

La Tribologie

La Science pour maîtriser et comprendre le frottement et l'usure

par Michel BARQUINS
Directeur de Recherche au CNRS
Laboratoire de Physique et de Mécanique des Milieux Hétérogène
URA au CNRS n°857
ESPCI - 10, rue Vauquelin - 75231 Paris Cedex 05

DEUXIÈME PARTIE*

1. LE FROTTEMENT

1.1. Le frottement des métaux et alliages

1.1.1. Généralités

Pour des raisons d'opportunité liée au développement des machines, c'est l'étude du frottement des métaux et alliages qui a monopolisé quasiment toutes les énergies au début de ces cinquante dernières années dont les résultats ont été principalement obtenus et rapportés dès 1950 par Bowden et Tabor [1950, 1964]. Le point crucial de leur modèle peut être décrit comme suit : si une bille lisse en cuivre est frottée contre une surface plane et lisse en acier, en l'absence de lubrifiant, le coefficient de frottement μ , défini par le rapport de la résistance tangentielle à l'avancement T à la charge normale d'appui N ($\mu = T/N$), a une valeur voisine de 0,8 et l'on constate un transfert de cuivre sur la surface en acier. Quand les surfaces sont lubrifiées, à l'aide d'un film d'acide gras ou de savon d'épaisseur 100 Å par exemple, le coefficient de frottement tombe à la valeur 0,1 et le transfert de cuivre ne se produit pratiquement plus. En d'autres termes, le frottement observé résulte principalement de l'adhésion métal-métal. De même si une sphère dure en acier est déplacée contre une surface de cuivre bien lubrifiée, afin de minimiser les effets de l'adhésion, le coefficient de frottement correspondant a une

* La première partie et la bibliographie de cet article ont été publiées dans le n° 764 de mai 1994.

valeur de l'ordre de 0,1 à 0,2 qui représente l'effort fourni pour «labourer» la surface de cuivre et y laisser un sillon. Des résultats semblables ont été obtenus avec des matériaux non métalliques, ce qui conduit à considérer la force de frottement comme la somme de deux termes : la force de cisaillement des jonctions interfaciales (adhésion) et la force nécessaire pour que les aspérités de la surface la plus dure creusent des sillons sur la surface la plus molle (labourage). On peut alors légitimement se demander ce qu'il y a de nouveau par rapport à la proposition de Coulomb [1785] et pourtant ce modèle diffère par deux aspects importants :

- le mécanisme de dissipation d'énergie par le frottement des aspérités est clairement montré ;
- la composante adhésion, spécialement pour les surfaces non lubrifiées, est parfaitement identifiée et son intervention bien comprise.

Ce modèle de frottement «à deux termes» n'est pas aussi sacrosaint qu'on pourrait le penser comme le montreront plus loin un certain nombre de résultats, néanmoins il a le mérite d'être encore de nos jours un point de départ commode pour les études du frottement. La faiblesse majeure de ce modèle de mécanisme frictionnel est de ne pas permettre la prédiction quantitative de la force de frottement sec (frottement non lubrifié) entre deux surfaces. Si le terme de labourage peut être raisonnablement évalué, comme cela sera examiné plus loin, ce n'est absolument pas le cas pour la composante adhésion, même si l'étendue de la zone réelle de contact est connue avec précision, parce qu'elle dépend de manière critique de l'intensité de la contrainte de cisaillement à l'interface, situation qui peut être compliquée davantage par la présence de films contaminants, influençant d'une manière ou d'une autre la résistance des liaisons interfaciales ; une complication ultérieure possible consiste en la destruction partielle de ces films par le processus de frottement lui-même. Les seules conditions où le modèle possède quantitativement un caractère prédictif sont :

- lorsque le cisaillement a lieu au sein d'un film superficiel lubrifiant, solide ou liquide, de contrainte de cisaillement connue ;
- si un matériau mou est frotté contre une surface dure, l'adhésion étant suffisamment élevée pour que le cisaillement ait lieu à l'intérieur du matériau le plus mou, lequel détermine la valeur de la contrainte de cisaillement.

1.1.2. La composante «labourage»

La force nécessaire pour qu'une aspérité rigide forme un sillon sur une surface plus molle a été évaluée à partir d'un modèle très simple [Bowden et Tabor, 1950, 1966] consistant à considérer le contact de glissement d'une aspérité sphérique de rayon R dont la force normale est supportée par une surface semi-circulaire de rayon a et de superficie $A = (1/2)\pi a^2$ (demi-circonférence avant), la force tangentielle devant déplacer une aire égale à $A' = 2a^3/3R$ (section transversale). Les forces étant proportionnelles aux surfaces sur lesquelles elles s'appliquent, le coefficient de frottement μ est donné par le rapport des surfaces : $\mu = A'/A = 4a/3\pi R$. Cette valeur, du fait de la géométrie du contact, dépend de l'enfoncement δ de la sphère de sorte que $\mu \approx 0,6(\delta/R)^{1/2}$. Pour une aspérité conique de pente θ (demi-angle au sommet égal à $\{(\pi/2) - \theta\}$), le rayon a de la zone de contact étant proportionnel à l'enfoncement δ , le coefficient de frottement est indépendant de cet enfoncement. Pour cette géométrie, les deux surfaces A et A' précédentes prennent les valeurs respectives suivantes $A = (1/2)\pi a^2$ et $A' = a^2 \tan\theta$, d'où $\mu = (2/\pi)\tan\theta$. Ainsi pour une aspérité bi-dimensionnelle, on peut considérer que le coefficient de labourage est $\mu \approx \tan\theta$. Bien que ces calculs élémentaires ne prennent pas en compte les déformations verticales et horizontales, leur utilité est indéniable car ils illustrent parfaitement les résultats trouvés avec tous les matériaux susceptibles de se déformer par fluage, tels que les métaux et les polymères ainsi que les solides inorganiques ductiles [Childs, 1992].

1.1.3. La composante «adhésion»

Lorsque deux surfaces métalliques propres sont pressées l'une contre l'autre, la liaison métallique s'exprime partout où le contact à l'échelle atomique est réalisé. On peut comparer l'interface à un joint de grain dont la résistance mécanique, comme cela a été bien montré par Buckley [1981], dépend d'un certain nombre de paramètres tels que : propriétés électroniques des métaux, leur structure cristalline, l'orientation mutuelle, les incompatibilités de réseaux, etc. Rabinovicz [1965] avait suggéré que les métaux insolubles entre eux doivent se comporter comme peu adhésifs l'un vis-à-vis de l'autre. Malheureusement, on connaît aujourd'hui trop d'exceptions pour en tirer une règle générale. En effet, bon nombre de couples de matériaux déclarés insolubles forment à l'interface un alliage monomoléculaire qui produit l'adhésion. Ce sont ces liaisons interfaciales qui doivent être cisailées pour qu'il y ait frottement. Pendant un temps ce concept fut critiqué,

partant du fait indiscutable que l'adhésion normale à l'interface n'est pas observée, en général. Cependant, il convient de signaler que si, précisément, l'adhésion normale est faible, cela vient du fait que la constatation de non-adhésion est effectuée après suppression de la force d'appui, opération pendant laquelle la restitution des contraintes élastiques emmagasinées est suffisante pour séparer les jonctions. Si bien que lorsque l'on n'y regarde pas de trop près, l'existence des jonctions peut être facilement, mais sottement, remise en cause. Et pourtant, avec les métaux mous et ductiles, comme le plomb, une forte adhésion est observée, même dans l'air, comme l'a démontré l'anglais Desaguliers au début du XVIII^e siècle [Dowson, 1979], et la séparation est accompagnée d'un transfert de matière, que l'on retrouve en frottement, en général du matériau le plus mou sur l'autre. Lorsque les deux surfaces métalliques en frottement ont des duretés du même ordre de grandeur ou lorsqu'il s'agit de deux surfaces de même nature, l'adhésion est très intense, la déformation des jonctions durant le frottement est très sévère et l'énergie de frottement est essentiellement dissipée sous forme de déformation plastique.

Pour les surfaces métalliques exemptes d'oxyde ou faiblement recouvertes, l'adhésion interfaciale est importante de sorte que la mise en mouvement pour provoquer le frottement crée d'intenses contraintes de tractions tangentielles, le fluage plastique apparaît et entraîne l'accroissement de l'aire de contact. Un certain nombre d'études, empiriques et théoriques ont décrit ce phénomène de «croissance de la jonction» [Tabor, 1959 ; Johnson, 1968, 1985 ; Chaudhri, 1984]. Si l'augmentation de la zone de contact devient excessive et qu'un contact intime intéresse une grande partie de l'aire de contact, on arrive au stade ultime de la soudure, du grippage du système frottant. La vitesse de croissance de la jonction semble dépendre de manière critique de la ductilité des métaux en contact, mais on manque d'information sur ce point, lequel mériterait donc d'être approfondi. Dans le cas où les surfaces sont contaminées, c'est-à-dire lorsque le coefficient de frottement reste inférieur à 0,2, la croissance des jonctions est inexistante même dans le cas des métaux très ductiles. L'un des facteurs de réduction de l'adhésion en frottement est la présence d'un film d'oxyde, à la condition qu'il ne soit pas traversé par les aspérités rigides de la surface la plus dure. Mais, comme toujours, il y a des exceptions : il arrive qu'une forte adhésion se produise entre deux couches d'oxyde [Pashley *et al.*, 1984], le frottement entraînant ensuite un cisaillement au sein d'un des films d'oxyde. Le principal facteur de réduction et

même d'élimination de l'adhésion est la présence d'un film lubrifiant, lequel sépare les surfaces et se cisaille facilement.

1.1.4. Modèle unifié

Il est bien connu que la déformation plastique des métaux se produit dès que les contraintes de cisaillement excèdent une valeur critique σ_u , et la déformation peut être décrite par la méthode des lignes de glissement limitant les régions où la contrainte critique est atteinte. Cette approche a été appliquée avec succès au cas particulier du frottement d'une aspérité rigide bi-dimensionnelle sur une surface métallique ductile non écrouissable [Challen *et al.*, 1984 ; Suh, 1986]. A titre d'exemple, considérons une aspérité présentant une pente θ (demi-angle au sommet égal à $\{(\pi/2) - \theta\}$). Mise en mouvement, cette aspérité se comporte comme la proue d'un navire et pousse le matériau en avant d'elle en formant un bourrelet. En l'absence d'adhésion interfaciale, le mouvement est continu et le bourrelet est constamment aplani de sorte que la surface reste à son niveau initial. Ce processus ressemble au brunissage des surfaces bien lubrifiées, phénomène décrit par Rabinowicz [1984]. Le frottement de l'aspérité est caractérisé par un coefficient égal à $\mu \approx \tan\theta$, comme déjà vu. Toutefois, si la pente θ est importante et/ou si l'adhésion interfaciale est appréciable, ou bien le système aspérité-matériau se bloque ou bien l'aspérité se détache de la surface ; dans les deux cas il n'est plus possible de parler de frottement. Le point le plus important, mis en évidence par Challen *et al.* [1984], est que l'adhésion entre l'aspérité et le bourrelet de matériau poussé devant celle-ci peut être incorporée dans le modèle de sorte que l'adhésion et la déformation provoquée par l'aspérité consiste en un processus unique de déformation. La force d'adhésion entre l'aspérité et le matériau est définie à partir de la contrainte de cisaillement $\tau = \mu\sigma_u$ nécessaire pour provoquer le glissement. Dans ces conditions, il est évident que $\mu = 0$ correspond à zéro adhésion associée à un processus de labourage pur, tandis que $\mu = 1$ signifie grippage total à l'interface aspérité-matériau. La force résultante qui produit le glissement est ainsi fonction des deux paramètres μ et θ . Comme le signale fort justement Johnson [1981], si les valeurs du coefficient de frottement μ pour $\theta = 0$ sont attribuées à la composante adhésion μ_a du frottement et celles pour $\mu = 0$ à la composante labourage μ_l , c'est-à-dire pour les faibles valeurs de θ ($\theta < 5^\circ$) et pour des coefficients de frottement inférieurs à 0,5, le frottement global n'est pas notablement différent de la somme des deux mécanismes «adhésion» et «labourage» considérés comme indépendants l'un de l'autre. En d'autre

termes, $\mu_{\text{total}} = \mu_a + \mu_1$, ce qui valide la relation «à deux termes» proposée par Coulomb [Kragelskii, 1965].

En pratique, il est bien rare de rencontrer des surfaces présentant des rugosités dont les pentes des aspérités sont supérieures à $\theta = 5^\circ$. De telles aspérités contribuent donc pour moins de $\mu_1 = 0,1$ dans le frottement global. Dans ces conditions, puisque le frottement mesuré avec des surfaces non lubrifiées est de l'ordre de $\mu_{\text{total}} = 0,2$ (essentiellement lorsque les couches d'oxydes ne sont pas traversées), il en résulte que la composante «adhésion interfaciale» μ_a intervient pour au moins 50 % dans la valeur du frottement global. En supposant que les surfaces réelles sont constituées d'aspérités de différentes hauteurs mais qu'en moyenne elles ont la même pente θ , on est ainsi amené à conclure que le frottement obéit à la loi de Coulomb et ne dépend que des deux paramètres μ et θ , et cela bien que certaines voies se soient élevées pour prétendre qu'il n'y avait pas d'adhésion réelle entre les surfaces et que si l'interface aspérité-matériau présentait une résistance au cisaillement finie (c'est-à-dire $\mu > 0$) cela provenait du fait que l'aspérité modèle était elle-même couverte d'aspérités plus petites produisant chacune leur propre processus de labourage. Cette hypothèse ne peut être retenue car elle conduit à une suite infinie d'aspérités toujours plus petites couvertes par des aspérités encore plus petites.

Ce modèle unifié du frottement des métaux ne répond pas à toutes les questions et les principales approches qui semblent pleines de promesses doivent concerner les points suivants :

- comment modifier le modèle pour prendre en compte le cas réel du fluage du matériau de chaque côté de l'aspérité, sphérique ou conique, au cours du frottement ;
- comment évaluer l'effet de l'érouissage et le rôle de la ductilité ;
- proposer un modèle réaliste pour rendre compte de la déformation observée lorsque l'adhésion est très élevée et dans le cas où les deux surfaces en contact ont des duretés du même ordre de grandeur ;
- comment gérer la formation et l'élimination des particules d'usure.

En fait, ce modèle a le défaut de se limiter à la seule intervention de la déformation plastique, mais comme Archard [1957] le soulignait déjà il y a 35 ans, il existe peu de systèmes mécaniques viables dans lesquels la déformation plastique est un phénomène permanent.

1.1.5. Le frottement cyclique

Le frottement répété sur les mêmes surfaces donne lieu à différentes évolutions selon les conditions de contact. Par exemple, si l'adhésion est marquée, la topographie de la surface est complètement déterminée par la manière dont sont cisailées les jonctions à l'interface. En effet, les surfaces sont susceptibles de présenter un état stable de rugosité dans lequel les processus de labourage et de cisaillement restent essentiellement plastiques. Le comportement est donc déterminé non par la topographie de la surface initiale mais par celle générée par le mécanisme de frottement lui-même [Archard, 1986a]. Toutefois, si l'adhésion se situe à un niveau inférieur à une certaine valeur critique, le frottement cyclique peut conduire à une situation stable pour laquelle le contact reste essentiellement élastique. En d'autres termes, les aspérités superficielles, au lieu d'être déformées et aplanies plastiquement, peuvent être simplement écrasées puis relaxées élastiquement. Dans ces conditions, on doit se demander comment est dissipée l'énergie, et de répondre que la dissipation s'effectue probablement du fait de l'imperfection élastique du système. De plus, il est difficile de comprendre comment l'adhésion à l'interface peut être associée à un modèle purement élastique sans évoquer celui de Tomlinson [1929], qui impliquait que l'énergie était dissipée lors de la formation et la rupture de liaisons atomiques au cours du frottement et du roulement. Il est beaucoup plus vraisemblable de supposer qu'une certaine forme de micro-plasticité est réalisée [Granato et Lucke, 1956]. A titre d'exemple, il a été suggéré par Rigney *et al.* [1984] qu'il pourrait y avoir une espèce de défoncement de la surface et de la couche sub-superficielle du métal et que le frottement impliquerait un bouleversement continu de la structure en cellules de dislocations produite dont rendraient compte quelques modèles récents [Kuhlmann-Wilsdorf et Van der Merwe, 1982 ; Kuhlmann-Wilsdorf et Hansen, 1986]. Mais en pratique, le problème se complique du fait de la présence de couches d'oxyde et/ou de lubrifiant qui sont plus ou moins fragmentées par le frottement cyclique. Si, de plus, des débris d'usure se trouvent piégés à l'interface, cela peut compliquer davantage les aspects «déformation» et «adhésion» des processus du frottement et de l'usure. Cette question relève du problème de la formation et de la rhéologie du «troisième corps» abondamment étudiées depuis une dizaine d'années [Misra et Finnie, 1983 ; Suh, 1986 ; Berthier *et al.*, 1988, 1989 ; Godet, 1984, 1990 ; Godet *et al.*, 1992].

1.1.6. Influence des films superficiels

La composante «adhésion» du frottement implique que le cisaillement s'effectue à l'interface ou au très proche voisinage de celle-ci. L'intervention de cette composante est nettement démontrée par l'action des films de surface. Si une couche fine d'un métal mou est déposée sur un substrat dur, la charge est supportée par le métal sous-jacent de sorte que l'aire de contact est de très petite dimension. Lors du frottement, adhésion et cisaillement se produisent à l'intérieur du film, lequel présente une résistance au cisaillement assez basse. En conséquence, on doit s'attendre à mesurer un frottement, dû au processus adhésion-cisaillement, faible. En fait, cette prédiction doit être nuancée, car l'expérience montre qu'il existe une épaisseur critique de film métallique pour laquelle le frottement est minimum, expériences réalisées avec des couches fines d'indium [Bowden et Tabor, 1950] et de plomb [Halling, 1986], qui donnent un coefficient minimum inférieur à 0,1, ce qui est très faible pour des surfaces métalliques non lubrifiées. Ces résultats montrent clairement l'action des films superficiels sur la réduction du frottement et par suite de l'usure.

Sur les surfaces métalliques, les films sont principalement des oxydes, ou des sulfures ou encore des chlorures qui peuvent être formés *in situ* par attaque chimique. La présence de ces films posent trois problèmes fondamentaux non encore parfaitement élucidés :

- comment ces films adhèrent-ils au substrat métallique ?
- quelle est la résistance au cisaillement de ces films ?
- comment ces films se rompent-ils ?

Parfois, il arrive que les couches se fragmentent, ce qui provoque l'«exsudation» immédiate du métal sous-jacent à travers les fissures formées, ce cas est fréquent avec l'aluminium lors de la rupture du film d'alumine protecteur [Barquins et Courtel, 1965]. Dans d'autres cas, on observe une formation de zones de décollement et un pelage ultérieur sous l'action des contraintes de compression emmagasinées dans le film [Kendall, 1975]. La prédiction de ces différents comportements doit être étudiée.

1.2. Le frottement des matériaux durs non métalliques : diamant, céramiques

Il est souvent affirmé que le frottement des céramiques entre elles est faible, du fait de leur haut module d'élasticité et de leur dureté élevée qui conduisent à une petite aire de contact. Cependant, il ne faut

pas en conclure que les liaisons interfaciales sont faibles. En effet, si la céramique est covalente, sa surface libre peut exposer des liaisons pendantes susceptibles de créer une forte adhésion avec la surface antagoniste. Dans ce cas, en dépit de la petitesse de la zone de contact, le frottement peut être assez élevé. Pour prendre un exemple évident concernant le rôle des liaisons covalentes, il a été observé sur des surfaces de diamant minutieusement nettoyées (dans l'ultra-vide) que le coefficient de frottement peut atteindre une valeur voisine de l'unité [Bowden et Hanwell, 1966 ; Pepper, 1982]. Cependant, dans l'air, l'existence de liaisons chimiques libres en surface implique que cette surface adsorbe avec avidité toutes les molécules libres de l'atmosphère, de sorte que l'on obtient irrémédiablement des surfaces de basse énergie, parce que recouvertes de groupements $=CH_2$ ou $-CH_3$ par réaction avec la vapeur d'eau ambiante. Ainsi la liaison interfaciale diamant-diamant est très faible par rapport à la liaison covalente au sein du même matériau. Il en résulte que pour les basses pressions de contact, le frottement est faible et résulte d'un réel processus interfacial dans lequel les liaisons de van der Waals sont continuellement formées et rompues, vraisemblablement suivant le modèle suggéré par Tomlinson [1929] et l'usure adhésive à laquelle on pourrait s'attendre n'est pas observée [Wilks et Wilks, 1972 ; Crompton *et al.*, 1973 ; Enomoto et Tabor, 1981]. Au dessus d'une certaine valeur critique de pression de contact, le frottement augmente et des expériences de photoluminescence [Enomoto et Tabor, 1981] ont permis de mettre en évidence la génération de dislocations sub-superficielles. Dans ces conditions, on doit s'attendre à une usure par fatigue pour les pressions moyennes et à une usure par propagation de fissures et formation de larges débris d'usure pour les pressions élevées.

S'il est vrai que, pour quelques céramiques, le comportement surfacique est bien compris, comme par exemple celui du nitrure de silicium qui réagit avec la vapeur d'eau pour former un film superficiel mou et relativement épais de silice hydratée de sorte que le frottement est faible et que l'on se trouve dans une situation comparable à celle du frottement sur un film de métal mou déposé sur un substrat dur, pour d'autres, le comportement est très mal compris. Il conviendrait donc d'entreprendre rapidement une étude systématique de l'adhésion et du frottement des céramiques en termes de structure et de nature des liaisons, bien qu'il existe une difficulté cruciale dans ce genre d'investigations, qui concerne la reproductibilité de la structure, de la composition et de la dimension des particules de la céramique. Une première étape vient d'être franchie récemment par Ross *et al.* [1991]

en simulant, à l'aide d'une expérimentation très sophistiquée de micro-contact, les interactions entre les particules de céramique dans l'ultra-vide. Il est montré que pour comprendre l'adhésion anormalement élevée, il est nécessaire de travailler sur un modèle faisant intervenir la topographie de la surface à un niveau aussi faible que l'échelle nanométrique. Dans le cas où les interactions sont intrinsèquement faibles, comme avec l'oxyde de titane, le coincement des aspérités entre elles joue un rôle important dans le frottement, surtout aux faibles charges d'appui pour lesquelles la déformation plastique est moindre, le contact entre les aspérités provoquant un stick-slip marqué. La même conclusion a été tirée pour ce qui concerne les comportements tribologiques du carbure de silicium et de l'alumine.

1.3. Le frottement des élastomères

Les premières études sur le frottement du caoutchouc, matériau essentiel au développement des techniques de transport modernes, ne remontent guère au delà du début de la période qui nous intéresse, à savoir la cinquantaine d'années. Les bandages de caoutchouc pleins et les pneumatiques, qui ne tardèrent pas à les remplacer sur les véhicules automobiles, présentaient de tels avantages par rapport au bois et à l'acier qu'il ne semblait pas nécessaire aux ingénieurs d'analyser en détail les remarquables propriétés d'élasticité de ce matériau, qui pourtant avaient attiré la curiosité de physiciens de renom tels que Joule et Bouasse, dès la fin du XIX^e siècle. Toutefois, il convient de remarquer, d'une part, que la recherche fondamentale n'avait guère de raison de s'intéresser à des phénomènes de frottement qui se prêtaient difficilement à des investigations rigoureuses, et d'autre part, que ces phénomènes concernaient des matériaux de composition complexe et généralement tenue secrète par la plupart des manufacturiers.

Ce n'est qu'à partir de 1940 que ce sujet commence à susciter un intérêt croissant de la part des chercheurs, notamment en Grande-Bretagne, en Union soviétique, aux États-Unis, et pour une moindre part en France, ainsi qu'en témoignent les cent soixante cinq références de l'étude bibliographique publiée par Conant et Liska [1960]. La somme des connaissances acquises, tant du point de vue technique que scientifique, a permis de réduire considérablement l'empirisme qui régnait dans les nombreuses applications du caoutchouc où le frottement joue un rôle important.

Lorsqu'une sphère de caoutchouc souple est frottée contre un substrat rigide, il a été trouvé par l'Anglais Schallamach [1971] que les

contraintes interfaciales créent une instabilité qui entraîne la formation de vaguelettes (communément appelées ondes de Schallamach) au sein du caoutchouc dont le mécanisme de formation a été largement étudié [Barquins et Courtel, 1975 ; Roberts et Thomas, 1975 ; Briggs et Briscoe, 1975 ; Barquins *et al.*, 1978 ; Roberts, 1979 ; Best *et al.*, 1981 ; Barquins et Roberts, 1986, 1987 ; Barquins, 1992]. Il n'y a pas de frottement proprement dit, car c'est le décollement et le recollement de ces vaguelettes, qui se propagent dans la zone de contact comme le déroulement d'un pli dans un tapis, à la manière de macro-dislocations, qui assurent le mouvement relatif du caoutchouc au contact du substrat. Le «frottement», ou plus exactement, la résistance à l'avancement est directement liée aux propriétés superficielles et viscoélastiques du matériau caoutchouteux, elle est relativement élevée ($\mu > 2$) pour les caoutchoucs souples, essentiellement parce que le faible module d'élasticité qui les caractérise conduit à une large aire de contact. En dépit des nombreuses expériences de laboratoires entreprises depuis 1971, les conditions pour lesquelles on a la certitude d'observer des ondes de Schallamach ne sont pas encore clairement établies et un énorme travail reste à accomplir.

Dans le cas où l'élastomère présente un degré de réticulation plus élevé, le module d'élasticité est augmenté ainsi que la résistance mécanique. Étant donné que les contraintes interfaciales sont toujours directement liées aux forces de van der Waals et que celles-ci ne sont modifiées par l'augmentation de la réticulation, il en résulte une diminution de la dimension des ondes de Schallamach, et, bien que cela ne soit pas encore prouvé, il est probable qu'il existe une relation critique entre la résistance au cisaillement interfacial et le module d'élasticité correspondant à la disparition de ces ondes, et concomitamment à l'apparition du glissement vrai. Il est d'usage d'annoncer que le coefficient de frottement d'un caoutchouc dur sur une surface rigide propre a une valeur voisine de l'unité. En fait, cette affirmation n'a pas de sens car l'appellation «coefficient de frottement» est critiquable dans la mesure où la valeur de celui-ci est largement dépendante de la force d'appui et il augmente fortement lorsque cette dernière tend vers zéro, par suite de l'intervention prédominante des forces d'attraction moléculaire (van der Waals) [Barquins *et al.*, 1977]. Quoiqu'il en soit, le frottement des élastomères ne consiste pas simplement en la formation et la rupture de liaisons interfaciales, surtout à grandes vitesses, pour lesquelles le processus de cisaillement produit la cission de liaisons et la formation de produits de bas poids moléculaires qui sont étalés sur la surface antagoniste et y adhèrent. Actuellement, les études du

frottement de glissement des élastomères sont basées, à l'image des premiers travaux de Schallamach [1953], sur l'adhésion moléculaire à l'interface dans le cadre d'un processus thermo-activé [Moore, 1972 ; Chernyak et Leonov, 1986 ; Savkoor, 1982, 1987, 1992].

Lorsque le frottement du caoutchouc est réalisé sur une surface dure et rugueuse, la déformation de l'élastomère par les rugosités ne représente qu'une faible contribution dans l'intensité de la résistance à l'avancement comparée à celle de l'adhésion. Toutefois, en présence de lubrifiant, la composante adhésion est extrêmement réduite et dans ce cas la plus grande part du frottement résulte des pertes par déformation (frottement interne) dans le caoutchouc. Ceci a conduit à l'idée d'utiliser des mélanges élastomériques à pertes par hystérèse élevées pour la confection des bandes de roulement de pneumatiques au contact de chaussées mouillées et/ou grasses, afin d'augmenter la résistance au glissement [Tabor, 1958]. Malheureusement cela entraînait inévitablement des pertes viscoélastiques par roulement excessives dont la conséquence immédiate était une surconsommation de carburant, d'où l'abandon de l'idée. Suite à l'étude de Bond [1985] montrant que lors du freinage d'un pneumatique, la déformation par les aspérités du sol impliquait des fréquences élevées entraînant une élévation importante de température, tandis que la déformation par roulement libre conduisait à des fréquences basses sans élévation excessive de la température, un mélange élastomérique fut mis au point présentant des pertes élevées à hautes fréquences et températures élevées et de faibles pertes à basses fréquences et température ambiante. Il a ainsi été possible de fabriquer un prototype de pneumatique pour lequel la résistance au glissement était améliorée tout en conservant des pertes viscoélastiques faibles en roulement libre [Bond, 1985].

1.4. Le frottement des polymères

Il est bien connu que le frottement des polymères implique adhésion et déformation aussi bien que formation de fissures en surface et sous la surface [Pascoe et Tabor, 1956 ; Cherry, 1981 ; Kinloch et Young, 1983 ; Briscoe, 1992]. Le comportement tribologique présente quelques ressemblances avec celui des métaux excepté pour ce qui concerne le processus de croissance des jonctions. De plus, les déformations sont beaucoup plus dépendantes de la température et de la vitesse de cisaillement [Briscoe et Tabor, 1980]. Également, du fait de leur faible conductivité thermique et de leur bas point de fusion, le frottement peut être à l'origine d'un ramollissement ou d'une fusion superficielle [Tanaka et Uchiyama, 1974].

Le comportement tribologique des polymères dépend essentiellement de leur composition chimique, de leur structure cristalline (quand ils en ont une) et de leur morphologie. L'adhésion est due aussi bien aux forces de Van der Waals qu'aux liaisons hydrogène dans le cas où le polymère est polaire. Dans certains cas, il peut même y avoir des liaisons chimiques ou des transfert de charges électriques produisant d'appréciables forces électrostatiques, selon la très ancienne suggestion de Deryaguin [1934]. Le frottement contre un substrat lisse à faibles vitesses de déplacement, des polymères réticulés et des polymères vitreux à une température inférieure à leur température de transition vitreuse, est caractérisé par un glissement rigoureusement localisé à l'interface. Le frottement peut être relativement élevé ($\mu \approx 0,4$) mais le transfert de polymère sur le solide antagoniste est très faible ou absent, comme c'est le cas avec le polyéthylène ultra haute densité. La contrainte de cisaillement interfaciale, c'est-à-dire la force de frottement rapportée à l'aire de contact a une valeur comparable à celle de la contrainte de cisaillement en volume. Avec les polymères partiellement cristallisés comme le Téflon[®] et le polyéthylène haute densité, on observe la formation d'un dépôt sous la forme d'un film mince de polymère orienté par le processus de cisaillement, dans ce cas le frottement est très faible et correspond au travail à effectuer pour extraire les chaînes macromoléculaires du volume (μ variable de 0,06 à 0,15) [Pooley et Tabor, 1972 ; Briscoe, 1981].

Dans le cas où le substrat rigide est rugueux, la composante «labourage», comme dans le cas des métaux, devient appréciable. Le polymère subit un cisaillement avec formation et propagation de fissures au sein même du matériau de sorte que la surface s'en trouve fortement endommagée. Dans ces conditions, on comprend aisément que la vitesse d'usure peut être complètement déterminée à partir de concepts d'énergie de rupture et de critères de propagation de fissures [Lancaster, 1972]. Le comportement tribologique des polymères peut être fortement perturbé par la présence de vapeurs et/ou de liquides, lesquels plastifient les couches superficielles. Pour de nombreuses applications pratiques, des charges de toutes sortes sont incorporées afin d'améliorer les propriétés mécaniques, essentiellement augmenter la résistance au fluage, et d'accroître la conductivité thermique. Un autre développement consiste en l'irradiation du polymère afin de modifier la structure moléculaire : des comportements tribologiques (frottement et usure) variés ont été observés [Briscoe et Zhilong, 1984] malgré le point commun qui caractérise tous les polymères, à savoir une énergie de surface relativement faible, de l'ordre de 25 à 40 mJ.m^{-2} .

Cette remarque a conduit Tabor [1982] à proposer un modèle simple reliant la résistance au cisaillement, l'énergie de surface et la distance moyenne entre les atomes de la chaîne macromoléculaire, malheureusement cette approche ne fournit aucune indication sur le mode de dissipation de l'énergie lors du frottement de ce type de matériaux. Question qui reste donc en suspens.

1.5. Le frottement du bois

Ce sujet peut paraître anecdotique, toutefois, il faut se souvenir que la plupart des expériences menées par Amontons [1699] et Coulomb [1785] ont été réalisées avec des surfaces en bois. Une étude détaillée [Atack et Tabor, 1958] a montré que le frottement du bois résulte de l'intervention des deux mécanismes d'adhésion et de déformation, l'adhésion pouvant être importante si le bois contient un peu de résine naturelle et cela est probablement dû à l'action des radicaux hydroxyles des composants de la cellulose du bois. A titre d'exemple, il a été mesuré un coefficient de frottement $\mu = 0,6$ entre une surface de sapin et une surface lisse d'acier. En revanche, le frottement de la lignine est faible ($\mu \approx 0,1$), par contre, après extraction des résines, le coefficient de frottement remonte à $\mu = 0,4$; en d'autres termes, la lignine est un matériau naturel auto-lubrifié. Le comportement mécanique du bois est caractérisé par une viscoélasticité notable, de sorte qu'une énergie appréciable peut être dissipée si le bois est déformé par le matériau antagoniste, au cours du frottement, et bien évidemment ce processus est clairement dépendant de la vitesse et de la température. Ces propriétés viscoélastiques ainsi que la composante «déformation» du frottement du bois ont été exploitées avec succès dans le développement de méthodes efficaces de dépulpage du bois, par exemple. Certains bois, présentant un spectre étendu de pertes viscoélastiques sont utilisés pour fabriquer des planchers absorbateurs de bruits de frottement, un sujet abordé par Gibson *et al.* [1981] au cours de leur étude des propriétés du liège.

1.6. Le frottement générateur de chaleur

La plus grande partie de l'énergie dissipée en frottement apparaît sous forme de chaleur : en effet, le travail de frottement associé à la production de chaleur constitue l'une des expériences réalisées par Joule dans son étude classique de l'équivalent mécanique de la chaleur. Étant donné que cette chaleur de frottement est créée dans une zone de petite dimension, il en résulte que les températures atteintes peuvent être élevées. Elles furent mises en évidence la première fois à l'aide de

couples thermo-électriques [Bowden et Tabor, 1950]. D'autres techniques peuvent être utilisées, telles que les radiations infra-rouges si l'une des surfaces est transparente, ou encore des vernis et peintures sensibles à la température [Swallowe *et al.*, 1986].

Il est indispensable de distinguer deux températures relatives à l'échauffement produit par le frottement. La première est la température moyenne de la surface, qui est plus ou moins stable et dont les effets sont importants à long terme pour ce qui concerne les phénomènes d'oxydation, de ramollissement et éventuellement de fusion. La seconde consiste en ce que l'on appelle communément la température «flash» qui résulte des contacts ponctuels entre aspérités, lesquels peuvent conduire à des températures locales très élevées. Ces dernières ont donc une action à court terme et peuvent jouer un rôle important dans la désorption ou l'évaporation de films lubrifiants ainsi que dans certaines transformations métallurgiques. De plus, Barber [1969] a montré, en imposant des cycles de chauffage et de refroidissement, que le ramollissement des aspérités les plus hautes modifiait la répartition de charge sur les autres aspérités, lesquelles ramollissaient à leur tour ; ce mécanisme expliquant que les fusions locales sont des événements cruciaux dans le processus de polissage des surfaces, bien que certains prétendent que l'on ne peut parfaire la qualité d'un polissage que par une abrasion de plus en plus fine [Archard, 1986b]. Quoiqu'il en soit, il est aujourd'hui bien établi que le bas frottement mesuré sur la glace résulte de la formation d'un film d'eau due à l'échauffement de la glace par frottement [Evans *et al.*, 1976]. Avec les polymères, cet échauffement par frottement peut produire un film superficiel fondu relativement visqueux ; par la suite, l'échauffement peut être généré par dissipation visqueuse au sein du film lui-même. Pour ce qui concerne les métaux, la chaleur produite par frottement joue un rôle très important dans l'oxydation. Dans certains cas, il peut y avoir dissolution d'un des matériaux dans l'autre. Par exemple, on sait depuis longtemps que le carbure de tungstène est soluble dans les matériaux ferreux à haute température [Trent, 1952] et que c'est pour cette raison que l'on ne l'utilise pas pour usiner l'acier à très grande vitesse. Le carbure de titane qui est moins soluble, est employé sous forme de dépôt sur les outils en carbure de tungstène. Dans toutes les analyses théoriques de l'effet calorifique du frottement, les premières étant dues à H. Blok en 1937 et indépendamment à J.-C. Jeager en 1942 [Bowden et Tabor, 1950], il est supposé que la chaleur est toujours générée à l'interface. Cependant, dans quelques cas, par exemple en roulement, il a été montré que les températures les plus élevées sont atteintes sous

la surface, là où les contraintes de cisaillement sont précisément maximales [Wannop et Archard, 1973 ; Rozeanu et Pnueli, 1978].

1.7. Vers une nouvelle formulation de l'équation du frottement de Coulomb

La valeur du coefficient de frottement μ pour un couple particulier de matériaux dépend de la rugosité de surface, des propriétés de déformation ainsi que de la résistance au cisaillement superficiel. C'est ce qui résulte des analyses très détaillées entreprises par l'École russe menée par Kragelskii [Kragelskii *et al.*, 1982]. Si l'on suppose d'une part, que la force de frottement F est la somme d'un terme «adhésion» τA_0 (avec τ = contrainte de cisaillement et A_0 = aire de contact) et d'un terme «labourage» C , et d'autre part, que le phénomène de croissance des jonctions est inopérant :

$$F = \tau A_0 + C$$

or, il est bien connu aujourd'hui que la résistance au cisaillement d'un grand nombre de matériaux, y compris les polymères, les cristaux non-métalliques et même les métaux, augmente avec la pression de contact p suivant une relation de la forme :

$$\tau = \tau_0 + \alpha p$$

l'effet étant le plus marqué avec les polymères par suite de leur grande tendance à décroître en volume libre sous l'effet de la pression. On peut ainsi écrire :

$$F = (\tau_0 + \alpha p)A_0 + C.$$

En remarquant que la force normale d'appui P est liée à la pression selon $p = P/A_0$, la relation précédente devient :

$$F = (\tau_0 + \alpha p)P/p + C$$

de sorte que le coefficient de frottement $\mu = F/P$ est donné par une loi «à trois termes» :

$$\mu = \tau_0/p + \alpha + C/P.$$

Pour les métaux, les deux premiers termes sont prédominants, par contre, avec les polymères et les solides non cristallins, c'est le deuxième terme qui l'emporte de sorte que si le labourage est négligeable : $\mu \approx \alpha$.

Ainsi, il est possible de mesurer les propriétés de cisaillement d'un film mince d'un solide entre deux platines rigides en fonction de la pression de confinement et de déterminer le coefficient de pression α de la résistance de cisaillement, ce qui permet ensuite une évaluation fiable du coefficient de frottement du solide étudié. De telles expériences ont prouvé leur efficacité dans la détermination du frottement de matériaux explosifs dont l'emploi à l'état massif pose des problèmes évidents [Amuzu *et al.*, 1976]. Il est significatif que ce survol du frottement, partant du mécanisme de Coulomb du glissement des aspérités, s'achève en soulignant le rôle particulier que joue la composante «adhésion».

2. L'USURE

2.1. Généralités

L'usure est la conséquence directe et néfaste, économiquement parlant, de conditions très sévères de frottement, et c'est vraisemblablement pourquoi aujourd'hui c'est plutôt l'étude de l'usure que celle du frottement qui est entreprise en pratique pour déterminer la fiabilité mécanique et économique d'un système tribologique particulier. Mis à part les équipements spéciaux travaillant dans l'espace ou à des températures très élevées, toutes les mécanismes sont lubrifiés. Néanmoins, la plupart des études de l'usure entreprises dans les laboratoires, le dispositif expérimental le plus répandu étant du type poinçon chargé en contact avec un disque rotatif, sont réalisées avec des surfaces non lubrifiées - exceptions faites des expériences menées pour étudier les lubrifiants «extrême pression» - et cela essentiellement pour deux raisons majeures :

- les surfaces bien lubrifiées s'usent très lentement et il faudrait donc multiplier des expériences de longue durée, ce qui irait à l'encontre d'une bonne reproductibilité ;
- il est bien admis que l'usure résulte d'une rupture du film lubrifiant qui conduit temporairement à des conditions de frottement sec.

Bien évidemment on peut se demander si l'hypothèse émise est vraie, malheureusement, la littérature spécialisée reste muette sur ce point. Il est supposé que le contact métal-métal crée une adhésion et que les contraintes locales sont suffisamment importantes pour produire un fragment d'usure. A travers le film lubrifiant les contacts locaux métal-métal ne sont responsables de la résistance de frottement que pour une très faible partie, la plus grande partie résultant du cisaillement

du film, mais en revanche, ils constituent la principale cause d'usure. Le problème le plus important est le suivant : d'un système de frottement à un autre, on peut observer des variations de frottement de quelques pour cent alors que les endommagements de surfaces, la perte correspondante de matériau due à l'usure peut varier d'un facteur mille ou plus. Il peut donc paraître futile de prétendre pouvoir déduire d'expériences de frottement des enseignements utiles concernant l'usure. Un autre problème consiste à comprendre le rôle que peuvent jouer les fragments d'usure sur le processus d'usure lui-même. Plus grave encore, dans quelle mesure le résultat de l'expérience de frottement conduisant à l'usure n'est-il pas conditionné par les caractéristiques mécaniques du dispositif expérimental lui-même ?

Malgré ces réserves, il est bon de rappeler le modèle d'usure adhésive suggéré par Archard et Hirst [1956], lequel est toujours d'actualité. Si l'on suppose qu'une aspérité porte une charge P et qu'elle produit une jonction de section circulaire de rayon a : $P = p\pi a^2$, p étant la pression locale. Si, de plus, on suppose que pendant le glissement le cisaillement de la jonction produit un fragment d'usure hémisphérique, son volume vaut $v = (2/3)\pi a^3$. Le fragment étant formé sur une distance de glissement égale à $2a$, il en résulte que le volume d'usure par unité de distance de glissement est $(1/3)\pi a^2 = P/3p$. Si l'on applique le même raisonnement à tous les fragments, le volume total W d'usure par unité de distance de glissement est égal à : $W = N/3p$, N étant la charge normale appliquée. Bien évidemment ce modèle suppose que toutes les jonctions produisent un fragment d'usure, ce qui n'est pas le cas, seulement une faible fraction κ contribue à l'usure ; en d'autres termes, le volume total d'usure par unité de distance de glissement vaut :

$$W = \kappa N/3p.$$

Cette formule simple n'est pas sans intérêt et cela pour deux raisons majeures, elle montre que :

- le volume d'usure est proportionnel à la charge totale d'appui ;
- le volume d'usure est proportionnel à la distance de frottement.

L'expérience confirme rigoureusement ces deux affirmations. Un autre point intéressant est le large éventail des valeurs couvertes par le paramètre κ , lequel varie de 10^{-2} pour le couple de matériaux acier mi-dur / acier mi-dur (coefficient de frottement égal à 0,6) à 10^{-7} pour le polyéthylène haute densité frottant contre une surface d'acier dur (coefficient de frottement égal à 0,65). Le paramètre κ est d'un grand

intérêt pratique dans la mesure où il permet de comparer les vitesses d'usure d'une gamme étendue de matériaux, même lorsque le processus d'usure n'est pas l'adhésion, mais l'abrasion, par exemple [Trent, 1952 ; Kragelskii, 1965 ; Rabinowicz, 1965 ; Bowden et Tabor, 1966 ; Lancaster, 1972 ; Moore, 1972 ; Crompton *et al.*, 1973 ; Wannop et Archard, 1973 ; Tanaka et Uchiyama, 1974 ; Moore, 1975 ; Terr et Arnell, 1975 ; Briscoe et Tabor, 1980 ; Sarkar, 1980 ; Buckley, 1981 ; Kragelskii *et al.*, 1982 ; Misra et Finnie, 1983 ; Challen *et al.*, 1984 ; Godet, 1984 ; Rabinowicz, 1984 ; Rigney *et al.*, 1984 ; Chernyak et Leonov, 1986 ; Lim et Ashby, 1987 ; Muhr et Roberts, 1988 ; Berthier *et al.*, 1989 ; Kajdas *et al.*, 1990 ; Barquins, 1992 ; Hutchings, 1992].

2.2. L'usure des métaux

Plusieurs types d'usure ont été répertoriés en fonction des similitudes de dégradations de surfaces et des mécanismes leur correspondant ont été proposés. Par exemple, pour ce qui concerne les phénomènes liés à l'adhésion, il y a l'usure dite sévère, le grippage rencontré essentiellement dans le cas de métaux propres ductiles avec transfert de fragments métalliques. L'usure est déclarée moyenne si le film d'oxyde résiste ou en présence d'une couche de contamination. Mais on ignore l'influence exacte de la ductilité, de l'écroutissage, de la structure électronique et cristalline, des transformations de phase pendant le cisaillement ; on ne sait pas comment les fragments transférés deviennent des particules d'usure ou encore quel est le degré de contamination qui empêche le contact métal-métal ?

Il existe des phénomènes d'usure par rayure, par coupe avec formation de copeaux que l'on regroupe sous le label d'usure par abrasion ou par érosion suivant la vitesse de l'impact. Des particules dures peuvent rayées une surface et produire un enlèvement de matière. Bien évidemment si ces particules dures sont les aspérités de la surface antagoniste, le calcul de l'usure est simple ; en revanche, si la présence des particules est accidentelle ou si elles sont produites par le processus d'usure lui-même, l'analyse de la situation s'avère très délicate. De plus, en présence de lubrifiant, la mise en place d'un régime de coupe augmente la vitesse d'usure, ce qui pose un problème grave pour toutes les surfaces lubrifiées [Challen *et al.*, 1984]. Pour ce qui concerne particulièrement le phénomène d'érosion, les grandes vitesses d'impact provoquent de très grandes vitesses de déformation ainsi qu'un cisaillement adiabatique. Mais quelles propriétés des matériaux sont principalement impliquées et est-ce que le cisaillement adiabatique est un fait général ?

Des mécanismes sont basés sur la nature des surfaces et leurs tendances à évoluer sous l'effet de la fatigue ou de la fissuration superficielle. Il peut y avoir formation soit de fines particules d'usure qui s'oxydent, soit de plaques créées par agrégation de ces fins fragments d'usure. Quant à la fissuration des couches sub-superficielles, elle a pour conséquence la délamination de la surface sur une certaine épaisseur [Suh, 1986]. Il n'y a pas encore de réponse apportée concernant l'origine exacte des fines particules d'usure observées : fatigue ou abrasion des aspérités durcies par l'écrouissage ou les deux processus ? Y a-t-il une cission critique en deçà de laquelle la délamination superficielle ne se produit pas ? Quant au brunissage des surfaces, est-il dû à une micro-adhésion ou une micro-fatigue de la surface des aspérités ? Avec certaines classes de céramiques, l'usure est quasiment nulle, bien que cela soit une bonne chose, on ne sait pas expliquer cette absence d'usure. Dans le cas du frottement du diamant contre lui-même, il existe une espèce de « période d'incubation » avant que l'usure commence, quel en est le mécanisme ?

D'autres mécanismes sont liés à l'existence des hautes températures, lesquelles provoquent une oxydation. Dans le cas d'une oxydation de moyenne importance, les températures « flash » créent l'oxydation aux points de contact, l'oxyde formé s'épaissit au cours de temps jusqu'à atteindre une dimension critique au delà de laquelle il se détache pour former un fragment d'usure, de sorte que la surface frottée est ré-oxydée de manière permanente. On ne sait pas encore dans quelle mesure interviennent les propriétés mécaniques de l'oxyde, et le processus de détachement de l'oxyde n'est pas parfaitement élucidé. Dans le cas d'une oxydation marquée, provoquée par de grandes vitesses de glissement par exemple, il est possible que l'oxyde subisse un ramollissement et même une fusion [Lim et Ashby, 1987] et une couche peut être déposée sur la surface antagoniste où elle se solidifie. Mais où se produit l'échauffement, en surface ou dans la couche subsuperficielle ou bien encore au sein du film d'oxyde ? Dans le cas de petits débattements, de frottement cyclique de faible amplitude, l'échauffement local crée des particules d'usure qui peuvent jouer le rôle de particules abrasives : comment se met en place cette auto-abrasion ?

Des effets chimiques, autres que l'oxydation, peuvent provoquer l'usure, comme cela peut arriver avec les additifs « extrême pression » lesquels, utilisés dans des conditions sévères de frottement, sont susceptibles de corroder les surfaces avec la conséquence immédiate

d'entraîner une perte importante de métal. C'est le problème général de la réactivité des surfaces frottées qui se trouve ainsi posé. Le mécanisme de rupture des films, leurs propriétés ainsi que leur caractérisation restent une question fondamentale en tribologie.

2.3. L'usure des matériaux non métalliques : polymères et céramiques

L'usure des polymères se manifeste sensiblement de la même manière que pour les métaux : par adhésion et cisaillement des couches superficielles, par abrasion au contact d'un contre-matériau plus dur, ou encore par ramollissement ou fusion. Les questions sans réponses concernent les influences de la cristallinité, de la structure chimique, du degré de réticulation, du colmatage des rugosités du matériau antagoniste par les particules d'usure du polymère. L'échauffement est-il provoqué par des pertes visqueuses au sein du polymère fondu ?

Pour les céramiques il y a aussi une certaine similitude avec les métaux, à laquelle il convient d'ajouter deux facteurs spécifiques :

- les céramiques sont des matériaux généralement fragiles de sorte que des tractions tangentielles sont capables d'initier et de propager des fissures à partir de défauts superficiels micro- ou macroscopiques préexistants provoquant une fragmentation de la céramique suivant un processus qui est relativement bien compris ;
- les céramiques ont ordinairement une conductivité thermique assez faible si bien que l'échauffement inévitable dû au frottement peut produire des températures extrêmes élevées, si celles-ci sont très localement du type «flash», les contraintes thermiques induites par la brusque variation de température peuvent générer des fractures.

Dans le cas d'un échauffement réparti, on peut observer un léger ramollissement et l'apparition d'une certaine ductilité. Pour ce qui concerne particulièrement les céramiques covalentes, on a déjà vu que la surface piège les molécules de l'atmosphère ambiante de sorte que l'adhésion interfaciale est beaucoup plus faible que la cohésion du produit, ce qui a pour conséquence d'observer une usure, non par arrachement adhésif de fragments mais par fracturation. Il est clair que la ténacité des céramiques est un paramètre des plus importants à prendre en compte dans les études de l'usure de ce type de matériaux.

3. CONCLUSIONS

Actuellement, les chercheurs et les ingénieurs tendent à isoler et à étudier les mécanismes spécifiques de l'usure. Les processus les plus divers ont été répertoriés et leur importance démontrée : adhésion, abrasion, délamination, fatigue, oxydation, corrosion, érosion, fissuration, fragmentation. Si un système mécanique fonctionne dans des conditions telles que l'usure est produite par un des mécanismes précédemment évoqués, les résultats de l'étude présentent un très grand intérêt. A titre d'exemple, dans une analyse de l'usure par fatigue [Kragelskii *et al.*, 1982] il a été possible de prédire les taux d'usure sur une dizaine d'ordres de grandeur pour des matériaux et systèmes aussi variés que des pneumatiques, des plaquettes de freins, des disques d'embrayages, des engrenages et autres mécanismes de l'industrie automobile. Cependant, dans la pratique, il n'est absolument pas évident qu'un seul processus d'usure soit prédominant et il conviendrait donc que ceux qui concentrent, à juste titre, leur étude sur un processus d'usure particulier détectent et indiquent clairement les conditions pour lesquelles le processus étudié cesse d'être important. Un modèle dans le genre a été réalisé par Lim et Ashby [1987] qui ont limité leurs investigations à l'étude de l'usure des surfaces non lubrifiées en acier. Et pourtant, même concernant cette étude remarquable, il est intéressant de signaler que dans le processus impliquant l'oxydation de la surface, le ramollissement ou encore la fusion superficielle, les équations de la chaleur peuvent fournir des résultats réalistes sans pour autant permettre de savoir ce qui se passe à l'interface ou comment le frottement, qui crée l'échauffement, est lui-même généré. Il convient de noter que l'évaluation de l'usure dans le cas où l'adhésion et les tractions superficielles jouent un rôle important, implique non seulement des calculs compliqués mais aussi un certain nombre d'hypothèses. De plus, bien qu'il semble possible de délimiter les domaines de pressions de contact et de vitesses de glissement pour lesquels les processus principaux d'usure sont bien identifiés, ceux-ci impliquent un très grand nombre de paramètres. Par ailleurs, les régimes d'usure bien séparés ne couvrent pas nécessairement l'ensemble du champ d'interactions et un mécanisme prédominant dans un domaine de pressions et de vitesses peut également interagir avec d'autres mécanismes dans d'autres domaines d'une manière imprévisible. Tout ceci pour conclure que les situations pratiques d'usure sont extrêmement compliquées et que l'on ne sait pas toujours pas aujourd'hui ce qui se passe réellement à l'interface pendant le glissement. C'est vraisemblablement la raison pour laquelle on est incapable de prédire la durée de vie d'un mécanisme en frottement sec, et cela malgré toutes les études entrepri-

ses dont la plupart sont répertoriées dans les 1750 références d'une encyclopédie de tribologie récemment éditée [Kajdas *et al.*, 1990].

Bien qu'il soit difficile d'être plus pessimiste, de vastes domaines d'études restent ouverts et mêmes prometteurs si l'on tente de répondre à la question, comme le suggère David Tabor [1992] : comment est dissipée l'énergie pendant le frottement ?

Plusieurs idées sont à explorer en remarquant que dans le domaine du cisaillement plastique, par exemple dans le cas d'un solide cristallin, il est bien connu que les atomes dans le plan de cisaillement sont déplacés de leur position d'équilibre vers une situation instable avant d'atteindre une autre configuration stable : au cours de ces mouvements successifs, de l'énergie a été consommée sous forme vibratoire qui est convertie en chaleur. Ce mécanisme intervient sans aucun doute dans le frottement, chaque fois qu'une déformation plastique est impliquée. Des mécanismes vibratoires semblables ont également vraisemblablement lieu, dans les conditions élastiques ou quasi élastiques, lorsque le frottement se produit rigoureusement à l'interface, ce qui peut être le cas avec les surfaces métalliques recouvertes d'oxyde, avec les céramiques, avec les polymères pour lesquels la distorsion cisailante des couches sub-superficielles est dissipée sous forme vibratoire. Cette idée n'est pas nouvelle [Tomlinson, 1929] mais une étude analytique récente, puissante et prometteuse [McClelland et Glosli, 1992], montre comment la dissipation type «Tomlinson» dépend des forces intermoléculaires et de l'espacement des réseaux cristallins des solides en contact. Il faut que les espacements ne soient pas trop petits et que les forces interfaciales ne soient pas trop faibles pour que de l'énergie soit dissipée. Le rôle d'oscillateurs que peuvent jouer les aspérités dans ces phénomènes d'origine vibratoire doit être élucidé. Il faut que les modèles à venir traitent correctement le problème de la restitution de l'énergie mécanique emmagasinée, soit dans les liaisons solides, soit dans le déplacement des aspérités. Dans ce domaine d'études, la microscopie de force atomique (AFM) devrait être un instrument de choix pour entreprendre des expériences extrêmement minutieuses et pleines d'enseignements pour la tribologie.

Il semble que l'Europe vienne de se donner les moyens de progresser à grands pas dans ce domaine très pluridisciplinaire qu'est la tribologie, en créant récemment l'Institut Européen de Tribologie (I.E.T.), dont la présentation internationale a eu lieu à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, le 19 janvier 1993. Cet institut

associe six laboratoires, trois français et trois anglais : le laboratoire de Mécanique des Contacts de l'I.N.S.A. de Lyon, le laboratoire de Tribologie et de Dynamique des Systèmes et le département Matériaux-Mécanique Physique de l'École Centrale de Lyon, the Institute of Tribology de l'université de Leeds, the Tribology Section du département de Génie Mécanique et the Particle Technology and Interface Engineering Group du département de Génie Chimique de l'Imperial College de Londres.