

## **Chapitre II: Notions générales sur l'usure**

### **II.1. Définition**

L'usure est un ensemble complexe de phénomènes difficiles à interpréter, amenant une émission de débris avec perte de masse, de cote, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces.

Un mouvement relatif entre un objet et son milieu, gazeux, liquide ou solide, provoque des forces mécaniques aux environs de l'interface. Souvent, ces forces entraînent une usure de l'objet par une perte progressive de matière en surface. Des phénomènes de corrosion ont fréquemment lieu en relation avec l'usure, provoquant l'altération rapide du matériau.

Le frottement entre les corps solides dissipe de l'énergie et use les surfaces en contact. L'étude de ces phénomènes appartient au domaine de la tribologie : il s'agit de l'étude des aspects scientifiques et technologiques liés au frottement, à la lubrification et à l'usure des matériaux.[4]

L'usure comporte une part importante de réactions chimiques ; des couches superficielles chimiquement inertes peuvent parfois se révéler plus résistantes au frottement que des couches dures, surtout en présence de milieux agressifs.

Elle est généralement combattue à cause de ses effets négatifs mais elle présente aussi des aspects favorables tels que l'affûtage des outils, la finition d'une surface par rectification.[3]

### **II.2. Les principaux types d'usure**

Ils sont classés d'après les phases de contact, les interactions mécaniques et l'importance relative des effets mécaniques et chimiques.

On distingue deux catégories principales d'usure :

- L'usure due aux frottements entre corps solides.
- L'usure due aux impacts et aux fluides (érosion)

Le tableau suivant montre quelque types d'usure :

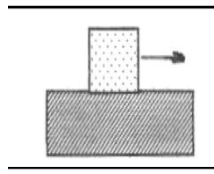
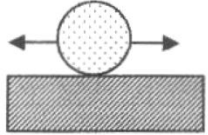
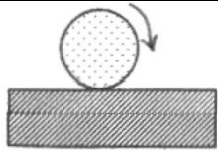
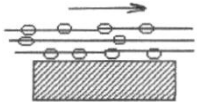
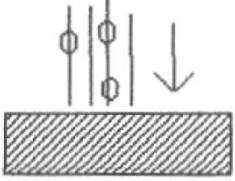
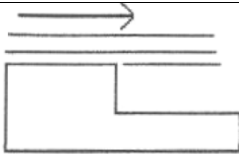
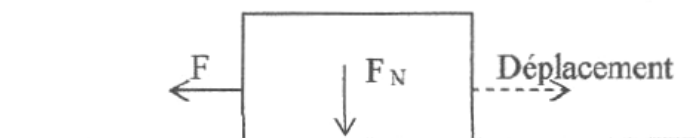
Type d'usure	Type de contact	Mécanismes Prédominants	Nom
Usure due au frottement entre solides.		Mécanique Chimique	Usure par glissement Usure par corrosion
		Mécanique Chimique	Usure par frottement Usure-Frottement
		Mécanique Chimique	Usure par roulement Usure par corrosion
Usure due aux impacts et aux fluides		Mécanique Chimique	Usure par érosion Corrosion - Erosion
		Mécanique Chimique	Usure par impact Corrosion impact
		Mécanique Chimique	Usure par cavitation Corrosion - Cavitation

Tableau n°01 : Type d'usure

## II.3 Le frottement

### II.3.1 Contacts non lubrifiés :

Pour faire glisser un solide sur une surface plane, il faut appliquer une force égale ou supérieure à la force de frottement  $F$  qui agit parallèlement à la surface dans le sens opposé au mouvement, (fg. 13).



(fig. 13 : glisser un solide sur une surface plane)

Son intensité est proportionnelle à la force normale  $F_N$ , appelée aussi charge, qui agit perpendiculairement à la surface de contact. Le facteur de proportionnalité  $f$  porte le nom de coefficient de frottement.[3]

$$F = f \cdot F_N \quad \text{Eq. n°01}$$

Le coefficient de frottement est une propriété du système, formant le contact, sa valeur dépend entre autres des :

- Facteurs mécaniques : force normale, vitesse de déplacement, viscosité du lubrifiant.
- Facteurs chimiques : humidité, oxydants, additifs.
- Propriétés des matériaux : dureté, plasticité, énergie de surface.

Dans les systèmes à mouvement, on cherche le plus souvent à minimiser les frottements, pour cela, on utilise normalement des lubrifiants. Ces derniers permettent de réduire le coefficient de frottement jusqu'à des valeurs inférieures à 0,1.

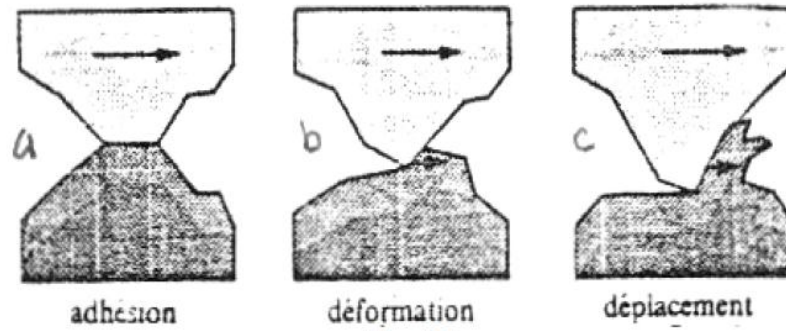
De nombreuses situations requièrent, cependant, un coefficient de frottement élevé, par exemple le contact entre un pneu de voiture et le sol. Dans ce cas, l'usure doit rester faible, malgré un coefficient de frottement élevé. Le tableau ci-dessous indique quelques valeurs typiques du coefficient de frottement suivant les matériaux en contact et la nature du milieu.

Contact	Milieu	F (dynamique)
Métal - métal	Vide	0,1
	Air	0,2 à 1
	Huile lubrifiante	0,02 à 0,1

**Tableau n°2 : quelques valeurs typiques du coefficient de frottement suivant les matériaux en contact et la nature du milieu.**

Trois phénomènes physiques bien distincts, provoquent des pertes d'énergie lors du frottement entre deux solides rugueux et influencent aussi sur la valeur du coefficient de frottement.

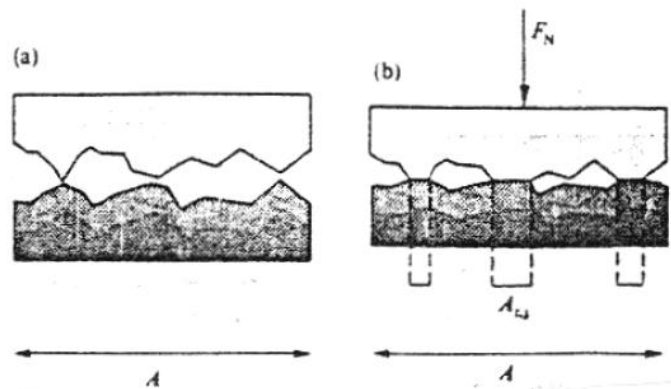
- Formation et rupture des jonctions d'adhésion aux lieux de contact (fig. 14 a).
- Déformation élasto-plastique des aspérités (fig. 14 b).
- Déplacement de matière par labourage (fig. 14 c)



(fig. 14 : Les phénomènes physiques)

### 1) Formation et rupture des jonctions d'adhésion

La figure 15 représente le contact entre deux surfaces rugueuses de métaux ductiles.



(fig. 15 : contact entre deux surfaces)

En raison de la rugosité, seules les aspérités se touchent. La vraie surface de contact  $A$  est égale à la somme de toutes les surfaces de contact entre les aspérités.

$$A_r = \sum A_{rj} \quad \text{Eq. n°02}$$

En général,  $A_r$  est inférieure à la surface de contact géométrique  $A$ . Sa valeur dépend de la force normale  $F_N$  et de la dureté du matériau. La pression agissant sur les aspérités en contact vaut :

$$P_{asp} = \frac{F_N}{A_r} \quad \text{Eq. n°03}$$

Si  $P_{asp}$ , dépasse la limite élastique du matériau, les aspérités subissent une déformation plastique et la surface réelle de contact augmente. Par conséquent, la pression agissant sur les

aspérités diminue jusqu'à ce qu'elle atteigne finalement, à l'équilibre, une valeur égale à la limite élastique du matériau. Un essai de dureté correspond à un mécanisme similaire.[5]

L'application d'une force normale connue induit une empreinte dont la taille (surface réelle de contact) caractérise la dureté  $H$  du matériau.

$$H = \frac{F_N}{A_r} \quad \text{Eq. n°04}$$

Lors du glissement relatif des deux surfaces, des jonctions se soudent et se défont constamment aux aspérités. Ces jonctions ont une résistance  $\tau$  au cisaillement.

$$\tau = \frac{F}{A_r} \quad \text{Eq. n°05}$$

On obtient une nouvelle expression pour le coefficient de frottement :

$$A_r = \frac{F_N}{H} = \frac{F}{\tau} \Rightarrow \frac{\tau}{H} = \frac{F}{F_N} = \frac{F_N \cdot f}{F_N} \Rightarrow f = \frac{\tau}{H} = \frac{F}{F_N} \quad \text{Eq. n°06}$$

$\tau$  : Résistance au cisaillement du moins dur des deux matériaux formant la jonction.

$H$  : sa dureté.

Ce modèle de frottement entre deux surfaces métalliques non lubrifiées suppose que le matériau le plus dur ne se déforme pas. Il admet également que la rupture de la jonction ne se produit pas au lieu de contact mais dans le matériau le moins dur. Cette théorie classique explique que le coefficient de frottement varie peu d'un métal à l'autre et ne dépend que du rapport  $\tau / H$  et non pas des quantités prises séparément, or ce rapport ne varie que peu entre différents métaux.[3]

Cependant d'autres observations ne concordent pas avec la théorie décrite ci-dessus. Tout d'abord l'expression  $\tau / H$  donne une valeur de  $f$  trop faible. En effet la dureté  $H$  des métaux vaut approximativement le triple de la limite en traction uni-axiale ( $H = 3\sigma_c$ ) et la résistance au cisaillement en vaut environ la moitié ( $\tau \approx 0,5 \sigma_c$ ) et avec l'équation

$f = \tau / H$ , on obtient un coefficient de frottement avoisinant ( $f \approx 0,17$ ), ce qui est nettement inférieur aux valeurs expérimentales mesurées sur des contacts lubrifiés, formés entre deux métaux non oxydés.

Dans cette théorie classique le milieu n'a pas été pris en considération. En effet, les surfaces métalliques pures ne peuvent pas exister au contact avec l'atmosphère, en raison des phénomènes d'adsorption et d'oxydation, or les atomes adsorbés où les couches d'oxyde superficielles empêchent la formation des liaisons métal-métal entre les surfaces de contact.

## **2) Déformation élasto-plastique des aspérités**

En théorie classique du frottement, la rugosité initiale des surfaces ne devrait pas influencer la valeur du coefficient de frottement, car en raison de la déformation des aspérités, la vraie surface de contact ne dépend que de la force normale et de la dureté.

En réalité, dans les systèmes en mouvement, on constate normalement une période de rodage durant laquelle le coefficient de frottement est lié à la rugosité initiale. Cette observation en contradiction avec la théorie classique s'explique par la figure 14 précédemment exposée.

Le mouvement relatif de deux surfaces rugueuses, provoque une déformation élastique et plastique des aspérités dans le sens du mouvement, l'énergie de déformation correspondante participe à l'énergie mécanique totale dissipée par le frottement.

## **3) Déplacement de matière par labourage**

Lorsqu'une aspérité d'un matériau dur, ou une particule d'abrasif, glisse sur un matériau moins dur, on observe un déplacement de matière par labourage et par conséquent, ça conduit à la formation de rainures, ce processus requière de l'énergie et contribue donc au frottement.

Donc les trois processus précédemment décrits, permettent de considérer le coefficient de frottement, comme la somme de trois contributions :

$$f = f_{ad} + f_{def} + f_{pl} \quad \text{Eq. n°07}$$

$f_{ad}$  : dû aux phénomènes d'adhésion.

$f_{def}$  : dû aux déformations élastiques et plastiques des aspérités.

$f_{pl}$  : dû au déplacement de matière par labourage.

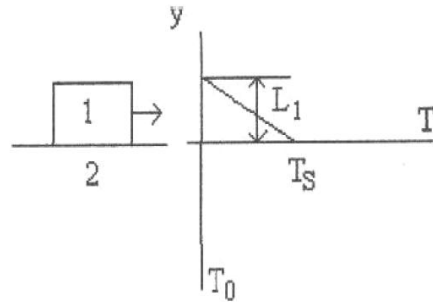
Mais l'état actuel des recherches ne permet pas de quantifier la contribution de chaque mécanisme participant au frottement.

$f$  dépend des propriétés des matériaux, des paramètres mécaniques et des conditions chimiques dans le contact, formation de particules d'usure, changement de la rugosité par déformation plastiques des aspérités, durcissement par écrouissage du métal près de la surface.[3]

En général la force tangentielle nécessaire pour faire glisser une surface solide au repos sur une autre est normalement plus élevée que celle nécessaire pour maintenir le glissement. On différencie entre le coefficient de frottement statique qui caractérise le frottement entre deux surfaces au repos et le coefficient de frottement dynamique qui caractérise le frottement entre deux surfaces en mouvement relatif.

#### 4) Température de contact

Le frottement entre deux surfaces conduit à la transformation de l'énergie mécanique en énergie thermique. Durant la phase initiale, la température augmente; elle atteint ensuite un état stationnaire lorsque la chaleur produite équivaut à la chaleur dissipée par conduction. La quantité



d'énergie thermique produite  $Q_f$  ( $J/m^2 \cdot s$ ) lors du glissement d'un matériau sur la surface d'un autre est proportionnelle à la force de frottement  $F$  ainsi qu'à la vitesse de déplacement  $v$ . [5]

$$Q_f = \frac{f \cdot F_N \cdot v}{A} \quad \text{Eq. n°08}$$

À l'état stationnaire, la conduction thermique a lieu à travers les deux matériaux formant le contact, le flux thermique  $Q_1$  dans le matériau 1 vaut :

$$Q_1 \approx K_1 \frac{T_s - T_0}{L_1} \quad \text{Eq. n°09}$$

$K_1$ : conductivité thermique du matériau 1.

$T_s$ : température à la surface de contact.

$T_0$ : température à une distance caractéristique.

$L_1$ : appelée distance de conduction thermique, épaisseur du matériau 1.

Le flux thermique  $Q_1$  ne représente qu'une fraction  $\theta_1$  de la chaleur totale  $Q_f$  dissipée.

$$Q_1 = \theta_1 \cdot Q_f \quad \text{Eq. n°10}$$

$$K_1 = \frac{T_s - T_0}{L_1} = \frac{\theta_1 f F_N v}{A} \quad \text{Eq. n°11}$$

$$T_s = T_0 + \frac{\theta_1 f F_N v L_1}{K_1 A} \quad \text{Eq. n°12}$$

La température moyenne de la surface est donc proportionnelle au coefficient de frottement  $f$ , à la force normale  $F_n$  et à la vitesse de déplacement  $v$ . La valeur de  $\theta_1$ , dépend du rapport des conductivités thermiques des matériaux en contact, pour des matériaux identiques  $\theta_1 \approx 0,5$ . [3]

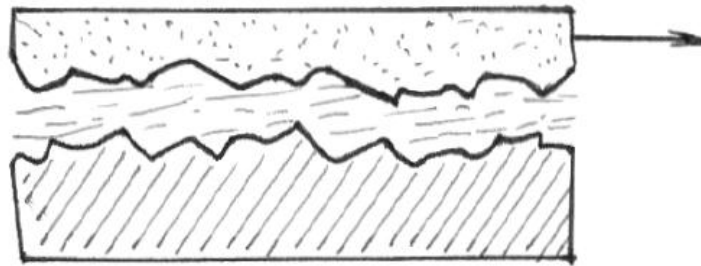
Dans certains cas extrêmes de frottement, la température de l'interface peut atteindre des valeurs très élevées, pouvant conduire à des transformations de phases dans une zone adjacente à la surface de contact. En présence de métaux à basse température de fusion comme le plomb, l'étain ou le zinc; l'échauffement local suffit à fondre le métal.

### II.3.2 Contacts lubrifiés

La présence d'un film de lubrifiant réduit considérablement le coefficient de frottement, dont la valeur se situe alors typiquement entre 0,2 et 0,1. Il existe plusieurs régimes de lubrification et l'important sont :

- Hydrodynamique.
- Mixte.

#### 1) Le régime de lubrification hydrodynamique



(fig. 16)

Appelé aussi élasto hydrodynamique et signifie que les propriétés du film continu, séparant les deux solides, dont notamment la viscosité, déterminent le coefficient de frottement. L'épaisseur moyenne du film liquide  $h$  dépasse largement la rugosité moyenne  $R_a$  des surfaces de contact.

Ce régime s'établit lorsque la force normale est relativement faible et que la viscosité du lubrifiant est élevée. Les contacts lubrifiés travaillent normalement dans ce régime parce que l'usure y est plus faible. [5]



$$\frac{h}{R_a} > 1$$

Eq. n°13

## 2) Régime de lubrification mixte

Elle a longtemps été appelé lubrification onctueuse.

Lorsque le mouvement débute, on constate que le coefficient de frottement diminue d'abord très vite, puis de plus en plus lentement, et la courbe représentative prend peu ou prou des allures hyperboliques sans que l'on puisse la faire correspondre à une formule définie autrement que par un ensemble de points expérimentaux. Le film de lubrifiant remplit alors les cavités des irrégularités d'état de surface. Le sommet de ces irrégularités s'entre-choquent au cours du glissement relatif. Le coefficient d'adhérence est alors généralement compris entre 0.3 et 0.05 mais peut atteindre des valeurs plus basses.

Le point C, dit **point critique**, correspond à la valeur critique  $Z_c$  du coefficient  $Z$  pour laquelle le coefficient de frottement passe par un minimum  $f_m$  dont l'ordre de grandeur peut aller de quelques centièmes à des valeurs aussi basses que quelques millièmes.

Classiquement les frottements mixtes se modélisent ainsi:

$$F = \alpha f_L + (1 - \alpha) f_H \quad \text{Eq. n°14}$$

où  $f_L$  est le coefficient d'adhérence limite,  $f_H$  le coefficient d'adhérence hydrodynamique et  $\alpha$  est le coefficient de répartition qui est obtenu statistiquement car son évolution n'est pas linéaire à l'épaisseur du film.[5]

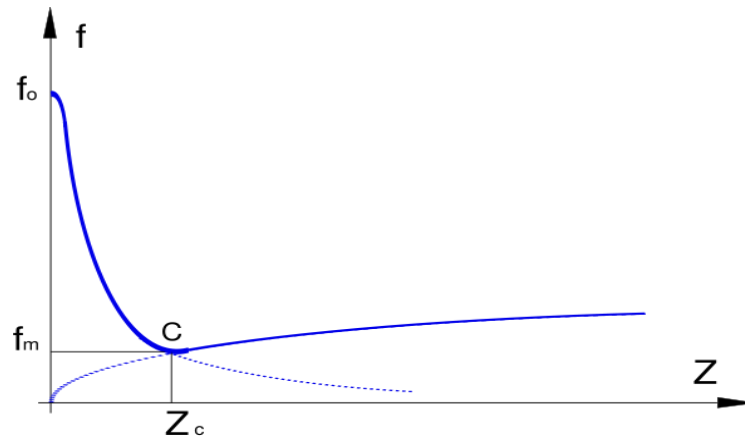
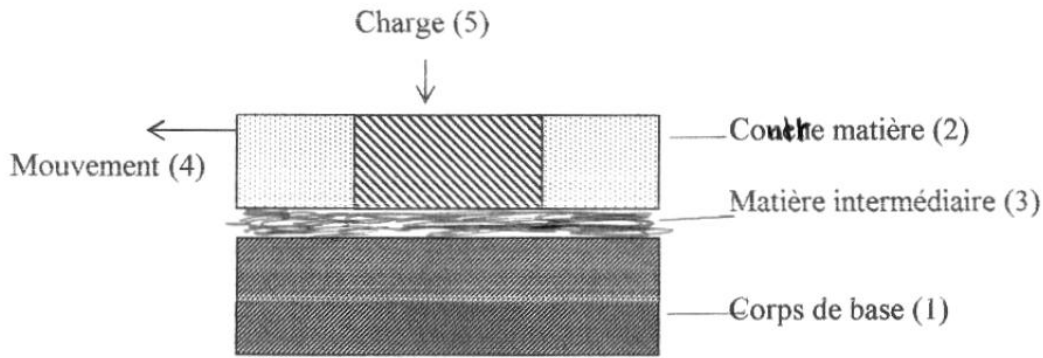


Fig.17 Courbe de Stribeck

### II.3.3 Usure due aux frottement entre corps solides

Le frottement entre corps solides, dissipe de l'énergie et use les surfaces en contact. . Actuellement il n'existe aucune relation claire entre le coefficient de frottement déterminé expérimentalement et la tenue à l'usure. Le processus d'usure peut, en effet, être introduit si seulement les cinq éléments de base, désignés ci-dessous, agissent l'un avec l'autre (fig. 18).



(fig. 18 : éléments de base le processus d'usure)

**1. Le corps de base** : c'est un corps solide (corps de frottement) caractérisé par son type, la teneur en éléments alliés, la rugosité, la dureté de la surface, la profondeur de dureté, la résistance, la structure et la température.

**2. La contre-matière** : c'est un corps de frottement pouvant se présenter à l'état solide, liquide et gazeux. La contre matière solide est caractérisée par les mêmes caractéristiques que le corps de base, tandis que liquide et gazeux, sont caractérisés par le type, la pression, la température et les impuretés.

**3. Matière intermédiaire** : peut-être solide (corps d'usure), liquide (lubrifiant) et gazeux (air). Dans le cas de l'usure de corps de base métalliques sous l'action de matières minérales, il est important de différencier, si ces minéraux agissent comme contre-matière, comme c'est le cas de broyeur à mâchoire (concasseur) ou si ces minéraux agissent comme matière intermédiaire comme, par exemple dans le cas des points encrassés de paliers.

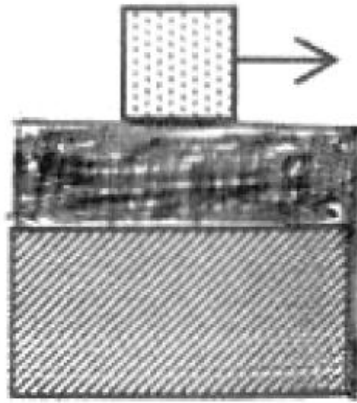
**4. La charge** : c'est un facteur important dont dépend le processus d'usure. La charge peut être constante, oscillante ou par chocs. Elle peut être uniforme ou non uniforme.

**5. Le mouvement** : on différencie généralement trois types de mouvement relatifs entre les forces en contact.

- Le glissement.
- Le roulement.
- Le frottement en petits débattements.[3]

**II.3.4 L'usure par glissement**

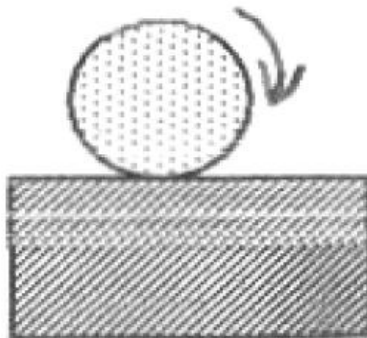
Elle se produit lorsque les surfaces de deux solides glissent l'une sur l'autre (fig. 19), qu'il y ait ou non de particules abrasives ou un lubrifiant entre elles. Ce type d'usure a fréquemment lieu dans les machines et les appareils dont certaines parties sont en mouvement. Dans un moteur à explosion, par exemple, le glissement des segments d'un piston sur la paroi du cylindre provoque une usure. Lorsque les effets chimiques prédominent, on parle d'usure-corrosion.[6]



(fig. 19 : deux solides glissent)

**II.4. L'usure par roulement**

Elle correspond au roulement d'une bille ou cylindre sur une surface solide (fig. 20), ce phénomène est responsable de la dégradation des paliers et roulements à billes de toutes sortes. Comme dans le cas précédent, on parle d'usure-corrosion, si les effets chimiques prédominent.[7]

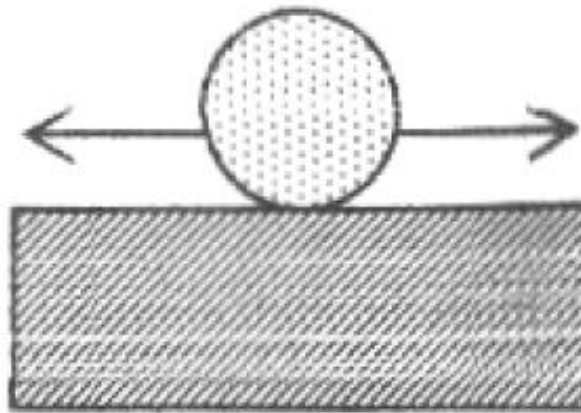


(fig. 20 : Une bille ou cylindre sur une surface solide )

## II.5 L'usure par frottement en petits débattements

Elle désigne une altération due à des mouvements alternatifs de hautes fréquences et de faibles amplitudes, (fig. 21). De tels mouvements proviennent notamment des vibrations émises par une machine ou une installation.

Il n'existe pas de limites bien définies entre l'usure par frottement en petits débattements et l'usure par glissement. Dans les deux cas, les surfaces glissent l'une sur l'autre. Cependant, lors du frottement en petits débattements, les débris d'usure ne sont pas évacués du contact. Ils peuvent donc agir comme abrasif. En plus la chaleur ne se dissipe que difficilement, et la déformation plastique des aspérités de surface subit une inversion à chaque demi-cycle, ce qui peut provoquer une dégradation par fatigue. Toutes ces différences peuvent influencer la vitesse d'usure.[6]



(fig. 21 : Une bille ou cylindre sur une surface solide )

La grande importance technique se trouve dans l'usure de glissement et de roulement.

## II.6. Vitesse d'usure

la vitesse d'usure  $v_W (m^3/m)$  est exprimée par le rapport de la dérivé du volume enlevé  $V_W$  sur celle de la distance de glissement  $L_{gl}$ .

$$v_W = \frac{dV_W}{dL_{gl}} \quad \text{Eq. n°15}$$

Selon la loi d'Archard,[ , établie de façon empirique, le volume de matière enlevée par usure  $V_W$  est proportionnel à la force normale  $F_N$  et la distance de glissement  $L_{gl}$ . De plus, il est inversement proportionnel à la dureté  $H$  du matériau.[3]

$$V_W = K_W \frac{F_N \cdot L \cdot g l}{H} \quad \text{Eq. n°16}$$

$K_W$  : coefficient d'usure.

Cette loi garde sa validité tant que les variations de températures dues aux frottements restent négligeables.[3]

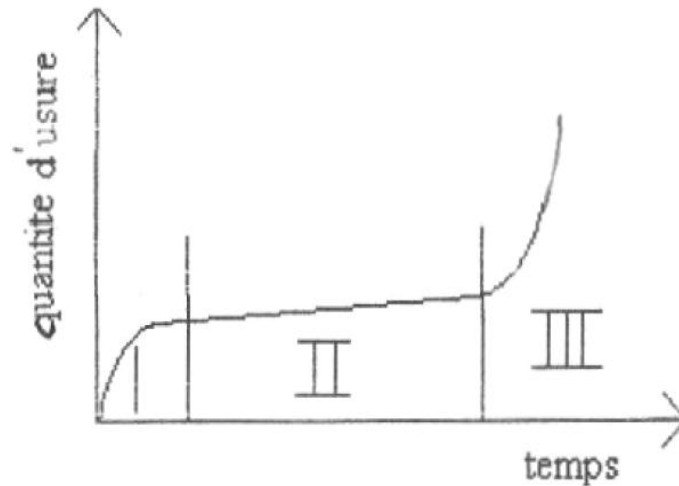
$$v_W = K_W \frac{F_N}{H} \quad \text{Eq. n°17}$$

Il existe des méthodes qui permettent de mesurer la vitesse d'usure en continu pendant l'essai, par exemple, en suivant le déplacement du crayon ou la quantité de matière enlevée, mais le plus souvent, on détermine le volume usé en fin d'essai seulement. En divisant par la durée de l'essai, on obtient alors la vitesse d'usure moyenne. Les mesures suivantes permettent de quantifier le volume usé.

- Pesage de l'échantillon usé.
- Déplacement du crayon par rapport à la surface de départ.
- Etendu de la zone usée (surface, section).
- Quantité de produit d'usure (par pesage, par analyse chimique du lubrifiant, à l'aide de traceurs radioactif etc.).[3]

La courbe d'usure ci-contre, (fig. 22) montre que dans le domaine I, se produit une diminution de la vitesse avec une augmentation de la quantité d'usure. Au début de cette phase, il y a inégalité des aspérités de surface, ce qui conduit au polissage de toute la surface. A la fin de cette phase débute la phase II ou la vitesse d'usure reste presque constante.

Dans le domaine III, il y a dégénération du processus d'usure, car la vitesse d'usure augmente exponentiellement, ce phénomène est désigné comme grippage et conduit, en un temps très court, à une incapacité de fonctionnement surtout dans le cas d'absence ou défaut de lubrification.



(fig. 22 : Courbe d'usure)

Dans le domaine III, il y a dégénération du processus d'usure, car la vitesse d'usure augmente exponentiellement, ce phénomène est désigné comme grippage et conduit, en un temps très court, à une incapacité de fonctionnement surtout dans le cas d'absence ou défaut de lubrification.

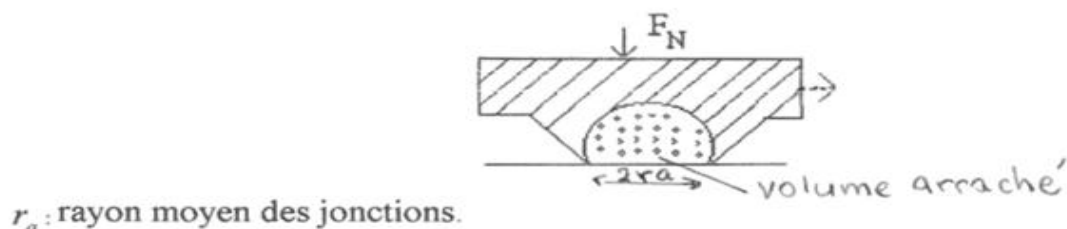
## II.7 Mécanismes d'usure

On distingue généralement quatre mécanismes d'usure.

- Adhésion, formation de jonctions adhésives puis arrachement de métal.
- Abrasion ou labourage par des aspérités ou des particules abrasives.
- Délaminage, croissance de fissures sous la surface suivie d'une rupture par fatigue.
- Oxydation ou enlèvement de matière oxydée

### II.7.1 Usure par adhésion

Les deux surfaces, en mouvement relatif, ne se louchent, qu'aux aspérités. Lorsqu'on applique une force normale  $F_N$ , les zones de contact subissent une déformation plastique, il se forme alors des micro-soudures, appelées jonctions adhésives, (frottement par adhésion).



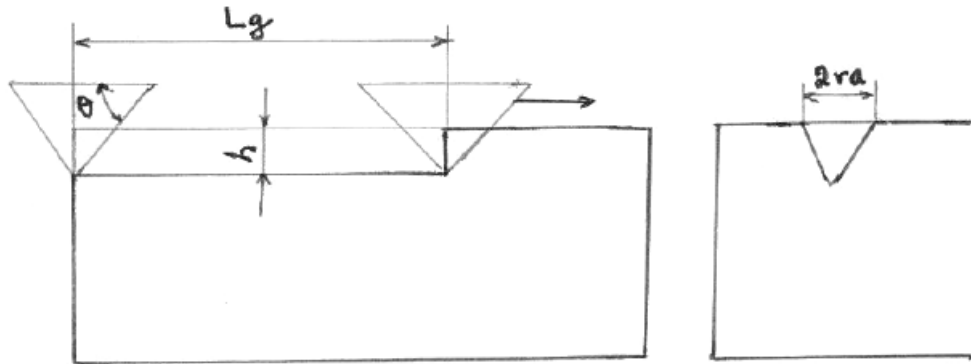
(Fig. 23 : frottement par adhésion)

### II.7.2 Usure par abrasion

Elle implique un déplacement de matière par labourage, autrement dit, une déformation plastique formant des bourrelets ou des copeaux. Parfois ceux-ci se cassent et constituent alors des particules d'usure. Ce mécanisme est important lorsqu'un matériau dur glisse sur un matériau relativement mou, notamment en présence d'abrasif.

Lors d'un polissage mécanique, l'abrasion à l'aide de poudres très fines (diamant), permet d'obtenir des surfaces métalliques lisses et brillantes. Les moteurs, engrenages et roulements à billes subissent, en service, une usure par abrasion souvent liée à la présence de particules d'usure durcies par ecrouissage ou oxydation. La formation de rainures démontre l'action de ces particules.

La figure 24 présente un modèle d'usure par abrasion où une aspérité conique en matériau dur se déplace sur une surface mole sous l'effet d'une force normale  $F_N$ , elle pénètre dans la dite surface, à une profondeur  $h$ .



(fig. 24 : modèle d'usure par abrasion )

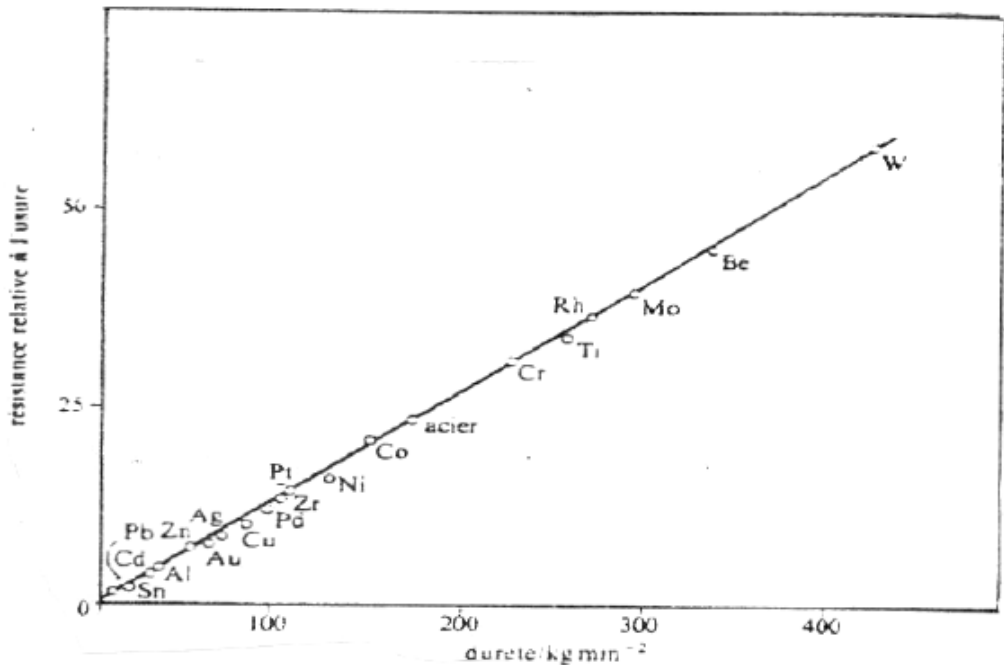
$h = r_a \cdot \tan \theta$ . Lorsque l'aspérité se déplace sur une distance  $L_{gl}$ , elle déplace un volume de :  $V_W = L_{gl} \cdot h \cdot r_a$

$$H = \frac{F_N}{A_r} = \frac{F_N}{\pi \cdot r_a^2} \Rightarrow r_a^2 = \frac{F_N}{\pi \cdot H} \quad \text{Eq. n°18}$$

Comme :  $h = r_a \cdot \tan \theta$ , donc  $V_W = L_{gl} \cdot h \cdot r_a = L_{gl} \cdot r_a^2 \cdot \tan \theta$

$$V_W = L_{gl} \frac{F_N}{\pi \cdot H} \tan \theta = \frac{\tan \theta}{\pi} \frac{F_N \cdot L_{gl}}{H} \Rightarrow \frac{\tan \theta}{\pi} = K_W \quad \text{Eq. n°19}$$

Dans ce modèle, le coefficient d'usure dépend surtout de l'angle d'attaque de l'abrasif. La vitesse d'usure d'abrasion est inversement proportionnelle à la dureté du matériau usé. L'équation ci-dessus, contient seulement la dureté du métal usé, celle de l'abrasif n'apparaît pas. La dureté de l'abrasif n'a pas d'importance lorsqu'elle est au moins 1,3 fois supérieure à celle du métal usé. La figure 25 montre l'influence de la dureté sur la résistance relative à l'usure de différents métaux.[3]

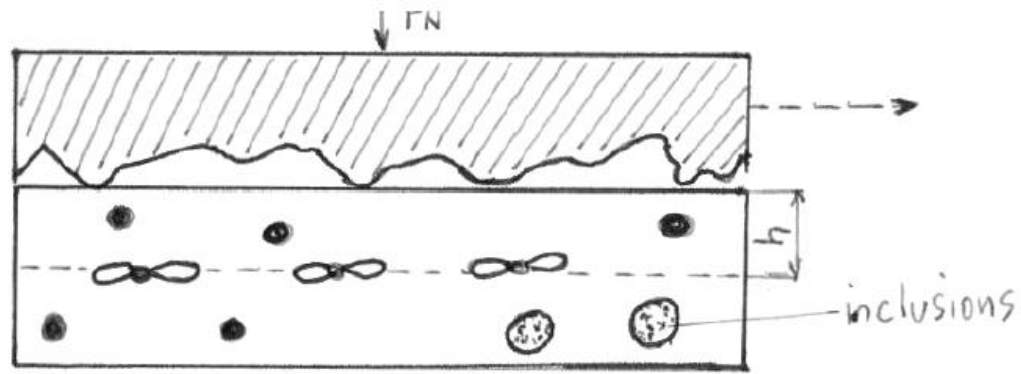


(fig. 25 : l'influence de la dureté sur la résistance relative à l'usure de différents métaux)

### II.7.3 Usure par délaminage

Sous certaines conditions, des fissures de fatigue se forment dans un plan parallèle à la surface de contact, à quelques micromètres de profondeurs. Dès qu'une telle fissure atteint une taille critique, une rupture donne naissance à une particule d'usure. Les fissures se forment en dessous de la surface de contact, car la contrainte de cisaillement  $\gamma$  est maximale.





(fig. 26 : une surface rugueuse et dure glisse sur un métal contenant )

Différents mécanismes peuvent contribuer à la création de fissures. Une hypothèse plausible, postule que les fissures partent de cavités qui se forment au voisinage d'inclusions non métalliques.

La figure 26 indique schématiquement ce modèle où une surface rugueuse et dure glisse sur un métal contenant des inclusions non métalliques rigides. Une distance moyenne  $\lambda$  sépare les aspérités avec l'échantillon mou, provoque un incrément de déformation  $\gamma_0$  par cisaillement.

Le cisaillement atteint un maximum dans un plan parallèle à la surface située à une profondeur  $h$ , du même ordre de grandeur (quelque micromètre) que la dimension des aspérités, donnée par leur rayon  $r_a$ .

Des fissures naissent aux cavités situées dans ce plan. Leur taille s'accroît à chaque cycle de déformation. Après un certain nombre de contacts  $n_{crit}$ , la surface occupée par les fissures dépasse une valeur critique. Une rupture a lieu et un volume de matière égal à  $A \cdot h$  se détache, représentant la surface géométrique. Au nombre critique de contacts correspond une distance parcourue  $n_{crit} \cdot \lambda$ .

La vitesse d'usure vaut ainsi :

$$v_W = \frac{dV_W}{dL_{gl}} \quad \text{Eq. n°20}$$

$$v_W = \frac{A \cdot h}{dL_{gl}} \quad \text{Eq. n°21}$$

Avec  $h \approx r_a$

$$v_W = \frac{A \cdot r_a}{n_{crit} \cdot \lambda} \quad \text{Eq. n°22}$$

$$\frac{1}{A_r} \approx \frac{\lambda}{r_a}$$

$A_r$  : surface réelle de contact.

$$v_W = \frac{A_r \cdot \lambda \cdot r_a}{n_{crit} \cdot \lambda \cdot r_a} = \frac{A_r}{n_{crit}} \quad \text{Eq. n°23}$$

Le volume enlevé correspond à :

$$H = \frac{F_N}{A_r} \Rightarrow A_r = \frac{F_N}{H} \Rightarrow V_W = \frac{1}{n_{crit}} \cdot \frac{F_N \cdot L_{gl}}{H} \quad \text{Eq. n°24}$$

$$K_W = \frac{1}{n_{crit}}$$

Le coefficient d'usure, dans ce cas, correspond donc à l'inverse du nombre critique de contact provoquant la rupture. La valeur de  $n_{crit}$ , dépend du nombre d'inclusions, donc de la micro structure du matériau.[3]

#### II.7.4 Usure par oxydation

L'usure par oxydation se produit en présence d'oxygène, lorsque le frottement provoque un échauffement important du contact. La température élevée accélère la croissance des couches d'oxyde. Quand celle-ci atteignent une épaisseur critique, des frottements s'en détachent sous l'effet de cisaillement, une nouvelle couche d'oxyde se forme alors sur la surface mise à nu et ainsi de suite. L'usure par oxydation est donc un enlèvement mécanique de matériau oxydé.[7]

Ce processus est décrit schématiquement par la figure 27. Une aspérité dure se déplace par rapport à une surface rugueuse recouverte d'une couche d'oxyde. Le frottement détache l'oxyde au lieu de contact.



(fig. 27 : Une aspérité dure se déplace par rapport à une surface)

Pour estimer la vitesse d'usure, on admet que la croissance de l'oxyde suite une loi parabolique :

$$L^2 = K_p \cdot t \quad \text{Eq. n°25}$$

$L$  : Épaisseur d'oxyde.

$t$  : le temps.

$K_p$  : Constante d'oxydation parabolique.

La couche atteint une épaisseur critique  $L_{crit}$  après un temps  $t_{crit}$

$$t_{crit} = \frac{L_{crit}^2}{K_p} \quad \text{Eq. n°26}$$

Au temps  $t_{crit}$  on a une longueur parcourue de :

$$l_{crit} = t_{crit} \cdot v_{gl}$$

Un volume d'oxyde  $A_t \cdot L_{crit}$  se détache de la surface.

$v_{gl}$  : vitesse de glissement

$A_t$  : surface réelle de contact.

$$v_W = \frac{dV_W}{dL_{gl}} \approx \frac{A_t \cdot L_{crit}}{t_{crit} \cdot v_{gl}} \quad \text{Eq. n°27}$$

En posant

$$K_{crit} = \frac{L_{crit}^2}{K_p}$$

$$A_t = \frac{F_N}{H}$$

$$v_W = \frac{F_N L_{crit} K_p}{H v_{gl} L_{crit}^2} = \frac{K_p F_N}{v_{gl} L_{crit} H} \quad \text{Eq. n°28}$$

$$K_W = \frac{K_p}{v_{gl} L_{crit}} \quad \text{Eq. n°29}$$

Le coefficient d'usure dépend donc de la vitesse de glissement  $v_{gl}$ , et de la constante d'oxydation  $K_p$ . [3]