

## Introduction

La tribologie est la science du comportement de surfaces en interaction lors du frottement. Ces surfaces, animées d'un mouvement relatif l'une par rapport à l'autre, fonctionnent en systèmes dynamiques et ouverts [1].

La tribologie résulte des problèmes posés dans un grand nombre d'applications pratiques (roulements, pièces mécaniques en mouvement de rotation ou de translation), avec des matériaux traditionnels tels les métaux, les alliages, le verre et, plus récemment, les polymères voire même les composites, dans des secteurs comme la métallurgie, l'aéronautique, la mise en œuvre de films plastiques pour les bandes magnétiques (vidéo et son), l'industrie du disque, la biologie (prothèses et biomatériaux), etc. Le frottement polymère sur polymère tient donc une place de plus en plus importante.

Il convient de distinguer frottement sec et frottement lubrifié ; dans ce dernier cas, un liquide ou un solide adéquat ( $\text{MoS}_2$ , noir de carbone) est présent à l'interface entre les deux solides. Le frottement sec sera essentiellement examiné ici.

On admet couramment que lors du frottement, propriétés de surface et propriétés mécaniques des matériaux interviennent dans le comportement à court et à long terme. Après une première période de mise en régime (running-in), un état d'équilibre ou de quasi-équilibre (état stationnaire) s'observe en fonction du temps.

Les polymères sont des matériaux organiques macromoléculaires, correspondant à un grand éventail de propriétés chimiques et mécaniques, avec une énergie de surface faible, de l'ordre de 19 à 50  $\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ . Les polymères peuvent être durs et rigides, cassants ou souples (plastiques, élastoplastiques, viscoélastiques) et donnent donc lieu à des phénomènes d'abrasion, d'érosion et de fatigue, lors du frottement. Il en résulte un transfert d'un matériau solide sur l'autre.

La tribologie peut se rattacher à des disciplines variées, telles la mécanique, la rhéologie des polymères, la physico-chimie des surfaces et des interfaces et la thermodynamique des processus irréversibles. Quand un solide frotte sur un autre solide à vitesse élevée, le travail dépensé pour lutter contre la force de frottement est libéré sous forme de chaleur dissipée [2].

En toute généralité, le frottement est caractérisé par le coefficient de frottement  $\mu$ , qui par définition est le rapport entre la force tangentielle,  $F_T$ , s'établissant au cours du frottement et la force normale appliquée,  $F_N$  :

$$\mu = F_T / F_N \quad (1)$$

Les mesures de la force tangentielle se font à l'aide d'un tribomètre, pour une force normale donnée, à une vitesse de rotation contrôlée et constante, avec passages successifs d'un pion sur un substrat plan.

Afin de préciser les différents aspects du frottement sec polymère-polymère, les théories proposées dans les divers travaux publiés ainsi que les modes de transfert spécifiques aux polymères sont examinées.

## Les aspects généraux du frottement sec polymère-polymère

Le frottement polymère-polymère a fait l'objet de nombreux travaux.

La théorie la plus générale est celle de Bowden et Tabor [3] : la force de frottement est exprimée par la somme d'une force due à l'adhésion entre les deux corps en contact,  $F_a$ , et d'une force due à la déformation,  $F_d$  :

$$F = F_a + F_d \quad (2)$$

En général, la composante d'adhésion l'emporte largement sur la composante de déformation.

Dans le cas particulier des élastomères, les théories moléculaires de Schallamach [4] et Bartenev [5, 6] ont été proposées : elles attribuent le frottement à des mouvements de chaînes élastomères après formation et rupture de liaisons adhésives avec le substrat rigide.

Les théories macroscopiques, comme celles de Bulgin et coll. [7] ou Kummer [8], font intervenir dans l'expression du coefficient de frottement des propriétés telle que la dureté,  $H_a$ , la résistance au cisaillement de la liaison adhésive,  $\tau_0$ , les modules d'élasticité,  $E$ , ou le facteur de pertes mécaniques,  $\text{tg}\delta$ . Ainsi, selon Bulgin [7], le coefficient de frottement  $\mu$  s'écrit :

$$\mu = c^e(\tau_0/H_a)\text{tg}\delta \quad (3)$$

Selon Suh et Sin [9], le coefficient de frottement est la triple somme d'un terme d'adhésion, d'un terme dû aux déformations réversibles et d'un terme dû aux déformations permanentes. Par la composante de déformation, qu'elle soit passagère ou permanente, le coefficient de frottement dépend alors des propriétés mécaniques massiques des matériaux.

Il faut aussi tenir compte dans le frottement sec de certains processus intervenant à plus grande vitesse, comme la fusion du polymère. Le polymère fondu joue alors le rôle d'autolubrifiant et les forces dues à la viscosité sont responsables du comportement au frottement. L'orientation des chaînes polymères est également un facteur important [11].

Les principales théories s'appliquant au frottement polymère-polymère relèvent de l'influence : des propriétés mécaniques, des propriétés de surface, des effets électrostatiques. Les diverses approches qui sont proposées dans les travaux publiés pour le frottement sec sont reliées à ces trois aspects.

## Les théories du frottement polymère-polymère

De nombreux auteurs [3, 10-19] pensent que le coefficient de frottement est lié à l'adhésion entre les deux polymères mais dépend aussi de la cohésion des matériaux. Trois théories fréquemment proposées sont rappelées.

## 1. La théorie mécanique

Selon de nombreux auteurs, seules les propriétés mécaniques des deux polymères en présence détermineraient le comportement lors du frottement. Il semble toutefois illusoire de penser que les propriétés de volume puissent permettre à elles seules de prévoir le comportement en tribologie, qui reste limité surtout aux interactions en surface. Des conclusions issues de l'étude du frottement sur métal sont tout d'abord rappelées.

Une expression générale du coefficient de frottement entre deux métaux [14] relie celui-ci à la contrainte de cisaillement de l'interface formé sous frottement,  $\tau$ , et à la pression au seuil d'écoulement,  $p$ , du métal le plus mou :

$$\mu = \tau/p \quad (4)$$

Outre les propriétés mécaniques, la rugosité de surface joue également un rôle important car elle conditionne l'usure et la formation de débris. Il est communément admis que l'usure est davantage influencée par les propriétés mécaniques que par les propriétés de surface [17]. Dans le cas où les propriétés mécaniques de volume sont responsables du comportement en frottement, l'équivalence temps-températures valable pour ces propriétés volumiques se retrouve dans l'évolution du coefficient de frottement [10, 11], avec des matériaux viscoélastiques par exemple.

L'influence de la structure des polymères sur le frottement a été mise en évidence [20, 21]. Ainsi la structure sphérolitique d'un polymère ou l'irradiation ont un effet comparable à celui d'une rugosité superficielle et conduisent à une abrasion, par effet mécanique ou mécano-chimique (tribochimique). Dans le cas du polyéthylène, la résistance à l'abrasion est augmentée pour les hauts poids moléculaires [22]. Avec le polypropylène, le coefficient de frottement diminue lorsque le diamètre des sphérolites augmente. Par ailleurs, le polyéthylène non ramifié a un coefficient de frottement plus faible que le polyéthylène ramifié.

La formation de radicaux libres, lors du frottement à température élevée ou à fortes vitesses, s'observe avec de nombreux polymères, tel le polychlorure de vinyle [23] ou le polyméthacrylate de méthyle [12].

Des lois reliant le coefficient de frottement aux propriétés mécaniques des polymères sont connues. Spurr [24] propose une relation entre la résistance à la rupture,  $\sigma$ , la dureté,  $p_0$ , et un paramètre faisant intervenir les forces de surface,  $\cot\psi$  :

$$\mu = (\sigma/p_0) \cot\psi \quad (5)$$

L'orientation des chaînes polymères peut être prise en compte dans certains cas. Ainsi avec un polyamide 6, le coefficient de frottement est maximal lorsque les deux polymères ne sont pas orientés [11].

Dans le cas du frottement à grande vitesse, les forces dues à la viscosité deviennent prépondérantes. Le coefficient de frottement,  $\mu$ , peut alors s'écrire [20] :

$$\mu = \rho V/c \cdot S_r/N \quad (6)$$

$c$  étant l'épaisseur de la couche fondue,  $S_r$  la surface de contact réelle,  $\rho$  la viscosité du polymère fondu et  $N$  la charge mécanique appliquée. L'un des problèmes posés, d'une importance fondamentale, est celui de la relation entre l'aire réelle et la charge totale transférée, qui dépend de l'accommodation des deux surfaces frottantes.

Avec le polyméthacrylate de méthyle, l'énergie dissipée par unité d'aire de fissure formée est de plusieurs ordres de grandeur supérieure à la valeurs correspondant à la rupture de liaisons covalentes [25]. La polarité des groupes latéraux interviennent également car elle favorise les liaisons adhésives avec le polymère en contact. Ceci constitue l'autre aspect des interactions lors du frottement polymère-polymère.

## 2. La théorie de l'adhésion

De nombreux auteurs attribuent à l'adhésion entre polymères un rôle majeur dans le comportement en frottement [2, 14, 15]. Les couples de polymères identiques, qui sont susceptibles de conduire à une adhésion élevée par autoadhésion, ont le coefficient de frottement et le taux d'usure les plus élevés. Le paramètre retenu est l'énergie réversible d'adhésion,  $W_0$ , calculée à partir de la connaissance des propriétés de surface des polymères.  $\gamma_s^D$  étant la composante dispersive de l'énergie de surface des solides, due aux forces de liaisons physiques de type London, et  $\gamma_s^P$  la composante polaire due aux forces non dispersives d'interactions dipolaires, on écrit communément pour deux solides  $S_1$  et  $S_2$  [26] :

$$W_0 = 2 \sqrt{\gamma_{S_1}^D \cdot \gamma_{S_2}^D} + 2 \sqrt{\gamma_{S_1}^P \cdot \gamma_{S_2}^P} \quad (7)$$

La détermination de ces grandeurs se fait par étude de mouillabilité, en mesurant l'angle de contact de liquides sélectionnés à la surface des solides.

Erhard [15] a montré qu'il y a une relation exponentielle entre le coefficient de frottement à l'équilibre et l'énergie d'adhésion,  $W_0$ , pour le frottement polymère-polymère, dans le cas des surfaces lisses, ainsi que le montre la figure 1.

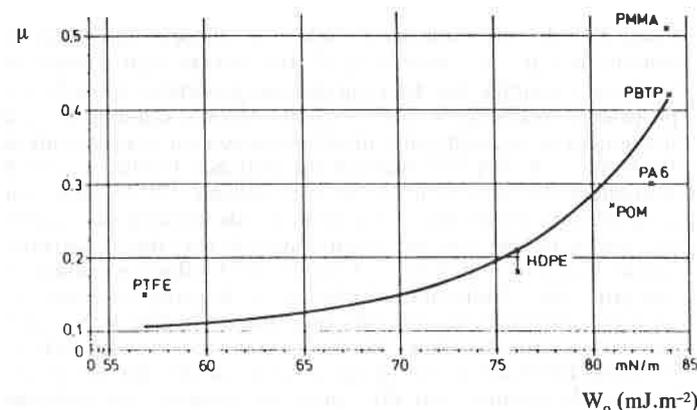


FIGURE 1. - Coefficient de frottement  $\mu$  en fonction du travail d'adhésion  $W_0$  pour du polystyrène frottant sur divers polymères selon [15].

L'adhésion dans ce cas ne résulterait donc que de l'existence de forces de Van der Waals. Il est connu que divers processus peuvent être responsables de l'adhésion [29] : l'interdiffusion des chaînes polymères, les liaisons chimiques résultant de la présence de radicaux formés lors du frottement par coupures de chaînes, l'orientation des bouts de chaîne et des groupements polaires, les interactions de type acide-base. Au cours du frottement, la liaison adhésive par forces de Van der Waals peut être rompue puis se reformer. Par contre, s'il y a déformation, il y a dissipation d'énergie et les propriétés mécaniques des polymères interviennent aussi dans le bilan énergétique [25].

Les deux processus les plus répandus en tribologie sont : le labourage du solide le plus mou par les aspérités du solide le plus dur et le cisaillement des régions où il y a contact adhésif. Selon le cas, l'un ou l'autre de ces comportements prédomine. Si les liaisons adhésives sont faibles, il y aura rupture à l'interface. Pour de fortes liaisons à l'interface, la rupture se produit plutôt dans le polymère et, en général, le coefficient de frottement peut être plus élevé. Néanmoins, il y a des cas où une adhésion forte peut correspondre à un coefficient de frottement faible.

Selon Jain et Bahadur [28], le transfert se ferait du polymère de plus basse énergie de cohésion vers celui de plus haute énergie de cohésion ; la figure 2 illustre ces observations.

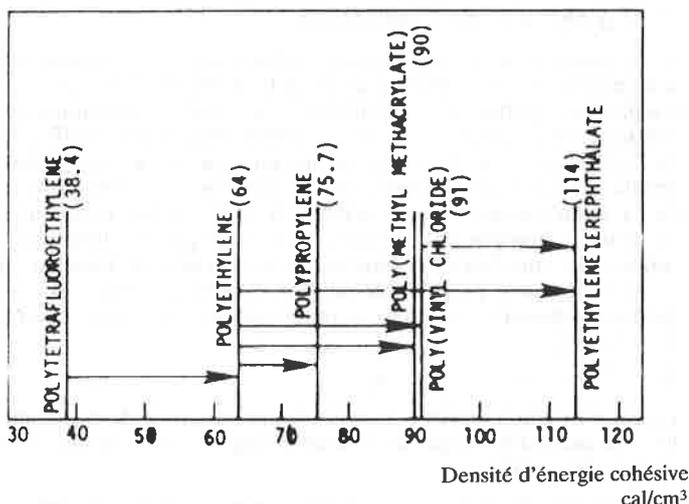


FIGURE 2. - Sens du transfert pour différentes combinaisons de polymères selon [28].

Dans l'étude de l'adhésion, selon la théorie de Gent et Schultz [30], il a été montré qu'il convient de tenir compte de l'influence couplée des deux paramètres propriétés de surface et propriétés mécaniques. Des résultats récents obtenus pour le frottement de polyéthylènes modifiés ou non sur des substrats de PMMA ou de PA [57] mettent en évidence l'influence sur le coefficient de frottement de la contribution due à l'adhésion, celle-ci étant caractérisée par l'énergie de rupture déterminée par test de pelage avec des assemblages de ces mêmes polyéthylènes sur feuille d'aluminium. Ceci illustre l'influence simultanée des propriétés d'adhésion interfaciale et des propriétés mécaniques des matériaux au cours du frottement, de telle sorte que la distinction entre les deux théories devient moins nette. S'il y a adhésion interfaciale, l'influence couplée des propriétés de surface et de volume doit être prise en compte : en l'absence d'adhésion interfaciale notable, les propriétés mécaniques massives seules pourraient régir le comportement tribologique.

### 3. La théorie électrique

Une autre manière d'aborder le frottement a été proposée en faisant appel aux charges électrostatiques formées. L'approche électrique de la tribologie peut être comparée à la théorie électrique de l'adhésion publiée par Deryagin [31] : l'assemblage polymère-métal est assimilé à un condensateur plan et, lors de la rupture de l'assemblage, des exoélectrons sont émis. Au cours du frottement, il y a électrisation des surfaces et émission d'électrons provenant des fissures formées. Une forte analogie entre ces deux théories apparaît ainsi.

La présence d'un dérivé chimique à la surface d'un solide augmente la ductilité superficielle en modifiant la répartition des charges électriques : ceci correspond à l'effet Rehbinder [34]. Un film d'eau sur des cristaux d'halogénures peut rendre ductile la surface. L'adsorption de gaz (oxygène, vapeur d'eau) peut aussi conduire à des émissions d'électrons au frottement : il s'agit d'électrons extrinsèques.

Souvent des différences de potentiel se développent au cours du frottement [32, 33]. Des tentatives ont été faites pour effectuer des expériences sous champ appliqué [11]. Avec des caoutchoucs chargés en noir de carbone, la force de frottement sur acier augmente de 200 à 300 % sous l'effet d'une différence de potentiel en courant continu [35]. Un champ alternatif peut convenir également.

L'électrisation des polymères lors du contact est connue de longue date ; elle est due à des différences de potentiels de contact.

Pour des polymères de natures différentes, la densité de charges électrostatiques formées par frottement présente un maximum pour leur température de transition vitreuse, selon une étude effectuée avec du polystyrène et du polyamide 6 à différentes températures [53]. Le mouvement des chaînes moléculaires a une grande influence sur l'électrification lors du frottement [36].

Les électrons à la surface du matériau sont activés par les déformations. Ces observations concernent en priorité les interfaces polymère-métal [37]. La structure de bandes des métaux ou la présence d'états localisés, donneurs ou accepteurs, dans celle des polymères permet une modélisation de l'interface.

Dans le cas du contact entre deux polymères, un bon accord entre valeurs de distribution d'énergie permettant de prédire le contact polymère-polymère et valeurs expérimentales s'observe [38].

L'aspect électrique de la tribologie reste peu exploité. Le frottement génère les charges électriques, donc les charges sont la conséquence plutôt que la cause des interactions entre les deux polymères. Cette conclusion reste proche de celle de l'étude électrique de l'adhésion.

Le transfert d'un matériau sur un autre est un paramètre caractéristique du frottement.

## L'usure et le transfert au cours du frottement polymère-polymère

Dans la plupart des cas, le transfert provient d'une situation complexe relevant souvent de plusieurs mécanismes [17, 39, 40].

Le transfert est proportionnel à la charge mécanique normale appliquée et représente la quantité de matériau transféré de l'une des surfaces solides en contact sur l'autre. Il peut aussi y avoir formation de débris, qui sont entraînés sur le matériau substrat : ceci correspond à l'usure. La température au niveau du contact des matériaux est un paramètre déterminant.

Divers modes d'usure peuvent être opérants [58] :

- usure par abrasion,
- usure par fatigue,
- usure chimique,
- usure adhésive.

### 1. L'usure par abrasion

Elle résulte du frottement d'un matériau fragile qui forme des débris par abrasion au contact d'un matériau plus dur ou par suite de ruptures dans le polymère, consécutives à la déformation résultant de l'adhésion localisée. Ceci correspond à un cas très fréquent se produisant avec les polymères fragiles ou les élastomères et résulte de la présence de fissures et de dissipations d'énergie en volume. Il s'agit d'un processus mécanique, conduisant à la formation du "troisième corps", qui est une zone de contact lubrifiée par les débris broyés et compactés. Cette théorie a été proposée par Rabinowicz *et al.* [62] en 1961.

Un modèle recensant les diverses possibilités de formation du troisième corps a été proposé par Berthier, Brendle et Godet [52], elles sont contrôlées par la rhéologie des polymères et les conditions au contact.

Une relation linéaire entre le taux d'usure pour un seul passage en frottement et le travail de rupture pour divers polymères ductiles a été mise en évidence par Lancaster [41] : il y a usure cohésive dans la masse de polymère. La figure 3 montre qu'il existe une relation entre l'usure et les propriétés de rupture des polymères,  $\sigma$  étant la contrainte et  $\epsilon$  l'allongement à la rupture. Le frottement du polyméthacrylate de méthyle [41, 51] ou du polytétrafluoroéthylène modifié par irradiation [40] illustre ce mode de transfert.

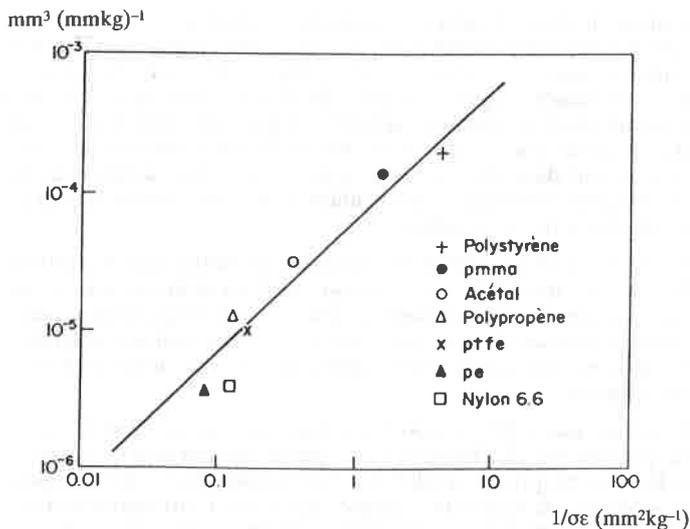


FIGURE 3. - Relation entre le taux d'usure et l'inverse du produit de la contrainte et de l'allongement à la rupture pour différents polymères selon [41].

## 2. L'usure par fatigue

Elle dépend de la rugosité de la surface en contact et du module d'élasticité du polymère, et augmente avec la charge normale appliquée. Lors du passage répété d'une aspérité sur un support, il y a modification des propriétés de résistance à la rupture et, finalement, il peut y avoir détachement d'une particule [43]. L'usure par érosion résulte de l'arrachement par abrasion ou fatigue, par suite de la présence de particules très fines et très dures. Ce type d'usure concerne peu les polymères toutefois.

## 3. L'usure chimique

Lorsqu'il y a dégradation du polymère par scission de chaînes par exemple ou par décomposition thermique ou oxydative [23], des effets tribochimiques ont été observés avec de nombreux polymères et constituent un cas de transfert adhésif. Les résines et les élastomères sont plus sensibles à ce type de transfert que les polyoléfines ou les polytétrafluoroéthylènes [17]. Le solide est ensuite éliminé sous forme de particules par abrasion ou fissuration.

## 4. L'usure adhésive

Ce modèle est largement utilisé avec les polymères [42]. Lors du frottement, des contacts sont formés et, lorsqu'une force tangentielle est appliquée, ceux-ci sont rompus selon un procédé qui peut être complexe. Certaines jonctions résistent et sont soumises à un cisaillement, tandis que d'autres se défont ou se forment. Les polymères créent en général leur propre lubrifiant à l'interface. Il est évident que, dans un tel comportement, les propriétés de surface et les propriétés mécaniques de volume sont influentes et le problème est étudié indifféremment sous l'un de ces deux aspects. Certains auteurs privilégient les propriétés de surface, exprimées par les énergies de surface, d'autres s'en réfèrent aux propriétés volumiques. Selon Belyi et coll. [60], le transfert de PTFE est proportionnel à l'énergie d'adhésion calculée,  $W_0$ , ainsi que le montre la figure 4 [61].

Des techniques d'analyse des surfaces sont mises en œuvre par spectroscopie infrarouge, par spectroscopie électronique (Auger, ESCA) ou à l'aide de la microscopie à force atomique. Des modèles ont été établis par Ferrante et coll. [44, 45]. Mais la complexité des processus engagés en tribologie ne peut être prise en compte dans de tels modèles statiques, puisqu'il s'agit de phénomènes dissipatifs irréversibles, avec dégagement de chaleur.

m/s.10<sup>-5</sup> g/m

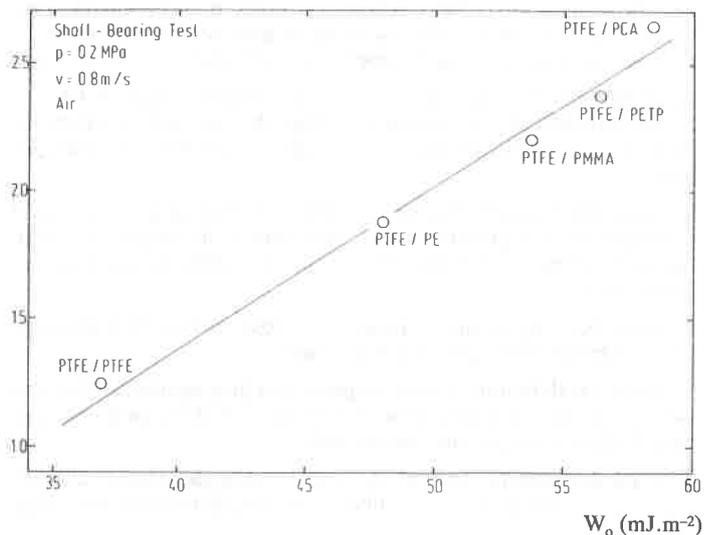


FIGURE 4. - Taux d'usure du polytétrafluoroéthylène au contact de divers polymères en fonction de l'énergie d'adhésion  $W_0$  selon [61].

Les passages successifs sur la couche de transfert conduisent au détachement du film formé puis à son élimination du contact. Un film peut alors se mettre en place à nouveau et le même processus reprend. Les élastomères, par fatigue ou par dégradation chimique, donnent naissance à des lambeaux ; les polymères vitreux conduisent à un transfert par filots isolés. La réorientation des chaînes polymères et leur mobilité sont favorables au transfert [53].

Pour le polytétrafluoroéthylène, les films de transfert formés conduisent à une adhésion faible sur la plupart des substrats et ont une orientation marquée. Ils sont en général très fins (10 nm d'épaisseur) [63]. Des modèles du transfert adhésif du polytétrafluoroéthylène et de ses composites avec des métaux (Zn, Ni, Se, Fe, W) sous forme de poudre sur un acier au carbone ont été proposés récemment [64], l'étude se faisant sous ultravide. Il apparaît qu'il y a formation d'un film de transfert en multicouches formées de morceaux superposés de polymère et la rupture du film se produit toujours entre deux couches de PTFE et non à l'interface avec l'acier. Les débris d'usure sont également sous forme de multicouches. De nombreux résultats peuvent à présent s'expliquer à l'aide de ces modèles et, en particulier, du fait qu'il n'y ait pas d'effet de la nature du substrat sur le transfert adhésif du PTFE. Une manière d'améliorer l'adhésion consiste à incorporer des charges (oxydes de cuivre, de plomb, ...) dans les polymères [27] : elles ont pour rôle de limiter le transfert du polymère (polyéthylène, par exemple).

La présence de charges minérales limite l'usure adhésive en augmentant l'adhésion de la première couche sur la contreface frottante [46]. Une autre manière de considérer le problème est proposée par Tanaka [50], qui suppose qu'une couche riche en charges est formée à l'interface et sépare le polymère de la contreface. Les charges sont moins efficaces pour diminuer l'usure par déformation (abrasion et fatigue).

## 5. Comparaisons entre les divers types d'usure

Deux types de comportements différents s'observent avec les polymères. Le *transfert froid* ou isotherme, aussi appelé *transfert complet*, caractéristique du PTFE, se produit avec peu de dégagement de chaleur et peu de scission de chaînes. L'usure résultant du type de transfert propre au PTFE est appelée usure par transfert [63]. La température joue un rôle important ainsi le

PMMA ne présente pas de transfert en-dessous de la température de transition vitreuse. A fortes vitesses, il y a fusion du polymère et les films de transfert se forment avec scission de chaînes : il s'agit du *transfert chaud*, appelé *transfert total*.

Avec les résines et les caoutchoucs, qui correspondent à des systèmes réticulés, il y a formation de films de transfert par dégradation chimique à vitesse élevée : il s'agit du *transfert avec dégradation*.

L'usure par fusion s'observe avec les thermoplastiques : lorsqu'il y a frottement à grande vitesse, une couche de polymère fondu assure le glissement. Ceci est vrai sur un substrat métallique en particulier.

L'usure par formation de rouleaux s'observe lors de l'abrasion des matériaux élastiques (caoutchoucs).

L'usure par délamination correspond à la propagation de fissures sous la surface, parallèlement à celle-ci ; elle a été proposée par Suh [48] pour les polymères chargés.

L'usure des polymères peut aussi être examinée selon la classification proposée par Briscoe [49], avec une distinction plus large en :

- usure cohésive,
- usure interfaciale ou adhésive.

L'usure cohésive tient compte de la dissipation d'énergie et des modifications dans des zones importantes à proximité de l'interface ; l'usure par abrasion et par fatigue appartient à cette catégorie. L'usure interfaciale concerne des domaines plus restreints : l'usure par transfert, ou adhésive, et l'usure chimique correspondent à ce cas. Selon la nature du polymère (élastomère, vitreux, ductile), divers comportements, avec ou sans formation de débris, sont recensés. Dans le cas de l'usure interfaciale, la nature de l'adhésion initiale joue un rôle important sur le transfert. Le processus a quelques analogies avec le comportement des fibres et l'orientation aux interfaces.

En conclusion, les processus d'usure ne sont pas bien compris à l'heure actuelle [40] malgré une littérature très abondante dans ce domaine. Les travaux publiés restent très qualitatifs, et il conviendrait de tenir compte aussi des grandeurs superficielles résultant de l'adsorption-désorption, comme cela est le cas avec les carbones [49, 55]. Dans le cas du frottement du polyamide sur acier, l'influence de l'eau sur le frottement a été mise en évidence ; le coefficient de frottement dépend des conditions de préparation de la surface du polymère et (ou) des propriétés de volume [59].

L'aspect qualitatif du transfert et de l'usure est l'un des moyens courants d'étude du frottement. Une analyse à l'aide de la théorie des fractals permet aussi de caractériser la morphologie du "troisième corps" [54].

## 6. Polymères autolubrifiants

Les polymères autolubrifiants constituent un aspect intéressant du frottement des polymères. Selon Sviridyonok [65], l'origine de la lubrification peut correspondre à diverses causes telles que la présence d'un lubrifiant solide, la présence de chaînes macromoléculaires linéaires (cas du polyéthylène, du polytétrafluoroéthylène), la fusion de métaux en surface (plomb, étain), la présence de courtes chaînes ou de liquides encapsulés, l'effet d'un champ électrique. Ainsi, les composites à base de polymère et de graphite, huile ou plomb, conduisent à la formation de couches de transfert lubrifiantes qui limitent alors l'usure. Ce domaine est en pleine expansion en raison des nombreuses applications spatiales et aéronautiques.

## Conclusion

L'étude scientifique et systématique de la tribologie a débuté vers les années 1960. Le terme "tribologie" a été proposé en 1966

seulement pour désigner ce domaine particulier de l'étude des interactions solide-solide [56]. Les systèmes étudiés sont des systèmes mécaniques ouverts et dynamiques. Un état stationnaire s'établit toujours après une période de mise en régime (run-in) pouvant aller de quelques secondes à quelques minutes. Le but des essais de laboratoire est de simuler le comportement en fonctionnement dans diverses situations réelles rencontrées dans de nombreuses industries et particulièrement dans l'industrie spatiale, de manière très cruciale.

Le frottement sec polymère-polymère constitue un cas particulier de ces applications et correspond à un domaine en expansion, compte tenu de l'usage de plus en plus fréquent des matériaux plastiques. Le cas des composites fibre-matrice polymère n'a pas été envisagé ici, mais représente un vaste domaine d'intérêt à lui seul.

Les principales théories pour expliquer ce type de frottement se rapportent soit à l'influence des propriétés mécaniques, soit à celles des propriétés d'adhésion interfaciale. Mais elles tiennent peu compte de l'influence couplée des deux. Cette manière d'envisager le problème s'adapte seulement au cas des surfaces lisses.

La représentation par les effets électrostatiques est une autre approche du problème, plus formelle que réelle.

L'usure du polymère par friction peut résulter de processus variés et s'accompagne toujours de transfert de l'un des polymères sur l'autre.

En résumé, deux modes de dissipation d'énergie peuvent intervenir :

- le labourage par des aspérités très dures dans des surfaces molles,
- le cisaillement aux interfaces adhésifs.

Trois types de rupture sont à la base de ces processus :

- les ruptures élastiques ou viscoélastiques avec déchirement,
- les ruptures plastiques ou visqueuses avec étirement,
- les ruptures fragiles avec cassure.

De très nombreuses revues bibliographiques ont été publiées sur le sujet, faisant le point très précisément sur l'état des connaissances [13, 17-18, 27, 39, 61].

En conclusion, le coefficient de frottement,  $\mu$ , globalise les effets de toutes les interactions au cours du processus tribologique. Il existe des méthodes performantes d'étude du transfert et de l'usure. Par contre, les mécanismes d'établissement du frottement restent mal compris, et les recherches en ce domaine devront contribuer à l'élaboration de règles de comportement.

## Bibliographie

- [1] G. Salomon, "Application of systems thinking to tribology", *ASLE Trans.*, 1973, 17, 4, 295-299.
- [2] H. Czichos, *ASLE Trans.*, 1973, 17, 4, 305-306.
- [3] F.P. Bowden, D. Tabor, "The friction and lubrication of solids", Clarendon Press, Oxford, vol. II, 1964.
- [4] A. Schallamach, "The abrasion of rubber", *Proc. Phys. Soc. London*, 1954, B67, 883-891.
- [5] G.M. Bartenev, *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 1954, 96, 1161.
- [6] G.M. Bartenev, A.I. Elkin, "Friction properties of high elastic materials", *Wear*, 1965, 8, 8.
- [7] D. Bulgin, G.D. Hubbard, M.M. Walters, "Road and laboratory studies of friction of elastomers", *Proc. 4th Rubber Technology Conf.*, London, May 1962, 173-185.
- [8] H.W. Kummer, "Unified theory of rubber and tire friction", *Engineering Research Bulletin B-94*, Pennsylvania State University, July 1966.
- [9] N.P. Suh, H.C. Sin, "The genesis of friction", *Wear*, 1981, 69, 1, 91-114.
- [10] G.M. Bartenev, V.V. Lavrentev, "Friction and wear of polymers", *Tribol. Ser. 6* (Lee L.H., Ludema K.C. Ed.), Elsevier, 1981.

- [11] H. Uetz, J. Wiedemeyer, "Tribologie der polymere", Carl Hanser Verlag, München Wien, 1985.
- [12] V.A. Bely, A.I. Sviridyonok, M.I. Petrokovets, V.G. Savkin, Friction and wear in polymer-based materials, Pergamon Press, 1982.
- [13] D. Tabor, Friction, adhesion and boundary lubrication of polymers in "Advances in polymer friction and wear", Plenum Press, New York, vol. 5A, 1974.
- [14] F.P. Bowden, D. Tabor, The friction and lubrication of solids, Oxford Sci. Publ., Oxford, 1968.
- [15] G. Erhard, Sliding friction behaviour of polymer-polymer material combinations, *Wear*, 1983, 84, 167-181.
- [16] H. Czichos, Tribology, Elsevier, Amsterdam, 1978.
- [17] B.J. Briscoe, D. Tabor, The sliding wear of polymers : a brief review, in "Fundamentals of tribology" (Suh N.P. and Saka N. Ed.), Cambridge Massachussets, 1980, 733-758.
- [18] B.J. Briscoe, Tribology of polymers : the state of an art, in "Physicochemical Aspects of polymer surfaces" (Mittal K.L. Ed.), Plenum Press, New York, 1983, 387-412.
- [19] E. Santner, H. Czichos, Tribology of polymers, *Tribol. Int.*, 1989, 22, 2, 103-108.
- [20] K. Tanaka, Y. Uchiyama, Friction, wear and surface melting of crystalline polymers in "Advances in polymer friction and wear", (Lee L.H. Ed.), Polymer Sci. and Technol., Plenum Press, New York, 1974, vol. 5B, 499-530.
- [21] V.A. Bely, A.I. Sviridyonok, Role of structure in friction mechanism of polymer materials in "Advances in polymer friction and wear" (Lee L.H. Ed.), Plenum Press, New York, 1974, vol. 5B, 745-759.
- [22] R.D. Deanin, L.B. Patel, Structure, properties and wear resistance of polyethylene in "Advances in polymer friction and wear" (Lee L.H. Ed.), Plenum Press, New York, 1974, vol. 5B, 585-596.
- [23] M.O.W. Richardson, M.W. Pascoe, Mechanochemistry and polyvinylchloride wear in "Advances in polymer friction and wear" (Lee L.H. Ed.), Plenum Press, New York, 1974, vol. 5B, 585-596.
- [24] R.T. Spurr, "The friction of polymers", *Wear*, 1982, 79, 301-310.
- [25] R.J. Good, F. Shoraka, Joint role of interfacial forces and viscoelastic effects in polymer adhesion and wear in "Polymer wear and its control", ACS Symposium Series, 287 (Lee L.H. Ed.), 1985, 39-57.
- [26] D.K. Owens, R.C. Wendt, Estimation of the surface free energy of polymers, *J. Appl. Polym. Sci.*, 1969, 13, 1741-1747.
- [27] B.J. Briscoe, C.M. Pooley, D. Tabor, Friction and transfer of some polymers in unlubricated sliding in "Advances in polymer friction and wear" (Lee L.H. Ed.), Polymer Sci. and Technol., Plenum Press, New York, 1974, vol. 5A, 191-204.
- [28] V.K. Jain, S. Bahadur, Material transfer in polymer-polymer sliding, *Wear*, 1978, 46, 189-202.
- [29] L. Lavielle, J. Schultz, L'adhésion polymère-métal, *Mater. et Techn.*, 1984, 215-222.
- [30] A. Gent, J. Schultz, Effect of wetting liquids on the strength of adhesion of viscoelastic material, *J. Adhes.*, 1972, 3, 281.
- [31] B.V. Deryagin, N.A. Krotova, Electric theory of adhesion of films to solid surfaces, *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 1948, 61, 849-852.
- [32] Microscopic aspects of adhesion and lubrication (Georges J.M. Ed.), 1982, partie Tribologie, 521-797.
- [33] J.L. Goldblatt, The importance of electron transfer processes to the wear process, in [32], 521-549.
- [34] P.A. Rehbinder, Proc. 6th Physics Conf., Moscow, 1928, 29.
- [35] A.R. Savkoor, T.J. Ruyter, Experimental investigation of the effect of electric potential on adhesive friction of elastomers in "Advances in polymer friction and wear" (Lee L.H. Ed.), 1974, vol. 5A, 333-353.
- [36] K. Ohara, Temperature and friction speed dependence of frictional electrification between polymers films. Contribution of molecular motion of polymers to frictional electrification, *J. Electrostat.*, 1978, 4, 233-246.
- [37] D.A. Seanor, Triboelectrification of polymers - A chemist's viewpoint in "Physicochemical aspects of polymer surfaces" (Mittal K.L. Ed.), Plenum Press, New York, 1983, 477-506.
- [38] C.B. Duke, T.J. Fabish, Contacts electrification of polymers : a quantitative model, *J. Appl. Phys.*, 1979, 49, 315.
- [39] L.H. Lee, Fracture energetics and surface energetics of polymer wear in "Polymer wear and its control", ACS Symposium Series (Lee L.H. Ed.), 1985, 27-38.
- [40] B.J. Briscoe, Material aspects of polymer wear, *Script. Metall. et Mater.*, 1990, 24, 839-844.
- [41] J.K. Lancaster, in "Polymer Science" (Jenkins A.D. Ed.), North Holland Publ. Cy, London, 1972, chap. 14.
- [42] B.J. Briscoe, Friction and wear of organic solids and the adhesion model of friction, *Phil. Mag.*, 1981, 43, 3, 511-527.
- [43] I.V. Kragelski, Friction and Wear, Butterworths, London, 1965.
- [44] J. Ferrante, Application of surface analysis and surface theory in tribology, *Surf. Interf. Anal.*, 1989, 14, 809-822.
- [45] J. Ferrante, J.R. Smith, *Phys. Rev.*, 1985, B31, 3427-3434.
- [46] B.J. Briscoe, A. Pogolian, D. Tabor, The friction and wear of high density polythene. The action of lead oxide and copper oxide fillers, *Wear*, 1974, 27, 19-34.
- [47] K. Tanaka, in "Wear of materials" (Glaeser W.A., Ludema K.C., Rhee S.K. Ed.), American Society of Mechanical Engineers, New York, 1977, 532.
- [48] N.P. Suh, An overview of the delamination theory of wear, *Wear*, 1977, 44, 1-16.
- [49] B. Briscoe, Wear of polymers : an essay on fundamental aspects, *Tribol. Int.*, 1981, 231-243.
- [50] K. Tanaka, T. Miyata, Studies on the friction and transfer of semicrystalline polymers, *Wear*, 1977, 41, 383-398.
- [51] L. Vincent, N. Dahmani, Interface dynamics in polymer friction in "Interface Dynamics", Tribol. Ser. 12 (Dowson D., Taylor C.M., Godet M., Berthe D. Ed.), Elsevier, Amsterdam, 1988, 19-25.
- [52] Y. Berthier, M. Brendle, M. Godet, Boundary conditions : adhesion in tribology, in "Interface Dynamics", Tribol. Ser. 12 (Dowson D., Taylor C.M., Godet M., Berthe D. Ed.), Elsevier, Amsterdam, 1988, 19-25.
- [53] M.O.W. Richardson, Chemical and physical effects associated with polymer tribology in "Polymer friction and wear" (Lee L.H. Ed.), Plenum Press, New York, 1974, vol. 5B, 787-805.
- [54] Y. Berthier, D. Wehbei, J. Wack, C. Roques-Carnes, M. Godet, Fractals : a method of characterization of third body morphology in "Interface Dynamics", Tribol. Ser. 12 (Dowson D., Taylor C.M., Godet M., Berthe D. Ed.), Elsevier, Amsterdam, 1988, 105-108.
- [55] J. Lepage, H. Zaida, Influence of the water vapour adsorption on the boundary conditions in tribology in "Interface Dynamics", Tribol. Ser. 12 (Dowson D., Taylor C.M., Godet M., Berthe D. Ed.), Elsevier, Amsterdam, 1988, 259-263.
- [56] G. Salomon, The structure of tribological systems, *Lubr. Eng.*, 1976, 458-599.
- [57] L. Lavielle, Polymer-polymer friction : relation with adhesion, *Wear*, 1991, 151, 63-75.
- [58] E. Rabinowicz, Friction and wear of materials, J. Wiley, Ed., New York, 1966.
- [59] L. Vovelle, J.M. Martin, Influence of surface preparation on friction of nylon 6-6 against steel in "Interface Dynamics", Tribol. Ser. 12 (Dowson D., Taylor C.M., Godet M., Berthe D. Ed.), Elsevier, Amsterdam, 1988, 255-258.
- [60] V.A. Belyi, A.I. Sviridyonok, V.A. Smurugov, V.V. Nevzorov, Adhesive wear of polymers, *Trans ASME*, 1977, 396-400.
- [61] K.H. Zum Gahr, Microstructure and wear of materials, Tribol. Ser. 10, Elsevier, Amsterdam, 1987.
- [62] E. Rabinowicz, L.A. Dunn, P.G. Russel, A study of abrasive wear under three body conditions, *Wear*, 1961, 4, 345-355.
- [63] B.J. Briscoe, Wear of poly(tetrafluoroethylene) in "Polymer Wear and Its control" (Lee L.H. Ed.), ACS Symposium Series, 287, Washington, 1985, 151-170.
- [64] D. Gong, Q. Xue, H. Wang, Physical models of adhesive wear of polytetrafluoroethylene and its composites, *Wear*, 1991, 147, 9-24.
- [65] A.I. Sviridyonok, Self-lubrication mechanisms in polymer composites, *Tribology Int*, 1991, 24, 37-43.