

Compatibilité tribologique des métaux purs

Mohammed ARBAOUI^{1*}, Rachid BOUZID¹

¹ Département Transport et Equipements des Hydrocarbures, Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie.

Université M'Hamed BOUGARA- BOUMERDES- Algérie

* auteur correspondant : arbaoui_umbb@yahoo.fr

Résumé - Afin d'avoir un choix rationnel des couples de matériaux et de déterminer leur domaine d'utilisation, une étude des phénomènes de frottement, d'usure et d'adhésion est nécessaire. Quelques travaux sur la compatibilité tribologique ont été réalisés en particulier sur les métaux purs avec chacune sa particularité : étude du frottement des solutions solides, détermination du mécanisme d'adhésion des matériaux, étude du phénomène de diffusion mutuelle,...

Dans notre étude on fera frotter sur un premier matériau : un second qui lui est tribologiquement compatible, un troisième qui lui est incompatible. Et au cours de cette étude on cherchera à déterminer l'évolution du comportement au cours du frottement de glissement des couples Cuivre et Nickel sur du Fer sachant que le Cuivre étant tribologiquement compatible avec le fer, alors que le Nickel a une compatibilité limitée.

Mots Clés : Compatibilité, Frottement, Usure, Adhésion, Métaux purs.

1. Introduction

Le travail réalisé concerne l'étude de l'usure, du frottement et de l'adhésion des métaux purs ainsi que des alliages binaires. La synthèse bibliographique, [1 ; 2 ; 3 ; 4] nous a montré les principales tendances observées dans le comportement tribologique des matériaux lors de l'utilisation industrielle aussi bien que d'essais de laboratoire sur Frictiographe et Tribomètre. Dans ce cas la mise en évidence des paramètres les plus importants ; des questions les plus aiguës ainsi que des lacunes, a donné des éléments précieux pour l'établissement de la stratégie (programme d'essai) à utiliser pendant le processus expérimental. La logique développée avec les métaux par la théorie du frottement et de l'adhésion conduit à l'établissement de liaisons étroites entre le comportement tribologique des couples de matériaux et leur solubilité mutuelle [5]. Dans cette recherche ayant pour but de déterminer les mécanismes physiques ; intervenant au cours de la déformation des solides ; dépendant de la température, du niveau de contrainte, comme paramètres extérieurs et de la constitution du couple en contact et surtout de la nature des matériaux ; on fera frotter sur un premier matériau (le Fer) un second (le Cuivre) qui lui est compatible, puis un troisième (le Nickel) présentant une compatibilité limitée.

Cette étude du comportement tribologique se fera à sec, c'est-à-dire en l'absence de tout lubrifiant, liquide ou solide, qui est une étude des plus importantes, car c'est à l'occasion d'une rupture du film de lubrifiant, cas de l'arrêt ou du démarrage des mécanismes que le contact direct de surfaces frottantes est inévitable, avec toutes ses conséquences. L'étude du frottement des matériaux est motivée par des intérêts multiples liés d'une part au besoin d'accroissement des performances et de la fiabilité des systèmes sollicités de plus en plus sévèrement et, d'autre part aux économies que représentent l'augmentation de la durée de vie, l'amélioration du rendement, Pour atteindre ce but, il est indispensable de connaître avec précision les mécanismes métallurgiques qui provoquent

cet accroissement des coefficients de frottement, d'usure et de l'adhésion, de façon à limiter les effets en agissant sur les paramètres qui les régissent [6 ; 7].

2. Généralités sur le comportement tribologique des métaux :

Afin de pouvoir diminuer le facteur adhésion pour une situation tribologique donnée, il faudrait choisir convenablement les paramètres extérieurs (charge, vitesse, mode de contact...) aussi un bon choix de matériaux s'impose, c'est-à-dire avoir des matériaux mutuellement insolubles dont le plus mou n'est pas écrouissable. C'est pourquoi une étude préliminaire de compatibilité tribologique est nécessaire. Les matériaux sont choisis sur la base des différentes remarques concernant le comportement tribologique [8], en particulier le phénomène d'adhésion [9] : les métaux ayant un réseau cubique à faces centrées ou cubique centré ont une aptitude élevée à l'adhésion lorsqu'ils sont en contact sous charge alors que pour ceux à réseau hexagonal, celle-ci étant très faible.

Le choix des matériaux composants un couple de frottement implique le respect de certaines conditions ou impératifs de façon à prévenir les possibilités d'adhésion entre les deux éléments constituant le contact mécanique.

L'effet de la compatibilité tribologique peut-être expliquée par l'effet de la composition chimique des matériaux, et que la compatibilité influence le phénomène tribologique par l'affectation de l'énergie d'adhésion de surface entre le contact de deux matériaux [10 ; 11]. Aussi il est bon de rappeler, que les métaux compatibles ont une énergie d'adhésion très élevée, et que celle-ci entraîne à une grande augmentation de la surface réelle de contact et qui augmente aussi l'adhésion. Mais un inconvénient majeur réside dans la mesure de cette énergie d'adhésion, qui présente de nombreuses difficultés, de même pour les caractéristiques de solubilité des oxydes [12] ; ou autres films contaminants [13], entre eux ou avec les métaux ainsi que les caractéristiques de diffusion dans les couches superficielles. COFFIN [3], a montré que la compatibilité a un effet plus prononcé dans le vide que dans l'air ; MACHLIN et YANKEE [14], en accord avec COFFIN [3], trouvent avec les échantillons préparés et testés dans un environnement inerte un fort effet de la compatibilité que celui des échantillons testés dans l'air.

1.1. Compatibilité tribologique

Les études concernant les corrélations entre les avaries superficielles et la solubilité ont montré que les meilleurs couples de frottement étaient ceux qui correspondent à des métaux insolubles ou qui donnent naissance à des composés intermétalliques, chimiques. On les appelle : couples compatibles tribologiquement.

La compatibilité tribologique, selon R. GRAS [15], peut être définie de la façon suivante : Deux matériaux sont dits compatibles au frottement, si ces matériaux placés dans une situation tribologique donnée, c'est-à-dire :

- en contact sous une certaine charge,
 - avec un état de surface déterminé,
 - animés d'une certaine vitesse relative ;
- + n'adhèrent pas l'un à l'autre,
- + ne subissent pas de détériorations rapides, c'est-à-dire ne transfèrent pas l'un sur l'autre,
- + ou ne grippent pas au cours du frottement.

1.2. Coefficient de frottement à sec entre surfaces métalliques

Du point de vue thermodynamique, la plupart des métaux sont instables à la température ambiante au contact de l'oxygène et forment des oxydes [16]. Vis-à-vis de l'usure, la formation de ces oxydes constitue habituellement une barrière aux métaux ou alliages en séparant le substrat du milieu environnant. Les oxydes superficiels ne protègent pas uniquement les métaux ou alliages contre l'oxydation avancée, mais aussi contre les endommagements occasionnés par l'usure. Effectivement, les effets bénéfiques de l'oxygène pour réduire l'usure sont bien connus depuis des années [17]. Si la compréhension des mécanismes de formation des oxydes est bien avancée, il n'est pas de même lorsqu'on envisage un glissement sur les surfaces libres des pièces en contact [6]. Dans cette situation, les mécanismes d'oxydation sont perturbés par les effets mécaniques du frottement.

L'explication la plus cohérente des interactions qui se développent au cours du glissement relatif de deux surfaces fût proposée par BOWDEN et TABOR [18]. Ils supposent qu'aux points de contact se développent des liaisons adhésives très solides qu'il faut cisailer lors du glissement, et la force nécessaire constitue la première cause du frottement.

1.3. Théorie de l'adhérence

La théorie de l'adhérence est basée sur le fait que le contact des surfaces s'effectue par des aspérités. La pression au contact de chacune de ces aspérités est très élevée ; précisément parce que la surface réelle de contact est très petite [19]. En fait la pression de contact atteint la limite de la résistance de la matière sous pression et il en résulte un écoulement plastique. Dans le cas d'un contact entre deux matériaux ; les conditions d'adhésion dépendent considérablement de l'aire de contact. Les surfaces n'étant jamais parfaites géométriquement, la charge appliquée aux solides en contact se répartit sur un petit nombre d'arêtes et pics. Il s'ensuit que même pour des charges moyennes, la pression de contact est très grande et peut -être assez élevée pour provoquer des déformations plastiques au voisinage des points de contact. On considère en général que l'adhésion met en jeu des interactions atomiques, quelques fois des accrochages mécaniques qui se traduisent par une force qui maintient les solides l'un contre l'autre : force d'adhésion. BOWDEN et TABOR [18] ont montré que l'effet est d'autant plus marqué qu'il se produit des déformations plastiques locales ou localisées. Il est à signaler que les forces d'adhérence à haute température résultent de la compétition de deux facteurs dans les effets antagonistes sont :

- l'augmentation de l'aire réelle de contact par fluage ou / et frittage qui sont régis par des processus thermiquement activés tels que la diffusion en volume, en surface le long des joints,...
- l'accroissement de la ductilité qui est également thermiquement activé.

1.4. Théorie de l'usure

L'usure considérée dans son large sens, c'est-à-dire comme la détérioration que produit l'usage, peut être due à plusieurs processus physiques, mécaniques et chimiques. L'usure considérée dans le contexte général est très difficile à décrire sous forme quantitative. L'usure est un enlèvement indésirable de matière d'un couple de surfaces en mouvement, et aussi c'est le résultat d'une action mécanique, physique ou chimique (ou combiné) dans le volume est variable selon la nature du matériau utilisé. Les surfaces métalliques, soumises à un frottement solide ou fluide, en présence ou non de lubrifiants, sont affectées par des formes d'usure qui peuvent aller de l'usure douce régulière et contrôlable (usure normale) à la détérioration brutale (usure catastrophique) entraînant la mise hors service du mécanisme.

Une grande partie des défaillances techniques s'amorce à la surface de contact des pièces mécaniques en mouvement relatif, de ce fait, le comportement tribologique des matériaux et les

performances des lubrifiants ou des revêtements dans un contact glissant déterminent à terme la qualité de la conception initiale ainsi que la fiabilité de fonctionnement de l'équipement.

1.5. Phénomène de frottement

Le comportement tribologique d'un couple de matériaux, en frottement, est très influencé par les propriétés mécaniques des matériaux en contact ; les conditions d'utilisation ; l'affinité métallurgique. L'usure et l'adhésion résultantes, dépendent du nombre de jonctions métalliques et de leurs tailles ; et elles ont beaucoup plus d'effet avec l'augmentation de la température et du temps de contact (ou de mouvement). Aussi le milieu ambiant, selon les cas, tend à accélérer le phénomène d'usure et d'adhésion ou à le ralentir, suivant qu'il favorise ou défavorise l'existence de jonctions métal - métal et le transfert qui en résulte. Afin de pouvoir diminuer les facteurs : usure et adhésion, pour une situation tribologique donnée, il faudrait choisir convenablement les paramètres extérieurs (charge, vitesse, ...), aussi un bon choix de matériaux s'impose.

Le cuivre et ces alliages, sont des matériaux largement utilisés dans les contacts tournants des machines, comme le recouvrement des roulements, les bagues, etc... L'usure générée par glissement est un paramètre important dans le comportement de ces éléments tournants. Ainsi, il est nécessaire de connaître les mécanismes d'usure de ces matériaux et d'identifier les différents phénomènes de contact comme le transfert des matériaux, le transfert des particules d'usure, l'usure abrasive, adhésive et ainsi qu'une éventuelle transition d'usure.

2. Partie expérimentale :

2.1. Matériaux utilisés

Les matériaux ont été choisis sur la base des différentes remarques concernant le comportement tribologique, en particulier le phénomène d'adhésion : les métaux ayant un réseau cubique à faces centrées (c.f.c) ou cubiques centrés (c.c) ont une aptitude élevée à l'adhésion lorsqu'ils sont en contact sous charge alors que ceux à réseau hexagonal, celle-ci étant très faible. D'où l'idée de prendre des matériaux avec un réseau cubique et notre choix s'est porté sur :

- le Fer (Fe) ; - le Cuivre (Cu) et - le Nickel (Ni)

et celui-ci repose sur le fait que :

- Fe : matériau largement employé dans l'industrie,
- Ni : métal de base de nombreux alliages réfractaires dans la gamme de température (400 à 1000 °C),
- Cu : a été choisi surtout par le fait qu'il se détériore plus rapidement que les deux premiers.

2.2. Dispositif expérimental utilisé

Afin de tenir compte du renforcement de certains effets dans le vide et aux températures élevées, notamment de l'adhésion, de la désorption des gaz contenus dans les couches superficielles, disparition en grande partie des couches d'oxydes laissant ainsi un contact entre matériaux propres, on utilisera le frictiographe à haute température sous vide.

Celui-ci permet de mesurer et d'enregistrer en continu le coefficient de frottement de deux éprouvettes en forme d'anneaux cylindriques avec des faces parallèles et de suivre son évolution au cours du temps, en fonction de la charge, de la vitesse et de la température. Et le contact est du type plan sur plan. L'aire nominale de contact des différents échantillons utilisés est de 220 mm² Les

éprouvettes doivent subir un traitement sont d'abord polies à l'alumine, nettoyées aux ultrasons dans un bain de trichloréthylène, et avant qu'elles soient placées dans l'enceinte du F.H.T.V, elles sont nettoyées à l'éther pour éliminer toutes traces dues au toucher sur les faces frottantes. Puis elles sont placées dans l'enceinte, qui est alors mise sous vide puis chauffées à raison de 200 à 300 °C par heure. La température d'essai atteinte, on laisse une période de stabilisation et d'homogénéisation de la température des éprouvettes d'une trentaine de minutes.

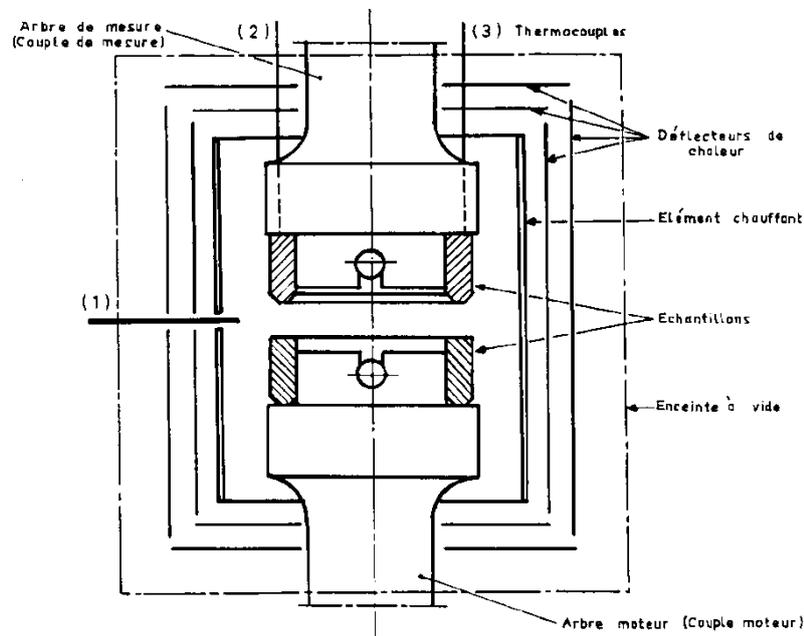


Figure 1 : Schéma de principe du frictigraphe : montage des éprouvettes

2.3. Conduite et résultats des essais

On propose les conditions suivantes :

- + pression de contact $p = 0.4 \text{ MPa}$ ($F = 10.5 \text{ daN}$) ;
- + temps de contact $\tau_0 = 60 \text{ mn}$;
- + rupture des jonctions éventuelles à la température d'essai.
- + état de surfaces : polis alumine 24 h ; $a \cong 3 \times 10^{-4} \text{ } \mu\text{m}$

Tableau 1 : Valeurs du coefficient de frottement f_s pour les couples : Fe / Cu

N° essai	1	2	3	4	5	6	7
$t \text{ } ^\circ\text{C}$	20	130	180	270	390	400	450
f_s	0.08	0.13	0.22	0.59	0.74	0.35	0.46

Tableau 2 : Valeurs du coefficient de frottement f_s pour les couples : Fe / Ni

N° essai	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$t \text{ } ^\circ\text{C}$	20	130	180	270	390	400	450	540	715
f_s	0.11	0.14	0.15	0.13	0.12	0.12	0.12	0.13	0.15

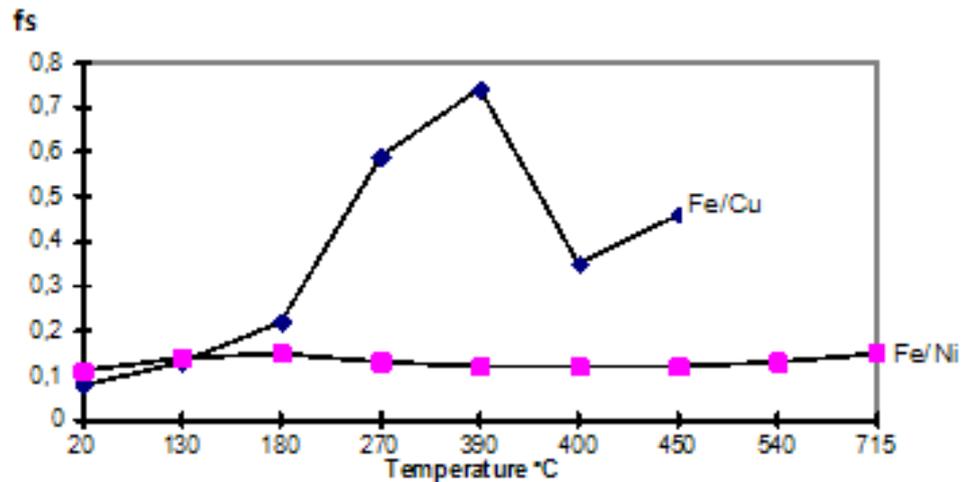


Figure 2 : Coefficients de frottement f_s en fonction de la température d'-- couples de matériaux: Fe/Cu et Fe/Ni

3. Analyses et discussions :

Le coefficient de frottement f_s égal à 0,08 à $t = 20$ °C, augmente rapidement pour atteindre la valeur 0,74 à $t = 390$ °C et la diminution de celui-ci au-delà de cette température proviendrait d'un :

- changement de propriétés magnétiques : le fer magnétique devient paramagnétique,
- début du glissement dévié dans le cas du cuivre.

A partir de 180 °C, on obtient un transfert du cuivre sur le fer ; et l'on a pu voir la zone de détérioration et d'arrachement sur le cuivre, avec un reflux de matière en fin de course. Mais les dégâts observés ne sont pas importants relativement à la surface nominale de contact. La localisation des traces de transfert semble être due aux déformations importantes imposées aux couches superficielles qui sont sollicitées et aussi par la faible dureté du cuivre par rapport à celle du fer. Alors que pour des températures supérieures, la détérioration des échantillons est plus importante, l'essai à 390 °C nous a montré une zone :

- d'arrachement non uniforme sur le cuivre dans toute la surface ;
- de transfert du cuivre sur le fer ;

et c'est dans cet essai qu'on a obtenu des zones de grippage importantes (figure 4 a), contrairement à l'essai n° 6 où l'on a eu une usure et un transfert plus faible. Par contre avec l'augmentation de la température, les régions d'adhérence commencent à devenir plus importantes quantitativement (par rapport à la surface nominale) et qualitativement (importance des rayures) ainsi que l'augmentation de la valeur de f_s jusqu'à l'adhésion complète (cas de l'essai n° 7). Et cette soudure des éprouvettes (figure 4 b), ainsi que le grippage total ont lieu après que l'accroissement de l'aire de contact soit généralisé. Et un tel comportement met en évidence le rôle déterminant d'un effort tangentiel dans le développement des microsoudures par extension des déformations plastiques. Alors que dans le cas des couples Fe/Ni où la valeur de f_s oscille autour de 0,13 (de 20 à 715 °C), on a observé un arrachement du fer de 20 à 400 °C, et au-delà le frottement, l'usure tendent à s'uniformiser. La détérioration des éprouvettes peut être expliquée par la différence des propriétés mécaniques avec le nickel ; et quantitativement le transfert et la détérioration sont plus faibles que dans le cas des couples Fe/Cu.

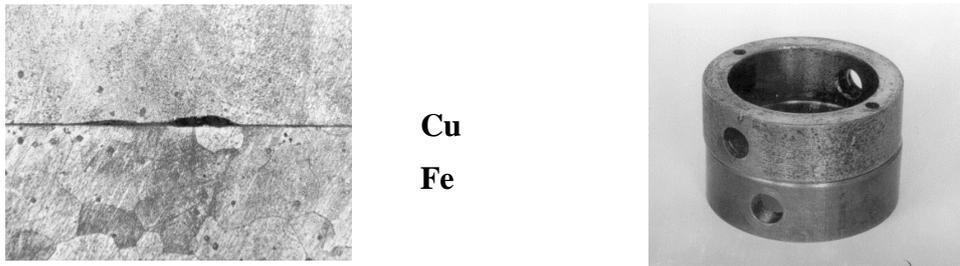


Figure 4 a : Déformation plastique entraînant la formation puis la rupture de jonctions des éprouvettes,
 Figure 4 b : Déformation plastique entraînant une adhésion sévère des éprouvettes

Un pic de dureté à (20 μm de l'interface des éprouvettes, (**Figures 4 a et 4 b**), qui a été observé lors de l'adhésion complète (grippage) après essai de frottement statique à 450 °C dans le cas du couple Fe/Cu ; ceci a été aussi remarqué par YOKOTA [8] dans son étude sur l'acier 304. D'où l'on peut conclure que la formation de jonctions s'effectue dans des conditions de contraintes élevées avec un écrouissage à une certaine distance de l'interface.

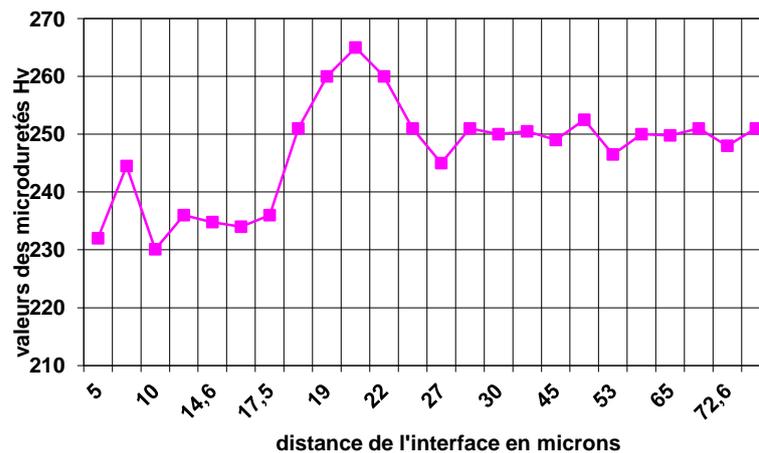


Fig. 4 a : Mesures de microdureté des éprouvettes de fer (après essai) sous une charge de 25 gr

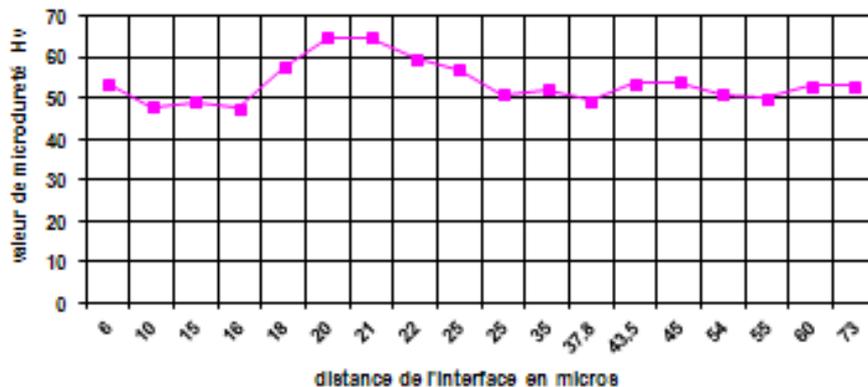


Fig. 4 b : Mesures de microdureté des éprouvettes de cuivre (après essai) sous une charge de 25 gr

4. Conclusions :

On a enregistré une usure adhésive des échantillons Fe/Cu : on a un transfert du cuivre sur le fer ; le cuivre étant transféré facilement (en dépendance de la température) ; le même type d'usure a été observé pour les échantillons Fe/Ni mais avec un transfert du fer sur le nickel. Et en ce qui concerne l'état de surface, on a obtenu une nette diminution de la valeur moyenne de courbures des aspérités, et dans le cas des éprouvettes de cuivre, celle-ci est plus importante, ce qui nous montre bien que le cuivre a subi des détériorations considérables par rapport au fer ou au nickel. Le rôle déterminant d'un effort tangentiel dans le développement des microsoudures par extension des déformations plastiques superficielles (en particulier cas de Fe/Cu à $\theta = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Références

19. J. M. GEORGES : "Frottement, Usure et Lubrification" ; Edition Eyrolles France, 2000.
20. G. W. STACHOWIAK, A. W. BATCHELOR, Engineering Tribology (Second Edition) BUTTER WORTH HEINEMANN 2001
21. L. E. COFFIN "A study of sliding of metal with particular reference to atmosphere". Lubrication Engineering (January-February 1956).
22. H. HAIDARA. Mécanismes fondamentaux du mouillage et de l'adhésion. 12èmes Journées d'Étude sur l'adhésion, Session de formation, 2003.
23. S. HOGMARK, S. JACOBSON, O. VINGSBO : Surface damage, ASM Handbook volume 18, Surface, lubrication and wear technology, Edition P.J. Blau, ASM International, 1992, 177-183
24. Y. BERTHIER : "Mécanismes et Tribologie" Thèse d'état es-science : INSA de Lyon, n° 88 INSAL 0050 1988, 156 p.
25. F. H. STOTT : "High Temperature Sliding Wear of Metals" Tribology International 35, n°8, (2002) 489-495.
26. J. BLOUET: "Contribution à l'étude de l'évolution initiale de l'usure dans le cas du frottement de certains métaux". Thèse Dr. és-sciences, Université Paris VI, Novembre 1973.
27. J. R. FEHLING, N. K SARKAR : "The friction of copper, nickel and iron in air and vacuum". Wear 14, (1969).
28. N. YOKOTA, S. SHIMOYASHIKI: "Characteristics of self-welding of structural materials in liquid sodium". Liquid Metal Engineering and Technology BNES LONDON (1984).
29. K. HIRATSUKA : Environmental effects on the formation process of adhesive wear particles. J. Tribology international 28, 279-286, 1995.
30. H. SO, D. S. YU, C. Y. CHUANG : "Formation and wear mechanism of tribo-oxides and the regime of oxidational wear of steel" Wear, 253(9-10) 2002 1004-1015
31. M. HANS JOERG ; E. BERGMANN; R. GRAS: Traité des matériaux : 4, Analyse et technologie des surfaces, Couches minces et tribologie. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne. 2003
- 32.- MACHLIN-YANKEE Journal of applied physics Vol. 25 n° 5 (May 1954)
33. R. GRAS : "Compatibilité des matériaux au frottement". Polycopie cours : "Mécanique des surfaces et tribologie" ISMEP / SUPMECA Saint-Ouen, 2006.
34. O. DALVERNY: "Vie tribologique à chaud et température interfaciale dans des contacts céramiques" Thèse Mécanique: Université de Bordeaux, 1998 231 p.
35. J. LARSEN-BASSE, : Basic theory of solid friction, ASM Handbook vol. 18, Surface, lubrication and wear technology, Edition P.J. Blau, ASM International, 27-38, 1992.

36. F. P. BOWDEN, D. TABOR, "The Friction and Lubrication of Solids Part I" (1958) Clarendon Press, Oxford. Reprint in the Oxford Classics Series (2001) Oxford University Press (374 pages), ISBN 0-19-850777-1.
37. J. A. GREENWOOD, J. B. P. WILLIAMSON : "Contact of nominally flat surfaces". Proc. Roy. Soc. A 295, (1966).