

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
معهد الصيانة والأمن الصناعي

Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Polycopié de cours



Dr. Salima SENHADJI

Master en Maintenance-Fiabilité-Qualité

2022/2023

Avant-propos

Ce polycopié est le fruit de nombreuses années d'expérience dans l'enseignement et de recherches scientifiques dans le domaine de la tribologie. Il est destiné aux étudiants de master en Maintenance-Fiabilité-Qualité (MFQ) de la filière de génie industriel. L'objectif de ce polycopié est de donner les outils nécessaires qui peuvent aider l'étudiant à maîtriser les concepts clés de la matière.

Le manuscrit est constitué de cinq chapitres :

Dans le premier chapitre on rappelle les notions de base de la tribologie, les différents domaines d'application dans l'industrie ainsi que les principaux paramètres influant un tribosystème.

Le deuxième chapitre contient les principaux constituant de la surface et les paramètres associés à l'échelle microscopique, et le rôle crucial que présente la surface du matériau dans l'étude du comportement tribologique des systèmes mécaniques.

Dans le troisième et le quatrième chapitre sont présentés les deux phénomènes observables qui peuvent se produire lors d'un contact mécanique en mouvement relatif, à savoir le frottement et le processus d'usure.

Quant au dernier chapitre, il introduit les notions élémentaires de la lubrification et les améliorations qu'elle peut apporter à un système tribologique, ainsi que les différents facteurs responsables de la création des différents régimes de lubrification.

Table des matières

1	Généralité sur la tribologie	2
1.1	Notions de la tribologie	2
1.2	Domaines d'application	3
1.3	Les différentes échelles de la tribologie	4
1.4	Le système tribologique	4
1.5	Influence des différents paramètres sur le comportement du contact	5
1.6	Phénomènes multi-physiques d'un tribosystème	8
2	Etat de surface microgéométrique	10
2.1	Introduction	10
2.2	Structure de surface	10
2.3	Principaux défauts de surfaces	11
2.4	Les techniques de mesures	12
2.5	Caractéristique du profil	13
2.6	Paramètres d'état de surface	15
2.7	Rôle de la rugosité	16
2.8	L'aire réelle du contact	17
3	Le frottement	19
3.1	Introduction	19
3.2	Définition du frottement	19
3.3	Types de frottement	19
3.4	Cinétique de frottement	20
3.5	Frottement statique	21
3.6	Frottement dynamique	21
3.7	Effet de frottement	23
3.8	Effet de la rugosité sur le frottement	23
4	Processus d'usure	24
4.1	Introduction	24
4.2	Evolution de l'usure	24
4.3	Les différents types d'usure	26
4.3.1	Usure adhésive	26
4.3.2	Usure abrasive	27
4.3.3	Usure par fatigue	28
4.3.4	Usure corrosive ou tribochimique	29
4.4	Approche quantitative de l'usure	30

4.5	La carte d'usure.....	32
5	La lubrification	34
5.1	Notions sur la lubrification.....	34
5.2	Rôles de la lubrification	34
5.3	Les régimes de lubrification (Courbe de Stribeck)	35
5.3.1	Régime de lubrification limite	36
5.3.2	Régime de lubrification mixte	36
5.3.3	Régime de lubrification hydrodynamique	36
5.4	Les types de lubrifiants	37
5.5	Les lubrifiants liquides.....	38
5.5.1	Composition d'une huile.....	38
5.5.2	Les additifs.....	38
5.6	Propriétés des huiles.....	39
5.6.1	Propriétés physiques	39
5.6.2	Propriétés chimiques.....	40
	BIBLIOGRAPHIE	41

Introduction générale

La tribologie est une discipline scientifique qui s'intéresse à l'étude des phénomènes liés aux frottements, à l'usure et à la lubrification des surfaces en contact. Cette science interdisciplinaire englobe plusieurs domaines, tels que la mécanique, la physique, la chimie et la science des matériaux. Elle permet de comprendre les interactions complexes qui se produisent entre les surfaces en contact, en prenant en compte les propriétés physiques et chimiques des matériaux utilisés. Ainsi, elle offre des solutions pour réduire l'usure, après avoir identifié les causes de cette usure, telles que l'utilisation de lubrifiants et des revêtements.

La tribologie a des applications dans de nombreux secteurs industriels, notamment l'automobile, l'aéronautique, l'énergie et la production d'équipements mécaniques. Dans l'industrie automobile, elle est utilisée pour améliorer la performance des moteurs, réduire l'usure et augmenter la durée de vie des pièces en mouvement. Dans l'aéronautique, elle permet de réduire les risques liés aux défaillances des équipements en vol, ce qui est essentiel pour assurer la sécurité des passagers. Dans le secteur de l'énergie, elle est utilisée pour améliorer l'efficacité des turbines et des générateurs, ce qui permet de réduire les coûts de production et de diminuer l'impact environnemental des processus industriels.

La tribologie est un domaine en constante évolution, axé sur la recherche et l'innovation, qui permet de répondre aux défis technologiques majeurs de notre époque, notamment en termes de développement durable et d'efficacité énergétique.

1 Généralité sur la tribologie

1.1 Notions de la tribologie

Le mot "tribologie" est un terme technique qui vient du grec "tribos" qui signifie "frottement". Il désigne la science qui étudie les phénomènes liés au frottement, à l'usure et à la lubrification des surfaces en contact, que ce soit entre des matériaux solides, des liquides ou des gaz.

La tribologie englobe à la fois la science et la technologie interdisciplinaires des surfaces en mouvement relatif et en interaction, ainsi que les domaines et techniques qui s'intéressent aux causes et aux effets et moyens d'amplifier ou de réduire les interactions entre les surfaces en contact (figure 1.1). Elle comprend notamment des aspects de physique, de chimie, de mécanique des solides, de mécanique des fluides, de transfert de chaleur, de science des matériaux, de rhéologie des lubrifiants, ainsi que de fiabilité et de performance.

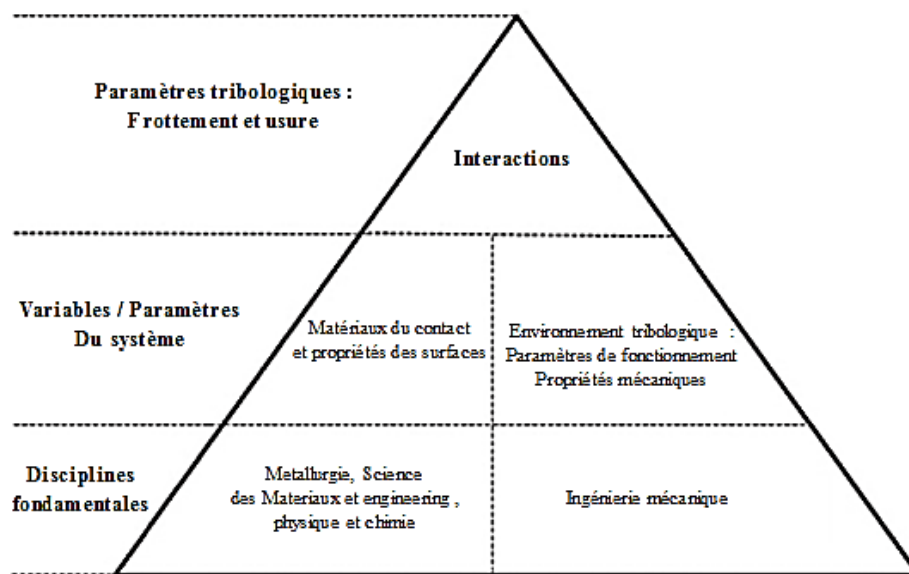


Figure 1.1 : Concept triangle illustrant l'interaction des sciences basiques, des disciplines d'ingénierie impliqués dans la tribologie

Au cours des dernières décennies, la recherche dans le domaine de la tribologie s'est principalement concentrée sur le volume des matériaux en contact (Bowden 1964), et cela en étudiant les lois de comportement du frottement et de l'usure (approche mécanique). Puis, la tribologie des surfaces est apparue par la suite faisant appel à la physico-chimie des surfaces (Buckley 1981) (approche des matériaux).

L'étude des surfaces n'ayant pas permis d'expliquer tous les phénomènes dus au frottement, la tribologie s'est étendue à l'étude des interfaces (approche complémentaire

mécanique/matériaux), qui a permis une meilleure compréhension des mécanismes de frottement et de l'usure. Plusieurs notions ont été introduites, par la suite, pour une meilleure compréhension des mécanismes de frottement et de l'usure (Godet 1984, Berthier 1988), tels que la notion du contact à trois corps qui s'articule autour des concepts de triplet tribologique, du circuit tribologique et des mécanismes d'accommodation de vitesse.

1.2 Domaines d'application

La tribologie joue un grand rôle dans l'industrie moderne qui utilisent des surfaces de glissement et de roulement dans différents mécanismes. Selon l'utilisation de ces mécanismes, on cherche à minimiser ou à maximiser le frottement et l'usure grâce à un bon choix des matériaux et de type de lubrification. Le frottement il est utile par exemple dans le cas des freins, des embrayages, des roues motrices des trains et des voitures. Par contre, il est nuisible lorsqu'il affecte le fonctionnement des organes mécaniques, tels que : les engrenages, les cames, les roulements.

Au cours des deux dernières décennies, le domaine d'application de la tribologie s'est étendu à d'autres secteurs novateurs, tels que celui de la santé (les solutions ophtalmiques, les prothèses, etc.), et du secteur de la tribotronique qui combine des pièces mécaniques et des composants électroniques (actionneurs piézoélectriques, couplage frottement/électricité, etc.) (figure 1.2).

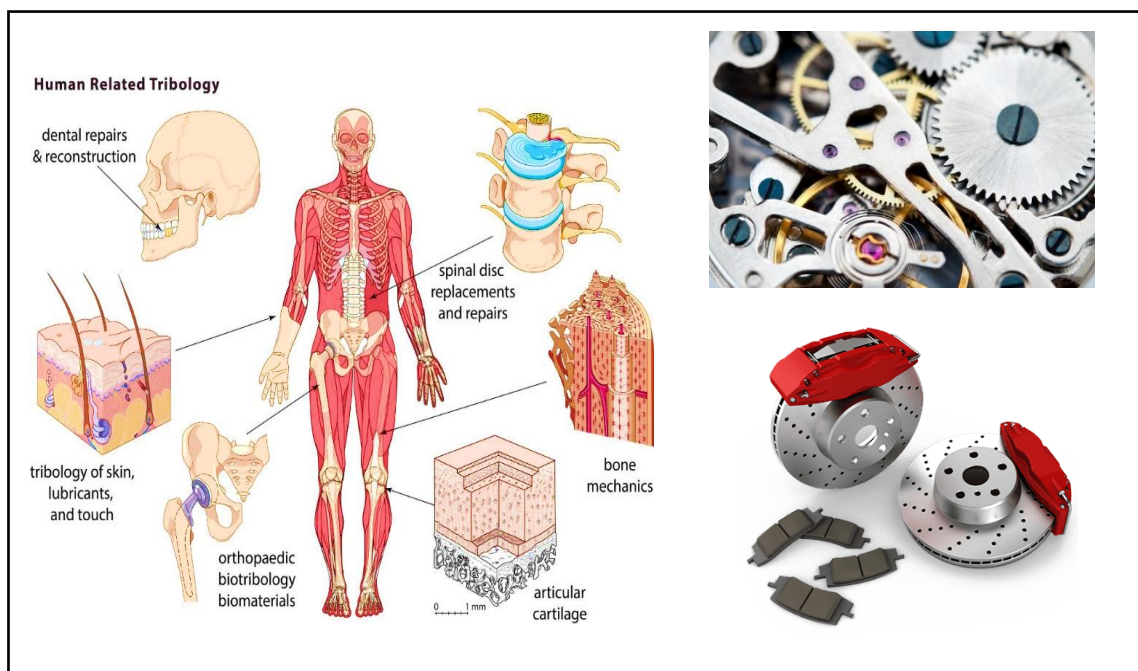


Figure 1.2 : Domaines d'application de la tribologie

1.3 Les différentes échelles de la tribologie

La tribologie s'intéresse aux phénomènes de friction et d'usure qui se produisent lors des contacts glissants entre des surfaces à grande échelle. Cependant, ces phénomènes dépendent de la surface réelle de contact, qui est constituée de petites aspérités à l'échelle microscopique. Par conséquent, la tribologie ne se limite pas au monde macroscopique, mais doit tenir compte des interactions des aspérités à l'échelle microscopique. Au cours des dernières décennies, les progrès des nouvelles technologies ont permis de mesurer le frottement, l'usure, l'adhésion et la topographie des surfaces à l'échelle micro et nanométrique (figure 1.3). Cela a conduit à la création de nouveaux domaines tels que la microtribologie et la nanotribologie. Les études des phénomènes qui se produisent en tribologie à de telles échelles sont cruciales pour mieux comprendre le comportement du matériau lors de contacts à une ou plusieurs aspérités et pour améliorer la fiabilité des systèmes mécaniques à petite échelle, tels que les systèmes micro et nano-électromécaniques.

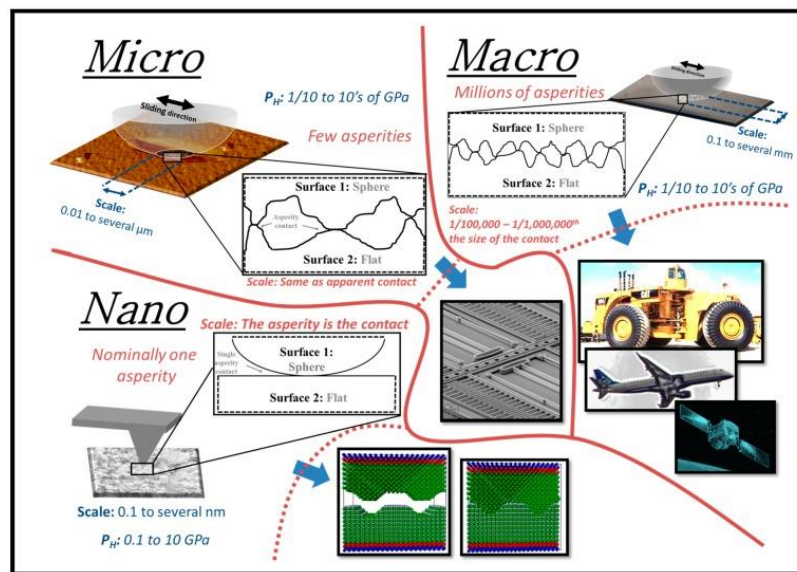


Figure 1.3 : Les différentes échelles de la tribologie

1.4 Le système tribologique

L'analyse des problèmes tribologiques se réduit à l'étude d'un système tribologique ou tribosystème composé de quatre principaux éléments : le premier corps, le deuxième corps antagoniste, le milieu interfacial, défini sous le terme générique de troisième corps (lubrifiant, débris d'usure...), et le milieu environnant (Figure 1.4).

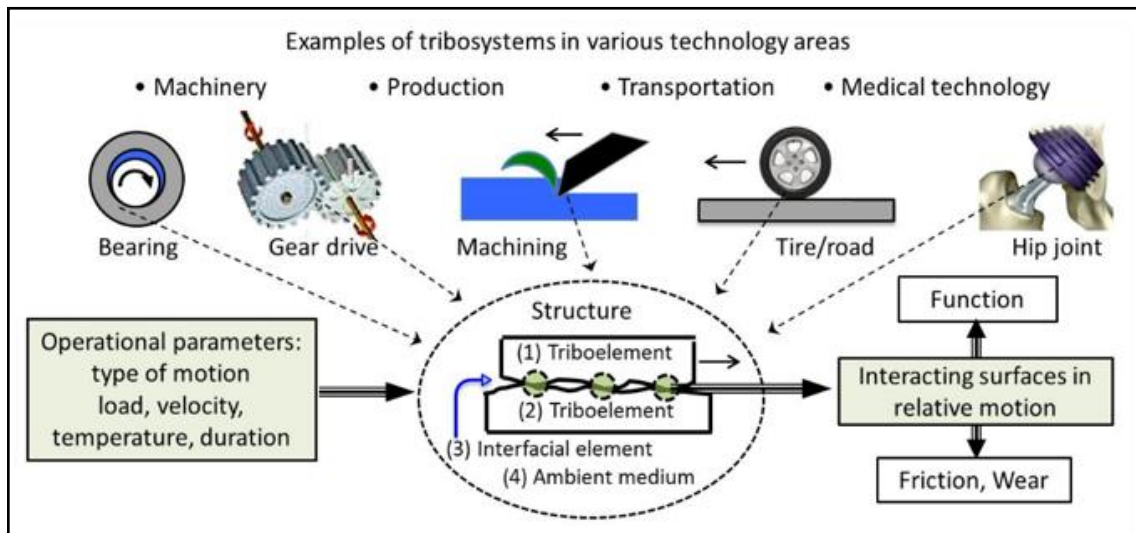


Figure 1.4 : Les systèmes tribologiques

Les paramètres d'entrée de ce tribosystème sont principalement : la cinématique relative des corps, la charge appliquée et son profil, ainsi que la température de service. Le fonctionnement mécanique de ce tribosystème est souvent accompagné par une certaine perte d'énergie, principalement sous forme de chaleur ($\approx 90\%$ de l'énergie introduite), de bruit et d'usure. La perte de matière générée lors de l'usure est influencée par de nombreux facteurs, notamment les propriétés générales des corps en contact, leurs caractéristiques de surface (par exemple, la rugosité, la dureté, l'énergie de surface) et les conditions du système, telles que le lubrifiant, le mouvement relatif des corps et les charges transmises.

1.5 Influence des différents paramètres sur le comportement du contact

Les paramètres qui conditionnent les effets du contact sur le système tribologique peuvent être classés en six familles : la géométrie, les matériaux, la cinématique, la charge normale, l'environnement et la microgéométrie.

a) La géométrie

La géométrie influence la nature et la forme du contact en tribologie. Elle dépend de nombreux paramètres, tels que la longueur, la largeur et le rayon de courbure des surfaces en contact. Compte tenu de la complexité de la forme réelle du contact, des géométries plus simples sont souvent choisies pour étudier le contact. Trois modes de contact sont généralement considérés : ponctuel, linéaire ou surfacique (figure 1.5).

Les deux premiers types sont des contacts Hertziens et présentent une surface de contact dont l'aire évolue avec l'usure.

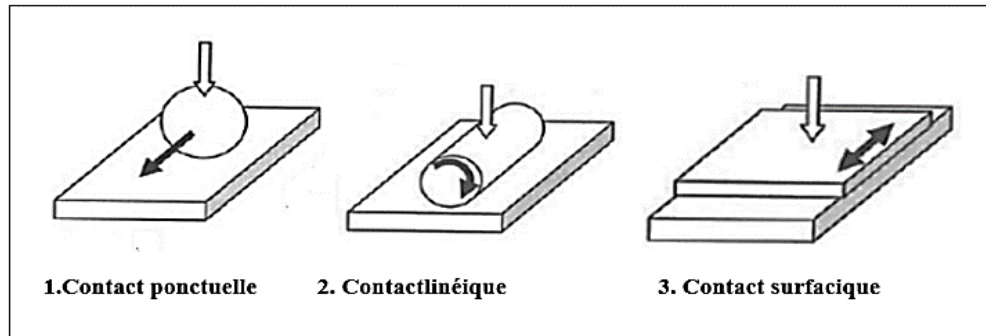


Figure 1.5 : Différentes géométries de contact en tribométrie

b) Les matériaux

La nature du matériau est importante pour le comportement tribologique, notamment dans la résistance à l'usure et la friction. Les propriétés physiques et mécaniques telles que la dureté, la ténacité, la résistance à la fatigue, la résistance à la corrosion et la conductivité thermique, affectent ces paramètres. La microstructure et la composition chimique du matériau ont également un impact significatif sur le comportement tribologique. Les traitements de surface et les revêtements peuvent améliorer les propriétés de surface et réduire la friction et l'usure.

c) La cinématique

La cinématique relative des corps en contact peut également avoir un impact sur le comportement tribologique. Par exemple, à des vitesses de glissement élevées, la friction peut augmenter en raison de l'augmentation de la température de contact et de la diminution de la capacité du lubrifiant à maintenir un film continu. De plus, la fréquence des sollicitations, qu'elles soient continuées, alternées ou répétées, peut également affecter le comportement tribologique et peut également entraîner des difficultés dans le maintien des films de lubrifiant, ce qui peut augmenter la friction et l'usure. Par conséquent, il est important de prendre en compte la cinématique et la fréquence des sollicitations lors de la conception de systèmes tribologiques.

La vitesse contribue à l'énergie dissipée dans le contact. Elle est aussi l'un des facteurs intervenant dans l'évaluation de la durée de vie des surfaces; combinée au temps de fonctionnement, elle permet le calcul de la distance à parcourir.

$$E_s = \mu PV \quad (1.1)$$

E_s : Energie spécifique dissipée dans le contact

P : Pression de contact

d) La charge

La charge est un paramètre important qui influence le comportement tribologique d'un système. Une charge plus élevée peut entraîner une augmentation de la friction, de l'usure et de la température, ce qui peut à son tour affecter la durée de vie du système. En effet, une charge élevée peut causer une déformation plastique, une fissuration ou un écaillage de la surface du matériau, ce qui peut entraîner une augmentation de l'usure. Cependant, dans certaines conditions, une charge plus élevée peut également entraîner une diminution de l'usure et une amélioration de la résistance à l'usure, car elle peut aider à former une couche protectrice de transfert de matière. Dans ce cas, l'usure peut être plus lente au début, puis augmenter à un taux plus lent à mesure que la couche de transfert s'épaissit. Il est important de noter que la charge appliquée peut également influencer le régime de lubrification et donc le comportement tribologique du système. Par exemple, une charge insuffisante peut entraîner une lubrification insuffisante et une augmentation de la friction, tandis qu'une charge excessive peut écraser le film de lubrifiant et réduire la résistance à l'usure.

La charge intervient dans l'énergie dissipée dans le contact. Si l'on adopte une loi de frottement de Coulomb, par exemple, la puissance mise en jeu par frottement s'exprime par l'expression:

$$E = \mu WV \quad (1.2)$$

E : énergie dissipée,

μ : Coefficient de frottement,

W : Charge appliquée,

V : Vitesse de déplacement.

e) L'environnement

L'environnement dans lequel le système tribologique est utilisé peut également avoir un impact significatif sur son comportement. Par exemple, la température et l'humidité peuvent affecter la lubrification, la formation de films protecteurs et la résistance à la corrosion des surfaces de contact. Les propriétés tribologiques des matériaux peuvent également varier en fonction des conditions environnementales telles que la température,

la pression. En outre, la présence de contaminants tels que des particules ou des fluides étrangers peut altérer les propriétés tribologiques des surfaces de contact, entraînant une augmentation de l'usure et de la friction. Enfin, les propriétés tribologiques peuvent être affectées par des processus chimiques tels que l'oxydation, la dégradation thermique ou la réaction chimique avec le lubrifiant ou les contaminants.

f) La surface de contact

La surface de contact joue un rôle important dans le comportement tribologique. Les propriétés de surface, telles que la rugosité, la dureté, la texture et la topographie, peuvent affecter significativement la friction, l'usure et la lubrification dans le système tribologique. Une surface plus rugueuse peut entraîner une augmentation de la friction et de l'usure, tandis qu'une surface plus lisse peut réduire la friction et l'usure. De plus, la dureté de la surface peut influencer la résistance à l'usure et la friction. La texture de surface, comme les motifs en relief, peut affecter le comportement tribologique en créant des poches de lubrifiant ou en dirigeant le flux de lubrifiant vers des zones spécifiques. Les irrégularités de surface, comme les crêtes et les vallées, peuvent également influencer la lubrification et la répartition de la pression.

1.6 Phénomènes multi-physiques d'un tribosystème

Un tribosystème est souvent caractérisé par la présence de phénomènes multi-physiques qui se produisent simultanément lors du frottement et de l'usure des surfaces en contact. Ces phénomènes peuvent inclure des interactions mécaniques, thermiques, chimiques et électromagnétiques. Par exemple, lorsqu'un matériau frotte contre un autre, une résistance mécanique est générée qui se traduit par une force de friction. Cette force de friction entraîne également une augmentation de la température des surfaces en contact, ce qui peut conduire à des phénomènes de transfert de chaleur. De plus, le processus de frottement peut entraîner des réactions chimiques entre les surfaces en contact et l'environnement, conduisant à des phénomènes de corrosion, d'oxydation ou de formation de films de surface (figure 1.6). Ces réactions chimiques peuvent également affecter les propriétés tribologiques des surfaces en contact, comme la friction et l'usure. Des phénomènes électromagnétiques tels que la génération de charges électrostatiques ou la création de champs magnétiques peuvent également se produire lors du frottement et de l'usure des surfaces en contact. Ces phénomènes peuvent avoir un impact sur les propriétés tribologiques du système, tels que la formation de films lubrifiants ou la réduction de la friction.

La compréhension de ces phénomènes multi-physiques est essentielle pour la conception et l'optimisation des systèmes tribologiques, ainsi que pour le développement de solutions de lubrification et de revêtements de surface efficaces.

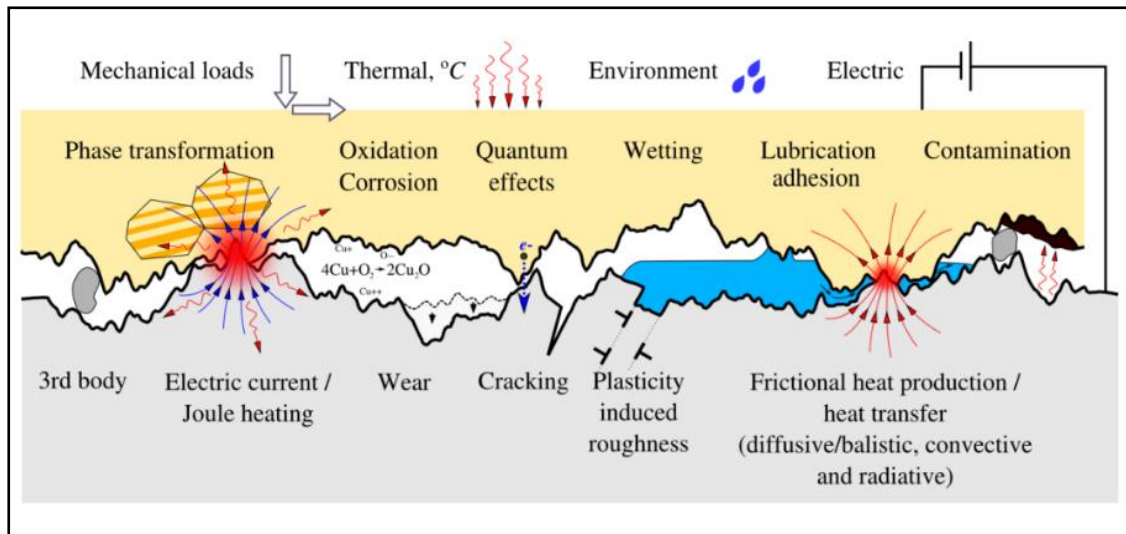


Figure 1.6 : Schéma représentant la nature multi-physique des interactions tribologiques

2 Etat de surface microgéométrie

2.1 Introduction

L'état de surface microgéométrique des corps en contact à l'échelle microscopique est crucial dans l'étude du comportement tribologique des systèmes. La rugosité, le profil et la texture de la surface peuvent influencer les propriétés tribologiques du système, tels que le frottement, l'usure et la lubrification. La rugosité peut affecter la capacité des surfaces à se mettre en contact et à se séparer, tandis que le profil et la texture peuvent influencer la répartition des contraintes et la capacité de la surface à maintenir un film lubrifiant efficace.

2.2 Structure de surface

Les surfaces des matériaux solides se composent de différentes zones qui ont des propriétés distinctes par rapport au reste du matériau. La première couche est une fine couche d'adsorption et de chimisorption qui se forme sur la surface en raison des interactions avec le milieu environnant. Cette couche est très mince, d'une épaisseur de l'ordre de quelques nanomètres. La deuxième couche est une couche d'oxyde qui se forme à la surface et a une épaisseur d'environ 10 nm. La troisième couche est une zone cristalline écrouie qui se forme à la surface en raison des contraintes de surface liées au processus de fabrication, tel que l'usinage ou le formage. Cette couche a une épaisseur d'environ 1 μm . Enfin, la quatrième couche est le volume du matériau qui commence à partir d'une profondeur d'environ 100 μm à partir de la surface. Chacune de ces couches a des propriétés physiques et chimiques différentes et peut influencer les propriétés tribologiques de la surface.

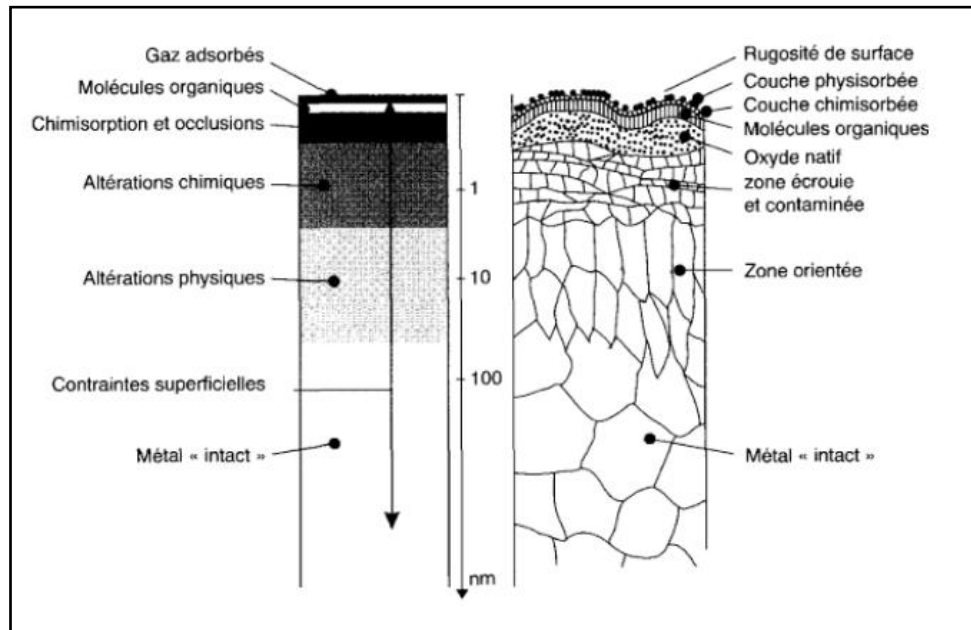


Figure 2.1 : Structure microscopique de la surface d'un métal usiné

2.3 Principaux défauts de surfaces

Les défauts de surface sont des imperfections ou des irrégularités qui affectent la géométrie de la surface d'un matériau. Ils peuvent être dus aux processus de fabrication, au traitement de surface, à l'utilisation, à l'usure ou à d'autres facteurs environnementaux. Les principaux défauts de surface comprennent les défauts de forme, les défauts d'ondulation et la rugosité.

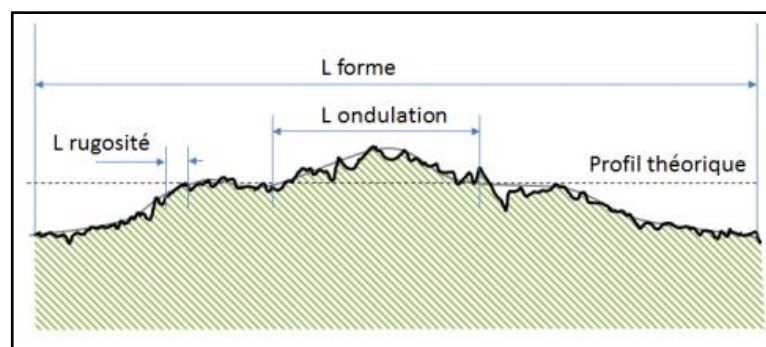


Figure 2.2 : Défauts géométriques d'une surface

Les défauts de forme sont des irrégularités qui affectent la forme générale de la surface, telles que des bosses, des creux ou des distorsions. Ces défauts peuvent être causés par des erreurs dans les processus de fabrication, tels que des variations dans les moules ou les matrices, des outils de coupe mal alignés ou des pressions de formage inégales. Les

défauts de forme peuvent affecter la performance tribologique en causant des points de contact inégaux ou en affectant la répartition des contraintes.

Les défauts d'ondulation sont des irrégularités périodiques qui affectent la surface, telles que des ondulations ou des vagues. Ces défauts peuvent être causés par des vibrations dans les machines de fabrication ou des variations de pression dans le processus de formage. Les défauts d'ondulation peuvent affecter la performance tribologique en créant des points de contact intermittents ou en perturbant la distribution de lubrifiant.

La rugosité est une caractéristique importante de la surface qui décrit les irrégularités à une échelle plus petite que les défauts de forme et d'ondulation, et elle est mesurée en termes de hauteur, d'espacement et d'orientation des irrégularités. La rugosité peut être causée par l'usinage, le traitement de surface, l'usure ou d'autres facteurs environnementaux. Elle peut affecter la performance tribologique en influençant la capacité des surfaces en contact, ce qui peut influencer la friction et l'usure.

2.4 Les techniques de mesures

Il existe deux grandes catégories de techniques de mesure de la surface : la mesure avec contact et la mesure sans contact :

a) **Mesure avec contact**

Cette technique implique que l'instrument de mesure entre en contact direct avec la surface à mesurer. Parmi ces techniques, on trouve la rugosimétrie, qui consiste à mesurer les défauts de surface (rugosité, ondulation, forme) à l'aide d'un palpeur mécanique qui suit la topographie de la surface. Cette méthode permet de mesurer des défauts de surface avec une grande précision, de l'ordre du nanomètre. Cependant, ces méthodes peuvent endommager la surface ou altérer la mesure en raison de l'usure du palpeur ou de la surface elle-même.



Figure 2.3 : Instrument de mesure en contact

b) Mesure sans contact

Elle utilise des méthodes de mesure optiques ou magnétiques pour mesurer la surface sans la toucher. Cette méthode est souvent utilisée pour mesurer des surfaces complexes ou délicates, où un contact physique peut endommager la surface ou altérer les résultats de mesure. Les méthodes optiques incluent la microscopie optique, la lumière structurée et la tomographie optique cohérente. Les méthodes magnétiques utilisent des capteurs magnétiques pour mesurer les champs magnétiques générés par la surface.

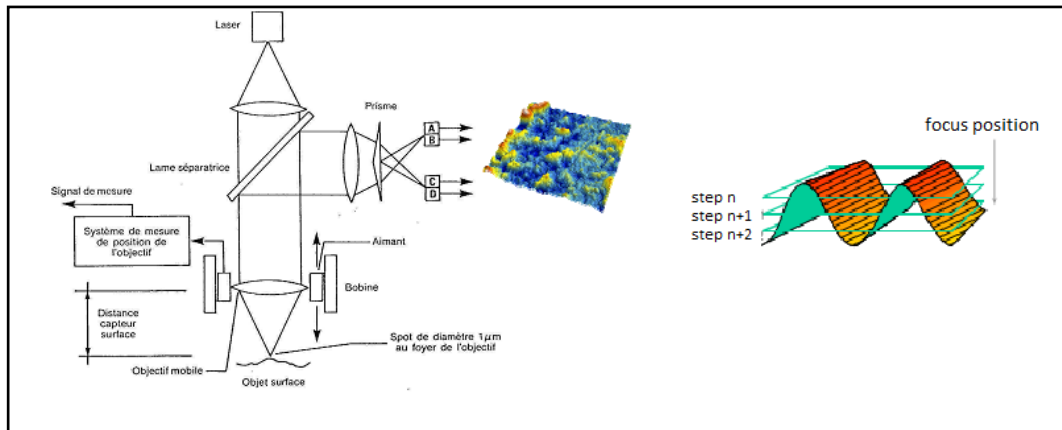


Figure 2.4 : Instrument de mesure sans contact

2.5 Caractéristique du profil

Le profil de surface est une représentation graphique des variations de hauteur de la surface d'un objet. Il est caractérisé par plusieurs paramètres qui permettent de quantifier et de décrire les propriétés du profil. Parmi ces paramètres, on retrouve la longueur d'évaluation, la base, la ligne d'enveloppe supérieure et la ligne moyenne. Chacun de ces paramètres apporte une information spécifique sur la rugosité de la surface.

- Longueur d'évaluation (l_n)

Une caractéristique importante du profil de surface. Cette longueur permet de définir la portion de la surface à considérer pour l'analyse du profil. Plusieurs longueurs peuvent être utilisées en fonction de l'objectif de l'analyse. La longueur de base est la distance totale sur laquelle est tracé le profil, tandis que la longueur d'évaluation est la portion de la base considérée pour l'analyse.

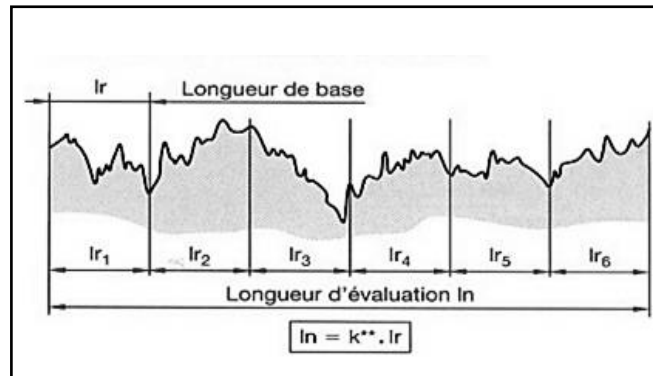


Figure 2.5 : Longueurs d'évaluation et de base

- **Ligne enveloppe supérieure**

C'est la ligne qui relie les sommets les plus hauts du profil de surface. Elle représente la surface la plus haute possible que peut atteindre le profil.

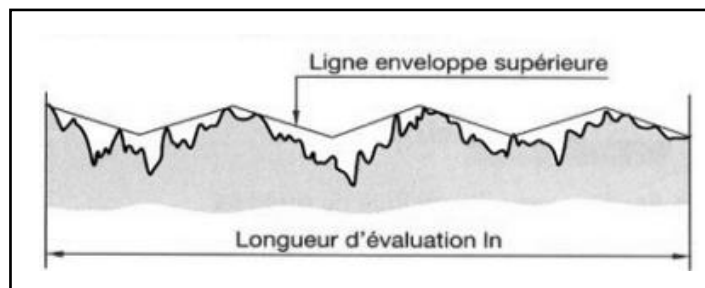


Figure 2.6 : Ligne enveloppe supérieure

- **Ligne moyenne**

C'est la ligne qui représente la moyenne arithmétique de tous les points du profil de surface. Elle est utilisée comme base de référence pour mesurer les hauteurs et les profondeurs du profil.

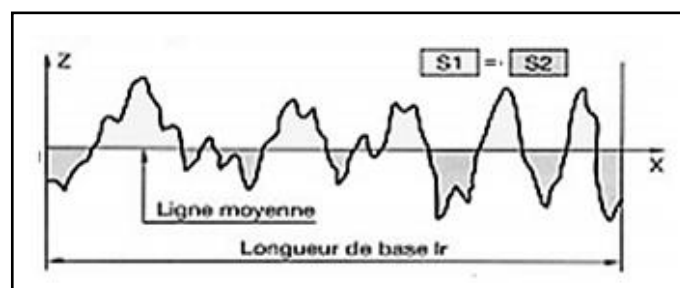


Figure 2.7 : Ligne moyenne

2.6 Paramètres d'état de surface

Les paramètres les plus utilisés sont les paramètres déterminés sur le profil de rugosité.

Les normes définissent deux familles de paramètres :

- a) Les principaux **paramètres géométriques** retenus sont, figure 2.8 :
- Hauteur maximale du profil Rz : C'est la distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux.
 - Hauteur maximale des saillies Rp : C'est la distance entre la ligne des saillies et la ligne des moyennes.

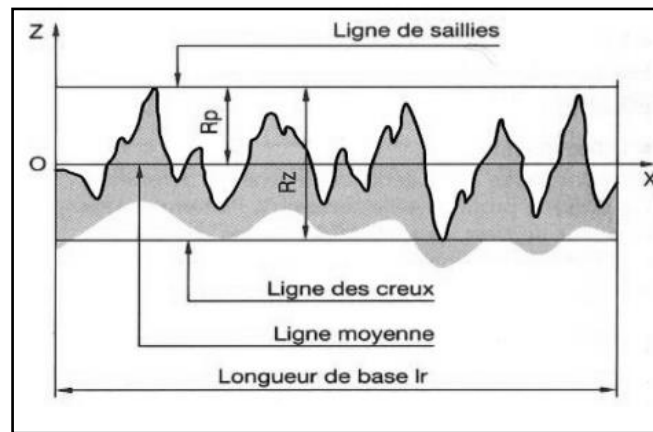


Figure 2.8 : Les paramètres géométriques

- b) Les principaux **paramètres statistiques** utilisés sont : Ra , Rq et le RSm .

- Ra (roughness average) est la moyenne arithmétique des ordonnées des points du profil par rapport à la droite des moindres carrés.

$$\frac{1}{l} \int_0^l |Z(x) dx| \quad (2.1)$$

- Rq est la moyenne quadratique des ordonnées des points du profil par rapport à la droite des moindres carrés,

$$\sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx} \quad (2.2)$$

- RSm est la périodicité moyenne des aspérités. On la détermine en recherchant la distance moyenne séparant les intersections successives, entre le profil et la droite des moindres carrés.

$$AR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AR_i \quad (2.3)$$

A ces paramètres de rugosité correspondent ceux d'ondulation Wa et Wq . On peut également définir comme Rt (Wt pour l'ondulation),

Les motifs sont définis comme un triplet pic-vallée-pic et sont détectés par une méthode de segmentation géométrique. Les principaux paramètres d'ondulation sont :

W : la profondeur moyenne des motifs d'ondulation

AW : la largeur moyenne des motifs d'ondulation

Wx : la profondeur maximale des motifs d'ondulation

Wte : l'amplitude de l'enveloppe supérieure.

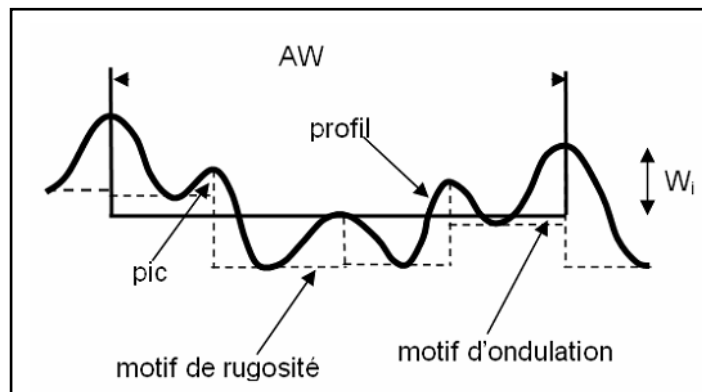


Figure 2.9 : Les paramètres statistiques

2.7 Rôle de la rugosité

La rugosité est un moyen permettant de caractériser la microgéométrie de surface et joue un rôle crucial dans de nombreuses applications industrielles. Une rugosité excessive peut entraîner une augmentation de la friction, de l'usure et du bruit, tandis qu'une rugosité trop faible peut affecter la capacité de lubrification et la tenue en place des revêtements. Par conséquent, la caractérisation et le contrôle de la rugosité de surface sont essentiels pour garantir la qualité et la fiabilité des produits industriels. La rugosité dépend du procédé d'obtention des surfaces et elle est fixée par les conditions d'utilisation des surfaces en contact, (Tableau 2.1).

Surface	Fonction	Condition	Exemples d'application	Ra*	R*	W*
Avec déplacements relatifs	Frottement de glissement (1)	Moyenne	Coussinets – Portées d'arbres	0,8	2	≤ 0,8R
		Difficile	Glissières de machines-outils	0,4	1	
	Frottement de roulement (2)	Moyenne	Galets de roulement	0,4	1	≤ 0,3R
		Difficile	Chemins de roulements à billes	0,02	0,06	
	Résistance au matage**	Moyenne	Cames de machines automatiques	0,4	1	-
		Difficile	Extrémités de tiges de poussée	0,10	0,25	
Frottement fluide	Moyenne	Conduits d'alimentation	6,3	16	-	
	Difficile	Gicleurs	0,2	0,5		
Étanchéité dynamique (3)	Moyenne	Portées pour joints toriques	0,4	1	≤ 0,6R	
	Difficile	Portées pour joints à lèvres	0,3	0,8		
Avec assemblage fixe	Étanchéité statique (3)	Moyenne	Surfaces d'étanchéité avec joint plat	1,6	4	≤ R
		Difficile	Surfaces d'étanchéité glacées – sans joint	0,1	0,25	
	Assemblage fixe (contraintes faibles)	Moyenne	Portées et centrages de pièces fixes démontables	3,2	10	-
		Difficile	Portées et centrages précis	1,6	4	
	Ajustement fixe avec contraintes	Moyenne	Portées de coussinets	1,6	4	-
Difficile		Portées de roulements	0,8	2		
Adhérence (collage)	-	Constructions collées	1,6 à 3,2	2 à 10	-	
Sans contrainte	Dépôt électrolytique	-	Indiquer la rugosité exigée par la fonction, après dépôt	0,1 à 3,2	0,25 à 10	-
	Mesure	Moyenne	Faces de calibres d'atelier	0,1	0,25	≤ R
	Revêtement (peinture)	-	Carrosseries d'automobiles	≥ 3,2	≥ 10	-
Avec contrainte	Résistance aux efforts alternés	Moyenne	Alésages de chapes de vérin	1,6	4	-
		Difficile	Barres de torsion	0,8	2	-
	Outils coupants (arête)	Moyenne	Outils en acier rapide	0,4	1	-
		Difficile	Outils en carbure	0,2	0,5	-

(1) Denture d'engrenage voir § 73.4.
(2) Voir également le chapitre 66 concernant les roulements.
(3) Voir également le chapitre 72 concernant les joints d'étanchéité.

■ Relations approximatives :
Rp ≈ 0,4 R ; Rz ≈ 3,2 Ra ; W ≤ 2 Ra.
■ L'intervalle de tolérance doit être supérieur à 10 Ra.

Tableau 2.1 : Rugosité de différentes fonctions de surface

La rugosité détermine aussi l'aire réelle du contact des surfaces en présence, et par conséquent la distribution des pressions à la surface. En plus, suivant la forme et l'orientation des rugosités les débris d'usure peuvent être piégés ou au contraire éjectés du contact.

2.8 L'aire réelle du contact

L'aire réelle du contact dépend essentiellement de la rugosité des surfaces antagonistes et du comportement mécanique des solides en contact.

Donc il est important de noter que la surface de contact réelle (A_r) n'est pas la surface apparente mais un ensemble de zones discrètes (A_i), puisque le contact réel ne s'effectue qu'entre les aspérités les plus importantes des surfaces.

$$A_r = \sum A_i \quad (2.4)$$

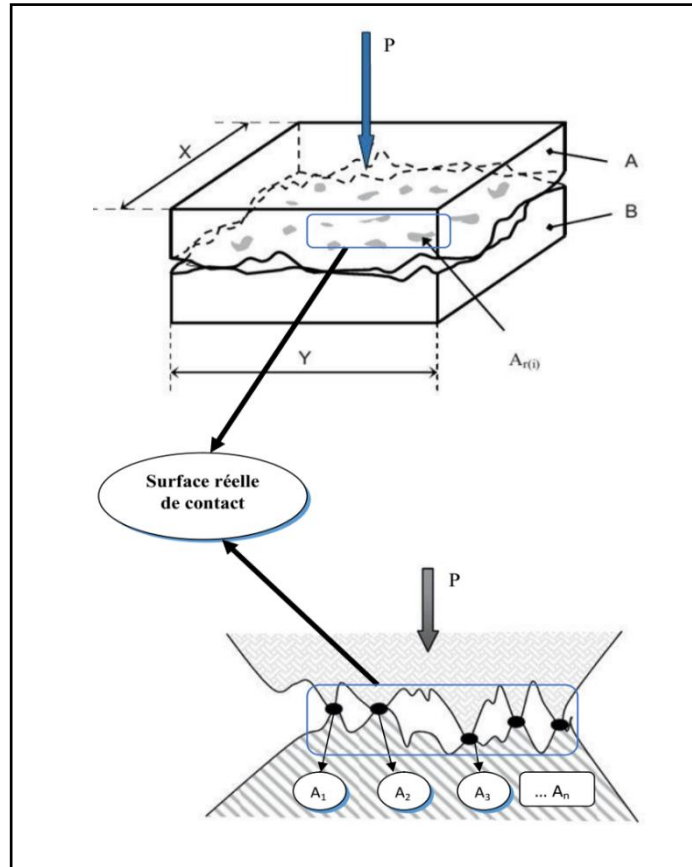


Figure 2.10 : Deux surfaces en contact tribologique

La surface de contact réelle est nettement plus petite que la surface de contact apparente, et les zones de contact subissent des déformations élastiques et/ou plastiques selon les conditions fonctionnelles du tribosystème. Cette distinction entre surface de contact réelle et apparente est un concept essentiel en tribologie.

3 Le frottement

3.1 Introduction

Le frottement est un processus dissipatif d'énergie qui peut se manifester sous différentes formes. Il peut causer des déformations élastiques ou plastiques des surfaces en contact, des ruptures comme des fissurations ou l'émission de débris, de l'échauffement, des réactions chimiques comme l'adhésion et l'oxydation, des phénomènes acoustiques comme des vibrations et des bruits, de l'électricité statique, et des étincelles. En fonction de la situation, il peut être souhaitable de minimiser ou de maximiser le frottement pour des raisons fonctionnelles ou de sécurité.

3.2 Définition du frottement

Le frottement est un phénomène physique qui se produit lorsque deux surfaces en contact et que l'une des surfaces résiste au mouvement par rapport à l'autre surface. Cette résistance est causée par la force de frottement \vec{F}_T qui s'oppose au mouvement relatif entre les deux surfaces.

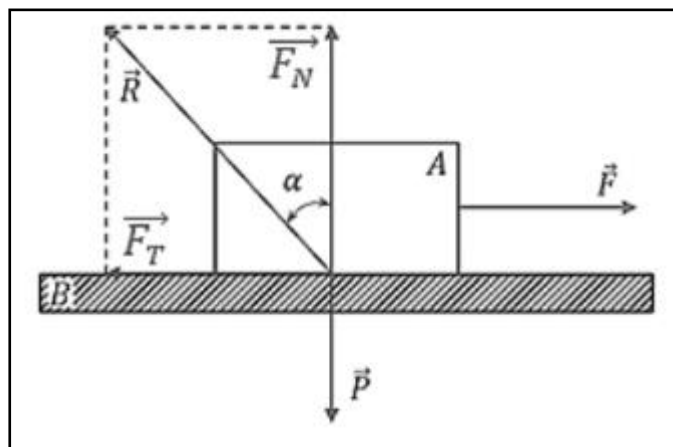


Figure 3.1 : Représentation des efforts sur deux solides en mouvement relatif

3.3 Types de frottement

La compréhension des différents types de frottement en tribologie est essentielle pour la conception de systèmes efficaces. Il existe trois types de frottement en tribologie :

a) Le frottement sec

Le frottement sec, également appelé frottement de glissement, est un type de frottement qui se produit entre deux surfaces en contact direct sans l'utilisation de lubrifiant ou d'autres fluides intermédiaires. Ce type de frottement se produit lorsque les aspérités des surfaces en contact s'entrelacent et résistent au mouvement relatif. Le frottement sec peut générer de la chaleur et de l'usure, ce qui peut entraîner une détérioration des surfaces en contact.

b) Le frottement fluide

Le frottement fluide, également appelé frottement visqueux, est un type de frottement qui se produit lorsque deux surfaces sont séparées par un fluide, tel que de l'huile ou de l'eau. Contrairement au frottement sec, où les surfaces en contact frottent directement les unes contre les autres, le frottement fluide est le résultat de la résistance que le fluide oppose au mouvement des surfaces qui le traversent. Cette résistance est due à la viscosité du fluide, qui dépend de sa densité et de sa cohésion moléculaire. Le frottement fluide peut être réduit en utilisant des lubrifiants qui diminuent la viscosité du fluide ou en modifiant la forme des surfaces en contact pour minimiser la traînée du fluide.

c) Le frottement mixte

Le frottement mixte, également appelé frottement semi-lubrifié, se produit lorsque les surfaces en contact sont soumises à des conditions de lubrification insuffisantes pour empêcher complètement le contact direct entre les aspérités de surface, mais suffisantes pour créer une fine couche de lubrifiant entre les surfaces. Dans ce cas, une partie des aspérités des deux surfaces est en contact direct, tandis que d'autres sont séparées par le film de lubrifiant. Ce type de frottement peut causer une usure importante des surfaces en contact et nécessite souvent des matériaux de surface spécifiques et des lubrifiants adaptés pour minimiser l'usure et prolonger la durée de vie des pièces.

3.4 Cinétique de frottement

La cinétique de frottement décrit la relation entre la force de frottement et la vitesse de glissement entre deux surfaces en contact. Cette relation peut être linéaire, où la force de frottement augmente proportionnellement avec la vitesse de glissement, ou non linéaire, où la force de frottement augmente plus rapidement que la vitesse de glissement.

La cinétique de frottement peut être influencée par plusieurs facteurs tels que la rugosité des surfaces en contact, la pression de contact, la température et la lubrification.

3.5 Frottement statique

Le frottement statique est un type de frottement qui se produit lorsque deux surfaces en contact ne glissent pas l'une sur l'autre malgré l'application d'une force tangentielle. Lorsque la force nécessaire pour commencer à déplacer un objet est plus grande que la force appliquée, créant une résistance au mouvement. Cette force de frottement statique maximale est généralement plus grande que la force de frottement dynamique, qui est la force de frottement qui agit une fois que le mouvement a commencé. Le frottement statique est important dans de nombreux domaines, notamment dans l'ingénierie où il est souvent nécessaire de maintenir une position fixe ou de créer une force de maintien pour les pièces en mouvement. La force de frottement statique F_s est exprimée en fonction du coefficient de frottement μ_s (figure 3.2), et on a :

$$F_s = \mu_s F_N \quad (3.1)$$

3.6 Frottement dynamique

Le frottement dynamique se produit lorsque deux surfaces sont en mouvement relatif l'une par rapport à l'autre. Il est également appelé frottement cinétique ou frottement de glissement. Dans ce cas, la force de frottement est proportionnelle à la force normale et est indépendante de la vitesse. Le coefficient de frottement cinétique est généralement plus faible que le coefficient de frottement statique, car les surfaces en mouvement ont tendance à glisser plus facilement les unes contre les autres que lorsqu'elles sont immobiles. Le frottement cinétique peut générer de la chaleur et de l'usure sur les surfaces en contact, ce qui peut causer des problèmes dans certains systèmes. La force de frottement dynamique (figure 3.2) est donnée par :

$$F_d = \mu_d F_N \quad (3.2)$$

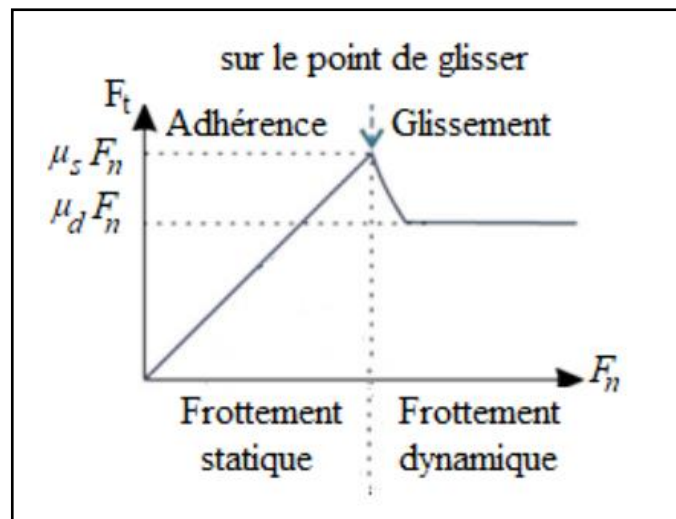


Figure 3.2 : Frottement statique et dynamique

Remarques

- Le coefficient de frottement est une propriété du matériau qui est généralement indépendant de la surface nominale de contact, mais dépend du couple des matériaux en contact et des conditions opératoires (force normale, vitesse de glissement, rugosité, température, etc.). Il est utilisé pour déterminer la force nécessaire pour déplacer un objet ou pour le maintenir en mouvement.

La plupart des études de frottement s'intéressent au coefficient de frottement dynamique. Il est souvent noté μ et dépend de nombreux paramètres, il n'est en aucun cas une propriété intrinsèque d'un matériau donné mais de l'ensemble du système tribologique.

- Le tableau suivant donne une idée sur les ordres de grandeur du coefficient de frottement de différents matériaux. Il est clairement montré que ce coefficient est fortement lié aux conditions dans lesquelles s'effectue le contact telle que l'environnement, la structure cristalline, température de contact...

Matériaux	Coefficient de frottement
Métal /métal dans le vide ($<10^{-7}$ Pa)	>3
Métal /métal à l'air	0.2 à 1.5
Polymère /polymère à l'aire	0.05 à 1
Métal / Polymère à l'aire	0.05 à 0.5
Métal /céramique ou céramique /céramique à l'aire	0.2 à 0.5
Métal /métal en présence d'un lubrifiant solide (PTFE, MoS ₂ , graphite)	0.05 à 0.2
Métal /métal en présence d'une huile de lubrification (en dehors du régime hydrodynamique)	0.1 à 0.2
Lubrification en régime hydrodynamique	0.01 0.005

Tableau 3.1 : Quelques valeurs de coefficients de frottement

3.7 Effet de frottement

Le frottement peut avoir des effets importants sur les matériaux en contact, notamment sur leur composition chimique, leur structure cristalline et leur surface topographique. Les transformations peuvent inclure l'oxydation, la transformation allotropique, la transformation de phase, la cristallisation, la diffusion, le polissage et l'arrachement de matière. Les conditions de sollicitation telles que la température, la vitesse et la charge peuvent également influencer les transformations causées par le frottement. Il est important de comprendre les effets du frottement pour optimiser la performance et la durabilité des systèmes mécaniques et de la tribologie en général.

3.8 Effet de la rugosité sur le frottement

L'effet de la rugosité sur le frottement est complexe, bien que la théorie d'interaction des aspérités de surface soit souvent citée pour expliquer le frottement, elle a été abandonnée en raison de la constatation que les surfaces polies peuvent également présenter des coefficients de frottement élevés. En réalité, la rugosité peut affecter le frottement de plusieurs manières : elle peut augmenter la surface réelle de contact et donc augmenter la composante adhésive du frottement, ou bien augmenter la déformation plastique et donc la composante déformation du frottement. Une rugosité optimale peut minimiser le frottement en associant une surface réelle de contact importante à une faible composante déformation plastique. Cela peut varier en fonction des matériaux et des conditions de fonctionnement. Il peut également exister une charge optimale associée à un coefficient de frottement minimal pour un état de surface donné. Les ingénieurs peuvent utiliser ces informations pour optimiser la performance et la durabilité des systèmes mécaniques.

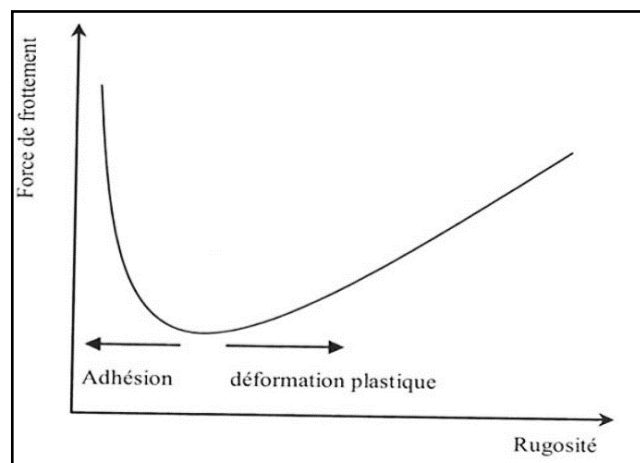


Figure 3.3 : Effet de la rugosité sur le frottement

4 Processus d'usure

4.1 Introduction

L'usure est un phénomène complexe qui peut avoir des conséquences désastreuses sur le bon fonctionnement des pièces mécaniques en service. Elle se manifeste par une perte de masse et de forme des surfaces en contact, et peut résulter d'un ensemble de mécanismes difficilement prévisibles. Comprendre les mécanismes d'usure nécessite souvent une connaissance approfondie de la mécanique, de la physique, de la chimie et de la science des matériaux. L'usure est un phénomène d'autant plus important dans les secteurs mécaniques tels que le processus de fabrication et les performances dynamiques des machines et des mécanismes, ainsi que dans les applications biomédicales, comme les prothèses de hanche et de genou.

Les paramètres qui influencent l'usure sont souvent les mêmes que ceux qui influencent le frottement, tels que la structure cristalline des matériaux, la nature des surfaces en contact et l'état de ces surfaces. Les surfaces métalliques, soumises à un frottement solide ou fluide, en présence ou non de lubrifiants, peuvent subir différents types d'usure, allant d'une usure régulière et contrôlable à une détérioration brutale entraînant la mise hors service du mécanisme. Bien que l'usure soit généralement considérée comme un phénomène nuisible, elle peut être bénéfique lors de la phase de rodage, où les premiers cycles de fonctionnement produisent des usures qui se révéleront « protectrices » par la suite. Comprendre les mécanismes d'usure est donc essentiel pour garantir une performance optimale des pièces mécaniques en service.

4.2 Evolution de l'usure

L'usure des surfaces en contact évolue au cours du temps et peut être divisée en trois principales phases: la phase de rodage, la phase d'usure normale et la phase d'usure critique.

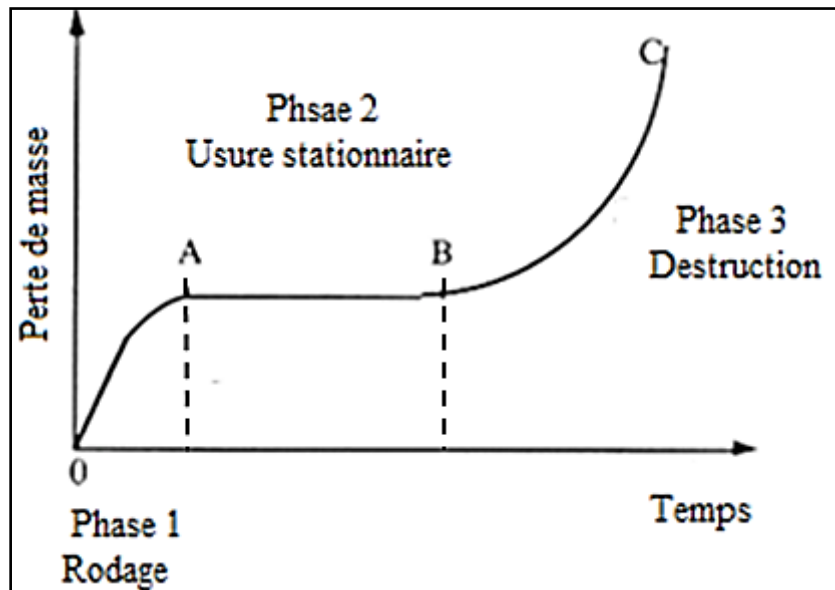


Figure 4.1 : Evolution de l'usure

a) **La phase de rodage**

Correspond aux premiers cycles de fonctionnement, est caractérisé par une usure initiale de la surface de contact. Cette usure produit une modification locale de la topographie de la surface, qui va conduire à la mise en place de micro-géométries favorables au maintien d'un film lubrifiant, réduisant ainsi le coefficient de frottement et augmentant la durée de vie des pièces.

b) **Le phase d'usure normale**

Correspond à une usure régulière et contrôlée de la surface, qui peut durer longtemps en fonction des conditions de fonctionnement. Les mécanismes d'usure sont différents en fonction de la nature du contact (solide ou fluide) et de la nature des matériaux. Dans le cas de contacts solides, l'usure peut être due à l'abrasion, l'adhésion, la corrosion ou la fatigue. Dans le cas de contacts fluides, l'usure peut être due à la cavitation, l'érosion, ou la corrosion.

c) **La phase d'usure critique**

Correspond à une détérioration brutale de la surface, entraînant souvent la mise hors service du mécanisme. Cette phase peut être déclenché par des facteurs externes tels qu'une augmentation de la charge ou de la température de fonctionnement, ou par une dégradation de la qualité de lubrification.

Comprendre les mécanismes d'usure et être capable de prédire l'évolution de l'usure au cours du temps est essentiel pour garantir le bon fonctionnement des mécanismes et prolonger leur durée de vie.

4.3 Les différents types d'usure

Afin d'étudier et de mieux comprendre l'usure, il est nécessaire de reconnaître que plusieurs mécanismes distincts et indépendants sont impliqués. Burwell (1957-1958) a énuméré les principaux types d'usure comme étant l'usure adhésive (due aux forces d'attraction entre les atomes de deux surfaces), abrasive (due à l'action d'une particule sur la surface d'un solide), par fatigue (passage répété d'un solide sur une surface) et corrosive (ou tribochimique). Les trois premiers types sont des processus mécaniques alors que le dernier est un processus chimique. A cela s'ajoutent des formes secondaires d'usure : corrosion de contact, usure par cavitation, usure d'origine électrique, etc.

En 1989 Cornet et Deville ont proposé une classification des mécanismes d'usure selon leur Importance relative dans le milieu industriel. Comprendre ces mécanismes peut aider à développer des stratégies pour minimiser leur impact et prolonger la durée de vie des équipements industriels.

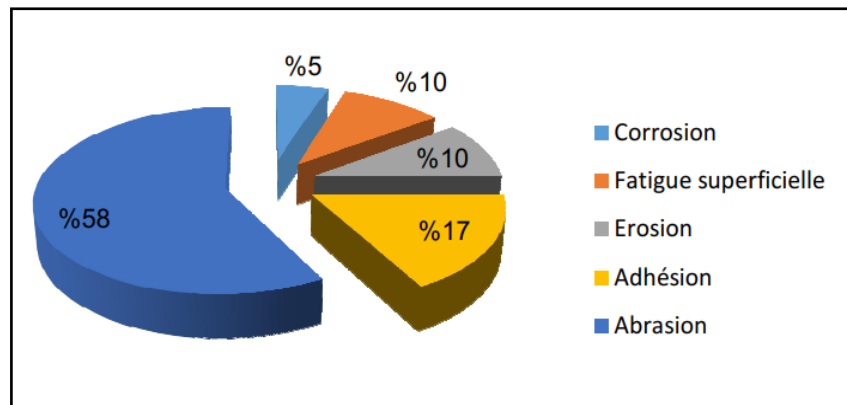


Figure 4.2 : Importance relative des mécanismes d'usure dans l'industrie

4.3.1 Usure adhésive

L'usure adhésive est le type d'usure le plus fondamental. Elle est due au cisaillement par frottement des microsoudures ou jonctions qui se forment entre deux aspérités en contact direct. Elle se manifeste par un transfert de matière d'une des deux surfaces en contact sur la surface antagoniste (de la face la plus tendre sur la plus dure). Elle est à la fois d'origine mécanique et physicochimique. L'intensité de l'usure adhésive dépend

principalement de la force d'adhésion entre les surfaces en contact. Dans le cas d'une liaison peu résistante le transfert de matière est limité, avec à un échauffement léger. Les particules détachées du contact, quant à elles, sont de très petites dimensions de l'ordre de 100Å , on parle alors d'une usure douce. Par contre, l'usure sévère apparaît lorsqu'il y a arrachement de matière de l'une des surfaces, dont les débris sont des fragments métalliques de dimensions relativement importantes. L'usure adhésive est surtout observée dans le cas de contact sec ou de lubrification insuffisante (mixte ou limite). Elle peut être minimisée par la réduction de l'échauffement de l'interface des surfaces en contact, en limitant les conditions d'utilisation (la distribution des pressions de contact, les vitesses de glissement) et en réduisant la rugosité des surfaces.

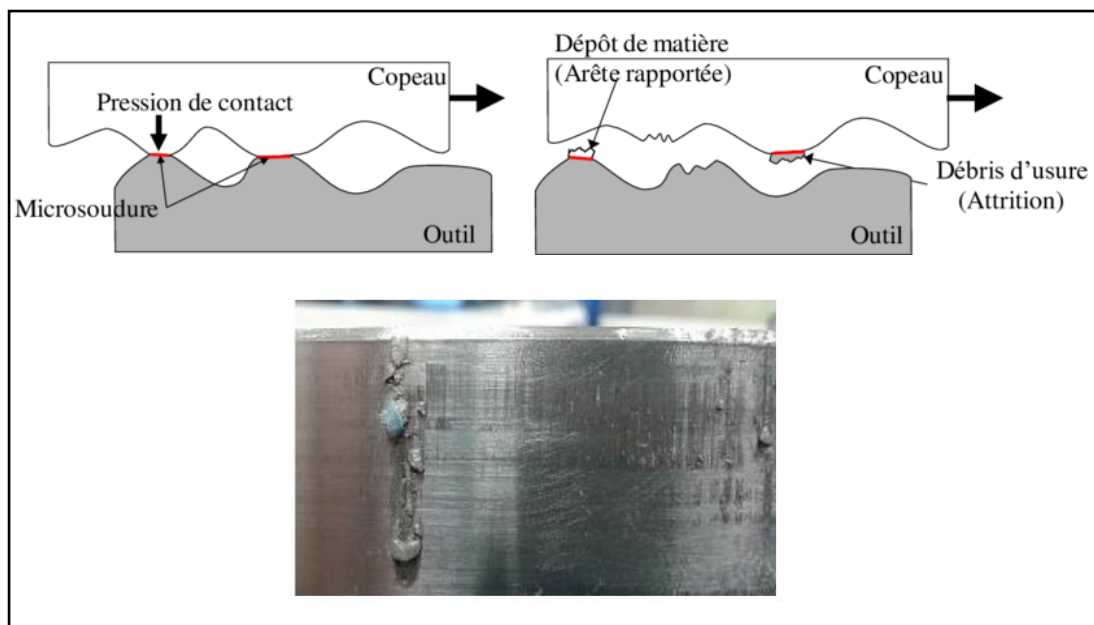


Figure 4.3 : L'usure adhésive

4.3.2 Usure abrasive

L'usure abrasive se produit lorsqu'une surface dure et rugueuse glisse contre une autre surface, ce qui entraîne l'enlèvement de petites particules de la surface. Ce mécanisme de dégradation fait intervenir en premier temps uniquement les corps antagonistes (figure 2.4.a). Il devient par la suite une usure avec un troisième corps (figure 2.4.b) qui provient des surfaces de contact ou de la pollution du milieu. Cette forme d'usure se manifeste par des sillons formés parallèlement au sens de glissement, des micro-labourages, de griffures, par un effet de polissage ou des arrachements de particules. Elle peut provoquer ainsi des modifications marquées dans la structure et l'orientation des couches superficielles.

Pour réduire l'usure abrasive, il est souvent nécessaire de durcir les surfaces en utilisant des traitements thermiques ou des revêtements de protection, ou d'utiliser des matériaux plus résistants à l'usure. Ce phénomène peut être nuisible dans la mesure où il peut causer des dommages à la surface du matériau et réduire sa durée de vie. Cependant, dans certains cas, l'usure abrasive est recherchée pour des applications telles que l'usinage par enlèvement de matière et le polissage.

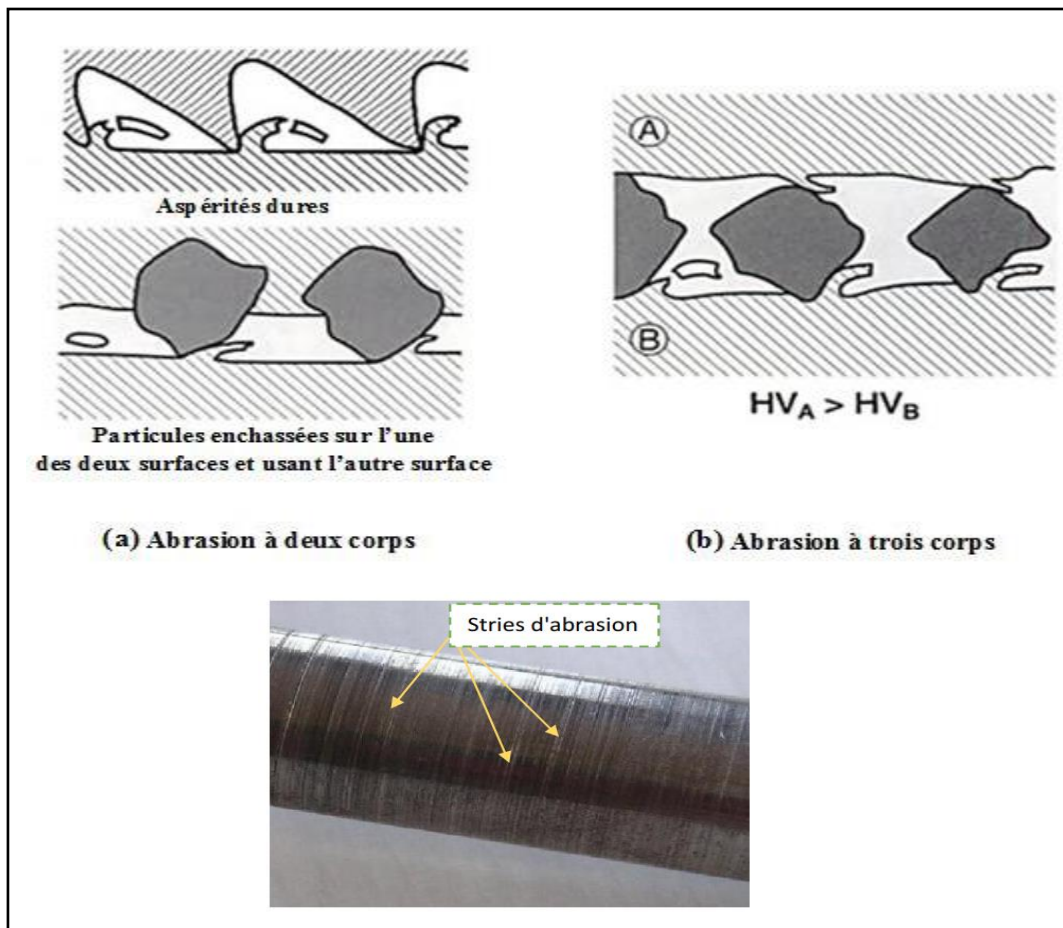


Figure 4.4 : L'usure abrasive

4.3.3 Usure par fatigue

L'usure par fatigue est un phénomène qui se produit lorsque des mouvements cycliques s'appliquent sur un matériau, entraînant une accumulation d'énergie de déformation et de contraintes thermiques générées par frottement. Ce processus peut causer la formation et la propagation de fissures en profondeur qui finissent par remonter à la surface. L'usure par fatigue peut entraîner une dégradation progressive du matériau et finalement une rupture.

Les caractéristiques de l'usure par fatigue dépendent du matériau, des charges appliquées, de la fréquence des charges et de l'environnement dans lequel se produit la fatigue.

Ce type d'usure peut aussi se manifester par des changements de structure métallurgique du matériau. Il est particulièrement fréquent dans le cas du frottement sec et des matériaux céramiques.

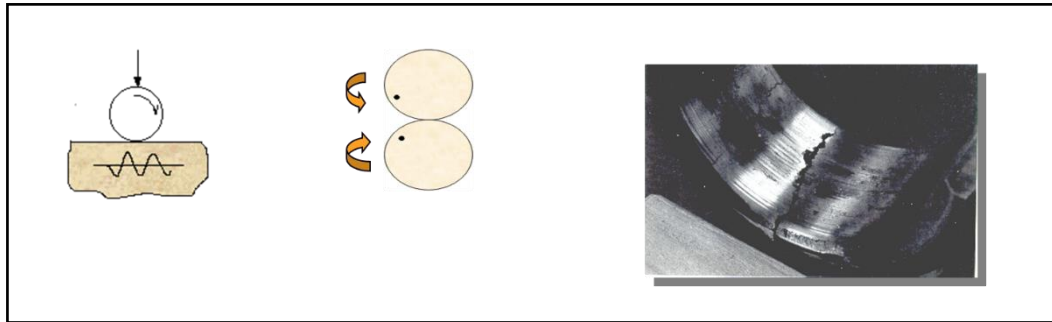


Figure 4.5 : Manifestation de la fatigue superficielle

4.3.4 Usure corrosive ou tribochimique

L'usure corrosive ou tribochimique se produit lorsque les matériaux entrent en contact avec un environnement réactif, comme l'eau de mer ou les atmosphères industrielles, durant le processus de frottement. Cela peut se manifester de deux manières : soit par la formation d'un film réactionnel sur la surface, qui est ensuite détruit par le frottement, formant ainsi des débris durs qui viennent dégrader les surfaces opposées et ainsi entretenir l'usure. D'un autre côté, l'oxydation des débris peut conduire à la formation d'un film d'oxydes mince et adhérent à la surface, jouant ainsi un rôle protecteur contre l'usure adhésive. La vitesse à laquelle se produit ce phénomène dépend de la compétition entre la formation du film réactionnel et sa destruction par le frottement. Pour minimiser l'usure corrosive ou tribochimique, il est souvent nécessaire de traiter les surfaces des matériaux avec des revêtements protecteurs pour réduire leur interaction avec les substances chimiques environnantes.



Figure 4.6 : Manifestation de l'usure corrosive

4.4 Approche quantitative de l'usure

Les lois d'usure ont été développées progressivement depuis le début des années 50. Les premières lois ont été proposées par Holm 1946 en étudiant l'usure des contacts électriques. Il montre ainsi que le volume usé est proportionnel au rapport de la charge normale P et de la dureté H , suivant la relation :

$$V = \frac{kP}{H} \quad (4.1)$$

où k est un coefficient difficile à interpréter.

Archard [1953] a repris les travaux de Holm en étudiant l'usure de matériaux mous contre un matériau dur. Il existe plusieurs formes de la loi d'Archard, la première forme, issue de l'expérimentation, est exprimée en fonction d'un coefficient d'usure k sans dimension, de la force normale appliquée F , de la distance de glissement L et de la dureté du matériau le plus mou H . Ce modèle de base a été appliqué initialement dans le cas de l'usure adhésive à sec, et s'exprime comme suit :

$$V = k \frac{N.L}{H} \quad (4.2)$$

Il a été montré que la loi d'Archard peut être étendue à d'autres mécanismes, notamment celui de l'abrasion. Moyennant une redéfinition de certains paramètres, l'équation précédente peut s'écrire :

$$V = K.N.L \quad (4.3)$$

Où K est un coefficient d'usure souvent exprimé en $mm^3N^{-1}m^{-1}$. Ce coefficient, dont la valeur ne dépasse pas l'unité, nous donne une indication sur l'amplitude du phénomène (usure sévère - usure modérée) et il n'est obtenu que par le biais de l'expérience.

Les faibles valeurs du coefficient d'usure K sont obtenues pour les conditions de glissement lubrifié, où on a une faible proportion d'aspérités en contact. Alors que dans les conditions de glissement non lubrifié, K peut varier de 10^{-6} à $10^{-2} mm^3N^{-1}m^{-1}$ et atteint son maximum dans les conditions de régime sévère.

Ce coefficient est différent pour chacun des corps en contact et dépend des conditions géométriques et thermodynamiques.

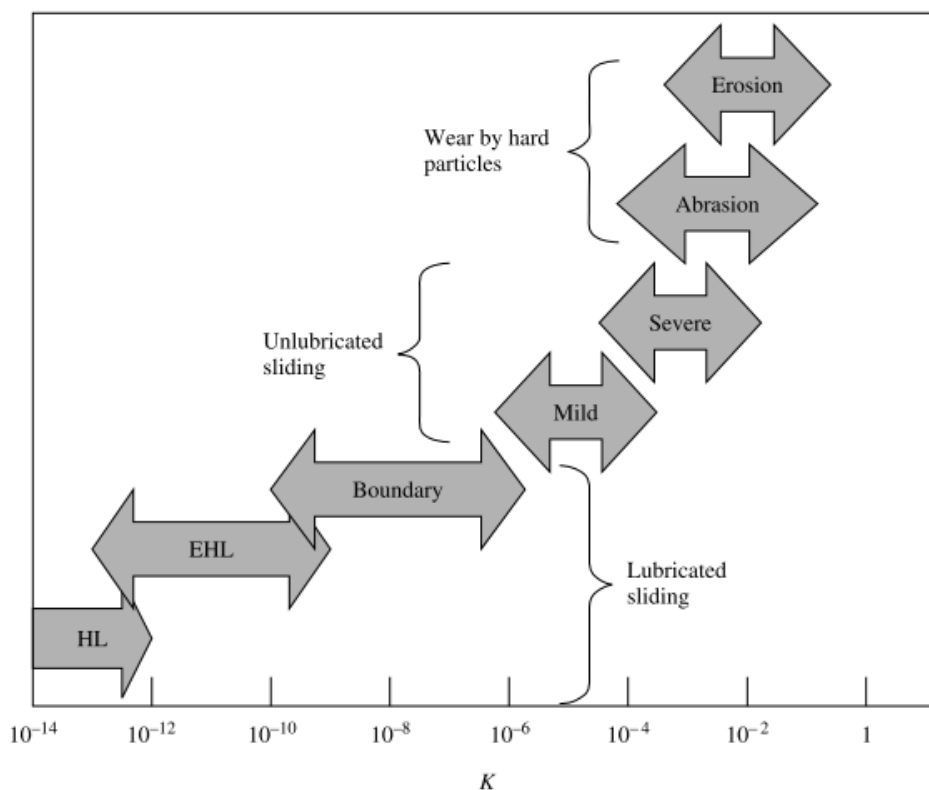


Figure 4.7 : Valeurs du coefficient d'usure K présentées pour différentes conditions d'usure. HL = lubrification hydrodynamique ; EHL = lubrification élastohydrodynamique

Par la suite plusieurs formes ont été proposées, comme celle qui fait intervenir la nature du matériau le plus mou par l'intermédiaire de sa contrainte d'écoulement σ_y et la surface S du contact:

$$V_u = b \frac{F_n S}{\sigma_y} \quad (4.4)$$

Une autre forme dérivée de la première loi d'Archard, fait intervenir l'énergie dissipée dans le contact par le biais du produit PV (pression x vitesse de glissement), proportionnel à la vitesse d'usure $\frac{dh}{dt}$ (h étant la profondeur de la piste d'usure).

$$\frac{dh}{dt} = c.P.V \quad (4.5)$$

En 1984, Frick a donné une forme plus simplifiée de la loi d'Archard, en introduisant le concept du travail d'usure, soit $W = F.L$ ce qui conduit à la relation suivante :

$$V = K.W \quad (4.6)$$

Les modèles d'usure ont été développés à partir d'expériences simples, souvent réalisées avec des tribomètres de type pion-disque, qui utilisent des sollicitations simples pour étudier l'usure. Cependant, en raison de la variété des mécanismes impliqués dans le contact, qui génèrent souvent des sollicitations multidirectionnelles et variables, l'établissement d'une loi universelle d'usure demeure difficile. Ainsi, il est plus approprié d'associer un modèle d'usure à un type de dégradation spécifique pour limiter le nombre de paramètres et pour permettre l'utilisation aisée de la loi en laboratoire.

4.5 La carte d'usure

Les cartes d'usure, également appelées cartes des mécanismes d'usure, sont des outils précieux pour la prévision et la gestion de l'usure dans diverses applications industrielles. Elles sont construites sur la base d'une analyse détaillée d'un grand nombre de résultats d'essais d'usure, combinée à une analyse théorique des mécanismes d'usure. Ces cartes permettent de représenter et de délimiter les différents types d'usure en fonction des paramètres tribologiques. Elles montrent comment le mécanisme d'usure dominant évolue en fonction des deux principales variables énergétiques, la charge et la vitesse, exprimées respectivement par la pression normalisée et la vitesse normalisée. Les cartes sont également utiles pour déterminer les limites de validité des modèles d'usure associés à chaque mécanisme d'usure. Ainsi, la compréhension de ces mécanismes d'usure et l'utilisation de cartes d'usure constituent des moyens efficaces pour optimiser la conception des systèmes tribologiques afin de minimiser l'usure et de prolonger la durée de vie des composants.

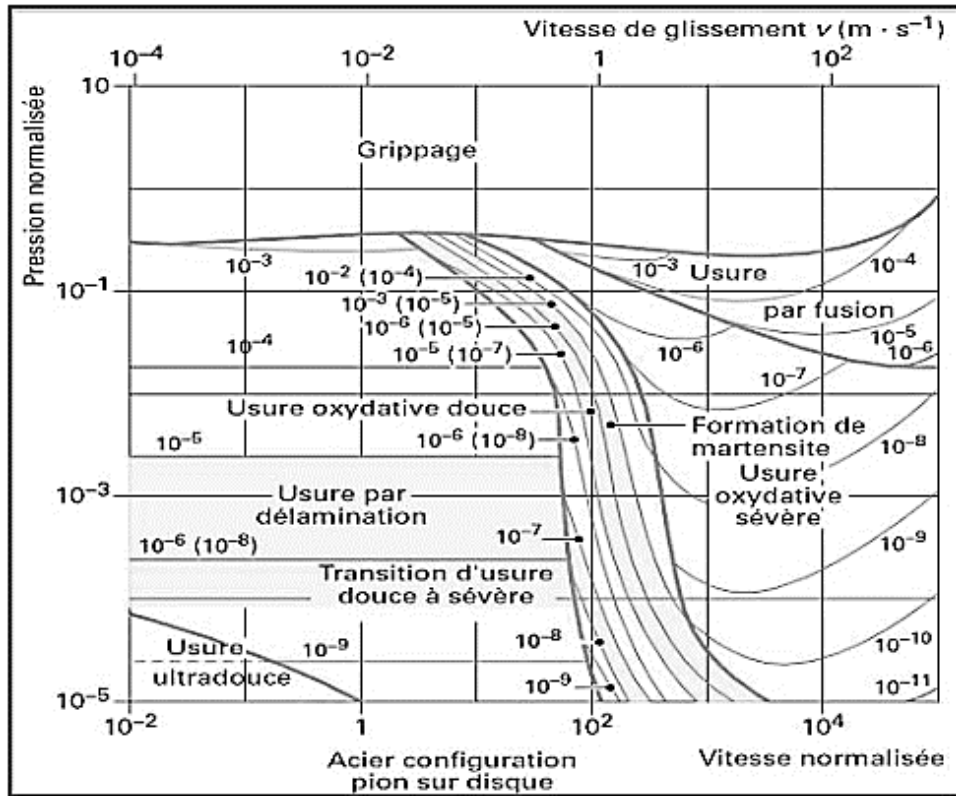


Figure 4.8 : Carte d'usure des aciers

Cette méthode établie aux aciers glissants, pour une large gamme de vitesses de frottement et de pressions normales, a été ensuite étendue pour d'autres matériaux avec différentes sollicitations de contact et différentes conditions environnementales.

5 La lubrification

5.1 Notions sur la lubrification

La lubrification est un processus clé en tribologie qui vise à réduire le frottement et l'usure entre des surfaces en mouvement relatif. Elle consiste à interposer une substance fluide, appelée lubrifiant, entre les surfaces en contact pour minimiser leur frottement et empêcher leur usure. Le lubrifiant peut être un liquide, un gaz ou un solide, et son choix dépend des conditions de fonctionnement, de la charge, de la température, de la vitesse et des propriétés des surfaces en contact. La lubrification est utilisée dans de nombreuses applications industrielles, telles que les moteurs, les machines-outils, les systèmes hydrauliques, les transmissions, les compresseurs, etc. Elle permet d'augmenter l'efficacité énergétique, de réduire les coûts de maintenance et d'augmenter la durée de vie des équipements.

5.2 Rôles de la lubrification

Les lubrifiants jouent un rôle essentiel dans le bon fonctionnement et la durabilité des équipements industriels en accomplissant plusieurs fonctions importantes :

- Les lubrifiants aident à réduire les frottements et les résistances passives dans les machines, ce qui permet d'améliorer leur rendement et d'économiser l'énergie. Ils assurent également une lubrification optimale entre les pièces en mouvement pour minimiser l'usure.
- Les lubrifiants sont essentiels pour protéger contre la corrosion en formant une couche protectrice sur les surfaces métalliques, empêchant l'oxydation et la corrosion, ce qui prolonge ainsi la durée de vie des composants mécaniques.
- Évacuer les impuretés, en maintenant en suspension les particules produites par l'usure et les débris, pour éviter leur accumulation dans les pièces en mouvement.
- Refroidir les pièces, en évacuant la chaleur générée par les frottements, ce qui permet de limiter les risques de fusion et de détérioration.
- Assurer l'étanchéité de l'équipement, en empêchant les impuretés externes de pénétrer et en minimisant les fuites internes.

- Transmettre de l'énergie ou de la chaleur, en utilisant les propriétés lubrifiantes du fluide pour faciliter le transfert d'énergie ou de chaleur entre les pièces en mouvement.

5.3 Les régimes de lubrification (Courbe de Stribeck)

Les régimes de lubrification correspondent aux différents états dans lesquels la lubrification entre deux surfaces en mouvement se produit. Ils sont déterminés par plusieurs facteurs tels que la charge, la vitesse de glissement et les propriétés du lubrifiant. L'épaisseur du film lubrifiant ainsi que la rugosité des surfaces en contact sont des paramètres clés qui influencent ces régimes de lubrification. L'épaisseur du film lubrifiant est importante pour la formation et le maintien d'une séparation entre les surfaces en contact, tandis que la rugosité peut favoriser ou perturber la formation du film lubrifiant. Ces deux paramètres sont étroitement liés aux différents régimes de lubrification et sont souvent utilisés pour caractériser et modéliser ces régimes.

La courbe de Stribeck, qui représente le frottement en fonction de la vitesse de glissement pour différentes valeurs de la charge appliquée, est souvent utilisée pour caractériser les différents régimes de lubrification et la transition entre ces régimes.

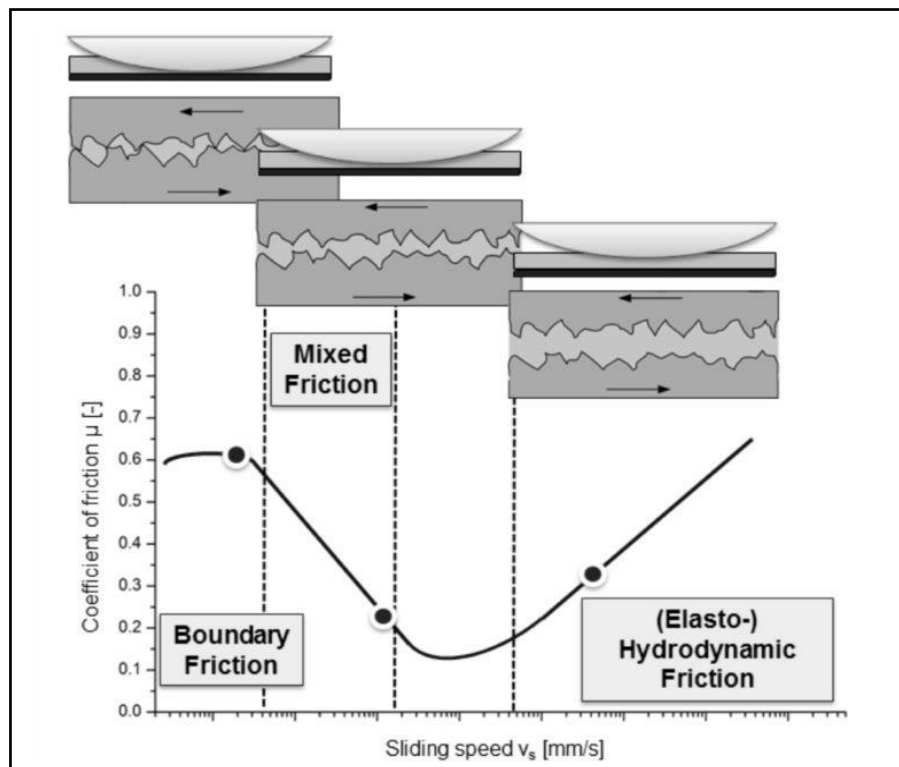


Figure 5.1 : Courbe de Stribeck

5.3.1 Régime de lubrification limite

La lubrification limite est un régime de lubrification où les deux surfaces en mouvement sont en contact direct la plupart du temps, avec un film de lubrifiant qui fournit une protection minimale. Cela est dû à une charge ou une vitesse élevée, qui compriment le film lubrifiant au point de le rompre et de permettre le contact direct des surfaces.

Dans ce régime, la charge est intégralement transmise les aspérités en contacts, et il est considéré comme étant le plus sévère. L'usure et le frottement sont très élevés, ce qui peut entraîner une dégradation rapide des surfaces et une réduction de la durée de vie des composants. Pour minimiser l'usure dans ce régime, il est souvent nécessaire d'utiliser des lubrifiants haute performance, des surfaces de contact lisses et des procédés de fabrication précis pour éviter les aspérités. Dans les applications industrielles, on rencontre ce régime dans trois cas principaux : le démarrage d'une machine, la période de rodage ou une surcharge occasionnelle.

5.3.2 Régime de lubrification mixte

La lubrification mixte est un régime de lubrification intermédiaire entre la lubrification limite et la lubrification hydrodynamique. Dans ce régime, les deux surfaces en contact sont partiellement séparées par un film lubrifiant, mais une partie de la surface est toujours en contact direct. La proportion de la surface en contact direct dépend des conditions de fonctionnement, telles que la charge, la vitesse de glissement et les propriétés du lubrifiant. La lubrification mixte est souvent associée à une augmentation de l'usure et de la friction par rapport à la lubrification hydrodynamique. Cependant, elle peut également offrir une meilleure stabilité et une meilleure résistance aux perturbations que la lubrification limite.

5.3.3 Régime de lubrification hydrodynamique

La lubrification hydrodynamique est un régime de lubrification dans lequel un film de lubrifiant est créé et maintenu par la pression hydrodynamique générée entre les surfaces en mouvement. Dans ce régime, les deux surfaces ne sont jamais en contact direct, et la charge est entièrement supportée par le film de lubrifiant. La formation du film de lubrifiant est favorisée par une épaisseur suffisante et une viscosité appropriée du lubrifiant, ainsi que par des vitesses de glissement élevées. Le régime de lubrification hydrodynamique est couramment utilisé dans les machines et les équipements industriels pour réduire l'usure et prolonger la durée de vie des composants. Cependant, il peut être

difficile à maintenir à des vitesses de glissement faibles ou dans des conditions de charge élevée.

5.4 Les types de lubrifiants

Il existe différents types de lubrifiants utilisés dans les applications industrielles. Les lubrifiants peuvent être classés en fonction de leur origine, de leur composition chimique, de leur viscosité, de leurs propriétés de lubrification et de leur mode d'application.

- Les lubrifiants d'origine minérale, tels que les huiles minérales, sont les plus couramment utilisés dans l'industrie en raison de leur coût relativement bas et de leur large disponibilité. Ils sont produits à partir de pétrole brut et sont disponibles dans une gamme de viscosités pour répondre aux différents besoins de lubrification.

Ces type d'huiles peuvent être raffinées pour atteindre une grande variété de viscosités et de propriétés de lubrification. Cependant, elles ont tendance à se dégrader plus rapidement que les huiles synthétiques et peuvent entraîner une accumulation de dépôts dans les moteurs.

- Les lubrifiants d'origine synthétique, tels que les huiles polyalphaoléfine (PAO), les huiles esters et les fluides de silicone, sont également utilisés dans des applications spécifiques qui nécessitent des propriétés de lubrification particulières.

- Les graisses sont un autre type de lubrifiant couramment utilisé. Elles sont composées d'une huile de base et d'un épaississant, et sont appliquées sous forme de pâte pour une lubrification plus durable dans des zones difficiles à atteindre.

- Les lubrifiants solides, tels que le graphite, le bisulfure de molybdène et le disulfure de tungstène, sont également utilisés pour la lubrification dans des conditions extrêmes telles que les hautes températures et les environnements corrosifs.

Enfin, les lubrifiants peuvent être appliqués de différentes manières, notamment par aspersion, immersion, circulation ou pulvérisation.

5.5 Les lubrifiants liquides

La lubrification liquide est un type de lubrification dans laquelle un lubrifiant liquide est utilisé pour réduire les frottements et l'usure entre les surfaces en mouvement, elle est largement utilisée dans les machines industrielles telles que les pompes, les moteurs et les transmissions pour maintenir leur bon fonctionnement et prolonger leur durée de vie. Les lubrifiants liquides peuvent être classés en différentes catégories en fonction de leur viscosité, de leur point d'éclair, de leur point de fusion et de leurs additifs. Le choix d'un lubrifiant liquide approprié dépend du type de machine, de la charge et des conditions de fonctionnement, ainsi que des exigences de performance telles que la réduction des frottements, la protection contre l'usure et la corrosion, et la résistance à l'oxydation.

5.5.1 Composition d'une huile

Une huile est composée d'une base lubrifiante et d'additifs qui améliorent ses propriétés. La base lubrifiante peut être d'origine minérale, synthétique ou végétale, et est généralement un mélange d'hydrocarbures.

5.5.2 Les additifs

Les additifs sont des produits chimiques ajoutés en petite quantité pour améliorer certaines propriétés de l'huile, telles que la viscosité, la résistance à l'oxydation, la protection contre la corrosion et l'usure, la capacité à nettoyer et disperser les impuretés, la réduction des frictions, etc. Les types et les quantités d'additifs varient selon le type d'huile et son application (Tableau 5.1).

Exemples d'additifs	
Anti-oxydant.	- Supprimer, ou tout au moins ralentir les phénomènes d'oxydation du lubrifiant. Contribuer à l'espacement des vidanges par une meilleure tenue aux hautes températures.
Anti-corrosion	- Empêcher l'attaque des métaux ferreux, attaque due à l'action conjuguée de l'eau, de l'oxygène de l'air et de certains oxydes formés lors de la combustion.
Anti-friction (usure).	- Renforcer l'action anti-usure qu'exerce un lubrifiant vis-à-vis des organes qu'il lubrifie.
Anti-congelant (jusqu'à 0,5 %)	- Permettre au lubrifiant de garder une bonne fluidité à basse température (de -15°C à -45°C).
Anti-mousse	- Le moussage de l'huile peut être dû : <ol style="list-style-type: none"> 1. A la présence d'autres additifs. Les additifs détergents agissent dans l'huile comme du savon dans l'eau : ils nettoient le moteur mais ont tendance à mousser. 2. Au dessin du circuit de graissage qui provoque des turbulences lors de l'écoulement du lubrifiant, facilitant ainsi le brassage air-huile et la formation des bulles.

Anti-émulsion	- Evite le mélange de fluides étrangers (<i>de l'eau par exemple</i>) avec l'huile et favorise la décantation (<i>séparation</i>) de l'ensemble.
Détergent <i>(utilisés à raison de 3 à 15 %)</i>	- Eviter la formation de dépôts ou de vernis sur les parties les plus chaudes du moteur telles que les gorges des pistons.
Dispersants <i>(utilisés à raison de 3 à 15 %)</i>	- Contrairement aux précédents, ils agissent essentiellement à basse température en retardant la formation de dépôts ou de boues. - Son rôle est de maintenir en suspension toutes les impuretés solides formées au cours de fonctionnement du moteur : imbrûlés, gommages, boues, suies diesel, dépôts nettoyés par les détergents.
Désaérant	- Favorise la séparation des gaz de l'huile.
Amélioration d'indice de viscosité. <i>(utilisés à raison de 5 à 10 %)</i>	- Permettre à l'huile d'être : <ol style="list-style-type: none"> 1. Suffisamment fluide à froid (<i>faciliter le démarrage en abaissant le point d'écoulement entre -15 et -45°C suivant les huiles</i>). 2. Visqueuse à chaud (<i>éviter le contact des pièces en mouvement</i>).
Additif extrême pression.	- Permettre à l'huile de : <ol style="list-style-type: none"> 1. Réduire les couples de frottement et par conséquent économiser l'énergie. 2. Protéger les surfaces des fortes charges.
De basicité	- Neutraliser les résidus acides de combustion des carburants, principalement sur moteur diesel.

Tableau 5.1 : quelques exemples d'additifs

5.6 Propriétés des huiles

Les huiles ont de nombreuses propriétés qui sont importantes pour leur utilisation efficace en lubrification.

5.6.1 Propriétés physiques

Les propriétés physiques comprennent :

- La viscosité, qui détermine la capacité de l'huile à lubrifier les pièces mobiles, est sa résistance à l'écoulement. L'index (ou indice) de viscosité mesure la variation de viscosité de l'huile avec la température. Une faible variation de viscosité est souhaitable pour garantir une lubrification optimale à toutes les températures de fonctionnement.
- La stabilité thermique est également importante car elle garantit que l'huile conserve ses propriétés à haute température.
- La densité de l'huile est importante car elle affecte sa capacité à lubrifier correctement les pièces et peut influencer les pertes de charge dans les systèmes de circulation d'huile. La couleur de l'huile peut indiquer la présence d'impuretés ou de contaminants.

- La compressibilité de l'huile mesure la variation de volume de l'huile sous pression. Le coefficient de viscosité-pression mesure la variation de viscosité de l'huile sous pression. Ces propriétés sont importantes pour garantir une lubrification efficace des pièces soumises à des pressions élevées.
- Enfin, le point d'écoulement de l'huile est la température la plus basse à laquelle l'huile peut encore s'écouler. Cette propriété est importante car elle garantit que l'huile restera fluide dans les conditions de fonctionnement les plus froides.

5.6.2 Propriétés chimiques

Les propriétés chimiques sont également importantes. Les huiles doivent avoir une bonne résistance à l'oxydation, qui est la dégradation chimique de l'huile sous l'effet de l'air, de la chaleur et des catalyseurs présents dans le moteur. La résistance à la corrosion est également importante pour protéger les surfaces des pièces en contact.

Les huiles ont de nombreuses propriétés chimiques, voici quelques exemples :

- Combustibilité : les huiles sont inflammables et peuvent brûler en présence d'une source de chaleur ou d'une flamme.
- Réactivité : certaines huiles peuvent réagir avec d'autres substances chimiques pour former des composés différents.
- Stabilité thermique : les huiles peuvent résister à des températures élevées sans se décomposer.
- Propriétés lubrifiantes : les huiles peuvent réduire la friction entre deux surfaces en mouvement.
- Propriétés solvantes : certaines huiles peuvent dissoudre d'autres substances chimiques, comme les graisses ou les huiles minérales.
- Propriétés antioxydantes : les huiles peuvent empêcher l'oxydation d'autres substances chimiques, ce qui peut prolonger leur durée de vie.
- Propriétés émulsifiantes : certaines huiles peuvent stabiliser des mélanges de liquides non miscibles, comme l'eau et l'huile.

Ces propriétés chimiques dépendent de la composition spécifique de l'huile en question.

BIBLIOGRAPHIE

1. Bharat Bhushan, ed. (2013) “Introduction to tribology”, Tribology Series, John Wiley & Sons, Ltd. May 2012, ISBN: 978-1-119-94453-9
2. J. Halling “Principles of Tribology”, The macmillan press Ltd 1978, ISBN 978-0-333-24686-3
3. Bharat Bhushan (2013) “Principles and Applications of Tribology”, Second Edition. John Wiley & Sons, Ltd. Published
4. A. Cornet & J.-P. Deville “ Physique et Ingénierie des Surfaces ”, EDP Sciences 1998, ISBN : 2-86883-352-7, ISSN : 1275-3807
5. G. Straffelini (2015) “Friction and Wear”, Springer International Publishing Switzerland, DOI 10.1007/978-3-319-05894-8_2
6. Rabinowicz, Friction and Wear of Materials, 2nd edn. (Wiley, New York, 1995)
7. M.M. Khonsari, E.R. Booser, “Applied Tribology”, 2nd edn. (Wiley, New York, 2008)
8. Robert W. Bruce , “Handbook of lubrication and tribology” Volume II, Taylor & Francis Group (2012)
9. K.C Ludema , “Friction, Wear, Lubrication”, CRC Press LLC (1996)
10. Gwidon W. Stachowiak & Andrew W. Batchelor “Engineering Tribology”, Elsevier Butterworth-Heinemann (2005), ISBN-13:978-0-7506-7836-0, ISBN-10:0-7506-7836-4