

1. Définition des surfaces solides

On peut définir une surface solide étant une interface entre un solide et un deuxième milieu qui peut être un autre solide, un gaz (l'atmosphère par exemple) ou un liquide (un lubrifiant par exemple). La figure 1.1 présente quelques exemples de surfaces

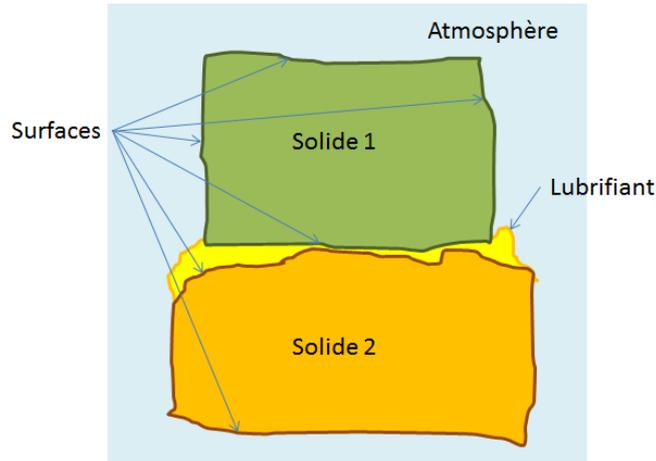


Figure 1. Quelques exemples de surfaces [1]

2. Structure des surfaces

En examinant les surfaces de matériaux métalliques, il est possible d'identifier différentes couches localisées plus ou moins profondément dans la matière [1]. La figure 2 présente une description des couches usuellement observées en surface :

***Gaz adsorbés** (0.3 à 3nm) : Cette couche de contient des molécules de gaz, vapeur d'eau, oxygène qui ont été adsorbées par le solide. Les molécules sont maintenues en surface par les interactions de Van der Waals.

Couche d'oxyde (10 à 100 nm) : La plupart des métaux réagissent avec l'oxygène pour former une couche d'oxyde.

Couche de Beilby (1 à 100 nm) : Dans cette couche, la structure cristalline est différente de celle présente au coeur matériau.

Couche déformée (1 à 100 μm) : La couche est soumise à des contraintes résiduelles résultant du procédé de fabrication.

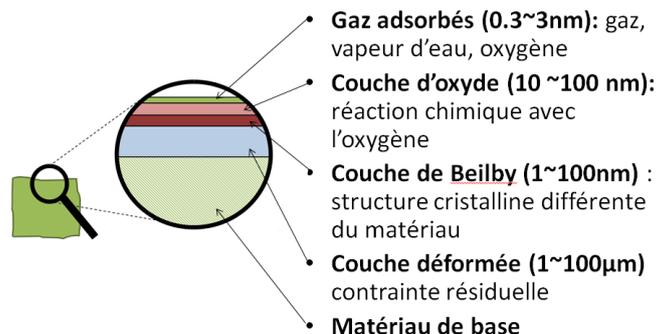


Figure 2. Les différentes couches observables en surface d'un solide (métallique) [1].

Cette surface solide ne constitue en aucun cas un inconvénient, plutôt elle assure une protection de la matrice soit une meilleure résistance mécanique et à la corrosion. Citons comme exemple, les aciers borurés qui présentent en extrême surface FeB et en sous couches Fe_2B , ces dites phases ont une dureté élevée et par conséquent

une meilleure résistance à l'usure. D'autant plus, les couches galvanisées Fe-Zn assurent à l'acier une meilleure résistance à la corrosion. La figure 3(a,b) montre clairement les couches antiusures et anticorrosion respectives au traitement combiné (boruration suivie d'une nitrocarburation) et galvanisées déposées sur aciers.

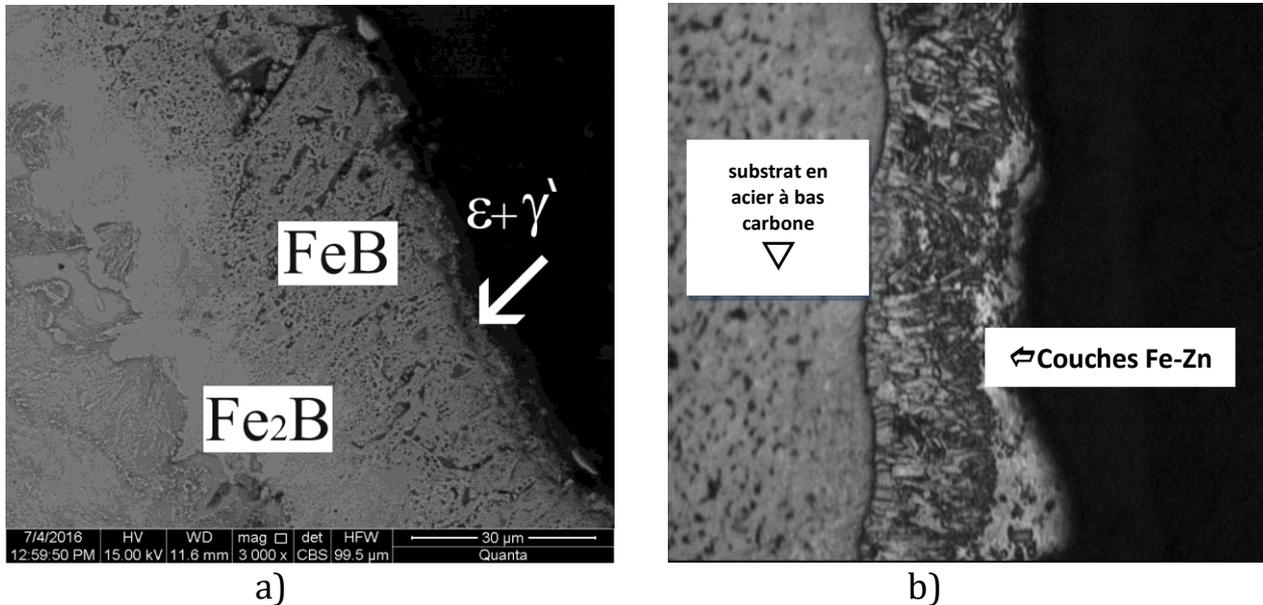


Figure 3(a,b). Micrographies électroniques et optiques montrant le dépôt des couches nitrurées et borurées sur un acier de type 25CD4 (a) [2], b Formation des couches Fe-Zn sur un acier à bas carbone

3. Différents mécanismes d'endommagement des matériaux

3.1. Mécanismes de dégradation de surface

Les mécanismes de dégradation des matériaux provoquant le détachement des particules des premiers corps (débit source interne) et conduisant à l'usure sont classés selon plusieurs familles dont les principales sont décrites ci-dessous. Ces phénomènes d'usure peuvent, en théorie, se produire simultanément, certains étant prépondérants par rapport à d'autres en fonction du tribosystème étudié.

3.2. Usure par adhésion

L'usure par adhésion intervient entre deux surfaces métalliques en mouvement où le frottement engendré détache de microscopiques fragments de matière qui agissent comme abrasif (exemple : les paliers lisses). La lubrification résout ce problème en empêchant l'adhérence ou/et par l'emploi, pour l'un des éléments, d'une matière plus tendre comme pour les coussinets en bronze. Dans le cas de la fonte grise, les lamelles de graphite qui la compose assurent la lubrification.



Figure 4. Schéma d'un tourillon qui porte diverses traces d'usure [3]

À gauche : Apparition des stries continues probablement dues à un phénomène d'abrasion. **À droite** : Les stries sont beaucoup plus chaotiques, avec des traces d'arrachements caractéristiques de l'usure adhésive.

3.3. Usure par abrasion

Entre deux surfaces en contact et en mouvement l'une par rapport à l'autre, des particules dures (provenant de l'une ou l'autre des surfaces ou de l'extérieur) qui s'imprègnent dans la surface la plus tendre raie celle plus dure, qu'elles soient lubrifiées ou non. Cette usure se produit par *écaillage*, *choc* ou *érosion*. Pour éviter ce phénomène abrasif (grippage), les surfaces doivent subir un traitement de surface augmentant la dureté superficielle par transformation martensitique, cémentation, nitruration, boruration, écrouissage. La figure 6 montre des traces d'usure provoquées par abrasion (d), par test de frottement (a,b,c) d'une bille en alumine diamètre 6mm sur une fonte grise lamellaire brute de coulée [7].



Figure 5(a,b,c) . Exemples de pièces mécaniques ayant subi une usure par abrasion [3].

a) d'un tourillon, b) d'un joint d'étanchéité,

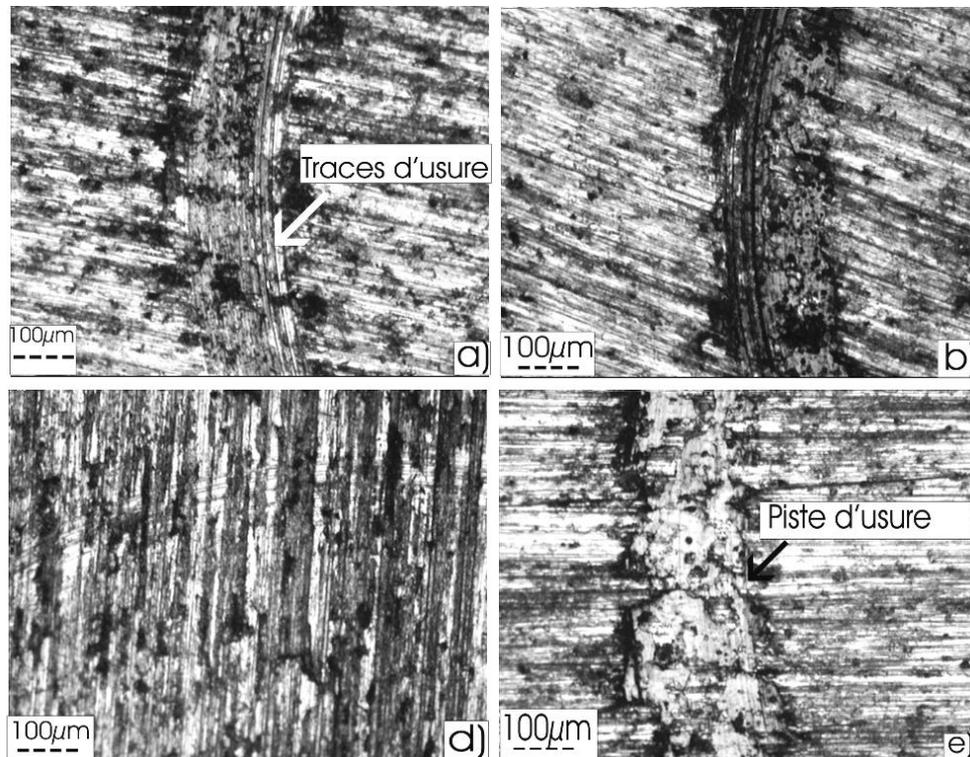


Figure 6(a,b,c,d). Traces d'usure provoquées par abrasion (d), par test de frottement (a,b,c) d'une bille en alumine diamètre 6mm sur une fonte grise lamellaire brute de coulée [7].

3.4. Usure par corrosion

Une surface est dite oxydée lorsque l'on peut enlever des particules par un simple toucher ou provoquer une oxydation sur la surface frottée par simple contact physique. Un cas particulier est le phénomène de *frittage corrosif*: les points de contact entre deux surfaces comprimées se soudent, puis lors d'un mouvement, des particules microscopiques se détachent et deviennent abrasives par frottement et élévation de température.



Figure 7. Corrosion en bout d'arbre [3]

3.5. Usure par laminage

Appelé aussi *fatigue superficielle*, elle est produite par des sollicitations périodiques dues au laminage (contact de Hertz) entre deux surfaces en contact. Ces contraintes provoquent des criques qui peuvent se produire en surface ou sous la couche de surface. Ces criques peuvent être accentuées par hydrogène ou l'eau

contenus dans les lubrifiants ou par le lubrifiant même, quand sa viscosité lui permet de pénétrer à l'intérieur des criques. Dans le cas d'une pièce cémentée irrégulièrement, il peut se produire un phénomène d'écaillage superficiel à la suite de la formation de crique (cas des cages de roulement à billes).



Figure 8. Écaillage d'une bague extérieure d'un roulement à rouleaux cylindriques [3].

4. Paramètres influençant l'usure abrasive

4.1. Caractéristiques des particules abrasives

L'usure abrasive dépend particulièrement de la topographie des surfaces en contact dans le cas d'une abrasion à deux corps ou bien des particules abrasives situées entre les deux surfaces dans le cas d'une abrasion à trois corps. Parmi les caractéristiques principales on cite :

- Dimensions et morphologie des particules abrasives. Les particules possédant des angles aigus provoquent davantage un effet de coupe alors que les particules ayant des angles arrondies ont tendance à provoquer des déformations plastiques ;
- Quantité et nature de l'abrasif impliqué dans le contact ;
- Charge appliquant les particules abrasives sur la surface ;
- Nature, structure du matériau subissant l'abrasion.

4.1.1. Rôle de la porosité

La littérature articule le rôle complexe de la porosité sur la résistance à l'usure. Cependant, ce rôle n'a pas été clairement identifié, du fait de sa forte dépendance avec les conditions d'essais tribométriques. Quelques travaux, qui ne portent pas exclusivement sur les dépôts projetés et sur les matériaux composites, traitent de l'influence de la porosité sur la résistance à l'usure.

En régime lubrifié, l'utilisation de matériaux poreux est courante. En effet, dans ce cas, la rétention de lubrifiant au sein des pores fournit continuellement une lubrification au cours du frottement.

En régime non lubrifié (glissement sec), différentes études sont consacrées à l'influence de la porosité sur la résistance à l'usure mais peu d'entre elles relie son rôle aux mécanismes d'usure. Beaucoup de travaux [4,5] ont montré que la **présence de pores au sein de matériaux composites diminue l'aire de contact réelle entre les deux matériaux en contact, augmentant ainsi la pression de contact**. En conséquence, des fissures apparaissent entre les pores, entraînant la formation de débris d'usure. La résistance à l'usure et le coefficient de frottement s'en trouvent ainsi diminués.

Les dépôts poreux obtenus par projection thermique pour des applications tribologiques s'emploient généralement en régime lubrifié. En effet, le rôle néfaste de la porosité des dépôts projetés a été mis en évidence. La présence de larges pores peut entraîner l'affaissement du dépôt au niveau de ces pores au cours du frottement et la fissuration des splats situés à côté des pores. Néanmoins, une influence positive de la porosité sur la résistance à l'usure de dépôts projetés a également été démontrée.

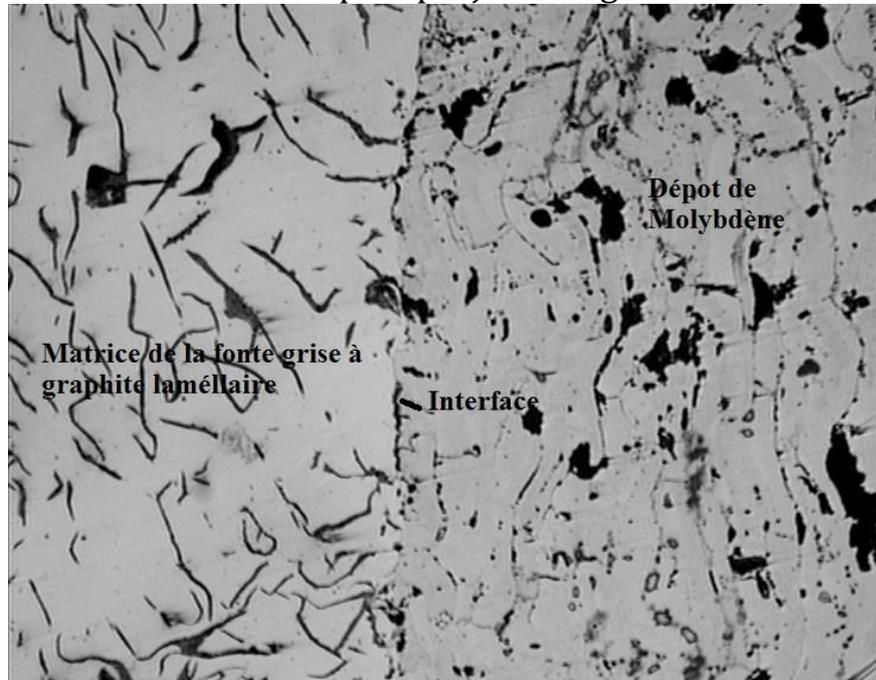


Figure 9. Dépôt de molybdène obtenu par projection thermique flamme fil déposé sur une fonte grise [6]

Dans le cas de dépôts à base de carbure de tungstène en contact avec du graphite, les pores servent de réservoirs à débris et sont ainsi remplis de particules abrasives et de débris contenant du graphite. Cela a pour effet de limiter le phénomène d'abrasion par des particules dures et d'augmenter l'effet lubrifiant par la rétention des particules à base de graphite, connu pour ses propriétés lubrifiantes. Cette capacité des pores à piéger les débris d'usure a aussi été observée dans le cas d'alliages ferreux obtenus par frittage.

Le remplissage des pores permet d'augmenter la résistance à l'usure de ce matériau poreux en augmentant l'aire de contact réelle et en diminuant la pression de contact. Par conséquent, la déformation plastique et la création de débris deviennent plus difficiles. De plus, le phénomène d'abrasion par des particules dures est réduit par le piégeage des particules abrasives dans les pores empêchant leur agglomération dans le contact. Au contraire, d'autres auteurs ont montré que la présence de pores au sein d'aciers frittés pouvait être à l'origine de fissuration et de création de débris d'usure et ont reporté le rôle néfaste de la porosité sur leurs propriétés tribologiques.

Dans le cas des aciers et les fontes nitrocarburrées par le procédé de Tenifer, les couches formées en extrême surface sont extrêmement poreuses. Ces pores dans les engrenages lubrifiés assurent la sustentation du film d'huile, ce qui diminue le coefficient de frottement et participe à la diminution de la perte de matières [6].

4.1.2. Rôle de la rugosité de surface

La rugosité est un paramètre essentiel lors de contact en frottement. Elle influe sur des facteurs qui régissent le comportement au frottement et à l'usure et, plus précisément, le mode de contact et le comportement du milieu interfacial (troisième corps). En effet, la rugosité détermine l'aire réelle de contact (le contact s'effectue par les aspérités de surface) et donc la répartition des pressions superficielles. Par exemple, une augmentation de la rugosité de surface permet de diminuer l'aire de contact réelle et par conséquent de limiter les phénomènes d'adhésion. De plus, suivant la forme et l'orientation des rugosités, une rétention ou au contraire une circulation plus aisée du troisième corps (débris d'usure et lubrifiant) pourra avoir lieu. De façon générale, les exigences de rugosité dépendent de la nature des matériaux en présence et du niveau de sollicitation.

4.1.3. Rôle de la dureté de surface

La dureté est considérée comme étant la propriété mécanique majeure qui gouverne la résistance à l'usure. Archard a montré que le matériau le plus dur résiste mieux à l'usure abrasive. La corrélation entre dureté et usure abrasive n'est pas simple. La vitesse d'usure est principalement dépendante de la dureté de l'abrasif ainsi que celle du matériau antagoniste. Toutefois, les particules angulaires causent une usure plus importante que celles qui sont sphériques

5. Evaluation de la résistance à l'usure et du coefficient de frottement

5.1. Coefficient de frottement

La force tangentielle, F_t , est enregistrée continuellement durant tout l'essai. Le coefficient de frottement est calculé comme le rapport.

$$\mu = \frac{F_n}{F_t}$$

F_n , représente l'effort normal.

La friction d'une surface solide qui peut être un dépôt, substrat nu, couches borurées, nitrurées, cémentées et autres est fonction du parcours de glissement. Les paramètres tribologiques important pouvant agir sur le coefficient de frottement sont les suivants :

L'effort normal, l'antagoniste (abrasif), vitesse de rotation ou de glissement, l'état de surface, la microstructure, l'humidité et la porosité.

Les expériences d'essai de friction peuvent se dérouler à sec ou dans les conditions lubrifiées à températures variées.

A titre d'exemple, nous montrons l'effet de la microstructure sur l'évolution du coefficient de frottement en fonction du temps de glissement (Fig.9), cas de l'acier à l'état recuit, boruré et ayant subi un traitement combiné (Nitrocarburation +boruration solide [8]).

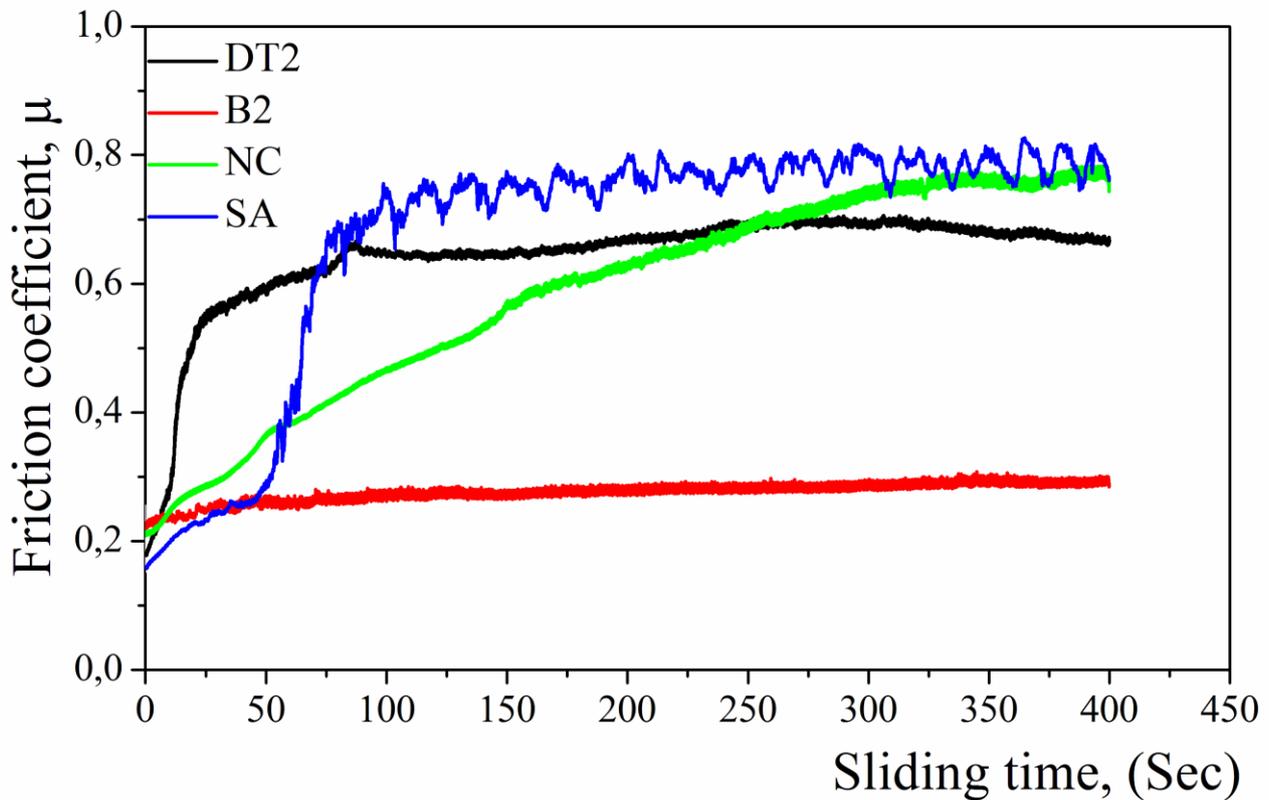


Figure 10: Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps de glissement, DT2- Traitement duplexe, B2- Acier boruré, NC-Acier nitrocarbure, SA-Acier à l'état recuit [8].

5.2. Essai d'usure par abrasion

Il existe différentes méthodes pour définir un critère d'abrasion, celles qui utilisent la perte en masse, d'autres qui sont basées sur la loi d'Archard et enfin des méthodes récentes basées sur la détermination du coefficient d'usure en déterminant par profilométrie laser 3D le volume usé.

5.2.1. Dispositif expérimental et les conditions d'essai

Le dispositif utilisé est composé d'un système porte échantillon fixé sur une polisseuse à vitesse variable (Fig.12). Les paramètres pris en considération sont le poids appliqué à l'échantillon, le temps de l'essai, la vitesse angulaire mesurée par tachymètre à laser et enfin le grade et la nature de l'abrasif (Al_2O_3 , SiC et autres). La perte en masse absolue est déterminée selon la relation suivante:

$$\Delta P = P_i - P_f \quad (\text{g, mg})$$

Où P_i , le poids mesuré après chaque temps d'usure et P_f le poids initial. Le parcours X est déterminé comme suit

$$X = \frac{V}{\tau} \quad (\text{m}),$$

et comme la vitesse linéaire (V) est égale au produit de la vitesse angulaire (ω) par le rayon du papier abrasif (r),

$$V = \omega \cdot r$$

$$X = \omega \cdot r / \tau$$

Comme la dureté suit la résistance à l'usure, l'évolution de la micro dureté des surfaces usées a été déterminée en fonction du parcours. La figure 11 montre clairement un exemple de test d'usure par abrasion (perte de masse en fonction du temps de glissement) effectué sur une fonte grise à graphite sphéroïdale ayant subi différents traitements [7].

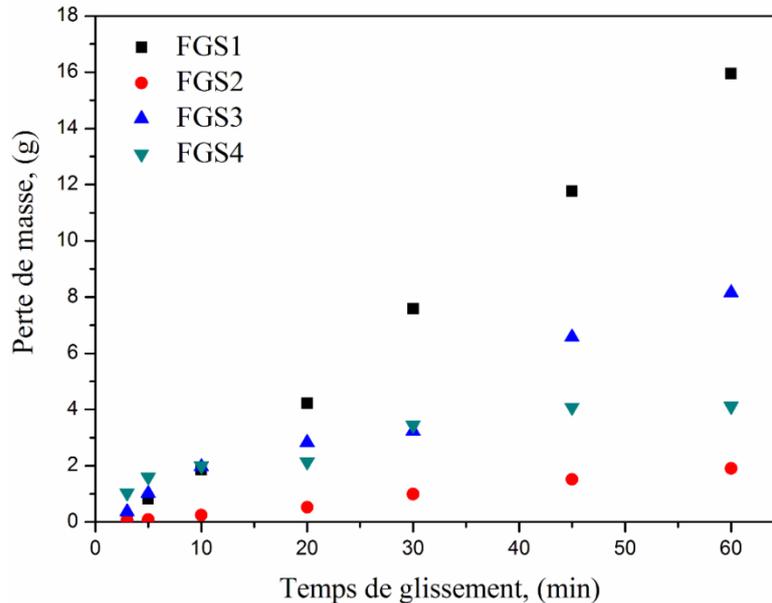


Figure 11. Evolution de la perte de masse en fonction du temps de glissement d'une fonte grise sphéroïdale ayant subi différents traitements [7]

5.3. Loi d'Archard

Dans sa forme initiale, la loi d'Archard [1] exprime, pour une configuration d'usure **adhésive, en glissement**, une relation entre le volume usé et des quantités caractéristiques du contact :

$$V = K \frac{F_n \times L}{H}$$

où V : volume usé,

k : coefficient d'usure sans dimension,

$\|F_n\|$: module de la force normale de contact, supposée constante,

L : longueur glissée,

H : dureté.

Le coefficient k est différent pour chacun des corps en présence. Il dépend des conditions géométriques et thermodynamiques lors du contact. Il a été montré que la loi d'Archard peut être étendue à d'autres mécanismes, en glissement dominant.

Moyennant une redéfinition de certains paramètres, l'équation précédente peut s'écrire :

$$V = K \cdot W$$

où K : est égal à kH ,

W : est égal à $\|F_n\| \cdot L$.

W a la dimension d'un travail. Par convention, il est appelé "travail d'usure

Dans le cas où la force normale de contact varie au cours du temps (par exemple, dans une situation d'impacts-glissements, $\|F_n\|$ présente de très fortes variations de courte durée lors des chocs), la définition de W devient :

$$W = \int_{t_0}^{t_1} \|Fn\| \|Vt\| dt$$

où W : travail d'usure,

$\|Fn\|$: module de la force normale au cours du contact,

$\|Vt\|$: module de la vitesse de glissement au cours du contact,

t_0 : instant de début du calcul,

t_1 : instant de fin du calcul.

Dès lors, par analogie avec les lois usuelles de la mécanique, il est possible de définir une "puissance d'usure" en posant :

$$P = \|Fn\| \|Vt\|$$

où P : puissance d'usure.

5.4. Loi d'usure 'ARCHARD'

La loi est de type linéaire : $V = K_x P_x t$

où V : volume d'usure,

K : coefficient d'usure,

P : puissance d'usure,

t : intervalle de temps.

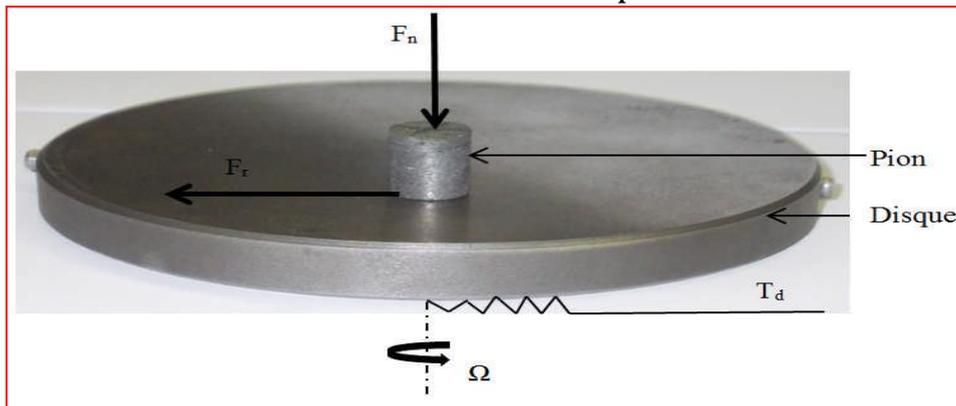


Figure 12. Couple pion-disque

Fn-Effort normal, Ft- Effort tangentiel, Pion-Echantillon, Ω -Vitesse angulaire

Bibliographie

- [1]. ARCHARD J.F. "Contact and Rubbing of flat surfaces". Journal of Applied Physics, vol.24,p. 24, 1953.
- [2] Mémoire de Master, Seddour Chourouk, Caractérisation des couches obtenues par traitements combinés, Dépt.Métallurgie, UBMAAnnaba, Session Juin 2016.
- [3]. Tribologie/Usure des surfaces, WikiBooks
- [4]. A.A. HAMID et al., Influence of particle content and porosity on the wear behaviour of cast in situ Al(Mn)-Al2O3(MnO2) composite, Wear 260, 2006, p.368-378.
- [5]. Mélissa Delqué, Thèse **Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris**, 26 Juin 2007, Influence de la microstructure sur le comportement tribologique de dépôts composites projetés plasma
- [6]. Thèse de doctorat en sciences, Tlili Samira, Dépôt du Molybdène obtenu par projection flamme- fil sur une fonte grise lamellaire, Juin 2012, Dépt. Métallurgie, UBMAAnnaba.
- [7]. Mémoire de Master, Bara Zoheir, Effet des traitements thermiques sur la coefficient de frottement d'une fonte GL, Session Septembre 2017, Dépt. Métallurgie, UBMAAnnaba
- [8]. RévistaMatéria, Touhami Med Zine et al. Effet des traitements combinés sur les propriétés de surfaces de l'acier de type 25CD4, 2018.