

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : D'HYDRAULIQUE

N° :



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : HYDRAULIQUE

OPTION : MAINTENANCE DES
INSTALLATION HYDRAULIQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master 2 Académique**

Par:

BAHACHE Mohammed El Amine

BOUKHAROUBA Youcef

Intitulé

**Effet Du Milieu Ambiant Sur La Qualité De
Lubrification Et Proposition De Methodes De
Prévention**

Soutenu devant le jury composé de:

MEZALI Farouk

Université - M'sila

Président

BOUABDALLAH Khaidre

Université - M'sila

Rapporteur

MANARI Abd ALmalek

Université - M'sila

Examineur

Année universitaire : 2016 /2017

Remerciements

Nous remercions en premier lieu Dieu le tout puissant de nous avoir accordé la volonté et le courage pour réaliser notre mémoire.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur PR Bouabdallah khaidre de l'université de M'sila de nous avoir encadré durant notre projet de fin d'étude et nous conseillé tout au long de notre travail.

Nous remercions également les membres du jury, qui ont eu l'amabilité d'examiner notre projet et d'évaluer son contenu.

Nous remercions aussi le chef de département de Hydraulique ainsi que tous les enseignants pour les connaissances qu'ils nous ont transmises.

Merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce modeste travail.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail :

A ma très chère mère, pour ses sacrifices depuis qu'elle m'a mis au monde, et qui n'a pas cessé de m'encourager, de me soutenir dans les moments difficiles et qui a su m'entourer de toute son affection et son amour pour que je puisse réussir.

A mon père, qui m'a toujours soutenu et aidé à affronter les difficultés

A ma sœur houda Et son mari ismail

Et ses deux fils haydar et kinan

A ma sœur wafa son mari sofian et sa fille dym

À mon frère SAMI et son Et sa femme et ses deux filles aicha et yassmin

À mon frère et mon ami et la prunelle de mes yeux et un compagnon de vie ANWAR Et lui souhaite plus de succès

A mon binôme boukharouba youcef

A nos collègues : salah,bilal.abdrahime,toufik,kamel,abd alkadar,zakaria,lahcen

A tous mes amis en particulier :

walid,borhan,said,issam,khalil,mohammed,chamso,hamid,ala,oussama,taki ,yassine,abd almalak et "imane",

AMINE

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail :

A ma très chère mère, pour ses sacrifices depuis qu'elle m'a mis au monde, et qui n'a pas cessé de m'encourager, de me soutenir dans les moments difficiles et qui a su m'entourer de toute son affection et son amour pour que je puisse réussir.

A mon père, qui m'a toujours soutenu et aidé à affronter les difficultés

A mes sœurs hadjira, amel, hanan, imen, halima, ghaniya, louiza et assia

À mon frère hassan

A mon binôme Bahache Mohammed El Amine

*A nos collègues : salah, bilal, abdrahime, toufik, kamel, abd
alkadar, zakaria, lahcen*

A tous mes amis en particulier : hadjer, abed alfatah, yahia.....

youcef

III.1.1 Huiles à bases minérales.....	20
III.1.2 Huiles à bases synthétiques	22
III.1.3 Les additifs des huiles	23
III.2 Les lubrifiants pâteux (ou graisses)	24
III.3 Les lubrifiants solides	25
III.3.1 Bisulfure de molybdène MoS ₂	26
III.3.2 Graphite	26
III.3.3 PTFE (Téflon)	26
IV- PROPRIETES DES HUILES	27
IV.1 Propriétés physiques	27
IV.1.1 Densité	27
IV.1.2 Couleur	27
IV.1.3 Chaleur massique	27
IV.1.4 Conductivité thermique	28
IV.1.5 Viscosité	28
IV.1.6 Index (ou indice) de viscosité VI.....	29
IV.1.7 Onctuosité	30
IV.1.8 Point d'écoulement	30
IV.2 Propriétés chimiques	31
IV.2.1 Combustibilité, point d'éclair, point de feu	31
IV.2.2 Température d'auto-inflammation	31
IV.2.3 Détergence, dispersivité	31
IV.2.4 Teneur en cendres	32
IV.2.5 Teneur en soufre	32
IV.2.6 Teneur en eau	32
IV.2.7 Capacité de rétention d'impuretés et résistance à l'oxydation	32
V- Classification des huiles de graissage	33
V.1 Classification selon la viscosité	33

V.1.1 Grade ISO	33
V.1.2 Grade SAE	34
V.2 Classification des huiles selon le service	36
VI- Dispositifs de graissage	36
VI.1 Graissage au goutte-à-goutte	36
VI.2 GRAISSAGE PAR capillarité	36
VI.3 Graissage par barbotage	36
VI.4 Graissage sous pression	36
VI.5 Graissage par jet d'huile	37
VII- Conclusion	38
ChapiterIII : Effets du milieu extérieu	
I- INTRODUCTION	39
II- POLLUTION DES LUBRIFIANTS PAR L'EAU	39
II.1 Origine de la pollution aqueuse	40
II.2 Formes de présence de l'eau dans l'huile.....	41
II.2.1 Eau dissoute	41
II.2.2 Eau en émulsion	41
II.3 Effets de la pollution aqueuse sur les mécanismes	42
II.3.1 Effets à court terme	43
II.3.2 Effets à long-terme	43
II.3.3 Variation des caractéristiques du lubrifiant sous l'effet de la pollutionaqueuse	45
III- POLLUTION SOLIDE DESLUBRIFIANTS	45
III.1 ORIGINE ET NATURE DE LA POLLUTION	46
III.2 Formes et dimensions des particules polluantes.....	47
III.3 Effets de la pollution solide sur les mécanismes	49
IV- Effet de la température ambiante sur la qualité de graissage	51
V- Conclusion	52

Chapitre IV :

Moyens de prévention

I- Introduction	53
II- Au niveau de la conception	53
II.1 Fonction étanchéité	53
II.1.1 Joints statiques	54
II.1.2 Joints dynamiques avec contact	55
II.1.3 Joints dynamiques sans contact.....	56
II.2 Fonction filtration	57
II.2.1 Le filtre à huile	57
II.2.2 Caractéristiques principales d'un filtre :	58
II.3 Systèmes de refroidissement des huiles de graissage	59
III- Au niveau de la maintenance.....	60
III.1 Origines de l'échauffement des systèmes mécaniques	60
III.2 Analyse de cas (échauffement d'un réducteur à engrenages) :	61
IV- Au niveau du control de qualite	62
IV.1 Les examens physico-chimiques	63
IV.1.1 Contrôle de la viscosité	63
IV.1.2 La teneur en eau.....	64
IV.1.3 L'acidité et de la basicité.....	64
IV.2 Le comptage de particules	64
IV.3 Les examens spectrométriques.....	66
IV.4 La ferrographie	66
IV.4.1 Ferrographie à lecture directe ISU (Indice de Sévérité d'Usure) :	67
IV.4.2 Ferrographie analytique :	67
IV.5 Fréquence d'analyse	68
V- Au niveau du stockage des produits lubrifiants.....	68
VI- Conclusion.....	69
CONCLUSION GENERALE	70

Listes Des figures

Figure 1.1 : Vue microscopique de l'interface lorsque les deux surfaces sont en contact direct.....	1
Figure 1-2 : Force de frottement.....	6
Figure : 1-3 : Adhérence et glissement.....	6
Figure 1-4 : Vues microscopiques des différents cas de contact des surfaces de glissement.....	7
Figure 1-5 : Etapes de formation du film d'huile dans le tourillon dans le cas d'un frottement Hydrodynamique.....	7
Figure 1-6 : Répartition de la pression dans le film d'huile dans un tourillon en rotation.....	8
Figure 1-7:Schéma du contact entre l'élément roulant et la surface de roulement.....	9
Figure 1-8 : Mécanismes d'usure par l'abrasion,.....	12
Figure 1-9 : Conséquence de l'usure par abrasion.....	13
Figure 1-10 : Formation et propagation d'une piqûre de fatigue en roulement et glissement combiné (DR : direction du roulement).....	13
Figure 1-11 : Usure par fatigue d'une bague extérieure d'un roulement à rouleaux cylindriques.....	14
1-12 : Mécanisme d'usure adhésive dite « sévère » : le cisaillement se produit dans le matériau le plus tendre (B) ce qui implique un important transfert adhésif et usure sévère....	14
Figure 1-13 : Usure adhésive d'engrenage.....	15
Figure 2-1 : Molécule paraffinique.....	20
Figure 2-2 : Molécule isoparaffinique.....	20
Figure 2-3 : Molécule naphthalique.....	20
Figure 2-4 : Schéma de glissement des couches d'un fluide visqueux.....	27
Figure 2-5 : Relation viscosité-température et indice de viscosité.....	29
Figure 2-6 : Diagramme température/viscosité.....	33
Figure2-7 : Comparaison entre l'huile monograde et l'huile multigrade.....	34
Figure2-8 : exemple de circuit de graissage d'un moteur thermique.....	36
Figure 3-1 : Effet de la pollution aqueuse sur la durée de vie des roulements.....	38
Figure 3-2 : Evolution de l'absorption de la vapeur d'eau par l'huile.....	39
Figure 3-3: Pollution d'une huile neuve.....	45
Figure 3-4 : Schématisation des différentes sources de pollution solide.....	46
Figure 3-5 : Ordre de grandeur des particules solides par rapport au film lubrifiant et au cheveu humain.....	47

Figure 3-6 : Etat de surface d'une denture d'engrenage avant et après fonctionnement avec un graissage à l'huile polluée par de la poussière de sable.....	48
Figure 3-7 : Déformation ou fragmentation de particules pour diverses natures de particules.....	49
Figure 3-8 : Intrusion de particules solides dans un circuit hydraulique.....	49
Figure 4-1 : classification des joints statiques.....	53
Figure 4-2 : classification des joints dynamiques avec contact.....	55
Figure 4-3 : classification des joints dynamiques sans contact.....	56
Figure 4-4 : Schéma du filtre à huile.....	57
Figure 4-5 : Circuit de refroidissement pour moteur thermique.....	59
Figure 4-6 : Réducteur à engrenage.....	60
Figure 4-7 : viscosimètre capillaire.....	62
Figure 4-8 : Courbe en baignoire.....	64

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Coefficients de frottement statique et cinétique.....	10
Tableau 1-2 :Coefficients de résistance au roulement.....	11
Tableau 1-3 : Coefficient de frottement constant μ pour roulements ouverts	11
Tableau 2-1 : principaux lubrifiants d'après leur nature.....	19
Tableau 2-2: Exemples de familles d'huiles de synthèse.....	21
Tableau 2-3 : Les graisses, leurs savons et leurs propriétés.....	24
Tableau 2-4 : Classification SAE des huiles pour moteur (décembre 99)	34
Tableau 2-5 : Différents modes de graissage dans un moteur thermique.....	36
Tableau 3-1 : Effets de 7% d'eau sur les caractéristiques de l'huile.....	44
Tableau 3-2 : Pollutions présentes dans les turbines aéronautiques.....	46
Tableau 3-3 : Forme des particules solides rencontrées dans les lubrifiants pollués par des substances solides.....	47
Tableau 3-4 : Types d'usure d'après la forme de particule solide.....	50
Tableau 4-1 : teneur maximale en eau des huiles selon le domaine d'application	63
Tableau 4-2 : classe de pollution d'après NAS 1638.....	64
Tableau 4-3 : niveau de pollution suggérés par différentes applications.....	65
Tableau 4-4 : fréquences d'analyse d'huile de graissage pour différentes applications.....	67

INTRODUCTION GENERALE

Depuis que l'homme a inventé les moyens qui lui permettent d'accomplir des tâches pénibles telles que le transport d'objets lourds, il n'a cessé de leur apporter améliorations et efficacité. C'est ainsi qu'il découvrit que l'application d'une couche de graisse animale sur les axes des charriots pouvait réduire considérablement l'effort qu'il doit fournir pour le trainer et éviter sa destruction rapide.

Avec l'avènement de l'ère industrielle, la nécessité de réduire les résistances passives au mouvement et atténuer l'effet de l'usure des organes de machines est devenue de plus en plus pertinente. Les pertes d'énergie dues à la résistance passive au mouvement dans les machines sont généralement dissipées sous forme de chaleur, pratiquement irrécupérables, réduisant ainsi le rendement des machines sous oublier les conséquences destructeurs sur les organes de ces machines. En même temps, l'usure prématurée des organes de machines causée par le frottement implique des remplacements coûteux et des arrêts de production préjudiciables au bon fonctionnement de l'entreprise.

Parmi les moyens adoptés pour lutter contre les effets néfastes du frottement, l'industrie a développé des techniques de lubrification basées sur une connaissance plus affinée du phénomène grâce aux progrès incontestables acquis dans le domaine de la science de la rhéologie et ses applications ainsi que dans le domaine de la chimie et de la pétrochimie. Les investigations dans le domaine du contact des surfaces et leur morphologie a permis de mettre en évidence l'aspect complexe du phénomène de frottement et les mécanismes d'usure et de dégradation des surfaces en contact. Les produits lubrifiants, quant à eux, ont connu un essor considérable grâce aux améliorations apportées par les adjuvants qui permettent d'améliorer les performances en matière d'efficacité et de durée.

Ces qualités sont, cependant, compromises par l'introduction indésirable de corps étrangers dans le fluide lubrifiant. Ces corps peuvent être de différentes natures et se présenter sous forme liquide, solide ou même à l'état gazeux.

La présente étude a pour objet la contamination des fluides lubrifiants utilisés pour le graissage des mécanismes et les moyens de prévention qu'il faut adopter pour en réduire les effets nocifs.

A cet effet, le mémoire a été subdivisé en quatre chapitres dont le premier sera consacré à l'étude du phénomène de frottement et ses effets néfastes sur les organes et mécanismes qui en sont le siège. Le deuxième chapitre portera sur la lubrification et les produits lubrifiants tout en insistant sur les différentes qualités et les additifs qui en améliorent les performances. Le troisième chapitre examinera les différents polluants qui peuvent affecter un produit lubrifiant. Ces polluants seront classés selon leur

Introduction générale

origine, leur morphologie ainsi que les effets qu'ils peuvent occasionner. Enfin, en quatrième chapitre, on proposera les moyens susceptibles de réduire l'effet néfaste de la présence de ces polluants et ce aux différents stades allant de la conception jusqu'à la maintenance sans oublier l'analyse et les conditions de stockage des produits lubrifiants.

I- INTRODUCTION

Dans une machine, le guidage assure la liaison entre des éléments en mouvement relatifs l'un par rapport à l'autre. Ce mouvement peut être une translation ou une rotation. A cet effet, les organes en mouvement doivent être dimensionnés de façon à permettre un jeu entre les surfaces en contact. Cependant, et afin de réduire les résistances passives au mouvement, les parties en contact doivent être soigneusement usinées et lubrifiées. Les résistances passives sont dues au phénomène de frottement qui, en plus des pertes mécaniques, engendrent des effets nuisibles sur les surfaces en contact, sur la qualité du produit et même sur l'environnement du travail.

Dans ce chapitre, on présente un aperçu général sur le phénomène de frottement et de ces effets sur les surfaces qui le subissent et sur la machine et l'environnement de travail en général.

II- TYPES DE FROTTEMENTS :

Par définition, le frottement est l'action de deux corps en contact et en mouvement l'un par rapport à l'autre.

Le frottement est l'objet de la partie des sciences mécaniques que l'on désigne par mot « tribologie ». Cette science qui étudie les phénomènes susceptibles de se produire lorsque deux corps en contact sont animés de mouvements relatifs, comprend l'étude du contact de corps solides compte tenu des frottements, des déformations et de l'usure des composants. La tribologie est donc la science et la technologie du frottement, de l'usure et de la lubrification.

Dans le contact de corps solides réels, sollicités par des efforts engendrés par le poids ou des forces extérieures, les actions réciproques des surfaces en contact engendrent des pressions normales et des cisaillements.

Ces actions peuvent se décomposer en poussées, résultantes de l'effet des pressions et de forces tangentielles, provenant des cisaillements, appelées forces de frottement. D'après [1], on distingue les cas de contact suivants :

a) 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.

b) 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.

c) 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.

d) 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.

II.1 Frottement de glissement

La résistance au glissement désigne les phénomènes s'opposant au mouvement relatif de deux pièces en contact. Il s'agit de l'application des notions d'adhérence et de frottement au génie mécanique. La résistance au pivotement désigne le cas particulier d'un mouvement relatif de rotation avec glissement. La notion de mouvement relatif est importante : il ne s'agit pas de phénomène s'opposant au mouvement d'un objet dans le référentiel lié au sol, mais bien au mouvement d'une pièce par rapport à une autre[1].

Selon que les surfaces de glissement soient directement en contact l'une par rapport à l'autre ou qu'elles soient séparées par une couche ou un coin de fluide intermédiaire, on distingue :

- Le frottement sec
- Le frottement visqueux
- Le frottement hydrodynamique

II.1.1 Frottement sec :

Pour commencer, rappelons que ce frottement n'apparaît que lorsque deux surfaces matériellement distinctes sont en contact et ont tendance à glisser l'une contre l'autre. Plusieurs effets interviennent au cours de ce phénomène :

a) La cause la plus intuitive du frottement réside dans le fait que les surfaces de contact ne sont pas parfaites, elles présentent toujours une certaine rugosité qui est caractérisée par des crêtes et des creux de hauteur et de géométrie variable (figure 1-1). Ainsi lorsque les surfaces sont mises en mouvement l'une par rapport à l'autre, les crêtes de l'une viennent se placer dans les creux de l'autre ce qui ralentit le mouvement[2].

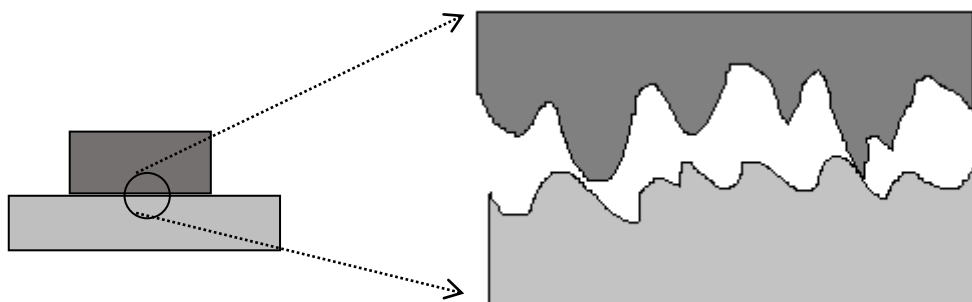


Figure 1.1 : Vue microscopique de l'interface lorsque les deux surfaces sont en contact direct

b) Sous l'action de la pression engendrée par le poids des éléments ou des efforts externes, les corps en contact se déforment légèrement, ainsi les crêtes de l'un viennent s'engrainer plus profondément dans les creux de l'autre

c) Le troisième effet et qu'au niveau des points de contact, les atomes des matériaux d'une des surfaces se trouvent dans le voisinage très proche des atomes de l'autre surface. Il apparaît donc une attraction atomique entre les deux surfaces au niveau des points de contact.

On peut ainsi dans cette optique :

- Utiliser un matériau possédant une surface très lisse avec de toute petites crêtes et creux en combinaison avec un matériau dont la surface est plutôt rugueuse avec de grosses crêtes et des creux profonds et larges.
- Utiliser des matériaux durs moins déformables de manière à éviter que le frottement augmente sous l'effet combiné de la force normale et la déformation locale du matériau.

De toutes ces considérations, Coulomb a déduit et vérifié les lois empiriques qui portent son nom. Les expériences réalisées par Coulomb ont visé à mesurer la force de frottement en fonction de la force horizontale appliquée à un solide posé sur un plan horizontal et soumis à la pesanteur verticale (voir figure 1-2).

Coulomb a établi que la force de frottement statique maximum ($T_{a(lim)}$) était proportionnelle à la force normale (N) (le poids dans ses expériences) selon un coefficient de proportionnalité (μ_s) dépendant du couple de matériaux utilisé et qui appelé coefficient de frottement statique[2] :

$$T_{a(lim)} \leq \mu_s N \quad (1-1)$$

Le cas de l'égalité ($T_{a(lim)} = \mu_s N$) est obtenu lorsqu'on se trouve à la limite entre l'adhérence et le glissement limite (équilibre strict).

Dès que l'objet se met en mouvement (glissement avec frottement), on a alors

$$T = \mu N. \quad (1-2)$$

Le coefficient (μ) est appelé coefficient de frottement dynamique. Sa valeur est légèrement inférieure à (μ_s) (figure 1-3).

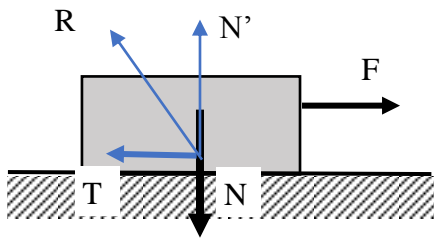


Figure 1-2 : Force de frottement

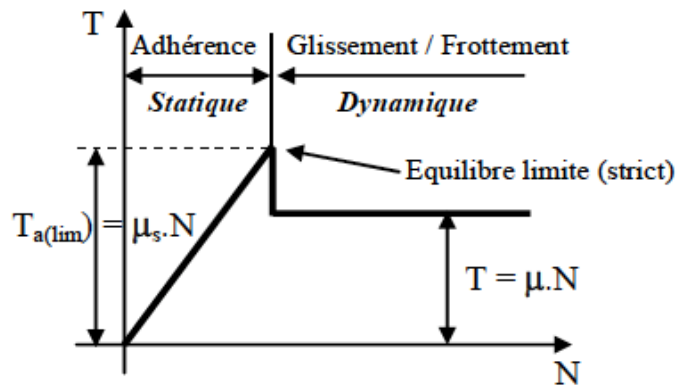


Figure : 1-3 : Adhérence et glissement.

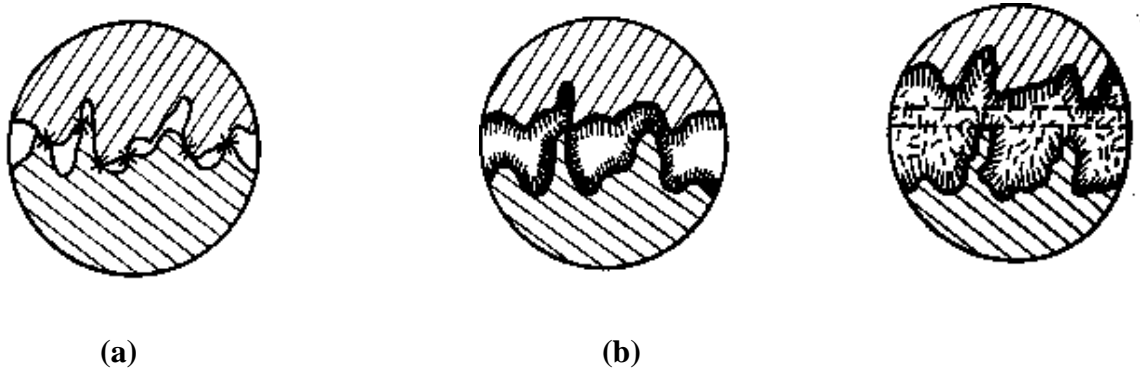
II.1.2 Frottement visqueux :

Dans ce cas, les surfaces en contact des deux corps sont enduites d'une substance lubrifiante, 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[3].

II.1.3 Le frottement hydrodynamique :

Dans le cas du frottement hydrodynamique, il n'y a plus aucun contact entre les surfaces, celles-ci sont toujours séparées par une couche de lubrifiant d'épaisseur $e = 0,02$ à $0,008$ mm (ou ≈ 100 fois supérieure à la hauteur des aspérités des surfaces). Le mouvement, à condition que la vitesse soit suffisante et la viscosité adaptée, crée une portance hydrodynamique comparable à celle du ski nautique. Le frottement est très réduit ($f = 0,002$ à $0,01$) et l'usure pratiquement nulle.

La figure 1-4 représente schématiquement les différents cas de contact des surfaces de glissement[4].



(c)

Figure 1-4 : Vues microscopiques des différents cas de contact des surfaces de glissement.

a- frottement sec

b- frottement gras

c- frottement hydrodynamique

A noter que le frottement hydrodynamique se rencontre particulièrement dans le cas de liaison des tourillons d'arbre avec leurs paliers. La couche visqueuse peut être maintenue dans le jeu entre les surfaces sollicitées par deux moyens :

- Amenée d'huile dans le jeu sous une pression susceptible d'équilibrer la charge extérieure, ce qui nécessite l'utilisation d'une pompe assez puissante et des conduites à haute résistance.
- Création des conditions telles que la vitesse de rotation de l'arbre engendre la création d'un coin d'huile dans le jeu entre le tourillon et le palier ce qui provoque le soulèvement de l'arbre, empêchant ainsi tout contact directe entre les deux surfaces. La figure 1-5 montre les étapes de formation du film d'huile dans le tourillon. Au repos, l'épaisseur de la couche d'huile est minimale au point C, tandis qu'au moment du démarrage ce point se déplace en D, enfin, en marche normale, le coin d'huile se forme et l'épaisseur minimale se trouve au point F. La pression hydrodynamique dans le jeu varie de $p=0$ au niveau des extrémités du tourillon en passant par la valeur $p = p_{\max}$ (voir figure 1-6)

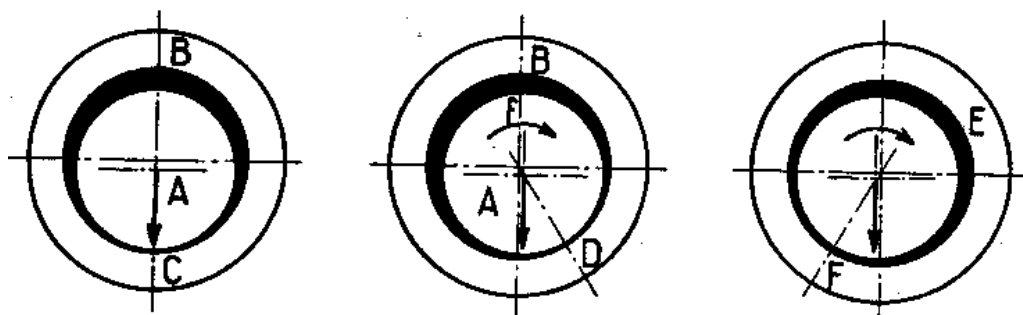


Figure 1-5 : Etapes de formation du film d'huile dans le tourillon dans le cas d'un frottement hydrodynamique.

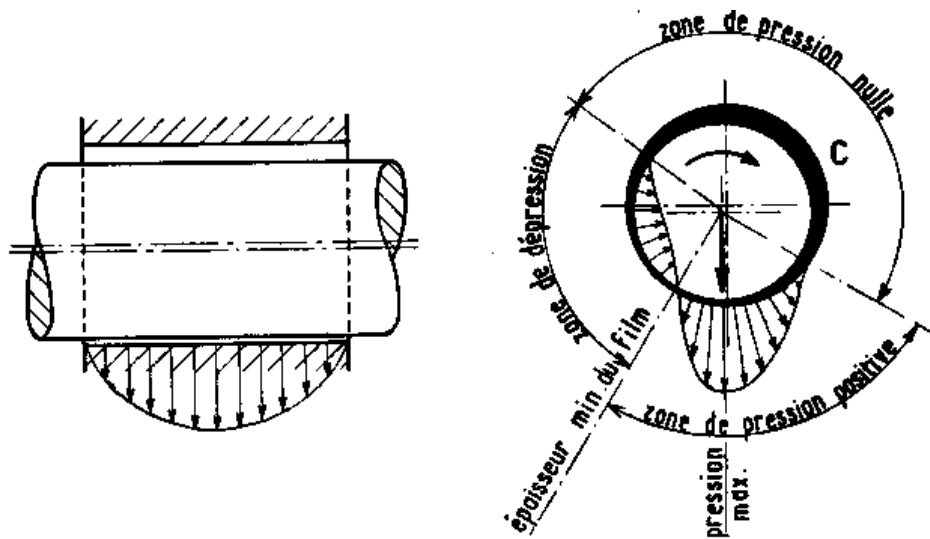


Figure 1-6 : Répartition de la pression dans le film d'huile dans un tourillon en rotation.

En plus du régime d'écoulement hydrodynamique, deux cas différents de régime d'écoulement du fluide lubrifiant peuvent être observés. On cite :

- Le régime hydrostatique
- Le régime élasto-hydrodynamique

II.1.3.1 Le régime hydrostatique :

Il ne doit pas être confondu avec le régime hydrodynamique. En régime hydrostatique, le mouvement relatif des pièces est très lent ($< 0,05$ m/s). Les surfaces sont séparées par une épaisse couche de lubrifiant (20 à 300 μm) engendrée par la seule pression du fluide (et non pas par la combinaison viscosité-vitesse relative du régime hydrodynamique)[4].

II.1.3.2 Le régime élasto-hydrodynamique :

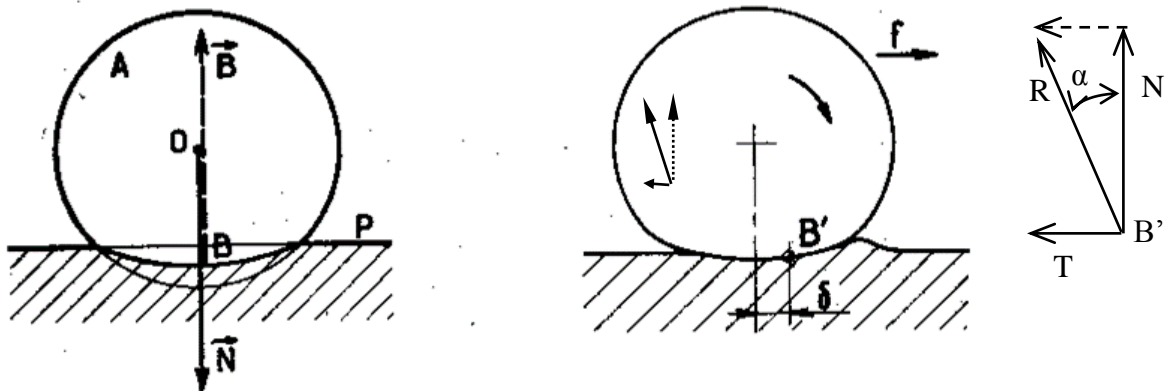
Cet état est obtenu avec des surfaces de contact élastiques, fortement chargées et généralement en contact selon un point ou une ligne. Exemples typiques : roulements, engrenages, cames...

Pour ces systèmes la géométrie des surfaces n'est pas propice à la formation du film hydrodynamique, de plus la pression de contact y est très élevée (≈ 1 GPa). Cependant, du fait des déformations élastiques des surfaces en contact, de leur vitesse relative, de la géométrie du début de contact, le tout combiné à l'accroissement de la viscosité entraînée par la forte augmentation de la pression, amène la formation d'un film très mince (0,5 à 1 μm) appelé film élasto-hydrodynamique. Le frottement est pratiquement nul dans le cas d'un roulement pur et de l'ordre 0,06 pour un glissement pur[4].

II.2 FROTTEMENT DE ROULEMENT :

Le frottement de roulement est le phénomène physique qui s'oppose au roulement. En tant qu'opposition au mouvement, il s'apparente aux frottements, mais est de nature différente : il est dû à la déformation élastique des pièces en contact. Il est donc en cela différent de la résistance au pivotement d'un palier lisse, et de la résistance au glissement.

La figure 1-7 montre, en effet que sous l'action de la charge normale (N), l'élément roulant ainsi que le plan de roulement subissent une déformation élastique. Le mouvement de l'élément roulant fait déplacer le point d'application de la charge (N) vers le point (B') tel que $BB' = \delta$. La réaction (R) se trouve ainsi inclinée d'un angle (α) par rapport à la verticale. La composante horizontale de la réaction (R) est une force qui s'oppose au mouvement de l'élément roulant ; c'est une résistance passive[5].



Action de contact au repos

Déformation pendant le mouvement

Figure 1-7: Schéma du contact entre l'élément roulant et la surface de roulement.

II.3 LES COEFFICIENTS DE FROTTEMENT :

Le coefficient de frottement dans une liaison mécanique exprime la résistance au mouvement des surfaces des deux pièces conjuguées. C'est le facteur qui détermine la résistance passive au mouvement. Sa valeur doit être réduite autant que possible car le rendement d'un mécanisme quelconque est directement lui est directement lié. Le coefficient de frottement dynamique diffère selon qu'il s'agisse d'un guidage en glissement ou en roulement[5].

II.4 CAS DU FROTTEMENT DE GLISSEMENT

Dans le cas du frottement de glissement, le coefficient de frottement dépend de beaucoup de paramètres d'origine diverse, à savoir :

- La nature des matériaux en contact
- La rugosité des surfaces de contact

- L'état des surfaces de contact (sèches, lubrifiées)
- La température.

Par contre, ce coefficient de frottement est indépendant de :

- La taille et la forme des surfaces de contact
- La valeur de l'effort normal au contact
- La vitesse de glissement du solide
- Leur mesure est donc délicate et les valeurs obtenues souvent incertaines.

Il faut noter que le coefficient de frottement dynamique est toujours plus petit que le coefficient de frottement statique. Quelques exemples de coefficients de frottement sont indiqués sur le tableau suivant[5]:

Coefficients de frottement statique et cinétique		
Surface	μ_s	μ_c
Acier sur acier (sec)	0.6	0.4
Acier sur acier (lubrifié)	0.1	0.05
Téflon sur acier	0.041	0.04
Acier sur Bois	0.6	0.2
Bois sur Bois	0.35	0.15
Acier sur glace	0.03	0.01

Tableau 1-1 : Coefficients de frottement statique et cinétique

II.5 CAS DU FROTTEMENT DE ROULEMENT

Pour avoir une estimation de la valeur du coefficient de frottement de roulement, considérons encore une fois le schéma représenté sur la figure 1-7.

Pour obtenir un mouvement de rotation de l'élément roulant sur la surface de roulement, on doit appliquer l'effort f dans le sens désiré. Le point d'application de la réaction R sera alors déplacé d'une distance $BB' = \delta$. Elle se trouve ainsi inclinée d'un angle (α) par rapport à la verticale.

La force qui s'opposera au mouvement sera donc la composante horizontale T orientée dans le sens inverse à celui du mouvement de l'élément roulant. On a :

$$T = N \cdot \tan \alpha \quad (1-3)$$

or $\tan \alpha = \delta / r$

$$\text{donc } T = N \cdot \delta / r \quad (1-4)$$

(δ) : coefficient de résistance au roulement ; c'est une longueur.

Le coefficient de résistance au roulement est donc défini comme étant la demi-largeur « δ » de la zone de contact ; il s'exprime habituellement en millimètre. Il dépend du coefficient d'élasticité des matériaux, mais aussi du rayon, de la vitesse de déplacement, de la rugosité...etc.

Pour les applications mécaniques, on retient en général les valeurs suivantes :

Matériaux (roue sur plan)	δ (mm)
acier sur acier	0.4
fonte sur acier	0.5
caoutchouc plein sur bitume	3 à 15
pneu sur bitume	20 à 30
acier sur béton	10 à 15
Acier sur rail (chemin de fer)	0.3 à 1

Tableau 1-2 : Coefficients de résistance au roulement (pour une roue de 1m de rayon)

Le tableau ci-dessous donne des valeur du coefficient de frottement constant μ pour roulements ouverts :

Type de roulement	Coefficient de frottement μ	
Roulements rigides à billes	0,0015	
Roulements à billes à contact oblique	à une rangée	0,0020
	à deux rangées	0,0024
Roulements à rotule sur billes	0,0010	
Roulements à rouleaux cylindriques	0,0011 – 0,0020	
Roulements à aiguilles avec cage	0,0020	
Roulements à rouleaux coniques	0,0018	
Roulements à rotule sur rouleaux	0,0018	
Butées à billes	0,0013	
Butées à rouleaux cylindriques	0,0050	
Butées à aiguilles	0,0050	

Tableau 1-3 : Coefficient de frottement constant μ pour roulements ouverts [source SKF]

Nous savons qu'en cas de glissement :

$$T = N.f \quad (f \text{ étant le coefficient de frottement de glissement voir tableau 1-1})$$

En comparant les expression 1-2 et 1-4 , on remarque que δ/r est analogue au coefficient de frottement (f).

A titre d'exemple, pour $\delta = 0,02$ mm et $r = 5$ mm, le roulement correspond à un coefficient de frottement de $:0,02/5 = 0,004$ ce qui est nettement plus faible par rapport au frottement de glissement.

Le moment du couple résistant vaut :

$$C = \delta .N \quad (1-5)$$

III- EFFETS NEFASTES DU FROTTEMENT

Le frottement, en tant que phénomène accompagnant tout mouvement relatif de surfaces en contact, est jugé utile ou néfaste selon le but recherché par le mécanisme considéré. Si, par exemple, le frottement est à l'origine de tous les systèmes de freinage, il est fortement combattu dans tous les types de guidage où il engendre des effets néfastes et peut mener à des situations à même de compromettre le bon fonctionnement du mécanisme.

Parmi les effets néfastes du phénomène de frottement, on peut citer[6] :

III.1 L'USURE :

L'usure est la perte progressive de matériau due à l'interaction de surfaces en mouvement l'une par rapport à l'autre. Elle est mesurée par le taux d'usure spécifique W_s d'un matériau. De nombreux phénomènes indépendants participent à l'usure d'un matériau :

III.1.1 Usure par abrasion :

C'est une "coupure" provoquée par des irrégularités sur la surface. Cette forme de dégradation est généralement combattue, mais aussi utilisée pour l'usinage : des taux d'usure importants sont recherchés et obtenus avec des outils abrasifs en rectification, affûtage, etc. L'abrasion coûte très cher, on lui attribue à peu près le tiers du total des pertes économiques dues à l'usure. Elle concerne de nombreux mécanismes fonctionnant dans des conditions sévères : machines agricoles, matériels de travaux publics, matériel minier. Les surfaces présentent des sillons de profondeur variable, parallèles au déplacement. La figure 1-8 représente schématiquement les mécanismes d'usure par abrasion.



A- abrasion par coupe

B- abrasion par déformation plastique

Figure 1-8 : Mécanismes d'usure par l'abrasion,.

L'usure par abrasion est assez constante au cours du temps, le volume des débris croît linéairement avec la charge appliquée et la distance parcourue. La vitesse n'intervient que si l'échauffement modifie les caractéristiques du matériau.



Figure 1-9 : Conséquence de l'usure par abrasion

III.1.2 Usure par fatigue :

C'est la rupture du matériau due à des contraintes répétées exercées par des irrégularités sur la surface. L'usure par fatigue est lente et habituellement masquée par l'abrasion ou l'adhésion. Induite par le frottement de roulement ou de roulement avec glissement sous fortes charges répétées, on la rencontre essentiellement dans les engrenages et les roulements dont elle constitue le mode normal de destruction.

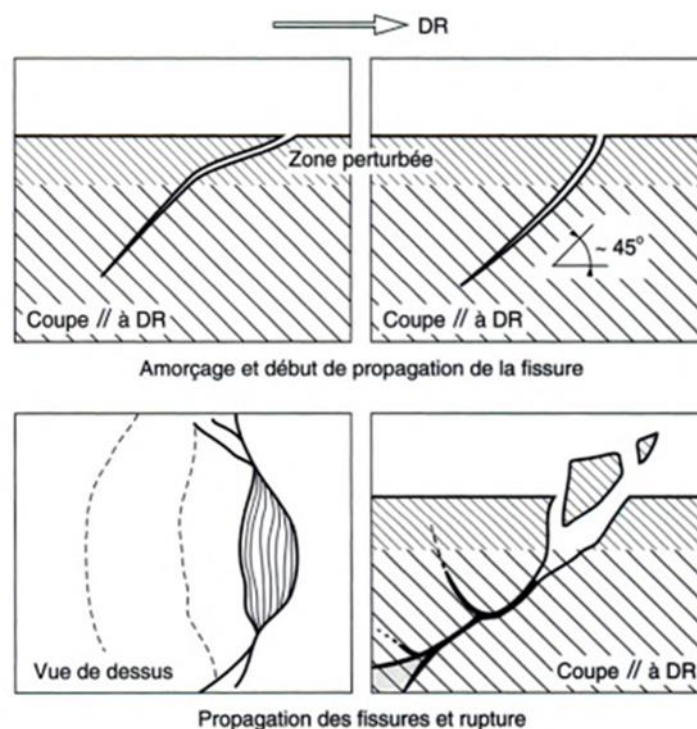


Figure 1-10 : Formation et propagation d'une piqûre de fatigue en roulement et glissement combiné (DR : direction du roulement).[7]

Une longue phase de vieillissement précède les accidents visibles. Une pièce peut être atteinte irrémédiablement tout en gardant jusqu'au dernier moment une apparence intacte. Il existe cependant un certain nombre de manifestations extérieures qui permettent, dans certains cas, un suivi des pièces en service.



Figure 1-11 : Usure par fatigue d'une bague extérieure d'un roulement à rouleaux cylindriques [6]

III.1.3 Usure adhésive :

L'usure adhésive ou usure par contact méta-métal est la forme la plus fondamentale de détérioration des surfaces. Elle est due à la rupture par cisaillement, lors du frottement. Dans ce cas, des microstructures ou jonctions formées instantanément entre les aspérités antagonistes des deux surfaces, en régime de frottement sec ou de lubrification limite ou mixte. La formation de ces soudures, très localisées, est favorisée par l'énergie thermique dissipée par frottement, associée à de très fortes pressions de contact. Le matériau d'une pièce est transféré et solidement soudé sur l'autre (voir figure 1-12). Les pièces peuvent être immobilisées par un grippage, dont la forme n'est reconnaissable qu'au début, avant que les surfaces ne soient complètement défigurées. Contrairement à ce qui se passe dans le cas de l'abrasion, de brusques changements de régime d'usure peuvent résulter de légères modifications des paramètres. Pour des surfaces non lubrifiées, le coefficient de frottement n'est pas multiplié par plus de vingt mais le taux d'usure peut varier d'un facteur un million.

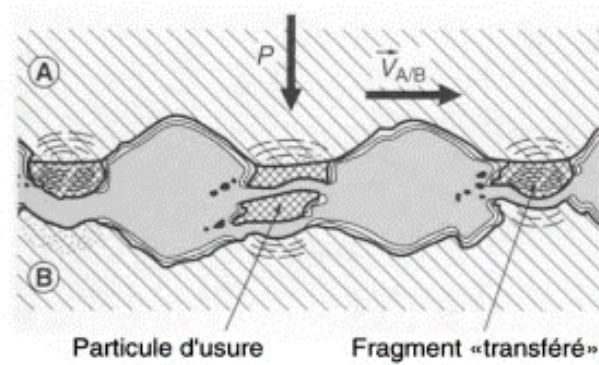


Figure 1-12 : Mécanisme d'usure adhésive dite « sévère » : le cisaillement se produit dans le matériau le plus tendre (B) ce qui implique un important transfert adhésif et usure sévère.

[7]

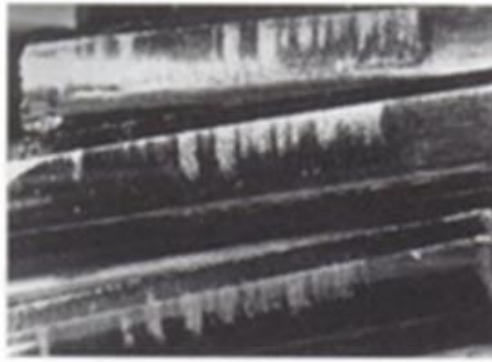


Figure 1-13 : Usure adhésive d'engrenage [7].

III.2 LES VIBRATIONS :

Lors du frottement, des vibrations se créent, causant ainsi un bruit ou des sons musicaux. Le bruit étant une notion difficile à définir, il est important d'en distinguer deux types :

- **Le bruit mécanique**, qui n'est pas lié aux frottements, mais aux chocs qui se produisent entre les pièces en mouvement. Si l'on est dans le cas de mouvements à fréquence élevée, ce type de bruit peut ressembler à un grincement. Une meilleure conception des pièces permet souvent de le réduire. Une autre solution consiste à utiliser des matériaux plus souples dotés d'un meilleur pouvoir d'amortissement.
- **Le grincement**, qui est dû au frottement et lié au coefficient de frottement. En règle générale, on peut affirmer que si le coefficient de frottement dynamique est plus élevé que le coefficient de frottement statique, le mouvement entre les deux surfaces peut être discontinu (l'on appelle cela l'effet de broutement, ou le stick-slip).

III.3 L'ÉCHAUFFEMENT :

L'énergie mécanique perdue par frottement, transformée en chaleur, est généralement irrécupérable et parfois très difficile à évacuer. L'estimation des calories produites par le frottement lors de la conception des freins d'un train à grande vitesse ou de ceux d'un avion de ligne est une étape cruciale dans le calcul de ces dispositifs. Le même problème se rencontre lors du taillage des matériaux par usinage. Les aspects thermiques du frottement peuvent avoir des conséquences déplorables. A titre d'exemple, on peut citer :

- L'échauffement par frottement provoque une usure plus rapide des pièces, voir une déformation de celles-ci.
- Dans le domaine de l'usinage, l'échauffement peut être la cause de transformation chimique des matériaux de l'outil.
- Un échauffement excessif peut provoquer la fusion des parties en contact, ce qui peut conduire au grippage et à la destruction des éléments mécaniques.

III.4 LES ODEURS :

Parfois, lors du frottement des odeurs sont dégagées. On peut le remarquer surtout lorsqu'on perce ou chauffe une pièce de plastique.

III.5 EMPREINTES DE CORPS ROULANTS :

- **Par déformation** : Des empreintes des corps roulants apparaissent avec un fond brillant, on y retrouve les traces de la rectification mais sans traces d'usure.
- **Par abrasion** : Dans ce cas les empreintes peuvent ne pas correspondre à l'écartement des corps roulants. L'enlèvement de matière cette fois par usure due à la vibration sans rotation du roulement (faux effet Brinell), Ce défaut peut apparaître sur des machines jamais mises en marche ;

IV- CONCLUSION :

La connaissance de la valeur de l'amplitude du coefficient de frottement et par conséquent de la force de frottement et du couple de frottement est primordiale parce qu'elle a un effet direct sur les pertes par frottement et par conséquent le rendement mécanique de la machine ainsi que sur l'échauffement des organes et du lubrifiant. La réduction du frottement permet, non seulement, d'économiser l'énergie mais aussi de prolonger la durée de vie des organes mécaniques et du lubrifiant. Cette réduction est possible par le recours à des mesures plus ou moins combinées telles que le choix de matériaux à haute qualités mécaniques, l'amélioration de la qualité des surfaces, le choix judicieux des jeux fonctionnels, et l'utilisation des fluides lubrifiants. Ce dernier point fera, justement l'objet du chapitre suivant.

I- INTRODUCTION

La lubrification (ou graissage) est un ensemble de techniques permettant de réduire le frottement et l'usure entre deux éléments en contact et en mouvement l'un par rapport à l'autre. Elle permet souvent d'évacuer une partie de l'énergie thermique engendrée par ce frottement, ainsi que d'éviter la corrosion.

Les lubrifiants sont des produits liquides, pâteux ou solides d'origine minérale (principalement des hydrocarbures), animale, végétale ou synthétique. En mécanique, on lubrifie les pièces (de métal ou de céramique) avec un corps gras, comme de l'huile ou de la graisse.

II- ROLES DE LA LUBRIFICATION

la lubrification permet de changer le coefficient de frottement entre deux éléments afin de faciliter le glissement ou le roulement entre elles ainsi que d'éviter ou de minimiser l'usure et les échauffements,

Le rôle de la lubrification est multiple, Jean Ayel Maurice [7] a résumé les principales fonctions comme suit :

- Réduire les frottements dans les machines et par conséquent économiser l'énergie.
L'énergie de frottement étant intégralement dissipée en chaleur, la réduction du coefficient de frottement entraîne la diminution des températures de fonctionnement des mécanismes.
- Combattre l'usure des machines sous toutes ses formes : usure adhésive et grippage, par fatigue de contact, par corrosion de contact ;
- Protéger les organes contre les corrosions humide et acide ;
- Participer au refroidissement des machines ; étant en contact intime avec les organes souvent très chauds, le lubrifiant contribue d'une façon très active à leur refroidissement et à l'évacuation de calories s'il circule, et s'il peut céder sa chaleur au milieu extérieur ;
- Contribuer à l'étanchéité aux gaz, aux liquides et aux contaminants solides ; par exempl, dans le cas du moteur à combustion interne, le lubrifiant permet d'améliorer l'étanchéité des segments et des joints, de même que la graisse empêche la contamination des roulements par les contaminants extérieurs (poussières) ;
- Garder propres les surfaces et les circuits en neutralisant ou en évacuant les produits indésirables : suies de combustion dans les moteurs à combustion interne, poussières, débris d'usure, produits de dégradation thermique ou chimique du lubrifiant (vernis, boues, carbone, etc.) eau. Cela est rendu possible grâce à :

- Une activité détergente,
 - Une activité dispersante ou solubilante,
 - Une aptitude à favoriser l'élimination des contaminants par filtration ou autre séparation physique (décantation, désémulsion, etc.) et purge.
- Transmettre l'énergie dans les systèmes hydrauliques ;
 - Absorber les chocs et réduire le bruit ;
 - Permettre la mise en route de l'organe à lubrifier à toutes températures ;
 - Assurer des fonctions passives diverses telles que : résistance au feu, au moussage, à l'aération, aux bactéries, neutralité vis-à-vis des élastomères, des plastiques et des peintures.

Chacune de ces fonctions peut être plus ou moins développée selon l'application. Afin de pouvoir remplir sa fonction de lubrifiant, le produit doit satisfaire à trois conditions fondamentales :

- un film doit pouvoir être formé à la surface des pièces ;
- le film formé doit être maintenu au contact ;
- le film formé et maintenu doit se déformer facilement, sans se rompre, par cisaillement.

III- ORIGINES ET FORMES DES PRODUITS LUBRIFIANTS

Les lubrifiants peuvent être liquides (huiles), consistants (graisses), ou solides (graphite, téflon). Les performances et caractéristiques diffèrent d'un lubrifiant à l'autre, leur seul point commun est qu'ils sont tous composés d'un constituant principal appelé « base lubrifiante », qui représente 75 à 85 % de l'huile ou d'une graisse et qui peut être d'origine pétrolière ou synthétique [8].

Longtemps, les lubrifiants utilisés étaient d'origine végétale ou animale, mais le développement des techniques industrielles ainsi qu'une demande croissante de lubrifiants ont conduit à l'utilisation massive de lubrifiant d'origine pétrolière. Ces lubrifiants présentent de meilleures caractéristiques physico-chimiques que les huiles naturelles. Actuellement on observe un développement rapide des huiles de synthèse qui sont moins sensibles à la température, l'oxydation, ...etc. assurant ainsi une durée de vie plus importante.

Le tableau 2-1 ci-dessous résume les principaux lubrifiants que l'on rencontre en industrie :

	LIQUIDES	PATEUX	SOLIDES
Lubrifiants minéraux	Huiles minérales (paraffine, naphthé) obtenues par distillation du pétrole	- Graisses à base d'huile de pétrole - Pâtes lubrifiantes - Lanoline	- Graphite - Bisulfure de molybdène - Biséléniures - Cires, résines
Lubrifiants de synthèse	Huiles synthétiques (polyglycols, esters...) obtenues à partir de produits simples issus de la pétrochimie	Graisses de synthèse (silicone)	- Plastiques fluorés (PTFE...) - Polyamides - Vernis de glissement

Tableau 2-1 : principaux lubrifiants d'après leur nature.

III.1 LUBRIFIANTS LIQUIDES OU HUILES

Les huiles utilisées dans le domaine de lubrification des systèmes mécaniques sont constituées de plusieurs huiles de base auxquelles on ajoute un certain pourcentage d'additifs. Les huiles de base les plus utilisées sont d'origine minérale extraite du pétrole ou d'origine synthétique.

III.1.1 Huiles à bases minérales

Les huiles à bases minérales sont d'origine pétrolière. Elles sont obtenues par distillation du pétrole brut et subissent des opérations de raffinage assez complexes qui comprennent les étapes suivantes [9]:

* 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.

* Désaromatisation : élimination par un solvant (furfural) des hydrocarbures aromatiques, ce qui améliore la stabilité thermique de l'huile et sa viscosité.

* 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.

* 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

Parmi les huiles les plus utilisées en mécanique, on distingue [10] :

Huiles paraffiniques ce sont des huiles à base minérale dont les molécules ont une structure à chaîne droite saturée en hydrogène (figure 2-1). Elles se caractérisent par une bonne stabilité à l'oxydation et un bon indice de viscosité [10].

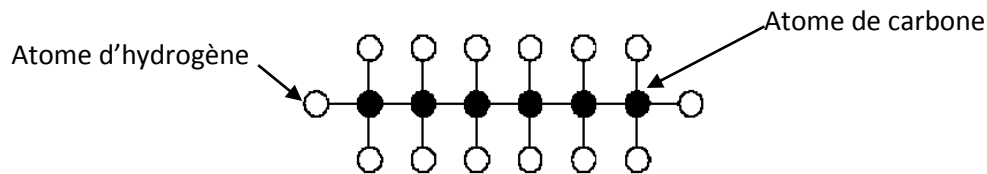


Figure 2-1 : Molécule paraffinique

Huiles Isoparaffiniques les molécules ont une structure à chaînes ramifiées (figure 2-2) : ces huiles 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 [11,12].

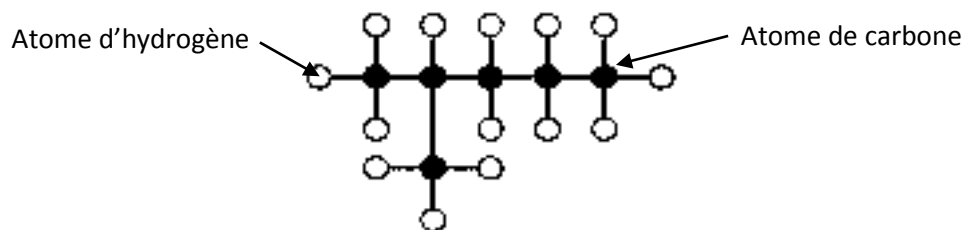


Figure 2-2 : Molécule isoparaffinique

Huiles naphéniques ce sont des huiles minérales qui contiennent des atomes de carbone dans une disposition annulaire en liaison simple (chaînes cycliques saturées) (figure 2-3). Elles sont moins stables à l'oxydation, plus agressives pour les élastomères, mais possèdent de très bonnes caractéristiques d'écoulement aux basses températures malgré un indice de viscosité plus faible.

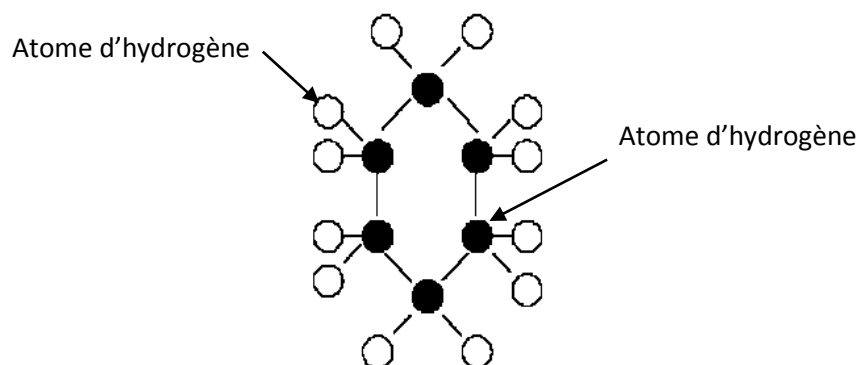


Figure 2-3 : Molécule naphalique

Les huiles naphthaliques présentent l'inconvénient d'être plus volatiles que les huiles paraffiniques. Ce qui peut affecter le fonctionnement normal de la lubrification [13].

III.1.2 Huiles à bases 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.*

Le tableau 2-2 donne, pour quelques types d'huiles, les principales caractéristiques qui les distinguent et des exemples de d'utilisation.

Huile	Principales caractéristiques et exemples d'utilisation
Polyglycols	<i>Bonnes propriétés lubrifiantes, haut indice de viscosité : 150 à 200 m²/s, faible volatilité (vaporisation), bonne stabilité thermique, incompatible avec les huiles minérales.</i> Exemples d'utilisations : - Polyglycol soluble à l'eau : <i>fluide difficilement inflammable, fluide d'usinage ...</i> - Polyglycol insoluble : <i>fluide de frein, lubrifiant moteur, lubrifiant engrenage ...</i>
Esters	<i>Faible volatilité, bonnes propriétés à froid, bonne tenue thermique, bonne propriété solvante et bonne résistance au cisaillement.</i> Exemples d'utilisation : <i>graisse, turbine à gaz, aviation, utilisé comme additif (pouvoir lubrifiant élevé).</i>
Hydrocarbures synthétiques	<i>- Comportement à froid performant, indice de viscosité élevé. Selon la longueur de la chaîne, bonne propriété thermique.</i> Exemples d'utilisations : <i>(polyalphaoléfinés) : lubrifiant d'engrenages, compresseur...</i>
Silicone	<i>- 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.</i> Exemples d'utilisations : <i>graisse, fluide hydraulique ...</i>

Tableau 2-2: Exemples de familles d'huiles de synthèse [14]

III.1.3 Les additifs des huiles :

Afin de renforcer certaines propriétés des huiles de base et leur apporter des propriétés qu'elles ne possèdent pas naturellement, on y ajoute des substances dans des proportions bien définies et selon les exigences des conditions de services du mécanisme lubrifié. Selon plusieurs sources bibliographiques, les additifs sont présents à hauteur de 1% à 30 % dans les huiles finies [15]. Les additifs se distinguent par leurs compositions chimiques et leurs fonctions. Ainsi, on distingue :

- Additifs qui protègent la surface,
- Additifs qui améliorent la qualité de l'huile
- Additifs qui protègent l'huile

Les principaux additifs sont présentés brièvement ci-dessous [14]

a) les améliorants de viscosité : ils permettent à l'huile d'être suffisamment fluide à froid et visqueuse à chaud pour éviter le contact direct des pièces en mouvement. Ce sont des polymères introduits dans une base lubrifiante. Une huile contenant ces additifs est dite multigrade. Les polymères à longue chaîne se contractent à basse température et n'offrent ainsi qu'une résistance négligeable au mouvement des molécules d'huile mais, à haute température, ils se déroulent et s'opposent à la fluidification du mélange.

b) les additives anti-usures : ils renforcent l'action anti-usure qu'exerce un lubrifiant vis-à-vis des organes qu'il lubrifie. Ils agissent en formant un film protecteur, en réagissant directement ou par l'intermédiaire de leur produit de réaction avec les surfaces lubrifiées.

c) Les additifs antioxydants : Ils ralentissent les phénomènes d'oxydation du lubrifiant et contribuent à l'espacement des vidanges par une meilleure tenue aux hautes températures.

d) Les additifs détergents : Ils évitent la formation de dépôts ou de vernis sur les parties les plus chaudes des moteurs tels que les gorges des pistons. Ils exercent une action détergente, en particulier à l'intérieur des moteurs thermiques où ils empêchent que les résidus carbonneux de combustion ou composés oxydés ne forment des dépôts ou des gommages sur les surfaces métalliques. Les additifs les plus récents sont des polymères de composés basiques azotés qui ne laissent pas de cendres.

e) Les additifs dispersants : ils maintiennent en suspension toutes les impuretés solides formées au cours de fonctionnement du moteur thermique : imbrûlés, gommages, boues, suies Diesel, dépôts nettoyés par les détergents. Ils empêchent les résidus solides de s'agglomérer et ainsi limitent le risque de dépôt (boues) dans les parties froides du moteur (carter).

f) Les additifs de basicité : ils neutralisent les résidus acides de combustion des carburants, principalement sur moteur Diesel, au fur et à mesure de leur formation.

g) Les additifs anticorrosion : Ils empêchent 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. Ils forment un film protecteur ou une passivation de la surface à protéger.

h) Les additifs anti-congélation : Ils permettent au lubrifiant de garder une bonne fluidité à basse température (de -15°C à -45°C).

i) Les additifs anti-mousse : le moussage de l'huile peut être dû à 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) ou le circuit de graissage qui provoque des turbulences lors de l'écoulement du lubrifiant, facilitant ainsi le brassage air-huile et la formation des bulles. Ces additifs ont pour but de limiter la dispersion d'un grand volume d'air dans l'huile.

j) Les additifs d'extrême pression : Ils ont pour but de réduire les couples de frottement et par conséquent économiser l'énergie et de protéger les surfaces des fortes charges. Ils apportent au lubrifiant des propriétés de glissement spécifiques, en particulier aux organes équipés d'engrenages ou de garnitures de friction travaillant dans l'huile (ponts auto bloquants, boîtes de vitesse : manuelles ou automatiques, freins immergés, etc.).

III.2 LES LUBRIFIANTS PATEUX (OU GRAISSES) :

Selon la norme ASTM (*American Society for Testing Material*), une graisse lubrifiante est une substance solide ou semi-fluide qui résulte de la dispersion d'un épaississant dans un lubrifiant liquide. Elle peut contenir d'autres composants qui confèrent des propriétés particulières (ASTM D 288). Les graisses se distinguent par leur consistance qui leur permet d'être appliquées directement sous forme d'une couche pâteuse sur les surfaces à lubrifier. D'après [16], les graisses sont composées de :

- 70 à 95 % d'huile de base (minérale, synthétique ou végétale) qui sert d'agent lubrifiant ;
- 0 à 5 % d'additifs identiques à ceux cités ci-dessus ;
- 3 à 30 % d'un agent épaississant ou gélifiant qui a pour rôle de donner la consistance au lubrifiant (semi fluide, fluide, mou ou dur) et d'emprisonner l'huile de base et les additifs pour qu'ils ne s'écoulent pas.

Les graisses se distinguent par leur adhérence aux surfaces à lubrifier, leur insolubilité à l'eau, leur résistance au cisaillement et leur durée de vie. En règle générale une graisse ne peut dépasser plus de 300°C (température à laquelle l'huile de base se sépare de l'épaississant). Au-delà, on parle plutôt de pâtes ou vernis à base d'aluminium ou de cuivre.

En plus de son rôle de lubrifiant (réduction de l'usure mécanique et des pertes d'énergie dues aux frottements), la graisse crée une barrière d'étanchéité vis-à-vis des éléments extérieurs tels que les poussières, l'eau, les solvants, et même la chaleur.

Le tableau (2-3) 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.

Graisse Propriétés	Graisse à savon simple				Graisse à savon complexe			Polyuré	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-Ex
Rétention de l'huile	Bon	Moy-Bon	Mé-Bon	Bon-Ex	Bon-Ex	Bon-Ex	Bon-Ex	Bon-Ex	Bon-Ex

Al= Aluminium, So=Sodium, Ca=Calcium, Li=Lithium,

Polyuré : un thermoplastique, Bentonite : grains de silice ou de glaise

Echelle d'évaluation : Mé = Médiocre, Moy = Moyen, Bon, Ex =Excellent

Tableau 2-3 : Les graisses, leurs savons et leurs propriétés [11]

III.3 LES LUBRIFIANTS SOLIDES

Les lubrifiants solides sont utilisés pour le graissage des systèmes mécaniques travaillant dans des conditions extrêmes, telles que :

- températures trop élevées ou trop basses,
- pressions de contact élevées,
- vide poussé,
- environnement chimique hostile,.....etc.

Les principaux lubrifiants solides sont : [16]

III.3.1 Bisulfure de molybdène MoS₂ :

C'est un lubrifiant solide ou sec à structure en réseau à plusieurs couches (lamellaire comme le graphite) ayant une grande capacité portante et un faible coefficient de frottement. Non soluble, il reste sous forme de grains très fins en suspension (moins de 0,2 µm dans le cas de roulements) incorporés aux huiles, aux graisses, aux pâtes lubrifiantes extrêmes pressions et à des vernis de glissement. On le trouve à l'état naturel dans les mines de fer mêlé aux autres minéraux, au-dessus de 400°C il se combine avec l'oxygène (donne du MoO₃). Le bisulfure de molybdène peut être utilisé jusqu'à 450°C, au-delà il devient abrasif.

III.3.2 Graphite :

Son faible coefficient de frottement est dû sa structure cristalline lamellaire. Il se caractérise également par son caractère réfractaire, une conductibilité électrique élevée et une faible dureté. Au-dessus de 550°C il se combine avec l'oxygène. Le graphite peut être utilisé jusqu'à 400°C en présence d'air et jusqu'à 1900°C en atmosphère inerte.

III.3.3 PTFE (Téflon) :

C'est un matériau thermoplastique n'ayant qu'une faible tendance à adhérer aux surfaces des autres matériaux et qui est caractérisé par un faible frottement. Température d'utilisation limitée à 300°C environ. Le téflon est utilisé en basses températures, de même que les nylons et divers polyamides.

L'application des lubrifiants solides s'effectue :

par frottage des surfaces avec une poudre sèche fine du lubrifiant,

par incorporation à une résine ou à un liant (résines, sels métalliques, céramiques, ...etc.) sous forme de fine couches protectrices (0,02 mm),

par réaction chimique avec le métal de base des surfaces à lubrifier.

Par rapport aux huiles et graisses, les lubrifiants solides présentent des inconvénients. En effet, en plus du fait que le lubrifiant solide ne participe pas au refroidissement des surfaces en

contact, le frottement reste assez élevé (0,02 à 0,3) et la durée de vie du film lubrifiant est beaucoup moins importante.

IV- PROPRIETES DES HUILES :

Chaque huile de graissage est caractérisée par un certain nombre de paramètres physiques et chimiques qui déterminent son domaine d'utilisation et les conditions de service qu'elles peuvent supporter. Ces caractéristiques (ou propriétés) ont été améliorées au fur et à mesure pour atteindre de hautes performances. Les principales propriétés physiques et chimiques des huiles de graissage ont été reproduites ci-après en se basant sur les données fournies par la littérature, notamment [7], [8], [10], ...etc.

IV.1 PROPRIETES PHYSIQUES :

IV.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.

IV.1.2 Couleur :

La couleur d'une huile minérale est évaluée par comparaison avec des verres étalons numérotés en colorations N.P.A. (National Petroleum Association). Elle varie généralement du blanc pur au rouge foncé en passant par le jaune citron et le jaune orange.

Les additifs assombrissent pratiquement la couleur de l'huile de base. Certains les noircissent complètement (graphite, bisulfure de molybdène...etc.).

La couleur de l'huile change progressivement au cours de son utilisation. En particulier pour les huiles pour moteurs thermiques qui deviennent rapidement noires en se chargeant de suies et des résidus de la combustion. La couleur foncée d'un lubrifiant usagé est un très bon moyen d'apprécier son altération. Aussi, l'aspect laiteux peut indiquer la présence de l'eau.

IV.1.3 Chaleur massique :

Cette caractéristique est utile pour quantifier le rôle caloporteur de l'huile. 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.

IV.1.4 Conductivité thermique :

Elle définit le flux thermique passant à travers un corps sous l'effet d'un gradient thermique. La valeur moyenne de la conductivité thermique des huiles minérales est de 0,14 W/m.K. (Watt/m.°K).

IV.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. 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 une distance constante h de la première (figure 2-4). Les deux plaques sont séparées par une lame liquide qui oppose une résistance au déplacement de ses molécules.

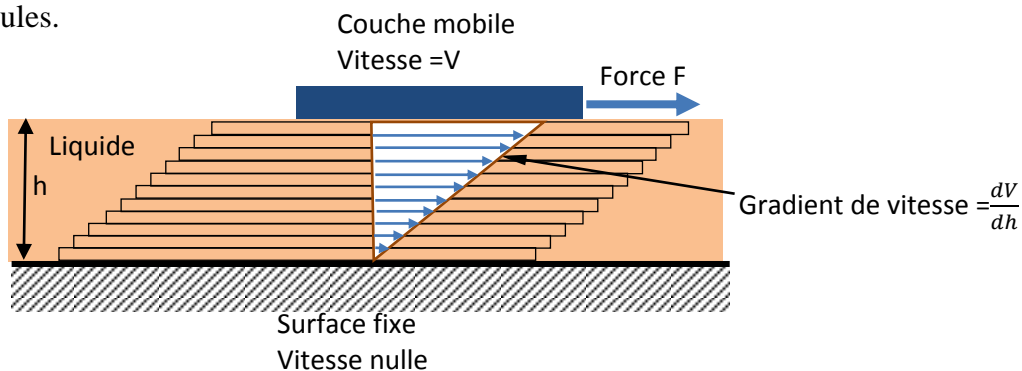


Figure 2-4 : Schéma de glissement des couches d'un fluide visqueux

La relation entre F et S n'est pas autre chose qu'une contrainte de cisaillement (τ) :

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (2-1)$$

La notion de viscosité fait également appel à celle d'écoulement laminaire. La figure... montre que le fluide s'écoule 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.

$$\tau = \frac{F}{S} = \mu \frac{dv}{dh} \quad (2-2)$$

μ est une constante appelée *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).

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

La *viscosité cinématique* est égale au rapport de la viscosité dynamique à la masse volumique, toutes deux définies à la même température :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-3)$$

μ : viscosité dynamique [Pa.s].

ν : viscosité cinématique [m²/s].

ρ : masse volumique [Kg/m³].

L'unité de mesure de la *viscosité cinématique*, le [m²/s], est définie comme étant celle d'un fluide ayant une viscosité dynamique $\mu = 1 \text{ Pa.s}$ et une masse volumique $\rho = 1 \text{ Kg/m}^3$. L'unité de mesure CGS était le stokes [St] ou [cm²/s]. On utilisait plus fréquemment le centistokes [cSt] qui n'est autre que le [mm²/s]. (1cSt = 10⁻⁶ m²/s = 1 mm²/s).

IV.1.6 Index (ou indice) de viscosité VI:

L'« Indice de Viscosité », noté VI, donne une idée sur la variation de la viscosité de l'huile avec la température. L'indice de viscosité d'une huile donnée est obtenu par comparaison avec deux

séries d'huiles de référence. La première, notées **L**, possède un indice **0** (grande variation de la viscosité avec la température) et la deuxième, notée **H**, possède un indice **100** (faible variation de la viscosité avec la température) (figure 2-5).

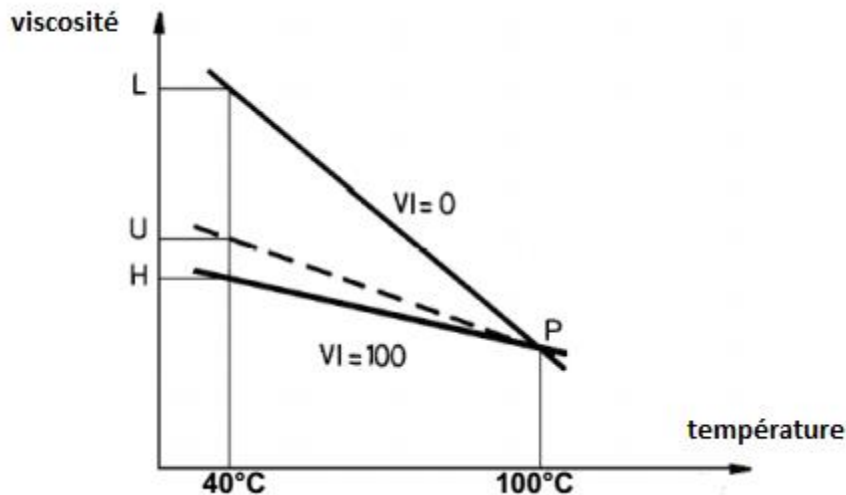


Figure 2-5 : Relation viscosité-température et indice de viscosité

Soit une huile quelconque dont la viscosité varie comme l'indique la courbe tracée en pointillé sur la figure 2-5, l'indice de viscosité se calcule par la formule suivante :

$$VI = 100 * \frac{L-U}{L-H} \quad (2-4)$$

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.

IV.1.7 Onctuosité :

Cette caractéristique est très importante car elle détermine l'aptitude d'une huile à adhérer aux surfaces (pouvoir adhérent) sous forme d'une fine couche (épilamen).

IV.1.8 Point d'écoulement :

En cas de baisse de température, toutes les huiles minérales s'épaississent jusqu'à prendre l'apparence de solides plus ou moins rigides. Ce comportement est dû au fait que 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.

IV.2 PROPRIETES CHIMIQUES :

IV.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.

IV.2.2 Température d'auto-inflammation :

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

IV.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.

IV.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.

IV.2.5 Teneur en soufre :

En principe, le soufre libre est éliminé des lubrifiants par raffinage, mais on peut en trouver à l'état combiné dans des composés tels les mercaptans. Parfois on ajoute 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.

IV.2.6 Teneur en eau :

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.

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

La capacité de rétention d'impuretés 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 en suspension dans le liquide, comme si elles étaient dissoutes. Au-delà de ce point, donc si leur concentration est trop forte, elles précipitent 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 capacité de rétention d'impuretés peut être évaluée par des méthodes gravimétriques. Elle s'exprime 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.

V- CLASSIFICATION DES HUILES DE GRAISSAGE :

Etant donnée la diversité des caractéristiques des huiles de graissage et des conditions de service, différentes méthodes de classification ont été élaborées afin de guider l'utilisateur pour un choix optimal aussi bien sur le plan de la qualité que sur le plan de la rentabilité. Dans la littérature relative au sujet, notamment [10, 11, 14, 15, 17 et 18], les deux principaux types de classifications concernent la « *viscosité* » et le « *service* » (niveau de performance).

V.1 CLASSIFICATION SELON LA VISCOSITE :

La viscosité étant l'une des principales caractéristiques des huiles de graissage, on trouve actuellement des organismes, tels l'ISO « *International Standard Organisation* », la SAE « *Society of Automotive Engineering* » et l'AGMA « *American Gear Manufacturers Association* », qui s'occupent de classer les huiles selon leur viscosité. On parle dans ce cas de « *grade* ».

V.1.1 Grade ISO :

La norme ISO divise la gamme complète des huiles industrielles en 18 classes de viscosité exprimée en (cSt) à 40°C allant des plus légères, huiles pour broche (ISO VG 2 – ISO VG 22), jusqu'à la plus lourde, huiles à cylindre (ISO VG 460 – ISO VG 1650). Le chiffre ISO VG correspond approximativement à la viscosité médiane de chaque classe en (cSt) à 40°C. Par exemple, une huile ISO VG 46 possède une viscosité d'environ 46 cSt à 40°C.

La figure 2-6 donne la relation entre la viscosité de l'huile et la température de fonctionnement. De plus, elle permet de définir approximativement la viscosité de l'huile en tenant compte des conditions de fonctionnement.

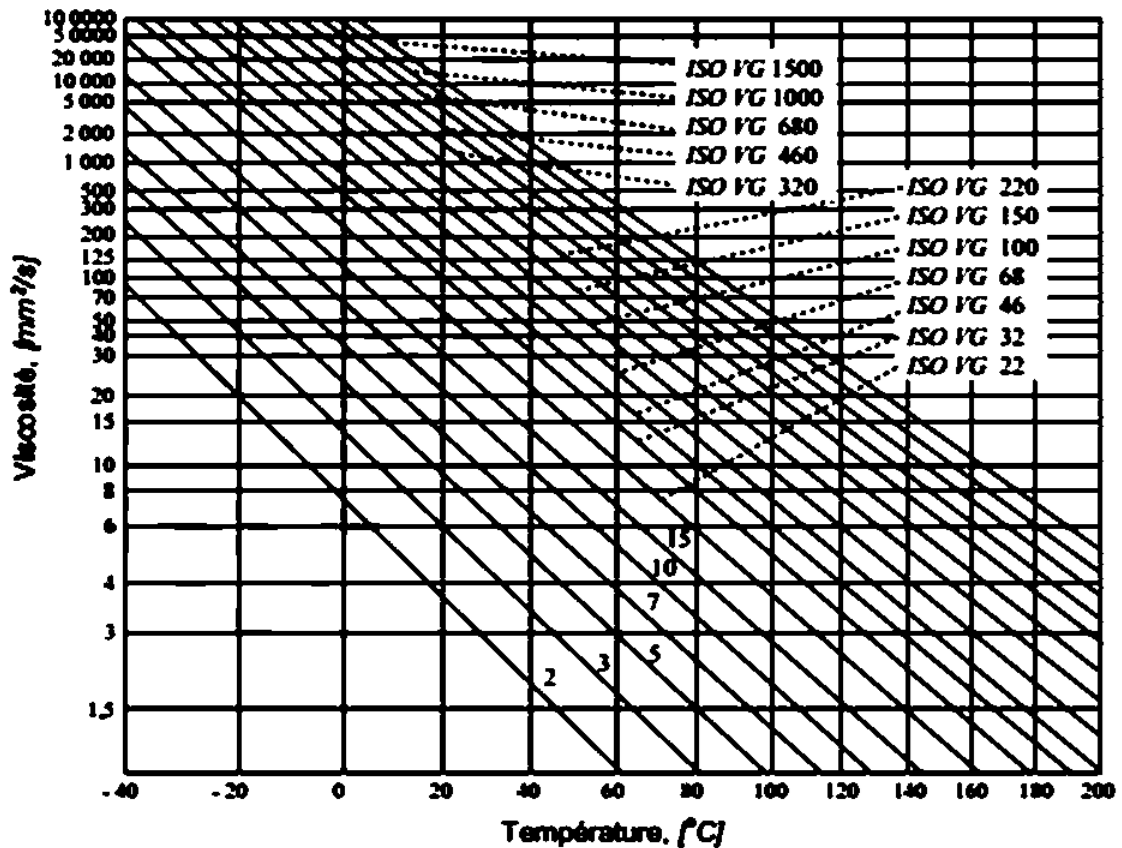


Figure 2-6 : Diagramme température/viscosité [17].

V.1.2 Grade SAE :

La classification SAE concerne les huiles automobiles (moteur à combustion interne et boîtes d'engrenages); elle donne une indication sur leur viscosité et non pas sur leurs autres propriétés. A titre d'exemple, le tableau 2-4 donne la classification SAE pour les huiles à moteurs.

On remarque, d'après le tableau ci-dessous, que les huiles de classe SAE 20, SAE 30, ..., SAE 60 utilisent la viscosité à 100°C, ce sont des huiles dites à hautes température.

Les huiles avec le suffixe W (du mot anglais Winter = hiver) correspondent à la viscosité à -18°C. Ce sont utilisées à basse température.

Il y a aussi des huiles dites multigrades. Elles présentent deux viscosités caractéristiques. A titre d'exemple, l'huile SAE 10W – 40 a la même viscosité qu'une huile SAE 40 à 100°C et la même viscosité qu'une huile SAE 10W) -18°C.

Classe de viscosité SAE	Viscosité maximale en mPa s pour une température de ... °C		Viscosité à 100°C en mm ² /s		Viscosité à haute température (150°C) pour un taux de cisaillement de 10 ⁶ s ⁻¹ en mPa s
	Mise en marche / Démarrage	Pompabilité	min.	max.	
W	6200 à -35	60'000 à -40	3,8		
5W	6600 à -30	60'000 à -35	3,8		
10W	7000 à -25	60'000 à -30	4,1		
15W	7000 à -20	60'000 à -25	5,6		
20W	9500 à -15	60'000 à -20	5,6		
25W	13000 à -10	60'000 à -15	9,3		
20			5,6	≤ à 9,3	2,6
30			9,3	≤ à 12,5	2,9
40			12,5	≤ à 16,3	2,9 (0W-40, 5W-40, 10W-40)
40			12,5	≤ à 16,3	3,7 (15W-40, 20W-40, 25W-40, 40)
50			16,3	≤ à 21,9	3,7
60			21,9	≤ à 26,1	3,7

Tableau 2-4 : Classification SAE des huiles pour moteur (décembre 99) [10]

Comme l'indique la figure 2-7, la variation de la viscosité en fonction de la température peut être différente d'une huile à l'autre. Une huile, dont la viscosité varie le moins possible en cas de fluctuation de la température (huile B), est appropriée pour la pratique. En effet, cette huile garantit un parfait démarrage à froid et une force portante suffisante pour le film lubrifiant à température élevée. Plus l'indice de viscosité (VI) est élevé, plus la baisse de viscosité est faible en cas d'augmentation de la température.

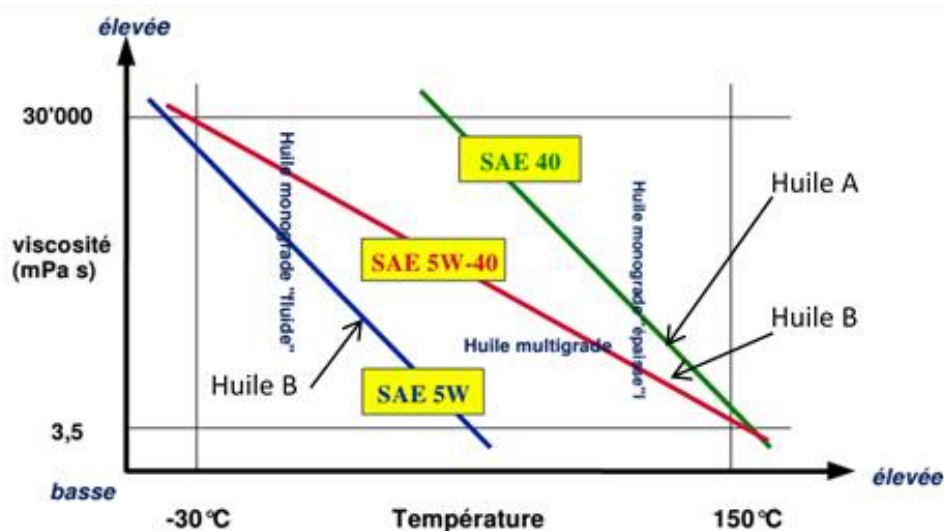


Figure 2-7 : Comparaison entre l'huile monograde et l'huile multigrade [10]

V.2 CLASSIFICATION DES HUILES SELON LE SERVICE :

La classification qui se réfère seulement à la viscosité, ne donne pas une réponse définitive au niveau qualitatif. Pour remédier à cela, de grandes organisations ont rédigé des spécifications en fonction des prestations qui sont exigées des huiles. Chacune de ces prestations est un ensemble de tests faits en laboratoires qui ont été sélectionnés pour tester les qualités de lubrifiants examinés.

A titre d'exemple, on cite la norme ACEA (Association des Constructeurs Européens d'Automobiles) dont la désignation comporte en plus de l'acronyme ACEA,

- une lettre, (A, B, C ou E) relative au type de moteur (essence, Diesel Tourisme, Diesel Lourds),
- un chiffre (1 à 5) et
- l'année qui représente la date de mise en conformité du produit avec la norme.

Exemple de désignation : ACEA A 2-99 : c'est une huile d'usage général dans les moteurs à essence avec des intervalles de vidanges normaux de 50000 à 10000 km.

VI- DISPOSITIFS DE GRAISSAGE

En mécanique, les conditions dans lesquelles les surfaces en contact doivent être lubrifiées sont multiples. Quel que soit le cas, le dispositif de graissage doit lubrifier tous les organes en mouvement. L'huile peut être apportée de diverses manières :

VI.1 GRAISSAGE AU GOUTTE-A-GOUTTE :

Ce type de graisseur permet de vérifier visuellement le débit de l'huile.

VI.2 GRAISSAGE PAR CAPILLARITE :

Dans ce cas l'alimentation est réalisée grâce à une mèche trempant dans un réservoir est possible pour des applications peu sévères.

VI.3 GRAISSAGE PAR BARBOTAGE :

Ce mode graissage est considéré comme suffisant dans les boîtes de vitesses, où l'huile est projetée par les dentures d'engrenages.

VI.4 GRAISSAGE SOUS PRESSION :

Ce mode de graissage s'applique aux mécanismes fonctionnant dans des conditions sévères. Divers types de pompes de circulation sont utilisées pour assurer un débit d'huile constant.

VI.5 GRAISSAGE PAR JET D'HUILE :

Ce type de graissage permet de forcer l'huile à atteindre les zones à lubrifier. L'huile est ensuite drainée vers le carter qui sert comme réservoir.

Un exemple de circuit de graissage est montré sur la figure suivante (moteur thermique à 4 temps)

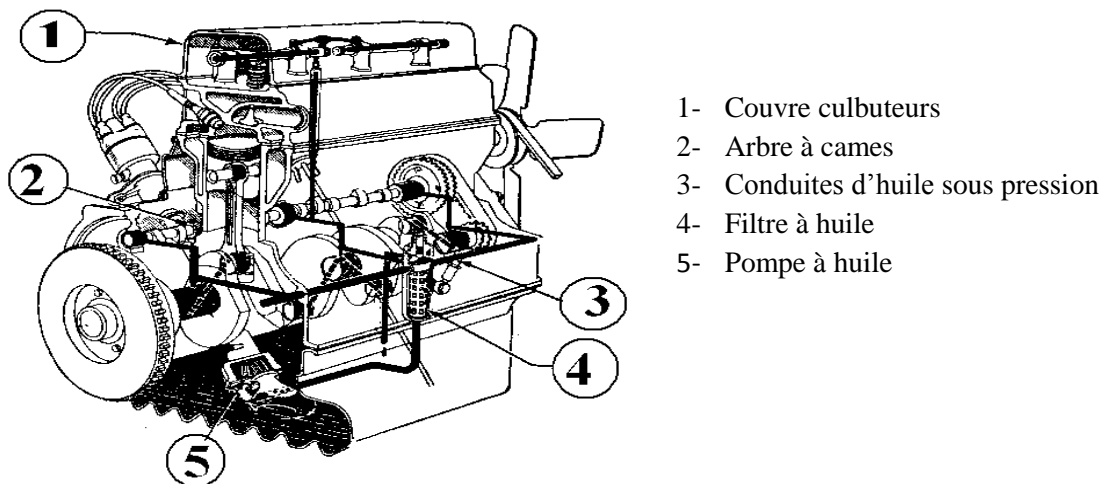


Figure2-8 : exemple de circuit de graissage d'un moteur thermique

Le tableau 2-5 ci-dessous indique différents modes de graissage dans un moteur thermique

Organes lubrifiés	Type de graissage
Paliers de vilebrequin et coussinets de têtes de bielle	sous pression
Parois de cylindres, pistons, segments	— par projection (huile venant des coussinets de bielles) — par brouillard d'huile
Axes de pistons	— par projection — par drainage d'huile par les segments — par gravité ou sous pression pour grands moteurs Diesel marins
Paliers d'arbre à cames	sous pression
Culbuteurs	sous pression et par gravité
Cames et poussoirs	— par gravité, l'huile venant des culbuteurs — par barbotage
Engrenages ou chaînes de distribution	par jet d'huile
Tiges et guides de soupapes	par gravité, l'huile venant des culbuteurs

Tableau 2-5 : Différents modes de graissage dans un moteur thermique

VII- CONCLUSION :

Comme présenté dans ce chapitre, la lubrification revêt une importance capitale pour l'obtention des meilleures conditions de fonctionnement des mécanismes et garantir une longévité optimale. On a vu, en effet, que les fonctions de la lubrification touchent aussi bien la préservation de matière en évitant l'usure, mais aussi la réduction du frottement ce qui évite les surconsommations d'énergie. Ces fonctions multiples sont de plus en plus exigeantes et la qualité des produits lubrifiants ne cesse de s'améliorer avec le temps. Par ailleurs, et afin d'utiliser les produits lubrifiants dans les meilleures conditions, il est nécessaire de connaître les différentes propriétés et la composition adéquate pour chaque application.

Les techniques d'élaboration et de classification des produits lubrifiants ont beaucoup évoluée et on trouve actuellement des spécifications pour répondre aux conditions les plus sévères. Toutefois, les qualités des lubrifiants peuvent altérées par des produits contaminants qui risquent de réduire considérablement le pouvoir lubrifiant et entraver ainsi leur fonction dans un mécanisme. Le chapitre suivant traite justement ce problème.

I- INTRODUCTION :

La contamination des lubrifiants peut entraîner une perturbation importante des performances des organes de guidage et de support des machines tournantes, en augmentant notamment la puissance dissipée ainsi que la température de fonctionnement. Dans les cas les plus sévères, ce problème de pollution peut conduire à une usure prématurée voire une défaillance des paliers et butées.

Plusieurs types de polluants peuvent être à l'origine de la dégradation des conditions de lubrification. On distingue par exemple, les pollutions par particules solides comme les poussières et les particules d'usure ou de rouille. Ce genre de pollution s'avère le plus nocif et doit par conséquent être arrêté dès la constatation des premiers symptômes.

D'autre part, la pollution par de l'eau, constitue l'un des contaminants les plus répandus et les plus dangereux, se classant juste après les pollutions par particules solides.

Dans le présent chapitre, on présente les différents types de polluants qui affectent les qualités lubrifiantes des huiles et des graisses, leurs origines ainsi que les effets néfastes qu'ils peuvent engendrer à plus ou moins long terme.

II- POLLUTION DES LUBRIFIANTS PAR L'EAU :

La pollution aqueuse a fait l'objet de recherche aussi bien sur le plan expérimental que sur le plan de la modélisation et la simulation numériques. Les investigations menées par les chercheurs et les industriels ont montré l'impact de la présence de l'eau dans les circuits de graissage et les systèmes hydrauliques. Une concentration d'eau, même très faible, peut réduire de moitié la durée de vie des roulements (voir figure 3-1).[19]

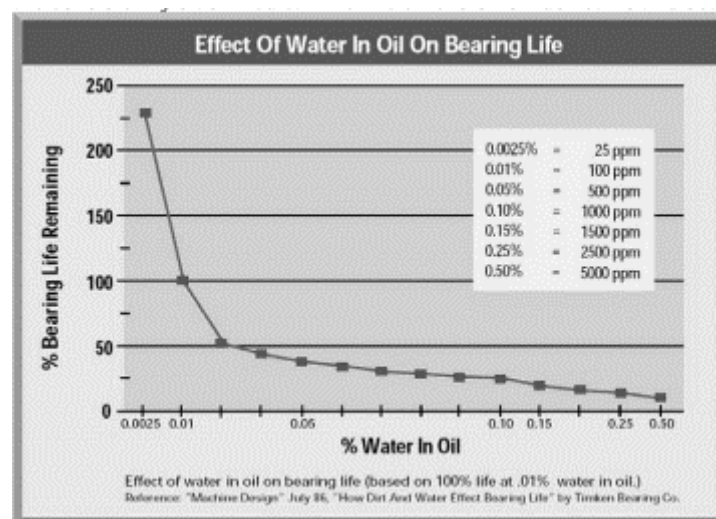


Figure 3-1 : Effet de la pollution aqueuse sur la durée de vie des roulements [19]

II.1 Origine de la pollution aqueuse :

Dans la majorité des cas, la pollution aqueuse des circuits de lubrification est inévitable. La présence de l'eau dans un circuit de graissage ou un circuit hydraulique peut avoir comme origine différents modes d'infiltration. Certains de ces modes sont communs à plusieurs domaines de l'industrie, comme par exemple la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air, au niveau des réservoirs d'huile. Cette condensation résulte surtout du changement cyclique de température « jour-nuit » qui rend ce phénomène continu et non limité. En corrélation avec ce phénomène, il faut tenir compte de l'absorption directe par le lubrifiant de la vapeur d'eau à partir de l'air, cette absorption dépend énormément de la température et de l'humidité relative du milieu ambiant (voir figure 3-2).

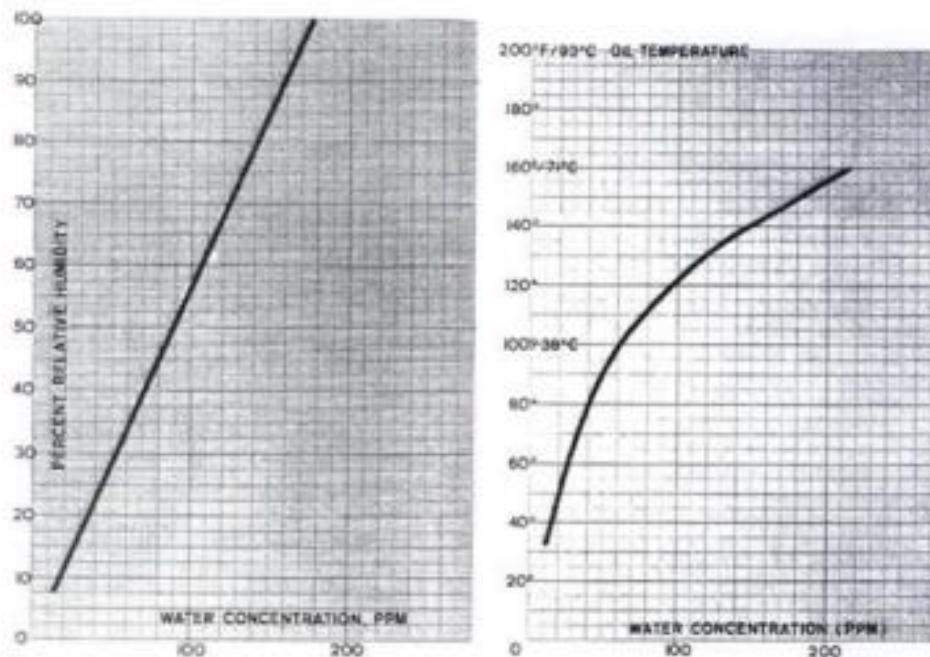


Figure 3-2 : Evolution de l'absorption de la vapeur d'eau par l'huile : a- en fonction de l'humidité relative à 38°C, b- en fonction de la température pour une humidité relative égale à 40% [H P]

D'autres modes de contamination peuvent apparaître dans des cas plus spécifiques, comme ceux résultant des défauts d'étanchéité, séparant l'huile de l'eau, dans les machines exposées directement à l'eau telles que les turbines de navires. Des défauts d'isolation entre l'huile et l'eau ou la vapeur d'eau sont fréquents aussi dans le monde des alternateurs électriques et des turbines à vapeur. Des endommagements dans les circuits de refroidissement, surtout au niveau des échangeurs thermiques, peuvent conduire à des pénétrations d'eau plus importantes dans les circuits de lubrification.

On résume ainsi les principales causes de contamination des lubrifiants par de l'eau comme suit :

- Milieu ambiant humide,
- Condensation,
- Appoint d'huile,
- Fuite dans le système de refroidissement,
- Stockage des fûts à l'extérieur.

II.2 Formes de présence de l'eau dans l'huile.

Le mélange huile/eau existe sous plusieurs formes comme l'eau dissoute dans l'huile, l'émulsion ou le mélange diphasique. Dans le domaine de l'étude de la pollution des huiles par l'eau, on rencontre surtout les situations où le mélange est sous forme d'eau dissoute dans l'huile ou bien sous forme d'émulsion d'eau dans l'huile.

II.2.1 Eau dissoute

Dès la présence des premières traces d'eau, on constate que l'eau et l'huile se comportent comme des fluides miscibles. Dans ces conditions, une petite quantité d'eau pourra être dissoute dans l'huile. Cela reste vrai tant que la teneur en eau ne dépasse pas le seuil de saturation de l'huile[20].

Le seuil de saturation dépend de la température et de l'humidité relative du milieu ambiant, sachant que l'addition de certains produits peut améliorer le pouvoir solvant de l'huile. En 1976, Cantley [21] a présenté des mesures du pouvoir d'absorption d'eau par des huiles minérales, selon la présence de certains additifs spécifiques et en fonction de l'humidité relative pour une température fixée à 38°C. Il a remarqué ainsi que le taux de saturation peut être amélioré par la présence des additifs et que ce dernier varie entre quelques dizaines de 400 ppm et 900 ppm. De même, il a souligné que les huiles synthétiques ont un pouvoir absorbant plus important et que le taux de saturation atteint parfois les 3 600 ppm.

II.2.2 Eau en émulsion

D'après [20], au-delà de 1 000 ppm, et sous l'effet d'une agitation mécanique, l'eau tend à se suspendre en gouttelettes plus ou moins grandes au sein de l'huile et forme ce qu'on appelle une émulsion d'eau dans l'huile. Dans ce cas, l'huile est dite phase continue et l'eau est dite phase dispersée. La taille des gouttelettes d'eau varie selon les conditions de formation du mélange et l'âge de l'émulsion.

Une émulsion est une phase transitoire instable formée par agitation mécanique, les deux phases sont ainsi continuellement en cours de séparation : les particules d'eau ont toujours tendance à se coller les unes aux autres, formant des gouttelettes plus grandes qui vont se décanter.

La taille des gouttelettes affecte largement la stabilité de l'émulsion : des gouttelettes plus grandes subissent une décantation plus rapide. Ceci peut être expliqué directement par la loi de Stokes :

$$v = \frac{2r^2g\Delta\rho}{9\mu}$$

où :

- v : vitesse de décantation d'une sphère dans un liquide.
- r : rayon de la sphère.
- $\Delta\rho$: différence de densités entre la matière de la sphère et le liquide l'entourant.
- μ : viscosité dynamique du liquide entourant la sphère.
- g : accélération de la pesanteur.

Au-delà d'une certaine concentration d'eau (> 20%), un phénomène d'inversion peut se produire et l'émulsion se transforme en « émulsion d'huile dans de l'eau ». En 1985, Pal et Rhodes [22] ont expliqué que cette concentration critique dépend surtout du mode de préparation du mélange. Par exemple, une addition d'eau par grandes quantités provoque l'inversion à une concentration plus basse que si l'eau est ajoutée par des pas de petites quantités.

II.3 Effets de la pollution aqueuse sur les mécanismes

La littérature permet de trouver une grande diversité des effets de la pollution par de l'eau sur les performances de mécanismes lubrifiés. La plupart de ces effets ont été présentés dans les travaux d'Alain Eachus en 2005.

La présence de l'eau dans les circuits de lubrification est nuisible au fonctionnement et peut aboutir à la défaillance des organes de guidage des machines tournantes. En 1976, Wilson [23] a montré que la présence d'eau peut bloquer le mouvement de certains organes mécaniques, comme des soupapes ou des pistons ce qui peut conduire à des défaillances catastrophiques des machines. Wilson souligne que les tests ou les essais de ces machines avant le fonctionnement n'éliminent pas le danger, l'eau étant susceptible de continuer à pénétrer le circuit d'huile lors du fonctionnement.

La même année, Cantley [21] a évalué l'effet de la teneur en eau du lubrifiant sur la durée de vie des roulements à billes. Dans une expérience à l'échelle réelle, il a comparé l'influence de trois concentrations d'eau différentes (25 ppm, 100 ppm et 400 ppm) sur les performances d'un roulement à billes alimenté par une huile SAE 20. Il a conclu que la présence de l'eau diminue la durée de vie des roulements à billes selon la relation empirique qu'il a proposée [Eq (3.1)]. Elle permet de déterminer la durée de vie relative des paliers « L » (sans dimension et égale à 1 pour le cas référence de 100 ppm) en fonction de la concentration d'eau X (en ppm) :

$$L = \left(\frac{100}{X}\right)^{0.6} \quad (3-1)$$

On remarque qu'une augmentation de pollution de 25 ppm à 100 ppm en eau a le même effet que l'augmentation de 100 ppm à 400 ppm : une diminution de moitié de la durée de vie du palier. Enfin, l'auteur a montré que la capacité de l'huile à absorber l'eau pouvait augmenter grâce à des additifs spécifiques, diminuant significativement l'effet nocif de la pollution aqueuse.

On note, cependant, que dans certains domaines, tels que le travail des métaux par usinage, l'utilisation des émulsions d'eau dans l'huile sont utilisées pour la lubrification et le refroidissement des outils de taillage et des surfaces à usiner.

Dans ce qui suit, et dans le but d'établir un ordre de priorité parmi ces effets, les effets sont présentés selon leurs effets à court terme et à long terme.

II.3.1 Effets à court terme :

La présence d'eau dans une huile de graissage engendre des effets que l'on peut constater immédiatement après contamination, ce sont les effets à court terme.

II.3.1.1 Effet sur la viscosité :

La viscosité de l'eau étant largement plus faible que celle des huiles et graisse de lubrification, un mélange peut avoir une viscosité plus faible que celle de lubrifiant. Dans ce cas, une lubrification par ce mélange aboutira à des épaisseurs de film plus petites que celles obtenues avec de l'huile et graisse pure [24]. Cela augmente la probabilité d'aboutir au contact entre les pièces en mouvement ou au contact entre ces pièces et les particules transportées dans le film, dans le cas de l'existence de particules.

Cependant, dans le domaine de la lubrification élastohydrodynamique (EHD), la présence de l'eau n'est pas significativement nuisible à la hauteur du film. En effet, les pressions élevées et les vitesses assez faibles empêchent l'eau d'entrer dans l'entrefer lubrifié.

II.3.1.2 Favorise le phénomène de cavitation

Selon [24], la présence de l'eau dans l'huile et la graisse favorise l'entraînement des bulles d'air, ce qui conduit à l'apparition de phénomènes de cavitation, surtout au niveau des surfaces de lubrification. De plus, la présence de la vapeur d'eau dans les circuits de lubrification engendre un phénomène spécifique de cavitation dû au fait que lorsque cette vapeur arrive dans les zones de grande pression, elle subit une condensation brusque et passe à l'état liquide, créant ainsi une sorte d'implosion laissant des micropiqûres au niveau des surfaces internes des paliers.

II.3.1.3 Réduit l'activité des additifs

Des études menées par [24] ont montré que la présence de l'eau peut changer les propriétés de l'huile, rendant certains additifs insolubles. En effet, ces additifs, qui ont pour rôle d'inhiber la corrosion et l'oxydation de l'huile ou d'éviter la formation de mousses, deviennent alors totalement inactifs.

II.3.2 Effets à long-terme

Certains phénomènes liés à la contamination aqueuse se déroulent de manière graduelle et leurs effets mettent plus de temps à se manifester, ce sont les effets à long terme. Parmi ces effets, on cite :

II.3.2.1 Oxydation des métaux

Les gouttes d'eau qui pénètrent les circuits d'huile et de graisse peuvent se décanter dans des zones mortes où l'écoulement n'est pas assez fort pour les entraîner. La présence des antioxydants dans l'huile s'avère insuffisante et de petites oxydations se déclenchent, aboutissant à la formation de rouille. Ce phénomène est bien expliqué dans le travail présenté par McDonalds en 1965 [25], dans lequel il a ajouté que l'eau peut accélérer la dégradation des antioxydants.

Il a également montré que les particules de rouille peuvent avoir différentes dimensions, dépendant des dimensions de la goutte d'eau immobile qui les a formées. Ainsi, les petites particules sont entraînées avec l'écoulement du lubrifiant formant avec lui un fluide extrêmement abrasif. Quant aux grandes particules de rouille, elles peuvent rester inertes et immobiles, mais elles peuvent aussi atteindre les pompes qui les écrasent et les transforment en des particules plus petites qui seront entraînées aussi. Dans les deux cas, l'usure des surfaces des paliers sera inévitable.

Eachus[24] a ajouté que les gouttes d'eau tendent à s'immobiliser au niveau des surfaces métalliques surtout lorsque ces dernières sont hydrophiles. Ainsi, ces surfaces seront localement dépourvues du contact avec la couche d'huile qui les protégeait avant.

II.3.2.2 Propagation de fissures

La présence de l'eau à proximité des surfaces métalliques peut déclencher un phénomène nuisible à ces surfaces connu sous le nom de « Hydrogen Embrittlement » : les molécules d'eau pénètrent par capillarité dans les micro-fissures du métal, où elles seront cassées à cause de la grande pression et du contact direct avec le métal. Il en résulte des atomes d'hydrogène libres qui s'accumulent dans les fissures, augmentent davantage la pression dans ces dernières et contribuent finalement à leur propagation. En 1968, Schatzberger et Felsen[26] ont montré expérimentalement qu'une quantité d'eau inférieure au taux de saturation de l'huile (100 ppm par exemple) est suffisante pour provoquer ce phénomène

II.3.2.3 Micro-piqûres par arcs électriques

Une caractéristique importante de l'huile est altérée lorsque celle-ci est polluée par de l'eau : c'est la résistance au courant électrique. En 2000, Prashad[27] a montré que la présence d'eau dans l'huile fait diminuer le seuil critique de la tension qui autorise le passage du courant. En effet, les axes tournants des machines électriques sont souvent chargés par un certain potentiel électrique. Une fois que ce potentiel dépasse un certain seuil, qui dépend de la résistivité du film d'huile, il se décharge sous forme d'arcs électriques causant des piqûres au niveau des surfaces internes des paliers et des butées.

Prashad a également montré que le remplacement de l'huile contaminée empêche les arcs électriques et augmente la durée de vie des paliers. Dans des travaux précédents.[28], l'auteur avait expliqué les origines de ce potentiel électrique : les défauts d'enroulement des fils électriques ou leur mauvaise alimentation peuvent causer une asymétrie magnétique qui induit, suite à la rotation, une tension électrique entre les axes et leurs supports statiques.

II.3.2.4 Oxydation de l'huile et attaque des additifs

Selon Eachus [24], l'eau peut provoquer l'oxydation de l'huile ou réagir chimiquement avec certains de ses additifs produisant, dans les deux cas, des acides corrosifs qui attaquent les surfaces internes des paliers.

II.3.2.5 Dégradation biologique

En outre, une concentration en eau de 500 ppm peut être suffisante pour assurer une ambiance favorable au développement de certaines bactéries qui se nourrissent des additifs et laissent des déchets acides [24] qui vont altérer les surfaces.

II.3.3 Variation des caractéristiques du lubrifiant sous l'effet de la pollution aqueuse

Les huiles utilisées comme lubrifiants se caractérisent par un certain nombre de paramètres physiques qui ont une influence directe sur les performances et la qualité de graissage. La contamination de l'huile par de l'eau engendre des modifications sur les valeurs de ces caractéristiques. L'effet de 7 % massique d'eau dans l'huile sur les caractéristiques sont résumés dans le tableau 3-1 ci-dessous.

Caractéristique	Huile pure	Huile + 7 % eau
Chaleur spécifique c_p (J.kg-1.K-1)	2000	2152,6
Conductivité thermique λ (W.m-1.K-1)	0.13	0,1365 $\leq \dots \leq$ 0,1587
Viscosité dynamique μ à 20°C (mPa.s)	119.9	147.1
Viscosité dynamique μ à 80°C (mPa.s)	10.5	12.3
Masse volumique ρ à 40°C (kg.m-3)	855	863.5

Tableau 3-1 : Effets de 7% d'eau sur les caractéristiques de l'huile [20].

Le tableau ci-dessus montre une nette augmentation des valeurs des caractéristiques de l'huile (ici il s'agit de l'huile ISO VG46) en présence d'une certaine quantité d'eau (7% en masse).

Dans son étude, [20] conclue que la variation de la viscosité dynamique du lubrifiant s'avère le seul paramètre agissant de manière conséquente sur les caractéristiques de fonctionnement du système lubrifié (butée). Pour toutes les vitesses et charges étudiées, l'épaisseur du film, la température et le couple de frottement calculés ont montré des sensibilités significatives à la variation de la viscosité dynamique produite par la présence de l'eau. Autrement dit, à court terme, la présence de l'eau jusqu'à 10% en masse ne montre pas d'effets négatifs sur la lubrification.

Cela montre l'intérêt de contrôler rigoureusement les huiles afin de s'affranchir de toute modification indésirable de ses caractéristiques.

III- POLLUTION SOLIDE DES LUBRIFIANTS

Comme décrit précédemment, le rôle d'un lubrifiant dans un mécanisme consiste à s'interposer entre les surfaces en contact de sorte à réduire l'interférence des rugosités et faciliter le glissement mutuel de ces surfaces réduisant ainsi les effets du frottement. En régime de frottement elastohydrodynamique (EHD), l'épaisseur du film du fluide lubrifiant est une caractéristique fondamentale qui résulte des propriétés de ce fluide.

Dans les conditions optimales de service (charge, température et vitesse), le film est censé garantir la séparation totale des deux surfaces en contact malgré l'état plus ou moins rugueux de celles-ci. En situation réelle, le fluide lubrifiant contient inéluctablement des polluants

solides qui peuvent s'introduire dans la zone de contact et perturber la continuité du film formé par le fluide lubrifiant.

Un polluant est donc une substance non désirée qui peut conduire à la détérioration d'éléments de mécanismes. Pour bien appréhender le rôle de la pollution solide des lubrifiants, il convient tout d'abord d'identifier l'origine, la nature et la forme des polluants.

III.1 ORIGINE ET NATURE DE LA POLLUTION

La pollution des huiles de graissage par des substances solides peut avoir plusieurs origines :

- **Pollution originelle** : c'est le cas par exemple la pollution est présentée dans une huile neuve comme témoin graphique à la figure 3-3; ou un circuit non ou mal rincé après réalisation (sablage, soudures, copeaux, limailles, ...). On note que les particules polluantes de très faible taille (2 à 5 μm) sont plus fréquentes.

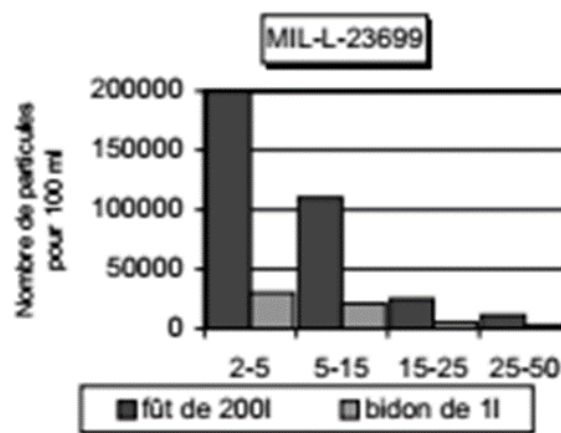


Figure 3-3: Pollution d'une huile neuve.

- **Pollution due à la fabrication.** Lors des usinages, il arrive que des copeaux ou encore des particules issus des outils coupants ou des meules de rectification restent dans le mécanisme
- **Pollution générée par l'équipement.** Lors du fonctionnement du dispositif, des particules d'usure se forment à partir des composants en mouvement. Il peut y avoir également de la pollution due à l'oxydation et à la décomposition du lubrifiant;
- **Pollution externe** : c'est une pollution ingérée de l'environnement. Cela provient d'une étanchéité insuffisante, des filtres qui n'éliminent pas toutes les particules (des filtres de taille absolue 40 μm sont utilisés dans l'automobile) ou encore de l'ouverture des réservoirs;
- **Pollution ingérée lors d'interventions sur le système** : (opérations de maintenance) : Cela se produit lors des démontages et remontages des pièces ou lors des pleins et appoints en lubrifiants.

La figure 3-4 schématise les différentes situations pouvant être à l'origine d'une pollution des huiles de graissage par des substances solides.

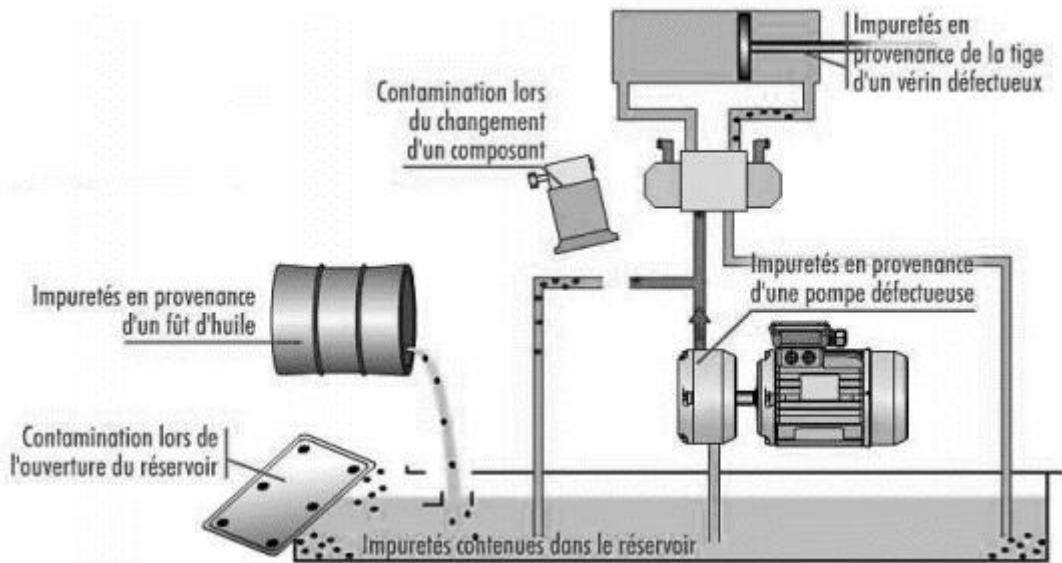


Figure 3-4 : Schématisation des différentes sources de pollution solide[L. Cuvilier, la pollution des fluides hydrauliques]

III.2 Formes et dimensions des particules polluantes

Les particules solides qui contaminent les huiles de graissage se distinguent par la nature du matériau, la forme et les dimensions.

Le tableau 3-2 ci-dessous montre, pour des huiles utilisées dans des applications aéronautiques, la diversité des particules polluantes [29]

Type	Source	Génération
Particules métalliques (Fe, Cu, Al,..)	Usinage montage	Très importantes pour les pièces neuves
	Usure, avaries	Importante en période de rodage
Carbures (B4c, Sic,...)	usinage	Faible, limitée aux pièces neuves
Minéral (Si, ...)	Interne : sable de fonderie	Faible, limitée aux pièces neuves
	Externe : ingestion en fonctionnement ou durant la maintenance	Faible à très importante (fonction de l'environnement et du type de moteur)
Oxydes et sulfures métalliques	Corrosion de surface, des particules en suspension	Tout le long de la vie du mécanisme (fonction de la température et des réactifs chimiques présents dans le lubrifiant)

Tableau 3-2 : pollutions présentes dans les turbines aéronautiques [29]

Les particules qui polluent les huiles peuvent avoir des formes très variées. Le classement basé sur la forme des particules (voir tableau 3-3.) permet également de déterminer l'origine de ces particules.








Forme	Schéma	Origine
Sphère		Agglomération et fusion de débris métalliques d'usure
Ovoïdes déformés lisses (galets)		Poussières (quartz, silice, ...) issues de l'extérieur
Gros morceaux et pavés		Particules métalliques produites par la fatigue de surfaces
Plaquettes et écailles		Particules métalliques produites lors du rodage ou d'une usure dite normale
Boucles, copeaux et lamelles		Particules produites lors de l'usinage ou par « labourage » de la surface
Rouleaux		Particules étant à la fois des copeaux et des écailles
Brins et fibres		Particules non métalliques en général issues d'une atmosphère polluée.

Tableau 3-3 : Forme des particules solides rencontrées dans les lubrifiants pollués par des substances solides. [30]

Par ailleurs, les particules solides polluant les huiles et graisses se caractérisent par leur taille qui peut varier de moins de $1\mu\text{m}$ à près de 2mm (voir figure 3-5) sachant que la limite de discrimination de l'œil humain normal est de l'ordre de $40\mu\text{m}$.

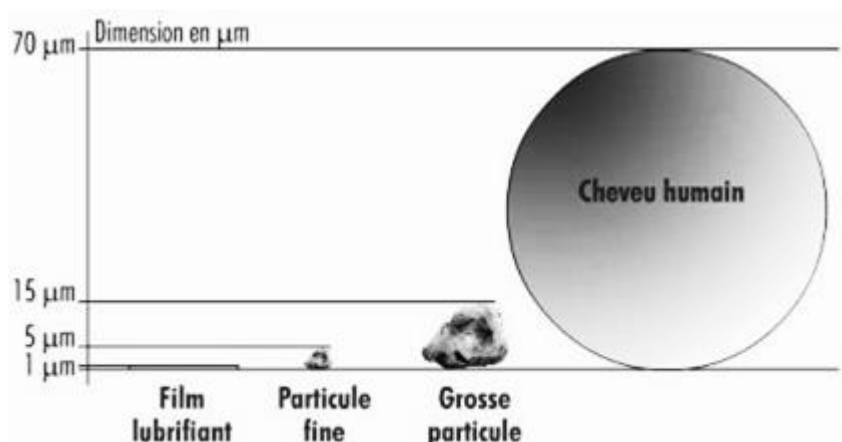


Figure 3-5 : Ordre de grandeur des particules solides par rapport au film lubrifiant et au cheveu humain.

III.3 Effets de la pollution solide sur les mécanismes

Les systèmes mécaniques qui nécessitent l'utilisation de produits lubrifiants sont les guidages (paliers lisses, paliers à roulements) et les organes de transmission de mouvement (boîte à vitesses, ...).

Ces systèmes se distinguent par leur fonctionnalité qui implique l'existence d'un mouvement relatif entre les surfaces juxtaposées. Le fluide lubrifiant constitue le troisième corps qui vient s'interposer entre les deux surfaces afin d'éviter leur contact direct et ainsi réduire l'effet du frottement.

Le jeu fonctionnel des différents composants de l'hydraulique industrielle varie entre 8 et 25 μm environ.

Or, les particules très fines qui polluent le fluide lubrifiant arrivent à passer à travers les filtres et lorsque leur taille est supérieure à celle du film lubrifiant, elles perturbent le film, rayent et indentent les surfaces. La pollution solide de la lubrification est donc un sujet d'actualité, notamment pour l'évaluation du cycle de vie.

Une étude menée par Sari et al [31] montre que la pollution d'une huile de graissage avec de la poussière de sable (concentration 7,5 g/l) modifie sensiblement certaines caractéristiques physiques de l'huile telles que la densité et la viscosité et provoque une importante usure abrasive au niveau des surfaces des composants mécaniques en action. La figure 3-6 montre les deux états de surfaces avant et après quelques heures de fonctionnement.

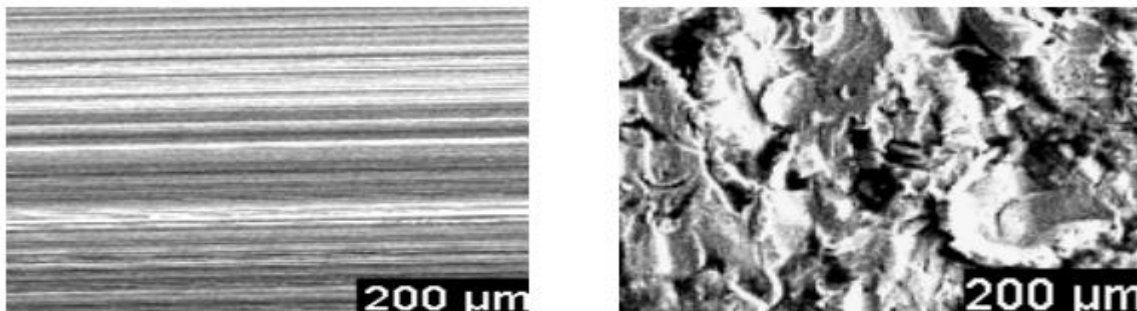


Figure 3-6 : Etat de surface d'une denture d'engrenage avant et après fonctionnement avec un graissage à l'huile polluée par de la poussière de sable [31]

Par ailleurs, les résultats d'investigations expérimentales concernant la concentration et la forme d'indentés dus aux particules sphériques métalliques et l'influence de la nature et de la taille des particules solides sur les caractéristiques des indentés ont abouti aux conclusions suivantes [32] :

- ✓ Les particules fragiles explosent dans l'entrée du contact EHD, produisant de petits fragments. Les débris plus gros que l'épaisseur du film lubrifiant indentent alors faiblement les surfaces comme cela est montré schématiquement à la figure 3-7(A).
- ✓ Les particules céramiques se brisent également dans l'entrée du contact, produisant des fragments plus gros que ceux dus aux particules fragiles. Les indents provoqués sont plus larges, profonds et ont des bords abrupts, figure 3-7(B).
- ✓ Les particules ductiles sont laminées lorsqu'elles sont piégées dans le contact. Elles produisent des indents larges et peu profonds dont la taille est liée au diamètre initial des particules, figure 3-7(C).

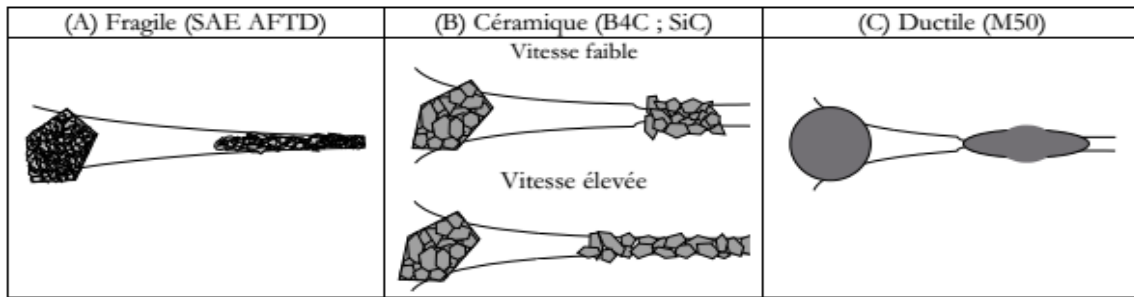


Figure 3-7 : Déformation ou fragmentation de particules pour diverses natures de particules[32]

En plus de l’indent produit par les particules solides qui se trouve imbriquées entre les deux surfaces en mouvement relatif l’une par rapport à l’autre (rotation pure, glissement pur ou glissement+rotation), on constate un effet de fatigue des surfaces qui réduit considérablement la durée de vie des éléments mécaniques.

La figure 3-8 illustre l’exemple d’intrusion de particules solides dans le tiroir d’un distributeur dans système de transmission hydraulique :

Les particules de taille supérieure au jeu fonctionnel peuvent provoquer des blocages donc des arrêts instantanés du tiroir lors de son déplacement. Tandis que les particules microniques s’infiltrent dans le jeu fonctionnel et sont à la base de l’usure des surfaces en mouvement.

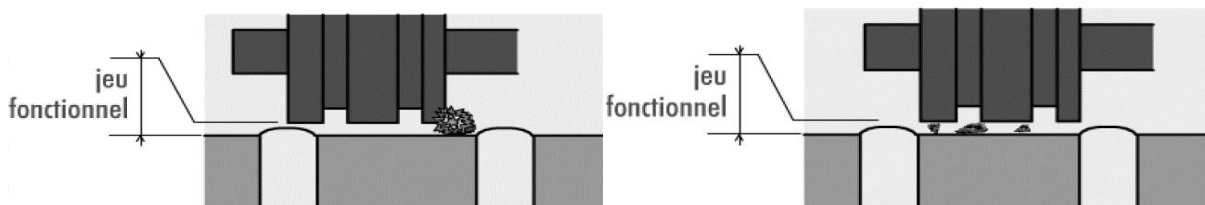


Figure 3-8 : Intrusion de particules solides dans un circuit hydraulique.

Le phénomène d’usure est caractérisé par la concentration, la taille et la morphologie des particules contenues dans l’huile. En règle générale :

- Plus l’usure progresse, plus la taille et la concentration des particules augmente ;
- Plus le système est sensible et fonctionne avec pression élevée, moins il tolère de particule.

Le tableau suivant résume le diagnostic d’après la morphologie des particules :

Formers des particulars	Type d'usure
Petites plaquettes de 0,3 µm à 5 µm	Usure adhésive
Grosses plaquettes de 5 µm à 150 µm	Grippage
Ecailles de 20 µm à 1 mm	Ecaillage
Copeaux enroulés, bouclés	Abrasion
Petites sphères métalliques de 1 µm à 5 µm	Fatigue des roulements
Grosses sphères métalliques > 10 µm	Cavitation, érosion
Sphères plastiques	Dépôts d'additifs
Magmas, agglomérations de 2 µm à 150 µm	Corrosion, oxydation

Tableau 3-4 : Types d’usure d’après la forme de particule solide

De manière générale, la pollution solide de l'huile entraîne :

- Une usure prématurée des organes mécaniques,
- Une obturation des orifices de pilotage et de drainage dans le cas des systèmes de transmission hydraulique,
- Un grippage des tiroirs et des pistons.
- Un colmatage rapide des filtres.

IV- EFFET DE LA TEMPERATURE AMBIANTE SUR LA QUALITE DE GRAISSAGE

Les huiles et les graisses utilisées pour la lubrification des systèmes mécaniques sont prévues pour fonctionner de manière optimale dans un intervalle de température bien défini pour chaque type. Généralement la plage indiquée par les fournisseurs est comprise entre -40°C et +160°C.

La température de l'endroit à lubrifier dépend d'un certain nombre de facteurs, parmi lesquels :

- Une machine thermique (moteur thermique, turbine à gaz, ..) produit de la chaleur.
- Les conditions environnantes (régions montagneuses assez froides, zones sahariennes à climat alterné ; chaud le jour et frais la nuit), industrie sidérurgique, ...
- Fonctionnement avec excès de frottement qui provoque l'échauffement excessif des organes.

Un dépassement des limites tolérées de la température de service (limite supérieure et limite inférieure) risque de dégrader les caractéristiques des huiles ou des graisses compromettant ainsi leur aptitude à assurer une lubrification efficace et durable.

Dans le cas de lubrification par circulation d'huile, un système de refroidissement permet de régénérer les caractéristiques altérées par la température de service.

La plage de température d'utilisation d'une graisse dépend du type d'huile de base et d'épaississant utilisé ainsi que des additifs. Au-delà du seuil de performance de température supérieure, la graisse vieillit et s'oxyde plus rapidement et les sous-produits d'oxydation ont un effet néfaste sur la lubrification.

De même, le fonctionnement dans des conditions de température supérieure à la limite tolérée entraîne une chute de la viscosité de l'huile et de la graisse, ce qui atténue considérablement leur aptitude à remplir leur fonction de lubrification.

Une température trop basse risque de rendre l'huile ou la graisse trop consistante et donc de s'opposer au lancement et au mouvement du mécanisme au démarrage.

V- CONCLUSION

A l'issue de ce chapitre, on peut conclure que le milieu extérieur peut agir sur le mécanisme qui est exposé aux différents facteurs polluants et aux conditions de température extrêmes. Les polluants des fluides de graissage peuvent être de nature liquide, gazeuse ou solide. La pollution aqueuse, même à faible quantité, se traduit par des effets à plus ou moins long terme et peut avoir des conséquences très nuisibles sur les caractéristiques des huiles et graisses ainsi que sur les organes lubrifiés des machines. De même, la présence de corps solides, aussi fines qu'elles soient dans le fluide lubrifiant, peut conduire à la réduction de la longévité des organes des machines et à rendre les opérations de maintenance beaucoup plus coûteuses. Les conditions de températures ambiantes doivent aussi être prises en considération car elles peuvent affecter les caractéristiques principales des huiles et des graisses. D'où la nécessité de prendre les mesures qui permettent de réduire l'effet néfaste du milieu ambiant sur la qualité de la lubrification. Ce sujet fera l'objet du chapitre suivant.

I- INTRODUCTION

La prévention et la lutte contre les effets polluants s'avèrent nécessaires afin de préserver les qualités lubrifiantes des produits de graissage. L'objectif étant, non seulement de garantir une efficacité optimale de la fonction de lubrification, mais aussi de la maintenir le plus longtemps possible. L'altération des qualités d'un fluide lubrifiant se répercute sur la longévité du mécanisme et sur la fiabilité et la sécurité de son fonctionnement. Les deux facteurs principaux qui sont à l'origine de l'altération des qualités lubrifiantes des huiles sont :

- La dégradation et l'altération physico-chimique de l'huile ;
- La contamination, présence physique de particules dans l'huile.

L'action du milieu ambiant et des conditions de service sur ces deux facteurs peut être d'une importance capitale. La prévention contre les effets néfastes de la contamination des fluides lubrifiants par l'eau ou par des corps solides est prise en charge dès la conception de la machine et devra se poursuivre tout le long de l'exploitation par les actions de la maintenance.

II- AU NIVEAU DE LA CONCEPTION

Comme indiqué au chapitre précédent, la contamination des fluides lubrifiants par l'eau ou par des corps solides peut provenir de l'action du milieu extérieur (poussières, eau, ...etc.) ainsi que de l'intérieur même de la machine (débris d'usure, fuites d'eau de refroidissement, ...etc.). Afin de réduire les risques de contamination et garantir des conditions de fonctionnement adéquates pour une durée de vie optimale de l'équipement, la conception d'une machine doit prévoir, en plus de l'état de surface convenablement élaborée pour résister à l'usure, des moyens qui permettent d'isoler les organes lubrifiés par rapport à l'action du milieu ambiant, c'est la fonction étanchéité[33].

II.1 Fonction étanchéité

La fonction étanchéité est une fonction mécanique complémentaire. Cette fonction est assurée directement par le contact des surfaces conjuguées ou par l'interposition d'organes spécifiques (joints ou garnitures).

Les joints d'étanchéité peuvent se classer en deux catégories : les joints statiques utilisés entre des surfaces immobiles et les joints dynamiques employés pour des pièces en déplacement les unes par rapport aux autres. Au moment du choix de type de joints, on doit savoir si celui-ci est destiné à empêcher un fluide de sortir du mécanisme, s'il doit empêcher l'entrée de corps

étrangers ou les deux à la fois. En cas de joint dynamique, il y a lieu de prendre en considération la nature du mouvement entre les pièces (rotation, translation, ...etc.), l'amplitude de ce mouvement ainsi que la vitesse relative entre les pièces conjuguées.

II.1.1 Joints statiques

En cas de joints statiques, l'étanchéité peut être assurée par des garnitures démontables ou indémontables ou par des produits d'étanchéité comme les mastics. On distingue :

- a) **Joint à serrage.** Il peut être axial ou radial. Dans ce cas, on utilise soit le principe des emmanchements et frettage, soit la déformation de la matière (exemple : assemblage des tubes bordés).
- b) **Joints démontables.** Ces joints existent en de nombreuses variantes (joints plats, joints toriques, joints profilés). L'étanchéité s'obtient par pression initiale sur le joint. Certains joints sont prévus pour un démontage fréquent du mécanisme.
- c) **Joints à manchon.** On distingue les manchons rigides (utilisés par exemple pour obtenir l'étanchéité dans les raccords des conduites) et les manchons élastiques.

La figure 4-1 donne une idée sur les différents types de joints statiques que l'on peut rencontrer en industrie mécanique[33].

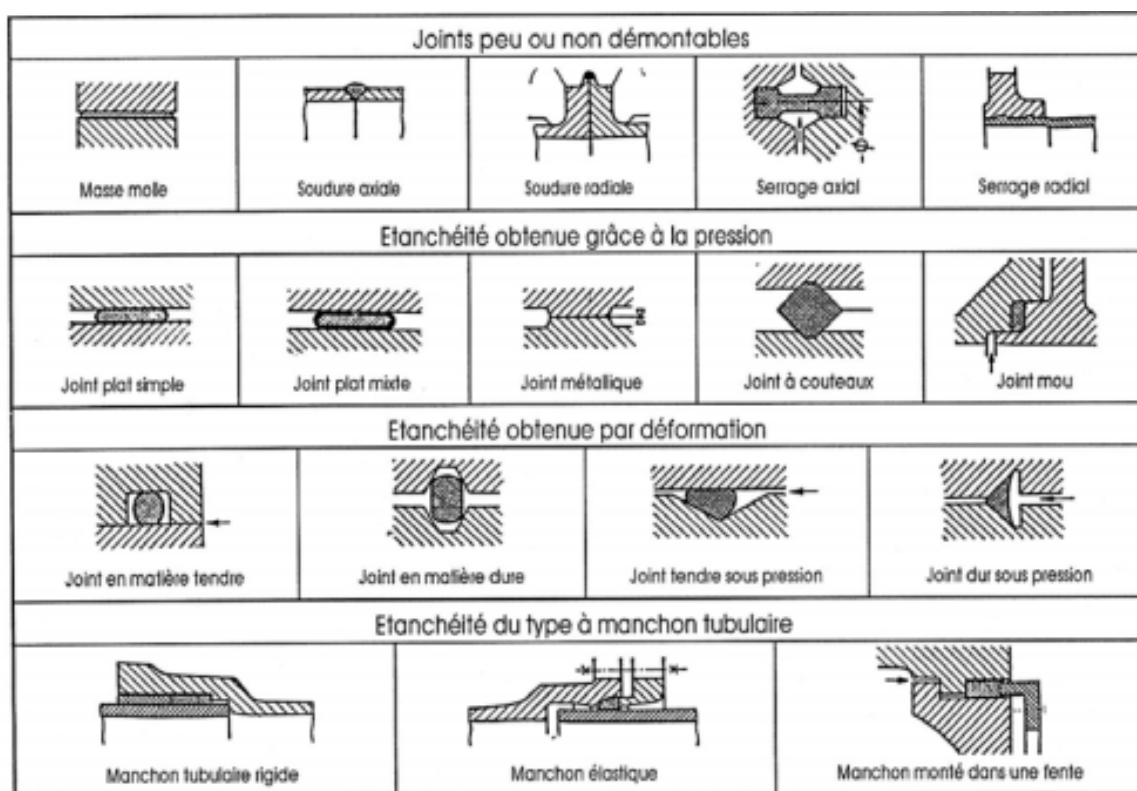


Figure 4-1 : classification des joints statiques [33]

II.1.2 Joints dynamiques avec contact

Le joint dynamique doit empêcher le passage du fluide suivant trois cheminements : entre le joint et la surface mobile, entre le joint et la partie fixe et à l'intérieur des composants du joint. Le joint assure l'étanchéité dans des mouvements de translation, de rotation ou une combinaison de ces deux mouvements. L'ensemble des joints dynamiques avec contact peut se subdiviser en diverses catégories selon le principe utilisé[34].

- a) **Joints pour pièces cylindriques en translation.** Ces joints agissent sur des surfaces cylindriques intérieure ou extérieure. L'élément d'étanchéité est fixe dans l'une des pièces. Ce type de joints est utilisé pour assurer l'étanchéité des éléments pneumatiques et hydrauliques.
- b) **Joints pour pièces cylindriques en rotation.** Ces joints agissent principalement dans la direction radiale. L'élément d'étanchéité est soit en rotation avec l'arbre, soit immobile dans son logement.
- c) **Joints annulaires.** C'est le cas des joints à presse-étoupe. La pression sur la surface cylindrique est obtenue par un fouloir agissant dans le sens axial. La déformation radiale résultante engendre la pression sur les surfaces. Les joints annulaires utilisent des matériaux très déformables comme les élastomères. Ils existent en de nombreuses variantes et se distinguent par la forme de la section transversale, leur aptitude à la déformation et leur composition.
- d) **Joints à lèvres.** Les joints à lèvres et manchettes, appelés très souvent joints hydrauliques, assurent l'étanchéité surtout par l'action de la pression. Ils nécessitent une pression préliminaire avec les pièces fixes et mobiles. La forme imposée au joint et sa composition permettent d'obtenir une étanchéité soit purement axiale, soit combinée à l'étanchéité radiale.
- e) **Joints à segments.** Les joints durs à segment travaillent généralement en série et la fonction résultante de l'ensemble dépend de la capacité de chacun des composants, de la disposition des divers anneaux entre les pièces fixes et mobiles. Le comportement du segment est influencé par la variation de la pression à étancher, les effets de la masse, les conditions de lubrification et le frottement.
- f) **Garnitures mécaniques.** Les garnitures mécaniques, utilisant l'étanchéité radiale, existent en de nombreuses variantes. Elles sont caractérisées par la possibilité de s'adapter à la pression de service. Les conditions de fonctionnement dépendent du type de frottement : sec ou mixte, hydrodynamique ou hydrostatique.

Sur la figure 4-2 sont représentés schématiquement les divers joints dynamiques avec contact.

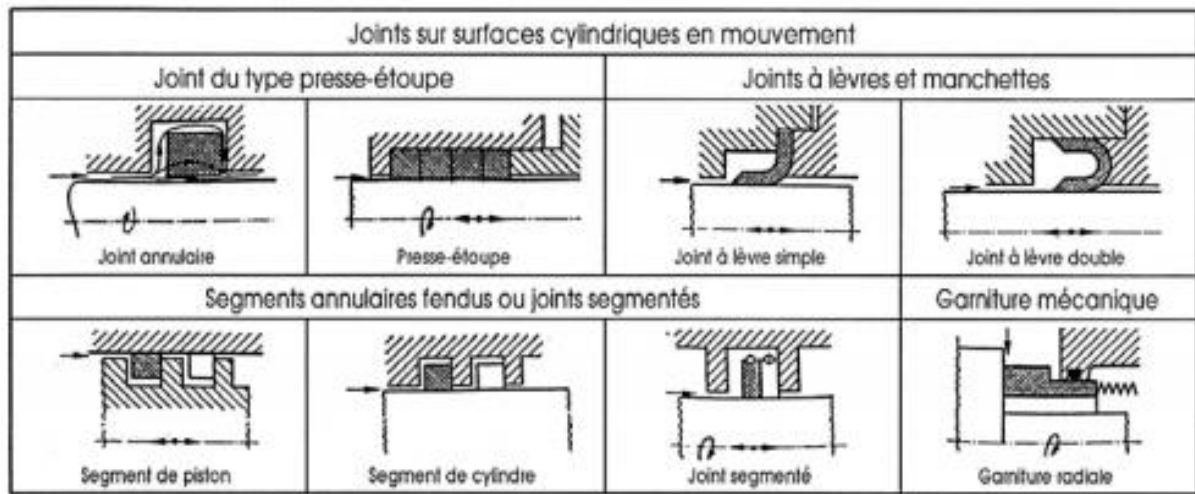


Figure 4-2 : classification des joints dynamiques avec contact [34].

II.1.3 Joints dynamiques sans contact

Les joints sans contact entre les pièces fixes et mobiles utilisent les lois de la mécanique des fluides pour assurer l'étanchéité. La présence d'une ou de plusieurs fentes, alimentées en fluide, permet de calculer les pertes entre les divers milieux. On distingue (voir figure 4-3)[35].

- Etanchéité à fente.** Les joints à fente, formant une résistance à l'écoulement du fluide entre deux ou plusieurs milieux, utilisent le frottement de l'écoulement ou la formation de tourbillons. Ils présentent toujours des fuites. L'écoulement s'effectue soit dans la direction axiale, soit dans la direction radiale, soit dans une combinaison de ces deux écoulements.
- Etanchéité à labyrinthe.** Dans ce cas, l'écoulement est caractérisé par la formation de tourbillons grâce à la présence de chicanes placées dans l'écoulement radial ou axial. La forme du labyrinthe permet de distinguer la chicane simple sur l'une des pièces de la chicane double placée sur les deux pièces.
- Etanchéité à barrière.** Dans les joints avec barrière fluide, la contre pression peut se créer dans le joint lui-même soit par l'entraînement radial, soit par un mouvement hélicoïdal comme dans le joint à filetage. La barrière de pression peut provenir d'une alimentation extérieure. Cette solution provoque aussi une évacuation du fluide à étancher.
- Etanchéité à membrane.** Les joints à membrane possèdent une pièce intermédiaire très déformable (membrane ou soufflet) placée entre la partie fixe et la partie mobile. La séparation entre les deux côtés de la membrane est particulièrement efficace.

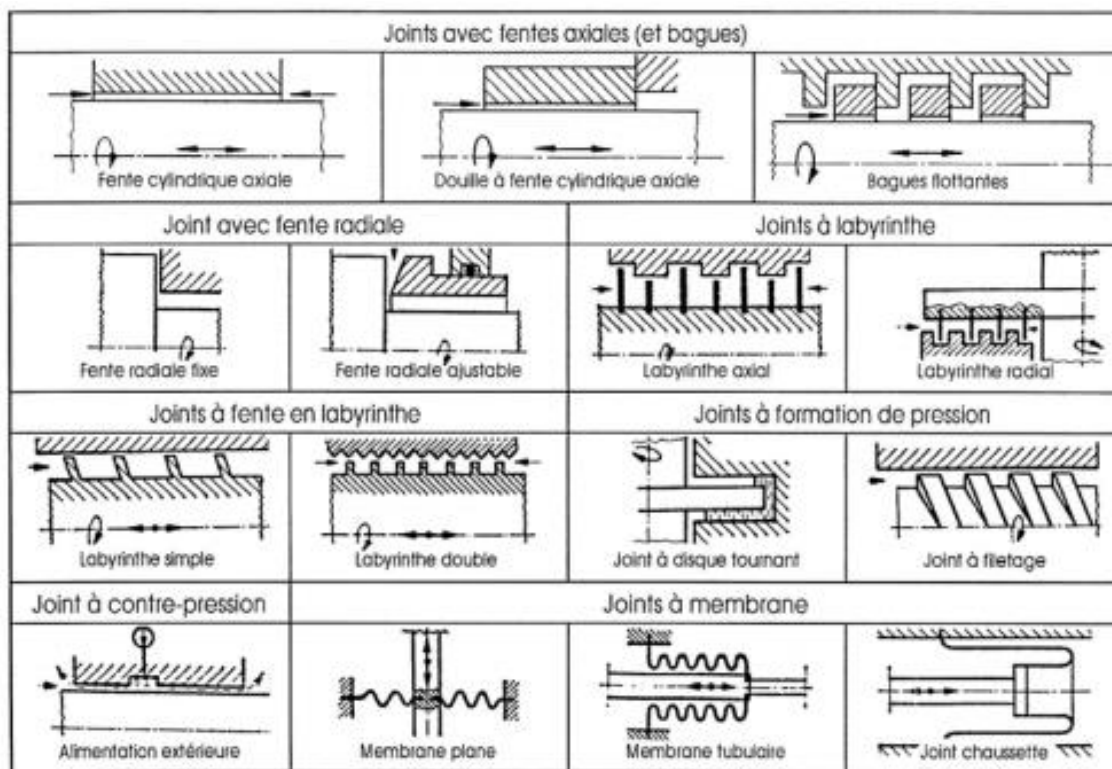


Figure 4-3 : classification des joints dynamiques sans contact [35].

L'industrie moderne met à la disposition des constructeurs de machines des joints d'étanchéité de divers matériaux et dans différentes configurations. Le choix du type de joint doit prendre en considération les conditions de fonctionnement du mécanisme et la sévérité de service.

II.2 Fonction filtration

La filtration de l'huile joue un rôle majeur dans le monde industriel. En effet, les études ont montré que la pollution des fluides lubrifiants est à l'origine de 70% des pannes de composants mécaniques. La filtration sert à maintenir le nombre de particules circulant à l'intérieur du circuit à un niveau acceptable. L'organe chargé de cette fonction est le filtre à huile.

II.2.1 Le filtre à huile

Le filtre est un élément essentiel pour tous les systèmes de lubrification et son rôle est de prévenir l'usure prématurée des composantes et de maximiser la performance de l'équipement. A titre d'exemple, le filtre à l'huile représenté sur la figure 4-4 est utilisé pour débarrasser les impuretés présentes dans l'huile d'un moteur thermique.

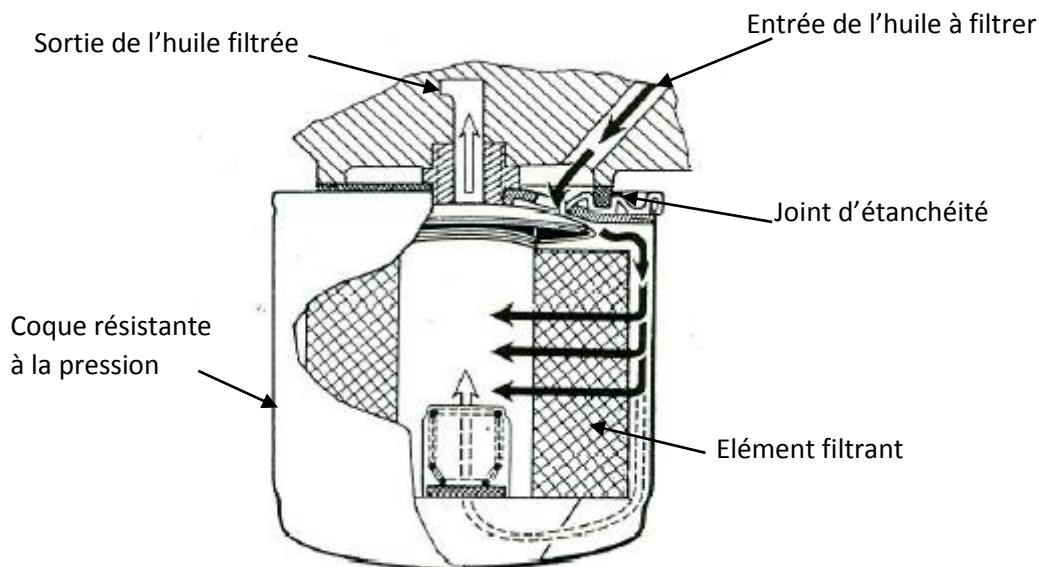


Figure 4-4 : Schéma du filtre à huile

II.2.2 Caractéristiques principales d'un filtre :

Il est difficile de faire un rapprochement entre un niveau de pollution et l'efficacité des filtres hydrauliques. Les constructeurs proposent des tableaux résumant la classe de pollution, le nombre de particules pour 100 ml, le type de système et l'efficacité que doit avoir le filtre pour atteindre cette classe.

Un filtre peut être défini par les caractéristiques suivantes :

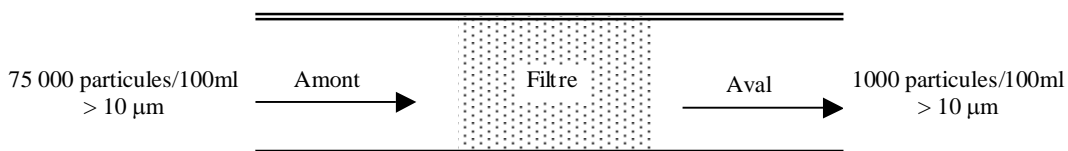
- a) **Valeur β .** C'est une valeur qui exprime le rapport entre le nombre de particules en amont du filtre et le nombre de particules en aval.

$$\beta = \frac{\text{Nombre de particules en amont}}{\text{Nombre de particules en aval}}$$

Exemple : $\beta_{X_{10}} > 75$

10 correspond à la taille des particules en μm

75 est la valeur de β



Dans l'exemple, $\beta = 75000/1000 = 75$

b) **Taux de rétention** : donné par l'expression :

$$\text{Taux de rétention en \%} = \frac{\beta_x - 1}{\beta_x} \times 100$$

Dans l'exemple $\beta_{x_{10}} > 75$, le taux de rétention est : $\frac{75-1}{75} \times 100 = 98,67\%$

c) **Finesse de filtration** : exprime, en μm , les dimensions des particules que le filtre peut retenir. exemple : 3, 5, 10, 20, 25 μm

Particulièrement pour les moteurs thermiques, le filtre d'huile est composé d'un papier poreux (soit lisse, ou plissé, ou en chevron) dont le seuil de filtration ne permet le passage qu'aux particules de 15 à 20 microns, voire 5 à 10 pour les moteurs turbocompressés.

Quand on parle de filtration dans les véhicules modernes, il s'agit en première ligne de filtres à lit profond. On utilise ces éléments filtrants spéciaux quand il faut extraire des particules de liquide (huile ou carburant) ou de gaz (air) si possible à 100%. L'extraction des particules se produit dans la structure en profondeur de l'élément filtrant à la surface des différentes fibres. Ces impuretés peuvent être des poussières, des particules métalliques dues à l'usure ou encore des déchets carbonneux issus d'une combustion incomplète et toutes les boues formées par une mauvaise combustion. Mais il faut extraire du système moyennant des filtres non seulement les particules solides mais également l'eau de condensation dans les conduites de carburant et les gouttelettes d'huile sous forme liquide, qui se forment dans le système d'aération du carter de vilebrequin.

II.3 Systèmes de refroidissement des huiles de graissage

Le maintien de la température à un niveau tel qu'il ne risque pas de compromettre les qualités de l'huile, telle que la viscosité, revêt une importance capitale pour tout système mécanique. L'excès de température est dû au frottement dans les différentes liaisons de guidage de la machine, mais dans le cas particulier des moteurs thermiques, le réchauffement de l'huile est plus sévère à cause de la combustion. L'évacuation de l'excès de chaleur se fait au moyen d'ailettes aménagées sur le carter du mécanisme ou, le cas échéant, renforcé par un système de refroidissement à circulation d'air ou à circulation d'eau[36].

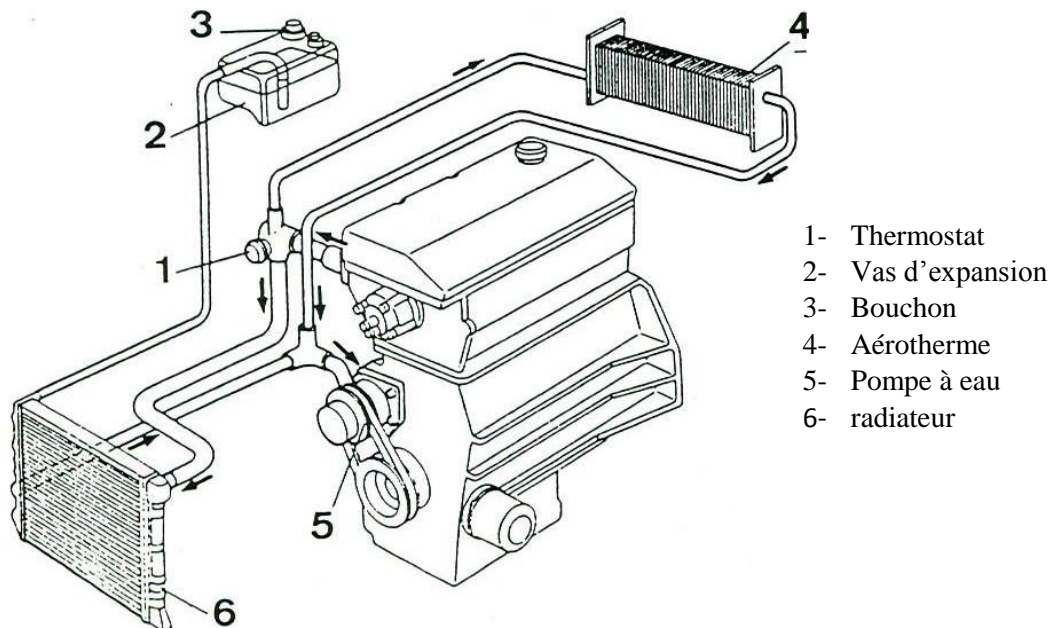


Figure 4-5 : Circuit de refroidissement pour moteur thermique

III- AU NIVEAU DE LA MAINTENANCE

Le rôle de la maintenance est primordial pour ce qui est de la préservation des qualités lubrifiantes de fluides de graissage et ainsi éviter la dégradation prématurée des mécanismes et des machines.

En maintenance préventive (conditionnelle ou prévisionnelle), on procède la surveillance de l'état du matériel afin de détecter les signes d'anomalie et ainsi prendre les mesures nécessaires afin d'éviter l'arrêt total ou une dégradation irréversible du matériel. La température et les vibrations sont parmi les paramètres les plus significatifs de l'état du matériel.

III.1 Origines de l'échauffement des systèmes mécaniques

Les échauffements et sur-échauffements dans les systèmes mécaniques ont des origines diverses et variées, dans le sens où des effets peuvent devenir des causes. Les principales causes identifiables sont multiples. On peut en citer [37]:

- a) les erreurs de montage, de réglage, de dimensionnement,
- b) des déformations importantes des matériaux,
- c) un excès ou un manque de lubrification,
- d) la qualité du lubrifiant, la nature inadaptée du lubrifiant,
- e) des composants non conformes,
- f) une usure «normale» qui peut être aussi la cause d'autres dysfonctionnements.

Un effet plus facilement constatable est le grippage, car il entraîne un arrêt immédiat de l'installation, avec toutes les conséquences qui en découlent en termes de disponibilité, durée d'intervention etc... Des effets extrêmes peuvent parfois survenir, rarement dans l'industrie, mais plus fréquemment rencontrés dans le monde agricole, tels que des incendies d'équipements.

III.2 Analyse de cas (échauffement d'un réducteur à engrenages) :

En mécanique, un réducteur est un système de transmission de mouvement entre un arbre moteur et un arbre récepteur. Il a pour but de modifier le rapport de vitesse et/ou du couple transmis. Les éléments de transmission dans un réducteur à engrenages sont soumis à des efforts qui engendrent des pressions importantes au niveau des surfaces des dentures conjuguées. Leur lubrification est souvent réalisée à l'aide d'huile ou de graisse.



Figure 4-6 : Réducteur à engrenage

L'échauffement que l'on peut constater sur un réducteur de vitesse peut être dû à [37].

- Une des causes principale d'échauffement est le défaut de lubrification. Pour la graisse, celui-ci est dû soit à un excès ou un manque de graisse, soit à une détérioration des caractéristiques de celle-ci. Il est très important de bien respecter les quantités et intervalles de lubrification. Attention au stockage des graisses : si le volume de graisse est important, il faut prévoir une analyse du lubrifiant.
- Pour l'huile par barbotage, les causes les plus fréquentes sont le manque d'huile, la perte des qualités de celle-ci et la pollution externe ou due à l'usure. Avant de mettre en place des moyens lourds, une bonne surveillance des niveaux est importante. Pour le suivi du lubrifiant, des analyses sont à effectuer : viscosité, TAN, teneur en eau, spectrométrie pour la qualité du lubrifiant, comptage de particules pour la pollution.

- Pour une lubrification par circuit, les causes sont identiques mais d'autres moyens de surveillance peuvent être mis en place tels que le suivi des débits (mise en place de débitmètres), le remplacement des filtres au bon moment (mise en place d'indicateurs de colmatages).
- D'autres causes d'échauffement des réducteurs sont :
 - le mauvais réglage après réparation et le non-respect des jeux dans les roulements et de denture.
 - le sous dimensionnement du réducteur. Il faut se rappeler que l'huile se dégradera plus rapidement (il est généralement admis que la durée de vie est divisée par deux pour chaque tranche de 10 degrés au-dessus de 70°C).

La périodicité des vidanges et des analyses devra être accrue. Un suivi des températures peut être réalisé, il permettra de déclencher une opération de maintenance, mais ne donnera pas la cause réelle de la défaillance. La mise en place de contrôle ou d'analyse vibratoire est préférable car elle permet de mieux anticiper et localiser la défaillance.

Pour réduire ou mieux éviter les dégradations liées aux surchauffes, comme souvent, deux tendances de maintenance préventives se dégagent : soit agir sur les causes, soit une surveillance de l'état des composants mécaniques. C'est un choix qui dépend entre autre de la criticité de l'équipement.

IV- AU NIVEAU DU CONTROL DE QUALITE

Une huile de graissage finie toujours par se dégrader, même si le mécanisme lubrifié fonctionne dans des conditions dites idéales. L'altération physico-chimique de l'huile ainsi que la contamination par la présence physique de particules réduisent les qualités lubrifiantes et augmentent le risque d'usure intempestive des organes lubrifiés. Les analyses visuelles et physico-chimiques de l'huile permettent d'en détecter les différentes altérations.

La procédure d'analyse d'huile repose sur l'étude d'un échantillon prélevé directement sur le mécanisme. Lors du prélèvement, il y a lieu de prendre les précautions afin d'éviter l'ajout de particules issues de l'atmosphère ambiante.

Le couplage de plusieurs essais est souvent nécessaire pour un diagnostic complet. L'analyse peut être découpée en quatre catégories :

- examens physico-chimiques ;
- comptage de particules ;

- examens spectrométriques ;
- examens ferrographiques.

IV.1 Les examens physico-chimiques

Les examens physico-chimiques permettent de vérifier l'état de l'huile utilisée. Ils passent entre autres par une mesure de la viscosité, de la teneur en eau, de l'acidité et de la basicité de l'huile

IV.1.1 Contrôle de la viscosité

Ce contrôle est essentiel car il permet entre autres de détecter un échauffement important de l'huile ou son éventuelle dilution par du carburant par exemple.

Une modification sensible de la viscosité signifie généralement [descriptif des analyse des fluides lubrifiants]:

- La détérioration thermique ou chimique du lubrifiant
- La pollution par le combustible (dilution)
- La pollution par les suies de combustion (mauvaise combustion)
- La pollution par un autre fluide

Le contrôle de la viscosité peut se faire à l'aide de plusieurs moyens tels que le viscosimètre capillaire (voir figure 4-7), le viscosimètre à chute de bille, le rhéomètre ou le viscosimètre absolu.

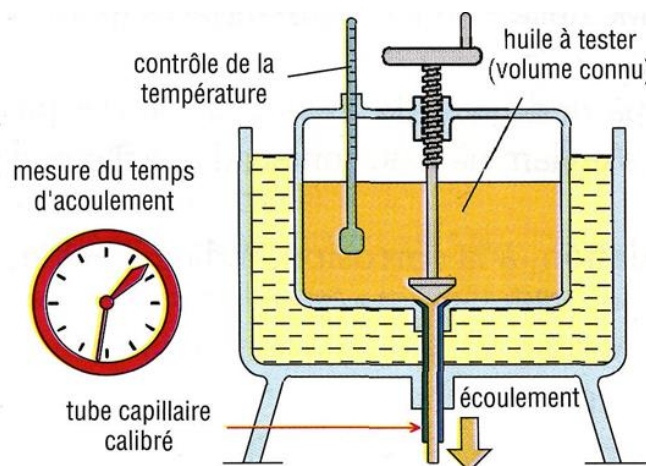


Figure 4-7 : viscosimètre capillaire.

IV.1.2 La teneur en eau

La teneur en eau dans l'huile est obtenue par chromatographie en phase gazeuse. Il est alors possible de détecter une éventuelle infiltration de l'extérieur. L'eau étant un très mauvais lubrifiant en milieu métallique, la présence d'eau dans une huile doit être limitée. Les teneurs maximales sont indiquées dans le tableau ci-dessous [description 4-1].

Application	Teneur maximale
Fluide hydraulique minéral, huile pour turbine	0,2%
Huiles mouvements, réducteurs	0,5%
Huiles pour compresseurs frigorifiques	100ppm = 0,01%
Huiles isolantes	30 ppm = 0,003%
Huiles de trempe	0,02%

Tableau 4-1 : teneur maximale en eau des huiles selon le domaine d'application [38]

IV.1.3 L'acidité et de la basicité

L'acidité de l'huile est exprimée par TAN (Total AcidityNumber) tandis que la basicité est exprimée par TBN (Total BasicityNumber). Ceci permet de connaître le niveau de dégradation de l'huile. En effet la précipitation ou la destruction de certains additifs conduit à l'acidification de l'huile par exemple.

IV.2 Le comptage de particules

Le comptage de particules présentes dans l'huile donne des informations sur le niveau d'usure d'un mécanisme. En effet il est maintenant bien établi que la vie d'un mécanisme peut se lire sur sa courbe d'usure (figure 4-8). La première partie correspond au rodage du mécanisme. Le volume d'usure est important mais va toujours en diminuant. Cette zone est suivie par un plateau qui correspond au fonctionnement normal du mécanisme. L'usure est faible. Enfin la troisième partie témoigne d'une augmentation rapide du volume d'usure. Il s'agit de la fin de vie du mécanisme et la rupture d'un ou plusieurs éléments est proche. Il apparaît donc clairement que le suivi de la quantité de polluants solides présents dans le mécanisme peut donner des informations capitales sur son état de santé.

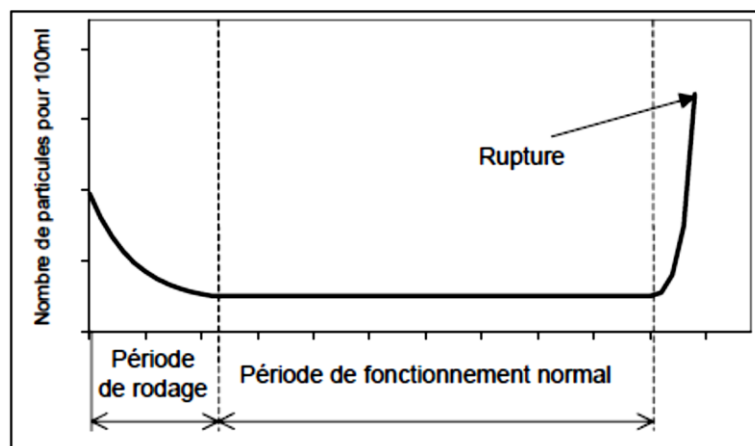


Figure 4-8 : Courbe en baignoire

Le comptage des particules peut être effectué par microscope après filtration sur membrane, transparisation et comptage statistique et par un capteur optique.

Cette technique permet de déterminer le degré de pollution solide et le situer par rapport aux normes en vigueur (voir tableau 4-2). Sur ce tableau sont indiqués, pour chaque classe, le nombre maximal de particules pour 100ml d'huile pour un intervalle de taille de particules.

Classe	5 à 15 μm	15 à 25 μm	25 à 50 μm	50 à 100 μm	> à 100 μm
3	2000	356	63	11	2
4	4000	712	126	22	4
5	8000	1425	253	45	8
6	16 000	2850	506	90	16
7	32 000	5700	1012	180	32
8	64 000	11 400	2025	360	64
9	128 000	22 800	4050	720	128
10	256 000	45 600	8100	1440	256
11	512 000	91 200	16 200	2880	512
12	1 024 000	182 400	32 400	5760	1024

Tableau 4-2 : classe de pollution d'après NAS 1638.

Les niveaux de pollution suggérés sont indiqués dans le tableau 4-3

Classe de pollution NAS 1638 la plus proche	Nb de particules suggéré pour 100ml		Sensibilité du système	Type de système hydraulique	Efficacité des filtres
	5µm	15µm			
4	4000	250	Super critique	Système sensible aux boues microniques à très haute fiabilité. Laboratoire et Aérospatiale.	$\beta_{1\mu 2} > 75$
6	16 000	1000	Critique	Système à haute pression à longue durée de vie. Servo-système, MOCN, banc d'essai.	$\beta_{3\mu 5} > 75$
7	32 000	4000	Très importante	Système fiable de haute qualité. Besoins industriels généraux, Machines-outils, sidérurgie, etc..	$\beta_{6\mu 12} > 75$
9	130 000	8000	Importante	Système moyenne pression, moyenne capacité. Systèmes mobiles et besoins industriels généraux	$\beta_{12\mu 15} > 75$
10	250 000	16 000	Moyenne	Système à basse pression. Industrie lourde et applications où une longue durée de vie n'est pas demandée.	$\beta_{15\mu 25} > 75$
12	1 000 000	64 000	Faible	Système à basse pression à tolérances larges.	$\beta_{25\mu 40} > 75$

Tableau 4-3 : niveau de pollution suggérés par différentes applications. [38]

IV.3 Les examens spectrométriques

Les examens spectrométriques menés sur une huile permettent de connaître la composition chimique des particules présentes. Ces particules peuvent provenir :

- de l'usure des pièces en mouvement. Les éléments alors détectés seront le fer, le cuivre, le plomb, le nickel, le chrome... ;
- de l'extérieur du mécanisme. Le silicium sera alors particulièrement recherché durant l'analyse,
- des additifs de détergence, de dispersivité, des anti-oxydants et anti-usures contenus dans l'huile vierge.

IV.4 La ferrographie

La ferrographie étudie uniquement les particules magnétisables présentes dans l'huile. Elle les classe par dimension et par susceptibilité magnétique. On détermine l'état de santé d'une machine en évaluant la concentration totale en particules d'usure et en examinant la proportion de grandes particules ferromagnétiques.

IV.4.1 Ferrographie à lecture directe ISU (Indice de Sévérité d'Usure) :

Elle donne un indice de sévérité d'usure. Elle est basée sur l'extraction des particules solides magnétisables contenues dans le lubrifiant, à l'aide d'un champ magnétique. Les particules ferromagnétiques supérieures à 0,1 μm forment un dépôt après avoir parcouru quelques millimètres au travers du champ magnétique alors que les particules non ferromagnétiques sont fixées à distance. La dimension de ces particules ferromagnétiques décroît avec le chemin parcouru. La ferrographie à lecture directe permet de façon simple et peu onéreuse de caractériser l'évolution de l'usure.

IV.4.2 Ferrographie analytique :

Elle est utilisée pour effectuer une analyse approfondie des particules comprises entre 1 et 250 μm , lorsque la ferrographie à lecture directe indique une usure importante. On étudie à l'aide d'un microscope bi-chromatique la forme et la couleur des particules déposées, afin de les identifier. On peut en outre, grâce à la lumière polarisée, distinguer au cours de l'examen optique, les particules cristallines d'une part, et les substances amorphes d'autre part.

Remarque : il existe bien d'autres procédés d'analyse de l'huile de lubrification que permettent, entre autre, de déterminer la rigidité électrique et le point d'éclair.

IV.5 Fréquence d'analyse

En principe, il se conformer aux instructions du constructeur pour le choix du type d'analyse et de la fréquence. Cependant, en l'absence de toute recommandation, on analyse à chaque vidange du circuit. Entre les vidanges, les fréquences conseillées sont indiquées sur la tableau 4-... suivant :

Application	Fréquence conseillée
Compresseurs d'air	chaque 500 h puis espacer à 1000 h si tout paraît correct
Compresseurs de gaz	chaque 500 h puis espacer à 1000 h si tout paraît correct
Circuits hydrauliques	1000 h
Circuits caloporteurs	1000 h
Compresseurs frigorifiques	de 1000 h à 2000 h
Turbines	2000 h
Réducteurs et engrenages	2000 h
Huiles mouvements	2000 h
Bains d'huiles de trempe	2000 h
Fluides isolants	5000 h
Huiles moteurs	15 000 km ou 250 h
Fluides de coupe aqueux	1 à 4 semaines
Fluides de coupe entiers	2 à 4 mois

Tableau 4-4 : fréquences d'analyse d'huile de graissage pour différentes applications [38]

V- AU NIVEAU DU STOCKAGE DES PRODUITS LUBRIFIANTS

Les conditions dans lesquelles sont stockés les lubrifiants peuvent avoir un effet négatif sur leurs performances. Le contrôle des stocks peut aussi jouer un rôle important. Il est donc recommandé d'adopter une politique de « premier entré-premier sorti » pour les stocks.

Les propriétés du lubrifiant peuvent varier considérablement pendant le stockage en raison de l'exposition à l'air/oxygène, la température, la lumière, l'eau, l'humidité et d'autres contaminants, ou la séparation de l'huile. Par conséquent, les lubrifiants doivent être stockés dans un endroit frais et sec à l'intérieur et ne jamais être directement exposés aux rayons du soleil. Les lubrifiants doivent être stockés dans leur conteneur d'origine, qui doit rester fermé jusqu'à utilisation. Après utilisation, le conteneur doit être refermé immédiatement.

La durée maximum de stockage recommandée est de deux ans pour les graisses et dix ans pour les huiles lubrifiantes, en supposant que des bonnes pratiques de stockage sont suivies et qu'une protection efficace est assurée contre la chaleur et le froid [SKF].

VI- CONCLUSION

Pour conclure, on peut dire que les moyens de prévention contre la dégradation des fluides de graissage et préserver leurs qualités lubrifiantes le plus longtemps possible sont multiples et sont pris en compte dès la conception du système mécanique.

Les produits de contamination, qu'ils soient liquides, solides ou gazeux, peuvent provenir du milieu ambiants comme de l'intérieur du système lui-même. De même pour ce qui est de l'excès de température.

Les mesures de prévention contre l'intrusion de corps étrangers consistent à choisir les dispositifs d'étanchéité adéquats en prenant en considération la nature de la liaison à lubrifier et les conditions de fonctionnement. Parmi les facteurs, on cite notamment la sévérité du milieu ambiant (poussière, humidité, agressivité chimique, ...etc.), la différence de pression entre les milieux à séparer, la température de service, ...etc. En cas de nécessité, il y a lieu de prévoir des systèmes de refroidissement qui permettent de régénérer les qualités lubrifiantes des huiles ainsi que des moyens de filtration pour écarter les particules qui peuvent s'accumuler dans l'huile durant la fonctionnement du mécanisme.

Par ailleurs, le rôle de la maintenance n'est pas à négliger dans ce domaine. En effet, le contrôle périodique de la qualité de l'huile permet de déceler les défauts et de prendre les mesures nécessaires pour en réduire les conséquences fâcheuses.

A noter aussi que la prévention de la dégradation des qualités de produits lubrifiants exige le respect des instructions relatives aux conditions de stockage et de renouvellement.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans la présente étude, on a examiné un problème qui touche, indifféremment, tous les secteurs industriels et tout système mécanique présentant des organes en mouvement mutuel quel que soit l'amplitude ou la fréquence de ce mouvement. Il s'agit du phénomène de frottement et ses effets négatifs sur le rendement et sur la longévité du mécanisme. Plus précisément, on a considéré l'action du milieu ambiant sur les performances des produits lubrifiants utilisés pour réduire l'effet du frottement ainsi que les moyens de prévention qu'il faut adopter.

Afin de mieux cerner le problème et mettre en évidence l'action nocive du frottement, on a commencé par donner un aperçu général sur le phénomène de frottement tout en indiquant les différentes formes et les principes qui régissent. Les conséquences du frottement sont multiples. Certains peuvent même être considérés comme tout à fait utiles, voir même indispensables à tout progrès humains, mais bien d'autres sont à mettre dans la case des effets négatifs, voir même dévastateur si certaines mesures ne sont pas appliquées et suivies avec soin. Parmi les effets indésirables du frottement on peut citer la baisse du rendement des mécanismes ainsi que l'usure prématurée de ses organes.

La lubrification, en tant que solution adoptée par l'homme depuis longtemps, est appliquée à une large échelle dans le domaine industriel et a connue de remarquables progrès tant sur le plan de l'efficacité que sur le plan de l'adaptation aux diverses spécificités de service. L'ensemble de ces qualités peut être compromis par l'action du milieu ambiant. Cette action peut se manifester par l'intrusion de corps étranger, solides, liquides ou gaz, comme par l'effet de la température extérieure (chaleur ou froid).

Pour parer à ces effets, on a préconisé une série de mesures qui vont de la phase de conception jusqu'à la mise en service la maintenance du système en passant par les conditions de stockage et de manutention des produits lubrifiants.

En effet, la prévention et le contrôle de qualité restent les moyens les plus efficaces pour la préservation des qualités des produits lubrifiants et en garantir les performances optimales et ce dans l'intérêt du bon rendement et de la longévité du mécanisme.

Références bibliographiques :

- [1] <http://fr.wikibooks.org/wiki/Tribologie> (livre sur internet)
- [2] <http://mathias.bavay.free.fr/these/html/>
- [3] <http://www.caradisiac.com/>
- [4] <http://pagesperso-orange.fr/christian.chamayou/chameca/Cours/Frottement.pdf>
- [5] <http://espace-prepa.ifrance.com/textes/etancheite.pdf>
- [6] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Usure_des_surfaces]
- [7] J. AVEL M. born, lubrification et fluides pour l'autonobile, publications de l'Institut Français du Pétrole, Ed. technip, 1998
- [8] S. Maatallah, thèse de Doctorat, Influence de la pollution solide sur les contacts Élasto-hydrodynamiques (EHD), Univ. Skikda, 2016
- [9] https://fr.wikibooks.org/wiki/Tribologie/Lubrifiants/Lubrifiants_liquides
- [10] Castrol, ABC du graissage - Structure, Utilisation et propriétés des lubrifiants. HC 04(2006)
- [11] N. Bensalem, lubrification et graissage, <http://www.technologuepro.com>
- [12] www.technologuepro.com
- [13] V. S.-Holm. Les huiles naphthéniques sont les plus adaptées au travail des métaux. NynasNaphthenics. 4 (2002)
- [14] Méthodes de Maintenance, graissage et lubrification, <https://www.scribd.com>.
- [15] <http://tpmattitude.fr/lubrification.html>
- [16] fr.wikibooks.org/wiki/Tribologie/Lubrifiants/Lubrifiants_solides_et_vernis
- [17] N. Bensalem, Catégories courantes des huiles industrielles,
- [18] R. Lefevre, Graissage et tribologie, T1 Lubrifiants et processus de graissage, Ed. technip, 1975.
- [19] J.C. Bernard predictive & preventive maintenance in lubricating systems by, dated June 2004.
- [20] H. Elias these Impact d'une pollution des lubrifiants par de l'eau sur le fonctionnement des organes de guidage des machines tournantes l'Université de Poitiers, 2011
- [21] R E Cantley (1976). "The effect of water in lubricating oil on bearing fatigue life". ASLE TRANSACTIONS, Vol 20,.
- [22] R Pal, E Rhodes (1985). "A novel viscosity correlation for non-newtonian concentrated emulsions". Journal of Colloid and Interface Science, Vol 107,.
- [23] Wilson "Problems encountered with turbine lubricants and associated systems". Lubrication Engineering, Vol 32, (1976).
- [24] A C Eachus. "Water, water everywhere nor any drop to drink". Tribology & Lubrication Technology, Octobre 2005.
- [25] J W MacDonald "Marine turbine oil system maintenance". Journal of ASLE, Vol 21, (1965).
- [26] P Schatzberg, I M Felsen (1968). "Effects of water and oxygen during rolling contact lubrication". Wear, Vol 12.
- [27] H Prashad "A study of electrical pitting of journal bearings with water contaminated lubricant". Tribo Test Journal, Vol 7. (2000).

- [28] H Prashad "Effect of operating parameters in the threshold voltages and impedance response of non-insulated rolling element bearings under the action of electrical currents". Wear, Vol 117, (1987). Et H. Prashad "Analysis of capacitive effect and life estimation of hydrodynamic journal bearings on repeated starts and stops of a machine operating under the influence of shaft voltage". Tribology transactions, Vol 37. (1994).
- [29] D. NELIAS - Étude du Glissement dans les Roulements à Billes Grande Vitesse de Turbomachine - Influence de la Pollution du Lubrifiant. Thèse Doct. Ing. : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et Univ. Lyon I, 1989.
- [30] H. HUNT T. M. - Handbook of Wear Debris Analysis & Particle Detection in Liquids. London : Elsevier Applied Science, 1993.
- [31] M. R. Sari, A. Haiahem, L. Flamand, Influence de la pollution solide sur les mécanismes lubrifiés, 19ème Congrès Français de Mécanique, Marseille, 24-29 Aout 2009
- [32] influence de la pollution solide des lubrifiants sur la durée de vie des mécanismes, F. VILLE et al, 17ème Congrès Français de Mécanique, Troyes, -Septembre 2005
- [33] G.R. Nicolet, conception et calcul des éléments de machine T1 FRIBOURG VOLUME1, 2006
- [34] J.F. Debonnie conception et calcul des éléments de machine T1 ,2013
- [35] G.R. Nicolet conception et calcul des éléments de machines T1 VOLUME 2 Version 1, juin 2006
- [36] N.BEN SALEM Généralités sur les lubrifiants -2014.
- [37] www.cimi.fr
- [38] <http://www.club-ensao-genie-industriel-58.websself.net>

ملخص:

ان ضمان جودة الإنتاج وكذا مردودية المنظومة الصناعية واستمراريتها منوطه بمدى نجاعة اساليب الصيانة وخاصة الوقائية منها. وتعتبر العناية بنظام التشحيم، أحد أهم وسائل حماية مكونات الآلة من التآكل وكذا تجنب إهدار الطاقة، مما يرفع من أداء الآلة ويسمح باستغلالها لأطول مدة ممكنة. لذلك نلاحظ انجاز تطور كبير في صناعة مواد التشحيم بشتى أنواعها، السائلة والصلبة، حيث تم انتاج مواد تتمتع بخصائص متميزة. كما ان التطورات الراهنة في اساليب المراجعة التقنية للآلات، سواء كانت نظريا او علميا، ساعدت في الكشف عن بعض العوامل التي تؤثر على اجهاد الآلات وهذا ما تطرقنا له في هذه المذكرة. حيث ان الإشكالية المطروحة في هذه المذكرة هي ظاهرة تدهور الخصائص الاصلية لمواد التشحيم نتيجة العوامل المحيطة بالعمل كالملوثات بشتى أنواعها. وللوقاية من هذه العوامل التي تؤثر سلبا على عملية التشحيم استخلصنا انه يجب اتخاذ تدابير من بينها مراعات شروط صناعة الآلة وكيفية تخزين المواد ومكان عمل الآلة واهم عنصر من اجل الحماية هو مراقبة الجودة والنوعية وذلك من اجل اطالة عمر عملية التشحيم وكذلك الزيادة في الاداء الجيد للآلة

الكلمات المفتاحية: احتكاك، تشحيم، ملوثات، حماية

Resumé

A fin de garantir la qualité du produit et assurer une rentabilité et une longévité optimale d'un système mécanique, il y a lieu d'appliquer les méthodes de maintenance adéquates, notamment celles à caractère préventif. A ce titre, le soin apporté aux méthodes de graissage constitue l'un des moyens les plus efficaces pour la protection des organes de machines contre l'usure et pour la réduction des pertes d'énergie. Ceci permettra d'améliorer les performances de la machine et de prolonger la durée d'exploitation. A cet effet, on constate un développement considérable dans le domaine de production des produits lubrifiants tout en apportant des améliorations aux caractéristiques spécifiques de ces produits. De même, les progrès atteints dans le domaine des méthodes de diagnostics et d'analyse technique des systèmes mécaniques aussi bien sur le plan théorique que pratique, ont permis la détection des facteurs qui influent sur dégradation des machines. Dans la présente étude, on a abordé ce problème, notamment celui relatif à la dégradation des qualités originales des produits lubrifiants sous l'effet des conditions de service, notamment l'intrusion de différents types de contaminants.

A fin de prévenir les effets néfastes de ces facteurs, notre étude a permis dégager certain nombre de dispositions qu'il faut adopter dès la conception des systèmes mécaniques. De même, les actions de la maintenance préventive ainsi que le contrôle de la qualité des huiles, jouent un rôle primordial dans l'optimisation de la longévité des machines. A cela, il faut signaler l'importance des conditions de stockage des produits lubrifiants qui doivent respecter les normes en vigueur.

Mots clés: frottement, lubrification, contaminants, protection

Abstract :

In order to guarantee the quality of the product and ensure optimum profitability and longevity of a mechanical system, it is necessary to apply appropriate maintenance methods, particularly preventive methods. In this respect, the care given to the lubrication methods is one of the most effective means for protecting the machine components against wear and for reducing energy losses. This will improve the performance of the machine and extend the operating life. To this end, considerable progress has been made in the area of manufacturing of lubricating products, while improving the specific characteristics of these products. Similarly, progress in the field of diagnostic and technical analysis of mechanical systems, both theoretically and practically, has enabled the detection of the factors that affect machine degradation. In this study, this problem was addressed, including the problem of the degradation of the original quality of lubricants under the conditions of service, including the intrusion of different types of contaminants. In order to prevent the adverse effects of these factors, our study has identified a number of provisions that must be taken into account when designing mechanical systems. Furthermore, the actions of preventive maintenance as well as the control of the quality of the oils play an essential role in the optimization of the longevity of the machines. In addition, it must be pointed out the importance of the storage conditions of lubricants which must comply with the standards.

Key words: frottement, lubrification, contaminants, protection