

Chapitre I

Endommagement des contacts et des surfaces

Endommagement est pris au sens général de détérioration et non au sens de la Mécanique de l'endommagement introduite par Rabotnov et Kachanov [1.1] où l'endommagement est associé uniquement à la génération et à la propagation de fissures.

1. SURFACES ET INTERFACES

1.1. Surfaces

Les solides dont les surfaces sont sujettes à l'usure, appartiennent à la large gamme des matériaux : cristallins, amorphes, ou semi-cristallins. En pratique, on rencontre encore le plus fréquemment, dans les applications technologiques, des solides cristallins. Quel que soit le type de matériaux, le procédé d'obtention et l'environnement (aérobie ou non, humidité ...) font que la surface n'a pas la même structure et la même composition que le matériau massif. En réalité, on ne peut donc pas parler de surface mais d'une couche superficielle de transition très hétérogène [1.4]. Cette couche superficielle a une épaisseur variable selon le mode d'élaboration pratiqué : elle est composée d'atomes provenant à la fois du matériau et du milieu environnant. Dans le cas de matériaux métalliques, on peut la décrire par une structure stratifiée (Figure 1.1).

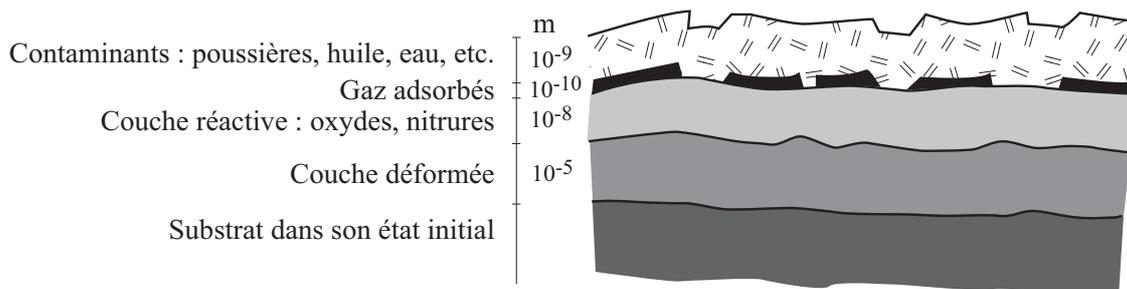


Figure 1.1 : couches de surfaces.

Echelle non-respectée.

La couche de contaminants peut avoir plusieurs origines.

- Des molécules de gaz sont adsorbées à l'interface matériau–environnement gazeux. L'adsorption est le fait du champ de forces intermoléculaires. Ces forces peuvent être classées en liaisons fortes (ioniques, covalentes, métalliques) et en liaison faibles (liaison hydrogène, force de Van der Waals) c.f. annexe 1. L'adsorption physique a pour origine les forces de Van der Waals.

- De l'eau provenant de l'humidité de l'air peut également être adsorbée à la surface du matériau.
- De plus, lorsque des molécules polaires (provenant d'une pollution ou d'une lubrification, par exemples) sont mises en présence d'une surface, l'adsorption provoque la formation d'un épilamen [1.2] selon l'état, la nature de la surface et la polarité de ces molécules. L'état physique de l'épilamen mono-moléculaire est assimilable à l'état solide, son épaisseur est très petite par rapport aux aspérités de surfaces. Outre l'adsorption physique peut se produire la chimisorption où les forces de liaison sont plus importantes et conduisent à des échanges électroniques : on obtient alors des couches plus solidement accrochées.
- Si la couche de contaminants existe quelle que soit la nature du matériau de base (métallique ou non), la couche d'oxyde n'existe que pour les métaux, sauf pour certains d'entre eux (or et platine).
- Dans le cas de métaux, la création de la surface d'une pièce mécanique peut être obtenue par plusieurs techniques (agencement ou enlèvement de matière par exemples). Dans le cas d'agencement de matière tels que formage ou fonderie l'élaboration est souvent complétée par un usinage. La génération des surfaces par enlèvement de matière est de ce fait assez générale. L'enlèvement de matière est classiquement obtenu par décohésion à l'aide d'un outil coupant (tournage, fraisage ...) ou à l'aide de grains abrasifs (rectification, pierrage, rodage ...). La structure cristalline superficielle est profondément modifiée sous l'influence des pressions et des températures élevées de contact. La perturbation de la couche sous-jacente (fissurations, désorientations) est plus ou moins profonde, de 1 à 200 μm , selon les conditions d'usinage. Seules les surfaces générées sans contraintes mécaniques, par électroérosion, dépôts sous vide, polissage électrolytique, ne présentent pas de couches déformées.
- Dans le cas des autres matériaux les surfaces sont tout autant hétérogènes. Une ségrégation peut se produire en surface des pièces polymères lors du moulage. Le frittage des céramiques induit une porosité importante et des zones amorphes ou semi-cristallines. La porosité est atténuée dans le cas de frittage d'une céramique complexe avec une phase liquide. Si on considère les matériaux composites, les matériaux chargés ou les revêtements de surface (dont les spécificités de comportement seront étudiées dans le chapitre II), l'hétérogénéité est évidemment importante puisque recherchée.

1.2. Interface en mécanique

L'interface, en mécanique, est constituée de deux surfaces en contact statique ou dynamique, sous un certain état de contrainte et de déformation.

Les surfaces des corps réels comportent des aspérités dont les dimensions sont très grandes si on les compare à la maille atomique. Ces aspérités existent quel que soit le soin apporté à la génération des surfaces. Le contact s'établit par l'intermédiaire de ces aspérités et de produits interfaciaux en des zones discrètes. Chaque contact discret constitue un réacteur élémentaire qui sera le siège de tous les phénomènes décrits ultérieurement, usure en particulier (Figure 1.2) [1.3]. L'usure est définie comme étant la perte progressive de matière à la surface active d'une pièce par suite du mouvement relatif d'un autre corps sur cette pièce.

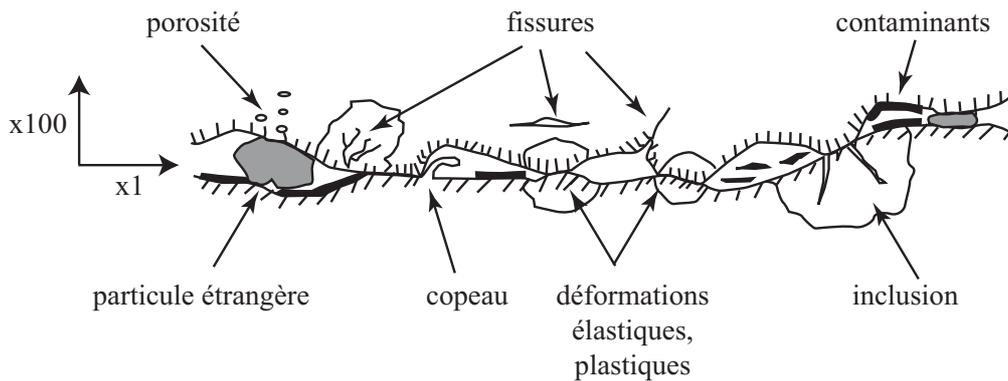


Figure 1.2 : coupe schématisée de l'interface en tribologie.

Usure adhésive

Au niveau des zones discrètes de contact de l'interface, suite au rapprochement des surfaces de deux solides, les forces intermoléculaires deviennent non négligeables lorsque la distance qui sépare ces éléments de surface est assez petite (quelques nanomètres). Ces forces croissent lorsque la distance diminue. Ce phénomène est appelé phénomène d'adhésion et l'état qui en résulte est l'état d'adhérence. Dans le cas de deux métaux, cette liaison chimique est appelée couramment une micro-soudure (Figure 1.3).

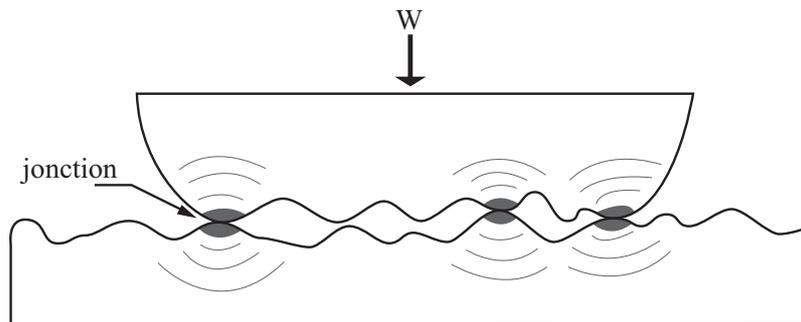


Figure 1.3 : formation de jonctions à l'interface.

L'effort nécessaire pour rompre les jonctions élémentaires ainsi formées est responsable de la force de frottement. Deux cas peuvent alors se présenter.

Si la liaison adhésive ainsi obtenue, appelée jonction, est plus faible que l'un et l'autre des deux corps, la rupture se produit là où la liaison a été créée, c'est-à-dire le long de la surface définissant la jonction (Figure 1.4). L'usure des deux surfaces est alors très faible ou nulle : c'est généralement ce qui se produit si la liaison est dominée par les forces de type Van der Waals.

En revanche, si la liaison est plus résistante que les matériaux qui lui ont donné naissance, la rupture a lieu dans la masse du matériau le plus faible dont un fragment est transféré sur le matériau antagoniste. Il y a transfert de matière d'une surface sur l'autre, c'est-à-dire une usure adhésive [1.4].

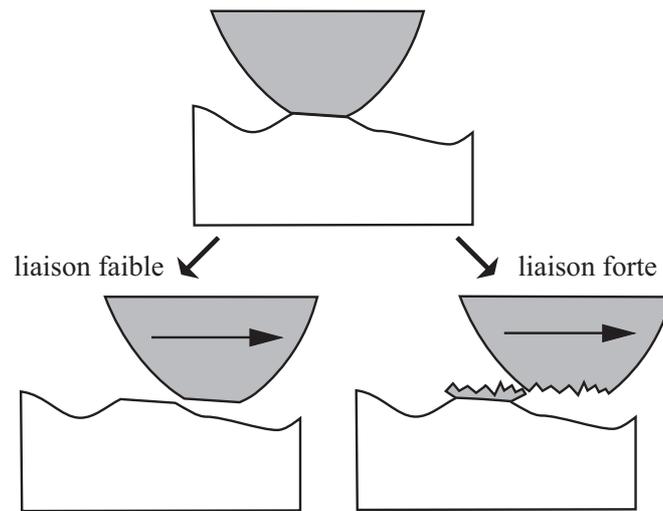


Figure 1.4 : cisaillement des jonctions à l'interface.

En présence de couches superficielles (oxydes, gaz ou molécules polaires adsorbées), les liaisons fortes sont annihilées et l'adhérence est plus faible [1.5].

L'adhésion dans le cas de polymères est principalement due aux forces de Van der Waals [1.6]. Avec des molécules polaires, il peut y avoir des liaisons hydrogène. Le transfert de charges électriques à l'interface induit un apport électrostatique à l'attraction adhésive. Tous ces phénomènes qui contribuent à l'adhésion interfaciale des métaux, polymères, céramiques, font que les forces d'adhésion sont aussi naturelles que les forces qui assurent la cohésion au cœur des solides.

Usure abrasive

Dans le cas de deux pièces en contact de glissement, de roulement ou de pivotement l'une sur l'autre, une aspérité de surface peut rayer l'autre surface. On est en présence d'abrasion à deux corps. Si un fragment d'usure détaché d'une surface, écrasé par déformations successives, devient plus dur et se comporte comme une particule abrasive ou si une particule étrangère pénètre dans l'interface on a alors de l'abrasion à trois corps [1.7] (Figure 1.5). L'usure abrasive se traduit par une déformation irréversible, mais pas nécessairement et exclusivement par un enlèvement de matière [1.12].

Si la particule abrasive, protubérance ou aspérité, est de forme convenable et sa pénétration suffisamment faible, l'abrasion consiste en une déformation plastique sans enlèvement de matière (cas d'une surface ductile). La trace ainsi créée s'appelle un micro-sillon de labourage. Dans des conditions analogues une surface fragile conduit à des arrachements et des fractures. On parle alors d'une trace de micro-fractures. En revanche, si la particule présente des angles vifs, convenablement orientés par rapport au sens de glissement, l'abrasion est analogue à un processus de coupe et la trace obtenue est une rayure de micro-coupe.

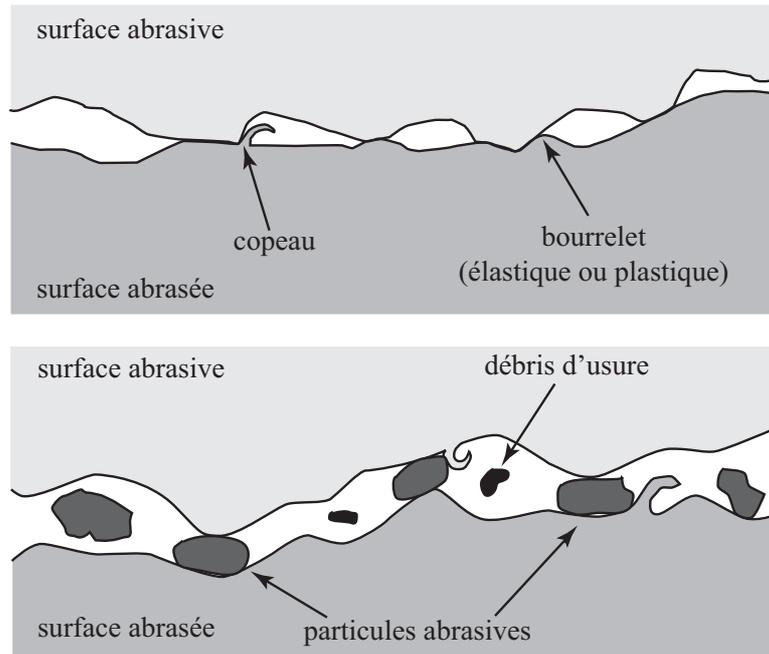


Figure 1.5 : abrasion à deux ou trois corps.

Abrasion à deux corps (en haut) et abrasion à trois corps (en bas).

Chacune de ces variantes de l'abrasion a des aspects caractéristiques (Figure 1.6) [1.12].

- L'abrasion accompagnée de micro-sillons de labourage est caractérisée par une importante déformation plastique et un faible taux d'enlèvement de matière.
- L'abrasion caractérisée par la prédominance de rayures de micro-coupe est facilement reconnaissable par la présence de micro-copeaux et par un enlèvement de matière important.
- L'abrasion dominée par des micro-fractures, de nombreuses fissures et des éclats conduit également à un important taux d'enlèvement de matière.

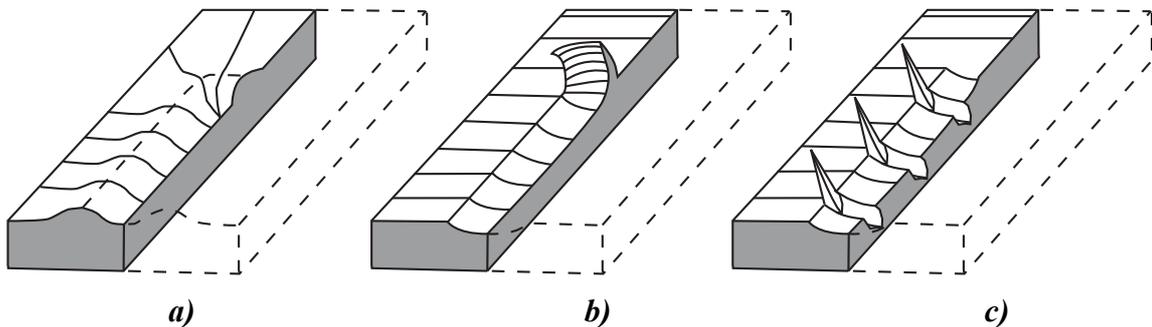


Figure 1.6 : illustration schématique des différents modes de déplacement et d'enlèvement de la matière en abrasion.

Par la formation de : a) micro-sillon, b) micro-copeau ou c) micro-fracture.

Ces trois types d'abrasion se manifestent à des degrés variés selon les conditions tribologiques, rhéologiques et cinématiques des interfaces. Parfois ils cohabitent.

Si le terme d'abrasion implique l'existence d'une aspérité ou d'une particule abrasive, le terme d'érosion est réservé aux mécanismes faisant intervenir un transport fluide des particules abrasives [1.7].

Usure par fatigue

Les aspérités d'une surface transmettent les contraintes à la surface en regard, même en présence d'un film lubrifiant ou d'un contaminant interfacial.

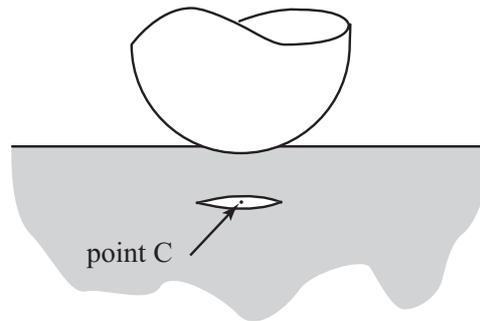


Figure 1.7 : point de cisaillement maximum, C, initialisation de la rupture.

Le point de cisaillement maximum, C, est situé sous la surface (c.f. § 3). De par les chargements répétés, la déformation plastique, la décohésion et la rupture sont initiées dans cette région, en particulier s'il existe des hétérogénéités de structure du matériau (Figure 1.7).

Après un certain nombre de cycles, un fragment est désolidarisé de la surface, sous forme d'écaille. Le fragment d'usure par fatigue ainsi généré est de taille importante (quelques centaines de microns) si on la compare à celle des particules transférées lors de l'usure adhésive (quelques dizaines de microns).

Usure tribochimique

Dans ce processus d'usure, l'effet dominant consiste en une réaction chimique ou électrochimique de la surface avec le milieu environnant. On peut considérer deux phases distinctes [1.7].

- Une réaction chimique ou électrochimique et une corrosion des surfaces selon un processus classique.
- Un enlèvement du film de matériau corrodé lors du mouvement relatif des pièces en contact et une mise à nu du matériau sous-jacent permettant le renouvellement du processus.

La cavitation

La cavitation désigne un processus au cours duquel la vaporisation des liquides peut s'effectuer sous l'effet de dépressions. Elle se produit dans les machines hydrauliques en s'accompagnant de la génération de bruit, de la perte des performances et également d'usure : l'enlèvement de matière de la surface d'une pièce se produit alors sans qu'intervienne une surface solide antagoniste.

La vaporisation d'un liquide désigne sa transformation en vapeur, c'est ce qui se produit quand de l'eau est portée à ébullition. Elle peut également être provoquée par une mise en dépression, comme lors de l'ouverture d'une bouteille de boisson gazeuse. Dans les machines hydrauliques, la pression au sein du fluide est reliée à sa vitesse par l'équation de Bernoulli. Si la vitesse augmente, la pression diminue. A une valeur critique de la vitesse, si la pression atteint la tension de vapeur du liquide, des bulles apparaissent, le liquide se vaporise : la cavitation est initiée. C'est ce qui se produit au niveau des profils d'ailes, des pales d'hélices, des aubes de turbines.

Les bulles de vapeur ainsi formées sont entraînées par l'écoulement fluide. Quand elles sortent de la zone de cavitation (en dépression), elles se condensent, d'autant plus brutalement que les gradients de pression sont importants. Si la condensation a lieu près d'une paroi solide, les vitesses atteintes par les parois des bulles sont suffisamment importantes pour créer des impacts qui endommagent le matériau [1.53] : c'est l'érosion de cavitation. Ce phénomène peut être très rapide, d'une ampleur considérable et reste difficile à maîtriser. La perte de masse dépend du matériau, du fluide en mouvement, de sa température et de sa vitesse : en régime stabilisé d'érosion, la perte de masse est une fonction de la vitesse à une puissance variant entre 1 et 19. La puissance 6 est généralement admise.

Si la cavitation est surtout source de nuisances, ses effets sont parfois recherchés (usinage et nettoyage par ultrasons, aide au forage pétrolier, création d'émulsions et de jets d'encre par exemple).

Réalité de l'usure

Dans la plupart des cas, on rencontre une combinaison de phénomènes d'usure élémentaires.

- L'adhésion conduit au transfert du matériau.
- Des micro-fractures sont initiées à la surface et sous la surface des pièces, les déformations superficielles sont anisotropes et aléatoires.
- Sous l'effet de la déformation répétée, particulièrement en l'absence de lubrification, la décohésion d'un fragment de la surface est aisée [1.8].
- Les fragments transférés d'un corps sur l'autre ou libérés dans l'interface peuvent, après écrouissage, engendrer des phénomènes d'abrasion.
- La surface est, dans la plupart des cas réels, recouverte d'un film contaminant d'oxydes, de sulfures ... Si la déformation globale du contact est limitée, l'usure intéresse principalement le film superficiel et est fonction des facultés d'enlèvement et de reconstitution de ce film.
- Des transformations se produisent dans l'interface en glissement : modifications géométriques, transformations superficielles de nature chimique ou métallurgique.
- Un film mou peut être créé lors du frottement par suite des réactions tribochimiques : phénomène observé en présence de certains lubrifiants [1.9].
- Une couche dure peut être générée lors du frottement par transformations métallurgiques : phénomène observé le plus souvent avec des matériaux ferreux [1.10].

- La chaleur dégagée lors du frottement peut accroître la diffusion des éléments dans l'interface et ainsi les facultés d'adhésion entre surfaces non lubrifiées.
- Dans le cas de systèmes lubrifiés, l'échauffement a un effet important sur l'efficacité du film protecteur (il peut y avoir désorientation, désorption, transformation chimique de la couche superficielle) [1.11].
- Le comportement de l'interface est fonction de l'histoire des matériaux en regard, du taux de déformation des surfaces sollicitées, de l'évolution de leurs caractéristiques mécaniques (aspect rhéologique du comportement de l'entité interfaciale).

2. CARACTERISATION MICROGEOMETRIQUE DES SURFACES

Toutes les surfaces sont rugueuses à une échelle plus ou moins microscopique quel que soit le domaine industriel (électronique, mécanique, génie civil ...) et le procédé d'élaboration utilisé :

- procédé par enlèvement de matière mécanique ou chimique,
- procédé par agencement de matière : formage et moulage,
- procédé par séparation de matière,
- procédé par dépôt de matière ...

La rugosité est donc liée à l'échelle à laquelle on s'intéresse : macro-rugosité pour des surfaces de génie civil (paroi de béton, enrobé de route), micro-rugosité pour les surfaces usuelles de la mécanique, nano-rugosité en électronique.

Les critères de qualification de la rugosité sont plus ou moins complexes en fonction des besoins.

Les premiers critères de qualité micro-géométrique furent des signes empiriques d'indication du façonnage définissant l'aspect des surfaces (alliages ferreux) en fonction de l'application recherchée : aspect terne, gris, brillant, glacé.

Les critères chiffrés [1.14] prennent en compte la distribution de la hauteur des défauts de surface (Figure 1.8).

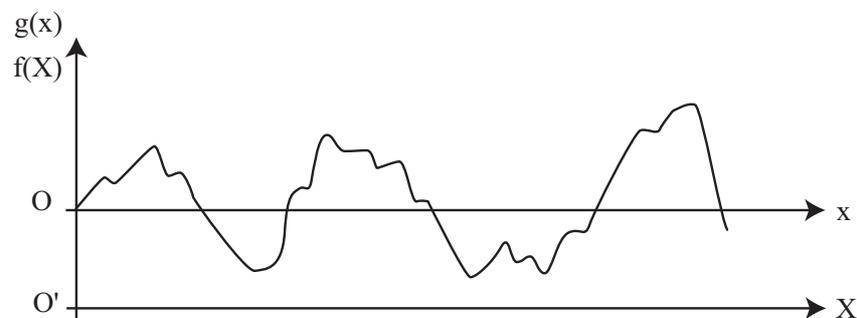


Figure 1.8 : exemple de profil de surface.