

## I- TRIBOLOGIE : NOTIONS FONDAMENTALES

### 1- Définition

- La tribologie est le domaine de la science et de la technologie qui concerne l'interaction de surfaces animées d'un mouvement relatif, qui embrasse l'étude du frottement, de l'usure et la lubrification [1].
- La tribologie est la science des contacts en mouvement qui présente un champ de recherche de caractère interdisciplinaire, qui requiert l'expérience et les connaissances des chimistes, des ingénieurs, des métallurgistes et des physiciens [2]. Donc la tribologie est un carrefour de beaucoup des domaines de connaissance.
- La tribologie, qui concerne le frottement, la lubrification et l'usure des surfaces en contact et en mouvement relatif, est un domaine récent de la science. Le frottement est la cause principale de la perte d'énergie et de l'usure. L'usure est la cause de la perte de matière et des performances mécaniques des systèmes. La lubrification a pour objectif principal de minimiser la friction des solides en contact et de prévenir leur endommagement [2].
- La tribologie est définie comme la science et la technique qui permet le mouvement relatif entre des surfaces qui interagissent [3].

Le mot « tribologie » devient du mot grec tribos logos qui signifie la science du frottement. C'est donc la science et la technologie de surfaces solides en contact; elle traite des multiples aspects du frottement, de la lubrification, de l'usure et de l'adhérence [6].

Les difficultés rencontrées par les ingénieurs pour prédire l'usure et pour sélectionner des couples de matériaux résultent essentiellement du fait que le frottement et l'usure ne sont pas directement des propriétés intrinsèques des matériaux et que les sollicitations du système tribologique sont en général complexes (pression, vibration, ...) [2].

### 2- Contact entre solides

Il est bien connu que les surfaces de contact ne sont jamais réellement planes, même si elles sont polies à l'extrême. Au microscope, on peut observer que la surface est en fait de crêtes et de creux. Les déviations par rapport au plan moyen sont appelées des aspérités. Différentes techniques expérimentales ont permis de mettre en évidence que la surface est une succession de pics dont la hauteur peut varier entre 0,5µm à 50µm tandis que l'espacement des pics varie de 0,5µm à 5mm. La pente des aspérités est en général très faible, de l'ordre de 5° à 10°. L'état de surface va aussi dépendre des interactions avec le milieu extérieur.

Cela signifie que pour deux corps pressés l'un contre l'autre, la surface de contact réelle est bien inférieure à la surface de contact apparente (Fig.1) [4].

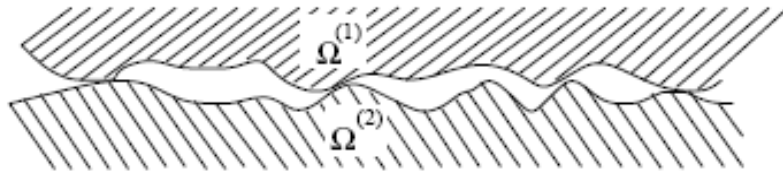


Fig. 1 : Schématisation microscopique du contact entre deux solides [4].

Le contact peut être selon les géométries des corps :

- ponctuel (sphère/sphère, sphère /plan,...)
- linéaire (cylindre/plan)
- surfacique (plan/plan)
- conformel (cylindre/cylindre) ou contraformel (cylindre dans cylindre creux) [5].

### 3-Système tribologique

Une approche plus moderne du frottement sec envisage l'analogie avec la lubrification hydrodynamique en considérant un frottement sec à trois corps.

Le terme de triplet tribologique, il est constitué par :

- ❖ Le mécanisme ou l'élément de machine dans lequel se situe le contact. Il gouverne les conditions de fonctionnement en transmettant les charges statiques et dynamiques et en imposant la cinématique et l'ambiance contenant le mécanisme ;
- ❖ Les premiers corps sont les éléments initialement en contact,
- ❖ L'interface ou troisième corps, qui sépare les premiers corps. C'est un opérateur transmettant la charge. Les troisièmes corps peuvent être formés naturellement par détachement de particules des premiers corps ou être introduits artificiellement dans le contact sous forme solide ou liquide [7].

### 4- Circuit tribologique

L'usure est un équilibre dynamique entre la formation des couches et leur élimination [6]. Les particules de troisième corps peuvent emprunter différents trajets, suivant leur comportement. L'ensemble de ces parcours possibles est défini sous le terme de circuit tribologique (Fig.2) [11]. Ce circuit se manifeste par différents débits de matière au sein du contact [12].

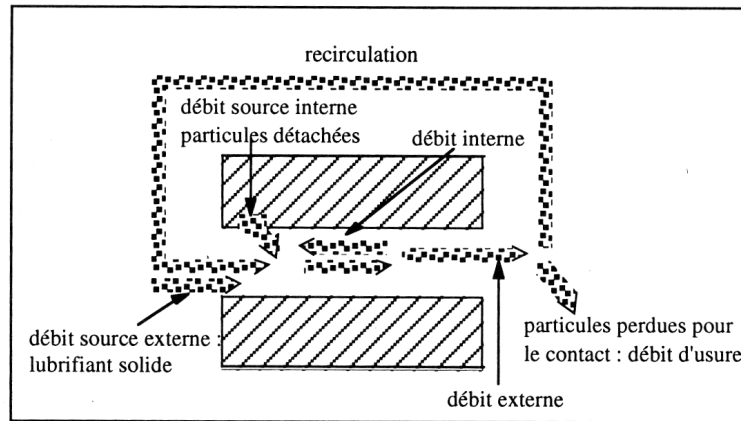


Fig. 2 : Circuit tribologique : les divers flux de matière dans un contact [9]

Un débit de matière donnant naissance au troisième corps correspond au détachement de particules des premiers corps, il s'agit d'une source interne. Ce débit source peut être également alimenté par un corps artificiel externe assurant à l'introduction du lubrifiant solide dans le contact, la source devient externe. Ces particules de troisième corps peuvent rester dans le contact ou bien être évacuées. Dans ce dernier cas, le contact est le siège d'un débit externe qui correspond à deux phénomènes distincts :

- Les particules peuvent être réintroduites dans le contact et constituent le débit de particules recyclées.
- Les particules définitivement exclues du contact deviennent des particules d'usure; leur débit constitue le débit d'usure.

La constitution d'un troisième corps séparant les deux premiers commence lorsque des débris d'usure (ou des éléments étrangers) sont piégés dans les zones frottantes. En général, la composition de cette couche de séparation n'est pas du tout homogène. La formation d'un troisième corps au détriment des deux premiers peut aboutir dans certains cas à ralentir leur usure. Ce phénomène est particulièrement important lorsque le troisième corps circule dans le contact, ou si l'objet frottant effectue plusieurs passages. Selon Godet et Ludema [10], [11], le troisième corps est un opérateur qui transmet la force normale (portance) d'un premier corps à l'autre et accommode, en s'écoulant (débit) d'une façon dissipative (frottement) l'essentiel de la différence de vitesse entre ces deux corps. Les « bons » troisièmes corps doivent adhérer aux surfaces frottantes et être capables d'accommoder la majeure partie de leurs déplacements relatifs [12].

## **II- FROTTEMENTS**

### **1- Définition**

Le frottement peut être défini comme la force résistante tangentielle à l'interface commune entre deux corps lorsque, sous l'action d'une force externe, un corps se déplace ou tend à se déplacer relativement à la surface de l'autre [3].

Le frottement est aussi défini comme la résistance au mouvement qui existe lorsqu'un objet solide est déplacé tangentiellement par rapport à la surface d'un autre qu'il touche, ou lorsque l'on essaie de provoquer un autre déplacement. [13].

Les normes ne définissent pas le frottement mais la force de frottement qui est la force résistante tangentielle à l'interface entre deux corps lorsque, sous l'action d'une force extérieure, un corps se déplace ou tend à se déplacer relativement à l'autre [14]. Pour d'autres normes, le frottement se résume à l'action agissant contre le mouvement relatif de corps en contact [15].

### **2-Types de frottements**

#### **2-1 Frottement sec**

Etant donné deux solides en contact et soumis à des forces tendant à leur faire effectuer un glissement relatif, le frottement sec est défini comme l'ensemble des phénomènes qui naissent dans l'interface de contact entre les deux corps en absence de lubrification.

La force de frottement résulte d'un ensemble complexe de mécanismes non parfaitement connus intégrant les propriétés géométriques, mécaniques et physico-chimiques des surfaces effectivement en contact, notamment la déformation plastique des aspérités de surface [16]. Ajoutés à l'interface et aux difficultés des mesures expérimentales, les mécanismes microscopiques produisant le frottement solide peuvent être de différentes natures selon les conditions du contact.

Le lien entre les mécanismes microscopiques et le comportement macroscopique n'est pas encore clairement élucidé.

La complexité des études des frottements secs provient essentiellement :

- ✓ Du nombre élevé de paramètres ;
- ✓ Du caractère ponctuel des phénomènes ;
- ✓ De la modification temporelle des phénomènes.

Donc en régime sec, les surfaces sont en contact par leurs aspérités (fig.1). On réduit la force de frottement en déposant entre les aspérités un lubrifiant solide dont la résistance au cisaillement est inférieure à celle du métal de base.

Ce lubrifiant, qui s'accumule dans les cavités microscopiques situées entre les aspérités, est entraîné dans la zone de contact par le mouvement relatif des surfaces. En régime sec, le coefficient de frottement est relativement élevé (entre 0,2 et 0,8) ; il y a donc dégagement d'une grande quantité d'énergie. Puisque, par ailleurs, l'évacuation de la chaleur est déficiente, les lubrifiants solides sont mieux adaptés aux utilisations sous charge élevée, à basse vitesse (Fig.3).

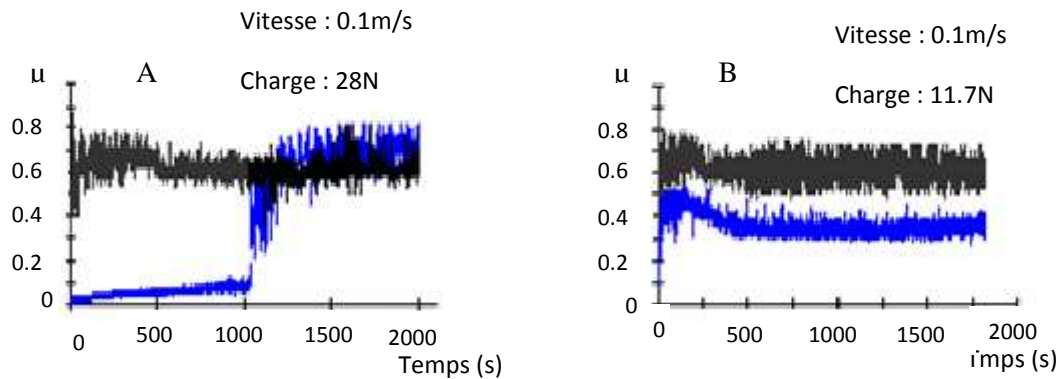


Fig.3 : variation du coefficient de frottement en fonction du temps  
(1 : Acier, 2 : Acier+graphite) [18], [19].

Les deux corps antagonistes sont : substrat revêtu d'un dépôt (acier ou acier+graphite) et pion 100C6.

| Charges normales et vitesse de glissement appliquées |                | 11.7N<br>0.1m/s | 18N<br>0.1m/s | 28N<br>0.1m/s | 11.7N<br>0.5m/s | 18N<br>0.5m/s | 28N<br>0.5m/s |
|--|----------------|-----------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|
| Coefficient de frottement                            | Acier          | 0.59            | 0.61          | 0.60          | 0.46            | 0.68          | 0.59          |
|  | Acier+graphite | 0.40            | 0.40          | 0.45          | 0.36            | 0.45          | 0.36          |

**Tab I.** Valeurs moyenne du coefficient de frottement dans différentes conditions d'essais [18]

## 2-2-Frottement mixte

C'est un frottement de niveau intermédiaire entre le frottement sec et hydrodynamique : le film du liquide absorbé en surface ou formé par réaction chimique est de faible épaisseur. Le degré d'adhérence de ce film avec la surface détermine son efficacité. Ce régime offre un coefficient de frottement plus faible que le régime sec [12].

## 2-3-Frottement fluide

Les surfaces en mouvement relatif ne sont pas en contact par leurs aspérités par ce qu'elles sont séparées par un épais film de lubrifiant. Le coefficient de frottement est faible et ce type

de frottement est indiqué pour l'utilisation à haute vitesse ou lorsque la force normale est élevée [12].

### III- USURE

#### 1- Définition

- ❖ C'est la perte progressive de matière de la surface active d'un corps par suite de mouvement relatif d'un autre corps sur cette surface [3].
- ❖ Le terme usure, dans son utilisation la plus large, exprime la détérioration des composants due à l'usage [20].

L'usure est générée par plusieurs mécanismes physiques, chimiques ou mécaniques indépendants ou non. En fait, l'usure considérée comme un phénomène global est très difficile à décrire du point de vue quantitatif. Il en résulte que les différentes approches théoriques sont faites à partir d'hypothèses simplificatrices tendant à dissocier les processus mis en jeu pour mieux les appréhender [20]. Les études expérimentales montrent l'influence de paramètres classiques comme la pression appliquée ou la vitesse de glissement [21].

- ❖ La perte de matière d'un organe mécanique en fonction du temps présente généralement trois phases distinctes (Fig.4).

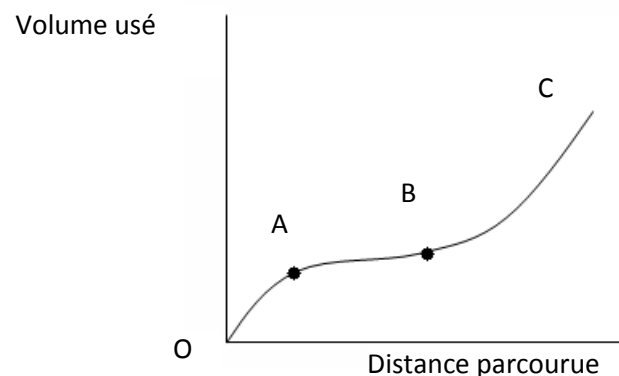


Fig.4 : Evaluation générale de la perte de matière par usure en fonction du temps [20].

La phase OA est une phase d'adaptation des surfaces souvent appelée phase de rodage ou d'incubation. La partie AB correspond à l'utilisation normale de l'organe mécanique. La perte de matière est faible, régulière en fonction du temps. La phase BC traduit la mise hors service du composant due à une usure exagérée qui tend à modifier les conditions nominales de fonctionnement [20].

## 2- Types d'usure

Nous adoptons ici une classification regroupant les différents types d'usures en grandes familles caractérisées par l'action d'un mécanisme spécifique :

### 2-1- Usure abrasive

#### 2-1-1- Définition

- ❖ L'usure abrasive est définie comme le déplacement de matière produit par des particules ou protubérances dures qui glissent contre une surface solide [22]
- ❖ est aussi l'usure abrasive est la conséquence d'un déplacement de matière dû à la présence de particules dures comme par exemple de la silice, de l'alumine ou d'autres minerais. Il y a formation de bourrelets ou de coupeaux [23].
- ❖ L'usure abrasive correspond à une perte progressive de matière à la surface de travail d'un corps et résultant d'un mouvement relatif au niveau de cette surface (Fig.5) [24].

Les aspérités ou particules dures peuvent être assimilées à des microoutils dont l'angle de coupe peut être positif ou négatif. Elles provoquent le déplacement de matière par cisaillement et formation de microcoupeaux ou par déformation plastique (fig.6).

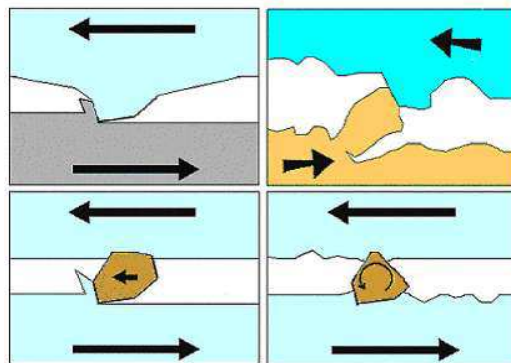


Fig.5 : Schéma de principe de l'usure abrasive [24]



Fig.6 : Mécanisme de l'abrasion : (a) abrasion par effet de coupe ; (b) abrasion par déformation [20]

On en distingue deux familles :

- Usure par abrasif lié lorsque l'abrasif appartient à la surface d'un des solides en contact, abrasion à deux corps,

- Usure par abrasif libre lorsque les particules sont enserrées entre les deux surfaces en contact, abrasion à trois corps [22] (fig.7).

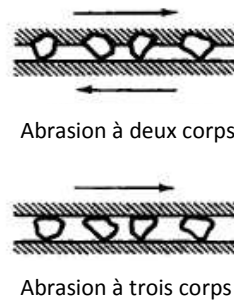


Fig.7 : représentation schématique de l'usure abrasive à deux corps et à trois corps [23]

Lorsque les particules abrasives se cassent pendant le processus on parle d'abrasion sous haute contrainte mais si la pression sur les particules est faible et que celles-ci restent intactes, il s'agit alors d'abrasion sous faible tension [23].

### 2-1-2 -Effets des paramètres tribologiques

- *Dimension et morphologie de l'abrasif* : l'intensité de l'usure abrasive croît avec la taille des particules. Une particule possédant des angles aigus aura un effet de coupe plus marqué. Des particules arrondies déformeront davantage le métal [20]. Généralement les particules responsables de l'abrasion ont une taille comprise entre 5 et 100 $\mu\text{m}$  (fig.8).

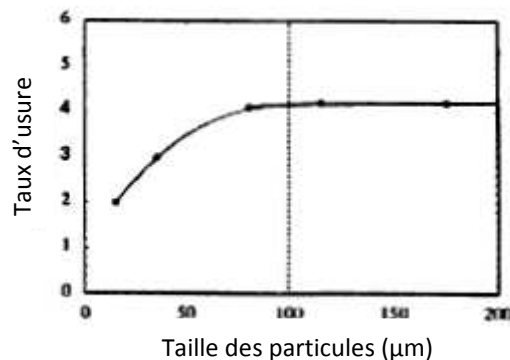


Fig.8 : Evolution de l'abrasion de la taille des particules [23].

Au-dessus de la taille critique, soit 100  $\mu\text{m}$ , la vitesse d'usure est pratiquement indépendante d'une augmentation de la taille des particules. R.Gahin et al [23] ont regroupé plusieurs explications pour ce phénomène mais l'évaluation de la taille des particules reste difficile car ce sont rarement des sphères.

Les mécanismes fondamentaux de l'abrasion dans ce cas sont reliés uniquement à la déformation plastique et à la rupture fragile [23].

- *Nature, dureté, quantité d'abrasifs impliquée dans le contact.*



- Charge appliquant les grains abrasifs sur la surface
- Nature, structure et dureté du matériau subissant l'abrasion.

EYRE [55] a étudié ces paramètres et montré qu'il existe un rapport critique entre la dureté du métal et celle de l'abrasif  $H_m/H_A=0,6$  caractérisant le domaine d'efficacité d'un abrasif (Fig.9). Un rapport supérieur à cette valeur conduit à un taux d'abrasion faible. Pour les métaux, à dureté de l'abrasif fixée, on observe que la résistance à l'usure des métaux purs est une fonction linéaire croissante de la dureté.

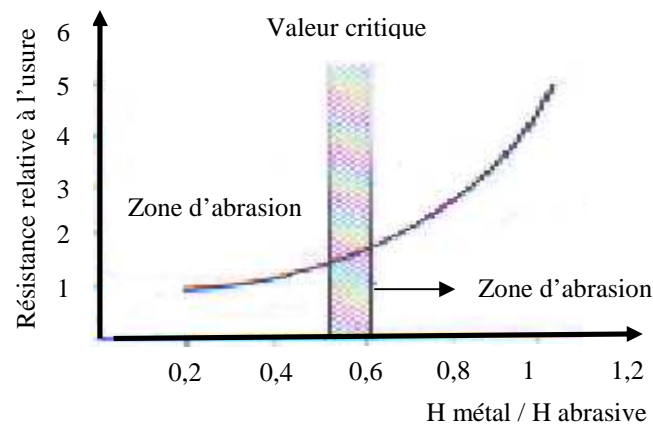


Fig.9 : Effet de la dureté de l'abrasif sur la résistance à l'usure des métaux [20].

Pour le cas de dépôts élaborés par projection thermique, la perte volumique ( $\Delta V$ ) dépend des caractéristiques suivantes :

- la nature chimique du dépôt (composition et homogénéité),
- la microstructure (porosité et teneur en oxyde),
- la dureté du dépôt,
- l'adhérence du dépôt (mode d'accrochage,...),
- l'épaisseur du dépôt [24].

## 2-2-Usure adhésive

### 2-2-1-Définition

Selon le schéma classique de Bowden et Tabor [56] (Fig.5), l'usure adhésive se caractérise par des jonctions interfaciales qui s'établissent entre les aspérités des surfaces en contact. Ces aspérités sont soumises à des contraintes locales élevées et subissent des déformations élastiques et plastiques qui provoquent un rapprochement des atomes et la création de liaisons interfaciales (Fig.10) [20].

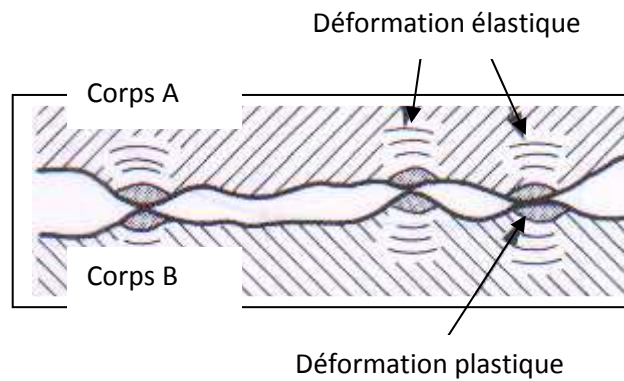


Fig.10 : contact de deux corps solides [20].

Plusieurs possibilités ont été proposées pour expliquer l'établissement de ces liaisons que l'on peut regrouper en quatre familles principales :

- ✓ Les liaisons par accrochage mécanique et interpénétration des aspérités. On les observe dans le cas de contact solide mou/solide dur (élastomère/métal ou minéral).
- ✓ Les liaisons par transfert des électrons à travers l'interface (théorie de Deriaguine) qui produit une double couche de charges électriques de signe opposé de part et d'autre de la surface. La force d'adhésion est générée par les forces électrostatiques qui s'établissent à travers l'interface entre ces couches. Ce mécanisme apparaît dans les contacts polymère/métal. Dans ce cas le polymère se charge négativement à la rupture.
- ✓ Les liaisons basées sur l'absorption qui peut être chimique, il se crée alors des liaisons primaires à courte distance de type métalliques, ioniques ou covalentes très résistantes ou physique, le contact intermoléculaire est dû aux forces secondaires à longue distance de type van der Waals qui s'établissent sur des distances de quelques nanomètres.
- ✓ Les liaisons avec diffusion dans lesquelles on observe un échange d'atomes à travers l'interface qui apparaissent dans les contacts à température élevée.

Phénoménologiquement, ces liaisons peuvent être de deux types : adhésives lorsque l'interface est maintenue, c'est le cas le plus fréquent pour les matériaux non métalliques pollués ou cohésive lorsque par suite de l'absence ou de la rupture des films superficiels, des mécanismes diffusionnels se mettent en jeu et l'interface disparaît. L'adhésion est alors provoquée par des liaisons métalliques ou covalentes pour les métaux, ioniques pour des matériaux non métalliques.

### 2-2-2 -Effets des paramètres tribologiques

L'adhésion dépendant essentiellement de l'aire réelle de contact, elle est fortement influencée par les paramètres fonctionnels de la situation tribologique concernée et par la nature et les propriétés des matériaux mis en présence [20].

#### ➤ Influence de la charge

Il existe une charge critique au-delà de laquelle l'usure croît considérablement (Fig.11). Sous faible charge, le volume usé est sensiblement proportionnel à la charge. L'augmentation de la charge se traduit d'abord par un accroissement du nombre des points de contact (Fig.12.a), et ensuite par un accroissement de la taille des jonctions (Fig.12.b). Les aspérités se déforment plastiquement et contribuent ainsi à une augmentation rapide de l'usure.

A faible vitesse, la pression critique est de l'ordre du tiers de la dureté Brinell. Au-delà de cette pression, l'aire réelle de contact devient une fraction importante de l'aire apparente et la déformation plastique tend à se généraliser favorisant l'adhésion. L'index de plasticité  $\Psi$  permet de déterminer le risque de déformation plastique des surfaces rugueuses :

$$\Psi = (F_n/H) * (\sigma/R)^{1/2}$$

Tels que :

H : dureté du matériau le plus mou obtenue par indentation

$\sigma$ : écart type de la distribution des hauteurs d'aspérités

R : rayon de courbure du sommet des aspérités

$F_n$  : charge appliqué

Lorsque cet index est inférieur à 0,6 la déformation des aspérités est majoritairement élastique, lorsqu'il est supérieur à 1 la déformation est majoritairement plastique [20].

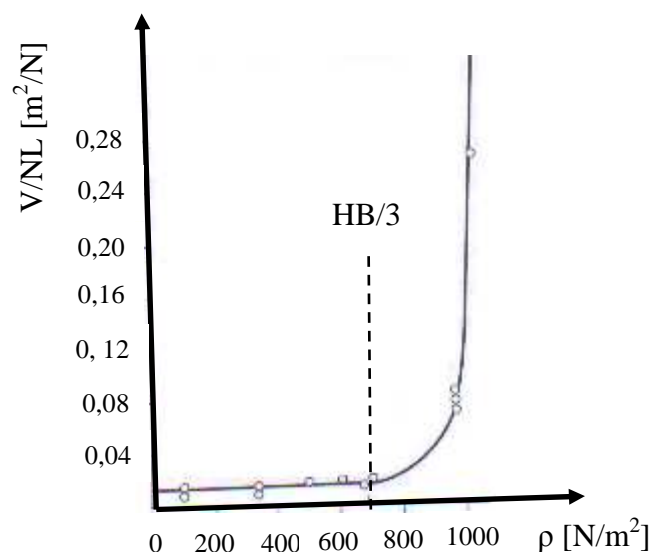


Fig.11 : Evaluation de l'usure en fonction de la pression de contact [20]

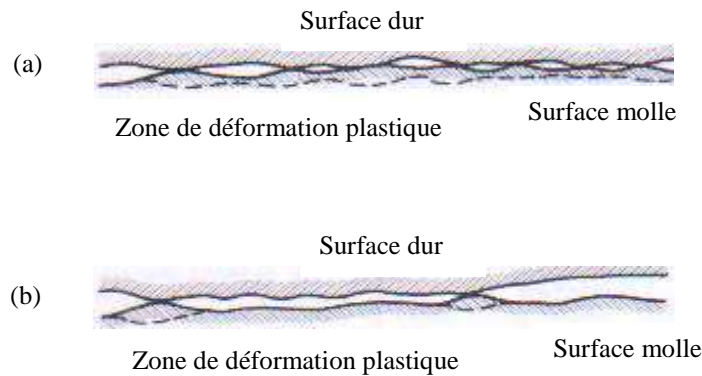


Fig.12 : Influence de la charge sur un contact – frotteur en acier : (a) charge faible ; (b) charge élevée [20].

➤ *Influence de la vitesse de glissement*

Le principal effet de la vitesse est d'agir sur la température superficielle, la température maximale atteinte étant celle du métal ayant le plus bas point de fusion. Si la charge faible n'entraîne pas de destruction immédiate, cet accroissement de température en surface aura pour effets :

- ✓ De créer des points chauds, ce qui accroît la réactivité des surfaces et des produits d'usure vis-à-vis du milieu environnant et favorise toutes les réactions chimiques qui peuvent se produire au cours des glissements.
- ✓ De faciliter (du fait des chauffages et refroidissements successifs) les modifications structurales et à partir d'un certain niveau de déclencher des mécanismes de diffusion de certains éléments. Ainsi, dans le cas des aciers, on peut trouver des transformations de type martensitique, et certaines zones voient se modifier leur teneur en carbone [20].

➤ *Influence combinée –charge et vitesse*

La charge (pression de contact) et la vitesse introduisent des limites dues aux déformations dans un cas, aux échauffements dans l'autre. L'action simultanée des pressions de contact et de la vitesse peuvent être :

- ✓ D'accroître la conformité des surfaces par déformation ;
- ✓ De favoriser (par l'élévation de température) la diffusion des éléments d'une pièce dans l'autre et la formation de composés à l'interface ;
- ✓ De favoriser les réactions superficielles avec le milieu environnant ;
- ✓ D'entraîner la fusion des couches superficielles.

➤ *Influence de la température*

La température, outre l'affaiblissement mécanique des matériaux, favorise les réactions interfaciales et, au-delà d'un certain seuil déclenche les mécanismes de fluage et de diffusion qui augmentent fortement le risque de création de liaisons étendues pouvant conduire au grippage. Pour prendre en compte l'effet de la température, on se réfère généralement à la température de fusion des matériaux  $T_f$ .

### 2-3-Usure par fatigue

Les contraintes auxquelles sont soumis les contacts conduisent selon leur intensité à plusieurs types d'endommagements. Si ces contraintes dépassent localement la limite d'élasticité des matériaux, ceux-ci se déforment plastiquement par surcontrainte dès l'application de l'effort, après quelques cycles de fonctionnement ou en cas de choc, ce qui conduit à ce qu'il est convenu d'appeler l'usure par déformation. Cela se traduit par des empreintes sur les surfaces. Ce type d'usure est quelquefois désigné par le terme de brinellage.

Si le niveau des contraintes reste inférieur aux valeurs critiques de plastification, la répétition des sollicitations s'appliquant à des volumes réduits de matière peut conduire à des phénomènes de fatigue superficielle. Ceux-ci se manifestent physiquement sous forme de modifications structurales et par l'apparition de fissures s'amorçant en sous-couche ou en des sites qu'il n'est pas toujours facile de prévoir. Ces fissures aboutissent à terme à des piqûres ou écaillages qui peuvent nuire gravement au fonctionnement du système et même engager un processus divergent aboutissant à une rupture catastrophique. Les endommagements dus à la fatigue de contact peuvent être répartis en deux familles suivant leur cause principale : fatigue d'origine mécanique et fatigue d'origine thermique [20].

### 2-4-Usure érosive

L'usure érosive se définit comme la perte de matière provoquée par l'action de particules qui viennent heurter une surface solide.

Comme dans le cas de l'usure abrasive plusieurs paramètres influencent ce mode d'usure :

- La taille, le nombre, la morphologie et la vitesse des particules.
- L'angle d'impact qui définit le faciès des endommagements observés (Fig.13).

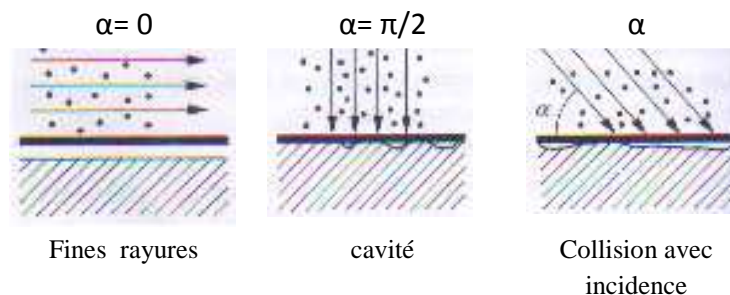


Fig.13 : Erosion d'une surface par des particules solides [20].

Un faible angle d'incidence favorise l'effet de coupe alors qu'une incidence normale entraîne plus de déformation. L'intensité des endommagements dépend de plus du comportement des matériaux (Fig.14).

Les résultats montrent que l'érosion est maximale pour de faibles angles d'attaque dans le cas des matériaux à caractère ductile et qu'au contraire, celle est maximale sous incidence normale avec des matériaux fragiles [20].

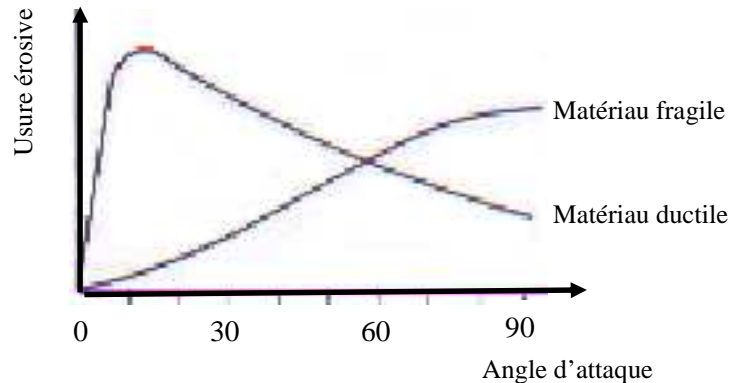


Fig.14 : Erosion en fonction de l'angle d'incidence des particules [20].

## 2-5-Usure par réaction tribochimique

En présence d'un environnement réactif, du fait des pressions et des températures élevées imposées au contact, des phénomènes complexes peuvent se produire et notamment des réactions entre l'environnement et le matériau constituant la surface (tribooxydation en milieu oxygéné par exemple). Suivant la nature et les caractéristiques du composé formé, ces réactions peuvent être bénéfiques, dans le cas des films réactifs issus des additifs des lubrifiants, ou néfastes au fonctionnement [20].

La tribochimie concerne la chimie des interactions des surfaces en mouvement relatif. K.H. Zum Gahr estime qu'il y a quatre mécanismes différents pour ce type d'usure :

- Un contact métallique entre les aspérités de surface qui entraîne un enlèvement de métal par adhésion. Les petits débris d'usure produits peuvent être oxydés.
- Une réaction chimique des métaux avec l'environnement qui réduit le contact et assure une protection.
- Une fissuration des couches protectrices provoquée par une grande pression locale qui entraîne des débris non-métalliques.
- Des débris d'usure métalliques ou non peuvent agir comme particules abrasives et rendre rugueuses les surfaces en contact. Il pourra y avoir reformation des couches protectrices.

Cette usure va dépendre fortement des cinétiques de formation des couches en surface et de leurs propriétés à résister à l'enlèvement [23].

### I-4-Mécanismes de l'usure

Il existe de nombreux mécanismes d'endommagement des surfaces, dont par exemple :

- La modification de la microstructure, qui subit ici un traitement thermomécanique sévère et peut répondre par un adoucissement, une transformation de phase, une recristallisation...
- La déformation plastique de la zone active, qui modifie la topographie de la surface ;
- La fissuration de la zone fortement déformée ;
- La perte de matière par transfert depuis la surface de l'antagoniste, qui peut générer une pollution ou un mauvais état de surface ;
- La corrosion.
- L'endommagement de la surface est le plus souvent synonyme de l'endommagement de la pièce, soit par perte de matière (érosion), soit par modification de la topographie, soit du fait des débris. Ce n'est pourtant pas toujours le cas (rodage des moteurs), (Fig.15).

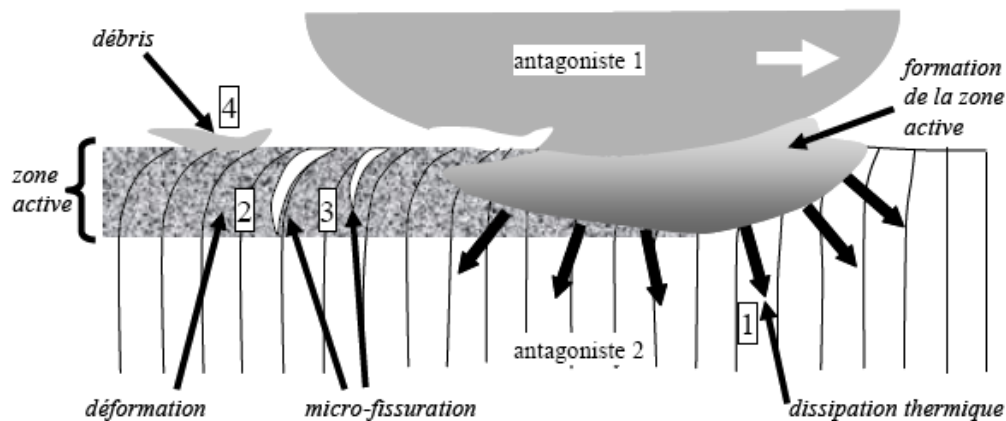


Fig.15 : Formation d'une couche active au cours d'un frottement. (1) : dissipation thermique ; (2) : déformations et/ou transformations de phase ; (3) : fissuration de la couche active ; (4) apparition de débris [25].

Dans la plupart des cas, plusieurs mécanismes entrent en jeu ; l'élévation de température peut par exemple induire une oxydation des surfaces, ce qui crée des débris et modifie les conditions de frottement [25].