

7. USURE ET PROPRIETES DES MATERIAUX

7.1. Introduction

En technologie, on différencie entre l'usure morale et l'usure physique. On caractérise les machines, appareils, équipements, etc., comme usure morale, si elles sont posées extérieurement des ateliers de fabrication, elles peuvent être encore fonctionnelles à cause :

- Du développement technique, et par suite, elles seront remplacées.
- De manque de productivité.
- Par manque de maintenance technique.

L'usure physique dans le sens technique, est défini comme un processus caractérisé par une attaque mécanique, en première ligne par un frottement conduisant à une perte progressive de matière en surface d'un corps solide par séparation de petites particules, donc c'est un changement de forme non voulue de la surface.

L'usure peut avoir lieu dans un mouvement relatif entre un objet et son milieu gazeux liquide ou solide. Le plus souvent l'usure est accompagnée par des phénomènes de corrosion où ces derniers ne sont pas clairs à séparer de l'usure. Même les connaissances et résultats obtenus pour les phénomènes d'usure n'ont pas une validité générale pour simplifier le danger de ce phénomène.

Les pertes occasionnées par l'usure dans l'industrie mondiale s'élèvent annuellement à plusieurs millions de tonnes de métaux. A cause de l'usure, beaucoup de machines et équipements sont remplacés, le plus souvent, avec d'énormes dépenses. Par exemple, aux Etats Unis, on estime ces pertes à 2,3 kg d'acier pour chaque tonne de minerais traitée.

Il n'est pas possible d'indiquer par l'intermédiaire d'une certaine valeur caractéristique la tenue à l'usure d'un métal vis-à-vis des différentes contraintes ou sollicitations d'usure. L'utilisation économique d'un métal est défini seulement par les différents essais d'usure et pour des sollicitations bien déterminées.

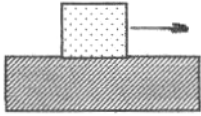
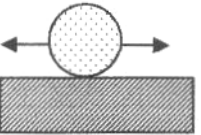
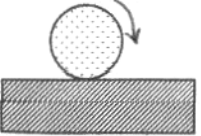
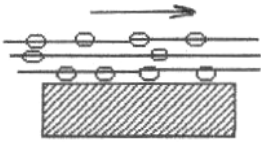
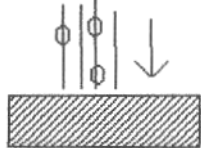
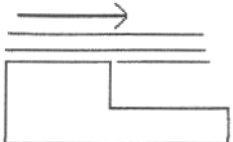
Une analyse du processus indique que la tenue à l'usure ou le phénomène d'usure sont influencés par :

- Les métaux accouplés.
- La rugosité des couches limites (surface, lubrification).
- Le type de mouvement (glissement, roulement, écoulement, chocs, etc.).
- La vitesse du mouvement.
- L'enlèvement des particules solides.

Les principaux types d'usure 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 :

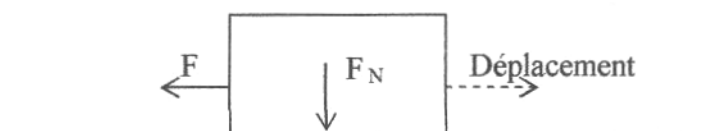
- L'usure due aux frottements entre corps solides.
- L'usure due aux impacts et aux fluides (érosion)

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

7.2. Le frottement

7.2.1. 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, (fig. 62).



(fig. 62)

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.

$$F = f \cdot F_N$$

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

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

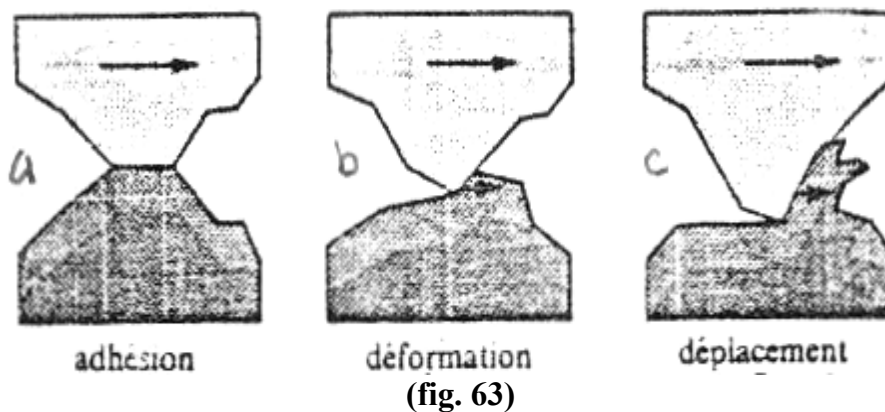
Dans les systèmes à mouvement, on cherche le plus souvent à minimiser les frottements, pour cela, on utilise normalement des lubrifiants. Ces derniers permettent de réduire le coefficient de frottement jusqu'à des valeurs inférieures à 0,1.

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

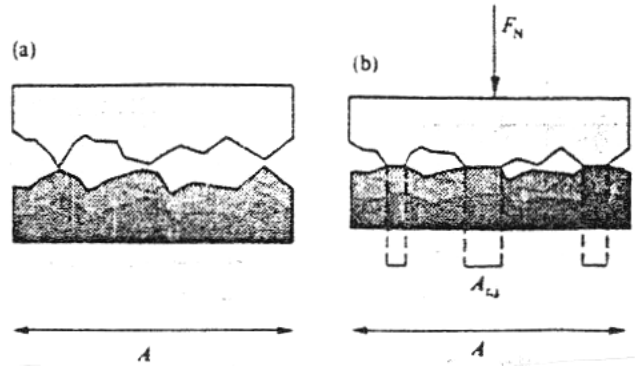
Trois phénomènes physiques bien distincts, provoquent des pertes d'énergie lors du frottement entre deux solides rugueux et influencent aussi sur la valeur du coefficient de frottement.

- Formation et rupture des jonctions d'adhésion aux lieux de contact (fig. 63 a).
- Déformation élasto-plastique des aspérités (fig. 63 b).
- Déplacement de matière par labourage (fig. 63 c)



7.2.1.1. Formation et rupture des jonctions d'adhésion

La figure 64 représente le contact entre deux surfaces rugueuses de métaux ductiles.



(fig. 64)

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.

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

Généralement A_i 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 :

$$P_{asp} = \frac{F_N}{A_r}$$

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 densité correspond à un mécanisme similaire.

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

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

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

$$\tau = \frac{F}{A_r}$$

A partir des équations :

$$F = f \cdot F_N \quad \text{et} \quad \frac{F_N}{A_r} = \frac{F}{A_r}$$

On obtient une nouvelle expression pour le coefficient de frottement :

$$A_r = \frac{F_N}{H} = \frac{F}{\tau} \implies \frac{\tau}{H} = \frac{F}{F_N} = \frac{F_N \cdot f}{F_N} \implies f = \frac{\tau}{H} = \frac{F}{F_N}$$

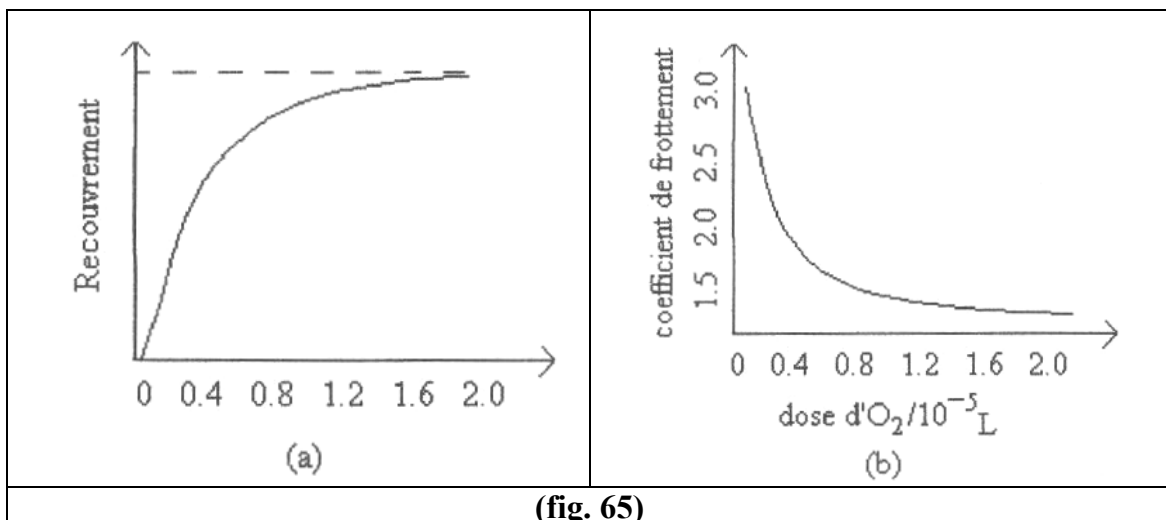
τ : Résistance au cisaillement du moins dur des deux matériaux formant la jonction.
H : sa dureté.

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 τ / H et non pas des quantités prises séparément, or ce rapport ne varie que peu entre différents métaux.

Cependant d'autres observations ne concordent pas avec la théorie décrite ci-dessus. Tout d'abord l'expression τ / 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 ou les couches d'oxyde superficielles empêchent la formation des liaisons métal-métal entre les surfaces de contact.

La résistance au cisaillement des jonctions se rapporte donc au contact entre deux surfaces oxydées contenant en plus, différentes espèces adsorbées, plutôt qu'aux jonctions métal-métal. La valeur de la résistance au cisaillement τ et par conséquent, celle du coefficient de frottement, dépendent de l'état chimique de la surface. La figure 65 a montre la variation du recouvrement de la surface en fonction de la dose d'O₂, et la figure 65 b montre l'influence de l'O₂ adsorbé sur le coefficient de frottement entre deux surfaces de Tungstène.



(fig. 65)

Les graphes (fig. 65), montrent que la présence d'oxygène absorbé modifie le coefficient de frottement entre deux surfaces de Tungstène. En l'absence d'oxygène sous

condition d'ultravide, le coefficient de frottement vaut approximativement $f = 3$ et dès qu'on introduit de l'oxygène dans le système, le coefficient de frottement diminue fortement. Il atteint une valeur constante avant même que toute la surface soit recouverte d'oxygène.

7.2.1.2. 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 63 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.

7.2.1.3. 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 :

$$f = f_{ad} + f_{def} + f_{pl}$$

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.

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.

7.2.1.4. 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 ($J/m^2 \text{ s}$) 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 .

$$Q_f = \frac{f \cdot F_N \cdot v}{A}$$

A 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 :

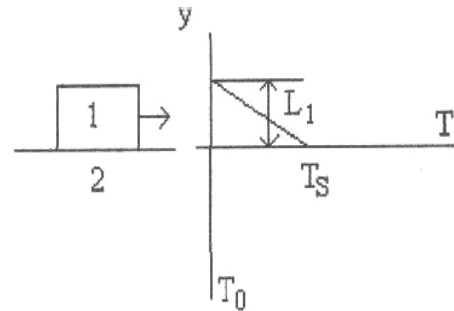
$$Q_1 \approx K_1 \frac{T_S - T_0}{L_1}$$

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 θ_1 de la chaleur totale Q_f dissipée.

$$Q_1 = \theta_1 \cdot Q_f$$

$$k_1 = \frac{T_S - T_0}{L_1} = \frac{\theta_1 f F_N v}{A}$$

$$T_S = T_0 + \frac{\theta_1 f F_N v L_1}{k_1 A}$$

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 θ_1 , dépend du rapport des conductivités thermiques des matériaux en contact, pour des matériaux identiques $\theta_1 \approx 0,5$.

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.

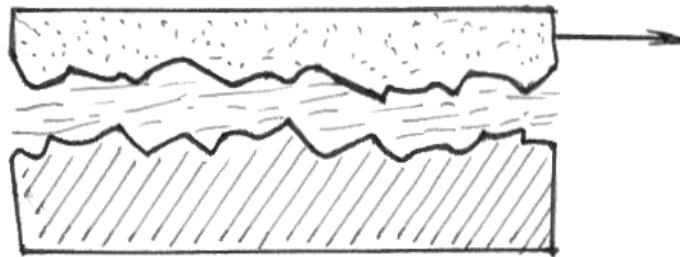
En raison de leur rugosité, les surfaces ne se touchent généralement qu'aux aspérités. Lorsqu'un mouvement relatif les anime, le contact entre deux aspérités n'a lieu qu'un court instant, cependant, la pression de contact devient très élevée. Une quantité importante d'énergie mécanique se transforme alors en chaleur, ce qui augmente localement la température temporairement. La température à la surface d'une aspérité peut aussi dépasser de beaucoup la température moyenne T_s , on parle alors d'une pointe de température. Ces pointes de température modifient localement les propriétés du matériau et accélèrent les réactions chimiques.

7.2.2. 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 trois régimes de lubrification :

- Hydrodynamique.
- Mixte.
- Limite.

7.2.2.1. Le régime de lubrification hydrodynamique



(fig. 66)

Appelé aussi élastohydrodynamique 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.

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

7.2.2.2. Régime de lubrification mixte

Si la force normale augmente, ou si la viscosité du lubrifiant devient insuffisante, le contact entre dans un régime de lubrification mixte. Le film liquide possède alors une épaisseur comparable à la rugosité moyenne de la surface et certaines aspérités entrent en

(fig. 69)

Le diagramme de Stribeck indique la variation de f en fonction de S pour les trois régimes de lubrification. Dans le régime de lubrification mixte, f prend le minimum.

Pour des valeurs de S , faibles correspondants au régime de lubrification limite, le coefficient de frottement f augmente rapidement, par contre dans le régime de lubrification hydrodynamique, le coefficient de frottement suit la relation :

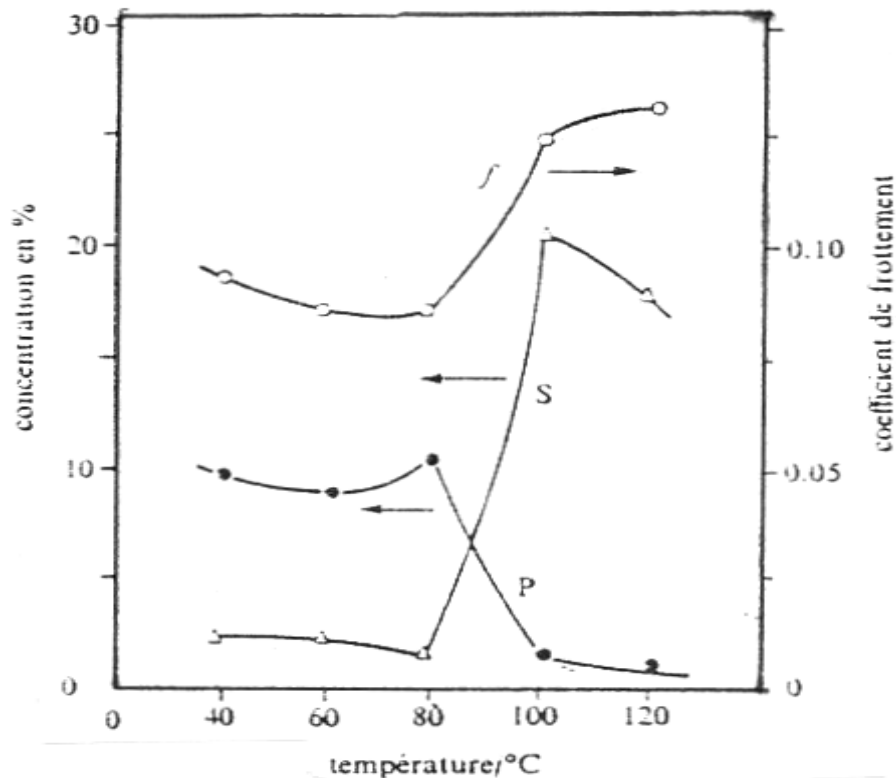
$$F = k_f \cdot S^n$$

K : facteur de proportionnalité.

n : coefficient variant de 0,5 à 1.

L'utilisation d'huiles lubrifiantes contenant des additifs, permet de diminuer le frottement et l'usure. La plupart des additifs agissent dans le régime de lubrification mixte. Grâce à leurs réactions chimiques avec les surfaces métalliques, ils forment des couches superficielles minces (10 à 20 μm), qui évitent que les métaux ne se touchent aux points de contact et forment une liaison chimique. En plus, la présence des additifs empêchent une oxydation de la surface. Les couches formées par les additifs ont en quelque sorte le même effet qu'un film extrêmement mince de lubrifiant solide.

Les additifs utilisés sont dits anti-frottements ou anti-usures et correspondent, généralement, à des groupes d'esters phosphoriques ou de sulfure. La figure 70 représente la variation de coefficient de frottement d'un contact lubrifié avec la température en présence d'un additif et d'une concentration en % de phosphore (P) et de soufre (S) mesurés par spectroscopie Auger à une profondeur de 4,3 μm de la surface.

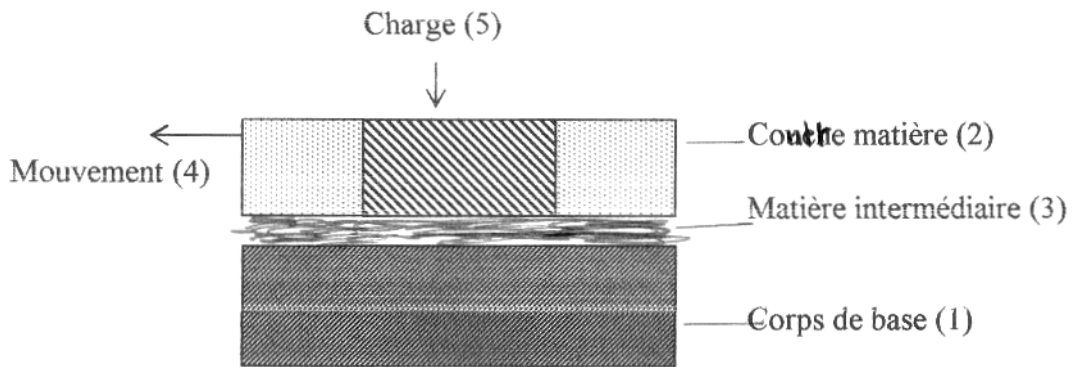


(fig. 70)

L'influence du P, S et de la température sur le coefficient de frottement est illustrée par la figure 70. L'augmentation de la température réduit progressivement la viscosité du lubrifiant. Le coefficient de frottement diminue par conséquent jusqu'à ce que le film superficiel ne sépare plus les métaux. On observe alors une brusque augmentation du coefficient de frottement à 80°C.

7.4. Usure due aux frottement entre corps solides

Le frottement entre corps solides, dissipe de l'énergie et use les surfaces en contact. L'étude de ces phénomènes appartient au domaine de la tribologie qui étudie les aspects scientifiques et technologiques liés au frottement, à la lubrification et à l'usure des matériaux. 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. 71).



(fig. 71)

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.

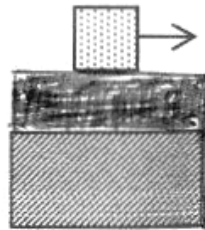
5. Le mouvement : on différencie généralement trois types de mouvement relatifs entre les forces en contact.

- Le glissement.
- Le roulement.
- Le frottement en petits débattements.

Comme la charge et le mouvement sont liés, l'un avec l'autre, on peut citer l'exemple suivant. Dans les chaînes des auto-chenilles ou excavateurs, l'on se pose la question, si on doit choisir des boulons avec un grand ou petit diamètre afin d'éviter une grande usure entre les boulons et les maillons de la chaîne. Si on considère la charge appliquée, on doit choisir un grand diamètre, afin de maintenir la pression de la surface petite, mais des essais pratiques ont démontrés qu'avec l'utilisation d'un grand diamètre l'usure est très grande à cause de la distance de glissement qui est grande. Dans ce cas l'influence du mouvement prédomine sur l'influence de la charge.

7.4.1. L'usure par glissement

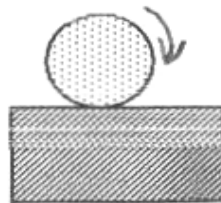
Elle se produit lorsque les surfaces de deux solides glissent l'une sur l'autre (fig. 72), qu'il y ait ou non de particules abrasives ou un lubrifiant entre elles. Ce type d'usure a fréquemment lieu dans les machines et les appareils dont certaines parties sont en mouvement. Dans un moteur à explosion, 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.



(fig. 72)

7.4.2. L'usure par roulement

Elle correspond au roulement d'une bille ou cylindre sur une surface solide (fig. 73), 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.



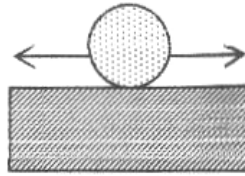
(fig. 73)

7.4.3. L'usure par frottement en petits débattements

Elle désigne une altération due à des mouvements alternatifs de hautes fréquences et de faibles amplitudes, (fig. 74). 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, justifiant ainsi la distinction entre l'usure par glissement et l'usure par frottement en petits débattements. Si les effets chimiques sont

importants, on parle de corrosion-frottement.



(fig. 74)

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

7.5. Procédés d'examen de l'usure

Le principal but de l'exécution des essais d'usure en laboratoire ou avec des machines d'essai d'usure, consiste en la détermination de la quantité d'usure, qui donne des indications quantitatives sur le changement de la forme et de la masse d'un corps ayant subi le phénomène d'usure.

Les termes usures et quantité d'usure sont utilisés avec le même sens, à cet effet, on doit différencier entre l'usure (processus) et quantité d'usure (résultat). La quantité d'usure peut être déterminée directement ou indirectement.

Dans la méthodes directe, on peut avoir :

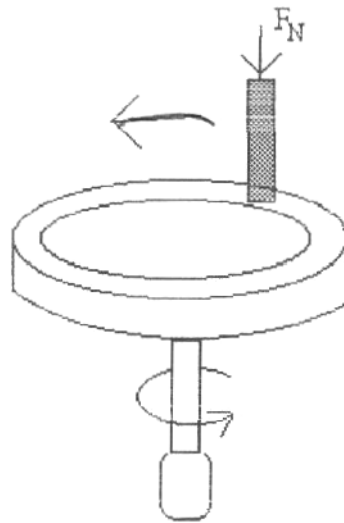
- La détermination de la quantité d'usure absolue linéaire Δl (μm , mm).
- La détermination de la quantité d'usure absolue volumétrique ΔV (μm^3 , mm^3 ou cm^3).
- La détermination de la quantité d'usure absolue massive (mg , g , ...).

A partir de ces valeurs caractéristiques de l'usure, on peut encore calculer la vitesse d'usure linéaire ($\mu\text{m}/\text{h}$), la quantité d'usure linéaire spéciale (mm/kg) et le rapport de quantité d'usure linéaire (%).

Comme valeurs caractéristiques indirectes, peuvent être déterminées la durée de vie totale ou d'usure (heures), la quantité d'apport d'usure (kg , m^3) ou encore, des grandeurs mesurées indirectement, par exemple la température.

Les résultats des essais d'usure ne peuvent pas être généralisés à cause de l'influence des différents facteurs sur l'usure. Il existe un grand nombre d'essais d'usure, mais ils correspondent généralement, à des situations spécifiques et présentent un caractère fortement empirique. La comptabilité entre les différents résultats reste, de ce fait, limitée.

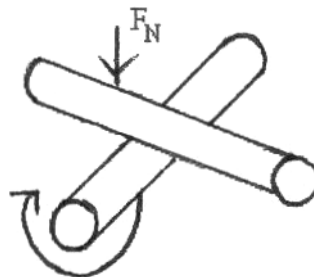
a. L'essai au crayon sur disque :



(fig. 75)

Cet essai comprend un disque tournant sur lequel s'applique un crayon ou une bille fixe avec une force constante. La force normale appliquée et le moment angulaire nécessaire à la rotation du disque permettent d'obtenir le coefficient de frottement comme le montre la figure 75.

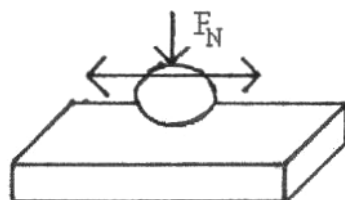
b. L'essai à cylindres croisés :



(fig. 76)

Deux cylindres perpendiculaires sont utilisés, l'un fixe et l'autre en rotation. Comme précédemment, la force normale et le mouvement angulaire renseignent sur le coefficient de frottement.

c. L'essai à mouvement alternatif :

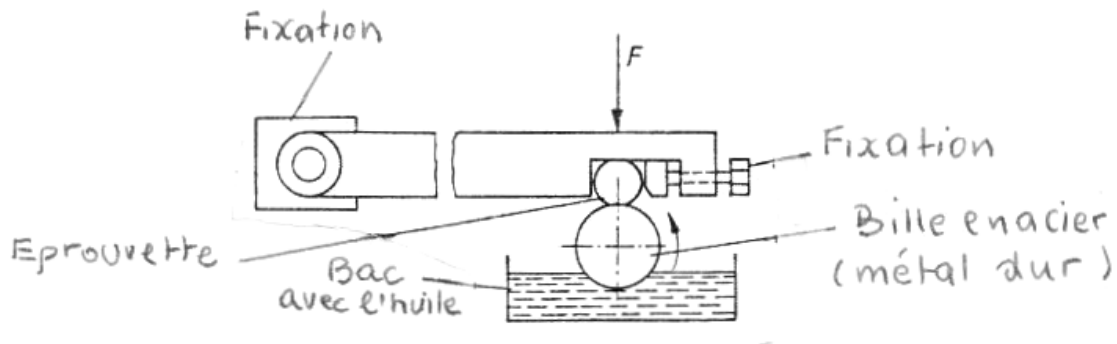


(fig. 77)

Cet essai correspond à un mouvement de va et vient d'une bille ou d'un crayon sur une plaque fixe. La force normale et la force tangentielle permettent alors de calculer le coefficient de frottement.

7.5.1. Essai d'usure de glissement

Avec l'appareil, ci-dessous (fig. 78), on peut déterminer l'usure de glissement avec ou sans lubrifiant.



(fig. 78)

La charge et la vitesse de glissement peuvent être variés. La quantité d'usure peut être déterminée soit par :

- L'utilisation d'une entaille (empreinte de diamant, calotte sphérique). Durant ou après l'essai, on peut déterminer la quantité d'usure à partir de la diminution du diamètre de la calotte sphérique.
- Détermination de la profondeur ou largeur du sillon formé.
- Détermination de la perte de masse.

7.5.2. Vitesse d'usure

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

$$v_w = \frac{dV_w}{dL_{gl}}$$

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.

$$V_w = K_w \frac{F_N \cdot L_{gl}}{H}$$

K_w : coefficient d'usure.

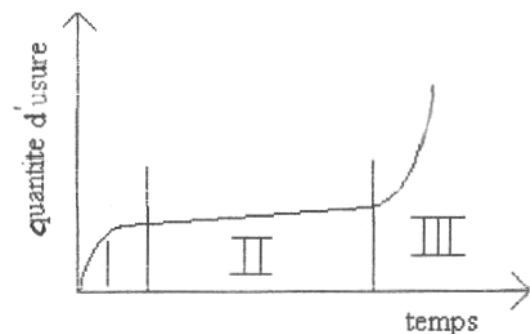
Cette loi garde sa validité tant que les variations de températures dues aux frottements restent négligeables.

$$v_w = K_w \frac{F_N}{H}$$

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.).

La courbe d'usure ci-contre, (fig. 79) 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.



Courbe d'usure
(fig. 39)

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.

7.5.3. Mécanismes d'usure

On distingue généralement quatre mécanismes d'usure.

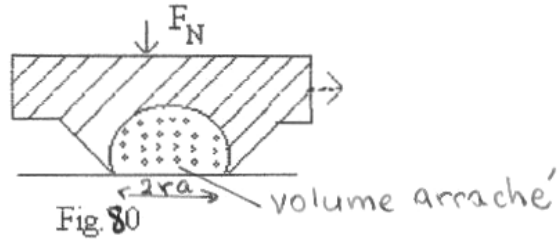
- Adhésion, formation de jonctions adhésives puis arrachement de métal.
- Abrasion ou labourage par des aspérités ou des particules abrasives.
- Délaminage, croissance de fissures sous la surface suivie d'une rupture par fatigue.
- Oxydation ou enlèvement de matière oxydée

7.5.3.1. 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).

S'il existe à chaque instant, n_j jonctions de surface identique, la vraie surface vaut :

$$A_r = n_j \cdot \Pi \cdot r_a^2$$



r_a : rayon moyen des jonctions.

Avec une approximation, on peut relier A_r , à H .

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

Le nombre de jonctions correspond donc à :

$$n_j = \frac{F_N}{H \cdot \Pi \cdot r_a^2}$$

La durée de vie t_j d'une jonction s'élève à ::

$$t_j = 2 \frac{r_a}{v_{gl}}$$

v_{gl} : vitesse de glissement.

Le nombre de jonctions formées par mètre parcouru :

$$N_1 = \frac{n_j}{2 \cdot r_a} = \frac{n_j}{t_j \cdot v_{gl}}$$

Certaines jonctions peuvent, toutefois, se défaire sans qu'il ne reste d'effet permanent, ainsi, seule une fraction des jonctions, conduit à l'arrachement de particules d'usure.

Le paramètre K_{WA} désigne la probabilité qu'une jonction donne naissance à une particule d'usure. Pour simplifier, on suppose que le volume arraché équivaut à une hémisphère de rayon r_a .

La vitesse d'usure v_w s'obtient en multipliant le nombre de jonctions avec leur volume et avec K_{WA} .

$$v_w = K_{WA} \cdot N_j \frac{4 \cdot \Pi \cdot r_a^3}{6}$$

En substituant N_j par $n_j / 2 r_a$.

$$v_w = \frac{n_j}{2 r_a} \frac{4 \cdot \Pi \cdot r_a^3}{6} = \frac{n_j \cdot r_a^2 \cdot \Pi}{3}$$

$$v_w = \frac{2 r_a \cdot \frac{F_N \cdot L_{gl}}{3}}{dL_{gl}}$$

En intégrant l'expression :

$$dV_w = v_w \cdot dL_{gl}$$

$$V_w = \frac{K_{WA}}{3} \cdot \frac{F_N \cdot L_{gl}}{H}$$

Avec :

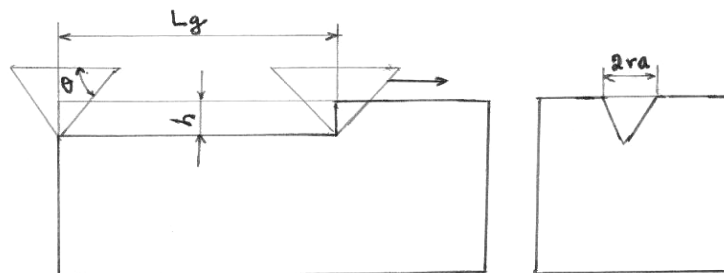
$$\frac{K_{WA}}{3} = K_w$$

7.5.3.2. 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 écrouissage ou oxydation. La formation de rainures démontre l'action de ces particules.

La figure 81 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. 81)

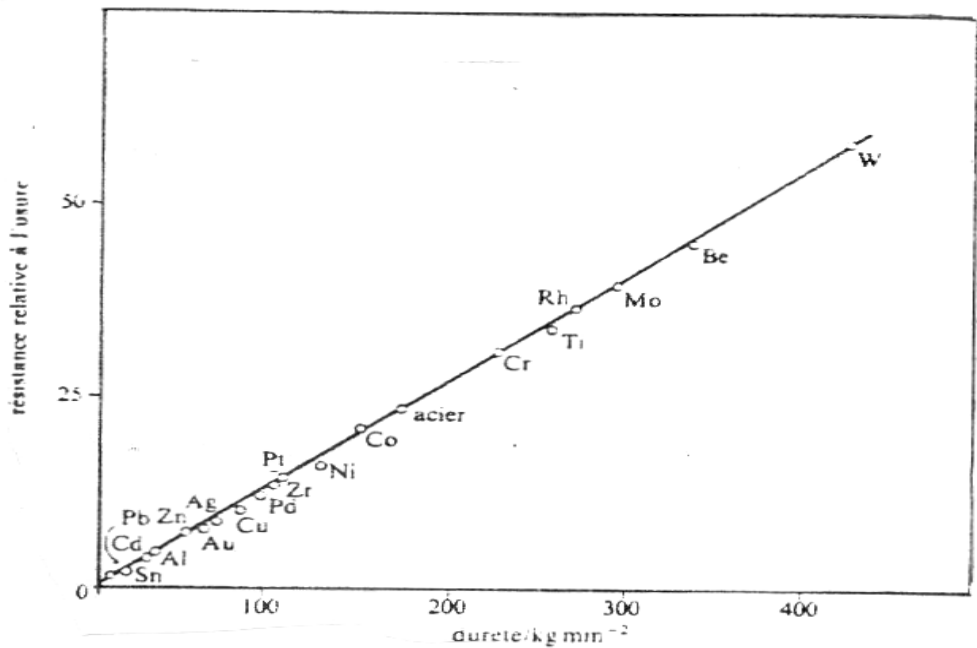
$h = r \cdot \tan \theta$. Lorsque l'aspérité se déplace sur une distance L_{gl} , elle déplace un volume de : $V_w = L_{gl} \cdot h \cdot \pi \cdot r_a$

$$H = \frac{F_N}{A_r} = \frac{F_N}{\pi \cdot r_a^2} \Rightarrow r_a^2 = \frac{F_N}{\pi \cdot H}$$

Comme : $h = r_a \cdot \text{tg } \theta$, donc $V_M = L_{gl} \cdot h \cdot r_a = L_{gl} \cdot r_a^2 \cdot \text{tg } \theta$

$$V_M = L_{gl} \frac{F_N}{\Pi \cdot H} \text{tg } \theta = \frac{\text{tg } \theta}{\Pi} \cdot \frac{F_N \cdot L_{gl}}{H} \Rightarrow \frac{\text{tg } \theta}{\Pi} = K_w$$

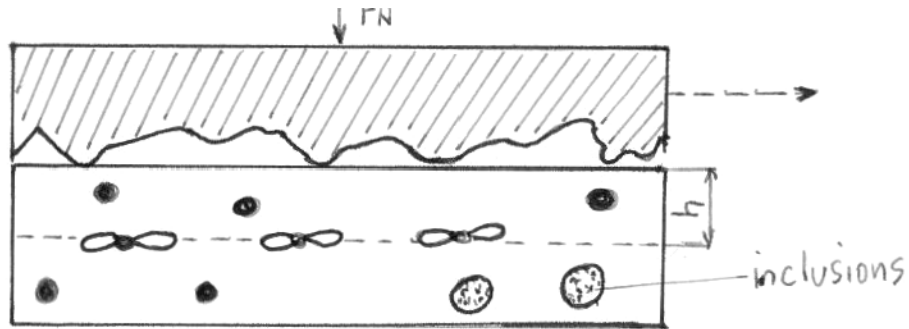
Dans ce modèle, le coefficient d'usure dépend surtout de l'angle d'attaque de l'abrasif. La vitesse d'usure d'abrasion est inversement proportionnelle à la dureté du matériau usé. L'équation ci-dessus, contient seulement la dureté du métal usé, celle de l'abrasif n'apparaît pas. La dureté de l'abrasif n'a pas d'importance lorsqu'elle est au moins 1,3 fois supérieure à celle du métal usé. La figure 82 montre l'influence de la dureté sur la résistance relative à l'usure de différents métaux.



(fig. 82)

7.5.3.3. 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 τ est maximale.



(fig. 83)

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 83 indique schématiquement ce modèle où une surface rugueuse et dure glisse sur un métal contenant des inclusions non métalliques rigides. Une distance moyenne λ sépare les aspérités avec l'échantillon mou, provoque un incrément de déformation y_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 (quelques micromètres) 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 :

$$v_w = \frac{dV_w}{dL_{gl}}$$

$$v_w = \frac{A \cdot h}{n_{crit} \cdot \lambda}$$

Avec $h \approx r_a$

$$v_w = \frac{A \cdot r_a}{n_{crit} \cdot \lambda}$$

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

A_r : surface réelle de contact.

$$v_w = \frac{A_r \cdot \lambda \cdot r_a}{n_{crit} \cdot \lambda \cdot r_a} = \frac{A_r}{n_{crit}}$$

Le volume enlevé correspond à : $V_M = v_W \cdot L_{gl}$

$$H = \frac{F_N}{A_r} \Rightarrow A_r = \frac{F_N}{H} \Rightarrow V_W = \frac{1}{N c_{crit}} \cdot \frac{F_N \cdot L_{gl}}{H}$$

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

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.

7.5.3.4. 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 celles-ci atteignent une épaisseur critique, des frottement 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.

Ce processus est décrit schématiquement par la figure 84. 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. 84)

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

$$L^2 = K_p \cdot t$$

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} .

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

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.

$$v_w = \frac{dV_w}{dL_{gl}} \approx \frac{A_t \cdot L_{crit}}{t_{crit} \cdot v_{gl}}$$

En posant :

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

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

$$v_w = \frac{F_N L_{crit} K_p}{H v_{gl} L_{crit}^2} = \frac{K_p F_N}{v_{gl} L_{crit} H}$$

$$K_w = \frac{K_p}{v_{gl} L_{crit}}$$

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

7.6. Grippage

Les conditions d'usure et de frottement déjà envisagées, sont des conditions normales. Cependant, il existe des conditions d'usure catastrophiques qui provoquent une destruction rapide du contact. La transition se manifeste normalement par une augmentation brusque du coefficient de frottement. Ce phénomène est appelé grippage.

Dans la plupart des cas, le grippage apparaît après une certaine durée de service seulement car l'usure dégrade peu à peu le contact, augmentant progressivement le frottement. Dès que la dégradation du contact atteint une valeur critique, il y a grippage, c'est à dire, formation de jonctions soudées de section importante entre les matériaux de contact.

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

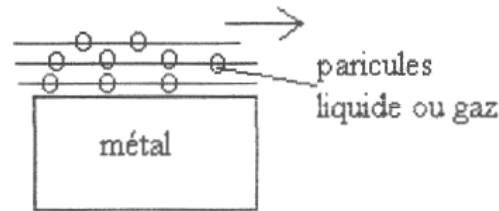
7.7. Usure due aux impacts et aux fluides

L'écoulement turbulent, parallèle à une paroi, d'un fluide contenant ou non des particules en suspension, ou l'impact d'un jet de liquide, de gouttelettes ou de particules entraînées par un gaz, peut provoquer, le plus souvent, une usure par érosion. La corrosion s'ajoute généralement, à ce type d'altération. On distingue trois phénomènes d'usure dues aux impacts et aux fluides, notamment par :

- Erosion.
- Cavitation.
- Impact

7.7.1. Usure par érosion

Elle correspond à une dégradation de la surface sous l'effet d'impacts de particules, de gouttelettes, d'un jet ou de l'action d'un écoulement turbulent, (fig. 85).



(fig. 85)

Les particules solides entraînées par un liquide ou un gaz et qui heurtent la surface provoquent une usure par érosion. Elle est normalement due à des particules solides, entraînées par un liquide ou un gaz, qui heurtent la surface.

Le sablage, méthode de nettoyage de surfaces métalliques avant l'application d'une peinture représente un cas particulier où l'érosion provoquée devient une fonction utile. L'action simultanée de la corrosion et de l'usure par érosion porte le nom de corrosion-érosion. Ainsi à la sortie des fours d'incinération de déchets, par exemple, l'usure due aux particules de cendres entraînées par les gaz de combustion, accélère la corrosion. Autre exemple, lorsque l'écoulement de l'eau dans un tuyau en cuivre dépasse une vitesse critique, on observe une forte accélération de la corrosion. Dans ce cas un phénomène de corrosion-érosion se produit même en l'absence de particules, par la seule action mécanique du fluide sur la paroi.

7.7.2. Corrosion-érosion due à l'écoulement turbulent d'un fluide

Certains métaux se corrodent beaucoup plus rapidement en présence d'un fluide, dont la vitesse d'écoulement turbulent dépasse une valeur critique. La corrosion-érosion se manifeste notamment dans les systèmes d'eau chaude, en cuivre, mal dimensionnés et dans les condenseurs en alliage de cuivre.

L'écoulement d'un fluide provoque une contrainte de cisaillement τ_0 , sur la paroi.

$$\tau_0 = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot f'$$

ρ : densité du fluide.

v : vitesse moyenne dans le direction de l'écoulement.

f' : coefficient de frottement additionnel représentant le rapport entre la force de frottement F agissant sur la surface A et l'énergie cinétique du fluide par unité de volume.

$$E_{\text{Kin}} = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2$$

$$f' = \frac{F.I.A}{E_{\text{Kin}}}$$

f' dépend de la vitesse d'écoulement du fluide, de la rugosité des parois et de la géométrie de l'installation. Selon la relation :

$$\tau_0 = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot f'$$

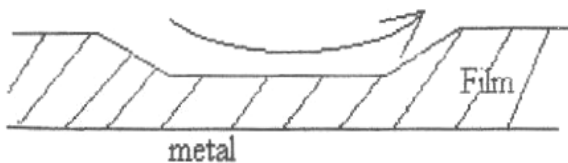
La vitesse critique de corrosion-érosion v_{crit} , s'élève à :

$$\tau_0 = \left[\frac{2 \cdot \tau_{\text{crit}}}{\rho} f' \right]^{1/2}$$

τ_{crit} : représente la contrainte de cisaillement critique qui provoque une détérioration de la surface par érosion.

La corrosion-érosion du cuivre et de ses alliages est un phénomène bien connu, lorsqu'ils se corrodent dans l'eau. Ces métaux considérés comme non passivables, forment des films superficiels relativement friables contenant des oxydes, des carbonates ou des chlorures, ce qui les rend particulièrement sensibles aux processus d'altération par corrosion-érosion.

L'influence de la rugosité de surface sur le processus de corrosion-érosion est importante. Une paroi rugueuse subit une corrosion-érosion plus importante qu'une paroi lisse. La corrosion-érosion augmente la rugosité d'une paroi métallique au cours du temps, la vitesse d'attaque varie donc avec la durée d'exposition au milieu corrosif. Les mécanismes responsables de ce phénomène sont données sur la figure 36 a,b et c. un exemple de la corrosion-érosion du cuivre en milieu aéré. Le fluide provoque une abrasion locale de la couche superficielle mettant progressivement le métal à nu.



(fig. 86 a)



(fig. 86 b)

L'oxygène accède alors plus facilement à la surface métallique et la corrosion s'accélère en ces lieux. Le transport de l'oxygène contrôle la vitesse de corrosion, qui dépend donc des conditions hydrodynamiques. Les turbulences locales, qui accélèrent le transport de l'oxygène, peuvent ainsi causer des cavités de formes caractéristiques.



(fig. 86 c)

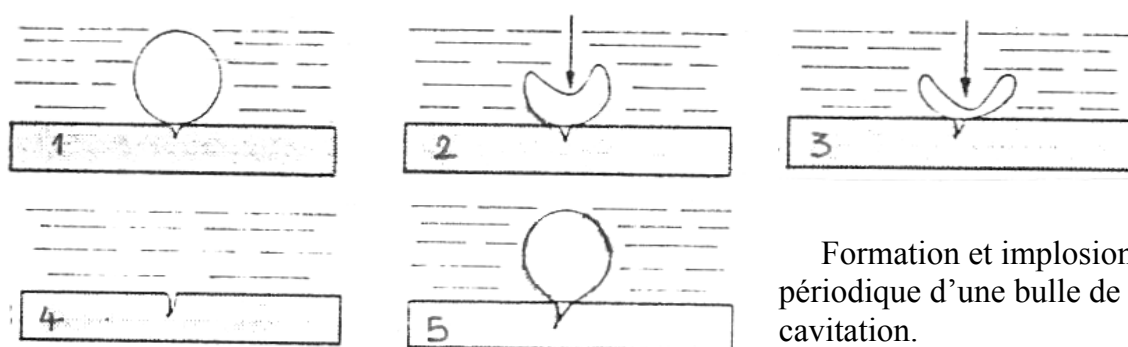
Les alliages passivables, tels que les aciers inoxydables et le titane, sont généralement peu sensibles à la corrosion-érosion due aux fluides, pour autant que ceux-ci ne contiennent pas de particules solides. Pour ces métaux, une vitesse critique n'existe pas.

7.7.3. Usure par cavitation ou corrosion-cavitation

La corrosion-cavitation désigne la dégradation progressive d'une surface sous l'action combinée de la corrosion et de l'implosion de bulles de cavitation. Ces bulles se forment dans les fluides en écoulement turbulent, lorsqu'il existe localement une sous pression en aval d'un orifice dans une conduite, sur certaines parties d'une hélice de bateau ou d'une turbine hydraulique, c'est à dire, lorsque la pression dans les fluides en écoulement turbulent devient temporairement inférieure à la pression de vapeur du liquide, le phénomène de cavitation peut se produire.

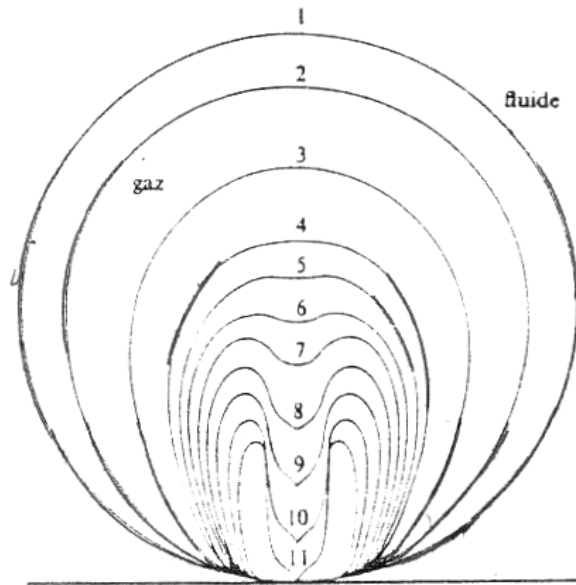
Une fraction de liquide se transforme en bulles de gaz. L'implosion de ces bulles entraîne une usure par cavitation ou une corrosion-érosion. Ces bulles possèdent un diamètre variant entre quelques micromètres et un millimètre.

En raison des fluctuations de pression, les bulles de cavitation implosent lorsque la pression augmente localement. Ce phénomène produit une onde de choc pendant un temps très court (quelques microsecondes). La pression à la surface du métal peut donc atteindre une valeur très élevée jusqu'à 1000 Mpa comme le montre les figures 87 a, b, c, d et e.



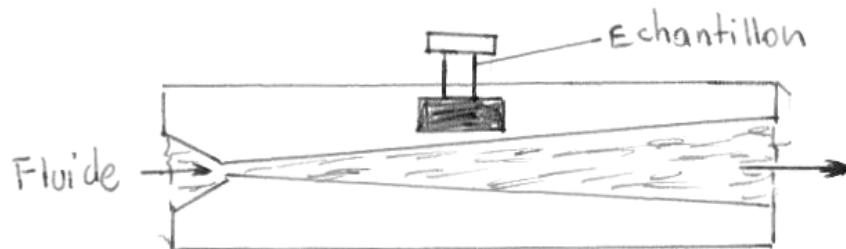
(fig. 87)

La répartition de ce mécanisme induit une fatigue de la surface métallique, pouvant créer des dommages irréversibles. Des figures d'attaques de formes caractéristiques apparaissent en ces lieux altérés.



Evolution théorique de la forme d'une bulle de cavitation lors de son implosion.
(fig. 88)

Le phénomène d'implosion est représenté par la figure 88, qui montre le changement de la forme de la bulle de cavitation qui implose. Elle se rétrécit au centre, puis un jet de liquide se forme et vient heurter perpendiculairement la surface métallique. Pour les études expérimentales de la corrosion-cavitation, on utilise, plus fréquemment, le système venturi, figure 89. Le système venturi existe sous différentes formes, mais son principe reste identique.

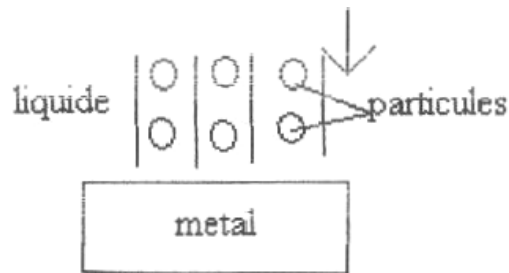


(fig. 89)

Un fluide s'écoule en régime turbulent dans une conduite. Il passe par un rétrécissement qui provoque la formation de bulles de cavitation. Celles-ci sont entraînées par le fluide et implosent plus loin, là où se trouve l'échantillon. C'est une augmentation de la section qui, par le ralentissement du fluide qu'elle provoque, accroît la pression locale et induit ainsi l'implosion.

7.7.4. Usure par impact ou corrosion-impact

L'impact de gouttelettes d'eau ou d'un jet de liquide sur une paroi est à l'origine de l'usure par impact, (fig. 90).



(fig. 90)

Les effets mécaniques, plutôt que chimiques, dominent généralement lors de l'érosion provoquée par l'impact de particules ou de gouttelettes entraînées dans un liquide ou un gaz. Les exemples sont nombreux comme, l'enlèvement de la rouille par sablage, l'érosion des zones exposées sur les avions volant à grande vitesse par l'impact de gouttelettes de pluie et l'érosion d'une paroi métallique par jet de vapeur.

L'impact d'une particule ou d'une gouttelette produit momentanément des contraintes élevées à la surface du matériau heurté, pouvant provoquer des déformations locales et des microfissures. Ce phénomène possède une application intéressante dans le découpage par jet d'eau des matériaux plastiques et composites.

7.7.5. Facteurs d'usure et influence de l'état du traitement thermique

Les facteurs d'usure des différents métaux et structure indiqués sur le tableau ci-dessous, sont déterminés selon le rapport de la perte de masse de l'éprouvette d'essai à la perte de masse d'une éprouvette standard.

Matériaux ou structure	Dureté HB	Facteur d'usure
Ferrite	90	1,40
Fonte grise	200	1,00 à 1,50
SAE 1020 recuit	107	1,00
Fonte blanche	400	0,90 à 1,00
Perlite	220 à 350	0,75 à 0,85
Austénite (12 % Mn)	200	0,75 à 0,85
Rainite	515	0,75
Martensite	715	0,60

L'état de traitement thermique de l'acier influe aussi sur les propriétés d'usure. Pour différents traitements thermiques, on a différentes pertes de masse.

Les valeurs indiquées sur le tableau ci-dessous, sont données pour un acier au carbone non allié.

	Recuit	Normalisation	Trempe
--	--------	---------------	--------

C (%)	HB	Perte de masse (g)	HB	Perte de masse (g)	HB	Perte de masse (g)
0,10	55	0,15	65	0,13	50	0,135
0,20	60	0,14	75	0,125	60	0,12
0,40	75	0,13	90	0,115	105	0,08
0,60	90	0,12	98	0,105	110	0,075
0,80	90	0,11	105	0,10	115	0,07
1,00	90	0,11	107	0,10	115	0,07
1,20	90	0,11	108	0,095	115	0,065
1,30	90	0,11	110	0,090	115	