large mesure de la nature des corps solides, des processus physico-chimiques se déroulant dans les couches superficielles et du procédé de traitement des surfaces de ces corps [KRA 84].

L'interaction des corps solides lors du frottement externe se localise dans des couches superficielles et sous-jacentes très minces. Les propriétés physico-mécaniques et chimiques de ces couches, exercent une influence sensible sur l'interaction des corps solides lors du frottement externe et leur usure. Ces propriétés sont différentes des propriétés analogues du matériau de base. Cette distinction est conditionnée par l'excès d'énergie potentielle dans les couches superficielles c'est-à-dire par l'énergie superficielle (de surface) et les liaisons non compensées des atomes (molécule, ions), disposés dans ces couches, les changements, se déroulant dans les couches superficielles pendant le processus de traitement mécanique des corps solides, ainsi qu'à la suite de frottement [KRA 84].

Entre les particules du corps solide (atomes, molécules, ions) agissent des forces d'attraction et de répulsion. Sous l'action de ces forces à l'intérieur du corps solide une particule occupe la position, pour laquelle leur composante est nulle. Par conséquent, la particule est maintenue dans une position déterminée par les forces des liaisons de la part des particules voisines. Dans les couches superficielles ces liaisons ne sont pas compensées, et la structure de ces couches s'avérant déformées par suite de l'asymétrie d'action des forces inter atomiques et intermoléculaires.

L'interaction des corps solides pendant le frottement externe et leur usure dépend de la qualité des surfaces de ces corps. Par qualité de surface on entend l'ensemble des caractéristiques mécaniques, chimiques, physiques, et géométriques des couches superficielles déterminant leur état de surface. Considérons ces propriétés.

### 1.3.1. Structure et Propriétés physico-mécaniques et physico-chimiques des couches superficielles des corps solides

Les particules se trouvant sur les surfaces des corps possèdent une énergie potentielle excédentaire et créent un champ électromagnétique périodiquement variable. Ce champ retient sur la surface des corps les molécules de gaz, vapeur d'eau et d'autres substances se trouvant à proximité (aux abords). Ainsi la couche superficielle des corps solides possède une forte capacité d'adsorption, ceci conduit au fait, que dans les conditions habituelles la surface d'un corps solide est toujours couverte par une couche adsorbée ayant une structure complexe comprenant des molécules de gaz, des vapeurs d'eau et autres substances adsorbées.

Ainsi les surfaces des corps solides en présence de milieu ambiant sont couvertes par différentes pellicules, et dans les zones de contact réel l'interaction se déroule non pas entre les corps solides mais entre les pellicules qui les couvrent.

Le traitement mécanique des surfaces influe sensiblement sur les propriétés des couches superficielles. L'exécution des pièces mécaniques peut être réalisée soit par formage ou bien par enlèvement de matière (usinage).

Le formage pris dans le sens générale (étirage, extrusion, frittage, etc.) permet d'orienter convenablement les fibres du métal par rapport à la direction des contraintes et permet d'avoir un bon état de surface, avec un réseau cristallin pratiquement intact. On peut ainsi réaliser les conditions optimales de résistance à la fatigue et à l'usure, ainsi que les jeux calculés, néanmoins des progrès demeurant à faire quant à la précision finale. Souvent le formage doit être complété par un enlèvement de matière limité au minimum possible.

L'usinage ou l'enlèvement de matière par arrachement à l'aide d'un outil de coupe ou des grains abrasifs, provoque la déformation plastique de la couche superficielle, ce qui conduit avec l'influence du milieu ambiant à ce que dans cette couche on remarque : la diminution de la densité et l'apparition de déformations résiduelles, l'augmentation de la densité des dislocations, la formation de textures, l'apparition de fissures à l'intérieur des grains et leur fragmentation et l'augmentation de la température provoquant une intensification des phénomènes de diffusion. Par conséquent la résistance mécanique et la micro dureté des couches superficielles augmentent par rapport aux couches sous-jacentes.

Par suite du traitement mécanique dans les couches superficielles naissent des macro et micro-contraintes. La valeur et le sens (compression ou traction) des micro-contraintes dépend des procédés et des régimes d'usinage, des systèmes technologiques d'usinage, de la qualité des outils, ainsi que des procédés de traitement préalable.

La fragmentation (la destruction) de la couche superficielle, observée par suite de certains processus de traitement mécanique, facilite la pénétration des molécules du milieu ambiant dans cette couche, ce qui crée les conditions pour l'apparition de l'effet de REBINDER, qui s'explique comme suit. Pénétrant par les microfissures dans les couches superficielles et s'adsorbant sur leurs parois, les molécules des substances tensioactives diminuent l'énergie superficielle, ce qui facilite la destruction des couches superficielles. En

outre, la pénétration des substances corrosivement actives dans les fissures peut provoquer des processus, analogues par leur nature aux processus de corrosion sous contraintes (fretting-corrosion). La présence de ces processus peut sensiblement intensifier l'usure des corps solides.

D'importantes variations des propriétés des couches superficielles apparaissent à cause du frottement, lorsqu'il se déroule une intense déformation de ces couches, qui est d'autant plus grande lorsque la température résultant du frottement est plus élevée. En outre, le frottement externe accélère les processus physico-chimiques d'interaction du milieu ambiant avec les surfaces des corps solides.

L'épaisseur des couches superficielles qui subissent un changement pendant le frottement, dépend de l'état de contraintes dans leurs zones de contact réel et de l'échauffement pendant le processus de frottement. L'état de contraintes dans la zone de contact réel se caractérise par la pénétration ou le matage des aspérités (irrégularités microscopiques) des surfaces, ainsi que par les déformations élastiques et plastiques de ces dernières. L'échauffement des surfaces lors du frottement dépend des propriétés thermo-physiques des corps en contact et du régime de frottement.

De la résolution des problèmes de la théorie d'élasticité s'ensuit, que la déformation s'observe fondamentalement dans la couche sous l'étampe d'une épaisseur d'environ 1.5 du diamètre de la tache de contact. Pendant le glissement, sous l'étampe apparaissent des contraintes de traction, qui s'atténuent à une distance de quelque fois le diamètre de la tache de contact. Cependant l'épaisseur de la couche sous-jacente affectée par la déformation est beaucoup plus petite que sous l'action des contraintes normales dans la zone de contact [KRA 84].

En cas de déformations plastiques dans les zones de contact, en absence de glissement, l'état de contraintes correspond pratiquement à l'état de contraintes qui apparaît en cas de pénétration du poinçon (pénétrateur) sphérique. La pénétration de ce dernier provoque l'apparition d'une déformation plastique dans les couches superficielles (fig.1.2) dépendant de la charge normale agissant sur le pénétrateur, de la dureté du matériau (HB) et du rayon du pénétrateur (R) [KRA 84].

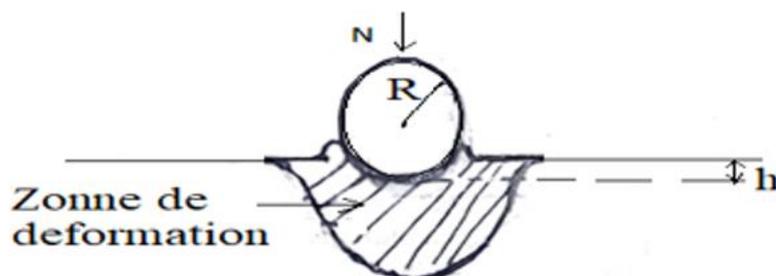


Fig 1.2 Déformation des matériaux dans le cas d'enfoncement du poinçon sphérique

Les déformations plastiques dans les zones de contact des corps solides s'observent habituellement pour les surfaces, dont les paramètres de rugosité  $0.1 < R_a < 2.5 \mu\text{m}$  et les rayons de courbure des aspérités  $30 < R < 670 \mu\text{m}$ . Par conséquent, l'épaisseur de la couche

déformée est d'environ  $17 \div 58 \mu\text{m}$ . L'augmentation de la température de la surface accroît sensiblement l'épaisseur de la couche déformée. Ainsi, en cas d'intense déformation des couches superficielles lors du frottement externe, comme lors du traitement mécanique survient une variation des propriétés mécaniques [KRA 84].

L'augmentation de la température des couches superficielles provoque non seulement leur adoucissement, mais augmente aussi de plusieurs fois la vitesse de déroulement des processus physiques et chimiques dans ces couches. Ceci conduit à la saturation des couches superficielles par les molécules de gaz du milieu ambiant, les pellicules d'oxydes, et conduit aussi à la concentration des défauts dans ces couches.

Après le traitement mécanique et l'exploitation ultérieure, la surface de contact d'un corps solide possède une zone qu'on peut considérer schématiquement, comme une zone à part (interface) séparant la masse de la pièce du milieu ambiant. Il y a plusieurs représentations de la structure des couches superficielles des corps solides [KRA 84].

Selon J.J. CAUBET [CAU 64], la structure d'une telle zone de surface métallique comporte elle-même 4 zones ou couches, qui se disposent de l'intérieur vers l'extérieur de cette surface comme suit (fig.1.3).

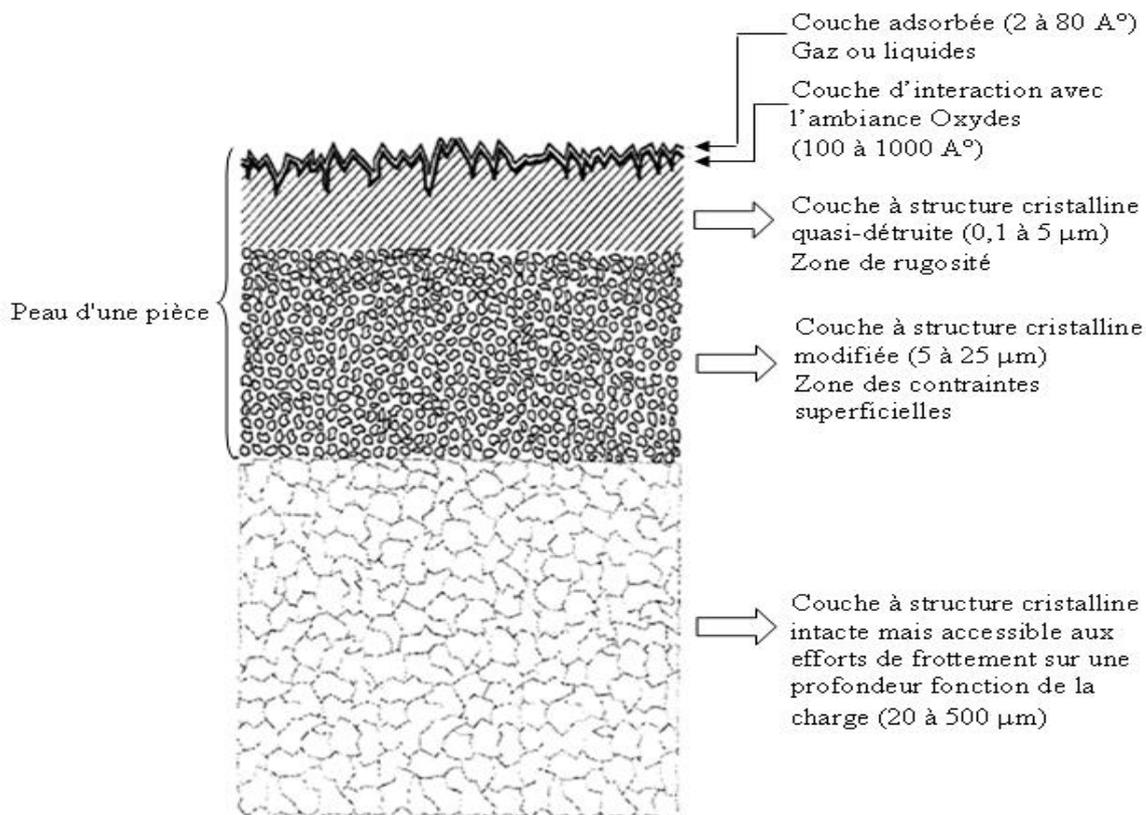


Fig 1.3 Couches superficielles d'un corps solide métallique

### 1- Zone en cours d'écroutissage

C'est une zone intermédiaire, disposée entre le métal de base et la couche 2 à structure cristalline déformée. Elle a une structure cristalline intacte, mais elle est rythmiquement sollicitée par les contraintes extérieures. Cette zone peut régner sur une épaisseur de plusieurs microns (20 à 50  $\mu\text{m}$ ) [POLZ 84].

### 2 - Zone intrinsèquement écroutie

Dans cette zone, la structure cristalline est déformée, car accessible aux efforts de frottement. Dans cette couche, on trouve des inclusions venant de l'extérieur. L'épaisseur de cette couche peut atteindre quelques microns (jusqu'à 5  $\mu\text{m}$ ) [POLZ 84].

### 3 - Zone amorphe

Elle est souvent appelée couche de BEILBY. C'est une couche qui est générée lors des opérations de finition de la surface (rectification, polissage ...), qui créent les conditions d'un concassage extrêmement fin de la surface cristalline auquel s'ajoute, par élévation de la température, la création de matériaux fondus, oxydés, caramélisés. L'écoulement visqueux de ces conglomérats en une unique couche superficielle achève de créer cette zone quasi-amorphe de BEILBY. L'épaisseur de cette couche ne dépasse pas 1  $\mu\text{m}$  [POLZ 84].

### 4- Couche adsorbée

On peut définir les phénomènes d'adsorption de la manière suivante. Puisque les atomes dans leur arrangement échangent des valences il est normal que ceux qui jouxtent la surface extérieure aient une ou plusieurs valences non saturées ; l'ensemble de ces valences forme un champ des forces qui peut s'exercer jusqu'à plusieurs angströms ( $\text{A}^\circ$ ) de la surface. Des molécules ambiantes, vont être attirées par ce champ de force, c'est le phénomène d'adsorption. Certaines molécules sont capturées par le champ, d'autres s'en échappent, le résultat de l'adsorption est en somme un équilibre statistique entre une condensation et une évaporation.

L'adsorption peut être suivant les caractéristiques des matériaux en présence, une réaction chimique, une diffusion ou une simple adsorption physique. Dans le cas d'adsorption physique, entre les molécules du milieu gazeux et les particules de la couche superficielle des corps solides agissent seulement les forces de WANDER VALS. Dans le cas d'adsorption chimique se remarque l'interaction chimique entre les molécules de l'ambiance gazeuse et les particules de la couche superficielle des corps solides. L'épaisseur de cette couche adsorbée varie de 2 à 80  $\text{A}^\circ$ .

La couche adsorbée est extrêmement solide et pratiquement inexpugnable sous vide, à une température de l'ordre de 1000°C.

En partant de ce qui vient d'être résumé, on peut supposer la loi suivante de variation des propriétés mécaniques des matériaux suivant la profondeur. Les couches superficielles possèdent de plus petites caractéristiques de résistance, que les couches sous-jacentes pour cela avec l'augmentation de la distance à partir de la surface les caractéristiques des

résistances vont en augmentant (fig.1.4, courbe 1), atteignant un certain maximum, pour diminuer ensuite jusqu'aux valeurs caractéristiques du matériau de base. Parfois, l'épaisseur des couches, pour lesquelles on observe une telle répartition des propriétés de résistance, est tellement petite, que la détermination de leur caractéristique mécanique, par exemple la micro dureté, est difficile. Cependant les propriétés montrées exercent une sensible influence sur la résistance tangentielle des liaisons atomiques et moléculaires qui se forment dans les zones de contact réel des corps solides.

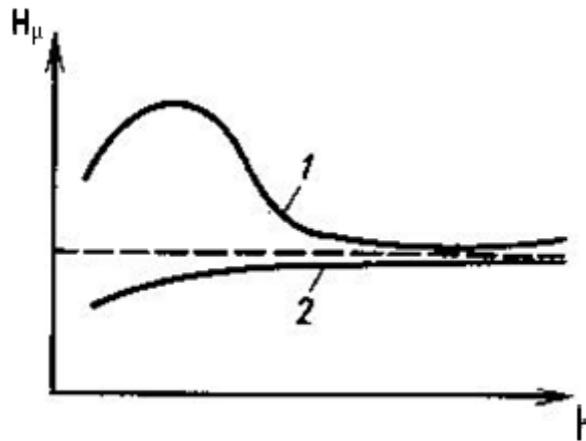


Fig 1.4 : Variation de la micro-dureté  $H_\mu$  en fonction de la profondeur  $h$  à partir de la surface en cas de traitement technologique (1) et dans les conditions d'exploitation [KRA 84, KHE 89].

La variation des propriétés des couches superficielles est appelée « règle du gradient positif des propriétés mécaniques suivant la profondeur ». En conformité avec cette règle le frottement externe existe seulement dans le cas où sur la surface du corps solide est disposée une couche qui possède une résistance plus faible que celle de la couche sous-jacente. L'analyse de l'état de contraintes dans les zones de contact montre que l'épaisseur des couches superficielles déformées lors du frottement externe en cas de déformation élastique est de  $3 \div 25 \mu\text{m}$ .

Effectivement comme il s'en suit de la théorie d'élasticité, dans les problèmes de contact sphère plan, cylindre - plan, la déformation couvre des couches d'épaisseur égale à peu près à 1.5 du diamètre de la tache de contact ( $H \sim 1.5 d$ ). Le diamètre statistique moyen de la tache de contact varie de 2 à 7  $\mu\text{m}$ .

En cas de déformations plastiques dans les zones de contact l'épaisseur des couches affectée par la déformation, constitue 17 à 78  $\mu\text{m}$ . L'épaisseur des couches superficielles, dont les propriétés mécaniques différentes de celles du matériau de base, habituellement ne dépasse pas 60  $\mu\text{m}$ , c-à-d elle est plus petite ou de même ordre que l'épaisseur des couches subissant la déformation pendant le frottement externe. Ainsi, dans les formules de calcul pour la détermination des interactions des corps solides pendant le frottement externe et le calcul de l'usure, en qualité de caractéristiques mécaniques, on peut utiliser la micro dureté et le module d'élasticité du matériau de base. En tenant compte que la micro dureté dans les limites de 100  $\div$  450 coïncide pratiquement avec les valeurs de la dureté BRINELL, dans les formules de calcul dans le cas de déformations plastiques on peut utiliser la dureté BRINELL [KRA 84].

**Les principales caractéristiques physico-mécaniques** des matériaux déterminant La force et le coefficient de frottement des corps solides sont la dureté Brinell (HB), le module d'élasticité longitudinale (E) et le coefficient de poisson ( $\mu$ ) [KRA 84, KHE 89].

**Les paramètres de friction (conditionnés par l'état physicochimique)** des surfaces de contact des corps solides sont notée  $\tau_0$  et  $\beta$  [KRA 84, KHE 89] :

- $\tau_0$  est la résistance au cisaillement de l'adhérence au niveau des zones de contact réel des surfaces de frottement correspondant à la pression de contact réelle extrapolée à zéro ;
- $\beta$  est le coefficient de renforcement de la liaison moléculaire, au niveau de ces zones de contact, avec l'augmentation de la pression de contact réelle.

Nous allons considérer ces paramètres dans le chapitre 2.

Les valeurs des caractéristiques  $\tau_0$  et  $\beta$  sont inexistantes dans la littérature pour la quasi-totalité des couples des matériaux, surtout si on prend en considération l'état physico-chimique des surfaces de contact (influence du milieu ambiant). Les méthodes de détermination de ces paramètres ne sont pas largement connues dans la pratique d'ingénierie, mais elles sont bien connues dans la littérature spécialisée [KRA 84, KHE 89, POL 84].

### **1.3.2. ETAT GEOMETRIQUE (MACRO ET MICRO GEOMETRIE) DES SURFACES DES CORPS SOLIDES ET SES PARAMETRES (CARACTERISTIQUES)**

Le profil de la surface d'une pièce est donné par le dessin de définition de celle-ci. Ce profil est appelé profil normal (nominal). La surface d'une pièce est obtenue à l'aide d'un traitement, le plus souvent mécanique. Lors du processus du traitement, par suite des défauts dans le système technologique (machine-outil - dispositif d'ablocage - outil de coupe - pièce), des vibrations dans ce système, du processus technologique sur la surface de la pièce se produisent des écarts par rapport au profil normal. Les écarts par rapports au profil normal, qui naissent pendant les processus du traitement sont dits technologiques. Les écarts dits exploitationnelle sont conditionnés par l'usure non uniforme des différents secteurs des surfaces de frottement [KHE 89].

On divise ces écarts en écarts macroscopiques et microscopiques. Ils exercent une influence déterminante sur le contact, l'interaction lors du frottement externe et l'usure des corps solides.

La section de la surface de la pièce suivant le plan qui lui est perpendiculaire est appelé profil de la surface.

#### **1. Les écarts macroscopiques (défauts macrogéométriques)**

Les écarts macroscopiques sont des écarts irréguliers de faible hauteur  $H_m$  (Figure 1.5) distribuée suivant un pas très grand  $P_m$ , tel que  $[(P_m/ H_m) > 1000]$ . A ces irrégularités, on rapporte les défauts de formes (planéité, cylindricité, conicité et autres) et de positions relatives (perpendicularité, parallélisme et autres) des surfaces.

On distingue les écarts macroscopiques technologiques et les écarts macroscopiques exploitationnels.

Les écarts macroscopiques technologiques sont conditionnés par le manque de précision de la machine-outil, les défauts de fixation de l'outil, mauvais choix du régime d'usinage ou la perturbation de ce régime, les contraintes thermiques et les déformations du système technologique [KHE 89].

Les écarts macroscopiques exploitationnels sont habituellement conditionnés par l'usure non uniforme, se produisant par suite du montage incorrect des pièces de l'ajustement mobile, des vibrations et des surcharges pendant le processus de travail. Les écarts macroscopiques peuvent être partiellement évités en excluant les causes de leur apparition [KHE 89].

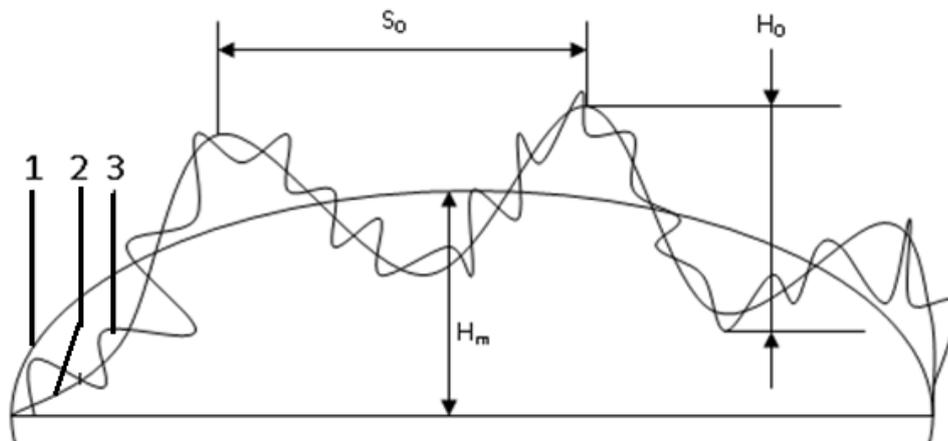


Fig 1.5. Schéma de la géométrie de la surface d'un corps solide [KRA 84].

1 : écart macroscopique (défaut de la forme); 2 : ondulation; 3 : rugosité.

## 2. Les écarts microscopiques comprennent l'ondulation 2, la rugosité 3 et la subrugosité de la surface (Figure 1.5)

### A. L'ondulation de surface

L'ondulation d'une surface représente les écarts de faible hauteur  $H_0$  qui se reproduisent périodiquement avec un pas moyen  $S_0$  (Figure 1.6). Cette irrégularité est représentée par des saillies et des creux de dimensions approximativement égales.

On distingue l'ondulation technologique et l'ondulation exploitationnelle de la surface.

L'ondulation technologique de surface apparaît par suite du manque de rigidité du système technologique et de l'apparition des vibrations dans ce système. Ces vibrations sont provoquées par la non-homogénéité des propriétés mécaniques des matériaux traités et par les différences dans les paramètres du traitement, par exemple les paramètres d'usinage.

L'ondulation exploitationnelle de la surface est provoquée par les propriétés rhéologiques du matériau des surfaces de frottement et par les charges dynamiques agissant dans l'assemblage mobile pendant le service. Les ondes sur la surface de la pièce ont une forme géométrique incorrecte, mais peuvent être décrites par une sinusoïde.

Dans la pratique d'ingénierie, l'ondulation des surfaces des corps solides est caractérisée par les paramètres suivants (Figure 1.5) :

- a) La hauteur de l'onde  $H_o$ , représentant la distance entre le sommet de l'onde et son creux, elle est égale au double de l'amplitude de l'onde. Habituellement  $50 < S_o / H_o < 1000$ .
- b) Le pas de l'onde  $S_o$ , représentant la distance entre les sommets des deux ondes voisines ;
- c) Le rayon de courbure des sommets  $R_o$  des ondes.

L'ondulation de surfaces peut être évaluée par le traitement d'ondulogrammes relevés des surfaces au moyen de profilographes (passe haut) permettant d'obtenir les caractéristiques citées.

Le rayon de courbure du sommet d'une ondulation est calculé par la relation [KRA 84]:

$$R_o = \frac{S_o^2}{8H_o} \quad (1.1)$$

Dans les calculs on utilise parfois le modèle sphérique de l'ondulation, pour lequel les ondes de la surface sont considérées comme des segments sphériques de rayon constant.

En utilisant la formule (1.1) on détermine les rayons de courbure des ondes suivant les directions de coupe  $R_{Olon}$  (ondulation longitudinale) et d'avance  $R_{Otra}$  (ondulation transversale).

On détermine le rayon de courbure de l'onde par la formule :

$$R_o = \sqrt{R_{Olon} \times R_{Otra}}$$

Dans les annexes 1.1 et 1.2 sont donnés des tableaux présentant les valeurs approximatives des paramètres d'ondulation.

### B. La rugosité de surface

La rugosité de surface représente les écarts microscopiques irréguliers par rapport au profil géométrique de la surface ondulée du corps solide. Ces défauts (aspérités, pics) ont une faible hauteur et un pas plus petit que celui des ondulations ( $0 < \frac{s}{h} \leq 50$ ).

On distingue la rugosité technologique et la rugosité exploitationnelle des surfaces.

La rugosité technologique est conditionnée par la géométrie de l'outil de coupe et son usure, les vibrations dans le système technologique, par la formation d'excroissances sur l'outil de coupe, les régimes de coupe, les propriétés du matériau traité et du matériau de l'instrument. La rugosité technologique de surface pour certains procédés du traitement (tournage, le fraisage, la rectification) n'est pas là même suivant la direction du mouvement de coupe (rugosité longitudinale) et dans la direction d'avance, qui lui est perpendiculaire (rugosité transversale).

La rugosité exploitationnelle se subdivise en rugosités instable et stable.

La rugosité instable représente une rugosité de passage de la rugosité technologique à la rugosité stable. La rugosité instable caractérise la période de rodage des pièces des jonctions mobiles. Le mécanisme de sa variation dépend de l'état de contraintes dans les zones de contacts des aspérités.

Dans le cas de déformations élastiques, dans les zones de contact, la variation de la rugosité est conditionnée par l'usure des surfaces de frottement des corps en contact.

Dans le cas de déformations plastiques dans les zones de contact réel des aspérités pendant la période de rodage se produit une intense déformation plastique de la couche superficielle du corps le moins rigide du couple de frottement. Il se produit l'adaptation de la rugosité du corps moins rigide à la rugosité du corps antagoniste plus rigide. En conséquence, les déformations plastiques dans les zones de contact réel des aspérités se transforment en déformations élastiques.

Dès que dans les zones de contact réel des aspérités se réalisent des déformations élastiques, la rugosité instable passe à la rugosité stable. On suppose, que la rugosité de surface stable se reproduit dans les conditions normales de frottement. Il est connu que pour la rugosité stable on observe les forces de frottement et les taux d'usures minimales possibles dans les jonctions mobiles. La détermination de la rugosité stable de surface en tenant compte des conditions de travail de la jonction mobile représente une tâche technique et scientifique d'actualité [KHE 89].

Pour évaluer la rugosité des surfaces on utilise plusieurs méthodes. La méthode basée sur l'utilisation du profil de surface est très répandue. Le profil normal (Figure 1.6) est habituellement obtenu par relevé de profilogrammes de la surface (passe-bas).

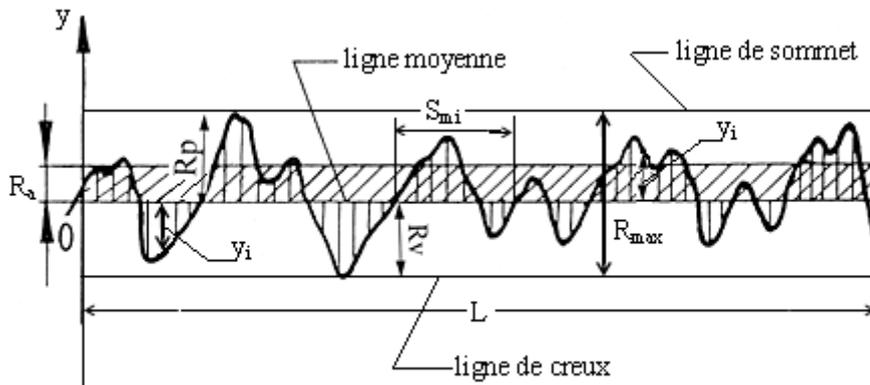


Fig 1.6 : Profil de surface

Dans la pratique d'ingénierie, la rugosité des surfaces des corps solides est caractérisée par plusieurs paramètres bien connus, dont les principaux sont (Normes ISO, DIN) :

a) la hauteur moyenne de rugosité ( $R_z$ )

Elle est déterminée selon dix points dans les limites de la longueur de base [DIN 90], et se calcule par la formule :

$$R_z = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^{i=5} |y_{p \max i}| + \sum_{i=1}^{i=5} |y_{v \max i}| \right) \quad (1.2)$$

Où  $y_{p \max i}$ ,  $y_{v \max i}$  : écarts maximaux de la ligne moyenne du profil de surface respectivement des saillies (pics) et des creux microscopiques.

b) la rugosité moyenne arithmétique ( $R_a$ )

Elle est la moyenne arithmétique de toutes les distances absolues du profil de rugosité mesurée à partir de la ligne médiane du profil sur la longueur d'évaluation L [DIN 90]. Elle est déterminée par la formule :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (1.3)$$

Où  $y(x)$  : fonction d'écart du profil par rapport à la ligne moyenne (Figure 1.6).

Dans le cas de calcul approximatif, on utilise la relation suivante :

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} |y_i| \quad (1.4)$$

Où  $y_i$  : écart du profil de surface à la ligne moyenne dans une section arbitraire;  $n$  : nombre de divisions du profil de surface.

c) La rugosité moyenne quadratique du profil ( $R_q$ )

Elle est la moyenne quadratique de toutes les valeurs du profil de rugosité calculée sur la longueur d'évaluation L et se calcule comme suit :

$$R_q = \frac{1}{L} \left[ \int_0^L y^2(x) dx \right]^{1/2} \quad (1.5)$$

d) Le pas moyen des aspérités ( $S_m$ ) ;

Le pas des aspérités  $S_{mi}$  est la distance entre deux points d'intersection des surfaces analogues des aspérités voisines avec la ligne moyenne du profil de surface. Il est calculé comme étant la moyenne arithmétique des pas des aspérités :

$$S_m = \frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^n S_{mi} \quad (1.6)$$

Où  $n_i$  : nombre de saillies, utilisées lors de la détermination de  $S_m$  (habituellement pas moins de 5 saillies);  $S_{mi}$  : pas de l'aspérité arbitraire, habituellement :  $0 < \frac{S_m}{R_z} \leq 50$ .

e) La hauteur maximale de rugosité ( $R_{\max}$  ou  $R_M$  ou encore  $R_t$ ) ;

Elle est la distance entre la ligne des creux et la ligne des sommets du profil de surface. Les lignes des creux et des sommets sont des droites, menées sur le profil de surface (Figure 1.6), dans les limites de la longueur de base, respectivement par le fond du plus profond des creux et le sommet de la plus haute aspérité parallèlement à la ligne moyenne de ce profil. Autrement dit la hauteur maximale de rugosité est l'écart vertical entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil de rugosité sur la longueur totale d'évaluation  $L$ .

La hauteur maximale de rugosité est égale à la somme de la hauteur maximale des saillies  $R_p$  et la profondeur maximale des creux  $R_v$  (Figure 1.6) :

$$R_{\max} = R_p + R_v \quad (1.7)$$

Les valeurs de  $R_{\max}$  dépendent du procédé et de la classe de traitement mécanique de surfaces et des matériaux traités (Annexe 1.5). Si on compare la hauteur maximale de rugosité  $R_{\max}$  et la hauteur de l'ondulation  $H_O$  (Annexes 1.1 et 1.2), on peut remarquer que dans un certain diapason de classes, ces grandeurs ont des valeurs de même ordre pour les divers procédés de traitement des surfaces.

Pour calculer la hauteur maximale de rugosité  $R_{\max}$  d'une surface on prend la moyenne arithmétique des hauteurs maximales de rugosité de cinq (5) secteurs de cette surface évaluée.

$$R_{\max} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_{\max i} \quad (1.8)$$

Où  $i$  :  $i$  ème secteur relevé.

f) Le rayon de courbure du sommet des aspérités moyen ( $R$  ou  $r$ )

Les aspérités de surface coïncident approximativement par leur forme avec des segments d'ellipsoïdes, dont les grands axes sont orientés suivant la direction du traitement. Elles se caractérisent par les rayons de courbure influant sensiblement sur l'interaction des corps solides.

Les rayons de courbure des aspérités  $R$  sont déterminés le long de la direction de traitement  $R_{lon}$  et de la direction transversale  $R_{tra}$  à partir des profilogrammes. A la distance  $h$  du sommet de l'aspérité donnée, on fait la section parallèle à la ligne moyenne du profil de surface. Si on désigne la largeur de la section par  $d$ , on peut calculer  $R$  par la formule suivante :

$$R = \frac{d^2}{8h} \quad (1.9)$$

Pour la détermination de  $d$  et  $h$  on utilise la méthode des « trois points » [KRA 84]. Si pour trois points successivement choisis sur le profil de la surface tels que la hauteur de rugosité dans le point moyen est plus grande que les hauteurs de rugosité dans les points extrêmes, alors le point moyen correspond à  $h$ , et la distance entre les points extrêmes est

égale à  $d$  (Figure 1.7). Il existe d'autres méthodes approchées de détermination de  $R$  [KRA 81].

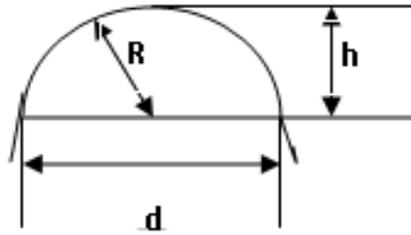


Fig 1.7 : Schéma en vue de calcul du rayon de courbure d'une aspérité

Habituellement dans les calculs on utilise le modèle sphérique des irrégularités de surface. Dans ce modèle, on présente toutes les aspérités de surface sous forme de segments sphériques de même rayon de courbure :  $R = \sqrt{R_{lon} \times R_{tra}} = 5 \text{ à } 3.10^3 \mu\text{m}$ . Les valeurs de  $R$  dépendent du procédé et de la classe de traitement mécanique de surfaces et des matériaux traités (voir annexe 1.5).

En plus de ces paramètres, pour caractériser la rugosité des surfaces, on utilise aussi les caractéristiques de la courbe de la surface portante (surface d'appui), qui donnent la distribution du matériau dans la couche rugueuse du corps solide, autrement dit la distribution des sommets des aspérités suivant la hauteur.

**Les caractéristiques de la courbe de la surface portante sont :**

- a) La longueur relative d'appui ( $t_p$ )

$$t_p = b \varepsilon^v \quad (1.10)$$

Le paramètre  $t_p$  est fonction du rapprochement relatif des surfaces en contact  $\varepsilon$  (Figure 1.8), qu'on exprime par la relation :  $\varepsilon = \frac{h}{R_{\max}}$  (1.11)

Où  $h$  : rapprochement des surfaces ;  $R_{\max}$  : hauteur maximale de rugosité de la surface du corps plus rigide (fig.1.6) ;

$b$  et  $v$  : paramètres de la courbe de la surface d'appui , dépendant du type de traitement mécanique (voir plus bas).

- b) Les paramètres de la courbe de la surface d'appui ( $b$  et  $v$ )

Pour les procédés d'usinage usuels en construction mécanique  $v = 1,7 \text{ à } 3$  et  $b = 1 \text{ à } 10$  (Annexe .1.5). Pour les calculs approchés on prend habituellement  $v = b = 2$  [KRA 84].

- c) Le paramètre complexe de rugosité [KRA 81 , KRA 84 , POL 84 , KHE 78] :

$$\Delta = \frac{R_{\max}}{Rb^{\frac{1}{v}}} \quad (1.12)$$

Toutes ces caractéristiques de la rugosité dépendent du type de traitement mécanique concernant les pièces nouvellement fabriquées, mais aussi des modifications intervenues sur les surfaces exploitées.

Les méthodes de détermination des paramètres caractérisant l'ondulation et la rugosité des surfaces sont données dans de nombreux ouvrages et documents techniques.

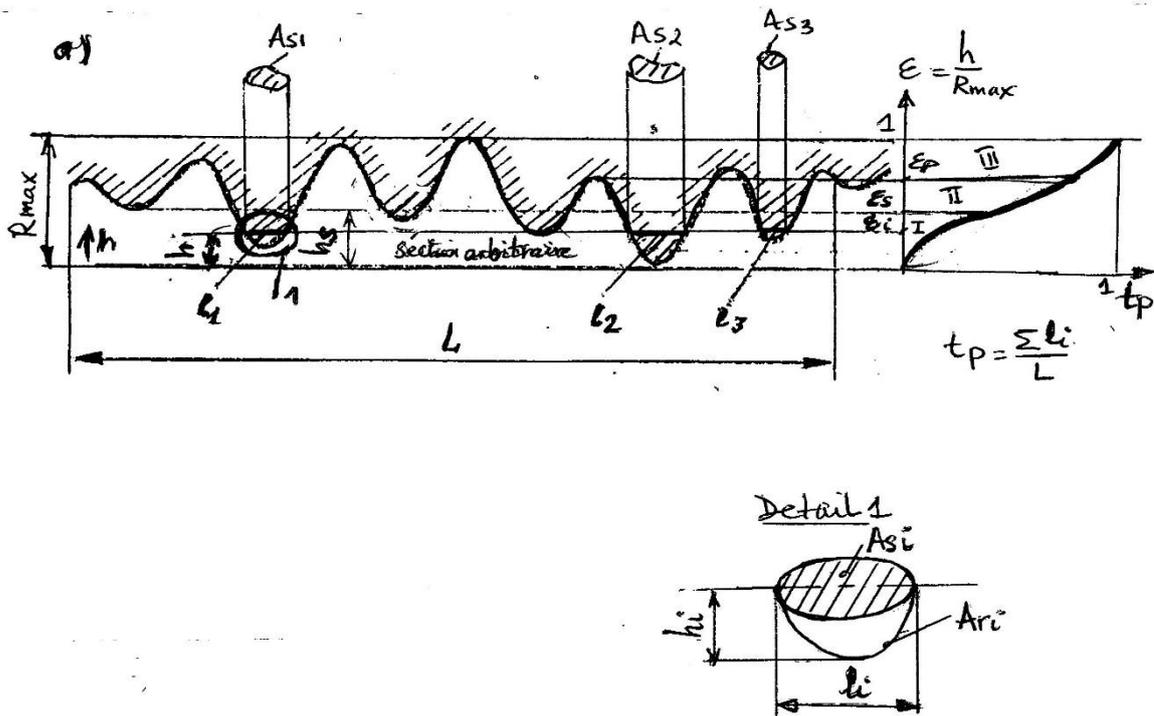


Fig 1.8 : Courbe de la surface d'appui (surface portante) [KHE 89].

d) **La subrugosité de surface** est constituée par de plus petits écarts présents sur les surfaces des aspérités (défauts de 4<sup>ème</sup> ordre). Elle est conditionnée par les défauts internes du matériau (vacances et dislocations), déformation non uniforme des cristaux, microfissures apparaissant lors de leur déformation et autres. Les dimensions de la subrugosité sont plus faibles que les dimensions de la rugosité de 2 à 3 ordres. En général, la subrugosité n'influe pas sensiblement sur les caractéristiques géométriques des surfaces des corps réels.

**REMARQUE :** Les paramètres d'état géométrique des surfaces des corps solides (ondulation et rugosité) rentrant dans le calcul du coefficient de frottement sont : la hauteur de l'ondulation ( $H_0$ ), le pas moyen de l'ondulation ( $S_0$ ), hauteur maximale des aspérités ( $R_{\max}$ ), le rayon de courbure moyen ( $R$ ), paramètres de la courbe de la surface d'appui ( $b$ ,  $v$  et  $k_1$ ) et le paramètre complexe de rugosité de la surface ( $\Delta = R_{\max}/(Rb^{1/v})$ ).

Les valeurs ces caractéristiques en fonction des procédés de traitement mécaniques des surfaces et des classes de rugosité sont fournies dans la littérature, mais seulement concernant certains matériaux (acier, fonte), et en outre, on ne connaît pas la précision de leur détermination. Les techniques de détermination de certains de ces paramètres ( $H_0$ ,  $S_0$ ,  $R_{max}$ ,  $R$ ,...) sont bien connues (normalisées) dans la pratique d'ingénierie, mais il n'est pas de même pour les autres paramètres ( $b$ ,  $v$  et  $k_1$ ).

### 1.4. CONTACT DES CORPS SOLIDES (PIECES DE MACHINES)

#### 1.4.1. Modes de contact des corps solides

On distingue trois modes de contact selon la forme des surfaces des corps solides conjuguées :

- Contact ponctuel, tel que celui d'une bille sur une surface de moindre courbure (bille sur le chemin de roulement).
- Le contact linéaire, tel que celui d'un rouleau sur une surface plane.
- Contact superficiel tel que celui d'un coulisseau sur une glissière.

#### 1.4.2. Aires de contact des corps solides

En fait, à cause des irrégularités géométriques (écarts de forme, ondulation et rugosité) des surfaces, le contact des corps solides est toujours superficiel (surfaccique), mais discret, c-à-d il se réalise dans des zones isolées (fig.1.8).

On distingue trois différentes aires de contact de surfaces rugueuses (fig.1.9) :

Aire nominale  $A_a$  ; aire de contour  $A_c$  et aire réelle  $A_r$ .

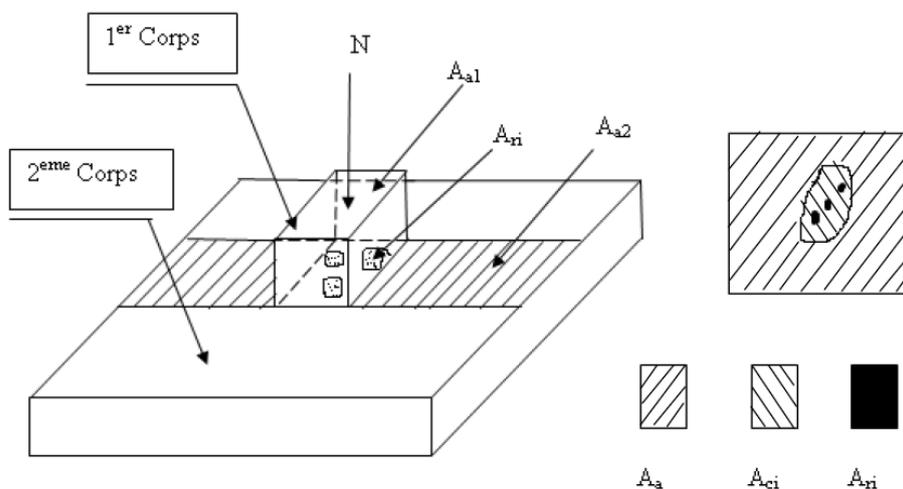


Fig 1.9 : modèle mécanique de contact de deux corps solides ayant des surfaces planes rugueuses au cours du frottement [POL 84]

$A_a$  : aire nominale de contact ;

$A_c = \sum A_{ci}$  : aire de contour du contact ; où  $A_{ci}$  : aire de contour élémentaire ;

$A_r = \sum A_{ri}$  : aire réelle de contact, où  $A_{ri}$  : aire réelle de contact élémentaire ;

$N$  : Charge normale agissant sur l'aire des surfaces de contact des corps.

Considérons ces types d'aires de contact des corps solides.

### 1. L'aire nominale de contact $A_a$

L'aire nominale de contact  $A_a$  coïncide avec l'aire apparente de contact des surfaces conjuguées. Par exemple, examinons le contact de deux corps, ayant des surfaces nominales planes (fig.1.9). Soit la surface d'un des deux corps en contact ondulée et rugueuse et la surface de l'autre idéalement régulière (plane sans ondulation et rugosité). L'aire apparente du premier corps est celle de la surface ondulée, quant à l'aire apparente du deuxième corps est égale à l'aire du rectangle délimitant les zones de contact.

### 2. L'aire de contour

Au départ le contact s'effectue sur les plus grandes aspérités disposées aux sommets des ondes. Les interactions mécaniques (de force) se transmettent par les éléments d'ondulation, dont elles provoquent la déformation. Habituellement, la déformation des éléments d'ondulation est élastique. En fait cette déformation conduit à la formation sur ces éléments des aires de contact, dont la somme est appelée aire de contour ( $A_c = \sum A_{ci}$ ). Ainsi l'aire de contour dépend sensiblement des paramètres caractérisant l'ondulation (le pas  $P_o$  et la hauteur  $H_o$  des ondes) ainsi que de la charge nominale de contact.

En cas de contact de pièces ayant des surfaces curvilignes, l'aire de contour du contact coïncide avec l'aire, calculée sur la base de la théorie d'élasticité en supposant les surfaces absolument lisses.

### 3. L'aire réelle de contact

Dans les limites de l'aire de contour du  $A_c$ , le contact s'effectue par les aspérités isolées, dont chacune forme une aire réelle de contact  $A_{ri}$ . Les dimensions de cette aire sont habituellement faibles et dépendent de la configuration des aspérités, des propriétés mécaniques des corps interagissant, des pressions de contour et du type de déformation dans les zones du micro-contact.

L'aire, dans laquelle s'équilibrent les forces intra-atomiques et intermoléculaires d'attraction et de répulsion, est appelée aire réelle de contact élémentaire. L'aire sommaire des zones de contact des aspérités forme l'aire réelle de contact des corps solides,

$$A_r = \sum A_{ri}$$

Avec l'augmentation du rapprochement entre les surfaces des corps en contact, l'aire réelle de contact s'accroît. Lors de la détermination de la rigidité des joints, l'écoulement à travers les micro-jeux et autres paramètres, il est nécessaire de connaître la loi de variation de l'aire réelle de contact en fonction du rapprochement entre les surfaces des corps solides en

contact. On obtient cette loi expérimentalement pour le contact de deux corps solides ayant des surfaces nominale­ment planes. On considère qu'une des surfaces est rugueuse et l'autre lisse.

En fonction des caractéristiques mécaniques des corps interagissant dans les zones de contact réel aura lieu le matage des aspérités ou leur pénétration dans la surface du corps antagoniste plus doux.

Dans le cas de matage (écrasement) le matériau déformé se distribue régulièrement sur toute la surface des aspérités (Fig.1.10). Le rapprochement entre les surfaces des corps interagissant sont faibles, par conséquent, les volumes déformés sont petits. Pour cela on peut considérer, avec une bonne approximation, que l'aire réelle de contact d'une aspérité en contact, coïncide avec l'aire de sa section.

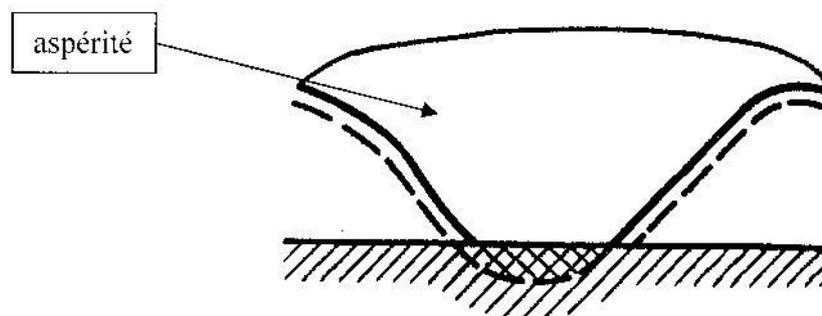


Fig.1.10 : Schéma d'interaction d'une aspérité avec le corps antagoniste plus dur.

### 1.4.3. Pressions de contact des corps solides

On distingue les pressions de contact suivantes :

#### 1. la pression de contact nominale

La pression de contact nominale est le rapport de la charge nominale à l'aire apparente de contact :

$$Pa = N/Aa$$

#### 2. la pression de contour

La pression de contour est le rapport de la charge normale agissant sur les corps solides à l'aire de contour :

$$Pc = N/Ac$$

En cas d'ondulation sphérique ou cylindrique, pour laquelle la hauteur et le pas sont constants, la pression de contour peut être déterminée par les formules approximatives suivantes [POL84] :

$$P_{c^{sph}} = 3,26E^{2/3} \left(\frac{H_0}{P_0}\right)^{2/3} Pa^{1/3}$$

$$P_{c^{cyl}} = 1,87E^{1/2} \left(\frac{H_0}{P_0}\right)^{1/2} Pa^{1/2}$$

### 3. la pression réelle de contact

La pression réelle de contact est le rapport de la charge normale à l'aire réelle de contact :

$$Pr = N/Ar$$

**Remarque importante :** Il existe des formules analytiques très développées [KRA 84], élaborées en vue du calcul des caractéristiques du contact des corps solides (rapprochement des corps en contact, aires de contact et pressions de contact), en tenant compte du degré de saturation du contact et du type de déformation (élastiques ou plastiques) dans les zones de contact réel.

## 1.5 TYPES DE CONTACT EN FONCTION DU DEGRE DE SATURATION DU CONTACT ET DU TYPE DE DEFORMATION

### 1. Types de contact en fonction du degré de saturation du contact

En fonction du degré de saturation du contact, on distingue les deux types de contact suivants :

#### a) Le contact non saturé

C'est un type de contact des corps solides, qui se caractérise par le fait que le nombre des aspérités en contact  $N_r$  est inférieur au nombre d'aspérités  $N_c$  disposées dans l'aire de contour.

Dans ce cas le rapprochement relatif  $\varepsilon$  est inférieur au rapprochement relatif correspondant à la saturation de contact  $\varepsilon_s$  (fig.1.8), autrement dit :  $\varepsilon < \varepsilon_s$ . Le rapprochement relatif  $\varepsilon_s$  est donné par l'expression :

$$\varepsilon_s = (b v)^{\frac{1}{v-1}} \quad (1.13)$$

Où  $b, v$  : paramètres de la courbe de la surface d'appui.

#### b) Le contact saturé

C'est un type de contact des corps solides, pour lequel toutes les aspérités ( $N_c$ ) disposées dans l'aire de contour se trouvent en contact réel avec le corps antagoniste ( $N_r = N_c$ ).

Dans le cas de contact saturé :  $\varepsilon \geq \varepsilon_s$

**Remarque importante :** Actuellement on dispose de formules analytiques de l'aire réelle de contact, pour les types de contact en fonction du degré de saturation du contact [KRA 81, KRA 84, KHE 89].

En outre, on dispose actuellement de formules de calcul analytique de l'aire réelle de contact de surfaces rugueuses de corps solides en fonction de l'aire de contour, de la pression de contour et des caractéristiques de rugosité des surfaces pour les différents types de contact classés en fonction du degré de saturation et du type de déformations dans les zones de contact réel de ces surfaces [KRA 81, KRA 84, KHE 89]. Ces différents types de contact en fonction du degré de saturation et du type de déformations dans les zones de contact réel des surfaces des corps solides seront définis plus bas. Ces formules sont obtenues en remplaçant le rapprochement relatif des surfaces de contact  $\varepsilon$  par ses expressions correspondantes en fonction de la pression de contour.

Le type de déformation le plus répandu est la pénétration des aspérités les plus rigides dans la surface la moins rigide des corps en contact. La pénétration se produit lorsque le corps rigide possède une surface plus rugueuse, par suite de l'hétérogénéité des propriétés mécaniques des différents secteurs des couches superficielles du corps solide et à cause de la différence dans les dimensions des aspérités. Même dans le cas d'écrasement des échantillons de même matériau, mais de formes différentes, par exemple lors du contact d'un poinçon sphérique avec une plaque, on observe la pénétration du poinçon dans la plaque. Même dans le cas d'écrasement des aspérités dans les zones de contact se produit la pénétration des aspérités plus rigides, de dimensions plus petites, dans la surface des aspérités moins rigides (Figure 1.11).

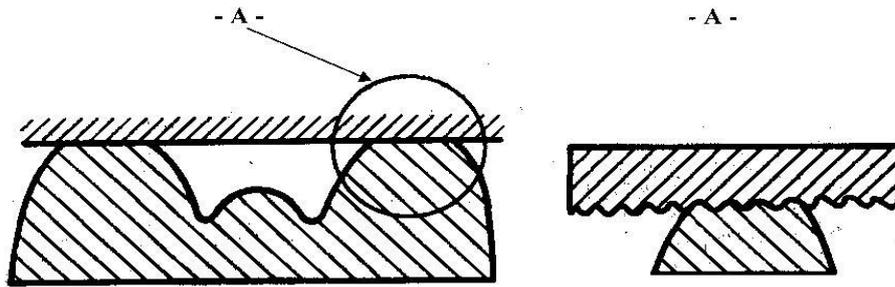


Fig 1.11 : Schéma de contact d'aspérités de différentes dimensions [KRA 84].

Lors de la pénétration, l'aire réelle de contact de l'aspérité se forme sur la surface de côté, sa valeur dépend du type de déformations (élastiques ou élastoplastiques) qui naissent dans la zone de contact, ainsi que du fait que les corps en contact soient immobiles ou en mouvement relatif. Tout ceci conduit au fait que l'aire réelle de contact I de l'aspérité (fig.1.12), lors de sa pénétration de la valeur  $h_i$  diffère de l'aire de la section de cette aspérité II, disposée à la distance  $h_i$  à partir de son sommet. Cependant cette différence n'est pas grande.

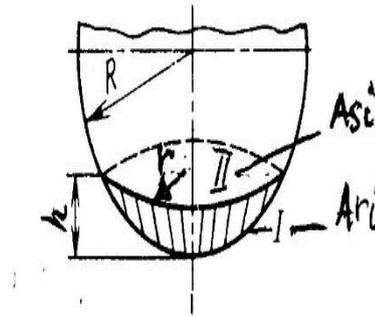


Fig 1.12 : Schéma de contact des aspérités dans le cas de pénétration

## 2. Types de contact en fonction de la pression de contour et des caractéristiques de rugosité

En fonction du type des déformations dans les zones de contact réel, on distingue les trois types de contact suivants :

- 1) Le Contact élastique,
- 2) Le Contact élasto – plastique,
- 3) Contact plastique

Il est évident que le type de déformations dans les zones de contact réel des surfaces des corps solides dépend de l'état de contraintes dans ces zones de contact, caractérisé par la pression de contact ( $p_a$ ,  $p_c$  ou  $p_r$ ), qui est à son tour fonction de la charge normale et de l'aire de contact.

Le modèle de surface rugueuse de corps solide le plus utilisé est le modèle sphérique des aspérités. La pénétration des aspérités du corps plus rigide dans la surface du corps antagoniste moins rigide est la déformation la plus favorable dans les zones de contact réel. La pénétration se produit lorsque le corps rigide possède une surface plus rugueuse, par suite de l'hétérogénéité des propriétés mécaniques des différents secteurs des couches superficielles du corps solide et à cause de la différence dans les dimensions des aspérités.

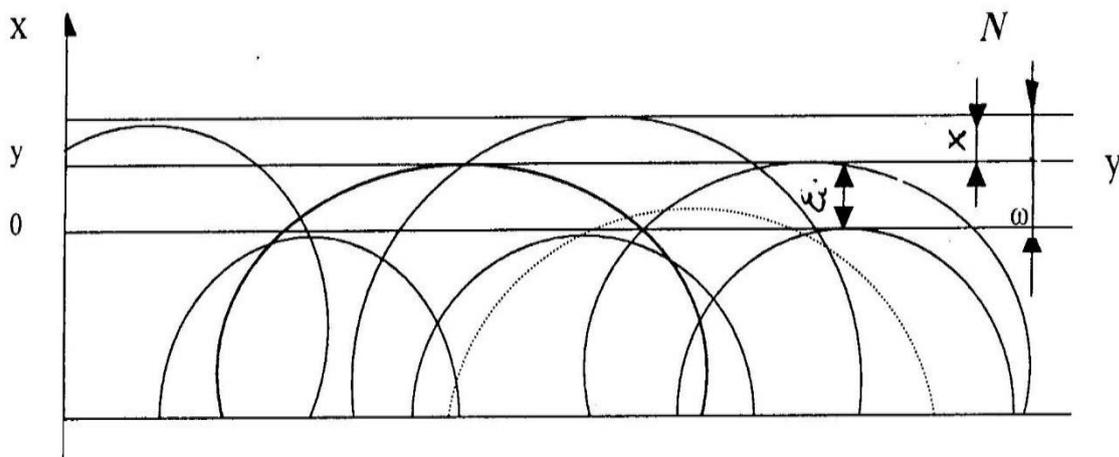


Fig 1.13 : Schéma de contact d'une surface rugueuse avec une surface lisse [KRA 84].

## **CONCLUSIONS**

1. Les définitions et notions de bases relatives considérées permettent de mieux situer l'importance de la tribologie et connaître ses objets (contact, frottement, usure et lubrification des corps solides-matériaux et pièces de machines) ;
2. L'analyse des systèmes tribologiques considérée permet de mieux poser les problèmes tribologiques, car elle indique d'une façon synthétique tous les facteurs déterminants et les processus accompagnants le frottement, ainsi que les types de dégradation des surfaces des corps solides ;
3. L'étude générale de l'état des surfaces des corps solides effectuée montre principalement les caractéristiques physico- mécaniques, physico-chimiques et géométriques des surfaces, qui influent sur le frottement et les processus qui l'accompagnent.
4. L'étude générale du contact des corps solides montre principalement les paramètres déterminants ou caractérisant l'interaction des C. S (aires, pressions, types de contact, déformations et contraintes,) et indique les méthodes simples de leur détermination.

**CHAPITRE 2**  
**FROTTEMENT DES CORPS SOLIDES**

### INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons considérer les connaissances de base relatives au frottement externe des corps solides (matériaux, éléments de machines) plus particulièrement le frottement de glissement.

### 2.1. GENERALITES SUR LE FROTTEMENT

#### 2.1.1. Définition et importance du frottement

Selon de nombreuses références [NIC71, MAI 84, KRA 84, KHEB 89, GRA 08, ...], le frottement est défini comme suit :

**Le frottement** est le phénomène de résistance au déplacement relatif de deux corps solides en contact.

L'expérience montre que lorsqu'on tend à déplacer un corps sur la surface d'un autre corps, dans le plan de contact de ces corps naît une force de résistance à leur déplacement relatif appelée force de frottement (fig.2.1).

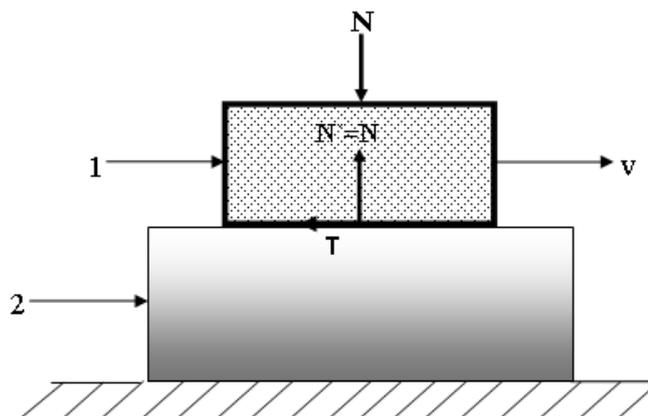


Fig 2.1: Schéma de frottement (dans le cas de glissement) de corps solides [KHE 13]

1 - corps mobile ; 2 - corps fixe ; N- Charge normale ; T – force de frottement.

L'importance du frottement n'est pas à démontrer, car il se manifeste dans les différents domaines de la nature et de la technique. Suivant les situations, le frottement peut être utile ou nuisible. En effet sans le frottement nous ne pourrions pas marcher, nous n'aurons aucun moyen de transport et rien ne s'opposerait à la force centrifuge ; d'autre part on estime que 10 à 30 % des ressources énergétiques mondiales sont perdues au travail lié au frottement.

Le frottement est utile dans certains mécanismes (systèmes de freinage, accouplements et transmissions à friction, et autres) et procédés (polissage, soudage par frottement, ...), mais nuisible dans d'autre cas (guidages, dispositifs d'étanchéité dynamiques et autres). Le frottement dans ces derniers cas occasionne des pertes d'énergies sous forme de chaleur et dans tous les cas il occasionne l'usure des corps en contact, qui à son tour conditionne des phénomènes nuisibles, tels que les vibrations, bruits et conduit au remplacement ou à la réparation des pièces de machines arrivant à la limite d'usure [GRA 08].

Comme le montre d'innombrables études expérimentales relatées dans différents ouvrages [KHE 89, POL 84 ; ZAM 98, GEO 00], le phénomène du frottement est très complexe du fait qu'il dépend d'un nombre important de facteurs et paramètres (nature des corps, caractéristiques macro et micro géométriques des surfaces, caractère et vitesse du mouvement relatif des corps, charge normale appliquée aux surfaces du contact, température et présence ou non d'un lubrifiant ou d'un liquide technologique à l'interface des corps de frottement). Pour cela d'ailleurs, on distingue plusieurs types de frottement en fonction de critères donnés, que nous allons présenter ci-dessous.

### 2.1.2. Types de frottement

Le phénomène du frottement est très complexe du fait qu'il dépend d'un nombre important de facteurs. Pour cela d'ailleurs, on distingue plusieurs types de frottement en fonction de critères donnés, que nous allons présenter avant de passer à l'étude plus détaillée du frottement externe de glissement des corps solides, en se basant sur différentes références [NIC 06; FRO87; KRA 84 ; KHE 89 ; POL 84 ; ZAM 98, GEO 00].

#### 1- Du point de vue physique on peut distinguer

**a) Le frottement externe :** c'est le phénomène de résistance au déplacement relatif, qui naît entre deux corps dans les zones de contact de leurs surfaces suivant leur tangente.

Dans le cas du frottement externe, l'interaction se réalise généralement entre deux corps solides qui diffèrent par leurs structures et propriétés. C'est un phénomène dissipatif d'énergie mécanique.

Le frottement externe des corps solides a une nature double : mécanique et moléculaire. L'interaction des corps solides en contact se réalise dans des zones de contact réel distinctes et isolées l'une de l'autre. La vitesse de glissement dans les zones de contact réel varie par bonds (stick-slip).

**b) Le frottement interne :** c'est le phénomène de résistance au déplacement relatif des particules du même corps. Il prend naissance dans les corps solides, liquides et gazeux lors de leur déformation et conduit à la dissipation irréversible de l'énergie mécanique.

La similitude entre le frottement externe et le frottement interne consiste à ce que ces deux types de frottements sont des processus dissipatifs.

Le frottement interne se caractérise par l'interaction se produisant dans le volume d'un seul objet (corps solide, liquide ou gaz). L'interaction se réalise suivant toute la surface géométrique de la couche considérée. La vitesse du mouvement relatif des couches de la substance varie continuellement et suffisamment progressivement.

#### 2 - En fonction de la présence du mouvement relatif des corps

**a) Frottement statique (adhérence)** – frottement de deux corps pendant un déplacement microscopique (sans déplacement macroscopique).

**b) Frottement de mouvement** - frottement de deux corps se trouvant en mouvement relatif.

### 3- En fonction du caractère du mouvement relatif des corps en contact, on distingue les types de frottement suivants

a) Le frottement de glissement ;

Lors du frottement externe de glissement, la vitesse relative de tous les points des corps interagissant est la même.

b) Le frottement de roulement ;

Lors du frottement externe de roulement, on peut toujours indiquer un point dans la zone du contact, dans laquelle la vitesse de glissement est nulle.

c) Le frottement de pivotement ;

d) Le frottement de roulement avec patinage (glissement) ;

e) Le frottement pendant les déplacements vibratoires.

### 4- En fonction de l'état des surfaces de frottement on distingue :

a) **Le frottement sec** (frottement immédiat)

Le frottement sec, appelé aussi le frottement sans lubrification, est le frottement de deux corps (1) et (2) dans le cas d'absence, sur les surfaces de frottement, de matériau lubrifiant de n'importe quel type (fig.2.2,a).

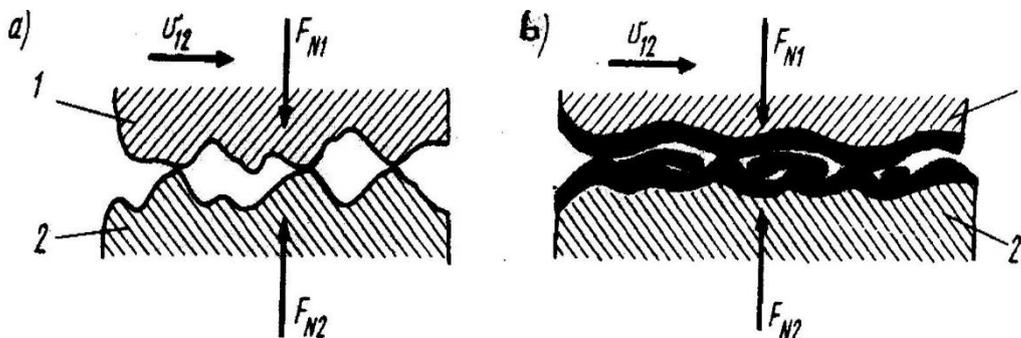


Fig 2.2 Schémas de frottement immédiat (a) et de frottement médiat (b).

b) **Le frottement avec lubrifiant** (frottement médiat)

C'est le frottement de deux corps (1) et (2) en présence, sur les surfaces de frottement, d'un matériau lubrifiant, introduit de n'importe quel mode (fig.2.3,b).

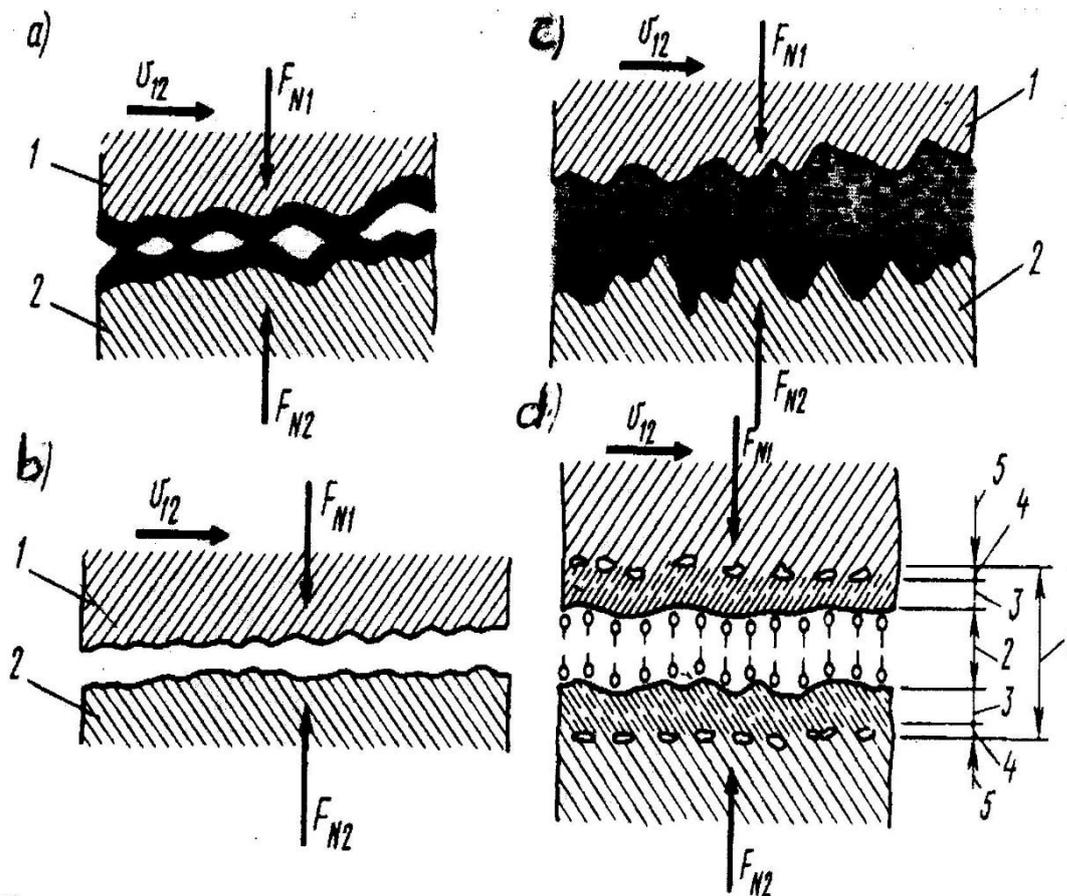


Fig 2.3 : Frottement médiat

L'amenée du matériau lubrifiant aux surfaces de frottement s'appelle la lubrification, et l'action du lubrifiant, dont le résultat est la diminution de la force de traitement entre les surfaces et leur intensité d'usure s'appelle le graissage.

On distingue trois types de lubrifiants : solides, liquides et gazeux.

### 5- En fonction de l'épaisseur du film lubrifiant et de la hauteur des aspérités des surfaces en contact

On distingue trois modes de frottement médiat :

- a) **Le frottement onctueux ou frottement limite, correspondant** au graissage solide ou onctueux)

Dans ce cas (fig.2.2,a), sur chaque surface l'épaisseur du film lubrifiant ( $e$ ) est inférieure à la hauteur moyenne de rugosité  $R_z$  ( $e < R_z$ ) ; une partie considérable de la charge normale est transmise par contact direct entre les surfaces de frottement, et une autre partie, plus faible, par le film d'huile.

- b) **Le frottement mixte** (graissage mixte) :

Dans ce cas ( $e = R_z$ ) ; la charge essentielle est transmise par la couche du lubrifiant.

Dans ces deux derniers cas il y a frottement gras et contact intermittent des surfaces. Chaque couche est appelée épilamen. La viscosité du fluide influe aux côtés des propriétés des matériaux en contact.

**c) Le frottement humide**, correspondant au graissage hydrodynamique ou hydrostatique

Dans ce cas ( $e > R_z$ ), le film d'huile (couche mince) supprime le contact direct des surfaces des corps solides et transmet toute la pression de contact (fig.2.2,b) .

Dans ce cas, le frottement a lieu entre les couches du film (frottement interne) et il est entièrement déterminé par la viscosité du lubrifiant, par conséquent dans ce cas les surfaces des corps solides ne s'usent pas.

**d) Le frottement élasto-hydrodynamique**

Dans ce cas les caractéristiques du frottement et l'épaisseur du film de lubrifiant entre les surfaces sont déterminées par les propriétés élastiques des matériaux des corps solides et la diminution automatique des contraintes l'écoulement, le poste effet élastique et les déformations résiduelles et irréversibles des matériaux des corps en contact.

Ce type de frottement se réalise lieu dans les cas de contact ponctuel (par exemple dans les roulements à bille) et linéaire (par exemple dans les engrenages).

## 2.2. LOIS ET CARACTERISTIQUES DU FROTTEMENT EXTERNE

### 2.2.1. Lois et caractéristiques du frottement de glissement sec (et onctueux)

Considérons l'interaction des corps solides lors du glissement.

Lors du frottement de glissement, l'interaction des corps solides est conditionnée par des processus, se déroulant dans des couches superficielles minces (d'épaisseur habituellement inférieur à  $10 \mu$ , plus rarement  $20 \mu$ ) de ces corps. Cette interaction peut se réaliser en absence de lubrifiant (frottement sec) ou en cas de frottement onctueux.

Même, en cas de frottement sec, entre les surfaces de contact s'interposent les couches adsorbées par ces corps, qui influent sur leur interaction (frottement).

Dans le cas de frottement onctueux, sur la surface de l'un des corps interagissant se trouve une pellicule du matériau lubrifiant d'une telle épaisseur, pour laquelle les propriétés de ce matériau diffèrent de ses propriétés dans le volume.

Lors du frottement externe se produit toujours le processus de déformation des couches superficielles minces des corps interagissant, pendant lequel leur continuité n'est pas rompue, et le processus de déformation des couches sous-jacentes est négligeable.

Le frottement externe dépend sensiblement des paramètres essentiels caractérisant la liaison de frottement (voir tableau I.1) :

- La nature des matériaux des corps en contact ;
- Le mode de contact des corps en contact ;

- L'état des surfaces, caractérisé par les propriétés physico- mécaniques des matériaux (HB, E,  $\nu$ ), les propriétés physico-chimiques ( $\mu_0$  et  $\beta$ ) et les caractéristiques géométriques des surfaces de contact ;
- Le milieu ambiant (tenant compte de la présence ou non d'un lubrifiant ou d'un liquide technologique à l'interface des corps de frottement ; la température de l'interface et autres facteurs).
- La charge normale appliquée aux surfaces du contact ;
- Le caractère et la vitesse du mouvement relatif des corps ;
- Température ;

### La force de frottement

Le frottement de glissement externe sec (et onctueux) se caractérise par **la force de frottement (la force de résistance au glissement relatif)** des corps en contact.

La force de résistance au glissement relatif est disposée dans le plan de contact des deux corps solides et représente la résultante des forces de frottement élémentaires, qui naissent dans des zones de contact réelle des aspérités isolés :

**La force de frottement de glissement** est dirigée contrairement au sens du mouvement relatif des corps en contact. La force de frottement est une force non conservatrice.

On distingue la force de frottement statique, la force de frottement statique incomplète et la force de frottement de glissement. En effet, il est expérimentalement établi que lors du déplacement relatif des corps en contact, la force de frottement s'accroît avec l'augmentation du déplacement d'un corps par rapport à un autre jusqu'à une certaine valeur, puis subitement devient constante et indépendante du déplacement ou bien diminue jusqu'à une certaine valeur indépendante aussi du déplacement (fig 2.4).

Le déplacement ( $\delta$ ) entre les corps solides pour lequel se produit la variation de la force de frottement (force de frottement statique s'appelle le déplacement préalable. Ce déplacement est microscopique.

La force de frottement maximale correspondante au déplacement préalable, s'appelle force de frottement statique  $T_s$ .

La force de frottement inférieure à la force de frottement statique, dépendante du déplacement ( $x < \delta$ ), s'appelle la force de frottement statique incomplète la force du frottement  $T_{si}$

La force de frottement correspondante au glissement ininterrompu entre les corps solides interagissant et indépendante des déplacements, s'appelle la force de glissement T.

### Le coefficient de frottement

Le coefficient de frottement est le rapport de la force de frottement à la force normale aux surfaces de frottement (ou la composante normale de la force agissant sur ces surfaces).

Le coefficient de frottement est exprimé par la relation :

$$f = T/N$$

Où  $T$  : force de frottement ;  $N$  : la force normale aux surfaces de frottement

Actuellement, au stade de conception des machines, il est rationnel d'estimer les caractéristiques tribologiques, en particulier le coefficient de frottement, des différents couples de matériaux des jonctions de frottement afin de choisir parmi ces couples ceux qui sont les plus adéquats. Dans les jonctions où le frottement est nuisible, par exemple les paliers, les couples de matériaux les plus adéquats sont ceux qui conditionnent le frottement et l'usure les plus réduits que possible. Dans les jonctions où le frottement est utile, par exemple les freins, les couples de matériaux les plus adéquats sont ceux qui conditionnent le frottement le plus élevé, avec l'usure la plus réduite que possible. Il est évident que d'autres considérations (par exemple les considérations économiques, environnementales,) rentrent en ligne de compte pour le choix des matériaux.

COULOMB a proposé la formule suivante :

$$f = K + A_o / N$$

Où  $K$ : coefficient dépendant des propriétés des surfaces des corps interagissant ;

$A_o$ : l'adhérence (force d'adhérence) entre ces surfaces.

On entend par la surface de frottement la surface nominale du corps solide, sur laquelle se réalise l'interaction des corps solides lors du frottement externe.

Pendant le processus de frottement se déroule la transformation du travail des forces extérieures essentiellement en chaleur, et l'interaction de forces provoque la destruction des couches superficielles des pièces des couples cinématiques, ce qui conduit à leur usure.

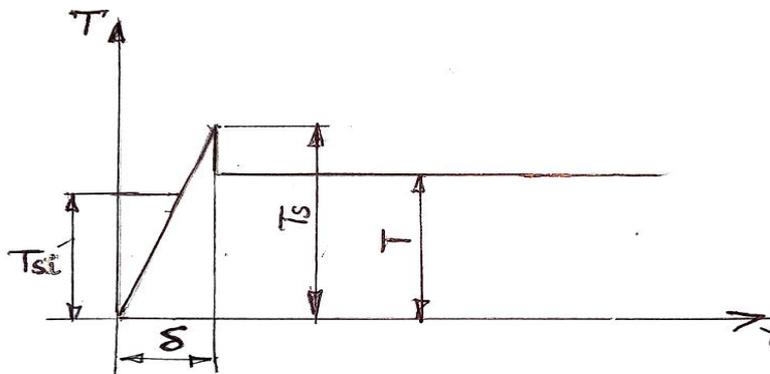


Fig 2.4 : Variation de la force de frottement  $T$  en fonction du déplacement  $X$  [FRO 87].

Dans le cas de frottement de corps de rotation (butée axiale, butée radiale, crapaudine, lien flexible sur poulie) pour caractériser le frottement de glissement des corps en contact, on utilise le moment des forces de frottement [NIC 64].

**Remarque :** Le frottement d'un lien flexible sur une poulie sera appliqué au chapitre 4.

### 2.2.2. Lois et caractéristiques du frottement de roulement

Il est généralement très faible, et dû aux micro-glissements et surtout à l'énergie de déformation élastique non restituée. En effet, lorsqu'un corps roule sur un autre corps (roulement à aiguilles, à billes, à roulement... etc.).

Il existe presque toujours une déformation, au moins élastique, dans la zone de contact, qui est à l'origine d'un léger glissement d'une part, d'autre part, cette même déformation (due aux forces qui rapprochent les surface) s'observe à chaque instant dans une région différente, et les compressions et décompression successives engendrent dans les matériaux même, une sorte de frottement interne avec la production de chaleur correspondante. Cette énergie est évidemment perdue et la présence d'un lubrifiant ne change rien au phénomène, ceci explique pourquoi le film lubrifiant, qui réduit fortement l'usure, n'a guère d'influence sur le frottement de roulement lui-même (tab.II.1).

Tableau II.1 : Quelques valeurs du coefficient de frottement de roulement avec et sans influence de la lubrification.

	Coefficient de frottement
Rouleau sur plan (roulement pur)	0.001 – 0.00001
Rouleau à billes sans lubrification	0.01 – 0.001
Rouleau à billes lubrification	0.01 – 0.001

Les valeurs contenues dans ce tableau montrent que le lubrifiant n'améliore guère le frottement, mais réduit fortement l'usure.

### 2.2.3. Valeurs types du coefficient de frottement (facteur de frottement)

Les valeurs ci-après sont des ordres de grandeur, obtenues dans des conditions expérimentales bien définies. Un léger changement dans ces conditions peut provoquer de grandes variations du facteur de frottement. Ainsi, lorsque la vitesse de glissement augmente, la chaleur de frottement peut provoquer un amollissement, ou même la fusion des couches superficielles, et par conséquent un changement considérable du facteur de frottement, tout comme la présence d'une très petite quantité de produits polaires.

Le facteur de frottement est souvent d'un accès très difficile sur une machine en vraie grandeur, malgré son intérêt pour les économies d'énergie. Au contraire, le taux d'usure est à la fois beaucoup plus sensible et beaucoup plus accessible.

## Chapitre 02 : Frottement des corps solides

Ainsi, en lubrifiant avec un sensible gras des surfaces en acier, initialement propres, le facteur de frottement peut passer de la plage 0.4 à 1. À la plage 0.05 à 0.1 alors que, dans le même temps, l'usure peut devenir 1000 à 10000 fois plus petite, cependant, il faut souligner que facteur de frottement et le taux d'usure sont souvent deux variables largement indépendantes, et que l'usure ne peut être exprimée, en fonction du frottement dans tous les cas de figure.

Tableau II.2 : Valeurs du coefficient de frottement en fonction des matériaux et de l'état des surfaces des corps en contact.

Matériaux	Coefficient de frottement	Commentaires
Métal sur lui-même <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dans le vide</li> <li>• Dans l'air</li> </ul>	2 à > 10  0,4 à 1,5	Dans de nombreux cas, il y a même grippage généralisé immédiat.  Les faibles valeurs correspondent soit aux métaux durs, soit encore à certains métaux oxydés.
Acier dur dans l'air contre <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plomb</li> <li>• Fonte</li> <li>• Métal Blanc à base d'étain</li> <li>• Métal Blanc à base de plomb</li> <li>• Bronze</li> <li>• Cuivre - plomb</li> </ul>	1.02 0.4 0.8 0.5 0.3 0.2	Ces valeurs correspondent à des charges faibles (< 10N) et à des vitesses de glissement de l'ordre de quelques millimètres par seconde, donc sans effet sensible de la chaleur de frottement.
Acier sur acier <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sous vide</li> <li>• Exposé à l'air sec</li> <li>• Exposé à l'air humide</li> <li>• Nettoyé à benzine</li> <li>• Nettoyé à l'alcool</li> <li>• Nettoyé à l'acétone</li> </ul>	Grippage 0.8 0.6 0.5 0.5 0.45 0.35	Ces valeurs montrent l'effet considérable des contraintes : gaz adsorbés, vapeur d'eau, film d'oxydes, traces de graisses...etc.
Sur acier dur en présence d'huile minérale <ul style="list-style-type: none"> <li>Plomb</li> <li>Fonte</li> </ul>	0.5 0.2	Valeurs obtenues en régime de lubrification limite

Métal Blanc a bas de plomb	0.1 – 0.08	Effet net des matériaux anti-friction
Métal blanc a bas d'étain	0,1 – 0.08	
Bronze	0.16	
Acier sur acier avec huile minérale comportent des corps polaires (acides gras)	0.1 – 0.05	Même résultats obtenus avec certaines huiles de synthèse lubrification limite
Métaux durs recouverts avec une fine couche de métal doux (plomb sur acier) mais sans autre lubrifiant	0.2 – 0.08	Même résultats obtenus avec du graphite ou du bisulfure de molybdène a la place du plomb
Le glissement relatif des surfaces permet l'introduction d'un film fluide qui les sépare complètement	0.01 – 0.001	Lubrification hydrodynamique
Le film fluide séparent les surfaces est produit par une source de pression extérieur	0.001 – 0.000001	Lubrification hydrostatique la valeur du facteur de frottement dépend alors beaucoup des paramètres de fonctionnement de la machine température et jeu notamment.

### 2.3. MECANISME DU FROTTEMENT ENTRE SURFACES METALLIQUES

#### 2.3.1. Surface réelle de contact

Toute surface métallique, même celle qui paraît plane, présente généralement une certaine rugosité. L'importance des irrégularités de surface, très difficiles à définir, dépend, par exemple, du mode d'usinage, la surface réelle d'une pièce en métal, usée par abrasion, peut être deux à trois fois plus grande que l'aire apparente. En revanche, comme le contact entre deux surfaces planes, réunies par une certaine charge, se présente seulement aux sommets des aspérités (voir chapitre 1).

La surface réelle de contact  $A_r$ , égale à la somme des aires de contacts élémentaires ( $A_r = \sum A_{ri}$ ), peut être beaucoup plus petite que l'aire apparente de contact  $A_a$ .

L'aire réelle de contact  $A_r$ , croît avec la pression de contact.

#### 2.3.2. Déformation des aspérités

L'aire réelle de contact dépend en fait de la charge et non de l'aire apparente de contact. Lorsque la charge croît, les surfaces se rapprochent : on observe de nouveaux contacts élémentaires et la croissance des contacts existants. Chaque contact se déforme élastiquement, lorsqu'il supporte une faible charge, et plastiquent lorsque la charge croît au-delà d'une certaine valeur.

Dans ce dernier cas, la relation, entre la déformation plastique d'une aspérité et la pression qu'elle subit, est de même nature que celle existant lors d'une mesure de dureté par indentation (dureté BRINELL par exemple) :

$$P(\text{dureté}) = P(\text{charge}) / A(\text{aire})$$

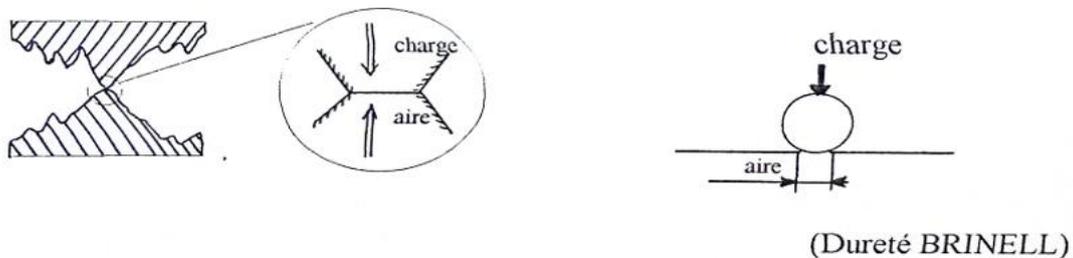


Fig 2.5 : Déformation plastique des aspérités

### 2.3.3. Nature du frottement solide

Au contact si les surfaces sont propres (sans aucun contaminant), les atomes de l'une attirent les atomes de l'autre et produisent ainsi une très forte adhésion.

Pour les métaux on peut parler soit de soudure froide, soit de soudure chaude ou métallurgique, et quand les surfaces glissent, l'usure sur l'autre, les jonctions ainsi formées doivent être cisailées. La force résistante ainsi développée à l'interface constitue souvent l'essentiel de la force de frottement. Si d'autre part une surface est plus dure que l'autre, ses aspérités pourront creuser des petits sillons dans la surface plus tendre, on pourra donc écrire l'équation :

Force de frottement = force de cisaillement des jonctions + force de rayage.

En frottement sec, l'adhérence prédomine largement, alors que la force de rayage peut être assez importante en frottement lubrifié.

La force  $F$  de cisaillement des jonctions peut être estimée, si l'on connaît l'aire réelle de contact  $A_r$  et la résistance au cisaillement  $\tau$  des aspérités :

$$F = \tau \cdot A_r$$

Comme l'aire réelle de contact  $A_r$  est, en gros proportionnelle à la charge  $w$  et indépendante de l'aire apparente, le frottement  $F$  sera aussi proportionnel à la charge

### 2.4. FACTEURS INFLUENÇANT LE FROTTEMENT

L'expérience montre que le frottement dépend surtout des points suivants :

#### 2.4.1. De la nature des corps en contact

Matériaux plus ou moins homogènes à l'état cristallin ou amorphe, dureté des surfaces en contact et des couches sous-jacentes. La résistance à l'usure dépend aussi de ces facteurs

#### 2.4.2. De l'état de surface résultant du procédé de fabrication

On distingue principalement :

- État brut de fonderie ou de forage : convient seulement pour des contacts de repos ;
- État brut de laminage ou d'étirage : intervient dans les aciers profilés les tubes les tôles, etc. Les surfaces sont suffisamment propres pour permettre des contacts satisfaisants sans usinage complémentaire. La pellicule de calamine ou de rouille provenant du travail à chaud empêche le mouvement des pièces dans des conditions acceptables sauf dans des rares exceptions ;
- Produit semi-finis travaillés à froid : tels les aciers étirés ou travaillés à basse températures. La précision dimensionnelle est de l'ordre dixième de mm pour les cotes transversales. La régularité de la surface permet le frottement de pièces mobile sans usinage supplémentaire dans les constructions économiques. L'étendue des surfaces en contact doit rester limitée si la répétition de la pression spécifique ne doit pas trop varier.
- Fonderie de précession, traitement de laminage ou d'étirage de précession : ils permettent d'obtenir de meilleurs contacts, mais non d'excellents conditions de frottement des surfaces mobiles.

En règle générale un usinage des surfaces est nécessaire. L'ébauchage ou le dégrossissage laisse des traces d'outils nettement visibles à l'œil nu ; la profondeur des sillons est encore importante pour les déplacements usuels. Pour les pièces mobiles il faut prévoir le fini normal ou plus fréquemment le fini soigné.

Les degrés d'usinages varient suivent les moyens utilisés ; les normes en vigueur prescrivant les états de surface au moyen de symbole normalisés.

- Autre procédé de fabrication : usinage de haut précession et haute finition comme le rodage, le polissage, le honing, le rasage, la super finition, etc. Ces modes de fabrication nécessitent des machines spéciales et un outillage approprié. Les procédés de fabrications par déformation de la matière comme l'emboutissage, le pliage, le reliage, etc., permettent de fabriquer des pièces à partir de profilés.

#### 2.4.3. Du procédé et du degré de lubrification

Les deux corps frottent directement l'un sur l'autre dans le frottement sec. Les aspérités des surfaces sont seules en contact ; les pressions locales peuvent devenir très élevés et dépasser les limites élastiques des matériaux.

La rugosité du matériau le plus tendre diminue habituellement, celle des matériaux le plus dur s'atténue moins vite.

La lubrification a pour but d'éviter la soudure des pièces métalliques et d'abaisser les forces de frottement entre les corps par l'introduction d'une substance lubrifiante.

Le lubrifiant est constitué par :

- Un solide en poudre comme le graphite colloïdal, le sulfure de molybdène mélangé habituellement à une graisse ou à l'huile minérale, le suif, le talc, sous forme de composé chimique sur la surface des pièces en mouvement (par exemple le traitement de surface sulfureuse).
- Un liquide comme l'eau dans des cas spéciaux, par exemple dans les paliers en caoutchouc des pompes à eau, les huiles animales ou végétales qui possèdent une excellente onctuosité, mais une stabilité chimique insuffisante ; les graisses lubrifiantes qui se liquéfient sous l'effet de la pression de contact ; les huiles synthétiques présentent des caractéristiques intéressantes dans des conditions d'utilisation particulièrement délicates ;
- Un gaz comme l'air ou ses composants, les brouillards d'huile pour des très grandes vitesses ou lorsque la présence d'un liquide n'est pas conseillée.

### **2.5. VOIX DE DIMINUTION DU COEFFICIENT DE FROTTEMENT**

- Améliorer la lubrification.
- Diminuer l'aptitude à l'adhésion.
- Lorsque l'on recouvre une surface dure d'un film plus tendre anti-adhésion, le film doit être le plus mince possible.
- Compacter les couches superficielles par des opérations comme le galetage ou le brunissage.
- A la plus petite longueur cinématique doit être affecté le matériau le plus tendre
- Si les rugosités sont alignées en « traits » sur les surfaces leur doit être rapprochée d'une direction perpendiculaire à celle du déplacement.
- En régime onctueux ou limite on doit améliorer le poli et la conformité des surfaces.

## **CONCLUSIONS**

1. L'étude des généralités sur le frottement des corps solides a permis de donner la définition du frottement et de son importance pour la nature et les machines, mais aussi de présenter les différents types de frottements en fonction de divers critères (nature physique, état de repos ou de mouvement, caractère de mouvement, état des surfaces,).

2. La recherche bibliographique effectuée sur les lois et caractéristiques du frottement externe des corps solides concerne quelques lois et caractéristique (force et coefficient) connues du frottement de glissement et permet de dégager le niveau d'influence des principaux paramètres déterminant ce phénomène.

3. La recherche bibliographique effectuée sur les mécanismes du frottement (déformations, ruptures des liaisons moléculaires des surfaces de contact) et l'influence des divers facteurs qui les déterminent, aide à mieux comprendre la nature du frottement externe et les causes des phénomènes qui l'accompagne (échauffement et usure des surfaces ; autres) et d'indiquer les voies de sa réduction ou son augmentation.

**CHAPITRE 3**  
**ETUDE ET CONTROLE DE L'USURE DES CORPS SOLIDES**

## **INTRODUCTION**

Dans ce chapitre nous allons principalement considérer quelques aspects fondamentaux de l'usure des corps solides, particulièrement dans le cas du frottement externe.

### **3.1. DEFINITION ET SIGNIFICATION DE L'USURE**

Le phénomène d'usure est le processus de détachement du matériau de la surface d'un corps solide pendant le frottement et/ou l'augmentation de sa déformation permanente, se manifestant à travers le changement progressif des dimensions et/ou de la forme du corps.

En langue française, le résultat de l'usure est aussi appelé usure. Dans ce cas l'usure est déterminée par des unités établies (la valeur de l'usure peut s'exprimer en unité de longueur, masse et autres).

Pendant le processus d'exploitation des éléments de mécanismes et de machines, il se produit inévitablement l'usure des éléments des couples cinématiques. L'usure diminue la résistance et la précision des mécanismes, augmente les charges sur les paliers, ainsi que les vibrations et le bruit. Souvent l'usure diminue l'aptitude au travail des mécanismes et peut conduire même à la rupture des pièces et la mise hors service de la machine.

Le phénomène d'usure est l'une des conséquences du frottement. On estime que 2/3 des défaillances dans le domaine de l'industrie mécanique sont dues à l'usure [GRA 08].

Pour cela, lors de l'élaboration de projet de construction des éléments de machines, il est important de prendre toutes les dispositions permettant de résoudre les problèmes liés à l'usure des éléments de frottement des machines, et par conséquent la garantie de la fiabilité et la durabilité des machines :

Il s'agit de :

- Connaître la forme et l'aire de la surface de frottement, déterminer l'épure de l'usure, afin de faire le choix convenable des matériaux de construction et la lubrification.
- Effectuer toutes les analyses étayées par les calculs nécessaires permettant d'assurer la résistance à l'usure et la durabilité des éléments de machines, en plus des calculs de résistance et de rigidité de ces éléments
- Déterminer les pièces et jonctions qui exigent le remplacement ou la réparation plutôt que les autres.
- Quant à la surveillance de l'usure des mécanismes pendant l'exploitation permet de préciser les lois de dégradation, les programmes, procédés et régimes de réparation des pièces de machines sujettes à l'usure.

### 3.2. MECANISMES ET TYPES D'USURE

L'usure des couches superficielles des corps solides est conditionnée par les interactions et les processus (mécanismes) qui se déroulent dans les zones de contact réel des corps solides sur les surfaces de contact pendant le frottement (voir fig. 3.1) [KRA 84].

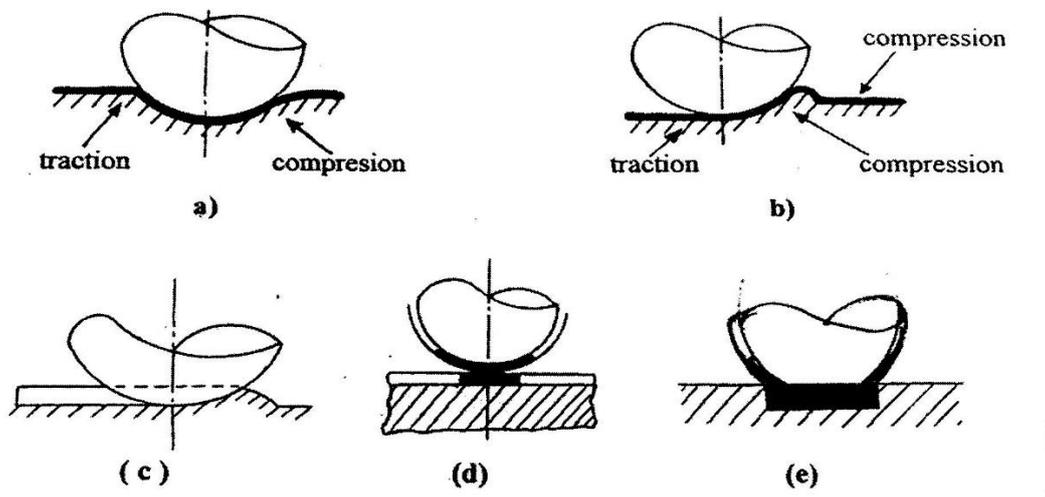


Fig 3.1 : Types d'interaction des surfaces de frottement [KRA 84].

a) déformation élastique, b) déformation plastique ; c) micro-usinage ; d) adhésion et destruction des films superficiels ; adhésion et détachement profond de métal (grippage).

#### 3.2.1. Mécanismes de l'usure

Selon CAUBET J.J. [CAU 64], Il y a tout un ensemble de phénomènes de vieillissement aboutissant, avec une vitesse variable selon les périodes, à la destruction des états de surfaces, où l'on peut distinguer six grandes familles : l'accommodement des aspérités superficielles ; les ruptures et arrachements des soudures ; les consommations chimiques ; l'abrasion par les copeaux et débris ; la corrosion ; l'écrouissage.

Considérons ces phénomènes (mécanismes d'usure), tels que décrits par CAUBET J.J. [CAU 64].

##### 1) Le coup de râpe initial

C'est le premier stade de fonctionnement de deux pièces en frottement ; il s'agit de l'accrochage des aspérités respectives des surfaces : elles sont arasées, déchiquetées jusqu'à ce qu'il y ait eu augmentation des surfaces effectives et du contact et une répartition suffisante de la charge.

C'est la période la plus difficile du rodage, les effets dynamiques des chocs entre aspérités, les effets thermiques d'échauffement y sont les plus graves ; il faut ajouter l'émission d'une grande quantité de copeaux, éléments d'abrasion pour les aires de contacts voisines ; lorsque les surfaces sont revêtues d'un manteau protecteur, c'est la période où il subit les plus grandes et les plus fréquentes déchirures.

### 2) La rupture des micro-soudures

Dans le cas favorable d'un frottement par cisaillement, les micro-soudures aussitôt formées rompues à l'interface même ; ceci ne détache des corps en présence, ne met en liberté dans le lubrifiant ou dans l'ambiance, qu'une quantité minime de matière ; mais s'il s'agit d'un frottement par soudure, il faut s'attendre à un transfert de métal, molécule par molécule sur la face frottant du corps le plus dur. Il y a « usure » du corps le plus tendre.

### 3) La consommation de l'interface

Chaque fois que sous l'effet d'une pression partielle trop forte, d'une aspérité trop exiguë, les métaux nus arrivent en contact , il y a eu déchirement et consommation des manteaux protecteurs, oxydes, savons, etc, à moins qu'il ne s'agisse des sels métalliques ( sulfures, chlorures, phosphures, etc), qui se forment à partir d'un dope extrême pression; le manteau protecteur va, dans ce cas, se reformer d'autant plus vite que la majeure partie de ces corps possèdent un coefficient de frottement croissant avec la vitesse , et avec des éléments de l'ambiance , et avec des éléments du métal; cette consommation est elle-même une forme d'usure.

### 4) L'abrasion par les copeaux et débris

Les matériaux mis en liberté, par exemple les copeaux et les débris divers créés par le coup de râpe initial, sont des éléments d'abrasion ; à leur tour ils recréent des copeaux, s'incrustent au hasard des accidents macro géométriques ou des plages molles de la structure, s'écrouissent totalement, voire subissent une trempe, bref acquièrent souvent une dureté très supérieure aux matériaux en présence.

### 5) L'écrouissage

L'écrouissage est provoqué par les contraintes normales rythmées et par sollicitations tangentielles; il se marque , d'une part par des glissements à l'intérieur des grains , d'autres part par la rotation de ces grains qui s'usent à leur interface propre, enfin par les déformations permanentes et même les facteurs qui peuvent intervenir dans la zone des points à cisaillement maximal; ces phénomènes aboutissent par exemple à la fatigue des coussinets en bronze, qui se révèle par des craquelures à la surface, ressemblant un peu à la vieille porcelaine; ils peuvent également revêtir des formes aiguës de lésions profondes , comme le pitting des engrenages.

De nombreux auteurs ont étudié en particulier l'action du frottement sur l'équilibre austénite-martensite ; il semble acquis que :

- L'usure reste à peu près sans changement durant la recherche du nouvel équilibre si les charges sont faibles ;
- L'usure passe par un maximum d'intensité à la fin de la transformation de l'austénite résiduelle ;

- Ce point coïncide avec le maximum de micro-dureté de la structure naissante, indiquant un état aigu de contraintes latentes.

### 6) La corrosion de contact (fretting - corrosion)

L'usure n'est pas le fait exclusif des frottements à grands mouvements relatifs, il existe également une autre forme de destruction des surfaces, causée par petits mouvements de forme vibratoire pouvant n'avoir qu'une très faible amplitude mais des charges et fréquences élevées.

Lors de la corrosion de contact, il se forme à l'interface des oxydes qui, dans les cas de métaux ferreux prennent la forme d'un matériau rougeâtre, pulvérulent, d'aspect tout à fait caractéristique ; comme l'exiguïté du mouvement ne permet pas la mise en liberté vers l'ambiance de cette poussière, il s'ajoute à la corrosion du contact une abrasion qui va en s'accroissant et en fait un accident irréversible et sans appel; on peut par exemple observer de tels phénomènes lorsque des accouplements à cannelure sont montés sur des machines à des vibrations .

### 3.2.2. Types d'usure

Il existe plusieurs types d'usure dont les plus répandus sont : l'usure par abrasion, l'usure adhésive, l'usure par fatigue, l'usure corrosive. Considérons ces types d'usure, mais aussi d'autres types affectant les équipements pétroliers.

Chaque type d'usure se déroule suivant un ou quelques mécanismes examinés précédemment.

#### 1) L'usure mécanique

L'usure mécanique est l'usure due aux interactions mécaniques (abrasion, destruction fragile).

#### 2) L'usure par abrasion (usure abrasive)

C'est une usure mécanique résultant de l'action de coupe ou de rayage d'une surface par des aspérités dures (abrasion à deux corps) ou par des particules solides incrustées entre les surfaces de frottement (abrasion à trois corps). Ainsi, on distingue trois types d'usure abrasive :

- abrasion par coupe, lorsque les particules sont grosses et entraînent la formation de micro-copeaux ;
- érosion abrasive, lorsque les particules sont petites.
- hydro-abrasion (gazo-abrasive) lorsque les particules sont véhiculées par un liquide (gaz), comme par exemple l'hydro-abrasion remarquable du tube d'usure de la tête d'injection de la boue de forage pétrolier.

Avec l'augmentation de la granulométrie des particules solides et la pression, celles-ci affectent d'une façon plus intense la surface des pièces, et la profondeur d'usure s'accroît. Si

les particules abrasives sont soumises à des pressions considérables et se déplacent à des vitesses élevées, les couches superficielles des pièces de frottement sont fortement échauffées ; il se produit des décollements et la pièce sera détériorée.

L'usure abrasive n'est pas une usure normale, d'où il faut, dans la mesure du possible, prendre les dispositions pour la combattre.

### 3) L'usure adhésive (usure de grippage)

L'usure adhésive est une usure mécano-moléculaire résultant de l'adhésion (collage), le détachement profond du matériau, son transfert d'une surface à l'autre et l'action des saillies naissantes sur la surface conjuguée.

Le grippage provient nécessairement du contact métal / métal prolongé qu'il s'agisse de la charge dépassant la résistance à la rupture du film lubrifiant, d'une insuffisance de débit du lubrifiant, ou d'une absence (temporaire ou non) du lubrifiant. A son début, ou plus exactement si le phénomène ne se manifeste que sur une très courte période, le grippage peut être sensiblement limité au grippage épidermique (formation de petits fragments d'oxydes métalliques), mais le plus souvent, on constate l'altération plus au moins profonde de l'état de surface (formation de gros fragments d'usure métallique souvent accompagnée de phénomène d'oxydation et d'écrouissage - grippage sévère).

Le mécanisme exact des grippages est encore mal connu. Bien entendu le classement par simple examen visuel ne peut se faire que pour des grippages pris tout à leur début et pour des surfaces qui n'ont pas eu le temps d'être complètement défigurées; à ce moment un grippage du premier genre se reconnaît aisément à des sillons labourés dans les métaux, parallèlement au sens du mouvement, sillons qui vont en s'élargissant et ont parfois pour origine une aire très exiguë et quasi ponctuelle ; dans le second cas le grippage n'a pas cet aspect divergent et l'on observe des descellements successifs comparables à des écailles de poisson.

### 4) L'usure par fatigue

L'usure par fatigue est une usure mécanique résultant de la destruction par fatigue dans le cas de déformation répétée des micro volumes du matériau de la surface de frottement (enlèvement de particules détachées par fatigue mécanique superficielle produite par accumulation de contraintes cycliques).

L'usure par fatigue peut apparaître lors du glissement comme lors du roulement, mais apparaît en particulier lors du frottement de roulement ou de roulement avec patinage, lorsque le contact est ponctuel.

L'usure par fatigue est le type d'usure le plus caractéristique au régime de travail normal de la plupart des assemblages mobiles.

### 5) L'usure mécano - corrosive

L'usure corrosive est une usure mécano-corrosive résultant de l'interaction chimique ou électrochimique de l'un des matériaux conjugués avec le milieu ambiant, suivi par

l'enlèvement des produits de réaction par action mécanique (frottement), peut être considérée comme une usure normale.

La destruction prématurée est motivée par la fatigue et la rupture fragile du métal des pièces, une telle usure se manifeste tout particulièrement sur les pièces soumises à un régime d'alternance des charges.

L'application des revêtements anticorrosifs, un choix convenable des matériaux respectifs, ainsi qu'une qualité satisfaisante des surfaces des pièces permettent de réduire l'usure corrosive.

**L'usure par oxydation** est un cas particulier de l'usure mécano-corrosive, conditionnée par la réaction chimique du matériau avec l'oxygène ou un milieu oxydant.

### **L'usure de contact - fretting wear, en anglais**

L'usure de contact est une usure mécanique des corps en contact pendant le micro déplacement relatif alternatif.

### **6) usure par corrosion de contact**

L'usure par corrosion de contact est une usure **mécano - corrosive** de corps solides en contact dans le cas de petits déplacements relatifs alternatifs.

### **7) L'usure par cavitation (usure cavitationnelle)**

L'usure par cavitation est une usure mécanique, qui apparaît pendant le déplacement d'un corps relativement à un fluide, lorsque les particules de gaz implosent à côté de la surface, ce qui crée une haute pression de choc locale ou une haute température (phénomène de cavitation).

Le cas le plus général est **l'usure abrasive-cavitationnelle**, qui apparaît par suite de l'action combinée de l'abrasif, contenu dans le liquide et des phénomènes de cavitation. Ce dernier type d'usure a lieu dans les conduites de pompage de fluides, des pompes, des paliers de roulement travaillant dans les conditions hydrodynamiques, c-à-d dans le cas où peuvent apparaître des propriétés volumiques des fluides.

Dans les conditions de frottement externe ou de graissage limite, ce type d'usure est peu probable.

### **8) L'hydro-érosion**

Usure de surface de corps solide résultant de l'action d'un courant de fluide ou de gaz.

**Remarques importantes :**

Dans les assemblages mobiles des machines souvent a lieu une usure complexe, càd comprenant quelques-uns des types susmentionnés.

Dans les assemblages mobiles travaillant dans les conditions de lubrification limite [KHE 89], l'usure la plus répandue est l'usure absorptive-corrosive-de fatigue. L'usure de fatigue et l'usure mécano-corrosive représentent des cas particuliers de cette usure complexe.

**3.3. PHASES D'USURE DES PIECES DE FROTTEMENT DE MACHINES**

En général, on distingue trois phases d'usure d'une pièce soumise au frottement (fig.3.2), qu'on appelle communément : la phase de rodage ; la phase de marche normale et la phase de vieillissement ou d'usure rapide.

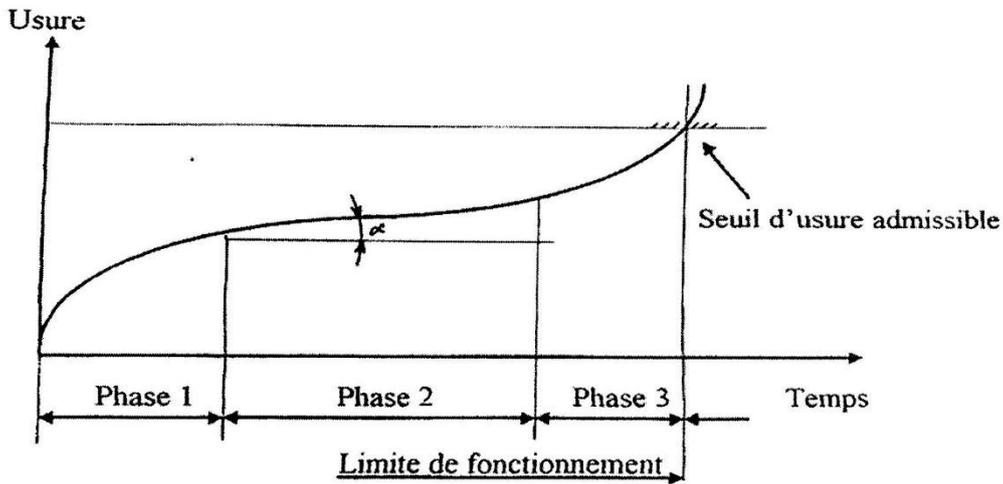


Fig 3.2 : Allure de la courbe d'usure en fonction de temps

Ces phases d'usure peuvent être présentées comme suit [GRA 08]:

**3.3.1. La phase de rodage**

Pendant lequel l'usure, sensible au début, diminue progressivement à mesure de l'accommodement des surfaces, sans compromettre le fonctionnement, sous réserve de prendre des précautions : mise en vitesse et mise en charge progressives, surveillance de l'échauffement, graissage plus abondant que la normale. L'état de surface s'améliore du fait de la réduction progressive des rugosités (fig.3.3).

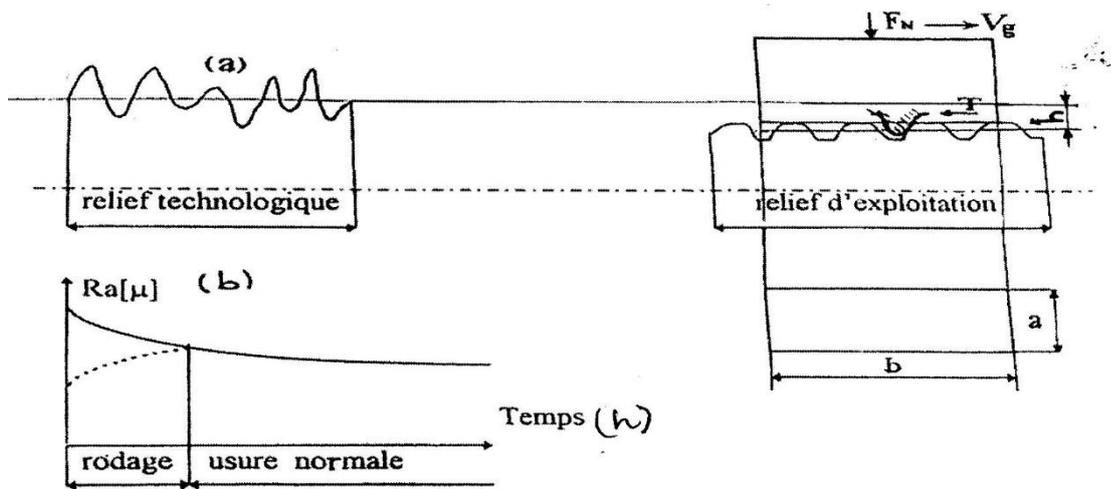


Fig 3.3 : Schémas d'usure [FRO 87]

- a) Modification de la topographie des surfaces de frottement ; b) Variation de paramètre de rugosité ( $R_a$ ) avec le temps

Il y a modification des jeux d'origine, du fait de la réduction des aspérités ; Ces modifications dépendent directement des états de surfaces initiaux. Dans le cas des machines-outils, la conception comme l'usinage initial doivent permettre le minimum de variation des jeux existants au départ. Il est possible de faciliter le rodage, Soit en prévoyant des états de surfaces corrects avant mise en route, soit en effectuant avant montage un prétraitement de surface avec un lubrifiant solide ; la durée du rodage en sera diminuée. Il en est de même dans le cas surfaces transformées par traitement thermochimique ou électrochimique.

### 3.3.2. La phase de marche normale

Pendant laquelle l'usure doit être très faible, et demeurer sensiblement constante.

### 3.3.3. La phase de vieillissement

Cette phase est plus ou moins rapidement atteinte, selon les valeurs des contraintes admises lors du calcul du mécanisme, pendant laquelle l'usure va commencer à croître jusqu'à ce qu'elle compromette le bon fonctionnement ou le rendement mécanique global, sous les effets conjugués de la fatigue des métaux et des jeux accrus.

La durée de cette phase sera fonction du système de remplacements périodiques envisagés dans le plan de maintenance. Il est évident que, dans le cas d'un élément mécanique dont la défaillance signifierait une forte perte pour l'entreprise, les dispositions doivent être prises, au départ pour que le délai d'usure normale couvre largement la période entre deux arrêts volontaires.

## 3.4. CARACTERISTIQUES DE L'USURE

Pour la caractérisation de l'usure des surfaces de frottement on utilise divers paramètres: l'épaisseur de la couche du matériau détruit ( $h$ ), la masse, la vitesse d'usure, les intensités intégrales d'usure et autres.

### 3.4.1. La vitesse d'usure

Elle est déterminée par la valeur de l'usure linéaire ( $h$  – épaisseur de la couche usée, en  $\mu\text{m}$  ou  $\text{mm}$ ) dans l'unité du temps (heures ou nombre de cycles) :

$$\gamma = dh / dt = k p_a^m v_g^n \quad (3.1)$$

Où  $k$  : coefficient d'usure (numériquement égal à  $\gamma$  lorsque  $p_a = v_g = 1$ );

$p_a$ : pression apparente dans le point recherché (considéré) de la surface du frottement;

$v_g$  : vitesse de glissement relatif au point recherché de la surface de frottement ;

$m$  : indice ou degré, dépendant du type d'interaction des surfaces agissantes ( contact élastique, contact plastique, micro usinage ), sa valeur oscille entre 1 et 3;

$n$  : indice de puissance , dépendant du type d'usure. Pour les éléments rodés des couples cinématiques  $m = 1$ ,  $n = 1$ , et alors :

$$\gamma = \frac{dh}{dt} = k p_a v_g \quad (3.2)$$

Souvent pour un type d'usure donné  $n = 1$ .

Le sens physique de cette formule peut être expliqué par l'exemple suivant : : soit un coulisseau de dimensions  $a \times b$  pressé contre une glissière par la force  $F_n$ ; le coefficient de frottement de glissement  $f$ ; la pression spécifique dans n'importe quel point de la surface de frottement  $p_a = F_n / a.b = \text{const.}$

Le travail de la force de frottement  $F_t$  sera dépensé à la destruction et l'arrachement du métal et l'émission de chaleur, pour cela approximativement on peut considérer, que la vitesse d'usure est proportionnelle au travail de la force de frottement dans l'unité du temps, c'est-à-dire la puissance du frottement  $P_t$  :

$$\gamma = \frac{dh}{dt} = \frac{k}{abf} F_n f v_g = c F_t v_g = c P_t \quad (3.3)$$

Où  $c = \frac{k}{abf}$  - coefficient de proportionnalité.

Dans le cas général la pression apparente  $p_a$  dans les différents points de la surface de frottement est différente, mais cette interprétation de la formule (3.2) peut être donnée à n'importe quelle surface élémentaire avec comme centre le point donné de la surface de frottement.

### 3.4.2. Les intensités intégrales d'usure

On distingue les intensités intégrales d'usure : linéaire  $I_h$ , massique  $I_g$  et énergétique  $I_\omega$  [KRA 81, KRA 84, FRO 87].

### L'intensité intégrale linéaire d'usure (taux d'usure)

Elle représente le rapport de l'épaisseur de la couche usée  $h$  au chemin de frottement  $L$ , auquel correspond l'usure produite :

$$I_h = \frac{dh}{dL} = \frac{V}{LA_a} \quad (3.4)$$

Où  $V$  : volume du matériau détaché par suite de l'usure de la surface de frottement ;  
 $A_a$  : aire nominale de contact.

En conséquence l'intensité linéaire et la vitesse d'usure sont liées par la relation :

$$\gamma = \frac{dh}{dL} \frac{dL}{dt} = I_h v_g \quad (3.5)$$

Les valeurs  $\gamma$  et  $I_h$  sont déterminés par voie expérimentale pour les valeurs moyennes de  $p_a$  et  $v_g$ , et après cela par la formule (3.2) on calcule le coefficient  $k$ .

Dans l'aide-mémoire [KRA 81] sont rapportées les données sur  $\gamma$  et  $I_h$  (où au lieu de  $I_h$  on a utilisé la désignation  $J$ ).

L'intensité d'usure  $I_h$  peut varier dans de très grandes limites, par exemple :

de  $I_h = 10^{-12}$  ( usure de  $0,001 \mu$  sur  $1\text{Km}$  de chemin de frottement, c'est-à-dire une très petite valeur ) jusqu'à  $I_h = 10^{-3}$  ( usure de  $1\text{mm}$  sur  $1\text{m}$  de chemin de frottement, c'est-à-dire une grande valeur).

### L'intensité intégrale massique d'usure (taux d'usure massique)

Elle est déterminée par la relation :

$$I_g = \frac{M}{A_a L} = \rho I_h \quad (4.6)$$

Où  $M$  : masse du matériau détaché de la surface d'usure.

### L'intensité intégrale d'usure énergétique (taux d'usure énergétique)

Elle représente le rapport du volume du matériau usé  $V$  au travail des forces de frottement (T.L), qui ont provoqué l'usure :

$$I_w = \frac{V}{TL} = I_h \frac{A_a}{T} \quad (4.7)$$

Où  $T$ - force de frottement.

#### 3.4.3. La résistance à l'usure (tenue à l'usure)

La résistance à l'usure est la propriété d'un matériau de résister à l'usure dans des conditions de frottement déterminées [KRA 81, KRA 84, FRO 87].

Elle est estimée par l'inverse de la vitesse d'usure ou de l'intensité d'usure.

Sur la tenue à l'usure influe la dureté et l'élasticité des matériaux, le régime de travail (charge, vitesse, température), les conditions externes (lubrification, milieu ambiant), particularités constructives des corps en contact.

Les caractéristiques d'usure sans unité sont très commodes pour la comparaison de la tenue à l'usure des matériaux des couples de frottement.

Suivant la valeur de  $I_h$  on distingue 10 classes de tenue à l'usure des matériaux, qu'on peut diviser en 3 groupes principaux en fonction du type d'interaction de contact des surfaces de frottement [KRA 81, FRO 87] :

- O- V classes ( $I_h = 10^{-12} \dots \dots \dots 10^{-7}$ ) - Tenue à l'usure élevée du fait du contact élastique
- VI -VII classes ( $I_h = 10^{-6} \dots \dots \dots 10^{-5}$ ) - Tenue à l'usure moyenne dans le cas de contact élasto-plastique.
- VIII-IX classes ( $I_h = 10^{-4} \dots \dots \dots 10^{-3}$ ) - Tenue à l'usure très faible dans le cas de micro-usinage.

Dans le cas général (lorsque  $p_a$  et  $v_g$  variables) l'usure linéaire est déterminée par la formule :

$$h = k \int_0^{t_f} p_a v_g dt \quad (3.8)$$

Où  $t_f$  – temps de fonctionnement

Pour la commodité des calculs dans les mécanismes à un degré de liberté (rotation) il est rationnel, de transformer la formule (3.8), en introduisant la coordonnée généralisée  $\varphi$  et la vitesse généralisée  $\omega = \dot{\varphi}$ . Dans ce cas l'usure pendant un cycle, pour lequel  $\varphi = \varphi_c$

$$h_c = k \int_0^{\varphi_c} p_a (v_g / \omega) d\varphi \quad (3.9)$$

Où  $v_g / \omega = v_g(\varphi) / \omega$  : angle de la vitesse de glissement ( ou la fonction de transmission  $dS/d\varphi$ ) au point considéré de l'élément du couple cinématique (dans ce cas :  $S = L$ ).

Si le nombre des cycles de travail est  $n_c$ , alors l'usure est :

$$h = h_c \cdot n_c \quad (3.10)$$

Selon la formule (3.10) on peut trouver le nombre des cycles de travail d'après la valeur donnée de l'usure linéaire limite  $h_a$ , ce qui est nécessaire pour la détermination de la durée de service d'une machine .

La durée de service des pièces d'usure peut être calculée par la relation suivante :

$$t_s = \frac{h_a}{\gamma} = \frac{h_a}{I_h v_g} \quad (3.11)$$

### 3.4.4. Caractéristiques opérationnelles d'évaluation de l'usure

On utilise les caractéristiques opérationnelles d'évaluation de l'usure suivantes :

#### 1) L'usure limite

C'est l'usure, qui correspond à l'état limite de l'article usé (ou de ses éléments).

#### 2) L'usure admissible

C'est la valeur de l'usure, pour laquelle l'article conserve sa capacité de travail.

On détermine l'usure limite des éléments des couples de frottement par une suite de critères, dont les principaux sont :

- a) L'altération de la capacité de travail par suite de l'usure - rupture des pièces, c'est-à-dire perte de la résistance, coincement, perte de la précision nécessaire ;
- b) La dégradation inadmissible des caractéristiques des machines (diminution de la qualité de l'article, augmentation des vibrations, et bruits à causes des jeux qui apparaissent dans les couples cinématiques etc.).

Dans le cas du frottement avec lubrifiant, quand l'épaisseur de la couche du matériau de graissage, séparant les surfaces de frottement, dépasse la somme des hauteurs maximales de leurs aspérités, l'usure s'avère très insignifiante.

**L'épure d'usure** est la représentation graphique de la distribution de la valeur de l'usure selon la surface de frottement ou selon une section donnée.

## 3.5. INFLUENCE DE DIVERS FACTEURS SUR LE COEFFICIENT DE FROTTEMENT ET L'INTENSITE D'USURE

### 3.5.1. La température

Dans le cas de contact discret les sources de chaleur sont des volumes élémentaires des corps solides dans les régimes de contact réel, à partir desquels la chaleur se répand à l'intérieur des corps de frottement. Le processus de génération et de stabilisation de la température porte le caractère de sauts thermiques  $\theta_s$ , dont la valeur maximale est atteinte en fonction de la vitesse de glissement  $v_g$  après  $10^{-4}$  à  $10^{-6}$  s. Le saut thermique, dans le cas de contact plastique, comme le montrent les travaux de A.V.TCHETCHENADZE et E.B.ZINOVIEV, est proportionnel au produit :

$$\theta_s \approx f p_c^{1/4} v_g^{1/2} HB^{1-4\nu} d^{1/2} \quad (3.12)$$

Où  $d$  : diamètre de la tache de contact.

La chaleur générée sur les taches de contact se distribue entre les corps de frottements. La grandeur, sans unité,  $\alpha_{fc}$  montrant quelle partie du flux de chaleur se dirige vers l'un des corps du contact, s'appelle le coefficient de distribution de flux de chaleur :

$$\alpha_{fc} = q_{1,2} / q .$$

Où  $q_{1,2}$  : flux de chaleur, passant à l'un des corps en contact ;  $q$  : flux de chaleur total. Dans le cas général le coefficient de distribution des flux de chaleur dépend de plusieurs facteurs, souvent interdépendants, dont on ne peut pas toujours tenir compte analytiquement.

Le gradient de température  $\partial\theta^* / \partial Z$  (où  $Z$  - coordonnée suivant la direction normale à la surface de frottement) est aussi une caractéristique importante du régime thermique de frottement. Comme l'a montré A.V.TCHETCHEADZE , le gradient de température influe sur le gradient des propriétés mécaniques et en conséquence sur le coefficient de frottement et l'usure.

Lors de l'étude de contact de friction comme un « troisième corps » viscoplastique par I.V. KRAGUELSKI et G.I. TROYANOSKA est obtenue la relation générale suivante :

$$f = C \theta^{m-n} \frac{\partial \theta}{\partial Z} + A \theta^{m-n} \quad (3.13)$$

Comme on le voit, avec l'augmentation du gradient de température le coefficient de frottement peut croître. Ceci s'explique par le fait, qu'avec l'augmentation du gradient de température, le gradient normal des propriétés mécaniques croît, en conséquence la résistance à la déformation augmente. Dans le cas général avec l'augmentation de la température, le coefficient de frottement peut diminuer, augmenter ou passer par un minimum ou un maximum en fonction des coefficients  $C, A, m, n$ .

Avec l'augmentation de la température superficielle et la diminution du gradient de température on remarque la tendance d'accroissement de l'usure des matériaux. En cas de températures élevées le mécanisme d'usure est déterminé par le processus de la mécanique physico-chimique.

### 3.5.2. La charge

L'influence de la charge sur le frottement dépend du type d'interaction de contact des surfaces de frottement (élastique ou plastique).

Comme s'ensuit du chapitre précédent, la composante moléculaire du coefficient de frottement est inversement proportionnelle à la pression réelle de contact  $p_r$ .

Lors du contact plastique la pression réelle est égale à la dureté du matériau du corps moins dur, et ne dépend pas de la charge.

Lors du contact élastique la pression réelle augmente avec l'accroissement de la charge proportionnellement  $p_c^{1/(2\nu+1)}$ . Ainsi, lors du contact élastique :

$$f_m = \Phi(p_c) \approx \frac{1}{p_c^{1/(2\nu+1)}} \quad (3.14)$$

Lors du contact plastique  $f_m$  ne dépend pas de  $p_c$  :

$$f_m = \text{const} \quad (3.15)$$

La composante de déformation (mécanique) du coefficient du frottement  $f_d$  est proportionnelle à la profondeur de pénétration cinématique des aspérités  $h^{1/2}$ . Lors du contact élastique, on néglige  $f_d$  par rapport à  $f_m$  dans la plupart des cas (si  $HB/E \ll 0,01$ ).

Lors du contact plastique la pénétration mutuelle des aspérités augmente avec l'accroissement de la charge proportionnellement à  $p_c^{1/(2\nu+1)}$ , par conséquent :

$$f_d = \Psi(p_c) \approx p_c^{1/2\nu} \quad (3.16)$$

De la confrontation des expressions établies plus haut s'ensuit qu'avec l'accroissement de la charge en passant du contact élastique au contact plastique  $f$  passe par un minimum dans la zone du contact élastique et augmente lors du contact plastique. La position du minimum dépend du rapport entre  $f_m$  et  $f_d$ . Avec la diminution du rapport  $f_m/f_d$  le minimum se déplace dans le sens des charges et des pressions de contour plus faibles.

Le minimum sur la courbe de  $f$  en fonction de la charge  $N$  s'exprime de façon faible. Pour les valeurs du paramètre de la courbe de la surface d'appui  $\nu$  pour les surfaces habituelles  $\nu = 2$  à  $3$ , dans le domaine du contact élastique le coefficient de frottement diminue proportionnellement à  $p_c^{1/5}$  à  $p_c^{1/7}$  et dans le domaine du contact plastique augmente proportionnellement à  $p_c^{1/4}$  à  $p_c^{1/6}$ .

Plus haut on a examiné l'influence de la charge sur le frottement comme un facteur qui change la géométrie du contact (exemple l'aire réelle de contact  $A_r$ , la pénétration  $h$ ).

Selon les données de Bridgman, l'influence de la charge sur les propriétés des matériaux en contact peut être négligée. Cependant la pratique montre que l'influence de la charge sur les caractéristiques de friction est sensible.

Avec l'augmentation de la charge, l'intensité d'usure augmente :

$$\text{- lors du contact élastique : } I \approx p_c^{1+t_e/(2\nu+1)} \quad (3.17)$$

$$\text{- lors du contact plastique : } I \approx p_c^{1+(t_p+1)/(2\nu)} \quad (3.18)$$

Où  $t_e$ ,  $t_p$  : indices de la courbe de fatigue pour les contacts élastique et plastique.

Actuellement il est admis que l'influence de la charge sur le frottement et l'usure avec des vitesses de glissement moyennes et élevées se réalise à travers la température développée pendant le frottement

### 3.5.3. La vitesse de glissement

La vitesse de glissement influe sensiblement sur le frottement et l'usure. En considérant la dissipation de l'énergie sur le contact de friction, I.V. KRAGUELSKI et V.S. CHEDROV ont obtenu l'expression suivante du coefficient de frottement :

$$f = (a + bV_g) e^{(-cV_g)+d} \quad (3.19)$$

Où  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  - paramètres caractérisant le frottement.

Le paramètre  $a$  dépendu sensiblement des propriétés physiques des matériaux des surfaces de frottement. Il augmente avec l'accroissement du module d'élasticité, de la vitesse de relaxation de contraintes et de la rugosité. Le paramètre  $b$  dépend des propriétés viscoplastiques des matériaux. Le paramètre  $c$  est le produit du décrement d'amortissement

des oscillations par le coefficient de viscosité de couches de contact. Les paramètres **b** et **c** dépendent de la pression de contact, puisque la viscosité croît avec l'augmentation de cette pression.

L'expression (3.18) représente dans le cas général une relation avec la présence d'un maximum sur la courbe  $f = f(V_g)$ . Les inconvénients sensibles de cette formule sont l'impossibilité de tenir compte de l'influence de la pression de contact, les dimensions de la surface, de la difficulté de la détermination des paramètres **a**, **b**, **c** et **d** dépendant de la température et de tout le complexe des processus qui déterminent les propriétés de la couche de friction active. En outre, cette formule est valable seulement dans le cas où la vitesse de glissement varie par palier.

Il est expérimentalement établi, que pour les matériaux qui ont des propriétés d'élasticité relativement parfaites et dans les conditions, lorsque la température ne les modifie pas sensiblement, le coefficient de frottement ne dépend pas de la vitesse. Dans ce cas l'élasticité parfaite exclue les pertes par hystérésis et assure l'indépendance de  $f_d$  vis à vis de la vitesse. La haute résistance à la chaleur assure la non dépendance de l'interaction moléculaire (adhésive) vis à vis de la vitesse.

Dans ce cas le contact élastique imparfait avec l'accroissement de la vitesse, le coefficient de frottement passe par un maximum et peut avoir un deuxième extremum –un minimum. Le maximum de coefficient de frottement est disposé dans la zone des vitesses, qui assurent les pertes par hystérésis les plus grandes. Dans le cas de petites vitesses les processus de relaxation compriment la boucle d'hystérésis, alors le coefficient de frottement diminue. Dans le cas de grandes vitesses, la température générée diminue l'interaction moléculaire (adhésive) et les pertes par hystérésis par la suite de la réduction du temps de relaxation. En conséquence le coefficient de frottement diminue. L'augmentation plus grande de la vitesse de glissement conduit à une nouvelle augmentation de la température des surfaces de frottement, la diminution de leur dureté, l'accroissement de la pénétration et de la composante moléculaire de la force de frottement : le coefficient de frottement peut de nouveau croître. Dans le cas de pressions relativement élevées, lorsque pour de petites vitesses l'augmentation de la température est possible, alors la zone de maximum des coefficients de frottement peut être absente (peut ne pas exister).

Dans le cas de contact plastique la vitesse de glissement peut influencer sur le frottement à travers la vitesse d'expansion de la déformation plastique. Lors de l'augmentation de la vitesse de glissement, la déformation plastique se localise dans un petit volume superficiel et le coefficient de frottement diminue.

Par suite de l'augmentation de la température, dans le cas d'accroissement de la vitesse de glissement, la résistance, et le caractère de la liaison moléculaire changent.

Avec l'augmentation de la température, la résistance, l'épaisseur et la nature du film protecteur changent. Dans la zone de petites vitesses le film ne réussit pas (n'a pas le temps) de se former et la déformation répétée passe au micro usinage, ce qui correspond à la branche croissante de la courbe  $f(V)$ . Lors d'une plus grande augmentation de la vitesse (par conséquent de la température), conduit à la diminution de la hauteur du bourrelet déformé et le nivellement de la surface de frottement. Par conséquent à fur et à mesure que la vitesse de glissement croît, la rugosité passe par un maximum et influence en conséquence sur le coefficient

de frottement. Pour les petites valeurs de la vitesse de glissement, l'influence du coefficient de frottement, comme facteur modifiant la résistance du matériau, n'est pas sensible.

Le complexe de processus qui apparaît sur le contact de friction, conduit à la dépendance complexe du coefficient de frottement et de l'intensité d'usure vis à vis de la vitesse de glissement. Cette dépendance représente en fait la dépendance de ces caractéristiques ( $f$  et  $I$ ) vis à vis de la température.

### 3.5.4. Gradient des propriétés mécaniques et paramètres de construction

Le gradient des propriétés mécaniques et la construction de la jonction de frottement ont une grande influence sur le frottement et l'usure. Le rôle de la construction de la jonction de frottement est tellement grand que les paramètres constructifs (aire de frottement, le recouvrement mutuel, la forme et les dimensions des éléments en contact, la rigidité de la construction et autres) sont considérés parmi les facteurs déterminant à côté des paramètres du régime de frottement et des propriétés des matériaux de frottement.

L'influence des paramètres de construction du nœud de frottement sur les caractéristiques de frottement apparaît fondamentalement à travers la variation de l'aire réelle de contact, l'influence sur la formation et la rétention des produits d'usure entre les surfaces de frottement à travers le régime thermique et l'action du milieu ambiant de la jonction de frottement. Par exemple la variation de l'aire nominale de frottement de 1 à 100 cm<sup>2</sup> dans certain cas conduit à la diminution du coefficient de frottement de 1,5 à 2 fois.

L'intensité d'usure a tendance à augmenter avec l'accroissement de l'aire nominale de la surface de frottement lorsque les autres facteurs influant sur le frottement sont constants.

Il est expérimentalement établi et théoriquement fondé qu'avec la diminution de la rigidité constructive générale des éléments de la jonction de frottement, le coefficient de frottement croit par suite de l'augmentation de l'aire de contact réelle. La division de la surface totale de frottement en éléments séparés, chargés indépendamment constitue un moyen effectif pour diminuer la rigidité.

De nombreux travaux de recherche montrent que dans les conditions de frottement, lorsqu'un accroissement sensible de la température est possible, l'influence de la variation de la construction et des dimensions de la jonction de frottement sur le frottement et l'usure apparaît à travers le régime thermique et le gradient des propriétés mécaniques, qui apparaît par la suite de l'échauffement des éléments du couple de frottement.

Les paramètres macro géométriques constructifs des jonctions de frottement influent sur toutes les caractéristiques principales du régime de frottement : distribution des flux thermiques, la température superficielle, le gradient de température et la distribution du volumique de la température dans les corps frottantes. La construction influe sur la chaleur totale générée à travers le coefficient de frottement effectif et sur l'uniformité de génération de la chaleur dans les limites de l'aire nominale de contact à travers la rigidité des corps frottantes.

La masse des corps frottantes, le volume absorbant la chaleur, les dimensions de la surface de frottement et de la surface d'évacuation de la chaleur sont des facteurs qui déterminent la distribution de la chaleur dans les corps frottantes, la température superficielle et autres caractéristiques du champ de température.

Le coefficient de recouvrement mutuel  $K_r$  représente une importante caractéristique constructive de l'organe de frottement. Il représente le rapport des aires nominales de frottement des corps frottantes ( $K_r = A_{a1}/A_{a2}$ ). La grande influence de ce paramètre s'explique par le fait que sa valeur dépend du régime thermique, l'état de contrainte et la possibilité d'infiltration du milieu ambiant à la surface de frottement, la rétention ou l'évacuation des produits d'usure. Le recouvrement mutuel incomplet assure la possibilité d'évacuation de la chaleur à partir des secteurs découverts de la surface de frottement. Dans le cas de recouvrement total toute la chaleur va à l'intérieur des corps frottant. Pour cela avec la diminution du recouvrement mutuel il y a tendance à la diminution de la température superficielle moyenne  $\theta^*$  et à l'accroissement du gradient de température  $\partial\theta^*/\partial Z$  c'est à dire selon les notions existantes un plus petit recouvrement mutuel, en cas de pression constante assure un régime thermique de frottement plus léger (température et gradient de température plus faibles).

La pratique confirme que pour beaucoup de dispositifs de frottement lourdement chargés, la diminution de  $K_r$  conduit à l'augmentation de  $f$  et sa plus grande stabilité en cas de variation de la température. La variation du recouvrement mutuel peut influencer sur l'état de contraintes des corps frottantes et l'apparition de films d'oxydes.

Le milieu ambiant lors du frottement est considéré comme un facteur influant sur le développement des phénomènes physico-chimiques dans la zone de frottement et par conséquent sur le frottement et l'usure.

Il est établi, que la forme et les dimensions de l'organe de frottement, le coefficient de recouvrement mutuel sont des facteurs influant sur l'infiltration du milieu gazeux dans le contact de friction. Pour cela on propose la méthode de modélisation des processus physico-chimiques, qui dépendent de l'action du milieu ambiant pendant le frottement de différents matériaux de friction et antifricition.

### 3.5.5. Les matériaux lubrifiants [MIK 77]

L'action du milieu sur la destruction des couches superficielles lors du frottement externe dépend de sa composition. Les matériaux lubrifiants utilisés dans les assemblages mobiles des machines et des mécanismes contiennent des additifs de différentes destinations, qui sont dans certains cas des substances tensioactives (STA) ou un milieu corrosif par rapport aux matériaux des couples de frottement. Il est naturel que l'existence de telles substances influe sur l'interaction de forces et sur la destruction des couches superficielles. Comme on l'a précédemment fait remarquer le type d'usure le plus répandu est l'usure par fatigue, pour cela examinons l'influence du matériau lubrifiant sur l'intensité intégrale linéaire d'usure par fatigue.

On pensait bien que les STA influent faiblement sur l'intensité d'usure. Ceci est conditionné par le fait que selon les travaux largement connus dans ce domaine, dans certains cas les STA influent faiblement sur la variation de la limite de résistance à la fatigue (endurance) en déterminant la fatigue volumique. Cependant dans le cas du frottement externe les déformations se concentrent dans des couches superficielles minces. Souvent, particulièrement dans le période de rodage, apparaissent des déformations plastiques dans ces couches, ce qui intensifie l'apparition de l'effet de REBINDER. Dans ces conditions, on peut

s'attendre à ce que les STA vont intensifier le processus d'usure par fatigue des couches superficielles des corps solides.

L'analyse montre que l'action des STA sur l'usure par fatigue pendant le frottement externe apparaît doublement. En effet l'intensité spécifique linéaire d'usure ( $i_h$ ) dans ce cas [kra 84] est déterminée par le nombre de cycles de chargement des couches superficielles, conduisant au détachement des particules d'usure.

Les STA par suite de l'effet de REBINDER peuvent réduire (particulièrement dans le cas de contraintes de traction, provoquant des déformations plastiques) la limite de résistance  $\sigma_r$ . Ceci doit amener à l'augmentation de l'intensité spécifique d'usure  $i_h$ . Cependant en diminuant l'énergie de surface des corps interagissants, les STA réduisent les contraintes tangentielles à la frontière de séparation conditionnées par les interactions inter atomiques et intermoléculaires. Ainsi l'action des STA conduit à l'apparitions de deux processus concurrentiels. D'un côté, elle diminue la résistance à l'usure par suite de l'effet de RBBINDER, et d'un autre coté elle l'augmente par suite de la diminution des interactions de forces entre les corps frottantes. En fonction de quel est de ces processus qui va dominer, l'ajout des STA au matériau lubrifiant sous forme d'additif ou leur apparition dans le lubrifiant, par suite de modifications se produisant pendant le processus de travail, peut conduire aussi bien à l'augmentation qu'à la diminution de la résistance à l'assure. Dans certains cas, on peut s'attendre à ce que l'addition de STA ne va pas influencer sur l'intensité d'usure.

Lorsque le lubrifiant contient des substances corrosivement actives (SCA), alors elles peuvent influencer sur la destruction des couches superficielles pendant le frottement. Dans ce cas peut se produire une destruction plus intense par suite du déroulement de processus, semblables par leur nature à la corrosion sous contraintes. Actuellement le mécanisme de la corrosion sous contrainte n'est pas bien élucidé. En général, cette corrosion naît dans le cas de contraintes de traction. Une diminution sensible des propriétés mécaniques du matériau se produit dans les cas où les contraintes apparaissant dans ce matériau provoquent des déformation plastique.

Pendant le frottement externe les charges utilisées conduisent le plus souvent à l'apparitions de déformations plastiques dans les zones de contact réel des corps interagissant. Derrière les irrégularités (aspérités) microscopiques peuvent naître des contraintes de traction provoquant l'écoulement plastique dans les couches superficielles. Ceci peut conduire en présence de SCA à la destruction selon le mécanisme semblable au mécanisme de corrosion sous contraintes. Ce qui est caractéristique est que, comme dans le cas d'apparition de l'effet de REBINDER, ce sont les couches superficielles moins dures déformées plastiquement qui vont se déformer plus intensivement.

L'influence du milieu sur le processus de destruction dans le cas de déformations élastiques est faible. Ceci est confirmé par les expériences menées (par l'institut des problèmes de mécanique de l'académie des sciences de l'URSS) pour l'étude de l'influence de l'état de contraintes dans la zone de contact sur la destruction des couches superficielle des

échantillons, fabriqués de cuivre et de laiton interagissant avec l'acier (XC42) dans le cas d'utilisation de la glycérine en qualité de lubrifiant.

### 3.6. VOIES ET MOYENS DE REDUCTION DE L'USURE DES MATERIAUX

La théorie mécanique et moléculaire du frottement externe détermine deux voies principales d'augmentation de la résistance à l'usure des matériaux :

- Augmentation de la dureté des surfaces de frottement ;
- Diminution de la résistance des liaisons d'adhésives.

L'augmentation de la dureté consiste à rendre difficile la déformation plastique et d'éliminer le micro usinage des surfaces de frottement, en assurant tant que possible la déformation plastique des zones de contact.

La diminution de la résistance de l'adhésion est nécessaire pour éviter le grippage des surfaces métalliques. Ce but est atteint plus efficacement par la séparation des surfaces par un matériau lubrifiant liquide, solide (parfois gazeux). En cas d'utilisation d'un lubrifiant liquide, lorsque les surfaces sont séparées par un film hydrodynamique portant, le coefficient de frottement est minimal (0,005 à 0,01) et l'usure est pratiquement absente.

Le lubrifiant solide assure un plus grand coefficient de frottement (0,02 à 0,15). Il est irremplaçable pour les organes de frottement, capables de travailler dans le vide, avec des températures élevées et autres conditions extrémales. Parmi les lubrifiants solides on utilise le plus largement le graphite et le bisulfite de molybdène ( $MoS_2$ ) ayant une structure lamellaire.

Cependant l'utilisation des matériaux lubrifiants ne garantit pas contre le grippage. Les lubrifiants solides s'usent progressivement, les conditions de lubrification fluide se perturbent à cause des régimes défavorables de travail des mécanismes. A ces régimes se rapportent les périodes de rodage, ainsi que le démarrage et l'arrêt des machines. Dans ces conditions apparaît le frottement limite, pendant lequel les surfaces sont séparées seulement par un mince film d'huile. Les contraintes de contact et l'échauffement sont capables de détruire le film et provoquer le grippage. Dans ces conditions une importance déterminante revient à la compatibilité du couple de frottement.

**Par compatibilité on comprend la propriété des matériaux de prévenir l'adhésion pendant le travail sans matériau lubrifiant ou en cas de perturbation de la continuité du film lubrifiant.**

La compatibilité s'obtient par les différents procédés :

#### 3.6.1. Utilisation des propriétés protectrices des films d'oxydes

Les propriétés protectrices d'oxydes dépendent de leur composition, épaisseur, ainsi que des propriétés du substrat métallique. Ces propriétés protectrices augmentent avec l'accroissement de la dureté du substrat (métal au-dessous). Si l'oxyde est dur et résistant, et le substrat est doux, alors le film se détruit facilement, et le grippage se développe sous une faible charge.

A titre d'exemple à cela peut servir l'aluminium, le plomb et la plupart des matériaux plastiques, y compris le titan (fig.3.4).

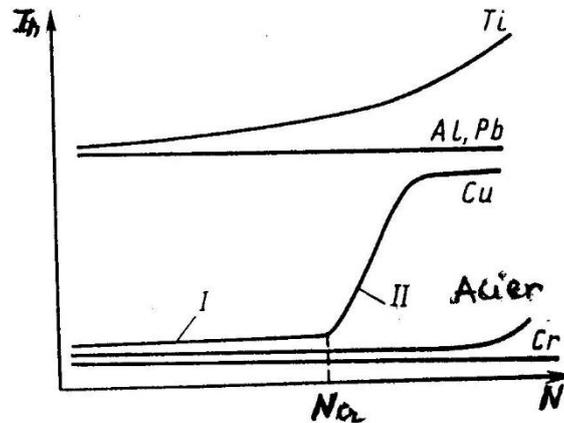


Fig 3.4 Influence de la charge  $N$  sur l'intensité d'usure linéaire unitaire  $i_h$  de différents matériaux (contact de matériaux de même nuance) :

I – usure d'oxydation ; II – usure adhésive de 1<sup>er</sup> ordre.

C'est une anomalie que les grands coefficients de frottement et usure du titan sont conditionnés non seulement par la destruction du film, mais aussi par sa capacité de se dissoudre dans le métal. Si on fait subir au titan la nitruration (saturation par l'azote) alors la pellicule d'oxyde se forme sur un support dur qui empêche sa dissolution. Le titan devient résistant à l'usure.

Les minces pellicules dures qui sont capables de se déformer avec le matériau sous une grande charge sont formés par le chrome, l'acier ainsi que le cuivre, malgré que sa charge admissible ( $N < N_{cr}$ ) soit plus petite que celle des deux premiers métaux (fig.3.5).

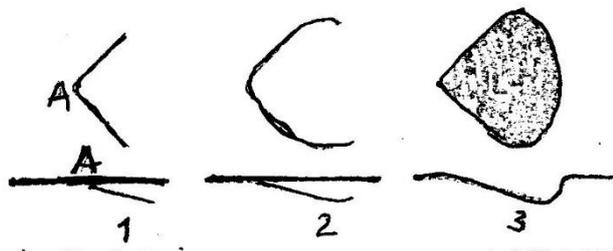


Fig 3.5 schémas de développement de l'effritement de surface sur le chemin de roulement :

A – lieu de naissance de la fissure de fatigue ; 2 – Stades de son développement ;  
3 – Cavité d'effritement.

La résistance à l'adhésion (grippage) des aciers trempés est sensiblement supérieure à celle des aciers normalisés et recuits. Pour cela les aciers trempés et les aciers renforcés par un traitement thermo-chimique constituent le matériau principal de l'usure des pièces conjuguées du couple de frottement. On augmente cette résistance à l'adhésion par sulfuration ou phosphatation. Suite à ces processus, se forme une pellicule, qui se détruisant facilement au moment initial, améliore l'aptitude au rodage et diminue le coefficient de frottement. Dans les conditions difficiles de frottement, cette pellicule est capable de changer, formant des structures secondaires de composition complexe et de résistance à l'usure élevée.

Dans les conditions de grippage à chaud les propriétés protectrices des pellicules d'oxydes dépendent de la capacité du substrat de conserver une grande dureté en cas d'échauffement. Dans de tels cas il s'ensuit d'utiliser des matériaux résistants à la chaleur.

### 3.6.2. Le choix des matériaux du couple de frottement

L'adhésion (le grippage) est particulièrement dangereuse pour le contact de deux matériaux durs. Dans le cas de destruction des pellicules d'oxydes protectrices le grippage conduit à l'endommagement des deux surfaces de frottement. En cas de combinaison de matériaux durs et doux le grippage apparaît sous forme moins dangereuse. Pour les aciers et les fontes dans les conditions de frottement de glissement les meilleurs matériaux de pièces conjuguées sont les matériaux non ferreux et les alliages, qui ont dans leurs structures une composante douce ou facilement fusible, capable de montrer une réaction protectrice. Dans le cas d'intensification du frottement une telle composante structurelle permet sur les différentes zones du contact un écoulement plastique facile ou bien l'adoucissement, par suite duquel diminuent les pressions locales et la température et par conséquent le grippage s'exclue.

Les alliages à composante structurelle douce (tendre) sont utilisés pour les transmissions à vis sans fin et les paliers lisses. Les transmissions à vis sans fin se caractérisent par de grandes vitesses de glissement et des conditions défavorables du graissage hydrodynamique. Pour la prévention du grippage, on exécute la vis sans fin en acier avec une grande dureté de la surface (HRC 40-60), et la roue en bronze d'étain, ayant une composante tendre dans la structure.

En qualité de composante structurelle dans les alliages de paliers peuvent servir les additifs d'étain et de plomb. Ces matériaux grippent avec l'acier, mais les liaisons adhésives se détruisent suivant le métal non ferreux moins résistant, qui couvrent la surface d'acier par une pellicule mince (2 à 3  $\mu\text{m}$ ) sans l'endommager. La mince pellicule du métal doux non seulement diminue l'interaction de forces dans les zones de contact, et dans les régimes difficiles de frottement à cause de leur adoucissement peuvent servir de matériau lubrifiant solide ou bien fondant et après un certain temps jouent le rôle de matériau lubrifiant liquide. Grâce à de tels propriétés on utilise l'étain, le plomb ainsi que le cuivre en qualité de revêtements à mince pellicule d'une des surfaces de frottement. On crée des pellicules aussi dans les jonctions acier-acier, acier-fonte, en ajoutant au matériau lubrifiant liquide des additifs sous forme de poudre de ces métaux ou de leurs sels. Pour des conditions de frottement déterminées les additifs forment sur la surface d'acier une pellicule de métal doux qui protège l'acier de l'usure.

### 3.6.3. Séparation des surfaces de frottement par des pellicules de polymères (téflon, polyamides et autres)

Les polymères se distinguent par leur faible adhésion aux métaux. En outre, sous l'influence de la chaleur de frottement, les polymères sont capables de passer de l'état bas - moléculaire (de petit poids moléculaire) et former une pellicule ayant une faible résistance au cisaillement. Par la force de ces particularités, les polymères ont un faible coefficient de frottement, qui varie peu avec l'utilisation d'un matériau lubrifiant.

La capacité de travail de beaucoup d'organes de frottement dépend de la vitesse de développement de l'écaillage de surface par fatigue (pitting).

L'écaillage de surface est une caractéristique des matériaux utilisés dans les organes de frottement de roulement (transmission par engrenages, paliers de roulement), qui sont soumis à des charges de contact fortement cycliques. Ces charges, agissant sur de petites zones de surfaces, conditionnent les processus de naissance dans la couche superficielle des fissures de fatigue, leur développement en profondeur de la couche et détachement de particules avec formation de piqûres (cavités) d'effritement.

La résistance du matériau à l'écaillage de surface s'appelle **l'endurance au contact**. Elle se caractérise par la limite d'endurance au contact  $\sigma_{clim}$ , qui comme dans le cas de fatigue volumique, se détermine expérimentalement (GOST25.501-78) d'après la courbe de fatigue.

L'augmentation de l'endurance de contact comme dans le cas de fatigue volumique est basée sur l'accroissement de la résistance de la couche superficielle des pièces au développement de la déformation plastique.

Les zones de contact de pièces se trouvant en déplacement relatif très petits, sont soumises au type particulier d'usure - le fretting. Ce type d'usure se développe sur les surfaces des arbres aux droites d'assemblage des roues dentées, des roulement et d'assemblage par charnières, par cannelures et clavettes. Les défauts de surfaces ont l'aspect de piqûres et ulcères qui comme le pitting, sont dangereux et diminuent la résistance à la fatigue des matériaux. Il n'y a pas d'unique théorie qui explique le mécanisme de ce type d'usure.

Selon une théorie le mécanisme déterminant est l'interaction mécanique des surfaces de contact. On suppose que cette interaction provoque la destruction des pellicules d'oxydes, dont les particules ne sont pas évacuées des limites du contact et agissent comme des abrasifs.

Selon une autre théorie c'est l'adhésion de contact qui est considérée déterminante en combinaison avec la corrosion. Par suite de l'adhésion les particules du métal se détachent de la surface au départ, puis s'oxydent par l'oxygène du milieu et deviennent des abrasifs. Les tenants de cette théorie l'appellent le processus fretting - corrosion.

Les principales méthodes de protection contre le fretting-corrosion sont l'augmentation de la dureté des surfaces de contact, l'utilisation de matériaux lubrifiants, des revêtements plastiques qui empêchent le contact métallique des surfaces et l'accès de l'oxygène à ce contact.

### **3.6.4. Autres moyens de lutte contre le frottement et l'usure tenant compte des conditions d'exploitation des éléments de machines**

Chaque année, l'économie internationale subit des pertes importantes d'argent à cause de l'inactivité des machines due à l'usure prématuré et à la mise hors de service de leurs pièces constitutives. Pour réduire au minimum ces pertes, les personnels de production et de la maintenance se partagent entre eux d'une façon très nette la responsabilité qui leur incombe quant à la bonne conduite et au maintien en bon état de fonctionnement de l'équipement entre deux réparations consécutives.

La longévité et le fonctionnement sans pannes de l'équipement sont assurés en premier lieu par une stricte observation des règlements consistant en ce qui suit [GUE 87] :

- L'équipement doit être utilisé en conformité avec sa destination et avec ses caractéristiques techniques ;
- La remise en ordre des machines et le nettoyage de leurs mécanismes et pièces doivent être exécutés en respectant rigoureusement les instructions formulées dans les notices correspondantes ;
- Utiliser pour le graissage des machines les lubrifiants prescrits et effectuer cette opération dans les délais indiqués dans la fiche de graissage ;
- Effectuer minutieusement et en temps dû toutes les opérations de réparations courantes et préventives planifiées, de même que les visites techniques et les réparations régulières.

Dans nombre d'entreprises, les machines-outils sont dotées d'écriteaux ou même d'instruction rappelant au personnel l'entretien qu'il doit assurer pour le bon fonctionnement des ensembles constitutifs de l'équipement. Chaque machine-outil doit être munie de sa fiche de graissage.

Pour réduire le frottement entre les pièces mobiles d'un mécanisme et par conséquence leur usure, afin de prolonger leur durée de vie, les conditions essentielles exposées ci-dessous doivent être remplies :

- Tâcher d'obtenir l'état de surface (rugosité) requis pour les pièces usées rénovées, de même que pour celles nouvellement réalisées ;
- Porter des revêtements résistants à l'usure sur les surfaces des pièces rénovées et des pièces neuves ;
- Augmenter la dureté des surfaces de travail des pièces en les consolidant par différents procédés ;
- Assurer un bon graissage des surfaces frottantes ;
- Protéger les surfaces de travail des pièces conjuguées contre la pénétration des poussières et des copeaux en installant des protections des volets, des carters et d'autres dispositifs similaires.

En fonction des types d'usure et des processus ayant lieu sur les surfaces de frottement on doit tâcher de trouver les solutions appropriées :

### A . Cas de l'usure par abrasion

1. Chaque fois que cela est possible, prévoir des étanchéités pour empêcher l'introduction de l'abrasif dans la zone frottant.
2. Si l'on connaît la granulométrie des grains abrasifs. Diminuer le jeu entre les pièces frottantes jusqu'à ce qu'il soit inférieur à la dimension des particules.
3. Ménager des sculptures sur les surfaces pour éliminer très rapidement les grains abrasifs des zones en contact.
4. Employer des matériaux plus durs et augmenter l'écrouissage des structures métallurgiques.

On peut donner les exemples suivants par ordre de résistance décroissante à l'abrasion :

#### a) Usure par effet de coupe prépondérant :

- Fonte blanche traitée en sulfuration au tenifer.
- Fonte blanche à haute teneur en chrome ;
- Acier austénitique au manganèse – molybdène ;
- Acier hadfield écroui ;
- Acier martensitique ;
- Acier bainitique ;

#### b) Usure par déformation prépondérante :

- Acier martensitique ;
- Fonte blanche à haute teneur en chrome ;
- Acier austénitique au manganèse – molybdène ;
- Acier hadfield écroui ;

Les matériaux qui résistent le mieux à l'abrasion sont généralement très durs. Si les impératifs de résilience sont cruciaux, il faut mieux s'orienter vers les solutions à base de rechargements.

5. lorsqu'il y a abrasion par coupe, augmenter la dimension des grains de la structure métallurgique du métal.
6. lorsqu'il y a abrasion par déformation, affiner les grains de la structure métallurgique.
7. Abaisser au maximum les températures.
8. Eviter les corps gras qui facilitent la coupe.

### 9. Traitements de surface utilisables :

D'une façon générale, offre plus ou moins une certaine résistance à l'abrasion tout traitement de surface apportant conjointement :

- Une augmentation de la dureté superficielle
- Des contraintes résiduelles de compression,
- Une augmentation de la température admissible en surface sans perte notable de caractéristiques mécaniques.

10. dans certains cas, on utilisera un couple de matériaux avec la surface cinématiquement la plus longue plus dure que les particules abrasives et la surface cinématiquement la plus courte très tendre (ex : paliers en caoutchouc de turbine).

### B. Cas de corrosion, de frottement et d'usure

- Un procédé de phosphatation à base de fer et manganèse permet, grâce à la couche cristalline de phosphates complexes réalisées à la surface des métaux ferreux (quelques microns d'épaisseur)

a) D'éviter le contact métal-métal,

b) D'éviter le grippage et de diminuer le coefficient de frottement grâce au pouvoir d'absorption de la couche de phosphates par le lubrifiant, joint à l'effet de polissage des cristaux de phosphates.

L'imprégnation de la couche de phosphates, au point de vue lubrification, peut se faire :

- Par une huile neutre diluée au kérosène,
- Par une huile soluble,
- Par une solution colloïdale de graphite,
- Par une graisse au plomb,
- Ou encore par un produit à base de bisulfure de molybdène, ce procédé, par les quantités qu'il possède d'abaisser le coefficient de frottement, d'améliorer les conditions de rodage et éviter les grippages, a de nombreuses applications dans l'industrie

Un autre procédé de traitement de surface utilisé la propriété de sulfure de fer (FeS) d'être très favorable au frottement sur acier, grâce à une sulfuration de celui-ci par électrolyse en bains de sels ignés.

- Les procédés thermochimiques de cémentation au chrome, notamment, ou mieux par chrome aluminisation suivant la technique de PHILIPPE GALMICHE, donnent des résultats remarquables vis-à-vis du frottement et l'usure aux hautes températures.

**Les revêtements électrolytiques** : sans vouloir passer en revue toutes les possibilités de ces revêtements, nous ne retiendrons ici que quelques applications du chrome dur et du nickel :

des tiges de vérins hydrauliques sont protégées de l'usure et de la corrosion par un dépôt de nickel suivi d'une couche de chrome dur des non moules pour matière très abrasives sont revêtus d'une couche de chrome dur de 1/10 de mm d'épaisseur.

**La métallisation au pistolet :** permet un revêtement local pour les pièces soumises à abrasion, frottement, cavitation conjointement à la corrosion, elle était utilisée, il y a quelques années, uniquement pour la réparation des pièces détériorées. Cette technique s'applique maintenant aux revêtements dits à priori d'organes soumis au frottement, à la cavitation ou à l'abrasion, en même temps qu'à la corrosion.

### C. Cas d'oxydation sèche et protection

Processus de formation des oxydes lors de la réaction de l'oxygène avec un métal susceptible de donner un oxyde thermodynamiquement stable, on distingue plusieurs étapes :

- a) Absorption de l'oxygène : la surface se recouvre d'abord d'un film d'oxygène chimisorbé, ce film se transforme ensuite en une couche d'oxyde de quelques mailles cristallines d'épaisseur.
- b) Un stade de germination après une certaine incubation il y a apparition de germes d'oxyde, puis leur croissance latérale jusqu'au recouvrement complet de la surface et croissance en épaisseur de la couche uniforme.

On distingue ensuite :

- Formation de films minces : leur épaisseur variée entre 30 et 100Å,
- Formation de couches épaisses ( $e > \lambda$ ) : une pellicule épaisse idéale est constituée par une ou plusieurs phases continues homogènes et limités par des surfaces géométriques simples.

### D. Principe de la protection contre l'oxydation sèche

Il consiste à former à la surface du matériau métallique une couche d'alliage, obtenue par diffusion, qui, soit par sa propre inertie chimique soit en formant rapidement une couche protectrice d'oxyde, arrête ou freine l'oxydation ultérieure. La protection par formation rapide d'une couche oxydée est la plus généralement rencontrée elle fera le principal objet de. Notre examen.

#### Facteur de protection :

Pour son principe, pour que la protection soit effective il faut que la couche protectrice empêche l'accès de l'oxygène jusqu'au métal allié.

Il faut donc que cette couche soit la plus imperméable possible, elle doit être continue uniforme. Elle doit être adhérente et avoir la porosité la plus faible possible. Les propriétés et la nature du support influent sur la protection. La préparation de la surface, les inclusions, la taille des grains, les hétérogénéités diverses sont des facteurs agissants sur la porosité de la couche protectrice.

Les accidents, les chocs par exemple, en écaillant la couche d'oxyde localement, détériorent la protection, ceci explique les recherches faites actuellement en vue d'élaborer des couche auto réparatrice qui auraient le pouvoir de se << cicatriser >>> en cas d'écaillage accidentel en reformant rapidement l'oxyde.

### E. Cas de cavitation

1- Eviter la présence de petites impuretés solides dans le lubrifiant sans rien changer au circuit, il est souvent possible de supprimer toute cavitation par la simple adjonction d'un filtre à maille fine ou d'un filtre centrifuge,

2- Eviter les gradients trop brusques de pression : lorsqu'il y a détente d'un film sous pression celle-ci doit se faire dans un espace ouvert (par exemple échappement d'un film de la tête de bielle dans le carter ) ; par contre s'il y a détente dans un espace clos, on pourra éviter la cavitation en installant un gavage dans cet espace ; par où l'huile passe successivement lors de son parcours de 360° dans les zones alternées de haute pression et de détente on peut supprimer la cavitation en installant un gavage des zones de détente,

3- Eviter les gradients trop brusques de température,

4- Eviter les turbulences sur les parcours du lubrifiant (éviter les coudes, les changements brutaux de section, les jets se brisant sur une paroi etc.) ;

5- On peut lutter également contre la cavitation en remarquant que si l'onde de choc de l'implosion est très puissante, par contre son volume d'action est très faible : de sorte qu'une simple peinture laissant à la surface du métal une pellicule relativement mince, mais très aisément déformable, comme du plastique ou du caoutchouc, peut protéger efficacement de la cavitation (à condition bien entendu qu'il n'y ait pas effet concomitant d'érosion).

## 3.7. L'USURE ET DIFFERENTES FORMES DE MAINTENANCES

D'après [fra ...], on peut affirmer les faits suivants concernant l'usure, en fonction différentes formes de maintenance :

### A. Maintenance corrective

- Aucun suivi du matériel n'est mis en place
- Symptômes d'un grippage inadmissible : échauffement, chute de performances, vibrations excessives...
- Intervention corrective : échange, reprise de surface ou rechange, traitement de surface.

### B. Maintenance préventive par visites

- Des visites périodiques permettent de déterminer la loi d'usure, et le seuil d'admissibilité.
- Intervention préventive au seuil d'admissibilité.

### **C. Maintenance systématique**

- La loi d'usure est connue : on fixe la date d'intervention périodique correspondant au seuil d'usure.

### **D. Maintenance conditionnelle**

- Il existe un paramètre mesurable (niveau de vibration par exemple) significatif de l'usure.
- Une alarme déclenche l'intervention lorsque le seuil est atteint par le paramètre suivi.

**Remarque :** les analyses des huiles, par la teneur en particules métalliques fonction du degré d'usure des guidages, est un bon exemple de maintenance conditionnelle par mesure d'un paramètre.

## **CONCLUSION**

1. L'étude bibliographique sur l'usure, qui est l'une des conséquences nuisibles du frottement, a porté en premier lieu sur la définition et l'importance de l'usure, qui est très déterminante pour la fiabilité, la durabilité des machines et leur maintenance.

2. En deuxième lieu cette étude on a considéré les divers mécanismes et types d'usure (usure abrasive, usure adhésive, usure par fatigue et autres) afin de mieux les connaître et pronostiquer les voies de lutte contre ce phénomène nuisible.

3. En troisième lieu l'étude a concerné les phases d'usure des pièces de machines qui doivent être bien connues par les spécialistes d'exploitation (maintenance) des machines et équipements industriels.

4. L'étape la plus forte de cette étude a concerné les différentes caractéristiques de l'usure et l'influence des divers facteurs (charge, vitesse, état des surfaces, ...) sur le frottement et l'usure des corps solides.

5. Enfin l'étude a été couronné par la présentation des voies et moyens de réduction du frottement et de l'usure aux stades de construction et d'exploitation des machines. Ces voies et moyens doivent être bien connus par les constructeurs et les spécialistes d'exploitation (maintenance) des machines et équipements industriels.

**CHAPITRE 4**

**ETUDE DU FROTTEMENT ET DE L'USURE  
DES FREINS MECANQUES A BANDE DES TREUILS DE  
FORAGE PETROLIER**

## **INTRODUCTION**

Avant d'entamer la proposition de l'étude de cas du système tribologique que représente le frein mécanique à bande d'un treuil de forage pétrolier, nous allons donner un aperçu sur les treuils de forage classiques.

Ensuite nous allons faire une description du frein mécanique à bande d'un treuil de forage pétrolier des points de vue conception et fonctionnement.

Après cela nous allons faire une étude mécanique d'un frein mécanique à bande, tenant compte du frottement dans ce dispositif.

Enfin nous allons terminer ce chapitre par des connaissances sur l'usure et l'entretien des freins mécaniques à bande en exploitation.

## **4.1. APERÇU SUR LE TREUIL DE FORAGE ET SES COMPOSANTS**

### **4.1.1. Généralités sur le treuil de forage**

Le treuil de forage (TDF) est l'équipement essentiel de tout l'appareil de forage de puits pétroliers. Sa capacité de levage et sa vitesse de manœuvre conditionnent pour une large part l'efficacité de la sonde.

Le treuil de forage est destiné à :

- Assurer les manœuvres de remontée et de descente et d'ajout des tiges de forage ;
- Assurer les manœuvres de descente des tubages ;
- Régulariser la vitesse de descente et l'arrêt du crochet sur toute la longueur de son déplacement ;
- Permettre le réglage de la vitesse d'avancement de l'outil pendant le forage ;
- Servir à l'assemblage et au désassemblage des connexions filetés (en absence de clés spéciales) s'il est équipé de tambour de curage et de cabestans ;
- Servir à l'entraînement de la table de rotation (sauf si elle dispose d'un entraînement individuel).

La remontée et la descente du train de sonde se produisent plusieurs fois, toutes les opérations se répètent systématiquement dans un ordre rigoureux et la charge sur le treuil a dans ces conditions un caractère cyclique (pulsatoire). Pendant la remontée du crochet la puissance est transmise des moteurs vers le treuil, et pendant la descente c'est l'inverse, **les dispositifs de freinages doivent transformer l'énergie libérée en chaleur**. Pour une meilleure utilisation de la puissance pendant la remontée du crochet avec des charges différentes les commandes du treuil doivent avoir plusieurs vitesses.

Le treuil doit passer des grandes aux petites vitesses de remontées et inversement, assurer un démarrage (mise en rotation du tambour) souple avec des pertes de temps minimales à ces opérations. Dans les cas de coincement et de serrage des trains, la force de traction doit être augmentée rapidement à n'importe quel moment. Pour cela ce genre de

démarrage doit être réalisé par des embrayages à friction pneumatiques sans arrêt du tambour.

On distingue divers types et classes des treuils selon divers critères (structure, dimensions, capacité, type de commande, ...).

Pour la réalisation des fonctions citées, tous les treuils doivent être équipés des principaux éléments (dispositif) suivants :

- Un châssis recevant les autres organes du treuil.
- Un tambour de manœuvres (tambour principal), sur lequel s'enroule le câble de forage.
- Un arbre principal, auquel est rigidement lié le tambour, il prend appui sur le châssis à travers des roulements à rouleaux sphériques et reçoit les roues dentées et les parties tournantes des embrayages.
- Un frein mécanique à bandes (frein principal) permettant l'arrêt du treuil à la fin de la remontée et le contrôle (ralentissement et/ou arrêt) de la descente de la charge suspendue au crochet (en absence dans la construction du treuil de dispositifs prévus à cet effet).
- Un frein ralentisseur (auxiliaire) monté sur l'axe du tambour pour le réglage de la vitesse de descente des trains et la dissipation d'une partie de l'énergie qui se dégage pendant cette opération. Ce frein est de type hydraulique ou électromagnétique, installé au bout de l'arbre principal.
- Deux embrayages pneumatiques (de type Airflex) de petites et grandes vitesses permettant la mise en rotation de l'arbre –tambour en établissant sa liaison avec l'arbre intermédiaire de boîte de vitesse.
- Des transmissions réalisant la transmission de puissance et la rotation du tambour pendant la remontée.
- Une boîte de vitesse, situé à l'arrière du treuil.
- Un poste de commande du treuil et des principaux organes de l'installation.
- Un panneau d'appareils de contrôle de travail du treuil et des autres agrégats de l'installation.

Les treuils de forage peuvent avoir d'autres dispositifs (arbre de cabestan, arbre d'entraînement de la table de rotation, ...).

Le schéma de construction d'un type de treuil de forage est montré sur la figure 4.1

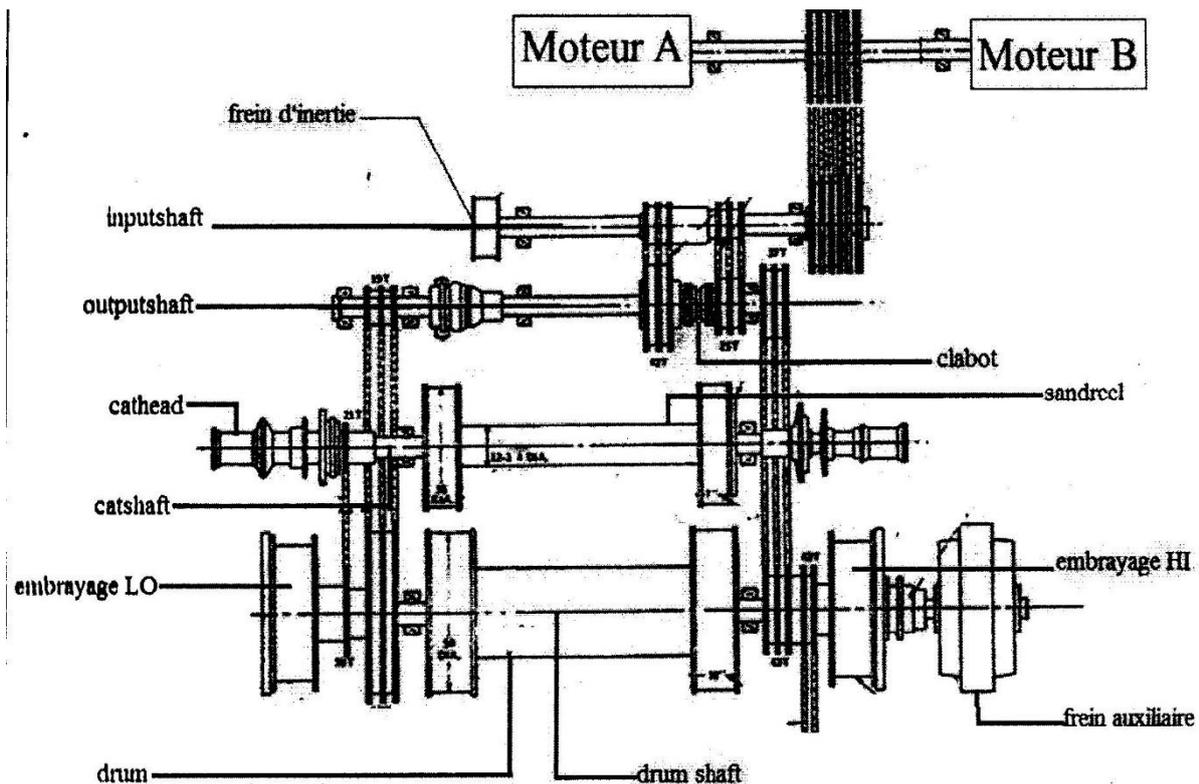


Fig.4.1 Schéma de construction du treuil de forage Oil Well 840 E

Le treuil de forage doit répondre à plusieurs exigences relatives à sa construction, parmi lesquels, nous tenons citer :

- L'ensemble de l'arbre avec le tambour de manœuvre, les transmissions et les embrayages pneumatiques doivent être montés dans un châssis, assurant la résistance nécessaire et la rigidité de la construction.
- Le frein principal doit assurer un freinage progressif croissant et souple du tambour. En conformité avec les exigences de la sécurité technique, il doit être monté directement sur le tambour, ses bandes doivent embrasser les poulies (jantes) de freinage pendant le freinage et assurer la libre rotation pendant la descente et la bonne dissipation de l'énergie qui se dégage pendant le freinage.
- Le frein auxiliaire doit effectuer le freinage du tambour seulement pendant la descente des trains de sonde. Pendant la remontée d'un train et la rotation du tambour dans le sens contraire le freinage (par le frein auxiliaire) doit être exclu.

#### 4.1.2. Présentation de l'ensemble arbre - tambour de manœuvre et d'autres éléments tournants du treuil de forage

Le dessin de l'ensemble arbre-tambour et d'autres éléments tournants du treuil est montré sur la figure 4.2. Sur ce dessin on peut voir la plupart des principaux composants du treuil.

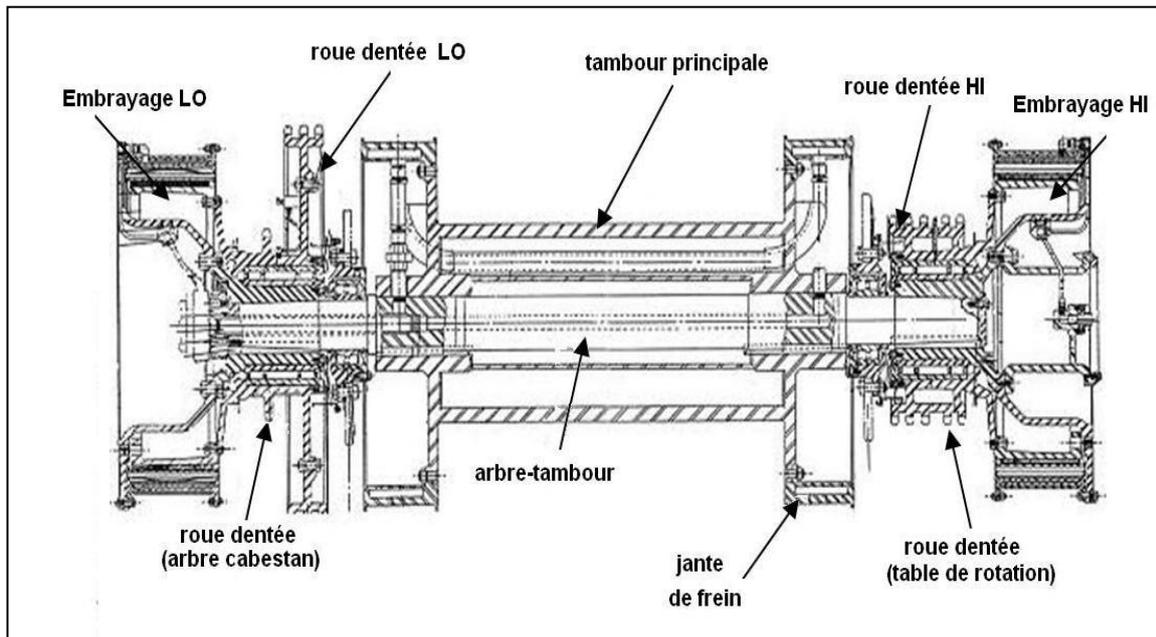


Fig 4.2 : Ensemble arbre- tambour et d'autres éléments du treuil OIL WELL 840 E

L'arbre et le tambour de manœuvre et les autres éléments tournants du treuil doivent chacun répondre à des exigences bien déterminées pour être apte à remplir ses fonctions avec fiabilité et efficacité.

Considérons, en particulier, les fonctions des différents types de freins d'un appareil de forage.

Les freins d'un appareil de forage sont destinés à :

- la création d'un effort sur le brin actif, assurant le maintien en état de repos du train de sonde (TDS) de poids maximal, pour lequel est calculé cet appareil.
- l'arrêt complet du train de sonde (ou autrement dit de la garniture de forage ou de la charge au crochet) lors des manœuvres de remontée et de descente du train de sonde suspendu au crochet et au moufle mobile, aux moments de mises sur coins (à la fin de la remontée ou de descente d'une longueur de longueurs – assemblage de 3 tiges).
- l'absorption de la grande énergie potentielle du train de sonde suspendu au crochet au cours de sa descente, à la longueur d'une longueur de tiges, avec la vitesse maximale admissible contrôlée par le freinage et l'arrêt complet du TDS à la fin de la descente.
- la garantie de l'avance progressive du TDS au fur et à mesure de l'approfondissement du trou par suite du réglage du moment de rotation de l'arbre tambour.
- l'absorption de la grande énergie potentielle des colonnes de tubages suspendu au crochet au cours de leurs descentes et arrêts à la fin de l'assemblage de chaque tube ajouté.

Pour l'exécution de toutes ces opérations, les treuils sont équipés par :

- Un frein principal (frein d'arrêt) : le frein mécanique à bande, qui sert presque uniquement aux moments des mises sur coins, à l'arrêt complet du tambour lors des manœuvres de remontée et de descente du TDS.
- Un frein auxiliaire régularisant la vitesse de descente du TDS et absorbant la plus grande partie de l'énergie dégagée pendant cette descente. Ce frein est de type hydraulique ou électromagnétique.
- Un dispositif spécial assurant l'avancement automatique du trépan pendant le forage proprement dit

Lorsque le treuil n'est pas équipé du dispositif d'avancement automatique, c'est le frein mécanique à bandes qui sert au contrôle (manuel) de la descente du train de sonde au fur et à mesure de l'avancement du trépan.

Le frein mécanique à bandes ne peut pas permettre de réaliser seul toutes les opérations citées du fait qu'au cours de sa descente le train de sonde (ou la colonne de tubage) crée une grande énergie cinétique, et son absorption par des freins mécanique est limitée par les températures maximales admissibles, qui naissent sur les surfaces de frottement, et les possibilités d'évacuation de la chaleur dégagée par ces freins. La température maximale admissible des surfaces de frottement est habituellement limitée à 500°C. Pour des températures plus grandes les qualités de friction des garnitures (patins de freinage) et la résistance des surfaces des jantes diminuent brusquement. La descente de trains de sonde lourds avec une grande vitesse et un freinage brusque conduit au fait que la température sur les surfaces de frottement atteint 1000°C et plus.

Le frein hydraulique ne peut pas servir de frein arrêtoir, parce que la puissance de celui-ci est proportionnelle à sa vitesse.

Toute la sécurité du sondage repose sur le bon fonctionnement des freins. Il s'agit donc de mécanismes de toute première importance, car une diminution de la capacité de freinage aurait des conséquences graves.

## **4.2. DESCRIPTION GENERALE DES FREINS MECANIQUES PRINCIPAUX DU TREUIL DE FORAGE**

Comme on l'a déjà mentionné, les jantes ou poulies de freinage sont montées directement sur le tambour (fixées aux joues du tambour), ce qui est dicté par les exigences de la sécurité technique pendant le forage, en outre, ceci diminue les masses des éléments intermédiaires, ce qui se fait pour améliorer les qualités dynamiques des treuils.

En outre, les freins principaux dans certains cas peuvent accomplir les fonctions de dispositifs pour l'avancement automatique du trépan. Ces derniers dispositifs ont diverses constructions. Ils peuvent être conçus pour agir sur le système principal de freinage ou en tant que dispositifs à part (voir plus bas).

Il est à noter qu'on calcule les freins principaux pour le freinage du crochet, se déplaçant à la vitesse 1 à 3 m/s et absorbant pendant la descente des puissances jusqu'à 10000

Kw, et qu'en même temps pendant l'avancement du TDS pendant le forage les vitesses de descente très faibles jusqu'à ( $\leq 0.03$  m/s), et la puissance respective 5 à 30 Kw.

Il est normal qu'un seul et unique frein ne peut satisfaire complètement à toutes ces exigences pour un aussi large diapason de puissances, du fait que les coefficients de frottement pour des petites vitesses ne sont pas stables, pour cela pour le forage dans des conditions difficiles il est rationnel de concevoir les treuils avec des dispositifs, capable d'accomplir un réglage fin de la vitesse de descente et d'avancement au cours du forage du puits.

On utilise 3 types de frein auto-serreur des treuils de forage, permettant avec une faible force appliquée au levier du frein de provoquer une grande pression sur la jante. Cependant on utilise souvent le frein mécanique à bandes simple (fig.4.3).

Le frein de treuil de forage absorbe une grande puissance, d'où le dégagement d'une quantité de chaleur, qui chauffe momentanément les surfaces de frottement. En relation avec ceci une bonne dissipation de la chaleur pendant le frottement représente l'une des principales qualités du frein de treuil. Pour cela on conçoit le système de refroidissement en fonction du chargement des freins avec de l'eau ou de l'air.

Le système de refroidissement à l'eau avec des chambres disposées sous les jantes, possède les inconvénients suivants : ne permet pas d'éviter une grande différence de températures sur les surfaces de frottement et les surfaces intérieures des jantes, la nécessité de conduire de l'eau à l'arbre du tambour tournant et le chauffage du système de conduite d'eau pour éviter son gel en hivers (lorsqu'il fait très froid). Malgré cela le système de refroidissement à l'eau est très répandu.

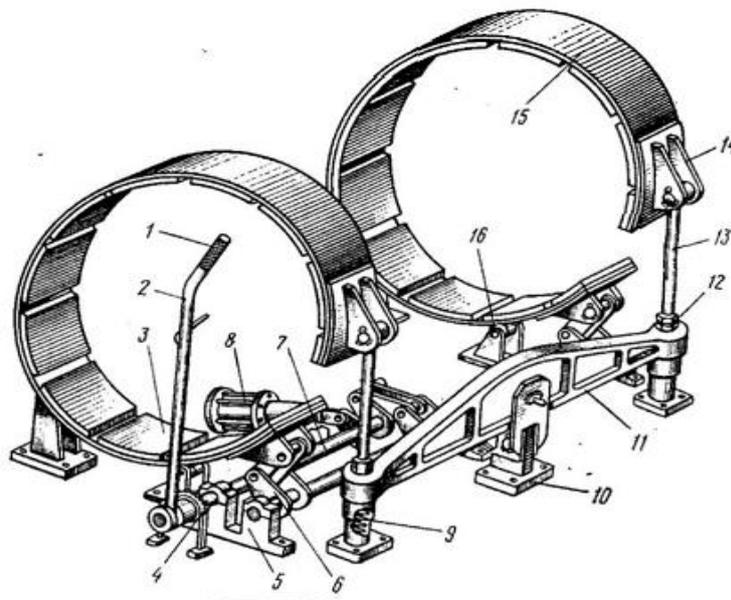


Fig. 4.3 vue générale d'un frein mécanique à bande d'un treuil de forage

1- Poignée ; 2 – leviers de freinage ; 3 – patins ; 4 – fixateur du levier ; 5 - support de l'arbre coudé ; 6 - levier ; 7 - arbre coudé ; 8 - vérin pneumatique ; 9 - ressort de fixation de la bande ;

10 - appui de la barre d'équilibrage ; 11 - barre d'équilibrage ; 12 - contre écrou ; 13 - tringle ; 14 – fixation de la bande ; 15 - bande de freinage ; 16 - galet de soutien.

Suivant la construction et le schéma cinématique il existe divers modèles du frein mécanique à bandes, mais qui diffèrent peu les unes des autres. Sur la fig.4.4 sont montrés différents schémas de commande des freins mécaniques à bandes.

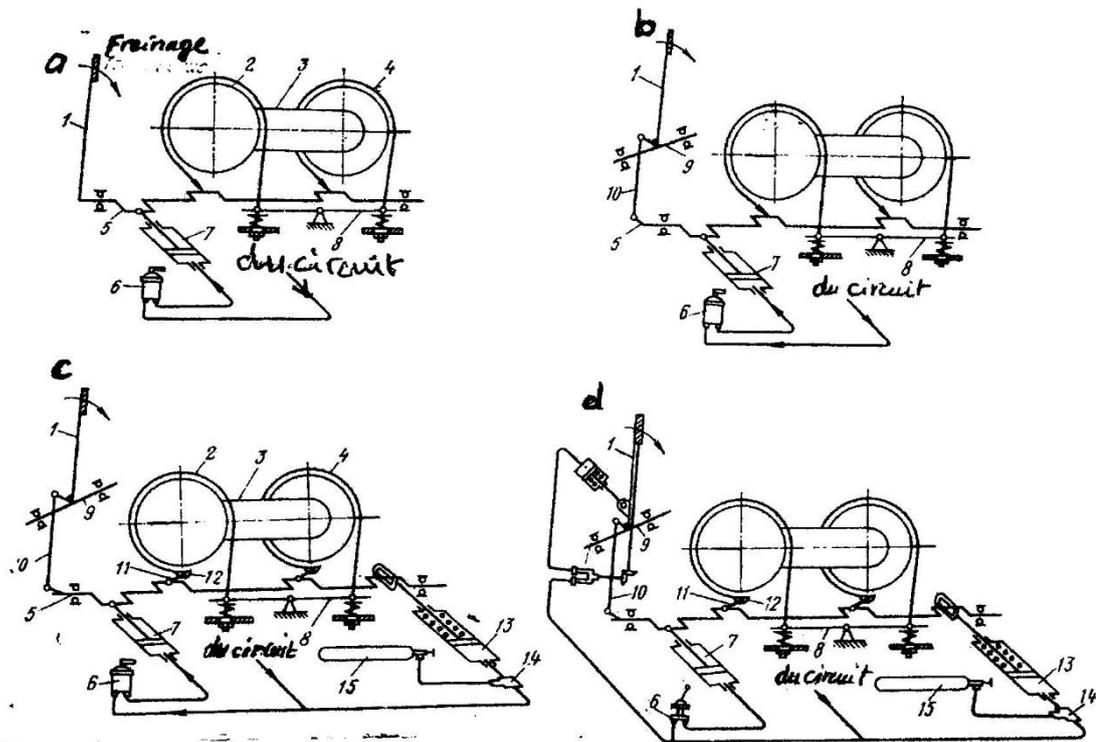


fig.4.4 : schémas de freins à bandes de forage :

- 1- levier de freinage ; 2 - jante de freinage ; 3 - tambour ; 4 - bande de freinage ; 5 - arbre coudé ; 6 - vanne de commande pneumatique ; 7 - vérin ; 8 - barre d'équilibrage ; 9 - axe du levier ; 10 - tringle ; 11 - actionneur (levier) ; 12 - semelle (pédale) ; 13 - vérin de sécurité ; 14 - clapet anti-retour ; 15 - bouteille d'air.
- a - le levier de freinage est monté directement sur l'arbre coudé du treuil ;  
 b ; c ; d- la commande du treuil est à distance.

Le frein mécanique du treuil (fig.4.4, a) comprend deux jantes, montées sur le tambour, qui sont enveloppées par des bandes métalliques de forme circulaire équipées de garnitures intérieures (patins fixés généralement aux bandes par des boulons en cuivre ou en aluminium, à tête noyée). Chaque bande de freinage a une extrémité (extrémité immobile ou fixe) reliée à la barre d'équilibrage, ce qui permet de répartir également la force de freinage entre les deux bandes et réduit ainsi l'usure des patins, et l'autre extrémité (extrémité mobile) est reliée à un coude d'un arbre coudé (ou à un arbre droit par l'intermédiaire d'un levier ou d'une came). Cet arbre est relié d'un coté au levier de freinage par l'intermédiaire d'un jeu de

coudes (leviers et/ou de cames). L'un des coudes (ou des leviers) de cet arbre est assemblé à un cylindre pneumatique (vérin), augmentant l'effort de freinage.

Le pivotement de l'arbre coudé provoque le déplacement des extrémités mobile des bandes reliées à ses coudes, et par conséquent les bandes de freinage viennent se presser par l'intermédiaire des garnitures contre les jantes, ce qui provoque le freinage. Le freinage est commandé par le levier de freinage. Le pivotement (l'inclinaison vers le plancher) de l'arbre coudé est provoqué soit manuellement par le levier de freinage, soit par le vérin du cylindre pneumatique 7. La commande pneumatique du freinage s'effectue par une manette, se trouvant sur le levier de freinage ou sur le poste de foreur.

Le levier de freinage doit avoir un angle de pivotement ne dépassent pas 90°, puisque pour la longueur du levier 1,2 à 1,6 m l'ouvrier ne peut le déplacer à un angle plus grand.

Le système de freinage peut être équipé d'un cylindre pneumatique de sécurité (vérin auxiliaire d'avarie), lié à l'arbre coudé par un anneau. Ce cylindre peut être alimenté avec de l'air comprimé d'un ballon à travers un clapet anti-retour et agit dans le cas de baisse de la pression de l'air comprimé dans la canalisation d'air principale.

La surface des jantes est généralement cimentée (saturé au carbone), afin d'être plus résistante à l'usure. Un refroidissement des jantes par une circulation d'eau intérieure est indispensable pour maintenir une température normale.

L'amplification dans l'articulation du levier de frein est obtenue par biellettes ou cames. Le rapport du bras de levier ( $l/r$ ) est d'environ 50/1, et souvent plus grand. Il résulte d'un compromis, de manière à obtenir une amplification suffisante, sans trop diminuer le trajet de la bande, car plus court est le trajet de la bande moins il y a de jeu. Des jeux faibles produisent un raclement presque permanent de la bande contre la jante, des difficultés de réglage et une usure rapide des bandes et des jantes. Le déplacement de l'extrémité mobile de la bande est de l'ordre de quelques centimètres (8 à 12 cm).

Les patins doivent avoir un coefficient de friction élevé, en particulier celles du côté fixe de la bande. Les patins de ce côté de la bande sont soumis à un effort de compression beaucoup plus grand que pour les suivantes, mais paradoxalement, dans la pratique les patins du côté de l'extrémité mobile qui s'usent plus vite que le reste des patins de la bande. Cependant pour des raisons de simplification, on n'utilise pratiquement qu'une seule qualité de garniture.

Il est très important que les bandes soient réglées de manière à présenter en position relâchée un jeu suffisant (1 à 2 mm) entre la jante et la garniture pour éviter le frottement.

Pour comparer la capacité de charge de différents freins, il faut considérer :

- Le rapport entre le diamètre de la jante de freinage et celui du tambour.
- L'angle de contact entre la bande de frein et la jante (cette caractéristique et la largeur déterminent la surface de freinage).
- L'amplification mécanique de l'articulation du levier.
- Le coefficient de friction des garnitures.

### 4.3. ETUDE MECANIQUE DU FREIN MECANIQUE A BANDES D'UN TREUIL DE FORAGE

Cette étude mécanique met en exergue l'importance des caractéristiques du frottement dans un frein mécanique à bandes d'un treuil de forage. Dans cette étude, nous avons pris en considération des études existantes dans beaucoup d'ouvrages [ILS 85, LEB 62, BOL 12], en prenant en considération les différences d'approches concernant certains détails.

#### 4.3.1. Moments et forces agissants sur le frein mécanique à bande au cours du freinage

La bande de freinage dotée des patins de freinage est considérée comme un lien souple embrassant la jante (la poulie) de freinage ayant la surface de frottement cylindrique. Pour cela, nous allons utiliser les relations connues relatives aux forces agissantes sur cette bande de freinage. Ces relations découlent de l'analyse d'un lien flexible sur une poulie, qui est initiée par EULER et adoptée par les spécialistes.

Le principal paramètre de départ lors de la conception et du calcul du frein mécanique à bande est le moment de rotation (torsion) maximal agissant sur l'arbre de levage au cours des opérations de forage (généralement en phase d'accélération de la remontée du train de sonde ou en phase de freinage de la descente du train de sonde ou des colonnes de tubage). Ce moment de rotation (torsion) maximal est dû à la tension maximale agissant sur le brin actif du câble, qui est elle-même conditionnée par la charge au crochet maximale apparaissant au cours de ces opérations. Ce moment est déterminé par calcul statique ou dynamique [BOL 12]. Dans le cas de calcul statique les efforts d'inertie sont négligés (accélérations nulles ou très faibles).

La charge statique maximale au crochet ( $P_{cmax}$ ) de calcul des éléments du système de levage est prise égale à la limite de rupture probable des tiges de forage utilisées ( $R_{rt}$ ) ou 0,8 du poids maximal de la colonne de tubage ( $G_{ct}$ ) [ ILS 85]:

$$P_{cmax} = R_{rt} = 0,8 G_{ct} < R_{em} \quad ()$$

où  $R_{em}$  - capacité de charge probable des éléments du mouflage (par exemple la capacité de charge du crochet ou du moufle mobile).

Il est à noter qu'on calcule les freins mécaniques à bande dans les conditions de freinage de descente de la charge la plus lourde (train de sonde ou colonne de tubage)

Le moment **de rotation (torsion)** maximal de l'arbre ( $M_{amax}$ ) est calculé par la relation :

$$M_{amax} = T_{bmax} \cdot \frac{D_e}{2} \quad (4.1)$$

Où  $T_{bmax}$  : tension maximale statique agissant sur le brin actif du câble ;  $D_e$  : diamètre d'enroulement du câble.

D'autre part la tension maximale statique agissant sur le brin actif du câble  $T_{bmax}$  ne doit pas provoquer la rupture du câble, ainsi dans le cadre de calcul de projet cette tension est estimée de la relation suivante exprimant la condition de sécurité du câble [ILS 85] :

$$T_{bmax} = \frac{R_c}{n_f} \quad (4.2)$$

Où  $R_c$  : Charge de rupture du câble ;  $n_f$  – coefficient de sécurité de freinage, pour la charge maximale au crochet. Dans ce cas, on prend  $n_f = 1,5$  à  $2$ .

Dans le cas de conditions d'exploitation données  $T_{bmax}$  peut être calculées par les formules connues en fonction la charge au crochet maximale et autres paramètres relatifs au mouflage [ILS 85].

Ainsi, on peut calculer  $M_{amax}$  comme suit :

$$M_{amax} = \frac{R_c \cdot D_e}{n_f \cdot 2} \quad (4.3)$$

Lorsqu'on actionne le frein à bande, grâce à l'effort ( $F_l$ ) exercé par l'opérateur perpendiculairement au levier de freinage, la jante de freinage exerce sur la surface des patins en contact avec cette jante une force périphérique ( $F_p$ ), qui n'est autre qu'une force de frottement, qui tend à entrainer les patins avec elle en rotation. Ces patins transmettent cette force à la bande à laquelle ils sont rigidement fixés.

A leur tour les patins en contact avec la jante conjuguée, pendant la période de freinage, réagissent avec des forces de frottement réparties sur les surfaces de contact des jantes et qui tendent à freiner le tambour tournant. Appelons la somme de ces forces de frottement la force de freinage (F) agissant sur les patins des deux bandes.

**La force de freinage totale** (F), qui s'exerce sur les deux jantes de freinage, de diamètre  $D_f$ , crée un moment de forces de frottement :

$$M_f = F \frac{D_f}{2} \quad (4.4)$$

Où  $D_f$ : diamètre des jantes de freinage

Dans les conditions d'équilibre statique du tambour, tenant compte du rendement du tambour ( $\eta_T = 0.85$  à  $0.95$ ), on obtient la relation suivante :

$$M_f = M_{amax} \eta_T$$

Alors, tenant compte des relations (4.3) et (4.4) on obtient la relation :

$$F D_f = T_{bmax} D_e \eta_T = \frac{R_c}{n_f} D_e \eta_T \quad (4.5)$$

**La force de freinage**, qui s'exerce sur une seule jante de freinage est déterminée par la formule suivante :

$$F_1 = \frac{T_{bmax} D_e \eta_T}{z D_f} = \frac{R_c D_e \eta_T}{n_f z D_f} \quad (4.6)$$

Où  $z$  : nombre de jantes de freinage ( $z=2$ ).

Remarques :

- Dans ces relations, on peut approximativement prendre :  $D_e = D_T + d_c$ , où  $D_T$  – diamètre du fût du tambour et  $d_c$  – diamètre du câble de forage, Ce qui s'explique par le fait qu'à l'arrêt du tambour suite à la phase de freinage de descente de la charge au crochet,  $D_e$  concerne la première couche d'enroulement du câble.
- La plupart des treuils ont un rapport entre les diamètres de la jante de freinage et du tambour :  $D_f/D_t \approx 2$ .

Dans les calculs de projet approchés du frein du tambour peut être considéré comme un frein à bande simple (sans patins), dans lequel la bande souple à garniture de friction serre sur la jante de freinage.

Dans ce cas pour la détermination approchée de la force périphérique (force de frottement totale) sur la jante de freinage, on se base sur la relation exprimant la condition d'équilibre statique des bandes :

$$T = t + F \quad (4.7)$$

Où  $T$  : la tension agissante sur les extrémités fixes des deux bandes ;  $t$  : la tension agissante sur les extrémités mobiles des deux bandes de freinage (fig.4.5).

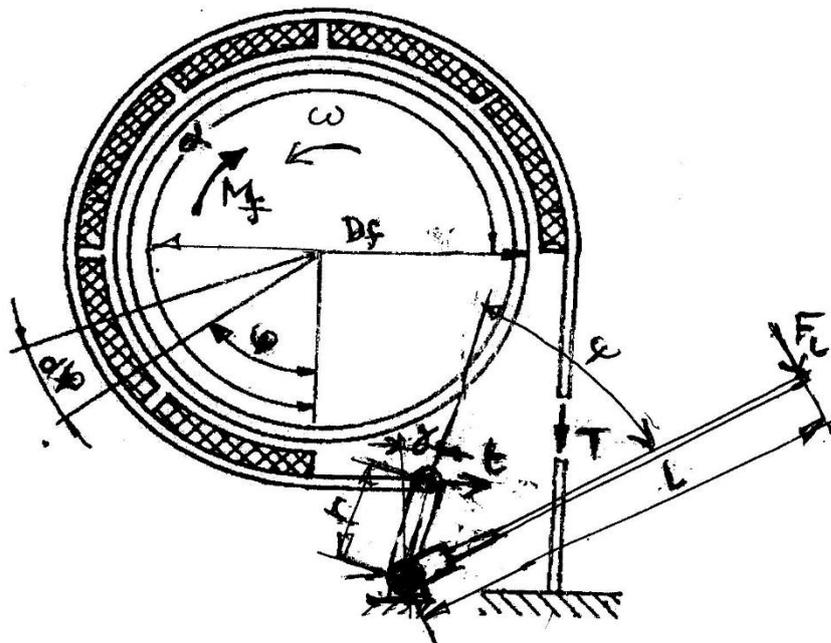


Fig.4.5 : Schéma de calcul des forces agissantes sur les éléments du frein

De cette dernière relation, il est simple d'obtenir la relation permettant la détermination de  $F$  :

$$F = T - t \quad (4.8)$$

Et dans ce cas, la tension agissante sur les extrémités fixes des bandes est déterminée par la relation d'EULER :

$$T = t e^{f\alpha} \quad (4.9)$$

Où  $e$  – base du logarithme naturel ( $e = 2,718$ ) ;  $f$  - le coefficient de friction des patins sur les jantes de freinage (ferrodo/acier ou ferrodo/fonte)  $f = 0,35$  à  $0,45$  ;  $\alpha$ - l'angle total de contact de la bande de freins et de la jante, en radians.

Tenant compte des relations (4.8) et (4.9), on obtient la formule classique de calcul de la force de freinage dans les freins à bandes est :

$$F = t (e^{f\alpha} - 1) \quad (4.10)$$

Tenant compte de ces dernières relations exprimer les tensions  $T$  et  $t$  en fonction de la force de frottement  $F$  :

$$T = \frac{F e^{f\alpha}}{e^{f\alpha} - 1} \quad (4.12)$$

et

$$t = \frac{F}{e^{f\alpha} - 1} \quad (4.13)$$

La tension agissante sur les extrémités mobiles des deux bandes de freinage est dû à la force appliquée au levier de freinage. Alors, Elle peut calculée de la relation exprimant la condition d'équilibre statique de l'arbre coudé du frein :

$$t \cdot r = F_l \cdot L \cdot \eta_{cf} \quad (4.14)$$

Alors, on déduit que la tension  $t$  peut être déterminée par la relation :

$$t = F_l \left( \frac{1}{r} \right) \eta_{cf} \quad (4.14)$$

Où  $F_l$  – force appliquée au levier de freinage ;  $L$  - longueur du levier de freinage ;  $r$  - excentricité ;  $\eta_{cf}$  - rendement de la commande du frein manuel.

Tenant compte des relations (4.4) et (4.14), le couple de freinage agissant sur le tambour peut être calculé par la relation :

$$M_f = F \frac{D_f}{2} = F_l \frac{1}{r} \eta_{cf} (e^{f\alpha} - 1) \frac{D_f}{2} \quad (4.15)$$

De cette expression, il est clair que le couple de freinage ou le moment des forces de frottement agissant sur les jantes de freinage dépend de la force exercée par l'opérateur sur le levier de freinage et des paramètres de construction du frein.

Sur la figure 4.6 est montrée la caractéristique du couple de freinage d'un frein à bandes, comparée à celles d'autres types de freins (freins auxiliaires).

L'angle de contact entre la bande et la jante doit être le plus élevé possible. Plus grand est l'angle de friction, plus grande est la force de freinage. Par exemple, un frein de  $330^\circ$  d'enroulement pourra supporter une tension sur le câble presque une fois et demie plus grande qu'un frein de  $270^\circ$ , toutes choses égales par ailleurs. Les freins de tambours modernes pour avoir un angle d'enroulement aussi proche de  $360^\circ$  et un angle d'embrassement compris entre  $330^\circ$  et  $350^\circ$  [LEB 63].

Cependant des formules établies, on voit que la largeur des bandes n'influe pas sur l'effort de freinage, il faut quand même en tenir compte pour évacuer la chaleur dissipée par freinage. Ainsi du point de vue des efforts de freinage, il est donc indifférent d'avoir une ou deux bandes de frein, mais pour équilibrer les efforts et réduire l'échauffement des surfaces de frottement et par conséquent l'intensité d'usure que l'on réalise des freins à 2 bandes. Il est à noter qu'en cas de rupture d'une bande, la deuxième est capable de supporter la même charge que les deux ensembles. Cependant, l'échauffement excessif de la bande restant en service pourra réduire son efficacité. La largeur de chaque bande est, selon les treuils, comprise entre 20 et 32 cm.

Le coefficient de frottement doit être élevé pour augmenter l'efficacité du frein, surtout concernant les patins les plus chargés, mais il y a aussi d'autres paramètres importants : la vitesse de frottement de patins sur les jantes, la pression de contact déterminant la largeur du frein et l'usure des surfaces des patins et des jantes.

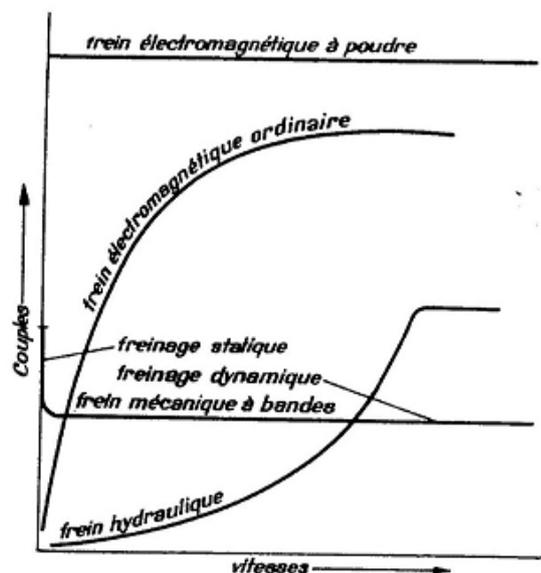


Fig.4.6 : Caractéristiques de différents types de freins [LEB 63]

### 4.3.2. Variations de la pression de contact entre les patins et les jantes

Pour analyser la variation de la pression de contact entre les patins et les jantes considérons l'élément de bande (fig.4.7), de longueur  $Rd\theta$ , qui est sollicité :

- en D par une tension  $\vec{F}$  (coté brin fixe)
- en C par une tension  $\vec{F} + d\vec{F}$  (coté brin mobile)
- en O par la résultante des actions de contact  $d\vec{Q}$  avec  $d\vec{Q} = d\vec{N} + d\vec{T}$  et  $d\vec{T} = f \cdot d\vec{N}$

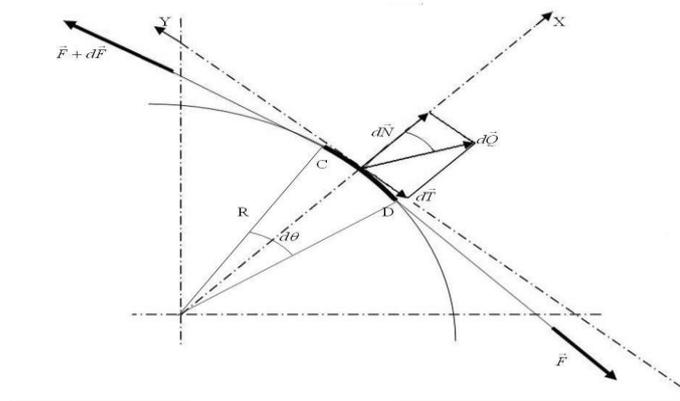


fig.4.7 Efforts sur un élément de bande

$$\sum \vec{F}_{ds} = \vec{F} + (\vec{F} + d\vec{F}) + d\vec{Q} = \vec{0}$$

En projetons sur OX et OY respectivement :

$$\begin{cases} -(F + dF) \frac{d\theta}{2} - F \frac{d\theta}{2} + dN = 0 \\ (F + dF) - F - fdN = 0 \end{cases}$$

Avec  $dF \frac{d\theta}{2} \approx 0$

$$\begin{cases} dN = Fd\theta \\ dF = fdN \end{cases}$$

Soit  $p$  la pression de contact agissant sur l'élément  $ds = bRd\theta$

Où  $b$ : largeur de jante ;  $R_f$ : rayon de la jante

$$P = \frac{dN}{ds} = \frac{Fd\theta}{bRd\theta} = \frac{F}{bR}$$

La pression de contact  $p$  est maximale en B où  $F = T$ , et minimale en A où  $F = t$

$$p_{\max} = \frac{T}{bR}$$

$$p_{\min} = \frac{t}{bR}$$

La condition de résistance au contact des patins s'écrit [BOL12] :  $p_{\max} \leq [P]$ , où [P] : pression de contact maximale admissible des patins. Généralement [BOL12] :  $[p] = 1.2 \text{ MPa}$ .

La pression  $P_{\theta}$  en un point situé d'un angle  $\theta$  de l'extrémité fixe B (fig.4.8) :

$$P_{\theta} = \frac{F}{bR} = \frac{T \cdot e^{-f\theta}}{bR} = Ke^{-f\theta}$$

Avec :  $K = \frac{T}{bR} =$

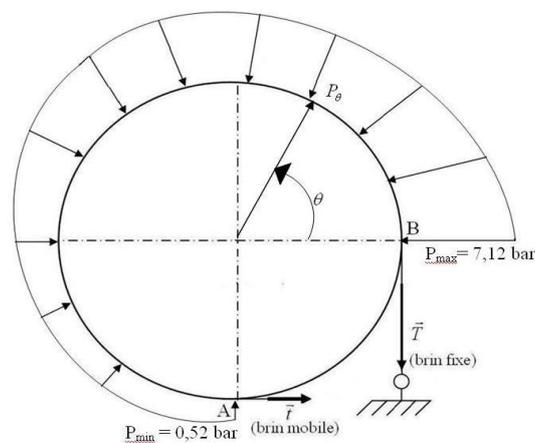


Fig.4.8 Distribution de pression de contact la surface de frottement

### 4.3.3. Transformation de l'énergie dans le frein mécanique à bande

Pendant les manœuvres de remonté et descente, le freinage est effectué à la fin de la course du crochet. Le moment de freinage est maximal lors de la descente du train de sonde le plus lourd.

Le travail mécanique que le dispositif de freinage transforme en chaleur pendant le freinage, a pour expression :

$$W = M_{f \max} \varphi$$

où  $\varphi$  : l'angle balayé par le tambour pendant la période de freinage.

$$\varphi = \frac{h_{cd} \cdot R_m}{R_{\text{enr.min}}}$$

Où  $h_{cd}$  : le déplacement vertical du crochet pendant le freinage de descente ;  $R_m$  : rapport de mouflage ;  $R_{\text{enr.min}}$  : rayon d'enroulement minimal du câble :  $R_{\text{enr.min}} = \frac{D_{\text{enr.min}}}{2}$

Donc la quantité de chaleur dissipée, en kcal, est :

$$Q = \frac{W}{4,18}$$

Puissance de freinage :

$$P_f = \frac{W}{t_{fd}}$$

Où  $t_{fd}$  : le temps de freinage,

$$t_{fd} = \frac{2h_{cd}}{V_{cd}}$$

Où  $V_{cd}$  : vitesse du crochet à la phase de freinage de descente.

#### **4.4. USURE ET ENTRETIEN GENERAL DES FREINS MECANIQUE A BANDE**

Dans le sous-chapitre 3.3 nous avons rapporté quelques constatations sur l'usure des éléments de frottement des freins mécaniques à bandes, nous avons notamment fait remarquer que l'usure suivant la circonférence des jantes et des patins n'est pas uniforme. Ceci rend difficile le calcul des caractérisations de l'usure des éléments de frottement des freins mécaniques à bandes. Le manque de données du terrain est aussi un obstacle non négligeable, qui rend cette tâche presque impossible. Pour ces raisons nous avons consacré ce sous chapitre au suivi et aux remèdes à l'usure des éléments de frottement des freins mécaniques à bandes sur le terrain d'exploitation de ces freins.

##### **Entretien général des freins**

Ce qui sera noté ci-dessous est divulgué par l'université du TEXAS en collaboration avec l'association américaine des contractuels du forage pétrolier (l'A.A.O.D.C) [FOR 71].

Les freins mécaniques exigent des vérifications périodiques quant à l'usure des garnitures et des jantes de frein. On peut procéder très facilement à une inspection visuelle en enlevant le couvercle avant du treuil. Une vérification et une bonne estimation de l'usure peuvent être effectuées.

Dans les conditions normales de travail, une garniture de bonne qualité et bien installée, doit pouvoir assurer pendant le forage de cinq ou six puits de profondeur moyenne, un service de freinage correct, et des jantes de frein bien entretenues doivent durer pendant une année de service ou plus.

Le remplacement des garnitures de frein et la vérification minutieuse de l'usure des jantes de frein sont habituellement réalisés pendant les temps d'arrêt de la sonde, comme par exemple pendant les déménagements entre puits où l'arrêt est inévitable. Pour cette opération, le carter avant du treuil est dégagé et les axes du palonnier où des attaches des bandes de frein sont sortis ainsi que ceux des extrémités opposées, et les bandes sont soulevées à la main. L'utilisation du cabestan ou de tout autre moyen peuvent gauchir ou ovaliser, les bandes de frein. Tandis que la nouvelle garniture remplace l'ancienne, on vérifie l'état d'usure des jantes de frein. Une méthode simple consiste à placer une règle perpendiculairement à la jante de frein et à mesurer la profondeur des gorges les plus profondes.

L'usure maximale tolérée au point de vue sécurité sur les treuils modernes est d'environ 6 mm ( $5/8''$ ), et si l'usure est plus importante, l'ensemble doit être envoyé à l'atelier pour que de nouvelles jantes soient installées et que les anciennes soient rechargées et réusinées.

La courbure des bandes de frein doit être vérifiée en traçant sur le plancher de sonde un cercle de diamètre égal à celui des bandes de frein, et celles-ci doivent se juxtaposer sur le cercle. Les parties ovalisées doivent être remises au gabarit. Une ovalisation peut par frottement adhérer et faire relever brusquement le levier de frein et casser le bras de l'opérateur à l'instant de l'embrayage du tambour.

Après que de nouvelles jantes et de nouvelles garnitures aient été installées et les freins remontés, on doit procéder aux réglages, en commençant par une faible tension sur les bandes de frein. Avant de manœuvrer à pleine charge, le moufle est descendu plusieurs fois à vide. En pressant sur le levier de frein et par effet de brûlage, on adapte la nouvelle garniture aux nouvelles bandes. Vérifiez à nouveau l'espace libre entre garniture et jante, levier relevé et réglez au serrage désiré.

La tuyauterie du circuit de refroidissement des jantes de frein doit être périodiquement vérifiée pour déceler les fuites et s'assurer que le circuit est libre de toute obstruction. Un frein surchauffé perd du rendement et peut présenter une efficacité oscillante et même se rompre.

L'usure d'une jante augmentera d'autant plus que son épaisseur diminuera et dissipera plus difficilement la chaleur.

Pour obtenir un refroidissement maximum des jantes de frein, on doit utiliser une pompe à eau indépendante. Lorsque les eaux du frein hydraulique et des jantes de frein sont mises en circulation par des pompes différentes, on augmente la durée d'utilisation des jantes de frein. Il y a lieu de prendre contact avec le constructeur pour la détermination de la pompe de circulation.

Les pompes à eau entraînées à partir du compound ne fournissent pas un bon refroidissement car elles tournent à faible régime lors de la descente des tiges dans le trou, soit à l'instant où les freins dégagent une grande quantité de chaleur.

La vie des jantes peut également être allongée par un bon entretien et une bonne lubrification de la timonerie de frein, des axes, du palonnier, des arrêts de sécurité et des rouleaux de bandes de frein ou des ressorts. Une bande de frein bien réglée maintiendra la garniture libre de tout contact avec la jante de frein lorsque le levier sera en position haute.

Dans les régions où l'eau de refroidissement contient une grande quantité de sels en solution, c'est-à-dire où l'eau est dure, ceux-ci vont se déposer sur la surface intérieure de la jante de frein et diminuer considérablement l'évacuation de la chaleur. Puisque la chaleur n'est pas évacuée, la jante s'usera plus rapidement. De plus, au fur et à mesure de la formation des dépôts, l'eau aura tendance à suivre des chemins préférentiels, et provoquera une usure inégale de la jante. De manière à éviter l'usure rapide due à cette cause, les circuits d'eau doivent être vérifiés périodiquement et nettoyés à l'aide d'un dissolvant.

Outre l'usure normale, ce qui probablement contribue le plus largement à user les jantes de frein et les garnitures, ce sont la torsion, la courbure défectueuse et le gauchissement des bandes de freins.

Les bandes sont endommagées lors du remplacement des garnitures en les extirpant du treuil avec le cabestan. Elles doivent être manipulées très soigneusement pour éviter toute déformation. Quand une bande est déformée, non seulement elle entraîne une usure rapide, mais, de plus fait osciller le levier de frein quand celui-ci est relevé.

Lorsque l'on appuie sur le levier de frein, l'extrémité de la bande de frein reliée au palonnier, touche normalement la jante d'abord et prend la plupart de la tension dans la bande par suite de l'effet d'auto serrage. C'est pourquoi les garnitures situées côté palonnier présentent toujours plus d'usure que celles du côté timonerie de frein. Il est également sûr que lorsque les rouleaux de bande ou les ressorts ne sont pas bien vérifiés, cette partie frotte sur les jantes lorsque, freins relâchés, le moufle monte dans le derrick.

Un dispositif de frein à bandes ne peut pas fonctionner aussi bien dans les deux sens. Sur un treuil, ils sont disposés pour fonctionner dans les meilleures conditions quand les garnitures sont légèrement usées. Lorsque le moufle monte, l'effet de freinage est bien moins efficace et il faut plus de temps pour arrêter le moufle au point voulu. Le levier de frein peut être abaissé pour obtenir une efficacité mécanique suffisante pour l'arrêt immédiat du moufle, mais ceci provoque le relâchement brusque du câble, et le fera sauter des gorges en fin de remontée. Une telle pratique est dangereuse à la fois pour l'équipement, et pour le personnel.

### **Usure admissible des jantes de frein**

Au cours du contrôle de l'usure la connaissance des valeurs de l'usure linéaire admissible des jantes de frein est nécessaire, pour prendre des décisions d'entretien adéquates. Dans l'annexe 4.1 sont données des valeurs recommandées.

## **CONCLUSIONS**

1. L'étude du frottement et de l'usure du frein mécanique à bande est une sorte d'essai d'application des connaissances acquises au cours d'élaboration des chapitres précédants. Mais avant d'entamer cette étude, il a fallu faire une présentation du treuil de forage pétrolier, qui est équipé par ce type de frein, afin de bien comprendre les fonctions et les exigences qui lui sont assignées.
2. Ensuite l'étude a concerné une description générale de la structure et du fonctionnement du frein mécanique à bande, tenant compte de ses fonctions et des conditions de travail qui lui sont imposées.
3. Le frein mécanique à bande est un bon exemple où le frottement est utile, car il assure le freinage du tambour et charges au crochet (train de sonde, tubages).
4. L'étude mécanique de ce frein a permis de déterminer les charges agissantes sur les éléments du treuil, en particulier les bandes (équipées de patins de freinage) et les jantes de freinage, en utilisant des modèles de calcul analytiques approchées. Cette étude montre bien le bienfondé de la prise en compte du frottement et la maîtrise des méthodes de détermination des caractéristiques (force, coefficient et moments de forces) de frottement.
5. Malgré que le frottement est utile dans le cas de ce type de frein, mais l'usure est bien présente et constitue la principale cause de défaillance des patins et des jantes de freinage. L'usure des surfaces de frottement des patins et des jantes n'a pas fait l'objet d'une étude considérable, faute de données de terrain, mais nous avons terminé cette étude par des conseils relatifs à l'entretien de ce type de frein, en se basant sur le contrôle de l'usure linéaire des jantes et des patins de freinage et en tenant compte de l'usure linéaire admissible.

## CONCLUSIONS GENERALES

Tenant compte du but principale assigné à ce mémoire, qui est la réalisation d'une recherche bibliographique sur les fondements théoriques et pratiques du contact, du frottement et de l'usure des corps solides, nous avons effectué un travail important de recherche bibliographique sur quelques aspects de la tribologie (contact, frottement et usure des surfaces des corps solides), qui permet de tirer les conclusions suivantes sur les connaissances acquises dans ce cadre :

1. Les définitions et notions de bases considérées concernant la tribologie permettent de mieux situer l'importance de la tribologie et connaître ses objets d'étude (le contact, le frottement, l'usure et lubrification des corps solides (matériaux et pièces de machines) ;
2. L'analyse des systèmes tribologiques considérée permet de mieux poser les problèmes tribologiques, car elle indique tous les facteurs déterminants le frottement (la forme et la nature des matériaux des corps en contact, la charge, l'état de leurs surfaces, vitesse relative des corps et autres ) et les processus (résistance au déplacement, vibrations, phénomènes thermiques, transformations superficielles, transformations structurales, perte de matière) qui l'accompagnent, ainsi que les types de mécanismes d'endommagement des surfaces de ces corps ;
3. L'état des surfaces des corps solides est décrit par les caractéristiques physico- mécaniques (la dureté, le module d'élasticité, le module de young des matériaux des surfaces), physico-chimiques ( les caractéristiques de l'adhésion des surfaces, tenant compte du milieu ambiant) et des caractéristiques géométriques des surfaces, qui influent sensiblement sur le frottement et les processus qui l'accompagnent.
4. L'étude du contact des corps solides (qui est en fait discret) montre principalement les paramètres (aires, pressions, types de contact, déformations et contraintes,) déterminants ou caractérisant l'interaction des corps solides et indique les méthodes de leur détermination.
5. Les généralités considérés sur le frottement des corps solides a permis de donner la définition du frottement et de son importance pour la nature et les machines, mais aussi de présenter les différents types de frottements ( frottement interne et frottement externe, frottement statique et frottement dynamique, le frottement de glissement et le frottement de roulement et autres, le frottement sec et le frottement lubrifié) en fonction de divers critères (nature physique, état de repos ou de mouvement, caractère de mouvement, état des surfaces,).
6. L'étude du frottement externe des corps solides et de ses mécanismes montre qu'il est un phénomène complexe, car il dépend de plusieurs facteurs déjà cités, et il est conditionné par la rupture des liaisons atomiques et moléculaires qui se forment aux zones de contact réel, ainsi que par la déformation des couches superficielles des surfaces de frottement et d'autres processus.

7. Les lois et caractéristiques connues du frottement externe (force et coefficient du frottement de glissement) des corps solides considérés permettent de dégager le niveau d'influence des principaux paramètres déterminant ce type de frottement.
8. L'usure est l'une des conséquences nuisibles du frottement, car il détermine sensiblement la fiabilité, la durabilité des machines et leur maintenance.
9. L'étude considérée sur les divers mécanismes et types d'usure (usure abrasive, usure adhésive, usure par fatigue et autres) permet de mieux les connaître et pronostiquer les voies de lutte contre ce phénomène nuisible.
10. Les phases d'usure des pièces de machines considérées doivent être bien connues par les spécialistes d'exploitation (maintenance) des machines et équipements industriels.
11. L'étape la plus forte de cette étude a concerné les différentes caractéristiques de l'usure (l'usure linéaire, la vitesse d'usure et d'autres), en tenant compte de l'influence des divers facteurs (charge, vitesse, état des surfaces, ...) sur le frottement et l'usure des corps solides.
12. Les voies et moyens de réduction du frottement et de l'usure considérés doivent être bien connus, aux stades de construction et d'exploitation des machines, par les constructeurs et les spécialistes d'exploitation (maintenance) des machines et équipements industriels.
13. L'étude du frottement et de l'usure du frein mécanique à bande est une sorte d'essai d'application des connaissances acquises sur le frottement et l'usure des corps solides. Avant d'entamer cette étude, il a fallu faire une présentation du treuil de forage pétrolier, qui est équipé par ce type de frein, pour bien comprendre les fonctions et les exigences qui lui sont assignées.
14. La description générale du frein mécanique à bande a concerné la structure et le fonctionnement de ce type de frein du treuil de forage, tenant compte de ses fonctions et des conditions de travail qui lui sont imposées.
15. Le frein mécanique à bande est un bon exemple de système tribologique, où le frottement est utile, car il assure le freinage du tambour et charges au crochet (train de sonde, tubages).
16. L'étude mécanique de ce frein a permis de déterminer les charges agissantes sur les éléments du treuil, en particulier les bandes (équipées de patins de freinage) et les jantes de freinage, en utilisant des modèles de calcul analytiques approchées. Cette étude montre le bienfondé de la prise en compte du frottement et la maîtrise des méthodes de détermination des caractéristiques (force, coefficient et moments de forces) de frottement.
17. Malgré que le frottement est utile dans le cas de ce type de frein, mais l'usure est bien présente et constitue la principale cause de défaillance des patins et des jantes de freinage. L'usure des surfaces de frottement des patins et des jantes n'a pas fait l'objet d'une étude considérable, faute de données de terrain, mais nous avons terminé cette étude par des conseils relatifs à l'entretien de ce type de frein, en se basant sur le contrôle de l'usure linéaire des jantes et des patins de freinage et en tenant compte de l'usure linéaire admissible

## Annexes

**Annexes 1.1** : Valeurs approximatives des paramètres d'ondulation transversale (suivant le mouvement d'avance de l'outil) [Krag 81].

Procédé de traitement et classe de rugosité	H <sub>o</sub> , μ m	S <sub>o</sub> , mm	R <sub>o</sub> , mm	S <sub>o</sub> / H <sub>o</sub>
Pièces en acier				
Rectification intérieure, 7 – 9 <sup>ème</sup> classe	0,6 – 4,5	500 - 1400	10 – 80	100 - 1350
Rectification cylindrique, 5 – 9 <sup>ème</sup> classe	0,75 – 3	250 - 500	10 – 25	165 - 400
Rectification plane, 5 – 9 <sup>ème</sup> classe	1,2 – 13	750 - 1400	15 – 50	100 - 700
Alésage, 5 – 7 <sup>ème</sup> classe	2 – 3,5	1000 - 1500	15 – 55	300 - 750
Rabotage, 4 – 7 <sup>ème</sup> classe	2 – 6	400 - 1700	10 – 30	200 - 350
Honing, 5 – 8 <sup>ème</sup> classe	0,1 – 0,8	150 - 700	2,5 – 40	200 - 7000
Dressage, 6 – 9 <sup>ème</sup> classe	0,5 – 4	300 - 500	5 – 50	100 - 1000
Polissage, 8 – 10 <sup>ème</sup> classe	0,3 – 1,5	150 - 350	10 – 25	200 – 500
Rodage des surfaces planes, 11 – 12 <sup>ème</sup> classe	0,1 – 0,35	60 - 100	5 – 10	300 - 600
Rodage des surfaces cylindriques, 10 – 13 <sup>ème</sup> classe	0,05 – 0,15	35 - 120	2,5 – 10	400 - 700
Grattage, 8 <sup>ème</sup> classe	3,5 – 6	5000 - 5500	600 - 1000	800 - 1600
Pièces en fonte				
Rectification intérieure, 6 – 8 <sup>ème</sup> classe	1 – 3	450 – 1400	5 – 400	120 - 450
Rectification cylindrique, 6 – 9 <sup>ème</sup> classe	0,5 – 7,5	550 - 1000	10 – 100	80 - 1850
Grattage, 8 <sup>ème</sup> classe	4,5 – 7	40 00	450	600 - 900
Rectification plane, 6 – 9 <sup>ème</sup> classe	0,8 – 4	500 - 900	20 – 80	200 – 800
Alésage, 5 – 9 <sup>ème</sup> classe	0,5 – 10	400 - 1000	5 – 50	40 - 850
Fraisage en bout (de face), 7 <sup>ème</sup> classe	2,5	800	85	300
Tournage, 7 <sup>ème</sup> classe	1	1000	50	1000

**Annexe 1.2** : Valeurs approximatives des paramètres de l'ondulation longitudinale (suivant le mouvement de coupe) [Krag 81].

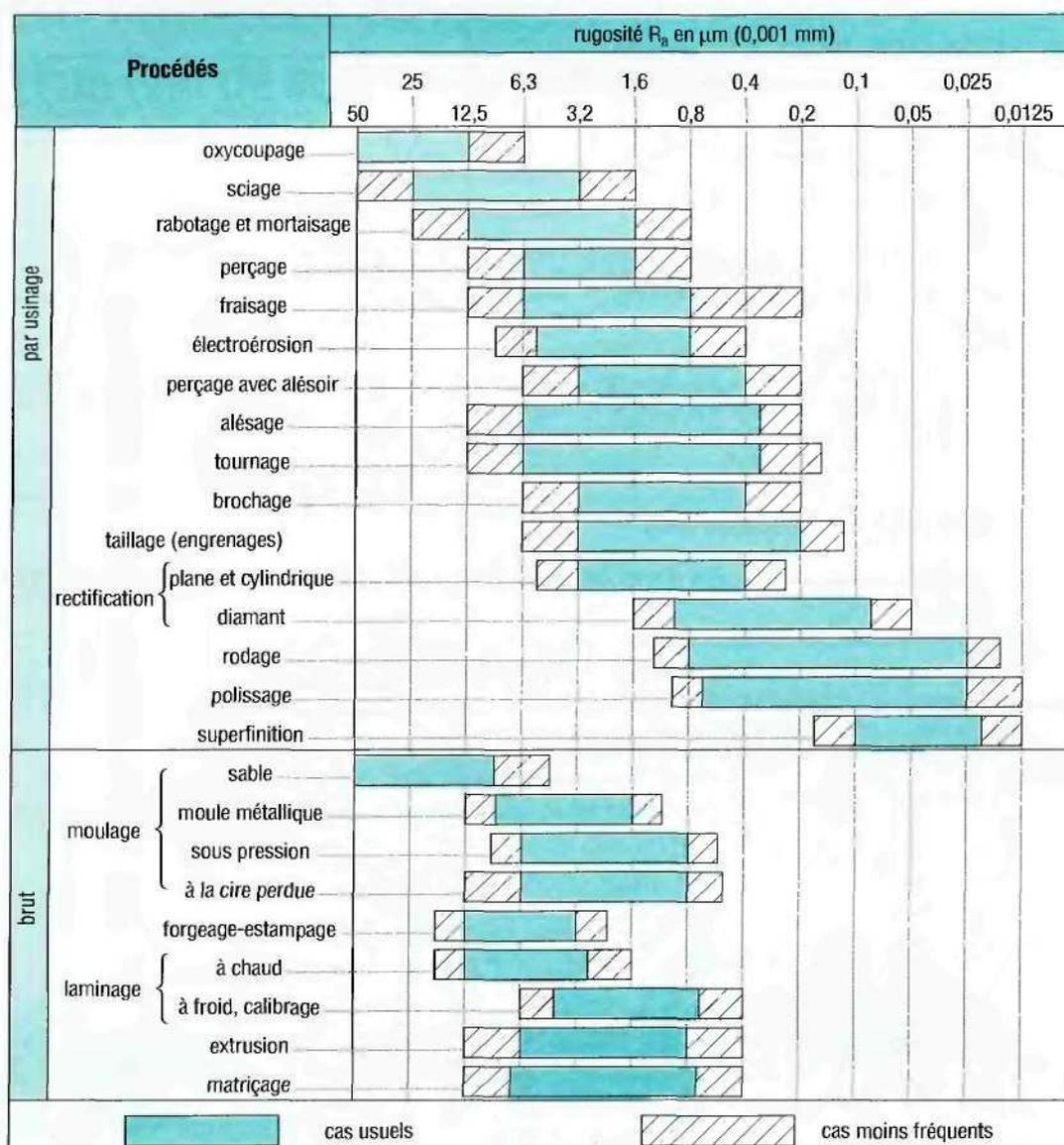
Procédé de traitement et classe de rugosité	$H_o$ , $\mu$ m	$S_o$ , mm	$R_o$ , mm	$S_o / H_o$
Pièces en Acier				
Rectification plane, 5 – 9eme classe	1,2 – 12	2,4 – 3,5	30 – 350	280 - 2900
Rabotage, 4 – 7eme classe	1 – 12	1 - 5	40 – 100	320 - 1000
Fraisage cylindrique, 4 – 6eme classe	7,5 – 40	1,7 – 3,4	5 – 45	60 - 270
Brochage, 7 – 9eme classe	0,4 – 3	0,7 – 0,9	20 – 80	300 - 1750
Rodage des surfaces planes, 4 – 7eme classe	0,25 –	1 – 1,5	150 – 850	2000- 6000
Grattage, 8eme classe	3,5 – 6	6000- 7 5 0 0	1100 – 1700	1000 - 2000
Pièces en fonte				
Rectification plane, 6 – 9eme classe	1,3 – 9	1,8 – 2,3	40 – 200	200 - 1770
Fraisage cylindrique, 4 – 7eme classe	7,5 - 30	1,6 – 2,5	10 – 60	83 - 267
Rabotage, 4eme classe	12	1,65	20	140
Grattage, 8eme classe	4,5 - 7	7000	1200	1000 - 1600

**Annexe 1.3** : Classes de rugosité et valeurs des caractéristiques ( $R_a$ ,  $R_z$  et  $L$ ) correspondantes [Krag 81].

Classe de rugosité	Sous classe	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Longueur de base $L$ [mm]
1	-		320 – 160	8,0
2	-		160 – 80	8,0
3	-		80 – 40	8,0
4	-		40 – 20	2,5
5	-		20 - 10	2,5
6	a	2,50 – 2,00		0,80
	b	2,00 – 1,60		
	c	1,60 – 1,25		
7	a	1,25 – 1,00		0,80
	b	1,00 – 0,80		
	c	0,80 – 0,63		
8	a	0,63 – 0,50		0,80
	b	0,50 – 0,40		
	c	0,40 – 0,32		
9	a	0,32 – 0,25		0,25
	b	0,25 – 0,20		
	c	0,20 – 0,16		
10	a	0,160 – 0,125		0,25
	b	0,125 – 0,100		
	c	0,100 – 0,080		
11	a	0,080 – 0,063		0,25
	b	0,063 – 0,050		
	c	0,050 – 0,040		
12	a	0,040 – 0,032		0,25
	b	0,032 – 0,025		
	c	0,025 – 0,020		

13	a		0,100 – 0,080	0,08
	b		0,080 – 0,063	
	c		0,063 – 0,050	
14	a		0,150 – 0,040	0,08
	b		0,040 – 0,032	
	c		0,032 – 0,025	

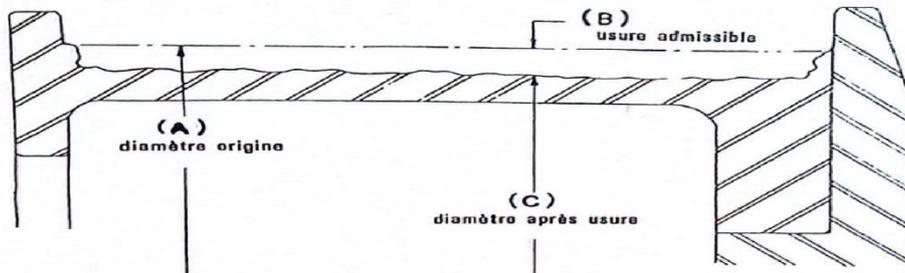
Annexe 1.4 : Valeurs de  $R_a$  en fonction du procédé d'usinage [FRO 01].



**Annexe 1.5** : Valeurs calculées des paramètres de rugosité des surfaces pour différents procédés d'usinages des pièces d'acier [KRA 81, KRA 84, KHE 89].

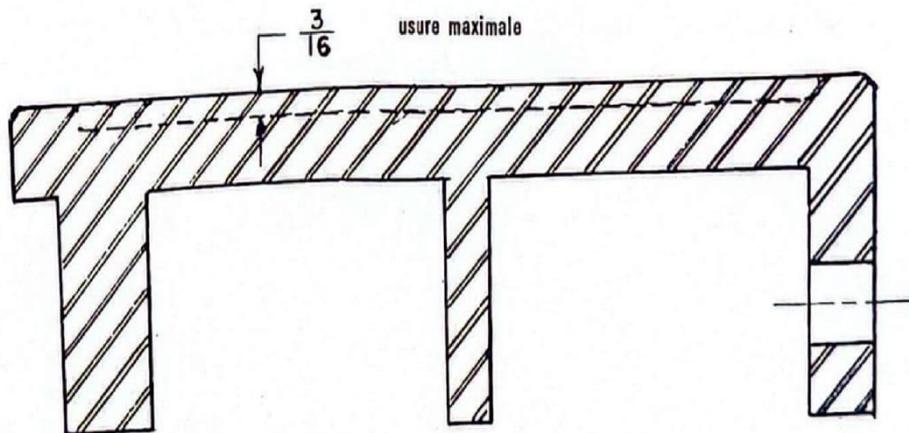
Procédé d'usinage	Classe de rugosité	R <sub>max</sub> , [μm]	R [μm]	b	v	Δ
Rectification circulaire	7	9,37	8	0,60	2,00	1,60.10 <sup>-1</sup>
	8	4,72	12	0,90	1,95	4,10.10 <sup>-2</sup>
	9	2,40	20	1,30	1,90	9,60.10 <sup>-2</sup>
	10	1,20	30	2,00	1,50	2,80.10 <sup>-2</sup>
Rectification intérieure	6	18,75	5	0,60	2,00	49,6.10 <sup>-1</sup>
	7	9,37	8	0,90	1,90	13,0.10 <sup>-1</sup>
	8	4,72	13	1,10	1,85	3,60.10 <sup>-1</sup>
	9	2,4	18,50	1,40	1,75	1,10.10 <sup>-1</sup>
Rectification plane	5	37,50	35	0,60	2,20	1,24
	6	18,75	100	0,90	1,95	2,00.10 <sup>-1</sup>
	7	9,37	180	1,00	1,85	6,00.10 <sup>-2</sup>
	8	4,72	370	1,60	1,80	1,30.10 <sup>-2</sup>
	9	2,4	550	2,30	1,65	2,64.10 <sup>-3</sup>
Polissage	8	4,72	230	2,00	1,70	1,40.10 <sup>-2</sup>
	9	2,40	450	2,50	1,60	3,00.10 <sup>-3</sup>
	10	1,20	670	3,50	1,50	7,80.10 <sup>-4</sup>
Tournage	5	37,50	15	1,00	2,10	2,50
	6	18,75	20	1,40	1,90	7,90.10 <sup>-1</sup>
	7	9,37	35	1,80	1,80	1,90.10 <sup>-1</sup>
	8	4,72	55	2,00	1,60	6,30.10 <sup>-2</sup>
Fraisage en bout	5	37,50	425	0,40	2,20	1,40.10 <sup>-1</sup>
	6	18,75	900	0,50	1,60	3,00.10 <sup>-2</sup>
	7	9,37	1350	0,60	1,40	1,10.10 <sup>-1</sup>
Rodage des surfaces cylindriques	10	1,20	30	2,50	1,5	2,2.10 <sup>-2</sup>
	11	0,60	40	2,60	1,40	7,70.10 <sup>-3</sup>
	12	0,30	55	2,60	1,30	2,60.10 <sup>-3</sup>
	13	0,15	75	3,30	1,20	7,40.10 <sup>-4</sup>
Rodages des surfaces planes	10	1,20	300	2,40	1,60	2,34.10 <sup>-3</sup>
	11	0,60	500	3,00	1,40	3,50.10 <sup>-4</sup>
	12	0,30	1000	3,30	1,20	1,20.10 <sup>-4</sup>
	13	0,15	3000	4,50	1,10	1,35.10 <sup>-5</sup>
Honing	8	4,72	15	0,70	1,80	0,37.10 <sup>-2</sup>
	9	2,40	20	1,00	1,70	1,20.10 <sup>-1</sup>
	10	1,20	35	1,90	1,60	2,26.10 <sup>-2</sup>
	11	0,60	70	2,50	1,60	4,65.10 <sup>-3</sup>

**ANNEXE 4.1 :** Les notes et données suivantes sont extraites du « TOOL PUSHERS MANUAL » de l'A.A.O.D.C.... elles représentent un ensemble d'informations de fabricants divers de treuils et de freins.



treuil <sup>5</sup>	jante tambour principal		
	A	B	C
N-55	40"	5/16"	39-3/8"
N-6	46"	7/16"	45-1/8"
N-7	46"	7/16"	45-1/8"
N-75	46"	7/16"	45-1/8"
N-10	46"	7/16"	45-1/8"
N-12	54"	1/2"	53"

**Fig.1:** Usure admissible – Brewster



**Fig.2:** Usure admissible – CARDWELL

La profondeur d'usure ne doit pas dépasser 3/16" sur une jante de frein CARDWELL. Ceci représente l'épaisseur de métal dur obtenu par cémentation, et le métal sous-jacent est doux. Ce type de finition et de traitement thermique des jantes de frein CARDWELL prolonge la vie normale d'usure tant qu'elles sont intactes. Il n'est pas question de les tourner ou de les reprendre par un quelconque moyen, et les jantes doivent être remplacées dès que la surface traitée est usée.

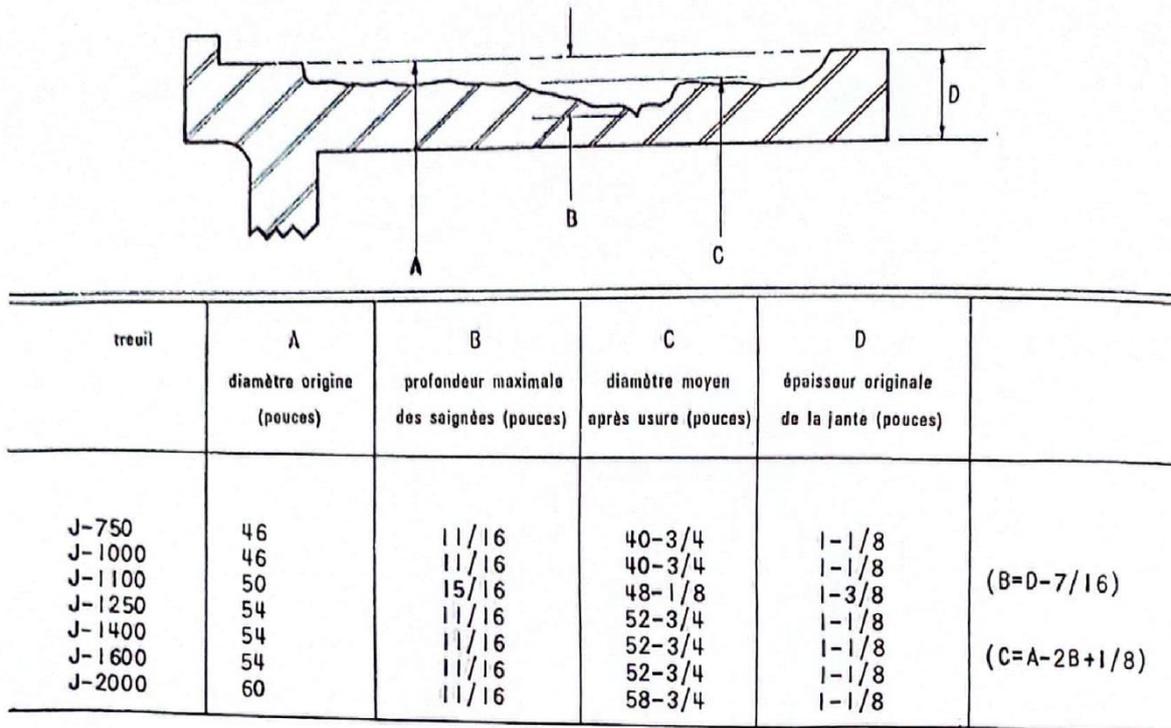
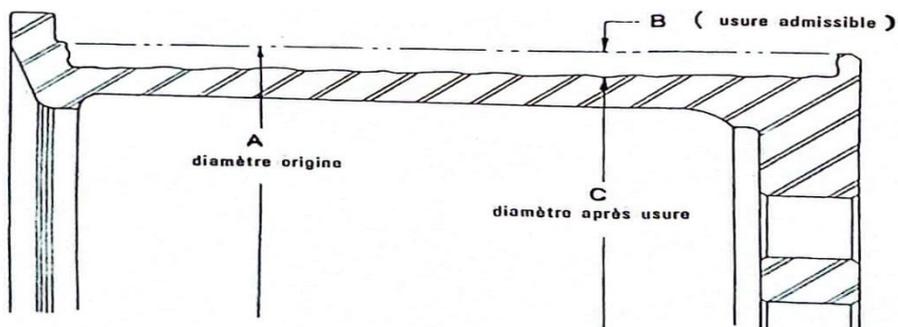
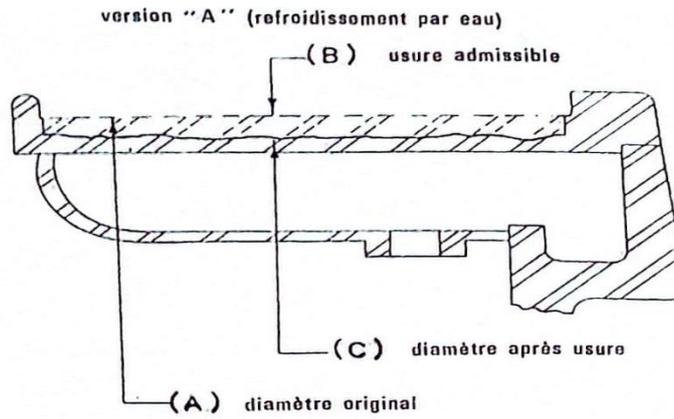


Fig.3: Usure admissible – EMSCO



treuil	jante de tambour principal		
	A	B	C
75, 75CA, 75CB	46"	7/16"	45-1/8"
80, 80-B	46"	7/16"	45-1/8"
100	54"	1/2"	53"
110	50"	1/2"	49"
125	54"	1/2"	53"
130	54"	1/2"	53"
160	62"	1/2"	61"

fig.4: Usure Admissible - IDEAL



trouil	tambour principal			
	version	(A)	(B)	(C)
<b>POWER RIGG</b>				
PR-800	A	46"	9/16"	44-7/8"
PR-1000	A	52"	9/16"	50-7/8"
PR-1050	A	52"	9/16"	50-7/8"
PR-1350	A	58"	9/16"	56-7/8"
M-10,000	A	46"	9/16"	44-7/8"
SUPER 7-11M	A	52"	9/16"	50-7/8"
LITTLE GIANT	A	46"	9/16"	44-7/8"
JUNIOR GIANT	A	52"	9/16"	50-7/8"
BIG GIANT	A	58"	9/16"	56-7/8"

Fig.5: usure admissible - IDECO

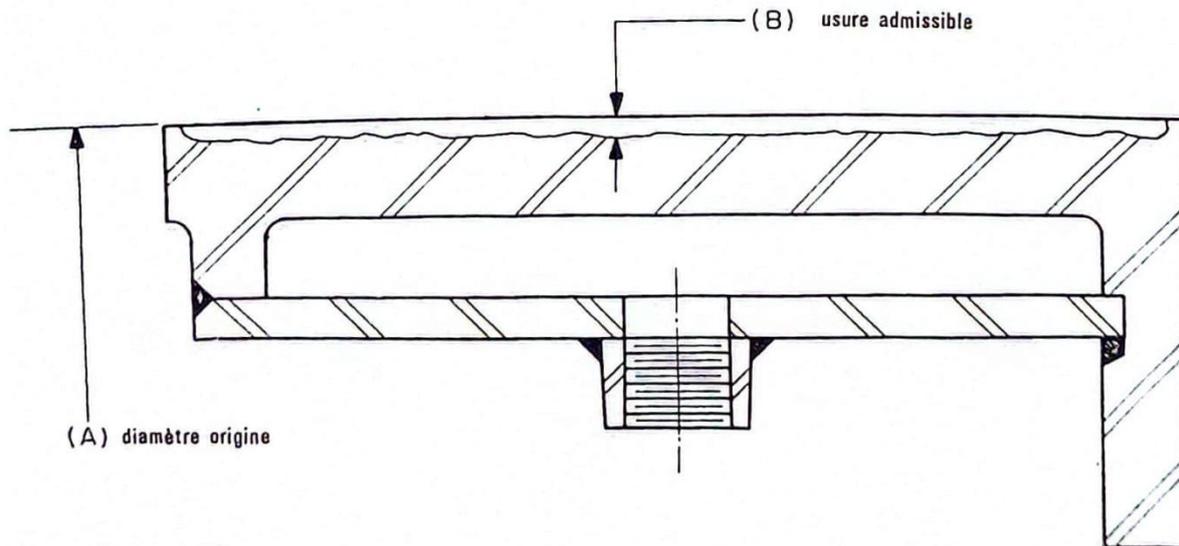
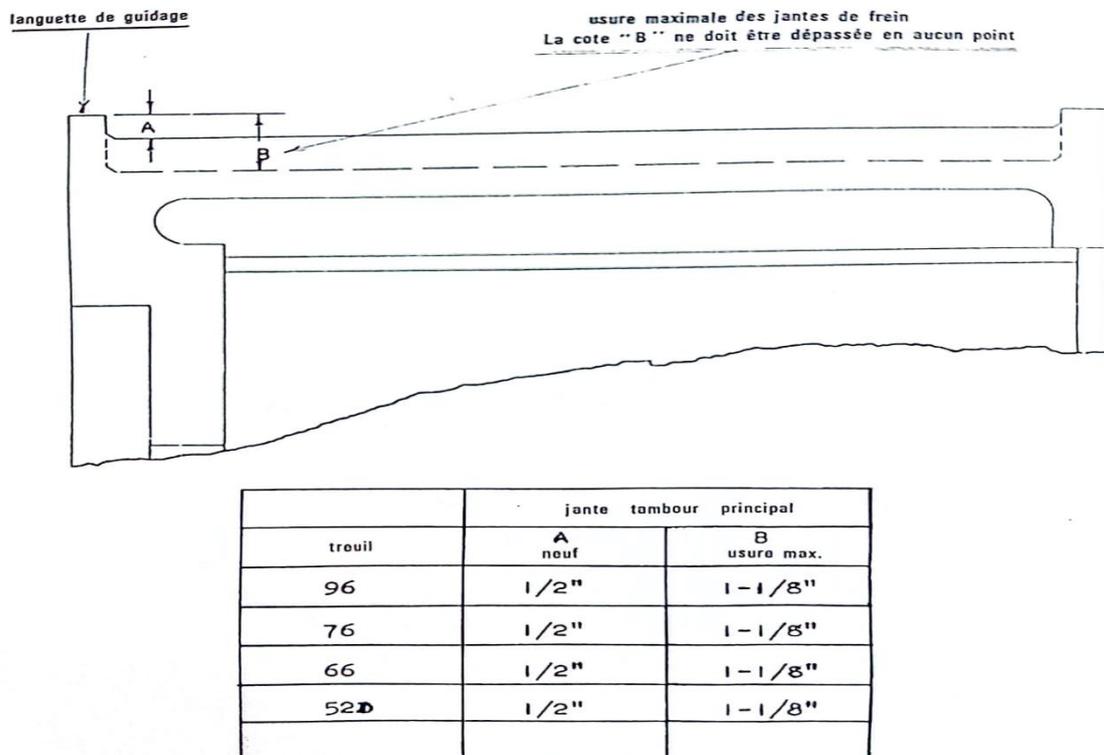


Fig.6: Usure Admissible - WILSON

Lorsque la jante est usée de 3/16", elle doit être tournée, rectifiée et soumise à un traitement de surface. Après une nouvelle usure de 3/16", la jante doit alors être remplacée. Lors de la première usure de 3/16" s'il n'est pas possible de procéder à la rectification et au traitement de surface, il est préférable de remplacer la jante.



**Fig.7:** Usure Admissible – OILWEL

## BIBLIOGRAPHIE

- [ASH 08] ASHBY Michael F., DAVID R., JONES H. ; Matériaux, propriétés, applications et conception. 3<sup>ème</sup> édition entièrement refondue. Dunod, PARIS 2008.
- [BAL 12] BALDENKO F.D., Calculs de l'équipement de forage, Université d'état russe du pétrole et de gaz – I.M. GOUBKIN, MOSCOU, 2012
- [BOW 64] BOWDEN E.P. et TABOR D., The friction and lubrication of solids, Clarendon Press, OXFORD, 1964.
- [CAU 64] CAUBET. J.J. ; Théorie et pratique industrielle du frottement. Ed. Technip, PARIS, 1964.
- [COU 85] Coulomb C.A. « Mémoire de mathématique et physique », l'académie royale des sciences,1985.
- [CZI 78] CZICHOS H., Tribology- A system approach, Elsevier, Tribology series 1, 1978.
- [DRO 86] DROUIN G., GOU M., THIRY P., VINET R. ; Elément de machines, deuxième édition revue et augmentée. Edition de l'Ecole Polytechnique de MONTREAL,1986.
- [DOB 72] DOBROVOLSKII V. A. et autres, Eléments de machines, 7ème éd. (En russe), Ed. MIR, MOSCOU, 1972.
- [FOR 71] FORAGE ROTARY, le treuil, cours, traduit de l'anglais par P. MOTARD, Editions Technip, PARIS ,1971.
- [MON 96] MONCHY F., La fonction maintenance, Ed. MASSON, PARIS, 1996.
- [FRO 01] [FRO 01] FRONCHON J.I.. ; Guide des sciences et technologies industrielles. AFNOR, tour Europe, Cedex 7, 92049 PARIS-La défense, 2001.
- [FRO 87] FROLOV K.V., Popov S.A, et autres, Théorie des mécanismes et machines (en russe), Ed. <<Ecole supérieure>>, 1987.
- [GEO 00] GEORGES J. M. ; Frottement, usure et lubrification - Tribologie ou science des surfaces. Ed. Eyrolles, PARIS 2000.
- [GOD 90] GODET M., Third bodies in tribology. Wear, 1990.
- [GRA 08] GRAS R. ; Tribologie Principes et solutions industrielles. Ed. L'usine nouvelle, Dunod, PARIS, 2008.
- [GUE 23] GUEBLI A. Cours de construction et calcul des équipements de forage pétroliers, destiné aux étudiants de Master mécanique des chantiers pétroliers, Faculté des hydrocarbures et de la chimie, Université de Boumerdes, 2023.

- [GUE 87] GUELBERG B., REKALIS G., Réparation de l'équipement industriel, Ed. MIR, MOSCOU, 1987.
- [ILS 85] ILSKII A.L., MIRONOV Y., TCHERNOBILSKII A. G., Calcul et construction de l'équipement de forage (en russe), Ed. NEDRA, MOSCOU, 1985.
- [I.F.P. 84] Institut Français Du Pétrole ; La lubrification industrielle ; Tome 1 : Transmissions, compresseurs turbines, Chapitre 1 : Tribologie ; ROUX F. Editions TECHNIP, PARIS 1984.
- [IOS 88] IOSSILEBITCH G.B., Eléments de machines (en russe). Ed. Machinostroénia, MOSCOU, 1988.
- [LEB 63] LEBLOND A., Cours de forage, Tome 1 Equipements de forage Institut français du pétrole et Société des éditions Technip, 1963.
- [KHE 89] KHEBDI M., TCHITCHINADZE.A.V. (sous la rédaction de); Formulaire de tribotechnique. T1 : Bases théoriques (en russe). Ed. Machinostroénia, MOSCOU, 1989.
- [KHE 13] KHELOUFI c., Mémoire de magister : Etude et application des méthodes de détermination des grandeurs nécessaires au calcul du coefficient de frottement externe des corps solides, université de Boumerdes, 2013.
- [KRA 81] KRAGELSKII I.V. et ALISSIN V.V. « Friction Wear lubrication », Vol.1, Ed. Mir Publishers, Moscow, 1981.
- [KRA 84] KRAGUELSKY I. V., MIKHIN N. M. ; Les organes de frottement des machines (en russe). Ed. Machinostroénia, MOSCOU 1984.
- [MIK 77] MIKHIN N. M. ; Frottement externe des corps solides (en russe). Ed. Naouka, MOSCOU, 1977.
- [NIC 86] NICOLET G.R., Conception et calcul des éléments de machines. Ecole d'ingénieurs de FRIBOURG (E.I.F.), section de mécanique, revu en 2006.
- [OIL 87] OILWELL, Manuel d'utilisation du treuil OILWELL 840 E, 1987 .
- [PIE 64] PIEUCHOT A., BLOUET J., GRAS R., COURTEL R., Méc. Mat. Elec., GAMI, Paris, Oct. 1964.
- [POL 84] POLZER G. et MAISNER F. ; les fondements du frottement et usure (en russe). Ed. Machinostroénia, MOSCOU 1984.
- [ZAM 98] ZAMBELLIG., VINCENT L. ; Matériaux et contact - Une approche tribologique. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes 1998.