

Introduction

CHAPITRE 1 : ETAT DE SURFACE ET CONTACTS DES CORPS SOLIDES

CHAPITRE 2 : FROTTEMENT

CHAPITRE 3 : USURE

CHAPITRE 4 : LUBRIFICATION

Introduction

Le mot tribologie a été proposé par Peter Jost 1 en 1966 et est basé sur le mot grec "tribos" qui signifie frotter. Il s'agit donc de la science du frottement. Son but est de regrouper sous une seule terminologie l'ensemble des sciences du frottement :

Contact des surfaces ;

- Usure ;
- Frottement ;
- Lubrification ;
- etc.

Une définition plus précise de la tribologie est l' "étude des interactions entre surfaces solides en mouvement relatif".

I- La tribologie :

La **tribologie** est la branche de la mécanique qui étudie le *frottement*, l'*usure* et la *lubrification* des surfaces de contact entre deux solides. Elle s'intéresse principalement aux corps solides ou à l'interaction entre un solide et un lubrifiant liquide (*huile*), onctueux (*graisse*) ou granulaire (*poudre*).

CHAPITRE 1 ETAT DE SURFACE ET CONTACTS DES CORPS SOLIDES

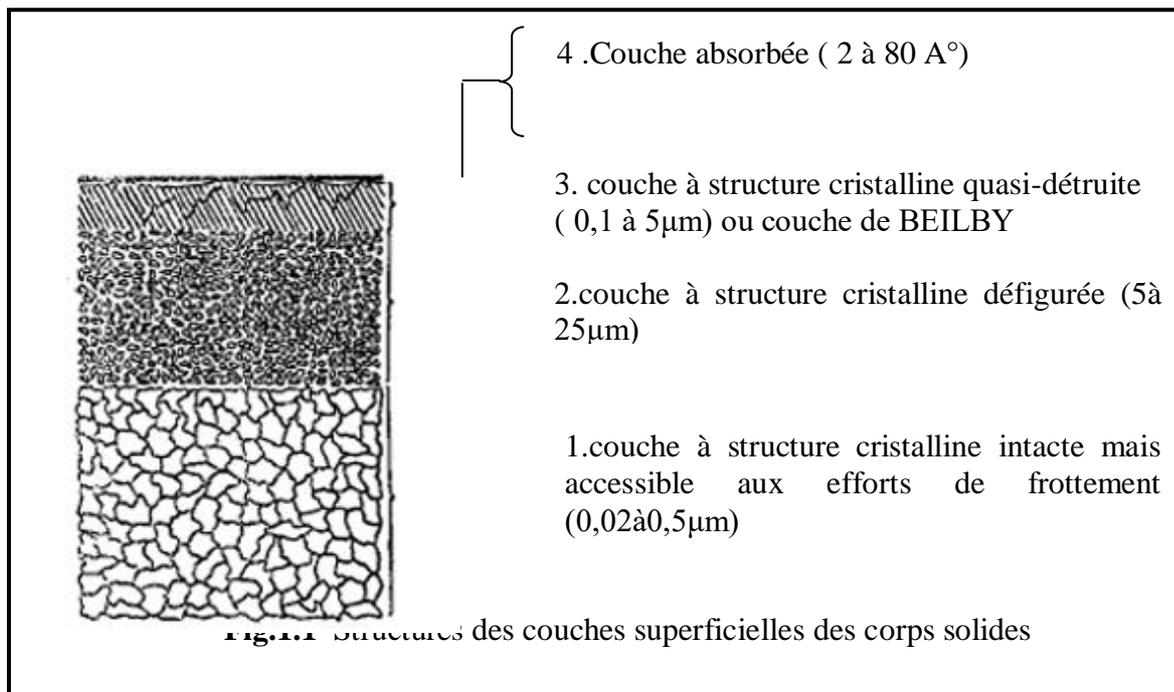
1 ETAT DE SURFACES DES CORPS SOLIDES

L'interaction des corps solides lors du frottement externe se localise dans les couches superficielles et sous-jacentes très minces des surfaces en contact. Les propriétés physico-mécaniques et chimiques de ces couches, exercent une influence sensible sur l'interaction des corps solides lors du frottement externe et leur usure. Ces propriétés sont différentes des propriétés analogues du matériau de base.

L'interaction des corps solides pendant le frottement externe et l'usure dépend de l'état des surfaces déterminé par l'ensemble des caractéristiques mécaniques, chimiques, physiques et géométriques des couches superficielles de ces corps.

Le traitement mécanique des surfaces influe sensiblement sur les propriétés des couches superficielles. L'exécution des pièces mécaniques peut être réalisée soit par formage soit par enlèvement de matière (usinage).

Après le traitement mécanique et l'exploitation ultérieure la surface de contact d'un corps solide possède une zone qu'on peut considérer, schématiquement, comme une zone à part séparant la masse de la pièce de l'ambiance. cette zone est elle même divisée en 4 couches qui de l'intérieur vers l'extérieur sont (voir Fig.1.1) :



1-Zone en cours d'écroutissage

Cette zone est rythmiquement sollicitée par les contraintes extérieures que l'on peut définir comme la partie sous-jacente du matériau accessible aux efforts des frottements, elle peut régner sur une dizaine de millimètres de profondeur.

2-Zone intrinsèquement écroûie

Dans cette zone la structure cristalline est défigurée. C'est là où l'on trouve des inclusions venant de l'extérieur. La hauteur de cette couche varie de 1 à 5 centièmes de millimètre.

3- Zone amorphe

Elle est souvent appelée couche de BEILBY. C'est une couche qui est générée lors des opérations de finition de la surface (rectification , polissage ...). Ces opérations agissent en effet de la façon suivante :

- Des grains d'abrasifs ont une action mécanique, ils labourent la surface et arasent les aspérités les plus élevées .
- Le frottement crée des phénomènes de fusion micro-localisés entre les grains d'abrasifs et le métal usiné.
- Un fort écrouissage provient d'une part des efforts exercés par les grains d'abrasifs, et d'autre part de la pression du plateau de la machine .

Ainsi se réalisent les conditions d'un concassage extrêmement fin de la surface cristalline auquel s'ajoute, par élévation de la température, la création de matériaux fondus , oxydés , caramélisés .

4-Couche adsorbée :

La couche adsorbée des substances du milieu ambiant est extrêmement solide et pratiquement inexpugnable, sous vide , à une température de l'ordre de 1000°C. L'épaisseur de cette couche varie de 2 à 80 Å° .

2 Etat géométrique des surfaces des corps solides

Le profil de la surface d'une pièce est donné par le dessin de définition de celle-ci.

Ce profil nous l'appellerons profil normal. La surface d'une pièce est formée à l'aide d'un traitement (le plus souvent mécanique). Lors du processus du traitement, à cause des défauts dans le système technologique (machine-outil dispositif, outil de coupe-pièce), des vibrations dans ce système, du processus technologique sur la surface de la pièce se produisent des écarts par rapport au profil normal. Les écarts par rapport au profil normal, qui naissent pendant les processus du traitement sont dits technologiques. Les écarts exploitationnels sont conditionnés par l'usure non uniforme des différents secteurs des surfaces de frottement.

Ces écarts se divisent en macroscopiques et microscopiques. Ils exercent une influence déterminante sur le contact, l'interaction lors du frottement externe et l'usure des corps solides.

La section de la surface de la pièce suivant le plan qui lui est perpendiculaire est appelé profil de la surface.

A) Les écarts macroscopiques : (défauts macrogéométriques)

sont des écarts irréguliers de faible hauteur H_m (fig.1.4) distribuée suivant un pas très grand P_m , tel que $P_m / H_m > 1000$. A ces irrégularités, on rapporte les défauts de formes (planéité, cylindricité, conicité et autres) et de position relatives (perpendicularité, parallélisme et autres) des surfaces. Les écarts macroscopiques technologiques sont conditionnés par le manque de précision de la machine-outil, les défauts de fixation de l'outil, mauvais choix du régime d'usinage ou la perturbation de ce régime, les contraintes thermiques et les déformations du système technologique. Les écarts macroscopiques exploitationnels sont habituellement conditionnés par l'usure non uniforme, se produisant par suite du montage incorrect des pièces de l'ajustement mobile, des vibrations et des surcharges pendant le processus de travail. Les écarts macroscopiques peuvent être partiellement évités, en excluant les causes de leur apparition citées.

B) Les écarts microscopiques :

Comprennent l'ondulation 2, la rugosité 3 et la subrugosité de la surface (Fig1.4).

Les ondulations sont des écarts de faible hauteur H_o qui se reproduisent périodiquement avec un pas moyen S_o . Ces irrégularités se représentent par des saillies et des creux de dimensions approximativement égales.

L'ondulation technologique de surface apparaît par suite du manque de rigidité du système technologique et de l'apparition des vibrations dans ce système. Ces vibrations sont

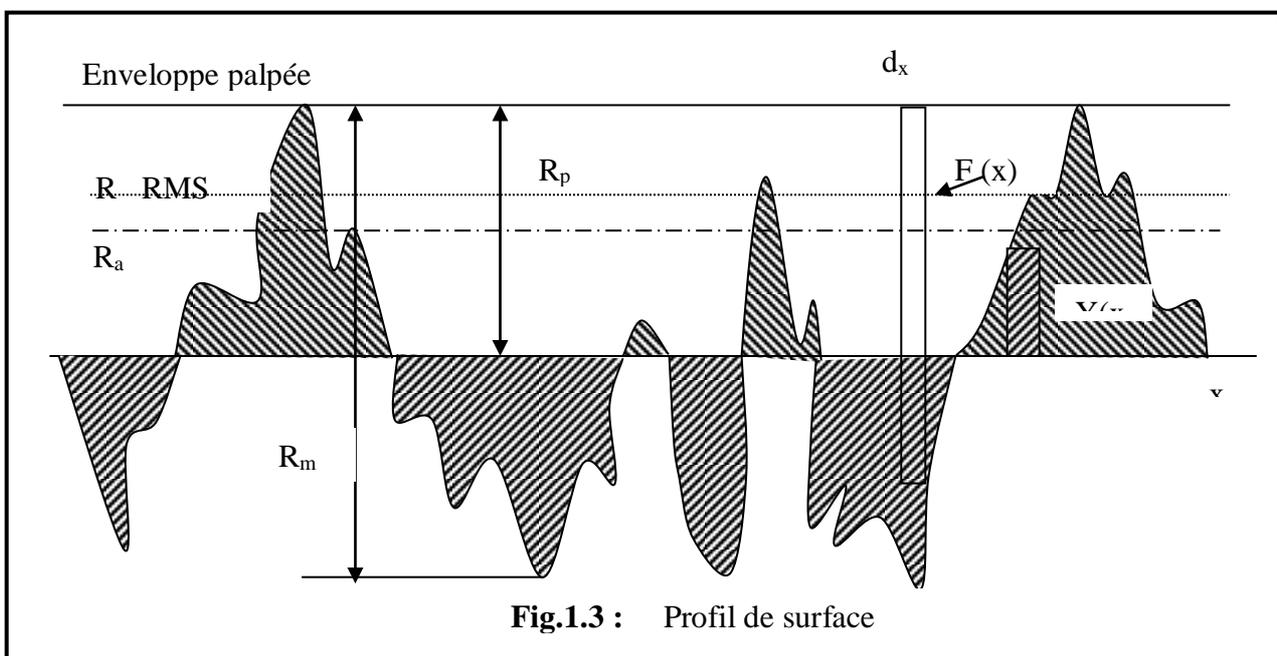
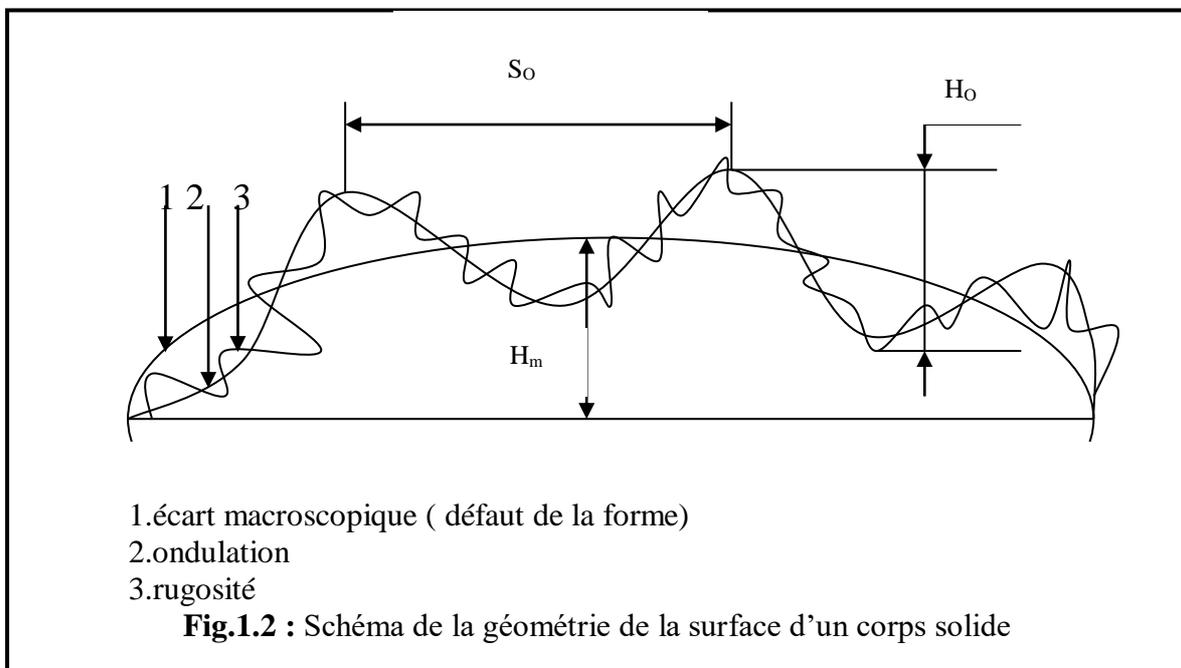
provoquées par la non-homogénéité des propriétés mécaniques des matériaux traités et par les différences dans les paramètres du traitement, par exemple les paramètres d'usinage.

L'ondulation exploitationnelle de la surface est provoquée par les propriétés rhéologiques du matériau des surfaces de frottement et par les charges dynamiques, agissantes dans l'assemblage mobile pendant le service. Les ondes sur la surface de la pièce ont une forme géométrique incorrecte, mais peuvent être décrites par une sinusoïde.

L'ondulation peut être évaluée par le traitement d'ondulogrammes relevés des surfaces au moyen de profilographes (passe haut). Pour caractériser l'ondulation on utilise le pas S_o et la hauteur H_o de l'onde. Le pas de l'onde est la distance entre les sommets des deux ondes voisines, mesuré sur le profil de la surface. La hauteur de l'onde est la distance entre le sommet de l'onde et son creux, elle est égale au double de l'amplitude de l'onde. Habituellement $50 \leq S_o/H_o \leq 1000$. En fonction du procédé de traitement de la surface, le pas S_o varie entre 0,25 et $10^4 \mu\text{m}$, et H_o de 0,03 à 500 μm .

Dans les calculs des paramètres de contact des corps solides, on utilise souvent les rayons de courbure des sommets des ondes R_o , qu'on calcule par la relation:

$$R_o = S_o^2/8H_o \tag{1.1}$$



Parfois dans les calculs on utilise le modèle sphérique de l'ondulation, dans laquelle les ondes de la surface sont considérées comme des segments sphériques de rayon constant. En utilisant la formule (1.1), on détermine les rayons de courbure des ondes suivant la direction du traitement $R_{o\text{ long}}$ et la direction transversale $R_{o\text{ trans}}$ on détermine le rayon de courbure de l'onde par la formule :

$$R_o \sqrt{R_{o\text{ lon}} \cdot R_{o\text{ trans}}} \quad (1.2)$$

La rugosité de surface : est constituée par des écarts microscopiques irréguliers par rapport au profil géométrique de la surface ondulée du corps solide. Ces défauts (aspérités, pics) ont une faible hauteur et un pas plus petit que celui des ondulations.

La rugosité technologique : est conditionnée par la géométrie de l'outil de coupe et son usure, les vibrations dans le système technologique, les régimes de coupe, les propriétés du matériau traité et du matériau de l'instrument. La rugosité technologique de surface pour certains procédés du traitement (tournage, le fraisage, la rectification) n'est pas la même suivant la direction du mouvement de l'instrument et dans la direction du mouvement d'avance, qui lui est perpendiculaire). On la subdivise en rugosités longitudinale et transversale.

La rugosité exploitationnelle : se subdivise en rugosités instable et stable. La rugosité instable représente une rugosité de passage de la rugosité technologique à la rugosité stable et elle caractérise la période de rodage des pièces des jonctions mobiles. Le mécanisme de sa variation dépend de l'état de contraintes dans les zones de contacts des aspérités.

La rugosité de surface s'évalue par la hauteur des aspérités du profil de surface R_z , la rugosité moyenne arithmétique R_a , la profondeur moyenne de rugosité R_p , la rugosité moyenne quadratique du profil R_{ms} , le pas moyen des aspérités S_a , la hauteur maximale des aspérités R_{max} ou R_M (Fig.1.3) et le rayon de courbure du sommet des aspérités R .

Pour la détermination des paramètres de rugosité de surface, on mène la ligne moyenne au profil de surface (Fig. 1.3), l'écart quadratique moyen du profil à partir de cette ligne dans les limites de la longueur de base est le même. La partie du profil de surface de la pièce, disposée entre deux points voisins de son intersection avec la ligne moyenne, au -dessus d'elle, s'appelle saillie. La partie du profil de surface du corps entre le profil et la droite, qui joint deux creux voisins, s'appelle aspérité.

Considérons ici seulement les paramètres utiles pour les analyses ultérieures :

La hauteur maximale de rugosité R_{max} : ou R_M est la distance entre la ligne des creux et la ligne des sommets du profil de surface. Les lignes des creux et les sommets sont des droites, menées sur le profil de surface (fig. 1.3), dans les limites de la longueur de base, correspondamment par le fond du plus profond des creux et le sommet de la plus haute aspérité parallèlement à la ligne moyenne de ce profil.

En fonction du procédé de traitement $R_{max} = 0,15 - 50 \mu\text{m}$, on comparant R_{max} et H_o , on peut remarquer que dans un certain diapason, ces grandeurs ont les mêmes valeurs pour divers procédés de traitement des surfaces.

La profondeur moyenne de rugosité R_p : est la distance entre la ligne du sommet et la ligne moyenne.

Pour les calculs on prend la valeur moyenne de cinq (5) secteurs de la surface.

$$R_{\text{max}} \approx \frac{1}{5} \sum R_{\text{max } i} \quad (1.3)$$

La subrugosité de surface : est constituée par de plus petits écarts présents sur les

surfaces des aspérités (défauts de 4^{ème} ordre). Elle est conditionnée par les défauts internes du matériau (vacances et dislocation), déformation non uniforme des cristaux, micro fissures naissant lors de leur déformation et autres. Les dimensions de la subrugosité sont plus faibles que les dimensions de la rugosité de 2 à 3 ordres. En général, la subrugosité n'influe pas sensiblement sur les caractéristiques géométriques des surfaces des corps réels.

2 CONTACT DES CORPS SOLIDES

2.1 Modes, aires et pressions de contact des surfaces des corps solides

On distingue trois modes de contact selon la forme des surfaces des corps solides conjuguées

- Contact ponctuel, tel que celui d'une bille sur une surface de moindre courbure (bille sur le chemin de roulement).
- Le contact linéaire, tel que celui d'un rouleau sur une surface plane.
- Contact superficiel tel que celui d'un coulisseau sur une glissière.

Lorsque les surfaces de deux solides en contact ne présentent pas un degré de conformité suffisant, la charge transmise se répartit sur une aire de contact de faibles dimensions, qui est une conséquence des déformations associées aux pressions qu'elle subit. De tels contacts sont souvent regroupés sous le terme abusif de contact hertzien, en référence aux travaux de Hertz sur l'étude du contact sec sans frottement entre deux corps élastiques de surfaces quadratiques. Les contacts hertiens se rencontrent typiquement dans les roulements à billes, les engrenages, les systèmes came-poussoir. Autres études ont montré que la présence des aspérités des surfaces modifie en effet la répartition des pressions sur l'aire de contact et introduit des sur-contraintes dans les premiers micromètres sous la surface des solides. Cette influence se trouve particulièrement exacerbée lorsque la lubrification est défaillante pour séparer convenablement les surfaces.

Les études sur les contacts rugueux ont connu un essor ces quinze dernières années grâce à l'apparition des formulations du problème de contact, mais également grâce aux progrès de l'informatique permettant de prendre en compte un nombre suffisant de points en contact pour décrire de manière satisfaisante la rugosité des surfaces.

Ainsi à cause des irrégularités géométriques (écarts de forme, ondulation et rugosité) des surfaces, le contact des corps solides réels se réalise dans des zones isolées, c'est à dire il est discret. Pour caractériser le contact des corps solides on utilise les notions d'aires de contact nominale A_a , de contour A_c et réelle A_r .

1. L'aire nominale de contact A_a

Coïncide avec l'aire apparente de contact des surfaces conjuguées. Par exemple, examinons le contact de deux corps ayant des surfaces nominales planes (Fig. 1.47). Soit la surface d'un des corps en contact ondulée et rugueuse et la surface de l'autre idéalement régulière (plane sans ondulations et rugosité). L'aire nominale du premier corps est égale à l'aire de la surface ondulée de contact A_a , quant à l'aire nominale du deuxième corps est égale à l'aire d'un rectangle délimitant les zones de contact.

Le rapport de la charge nominale à l'aire apparente de contact représente la pression de contact nominale :

$$P_a = N / A \quad (1.4)$$

2. L'aire de contour A_c

Au départ, le contact s'effectue sur les plus hautes aspérités, disposées sur les sommets des ondes. Les interactions mécaniques (de forces) se transmettent par les éléments

d'ondulation et provoquent leur déformation. Ordinairement, la déformation des éléments d'ondulation est élastique. En fait cette déformation conduit à la formation sur ces éléments des aires de contact, dont la somme est appelée aire de contour A_c . Pour cela l'aire de contour du contact dépend sensiblement des paramètres caractérisant l'ondulation de la surface (le pas P_o et la hauteur H_o des ondes) ainsi que de la charge normale.

Le rapport de la charge normale agissante sur les corps solides à l'aire de contour représente ce qu'on appelle la pression de contour du contact P_c :

$$N / A_c \quad (1.5)$$

3. l'aire réelle de contact

Dans les limites de l'aire de contour A_c , le contact s'effectue par les aspérités isolées, dont chacune forme une aire réelle de contact A_{ri} . Les dimensions de cette aire sont habituellement faibles et dépendent de la configuration des aspérités, des propriétés mécaniques des corps interagissant, des pressions de contour et du type de déformation dans les zones du micro-contact. L'aire, dans laquelle s'équilibrent les forces intra-atomiques et intermoléculaires d'attraction et de répulsion, est appelée aire réelle de contact élémentaire. L'aire sommaire des zones de contact des aspérités forme l'aire réelle de contact des corps solides :

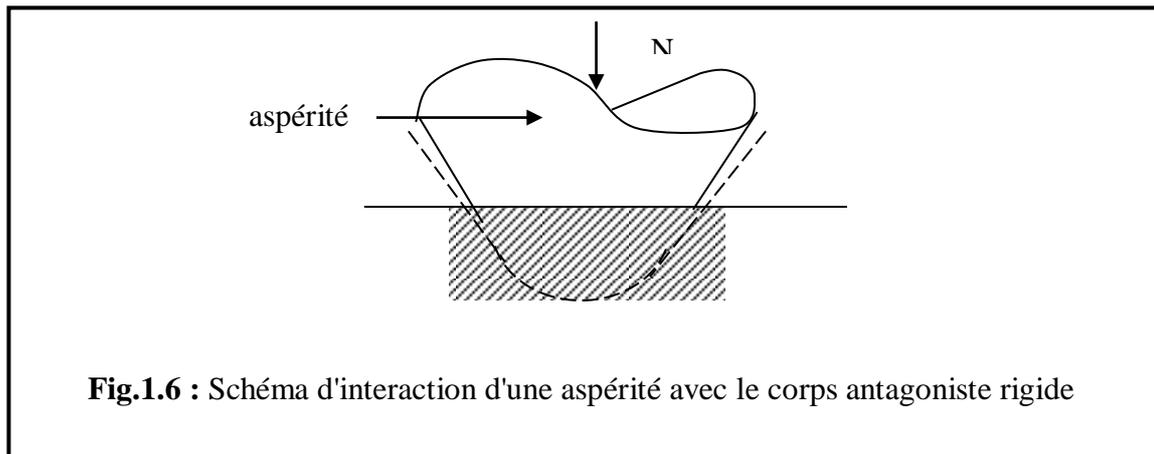
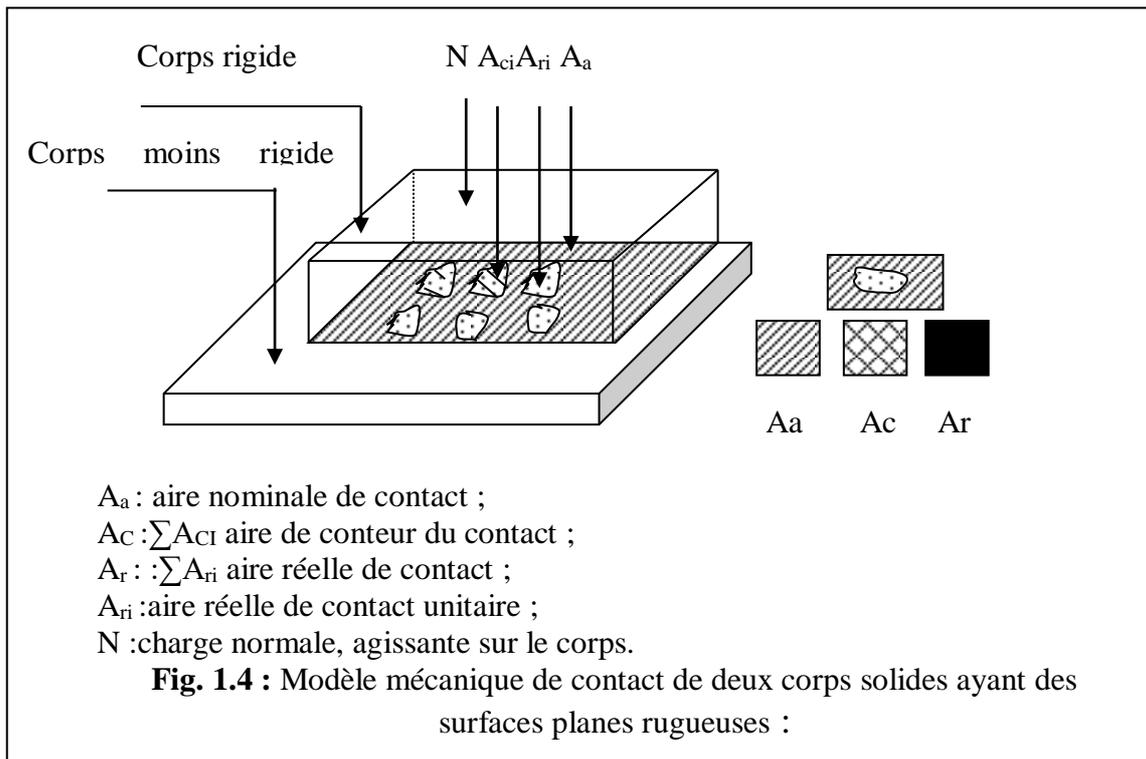
$$A_r = \sum A_{ri}.$$

Avec l'augmentation du rapprochement entre les surfaces des corps en contact, l'aire réelle de contact s'accroît. La loi de variation de A_c en fonction du rapprochement est obtenue expérimentalement pour le contact de deux corps solides ayant des surfaces nominale-ment planes. On considère qu'une des surfaces est rugueuse et l'autre lisse.

En fonction des caractéristiques mécaniques des corps interagissant dans les zones de contact réel aura lieu la pénétration des aspérités dans la surface du corps antagoniste plus doux (Fig. 1.8) ou l'écrasement de ces aspérités contre un corps plus dur (Fig. 1.5). Dans le cas de matage (écrasement) le matériau déformé se distribue régulièrement sur toute la surface des aspérités.

Le rapport de la charge normale à l'aire réelle de contact représente la pression réelle de contact :

$$P_r = N / A_r \quad (1.15)$$



Chapitre 2 : 2. FROTTEMENT

2.1 Introduction

Dans le contact de corps solides réels, sollicités par des efforts engendrés par le poids ou des forces extérieures, les actions réciproques des surfaces déformées engendrent des pressions normales et des cisaillements difficilement définissables. Ces actions peuvent se décomposer en poussées, résultantes de l'effet des pressions et de forces tangentielles, provenant des cisaillements, appelées forces de frottement. Cet exposé des conditions de frottement, limité habituellement à deux corps, distingue les cas de contact suivants :

1. Les deux corps en contact sont immobiles l'un par rapport à l'autre. Les surfaces déformées des parties en contact transmettent des efforts imposés par les conditions d'équilibre au repos et les lois du frottement dit d'adhérence.
2. Les deux corps glissent l'un par rapport à l'autre. Les surfaces déformées des parties momentanément en contact transmettent des efforts imposés par les conditions d'équilibre en mouvement et la loi du frottement de glissement.
3. Les deux corps roulent l'un sur l'autre sans que les surfaces en contact glissent l'une par rapport à l'autre. Les efforts produits entre les deux corps sont trouvés par la loi du frottement de roulement.
4. Les deux corps en contact roulent et glissent simultanément l'un sur l'autre. Les conditions de déplacement des surfaces déformées et les efforts qui en résultent dépendent des lois composantes du frottement de glissement et du frottement de roulement.

Le phénomène des frottements de glissement et de roulement est excessivement complexe et il n'a pas été possible jusqu'ici, malgré toutes les hypothèses, théories et essais, de donner des lois applicables à tous les cas rencontrés en construction de machines, le nombre de paramètres influençant de loin ou de près le comportement des corps étant trop grand. Les lois citées dans ce premier chapitre sont très primitives et peu précises. Elles permettent malgré tout de mettre en évidence les particularités réelles de corps en contact, d'estimer avec une précision plus ou moins limitée les efforts transmis à travers les surfaces déformées, à énoncer des recommandations valables dans le choix et l'implémentation des éléments ou des parties de machines.

2.2 Lois et caractéristiques des frottements de glissement

Pour la caractérisation du frottement externe on se sert de la force de frottement externe. C'est la force de résistance au glissement relatif, disposée dans le plan de contact des deux corps solides et représente la résultante des forces de frottement élémentaires, qui naissent dans les zones de contact des aspérités isolées. Cette force est dirigée contrairement au sens du mouvement relatif des corps flottants.

Le rapport de la force de frottement à la force normale aux surfaces frottantes (ou la composante normale de la force agissante sur ces surfaces) s'appelle le coefficient de frottement

La notion de coefficient de frottement a été introduite pour la première fois par *Leonard de Vinci*. Plus tard *Amonton* a proposé la formule :

$$f = T / N$$

La loi de Coulomb est très peu précise, mais très pratique dans les applications simples. Elle est à peu près valable lorsque les surfaces en contact sont sèches ou très peu lubrifiées. Le

tableau 1.1 donne les coefficients de frottement d'adhérence et de glissement en fonction des matériaux en contact et de l'effet de la lubrification.

Tableau1
Valeurs moyennes des coefficients defrottement

Matières en contact	Frottement d'adhérence Coefficient de frottement mu zéro Lubrification		Frottement de glissement Coefficient de frottement mu Lubrification	
	sec	Graissé	sec	graissé
Acier sur				
Acier	0,40 à 0,70	0,10	0,30 à 0,60	0,04 à 0,10
Ac37 / Ac 37 poli			0,15	
Fonte grise	0,16 à 0,25	0,10	0,14 à 0,26	0,03 à 0,16
Bronze	0,20	0,10	0,16 à 0,28	0,04 à 0,12
Alliage d'aluminium	0,20	0,10	0,20	0,04 à 0,16
Acier sur Métal				
blanc Alliage de			0,22	
plomb Joint en			0,30 à 0,50	
cuir Garniture de	0,50	0,20	0,20 à 0,26	0,12
frein PTFE			0,40 à 0,60	0,20 à 0,45
(Téflon)			0,04 à 0,22	
Polyamides			0,28 à 0,40	0,10
Glace	0,027		0,014	
Fonte grise sur				
Fonte grise	0,20	0,16		0,05 à 0,15
Bronze	0,20	0,10	0,20	0,10
Autres matières				
Bronze sur	0,20	0,10	0,20	0,04 à 0,08
bronze Métaux	0,50 à 0,65	0,10	0,20 à 0,50	0,04 à 0,10
sur bois Bois sur	0,40 à 0,65	0,15 à 0,20	0,20 à 0,40	0,04 à 0,18
bois Métaux sur	0,50	0,25	0,20 à 0,30	0,12
cuir				

Remarque

Les valeurs numériques des coefficients de frottement d'adhérence et de glissement , sont déterminées par des séries d'essai en laboratoire, sur des éléments de machines ou des mécanismes, en faisant varier les paramètres comme la pression, la vitesse, la lubrification, les matières en contact.

2.3 Système tribologique

L'analyse tribologique d'un système introduit quatre éléments composants fondamentaux

1. le corps en étude qui fait l'objet de l'analyse; il s'agit le plus souvent d'un corps solide.
2. le corps de base sur lequel agit directement le corps étudié. Il peut se présenter sous l'une des trois formes : solide, liquide ou gazeuse.
3. le corps intermédiaire placé entre les deux corps précédents. Il peut être aussi solide, liquide ou gazeux, soit souhaité comme dans le cas d'un lubrifiant, soit indésirable comme les particules solides provenant de l'usure des corps.
4. le milieu ambiant, généralement gazeux, mais aussi liquide dans certaines

applications. Le milieu ambiant agit sur les autres composants habituellement sous forme de réactions physico-chimiques

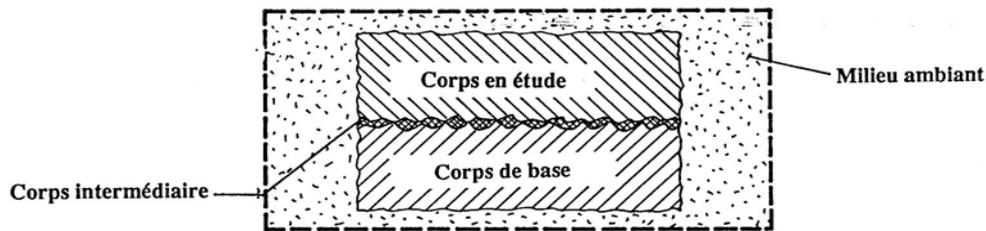


Figure 1 système tribologique

2.4 Types de frottement

Le choix correct du troisième composant, le lubrifiant, nécessite la connaissance de toutes les caractéristiques imposées au mécanisme à étudier et des propriétés particulières des lubrifiants. Les facteurs issus directement du mécanisme sont : la pression superficielle maximale et sa répartition, la vitesse relative des pièces en glissement et/ou roulement, les températures d'utilisation et limites acceptables, la circulation du lubrifiant à l'intérieur du mécanisme et son renouvellement, la possibilité d'évacuer l'énergie calorifique produite par les pertes mécaniques, etc. Les propriétés physico-chimiques du lubrifiant influencent directement les conditions de frottement de glissement entre les corps.

La théorie de la lubrification et la pratique du frottement permettent de distinguer six régimes de frottement

1. Frottement d'adhérence

Le comportement des surfaces rugueuses en contact dépend de la géométrie des surfaces et de la rugosité. La loi du frottement d'adhérence, indique la condition à remplir par la composante tangentielle pour que les corps ne se déplacent pas l'un par rapport à l'autre

2. Frottement sec

Les deux surfaces, toujours rugueuses, en glissement l'une par rapport à l'autre, ne sont pas séparées ou enduites d'un lubrifiant. Le déplacement relatif des corps engendre un échauffement très localisé aux aspérités qui se traduit par des microsoudures aussitôt cisailées par le mouvement. Le coefficient de frottement est très élevé et l'usure des pièces reste trop importante.

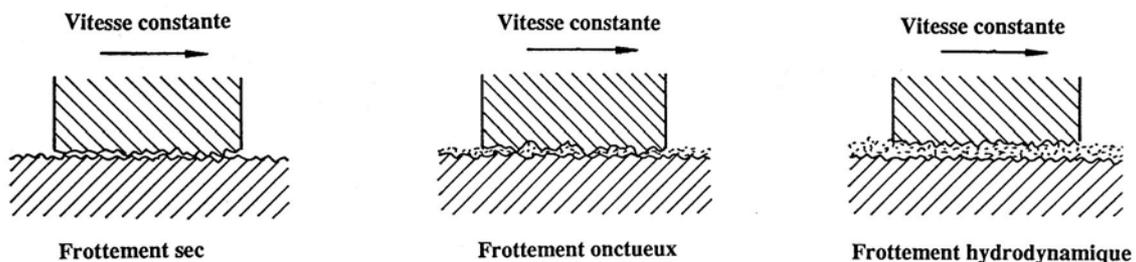


Figure2 : Régimes de frottement de glissement

3. Frottement onctueux

Les corps sont enduits d'une substance étrangère, le lubrifiant, qui a pour tâche essentielle d'empêcher le grippage des pièces et d'abaisser les forces élémentaires de frottement. A faible vitesse relative, l'épaisseur de la couche lubrifiante est inférieure aux aspérités des pièces en contact. L'usure devient plus faible et les microsoudures sont moins fréquentes. Le coefficient de frottement est fortement réduit. L'état de surface des pièces et les propriétés du lubrifiant, en particulier son aptitude à adhérer sur les surfaces et à résister aux pressions, jouent un rôle important dans ce régime de frottement.

4. Frottement hydrodynamique

En présence d'une couche de lubrifiant suffisante, l'épaisseur du corps intermédiaire est toujours supérieure à la somme des aspérités des surfaces. Un film liquide ou pâteux sépare complètement les surfaces primitivement en contact. C'est le régime de frottement hydrodynamique lorsque la couche liquide est créée par la géométrie des pièces, représentée par un coin liquide, et par la vitesse de glissement des pièces. Une autre possibilité de séparer les surfaces des corps est d'engendrer une pression artificielle entre les surfaces au moyen d'un dispositif extérieur. Le régime est appelé hydrostatique bien que le déplacement des corps soit possible. Les seules forces à mettre en jeu pour déplacer les pièces sont dues aux caractéristiques du lubrifiant. Le coefficient de frottement de glissement selon la loi de Coulomb n'existe pas directement mais il est très utile de pouvoir exprimer les forces parasites en fonction de la charge normale par un coefficient que nous voulons désigner par *coefficient de frottement équivalent*

Dans le frottement hydrodynamique ou le régime hydrostatique, l'usure des pièces est pratiquement nulle. La construction des grandes machines tournantes et l'amélioration de leur rendement mécanique seraient impensables sans la possibilité de créer le frottement hydrodynamique. Les coefficients de frottement équivalents se situent entre 0,05 à 0,3 %, soit environ vingt fois moins qu'en frottement de glissement onctueux.

5. Frottement mixte

Entre le régime onctueux, avec lubrifiant protecteur de surfaces, et le régime hydrodynamique avec lubrifiant porteur, se situe un frottement intermédiaire appelé frottement mixte ou imparfait. La portance du lubrifiant ne suffit pas à séparer entièrement les corps en mouvement, les surfaces restant partiellement en contact.

Exemple : Glissières et coulisseaux de machines-outils de précision. Sur des surfaces grattées, la pente des surfaces de grattage engendre le frottement hydrodynamique à vitesse suffisante. Dès que le coulisseau est immobile, le lubrifiant liquide est expulsé des alvéoles et les parois se rapprochent jusqu'à se toucher. De mesures effectuées, le temps nécessaire pour atteindre le contact entre surfaces varie de 1 à 2 minutes. Le film protecteur dépend non seulement de la viscosité du lubrifiant, mais aussi de sa tension superficielle.

Chapitre 3 : Usure

Définition

L'usure est une conséquence du frottement, et se produit au niveau de la zone de contact. Les résultats d'usure sont l'enlèvement ou le détachement du matériau qui entraîne un changement progressif des dimensions et ou de la forme du corps usé.

Les paramètres influençant le taux d'usure sont :

- la force de contact
- la température
- l'aire de contact
- l'état physico-chimique des surfaces flottantes (la rugosité, les couches d'oxydes)
- la structure cristallographique et les propriétés mécaniques des matériaux (la dureté)
- l'absence ou la présence d'un lubrifiant
- la présence d'agents actifs en frottement (additifs anti usure)

Origines de l'usure

- les déformations plastiques : *création, déplacement de dislocations rayures, impacts*
- les fissurations : *brutale, progressive initiation, propagation*
- les transformations physico-chimiques des surfaces *transformations de phase*
- réactions chimiques
- adhésion : *transferts à l'échelle atomique, micro-grippage, grippage*

Sévérité de l'usure

- *usure douce ou ultra-douce* : le système s'use peu. Les surfaces restent lisses et les particules ont une dimension de l'ordre du micromètre.
- *usure sévère* : les surfaces des corps sont modifiées, et la taille des particules dépasse 100 microns.
- *usure catastrophique* : la durée de vie est énormément réduite

OA : usure rapide (rodage)

AB : utilisation normale de la machine

BC : destruction des éléments de la machine

MÉCANISME DE L'USURE

L'usure intervient non seulement par le glissement de deux pièces rugueuses l'une sur l'autre, mais également par l'action de corps liquides ou gazeux sur les corps solides comme par exemple la cavitation et l'érosion. Les mécanismes de l'usure sont habituellement une combinaison pondérée des mécanismes fondamentaux, ces derniers étant cités dans le tableau ci-dessous. Il est possible de distinguer les cas fondamentaux suivants.

1. Usure par adhésion : L'usure par adhésion est engendrée par des pressions locales très élevées rompant la couche protectrice d'oxydes et provoquant des micro-soudures entre

aspérités des surfaces. Ces soudures à froid peuvent posséder une résistance mécanique supérieure à celle du métal de base et entraîner, lors du déplacement des surfaces, des arrachages de particules des deux corps. Ce processus dépend :

- A. des possibilités de déformations élasto-plastiques des aspérités des corps dépendant de la structure cristallographique du métal, les cristaux à faces centrés étant plus exposés aux micro-soudures.
- B. Des essais sous vide poussé ont démontré que l'adhésion entre les métaux est toujours présente dans ces conditions. Des micro-soudures peuvent intervenir dès que la couche d'oxydes est rompue ou éliminée.

2. Usure par abrasion : L'usure par abrasion se caractérise par la pénétration du corps le plus dur dans la couche superficielle du corps le plus tendre en produisant des particules libres par glissement des surfaces. L'exemple classique d'usure par abrasion est l'usinage ou le rectifiage des pièces métalliques par meules où l'usure par abrasion se fait sur la surface à usiner. La résistance à l'usure par abrasion peut s'améliorer :

- A. par le choix de meilleures propriétés des matériaux : traitement d'amélioration ou de durcissement,
- B. par une modification dirigée des propriétés des matériaux dans la zone des couches limites : diffusion thermique, durcissement superficiel.
- C. par application de couches protectrices : métal d'apport appliqué par soudage, recouvrement galvanique ou chimique, frittage ou coulée.

3. Usure par corrosion L'usure par corrosion provient d'une combinaison de sollicitations mécaniques et chimiques. Le corps tribologique intermédiaire et le milieu ambiant interviennent dans ce processus. Il existe deux familles de corrosion :

- A. l'activité chimique entre le corps intermédiaire et les surfaces frottantes est déclenchée principalement par une action mécanique. Un exemple simple est donné par la formation de rouille d'appui due à la corrosion de surfaces sèches, glissant sous une forte pression, en présence de l'oxygène de l'air.
- B. l'action du corps intermédiaire sur les surfaces indépendamment des actions mécaniques. La conjugaison des composantes mécaniques et chimiques accélère la destruction des surfaces par la corrosion.

4. Usure par déport de matière L'usure lente mais inexorable par déport de matière provient du glissement des surfaces rugueuses l'une sur l'autre. Elle dépend de la formation possible d'une couche protectrice et de l'activité chimique du processus de frottement. Pour ralentir le déport de particules, la pression et la température doivent rester dans des limites admissibles trouvées dans la pratique industrielle.

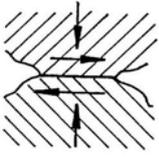
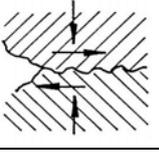
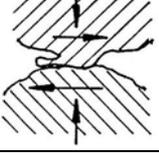
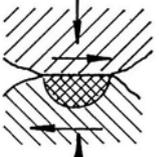
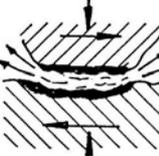
5. Usure par fatigue L'usure par fatigue est engendrée par la variation des sollicitations mécaniques et thermiques au niveau des surfaces en contact. Elle provoque le glissement des cristaux constituant la matière métallique et la formation progressive de déchirures internes qui se propagent vers l'extérieur des corps.

En définitive, l'usure est caractérisée :

- 1. par l'apparition de particules dont la forme, la grandeur, la composition chimique dépendent du mécanisme d'usure.
- 2. par une modification de la micro-géométrie des surfaces en particulier de la rugosité des pièces par l'apparition de rayures, trous, pellicules, fissures.
- 3. par une modification des propriétés des matériaux dans les couches extérieures : durcissement, augmentation de la fragilité, autocontrainte, composition chimique locale.
- 4. par transport de particules d'un corps sur l'autre.

Pour assurer la fonction de l'élément ou du mécanisme, l'usure doit rester dans des limites acceptables, malgré la formation de rayures, ondulations, fissures, trous micro- ou macroscopiques, etc.

Principaux mécanismes d'usure des corps solides

Représentation schématique	Mode d'usure Description du mécanisme
	<p>1. Adhésion Par suite du phénomène d'adhésion, les deux corps en contact subissent des micro-soudures par l'action de pressions élevées, liaisons qui sont cisailées par le mouvement relatif des pièces.</p>
	<p>2. Diffusion Dès que les deux corps sont à l'état micro-soudés, le phénomène de diffusion entre en action, d'autant plus important que la température est élevée. Le mouvement relatif des pièces arrache de grandes particules de matière.</p>
	<p>3. Engrènement La déformation plastique des surfaces en contact provoque des glissements inter cristallins et engendre une formation des tries qui engrènent les unes dans les autres.</p>
	<p>4. Formation de coin Lors du glissement d'une surface relativement dure sur une surface plus tendre, la première produit une déformation plastique de la seconde et une accumulation de matière. Cette accumulation forme un coin qui va cisailier et déporter des particules de matière.</p>
	<p>5. Coupe microscopique Lors de sollicitations extérieures, les aspérités de la pièce la plus dure va pénétrer dans le corps le plus tendre et déchirer les aspérités de la pièce la plus tendre sous forme de copeaux microscopiques.</p>
	<p>6. Déformation Par suite de déformations élastiques répétées, la sollicitation provoque la fatigue de la matière et l'usure. Les déformations plastiques répétées engendrent des glissements inter cristallins et finalement le déport de matière sous forme de couches successives.</p>
	<p>7. Énergie superficielle Lorsque l'énergie élastique accumulée dans la zone sollicitée est supérieure à l'énergie d'adhésion, il se forme des particules libres d'usure. Par contre, il y a transfert de particules si l'énergie élastique est égale à l'énergie d'adhésion.</p>
	<p>8. Plasma submicroscopique La production et l'accumulation thermique localisée dans les couches limites du partenaire peut engendrer des réactions tribocatalytiques. Ils s'ensuivent des dislocations de la structure cristalline de la matière accompagnée d'une diminution de la résistance à l'usure.</p>

Chapitre 4 : Lubrification

Objectifs

1. Préciser les différentes fonctions des lubrifiants.
2. Indiquer les classifications, les caractéristiques et les propriétés des principales familles de lubrifiants.
3. Définir les différents additifs suivant leurs types ainsi que leurs fonctions.

I- Fonctions des lubrifiants :

Les fonctions principales d'un lubrifiant sont :

REFROIDIR : (l'évacuation des calories).

La circulation de l'huile évacue les calories, et élimine les risques de fusion et de détérioration. Un moteur, surtout aujourd'hui avec les technologies de pointes ou les difficultés de circulation, peut chauffer anormalement jusqu'à 400°.

Equilibre thermique, refroidissement

L'huile refroidit les parties essentielles du moteur que le liquide de refroidissement du radiateur ne peut pas atteindre, comme l'arbre à cames, les bielles et les pistons. L'huile assure ainsi jusqu'à 35 % de la fonction de refroidissement.

ÉTANCHER : (la protection contre l'entrée d'impuretés)

Contribuer à parfaire l'étanchéité du moteur : (L'huile protège constamment les pièces d'agressions comme les poussières aspirées par le moteur, l'eau et l'acide résultant de la combustion...).

NETTOYER : (l'évacuation des impuretés).

L'huile maintient en suspension et véhicule les imbrûlés issus de la combustion. (C'est à ce niveau qu'elle a de l'importance car il n'a plus d'étanchéité. Le moteur consomme anormalement ... Il arrive même qu'il ait des grippages. C'est le phénomène d'usure par polissage).

LUBRIFIER : (la réduction des frottements et de l'usure)

Diminuer les frottements et les résistances passives dans les machines, améliorer leur rendement et économiser l'énergie. (La viscosité d'une huile moteur devrait rester constante malgré des écarts de température. L'huile ne doit pas figer au froid, elle ne doit pas se liquéfier à la chaleur).

Elles permettent aussi de :

- Protéger les organes lubrifiés contre les diverses formes de **corrosion** et d'usure, donc contribuer à leur longévité ;
- Transmettre de **l'énergie** ou de la chaleur ;
- Assurer **l'isolation** électrique ;
- Améliorer **l'état de surface** des pièces usinées ;
- Augmenter la **durée de vie**

Nb : a chaque type de moteur, correspond une huile spécifique répondant a des normes rigoureuses :

Dans un moteur, il y a des centaines de pièces en mouvement et sans l'huile, le moteur ou tout autre organe (boite de vitesses, cardans, etc...) ne peut pas fonctionner

II- CLASSIFICATION DES LUBRIFIANTS

On peut distinguer les lubrifiants selon leur origine, animale, végétale, minérale ou synthétique, ou selon leur présentation, liquide, pâte ou solide.

II.1. Lubrifiants d'origine animale

Ils sont constitués essentiellement d'esters résultant de la combinaison d'acides gras avec la glycérine. Ce sont souvent des « *ancêtres* » mais certains entrent encore dans diverses compositions :

- **Liquides** : oléines, huiles de lard, de pied de bœuf ou de mouton, etc., très onctueuses, huiles de poisson, de baleine, de phoque, glycérine autrefois utilisée pour son point de congélation très bas.
- **Pâteux** : oléo stéarines, suifs (*qui deviennent très acides par oxydation*), suintines et brais résultant du traitement de la laine, lanoline très utilisée dans les produits antirouille car elle absorbe l'eau ;
- **Solides** : stéarine, dont l'usage est restreint à la formulation de graisses très dures.

II.2. Lubrifiants d'origine végétale

Ce sont en général des combinaisons d'acides gras peu ou pas estérifiés. Certains sont encore largement utilisés en addition dans les huiles de pétrole ou dans les graisses :

- **Liquides** : huiles semi siccatives (*s'épaississant par oxydation*) de coton, de colza, huiles non siccatives d'arachide, d'olive, et surtout de ricin intéressante par sa forte viscosité et la possibilité de l'utiliser dans une large gamme de températures.
- **Pâteux** : huiles de palme, de coco et de coprah, liquides aux températures tropicales mais pâteuses dans les régions froides ;
- **Solides** : résines et colophanes tirées du pin, pouvant résister à l'eau.

II.3. Lubrifiants d'origine minérale

- **Liquides** : huiles de houille (*Charbon utilisé comme combustible*), de schiste (*Roche sédimentaire ou métamorphique qui se débite en feuillets*), utilisables comme produits de remplacement, et surtout huiles de pétrole.
- **Pâteux** : vaseline.
- **Solides** : soufre utilisé autrefois pour sauver les paliers endommagés, talc, mica, bisulfures de molybdène et de tungstène, graphite, sulfure de plomb, oxyde de zinc.

II.4. Lubrifiants d'origine synthétique :

- **Liquides** : silicones, polyglycols, esters phosphoriques, esters aliphatiques, polyoléfines, métaux liquides.
- **Pâteux** : verres, borates et oxyde de bore B_2O_3 (*pâteux à chaud*), graisses silicones.
- **Solides** : polyéthylènes, polytétrafluoroéthylène (*PTFE*), savons (*stéarates de zinc, de calcium, d'aluminium, etc.*), oxyde de plomb (*PbO*), disulfure de tungstène, phtalocyanine, fluorure de graphite, fluorures de calcium, de baryum et de lithium, nitrure de bore.

III- LUBRIFIANTS LIQUIDES

Pour l'essentiel, l'étude ci-dessous porte sur les huiles de graissage au sens général du terme mais il ne faut pas négliger certains liquides spéciaux utilisés comme lubrifiants et surtout les fluides hydrauliques présents dans de très nombreux équipements (*coupleurs hydrauliques, convertisseurs de couple, directions assistées*) ou machines (*engins de chantier, de manutention*).

Ces fluides sont utilisés pour leur aptitude à transmettre de l'énergie mais ils doivent être dotés de propriétés lubrifiantes car ce sont forcément eux, et pas d'autres produits, qui assurent la

lubrification des pistons ou autres organes qui les mettent en mouvement. De plus, les normes imposent souvent qu'ils soient ininflammables, ce qui exclut beaucoup de produits courants à base, par exemple, d'huiles de pétrole.

III.1. Bases minérales

Elles appartiennent aux diverses familles d'hydrocarbures et possèdent des propriétés fort différentes :

- **Paraffiniques** (*molécules à chaîne droite*) : ils sont stables à l'oxydation, peu agressifs pour les élastomères, dotés d'un bon indice de viscosité (*variation de viscosité relativement faible avec la température*), mais certains constituants cristallisent dès la température ordinaire.
- **Isoparaffiniques** (*molécules à chaînes ramifiées*) : ils résistent bien à l'oxydation, sont peu agressifs pour les élastomères, se comportent mieux à froid que les précédents, mais leur indice de viscosité est plus faible.
- **Naphténiques** (*chaînes cycliques saturées*) : ils sont moins stables à l'oxydation, plus agressifs pour les élastomères, mais possèdent de très bonnes caractéristiques d'écoulement aux basses températures malgré un indice de viscosité plus faible.
- **Aromatiques** (*chaînes cycliques non saturées*) : très oxydables, dotés d'un très mauvais indice de viscosité, leur comportement est catastrophique en lubrification et ils sont éliminés dès le raffinage.

Remarque : Les bases paraffiniques sont généralement préférées mais on utilise les naphténiques pour certaines applications particulières : *froid, huiles de coupe ...*

III.2. Obtention des huiles minérales

Elle comporte plusieurs étapes :

1. Distillation des produits pétroliers d'abord à la pression atmosphérique puis sous vide.
2. Désalphaltage et élimination à l'aide de solvants (*butane et propane*) de composés contenant du soufre et de l'oxygène et qui servent ensuite à la fabrication de bitumes.
3. Désaromatization : élimination par un solvant (*furfural*) des hydrocarbures aromatiques, ce qui améliore la stabilité thermique de l'huile et sa viscosité.
4. Déparaffinage : élimination des hydrocarbures paraffiniques lourds qui se solidifient à température ambiante, à l'aide de solvants (*méthyléthylcétone et toluène*) pour abaisser le point de congélation de l'huile.
5. La finition a pour but de stabiliser les huiles qui ont subi plusieurs traitements thermiques au cours du raffinage, notamment des distillations et récupérations de solvants.

IV- COMPOSITION D'UNE HUILE

Une huile ayant les propriétés demandées pour une utilisation donnée est constituée : d'une **huile de base** (*minérale, synthétique ...*) et d'un certain nombre d'**additifs**, ajoutant chacun une propriété particulière.

IV.1. Les huiles de base

IV.1.1. Les huiles minérales

Les huiles minérales proviennent de la distillation du pétrole brut. D'un prix peu élevé, elles présentent des performances « moyennes ».

Le procédé d'obtention de ces huiles n'est pas parfait : les molécules obtenues sont de tailles différentes, ce qui nuit à l'homogénéité de l'huile et limite ses possibilités d'application. Des produits indésirables restent également dans cette huile de base (*paraffines, solvants légers...*).

Les huiles minérales sont, et de très loin, les plus utilisées aussi bien dans les applications automobiles qu'industrielles.

IV.1.2. Les huiles de semi synthèse

Les huiles de semi synthèse s'obtiennent à partir d'un mélange d'huiles minérales et d'huiles de synthèse (*généralement 70 à 80% d'huile minérale et 20 à 30% d'huile de synthèse*).

IV.1.3. Les huiles de synthèse ou synthétiques

Dans le cas de l'huile synthétique, on fabrique la molécule dont on a précisément besoin, si bien que l'on obtient une huile de base dont le comportement est voisin de celui d'un corps pur. En créant un produit dont les propriétés physiques et chimiques sont prédéterminées, on fait mieux que la nature.

On rajoute ensuite les additifs nécessaires pour répondre à un service voulu. Ces huiles ont des performances élevées, en particulier pour des objectifs et des conditions de service difficiles.

Ces huiles elles offrent des performances supérieures :

- 1. indice de viscosité plus élevé.**
- 2. meilleure tenue thermique.**

3. *meilleure résistance à l'oxydation.*

Exemples de familles d'huiles de synthèse	
Polyglycols	- Bonnes propriétés lubrifiantes, haut indice de viscosité : 150 à 200 m ² /s, faible volatilité (vaporisation), bonne stabilité thermique, incompatible avec les huiles minérales. Exemples d'utilisations : - Polyglycol soluble à l'eau : fluide difficilement inflammable, fluide d'usage ... - Polyglycol insoluble : fluide de frein, lubrifiant moteur, lubrifiant engrenage ...
Esters	- Faible volatilité, bonnes propriétés à froid, bonne tenue thermique, bonne propriété solvante et bonne résistance au cisaillement. Exemples d'utilisation : graisse, turbine à gaz, aviation, utilisé comme additif (pouvoir lubrifiant élevé).
Hydrocarbures synthétiques	- Comportement à froid performant, indice de viscosité élevé. Selon la longueur de la chaîne, bonne propriété thermique. Exemples d'utilisations : (polyalphaoléfines) : lubrifiant d'engrenages, compresseur...
Silicone	- Inerte chimiquement, grande résistance à la chaleur et à l'oxydation, hydrophobe (qui n'absorbe pas de l'eau), indice de viscosité élevée, bonne propriété à froid, incompatibilité chimique avec de nombreux additifs. Exemples d'utilisations : graisse, fluide hydraulique ...

IV.2. Les additifs

Un **additif** désigne une substance qui est introduite dans un mélange pour apporter une propriété spécifique.

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-mousse	Le moussage de l'huile peut être dû : 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 (utilisés à raison de 3 à 15 %)	Eviter la formation de dépôts ou de vernis sur les parties les plus chaudes du moteur telles que les gorges des pistons.
Dispersants (utilisés à raison de 3 à 15 %)	- 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
Amélioration d'indice de viscosité. (utilisés à raison de 5 à 10 %)	Permettre à l'huile d'être : 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 : 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
Anti-congelant (jusqu'à 0.5)	- Permettre au lubrifiant de garder une bonne fluidité à basse température (<i>de -15°C à -45°C</i>).
Désaérant	Favorise la séparation des gaz de l'huile.

V- PROPRIETES DES HUILES

V.1. Propriétés physiques

V.1.1. Densité

Elle se mesure à 15 °C par rapport à l'eau à 4 °C, à l'aide d'un densimètre plongeant dans un tube à essais. Les valeurs courantes pour les huiles de pétrole varient de 0,85 à 0,95 et dépendent de l'origine des produits. La densité diminue avec la température selon des lois complexes, mais en première approximation on peut la diminuer de 0,00062 par kelvin. Certains lubrifiants synthétiques ont des densités bien plus élevées, jusqu'à 1,5. La comparaison de la densité d'une huile usagée avec celle de l'huile neuve permet de détecter d'éventuelles pollutions.

V.1.2. Couleur

Pour les huiles de pétrole, elle varie généralement du blanc pur au rouge foncé en passant par le jaune citron et le jaune orange, on l'évalue par comparaison avec des verres étalons numérotés en colorations NPA (*National Petroleum Association*). La couleur foncée d'un lubrifiant usagé peut être un assez bon moyen d'apprécier son altération, de même qu'un aspect laiteux peut indiquer la présence d'eau. La présence d'additifs oblige à la prudence et cette propriété à beaucoup perdu de son intérêt aujourd'hui.

V.1.3. Chaleur massique

Elle s'exprime en *Joules par kilogramme x kelvin (J/kg.K)*. Elle augmente avec la température, d'environ 20 % pour 100 °C, et diminue avec la densité. Aux environs de 100 °C, on peut prendre comme base 2 kJ/kg.K.

V.1.4. Conductivité thermique

Elle définit le flux thermique passant à travers un corps sous l'effet d'un gradient thermique (*en watts par mètre par kelvin*). On peut prendre comme valeur moyenne pour les huiles minérales 0,14 W/m.K.

V.1.5. Viscosité

C'est une des propriétés capitales des huiles de graissage, qui conditionne leur emploi dans la majorité des cas. Plus grande est la viscosité d'un liquide, plus grande est la durée de son écoulement, par exemple. La notion de viscosité implique donc celle de mouvement. En fait, on peut dire que la viscosité est **la résistance qu'oppose un fluide au glissement de ses molécules les unes sur les autres**, autrement dit, sa résistance à la déformation.

Considérons deux surfaces planes parallèles d'aire S , l'une fixe, l'autre se déplaçant à la vitesse V , sous l'effet d'une force F , à la distance constante h de la première. Les deux plaques sont séparées par une lame liquide qui oppose une résistance au déplacement de ses molécules. La relation entre F et S n'est pas autre chose qu'une **contrainte de cisaillement** :

$$\tau = F/S.$$

Viscosité dynamique

La notion de viscosité fait également appel à celle d'écoulement laminaire. Tout se passe comme si le fluide s'écoulait comme le feraient les cartes d'un jeu ou les feuilles d'une ramette de papier. Dans ces conditions, on s'aperçoit que la répartition des vitesses dans la veine fluide suit une loi linéaire. Si deux couches de fluide distantes de la quantité dh ont pour vitesses respectivement v et $(v + dv)$, il existe entre elles un gradient de vitesse dv/dh . Pour les liquides dits newtoniens, la contrainte de cisaillement est proportionnelle au gradient de vitesse, ce qui est le cas de la grande majorité des huiles de graissage, sauf au voisinage de leur point d'écoulement.

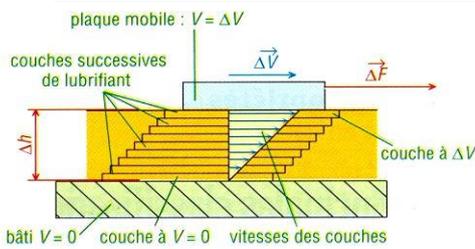
$$F/S = \mu dv/dh$$

μ est, à une température et une pression donnée, une constante que l'on appelle coefficient ou module de viscosité dynamique, ou plus simplement **viscosité dynamique**. Cette grandeur a pour dimension $M.L^{-1}.T^{-1}$.

L'unité de mesure correspondante est le *Pascal x seconde [Pa.s]*, défini comme la viscosité dynamique d'un fluide dans lequel le mouvement rectiligne et uniforme, dans son plan, d'une surface plane, solide, indéfinie, donne lieu à une **force retardatrice de 1 newton par mètre carré** de la surface en contact avec le fluide homogène et isotherme en écoulement permanent. (*Le gradient de la vitesse du fluide, à la surface du solide et par mètre d'écartement normal à ladite surface, est de 1 mètre par seconde*).

Le pascal x seconde s'appelait auparavant poiseuille **[PI]**, du nom du médecin *Jean-Louis-Marie Poiseuille*.

La viscosité dynamique ne tient pas compte de la masse volumique des fluides. Ainsi, de deux fluides de même viscosité dynamique s'écoulant dans les mêmes conditions sous l'effet de leur poids, le plus dense s'écoulera plus rapidement.



$$\tau = \mu \left(\frac{\Delta V}{\Delta h} \right) = \left(\frac{\Delta F}{\Delta S} \right)$$

τ : Contrainte de cisaillement entre couches limites.

ΔS : Aire de contact entre les couches.

ΔV : Accroissement de la vitesse entre couches successives (ou gradient de vitesse).

ΔF : Accroissement de l'effort entre couches successives (ou gradient de force).

Δh : Epaisseur du film lubrifiant.

Viscosité cinématique :

L'unité de mesure de la **viscosité cinématique**, le mètre carré par seconde [m^2/s], est définie comme étant celle d'un fluide dont la viscosité dynamique est 1 pascal \times seconde et la masse volumique 1 kilogramme par mètre cube. Il s'ensuit que la viscosité cinématique est égale au rapport de la viscosité dynamique à la masse volumique, toutes deux définies à la même température :

$$\underline{v = \mu / \rho}$$

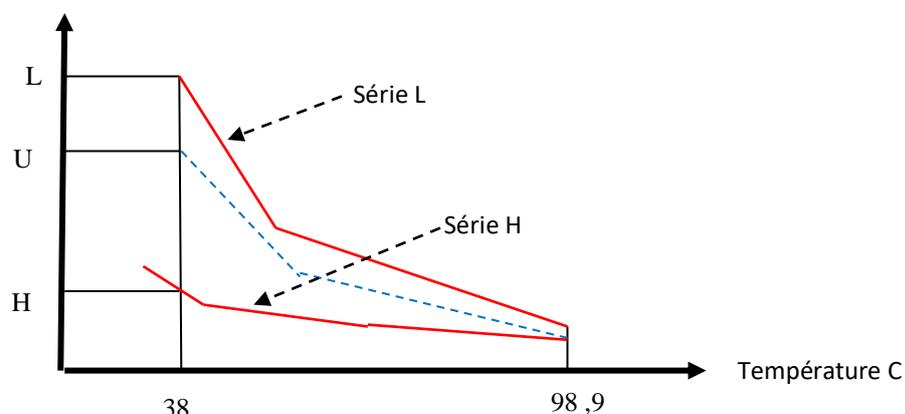
v : viscosité cinématique [m^2/s].
 μ : viscosité dynamique [$Pa.s$].
 ρ : masse volumique [Kg/m^3].

L'unité de mesure **CGS** était le stokes [St] ou [cm^2/s]. On utilisait plus fréquemment le centistokes [cSt] qui n'est autre que le [mm^2/s]. ($1cSt = 10^{-6} m^2/s = 1 mm^2/s$).

V.1.6. Index (ou indice) de viscosité :

L'« *indice de viscosité* » donne une idée de la variation de la viscosité de l'huile avec la température. La notion d'indice de viscosité ($VI = \text{viscosity index}$) a été conçue en 1929 par *Dean et Davis*. Ceux-ci retiennent deux séries extrêmes d'huiles de référence, les unes donnant les plus grandes variations de la viscosité avec la température (**indice 0**), les autres les plus faibles (**indice 100**). L'indice de viscosité d'une huile donnée est obtenu par comparaison avec ces deux séries d'huiles de référence, notées **L** et **H** pour les indices **0** et **100** respectivement. (Figure suivante).

Viscosité [Secondes Saybolt]



Indice de Viscosité

Soit une huile quelconque dont la viscosité varie comme l'indique la courbe tracée en pointillé sur la figure précédente, l'indice de viscosité se calcule par la formule suivante :

$$V1 = 100 \times \frac{L - U}{L - H}$$

Ce procédé permet de situer une huile quelconque par rapport aux deux séries d'huile de référence. Plus l'indice **VI** est grand, plus la courbe est voisine de la série **H** (*caractère paraffinique accentué*), par conséquent moins grande est la variation de la viscosité avec la température.

V.1.7. Compressibilité :

Le module de compressibilité est de l'ordre de 6.10^5 en régime isotherme, par conséquent la diminution de volume est d'environ 2 % à 350 bar et 4 % à 700 bars. Les huiles sont d'autant moins compressibles que la pression est plus forte, la viscosité plus faible et la température plus basse.

V.1.8. Coefficient de viscosité-pressure :

Si la pression croît, la mobilité des molécules diminue et la viscosité augmente selon une loi exponentielle. Pour une huile minérale classique, la viscosité à 350 bars est environ deux fois plus forte qu'à la pression atmosphérique, ce qui équivaut à une baisse de température de 10 à 15 °C.

Le tableau ci-dessous donne une idée des variations relatives de viscosité de l'eau et d'une huile courante à 20 °C :

Viscosité de l'eau et de l'huile

Pression [bar]	Viscosité de l'eau	Viscosité de l'huile
1	1	1
1 000	1,08	4,3
2 000	1,16	15
4 000	1,36	110

Dans le cas de contacts localisés en mouvement sous très fortes charges, comme dans les engrenages, il faut tenir compte d'une part de l'accroissement de la viscosité sous l'effet de la pression, d'autre part de la déformation élastique des pièces dans la zone chargée. Ce calcul, possible grâce à la théorie de la lubrification élastohydrodynamique de *Grubin*, sort du cadre de ce cours.

V.1.9. Point d'écoulement :

Suffisamment refroidies, toutes les huiles minérales s'épaississent jusqu'à prendre l'apparence de solides plus ou moins rigides. Il ne s'agit pas d'une congélation, laquelle n'a de sens que pour un corps pur passant de l'état liquide à l'état solide à température constante : on le sait, les huiles de graissage sont des mélanges.

En fait, les hydrocarbures paraffiniques les plus lourds flocculent les premiers en donnant à l'huile un aspect trouble. La multiplication des cristaux se poursuivant, ces derniers finissent par s'agglomérer en un réseau enfermant les fractions encore liquides.

Une norme précise la procédure complexe qui permet de déterminer la température à laquelle une huile cesse de couler et de se laisser pomper dans un circuit de graissage. Il est difficile d'obtenir une grande précision et la norme admet un écart de reproductibilité de 6 °C. En pratique, la notion de point d'écoulement est très insuffisante pour évaluer les performances d'une huile à froid, il vaut mieux définir et mesurer la viscosité au-delà de laquelle le pompage est impossible. Le viscosimètre Brookfield mesure à cet effet le couple résistant d'une palette tournant dans l'huile.

V.2. Propriétés chimiques

V.2.1. Combustibilité, point d'éclair, point de feu

À partir d'une certaine température, les constituants volatils de l'huile peuvent brûler au contact d'une flamme : **c'est le point éclair**.

Si on chauffe davantage, il arrive un moment où la combustion devient permanente : **c'est le point de feu**.

Ces deux températures sont très variables avec les paramètres locaux et en particulier avec la présence d'eau en suspension dans l'huile. Leur mesure fait l'objet de normes. À partir du point d'éclair Cleveland, il est possible de déduire le point de feu Cleveland avec une assez bonne précision. Quand une huile est portée à son point d'éclair, sa tension de vapeur est de l'ordre de *13 mbar*.

✚ **Point d'éclair (appareil Cleveland)** : Température à laquelle il faut chauffer un liquide combustible pour qu'il émane suffisamment de gaz pour former, avec l'air, un mélange momentanément inflammable pour qu'il prenne feu quand on en approche une petite flamme dans des conditions données (*méthode D 92 de l'ASTM*).

V.2.2. Température d'auto-inflammation :

C'est la température à partir de laquelle se produit une oxydation spontanée dans l'air (*environ 400 °C*). Cette température est nettement supérieure à celle du point d'éclair.

V.2.3. Détergence, dispersivité :

Cela concerne surtout les huiles pour moteurs. Il faut éliminer les résidus de combustion qui se condensent à basse température et les produits de la dégradation de l'huile à haute température. La détergence et la dispersivité constituent en fait un ensemble de propriétés physicochimiques particulièrement difficiles à évaluer.

V.2.4. Teneur en cendres :

On compare le résidu de la calcination de l'huile à la masse initiale. Pour une bonne huile minérale pure, on trouve en général une teneur en cendres variant de *0,001 à 0,05 %*. Cette teneur peut être beaucoup plus élevée, et sa mesure devient alors compliquée, si l'huile contient des additifs organométalliques ou autres.

Une teneur en cendres élevée pose des problèmes dans les moteurs thermiques modernes car les résidus de combustion de l'huile tendent à se déposer dans les filtres à particules.

V.2.5. Teneur en soufre :

Il n'y a normalement plus de soufre libre dans les lubrifiants après le raffinage, mais on en trouve souvent à l'état combiné dans des composés tels les mercaptans. On ajoute parfois du « *soufre actif* » sous forme d'additifs améliorant les propriétés anti-soudure ou anti-grippage. Si l'huile se décompose, et selon que l'on se trouve en milieu réducteur ou oxydant, on peut assister à un dégagement toujours malvenu de sulfure d'hydrogène ou de dioxyde de soufre.

V.2.6. Teneur en eau :

L'eau est l'un des principaux ennemis des lubrifiants. Dans les environnements humides, lorsqu'un lubrifiant reçoit de l'eau directement ou par condensation de vapeur, ses performances sont en général fortement diminuées. La sensibilité à l'eau est très variable selon le produit utilisé, relativement faible pour les glycols, beaucoup plus élevée pour les oléfines. Une teneur en eau trop élevée est un sérieux signal d'alerte avant une prochaine défaillance du mécanisme concerné.

V.2.7. Capacité de rétention d'impuretés et résistance à l'oxydation

Beaucoup de lubrifiants modernes ont la double réputation : de produire facilement des boues ou des vernis et de posséder en même temps une haute résistance à l'oxydation. Pour comprendre ce paradoxe, on a introduit la notion d'*Impurity-holding Capacity (IHC)*, que l'on peut traduire par capacité de rétention d'impuretés. Cette propriété fait référence au fait que de très petites particules, de dimension inférieure au μm , provenant de la dégradation des produits ou de la mise en émulsion d'autres liquides, peuvent rester jusqu'à un certain point (*dumping point*) en suspension dans le liquide, comme si elles étaient dissoutes. Au-delà de ce point, donc si leur concentration est trop forte, tout ce passe comme si elles devenaient insolubles et elles précipitent alors pour former des boues et des vernis. En fait cette précipitation sous forme de dépôts ne concerne que la quantité d'impuretés qui va au-delà de ce que peut supporter le lubrifiant. Elle peut se produire lorsque la capacité de rétention du lubrifiant est faible ou affaiblie, par exemple par le froid, ou encore si la production d'impuretés est trop importante.

Il se trouve que la capacité de rétention d'impuretés baisse en général lorsque la résistance à l'oxydation augmente, et inversement. Ces deux qualités sont donc fondamentalement incompatibles. Par ailleurs, la formation de vernis est souvent due à des décharges électrostatiques qui se produisent au sein même du fluide, surtout lorsque celui-ci est très propre et très sec, parce qu'il a justement une très basse capacité à retenir les impuretés.

La quantité totale d'impuretés dans un lubrifiant comprend celles qui sont en solution et celles qui sont déposées. Il faut généralement y inclure une partie des additifs, que l'on ne regarde pas habituellement comme des impuretés, mais qui altèrent malgré tout la pureté de l'huile de base. Eux aussi sont maintenus en solution dans l'huile, au même titre que de l'eau ou des produits de dégradation, par exemple. Ils interviennent donc dans le bilan global des produits dissous.

✚ Pour l'eau, une comparaison peut être faite avec le taux d'humidité relative qui exprime la quantité d'eau présente dans une atmosphère en pourcentage de la quantité maximale que cette atmosphère peut contenir avant que la condensation se produise. Les huiles peuvent dissoudre une certaine quantité d'eau, mais celle-ci est d'autant plus grande que la température est plus élevée, comme dans le cas des gaz.

✚ On peut quantifier par des méthodes gravimétriques la capacité de rétention d'impuretés. Elle peut s'exprimer en particules par million [ppm], en [mg/kg] ou encore en [mg/litre] de produit. Comme pour la viscosité, il faut opérer dans des conditions standardisées de température, par exemple 20 ou 40 °C. Il est même possible de déterminer un indice de variation, analogue à l'indice de viscosité des huiles, montrant comment la capacité de rétention varie en fonction de la température.

✚ D'une part, les additifs consomment en quelque sorte une partie de la tolérance des lubrifiants aux impuretés, mais d'autre part certains d'entre eux, comme les dispersants, augmentent cette tolérance. Par ailleurs, certains additifs sont consommés pendant le service et restituent donc au fur et à mesure une partie de la « place » qu'ils occupaient.

✚ Comme on le voit, le problème n'est pas simple. Il manque actuellement des tests standardisés qui permettraient d'obtenir des valeurs fiables et permettant les comparaisons. La capacité de rétention d'impuretés est pourtant très importante en pratique car elle conditionne la présence ou l'absence de dépôts et de vernis, surtout lorsque le lubrifiant est susceptible d'être porté à des températures très basses, auquel cas elle joue le rôle d'une véritable bouée de sauvetage.

Propriété	A base de paraffine	A base de naphène	Aromatique
Densité	faible	moyen	élevé
Tenue viscosité-température	bon	moyen	médiocre
Comportement au froid	médiocre	très bon	bon
Comportement à l'évaporation	bon	moyen	médiocre
Point d'inflammation	élevé	moyen	faible
Tendance à la cokéfaction	moyen	faible	élevé
Stabilité à l'oxydation	bon	moyen	médiocre
Stabilité thermique	moyen	bon	très bon
Compatibilité avec les élastomères	bon	bon	médiocre
Toxicité	faible	moyen	médiocre
Solubilité dans additif	moyen	bon	bon

Tableau 5 : propriétés des produits raffinés classiques à base d'huile minérale en fonction de la structure de molécule.

VI- LES GRAISSES

VI.1. Définition :

Une graisse est une huile à laquelle on a ajouté un épaississant (*savons*) dans une proportion de 10 à 20 % pour lui donner une consistance pâteuse de semi-liquide à solide. Le tableau (Fig16) donne une liste de quelques épaississants avec leurs propriétés lorsqu'ils sont incorporés à une huile pour former une graisse. Parmi ceux-ci, le plus utilisé est le savon de lithium simple ou complexe dans une proportion de plus de 60 %, suivi du savon d'aluminium.

Tableau 3.6 – Les graisses, leurs savons et leurs propriétés

Propriété	Graisse à savon simple				Graisse à savon complexe			Polyuré ^a	Bentonite
	Al	So	Ca	Li	Al	Ca	Li		
Point de goutte, °C	110	170	100	200	260+			245	260+
Temp. max en opération, °C	80	120	95	135	180				
Résistance à l'eau	Bon-Ex	Mé-Moy	Bon-Ex	Bon	Bon-Ex	Moy-Ex	Bon-Ex	Bon-Ex	Moy-Ex
Stabilité au cisaillement	Mé	Moy	Moy-Bon	Bon-Ex	Bon-Ex	Moy-Bon	Bon-Ex	Mé-Bon	Moy-Ex
Stabilité à l'oxydation	Ex	Mé-Bon	Mé-Ex	Moy-Ex	Moy-Ex	Mé-Bon	Moy-Ex	Bon-Ex	Bon
Protection contre la rouille	Bon-Ex	Bon-Ex	Mé-Ex	Mé-Ex	Bon-Ex	Moy-Ex	Moy-Ex	Moy-Ex	Mé-E
Application (système de pompage central)	Mé	Mé-Moy	Bon-Ex	Moy-Ex	Moy-Ex	Mé-Moy	Bon-Ex	Bon-Ex	Bon
Rétention de l'huile	Bon	Moy-Bon	Mé-Bon	Bon-Ex	Bon-Ex	Bon-Ex	Bon-Ex	Bon-Ex	Bon-Ex
Apparence	Mou-Clair	Mou-Fibreux	Mou-Crémeux						

- Al = Aluminium; So = Sodium; Ca = Calcium; Li = Lithium; Polyuréa = un thermoplastique; Bentonite = grains de silice ou de glaise
- Échelle d'évaluation : Mé = Médiocre; Moy = Moyen; Bon ; Ex = Excellent

VI.2. Fonction :

Les fonctions des graisses se résument comme suit :

- Pendant une grande période de temps, garder l'huile entre les surfaces à lubrifier dans la gamme de température de l'application.
- Empêcher les agents extérieurs tels que l'eau et la poussière de pénétrer entre les surfaces à lubrifier.
- Adhérer aux surfaces et aux pièces à lubrifier et à protéger.
- Demeurer stable même après avoir absorbé une certaine quantité d'agents contaminants.

VI.2. Propriétés des graisses :

VI.2.1. Consistance :

C'est la propriété principale. Elle exprime la résistance à la déformation de la graisse. Etroitement liée à l'adhérence et à l'onctuosité, elle diminue lorsque la température augmente.

Selon le test *ASTM D 217 (1996)*, la consistance des graisses est divisée en neuf classes de **000** à **6** par la *National Lubricating Grease Association (NLGI)*. Le tableau (Fig17) résume les neuf classes considérées selon leurs applications génériques.

VI.2.2. Point de goutte :

Il caractérise la tenue de la graisse à la chaleur en précisant la température de début de liquéfaction.

VI.2.3. Point de solidification :

Il indique la température de début de solidification de la graisse.

VI.2.4. Autres propriétés :

Résistance au cisaillement, qualité extrême pression, acidité...

VI.2.5. Remarque :

- L'épaississant que l'on ajoute à l'huile sous la forme d'un savon, d'une chaîne polymère, de gains de silice microscopiques ou de glaise traitée en surface pour avoir une affinité particulière avec l'huile de base, retiennent l'huile par un mécanisme d'attraction ionique à 20 % et par capillarité à 80 %. Avec le temps, il est normal qu'au repos une partie de l'huile se sépare de la graisse par effet capillaire.
- Ce phénomène a conduit à introduire la notion de capacité de rétention d'une huile. Quand la température augmente, la viscosité de l'huile diminue et la rétention par capillarité devient moins bonne. Le mécanisme de rétention par attraction ionique perd aussi de son efficacité à cause de l'agitation accrue des molécules.
- La température, au-delà de laquelle un épaississant particulier ne peut plus retenir l'huile, se nomme le *point de goutte* d'une huile (*ASTM D 566*).

Grade NLGI	000	00	0	1	2	3	4	5	6
consistance	très fluide	fluide	semi-fluide	très molle	molle	moyenne	dure	très dure	extra dure
enfonce- ment cône pesant (en 0,1 mm)	445 à 475	400 à 440	355 à 385	310 à 340	265 à 295	220 à 250	175 à 205	130 à 160	85 à 115
utilisation	—	A	A-B	B-C	B-C-D-E	E	—	—	—

Classes NLGI des graisses selon la norme ASTM D 217

VI.3. Application usuelles des graisses :

Propriétés des graisses usuelles (bases : huiles minérales)									
type de la graisse	nature du savon	aspect (point de goutte)	température d'utilisation	résistance					observations
				chaleur	eau	charges	vitesses	adhésivité	
au lithium**	lithium (Li)	butyreux (*) lisse (170/190°)	- 30 à 130 °C	*****	*****	*****	*****	***	Les plus utilisées, tous usages, multiservices. Allie les propriétés des autres graisses
calcique (à la chaux)	calcium (Ca)	butyreux (*) lisse (« rose ») (80/90°)	- 20 à 70 °C	*	*****	***	***	*	Insolubles dans l'eau prix faible, graissages courants peu sévères. Apte à l'étanchéité
sodique (à la soude)	sodium (Na)	fibreuse (150/180°)	- 20 à 130 °C	*****	*	*****	*****	*****	pour roulements, sensible à l'eau, supporte vibrations et chaleur
à l'aluminium	à l'aluminium (Al)	butyreux (*) lisse (70/100°)	- 10 à 80 °C	*	*****	*	*	*****	faible résistance mécanique. Assez adhésives (chaînes...)

(*) butyreux : qui à l'apparence ou les caractères du beurre ; ** variantes avec huiles de synthèse (- 50 à 160 °C).

Propriétés des graisses usuelles (bases :huile minérale)