

Partie 6

La Fonction Technique de Base **LUBRIFICATION**

1. Introduction

1.1 Frottement entre deux pièces

Dans le mouvement relatif entre deux pièces en contact, sous une charge normale F , l'effort tangentiel T nécessaire pour produire le déplacement est $T = \mu_f F$ (μ_f désignant le coefficient de frottement). Si la vitesse relative entre les deux pièces est V , la puissance dissipée en chaleur est FV .

Diminuer ces frottements, c'est augmenter le rendement des mécanismes et diminuer leur usure.

Mais pour cela, il faut agir sur le coefficient μ_f et non sur F .

1.2 Définitions

Le frottement entre deux surfaces est dit immédiat, ou à sec, dans le cas de surface directement en contact. Il est dit médiat, lorsqu'une substance quelconque, appelée lubrifiant, est interposée.

Suivant l'épaisseur de cette pellicule interposée, le régime est dit **onctueux** ou **hydrodynamique** ; dans ce dernier cas, les surfaces baignent dans l'huile et la force de frottement sert à vaincre les résistances tangentielles qu'opposent les couches de lubrifiant à leur glissement mutuel.

1.3 Frottement immédiat

Entre deux surfaces immédiates, plus ou moins rugueuses, il se produit dans le déplacement relatif un rodage plus ou moins rapide de la surface tendre par la plus dure, à moins que dans la première ne s'incrustent des particules plus dures, amenées par les poussières.

En général le coefficient de frottement diminue si on améliore le poli (abaissement de la rugosité de la surface, par exemple R_a de 0,8 et moins). Par contre si le poli des surfaces tend vers le parfait, des forces de cohésion (actions physico chimiques ou inter moléculaires) ont tendance à faire adhérer celles ci (Cf cales étalons que l'on peut combiner entre elles).

Ces diverses influences augmentent avec la température, provoquent les grippages et arrachements de métal dans les mécanismes ; il devient alors nécessaire d'adopter le deuxième état de frottement, dit médiat.

1.4 Frottement médiat

Lorsqu'une substance lubrifiante est interposée entre deux surfaces, l'une fixe, l'autre mobile, il peut se produire trois cas.

- a) L'épaisseur du lubrifiant est très faible (beaucoup plus petite que la hauteur des aspérités, voir les notions de rugosités maximales); une couche adhérente moléculaire ou épilamen s'établit sur les surfaces, neutralisant le champ d'attraction moléculaire. C'est le graissage **onctueux**, assez fréquent dans la pratique industrielle. L'onctuosité du lubrifiant caractérise cette faculté plus ou moins grande de pouvoir former cet épilamen stable; elle est difficilement chiffrable et dépend des tensions superficielles de la surface et du lubrifiant.

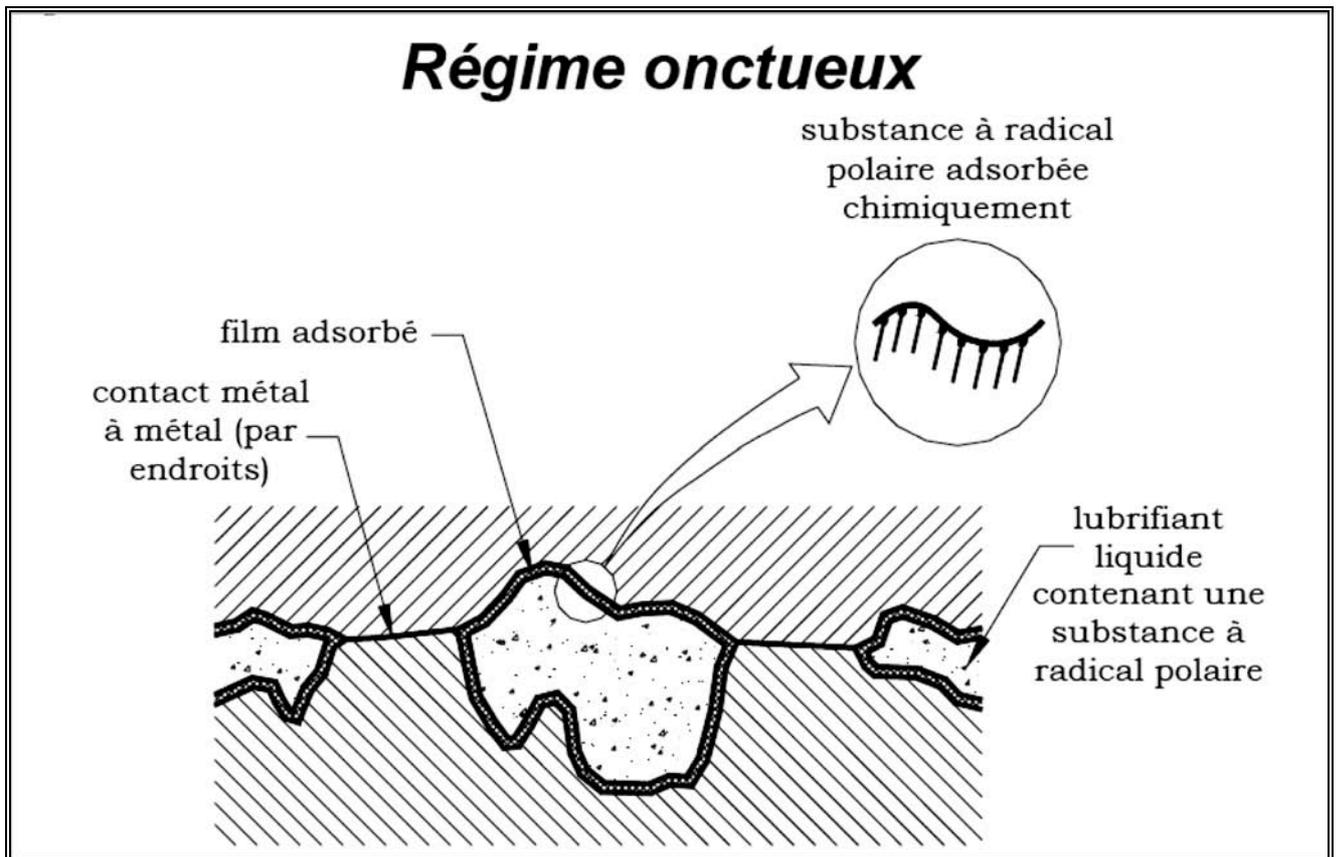


Figure 1 : exemple de régime onctueux

- b) L'épaisseur du lubrifiant, bien que plus grande que dans les cas précédents, reste inférieure à la hauteur des aspérités et n'empêche pas le contact intermittent entre les surfaces métalliques; le graissage est dit alors mixte ou imparfait. Il est très fréquent dans la pratique.
- c) L'épaisseur du lubrifiant est supérieure à la hauteur maximale des aspérités métalliques (voir à ce sujet le R_m des surfaces en contact); le graissage est dit hydrodynamique ou parfait. Un film d'huile sépare complètement les surfaces métalliques. Les résistances au mouvement correspondent aux actions tangentielles des diverses couches de

lubrifiant dont les vitesses varient de 0 (épilamen fixe), à V (épilamen mobile). La viscosité du lubrifiant caractérise ces résistances tangentielles (Voir à ce sujet le cours LA 313 & 336 en fluide pour les équations correspondantes).

Nous n'envisagerons désormais, dans ce paragraphe, que le frottement médiat.

Nous allons déterminer les variations du coefficient de frottement μ_f , entre deux pièces en contact : on admet fréquemment, dans une première hypothèse, que celui ci ne dépend que de l'état de ces surfaces et non de leur étendue ou de leur vitesse relative. Le graphique, figure 2, donne une bonne approximation des valeurs de μ_f (f sur le graphique) en fonction du nombre de **Sommerfeld** qui caractérise :

- la variation d'épaisseur minimale h_0 du film de lubrifiant
- la variation du coefficient de frottement
- les débits d'alimentation q et de fuite q_s
- la variation d'angle Θ entre la direction du film d'épaisseur minimale et la direction de la charge
- la variation de pression maximale p_{max} à l'intérieure du film.
- Le jeu relatif du palier $(R/C) \approx (D-d)/D$

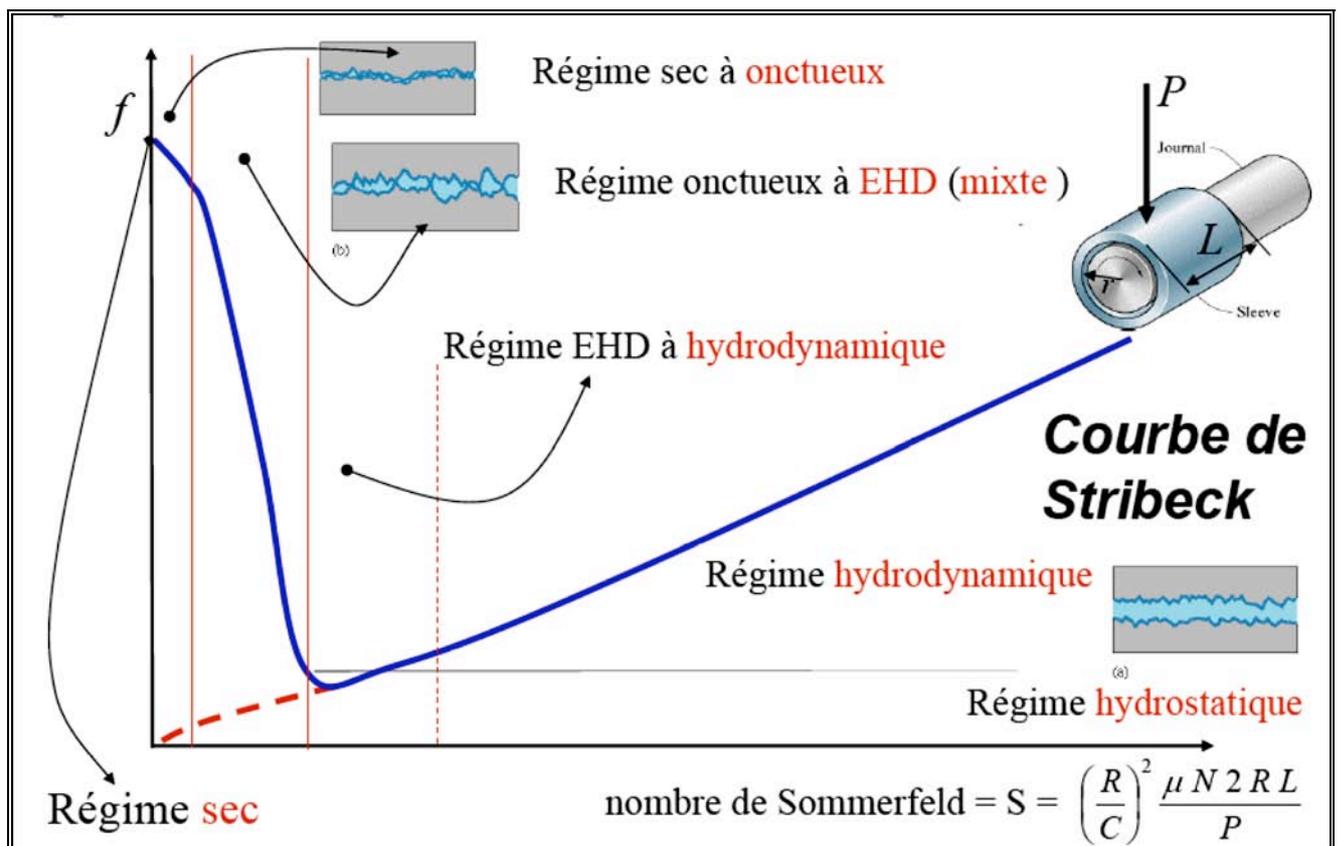


Figure 2 : Variation de μ_f en fonction des différents régimes de lubrification

Dans le cas de graissage (ou lubrification) hydrodynamique, des formules empiriques permettent de calculer, avec une assez bonne approximation, le

coefficient de frottement (noté μ_f) . Par exemple pour des paliers à film partiel, avec un jeu de $2d/1000$

$$\mu_f = 10^{-3} * 1,04 (\mu * N/p)^{0,5}$$

avec μ en 10^{-1} Poise ($1P = 0,1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$), N en tr/mn et p en bar. Un exemple numérique avec une huile de viscosité 2° Engler, soit environ 10^{-3} Poise, lubrifiant un palier de turbine tournant à 3 000 tr/mn, avec $p = 15 \text{ daN/cm}^2$, on a $\mu_f = 0,0046$.

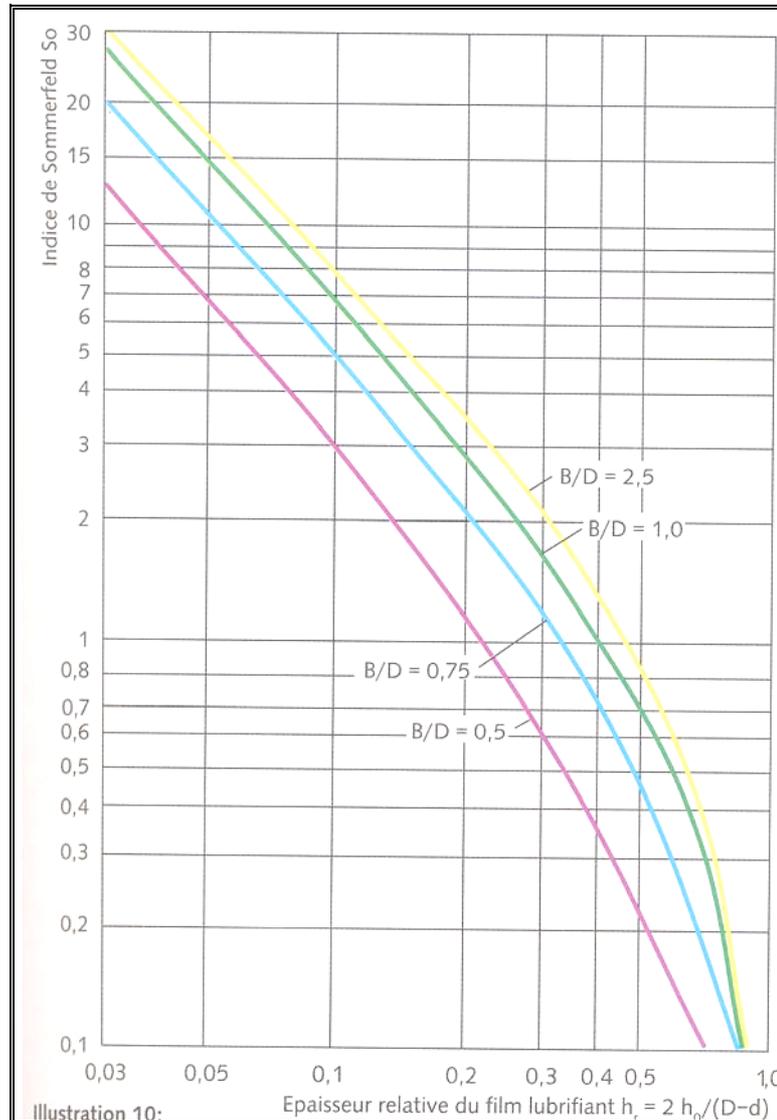


Figure 3 : Variation du nombre de Sommerfeld en fonction de l'épaisseur du film

On remarquera sur la figure 4, que pour des vitesses très importantes, les guidages par roulement sont totalement inefficaces. De plus pour des gros réducteurs ou des paliers de machines de grandes capacités, on réalise toutes les liaisons pivots par palier lisse.

Les paliers et les butées hydrodynamiques sont très sensibles à la température, car la viscosité de l'huile dont dépend le fonctionnement diminue très vite lorsque la

température augmente. C'est pourquoi ces paliers se calculent toujours sur la base d'un bilan thermique.

Un palier lisse se calcule, un roulement se vérifie

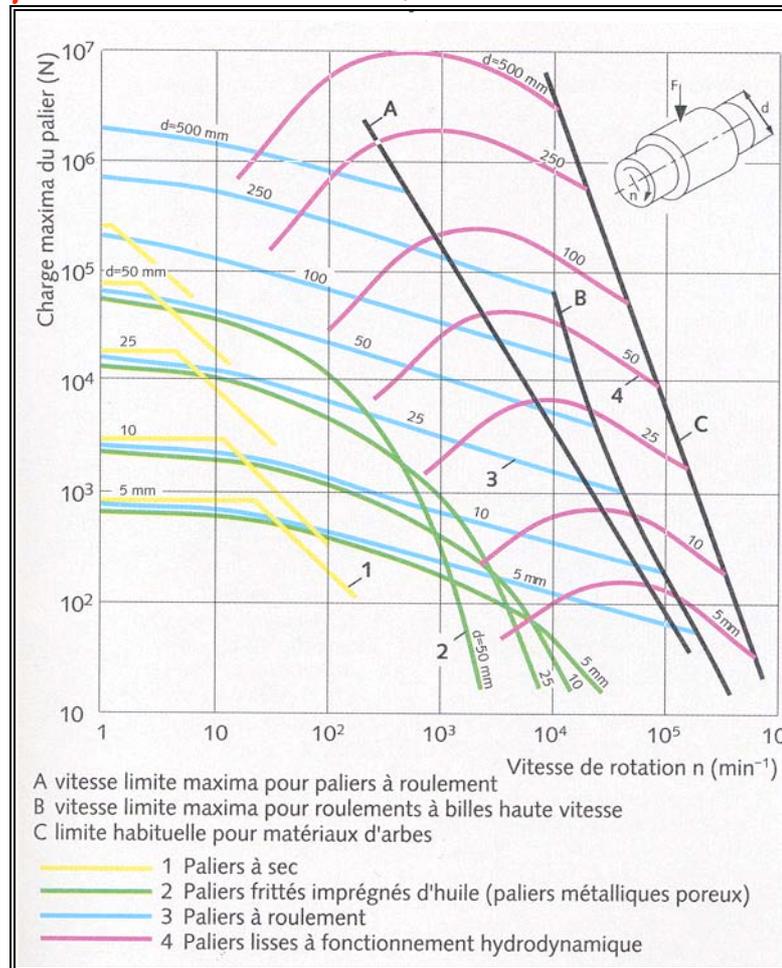


Figure 4 : Comparaison paliers lisses et roulements

1.5 Influence de la forme des surfaces : le coin d'huile

a) Surfaces planes :

Lorsque deux surfaces planes sont en mouvement relatif (Cf figure 3), et que l'une d'elles est inclinée sur l'autre (Cf plaque AB), le lubrifiant grâce à sa viscosité, s'enfonce entre elles comme un coin et tend à les séparer malgré l'existence d'une charge normale P . D'après Reynolds, cette action est maximal lorsque $h_1 = 2,2 h_0$, avec une pente de $1/3\ 000$ et le centre de pression est décalé par rapport au centre de gravité de la surface.

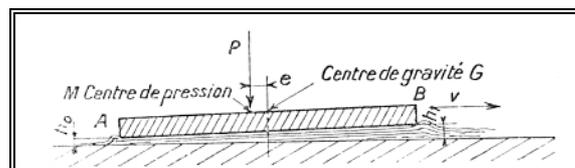


Figure 5 : Coin d'huile entre deux plaques planes

On favorisera la formation du coin en pratiquant un chanfrein sur l'arête avant en B. La répartition des pressions s'établit suivant les courbes C et D (Cf figure 6). À l'arrière de la surface glissante, en A, il se produit une dépression que l'on peut atténuer en réalisant un chanfrein.

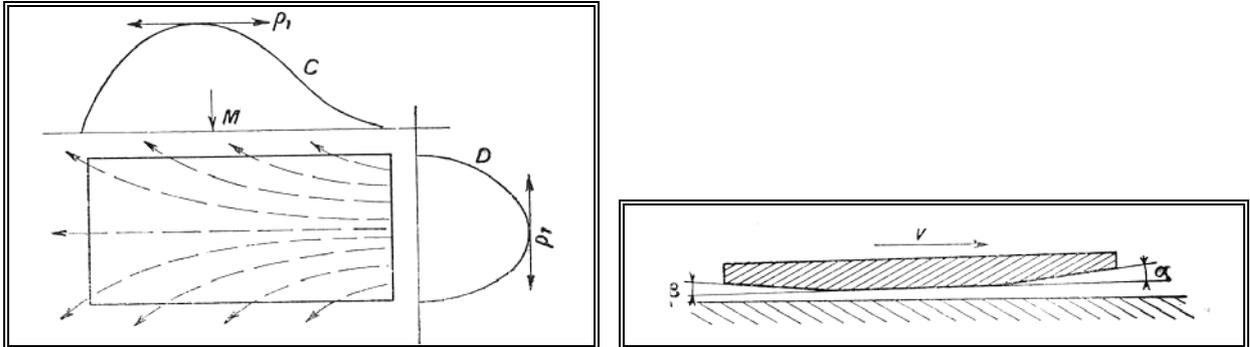


Figure 6 : Formes de la plaque plane et distribution des pressions

b) Surfaces cylindriques :

Si l'on suppose un jeu dans un coussinet au repos, le tourillon en A (Cf figure 7). Par rotation dans le sens indiqué, le contact a lieu en B (Cf figure 7), mais si la vitesse augmente, l'huile située en d, entraînée, forme coin et repousse le tourillon en C, et en ce point il s'établit un certain état d'équilibre entre la charge P et les pressions exercées par l'huile comprimée en d. Les courbes de pressions affectent les formes C et D (Cf figure 6). Dans le cas de la courbe D, la pression ne peut être uniforme, par suite de fuites latérales et la pression maximale p_1 est nettement supérieure à la pression diamétrale moyenne ($p = P/D*L$) :

ainsi pour $p = 24 \text{ daN/cm}^2$, $p_1 = 45 \text{ daN/cm}^2$ (Expérience de Tower)

Toutes ces informations vous seront développées dans les modules LA 313 & 336.

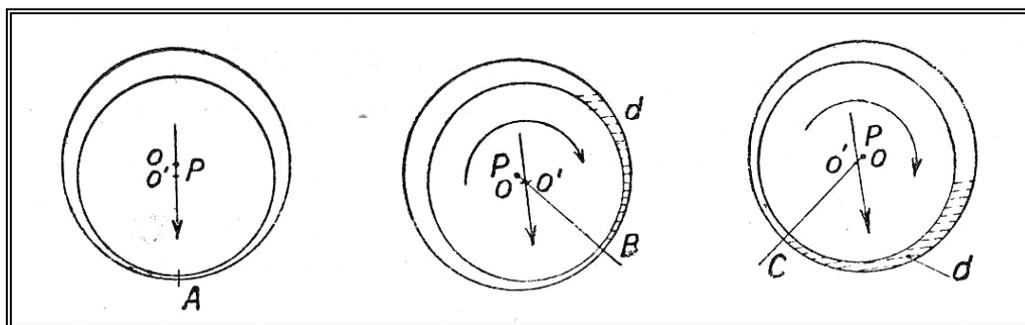


Figure 7 : points de contact sur un palier lisse

La figure 8 montre la répartition de pression dans un palier ainsi que l'équation régissant la variation de pression en fonction de l'angle Θ .

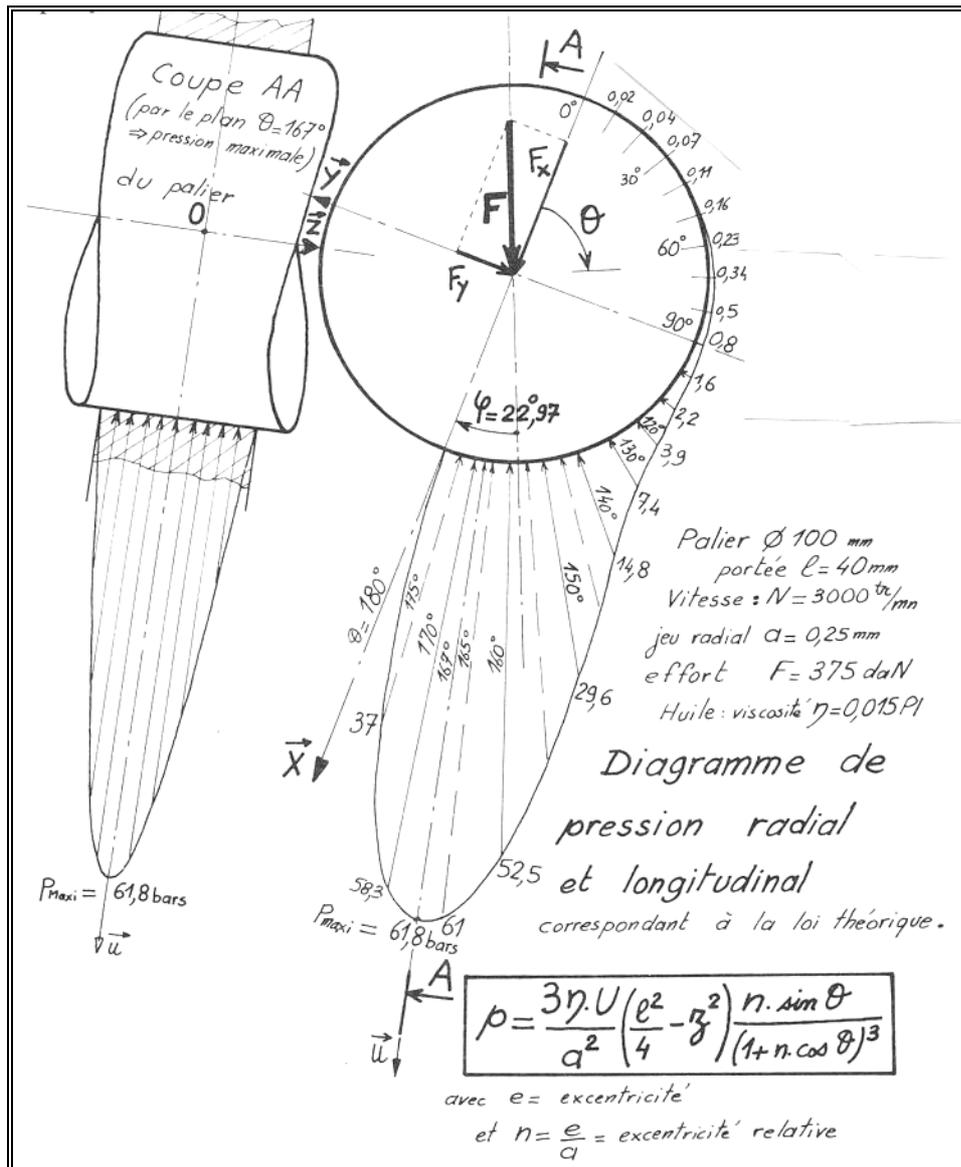


Figure 8 : Répartition de pression dans un palier lisse

Toute cause provoquant un agrandissement de volume, telle que rainure, patte d'araignée, trou de graissage, entraîne une rupture de la courbe de pression suivant les courbes b) comparativement à la courbe a) qui est la bonne répartition (Cf figure 9).

Cependant aux faibles vitesses et fortes pressions, ces rainures peuvent se justifier car elles permettent au film partiel de se reformer, et dans les cas défavorables, elles servent pour irriguer les surfaces et maintenir au moins le régime onctueux.

Ces rainures doivent être normale à la vitesse et abondamment alimentées par les bassins relais.

L'alimentation du film en huile doit toujours se faire dans les régions de moindre pression.

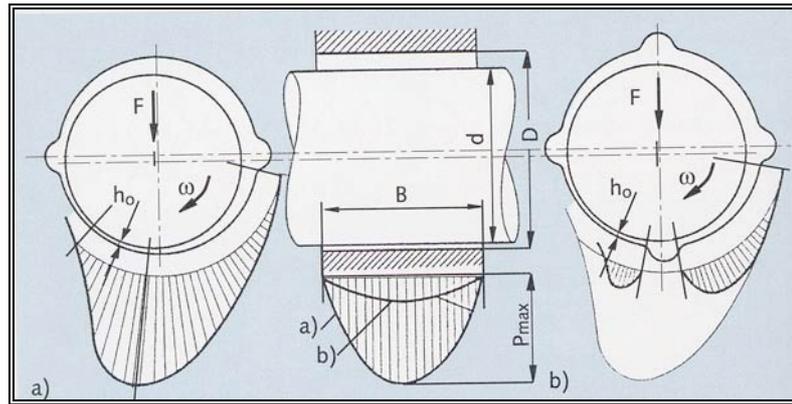


Figure 9 : Influence d'une rainure sur la pression

Compte tenu de ces considérations, voici quelques formes de surfaces favorisant la formation du coin d'huile (Cf figure 10), puis un exemple de palier lisse vous est donné par la figure 11.

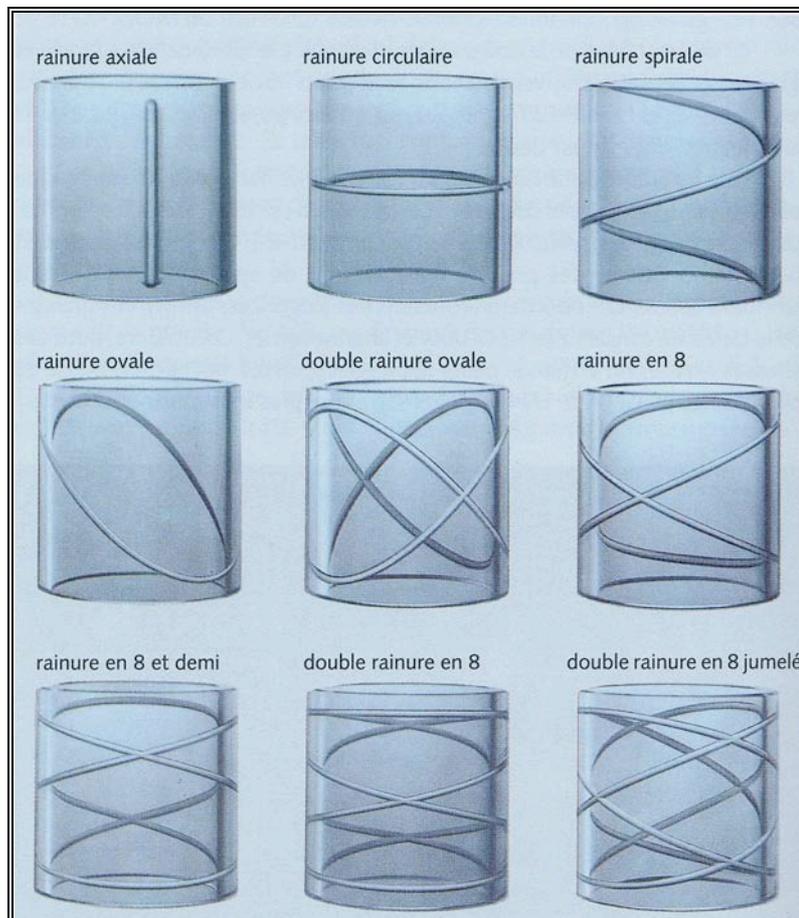


Figure 10 : Formes de rainures sur des coussinets

Toutes ces formes de rainures sont non débouchantes pour éviter des fuites trop importantes et la rupture du film d'huile.

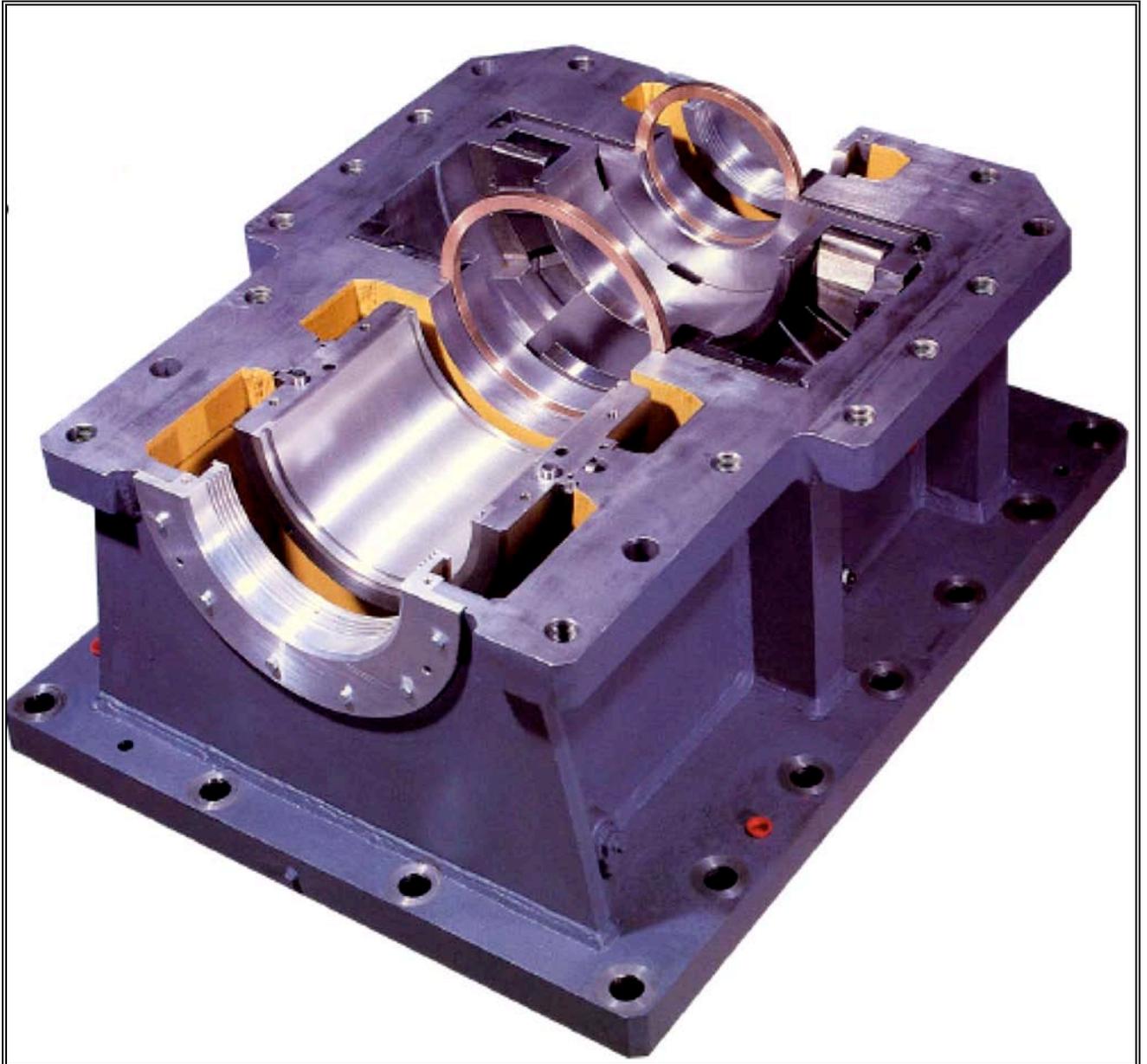


Figure 11 : Exemple de paliers lisses

1.6 Influence de la nature des surfaces

Si le graissage (ou lubrification) hydrodynamique peut être réalisé, la nature des surfaces semble sans importance ; mais comme cette condition n'est toujours pas remplie, il faut des surfaces résistant aux déformations locales (sous la pression, les chocs) et à l'usure provoquée par les poussières. Aussi emploiera-t-on des aciers durs, les aciers cémentés, le bronze phosphoreux, le bronze au manganèse, les résines synthétiques, les alliages anti-frictions etc.....

1.7 Échauffement

Le travail de frottement se transforme en chaleur et celle-ci modifie les qualités de viscosité, de tension superficielle déjà mentionnées. Aussi, pour maintenir des conditions de fonctionnement toujours identiques, convient-il de dissiper cette

chaleur au fur et à mesure de sa production. Des formes spéciales devront être réalisées au niveau des carters pour l'échange optimum avec l'extérieur, ainsi que le choix du lubrifiant comme fluide caloporteur.

2. Qu'est ce qu'un lubrifiant

Le lubrifiant est un produit qui, interposé entre les deux surfaces frottantes d'un mécanisme, réduit le frottement et par conséquent l'échauffement, tout en combattant l'usure des mécanismes.

Historiquement, l'usage des lubrifiants remonte à la plus haute Antiquité. Les produits utilisés furent, jusqu'au XIX^{ème} siècle, essentiellement des huiles et corps gras animale ou végétale. Puis les huiles d'origine pétrolière s'imposèrent vers la fin du XIX^{ème} siècle, mais ce n'est qu'à partir de 1930, et surtout pendant la seconde guerre mondiale, que les grandes découvertes en matière d'additifs et de lubrifiants de synthèse ont été faites.

Ensuite les progrès furent continus dans tous les domaines avec, cependant, dans les années soixante, un véritable foisonnement de recherches, sous l'impulsion de la course à l'espace, dans le domaine des lubrifiants non conventionnels.

Le principe de composition d'un lubrifiant est donné par les figures 12 & 13 et la fabrication à partir de pétrole brut est donnée par la figure 14.

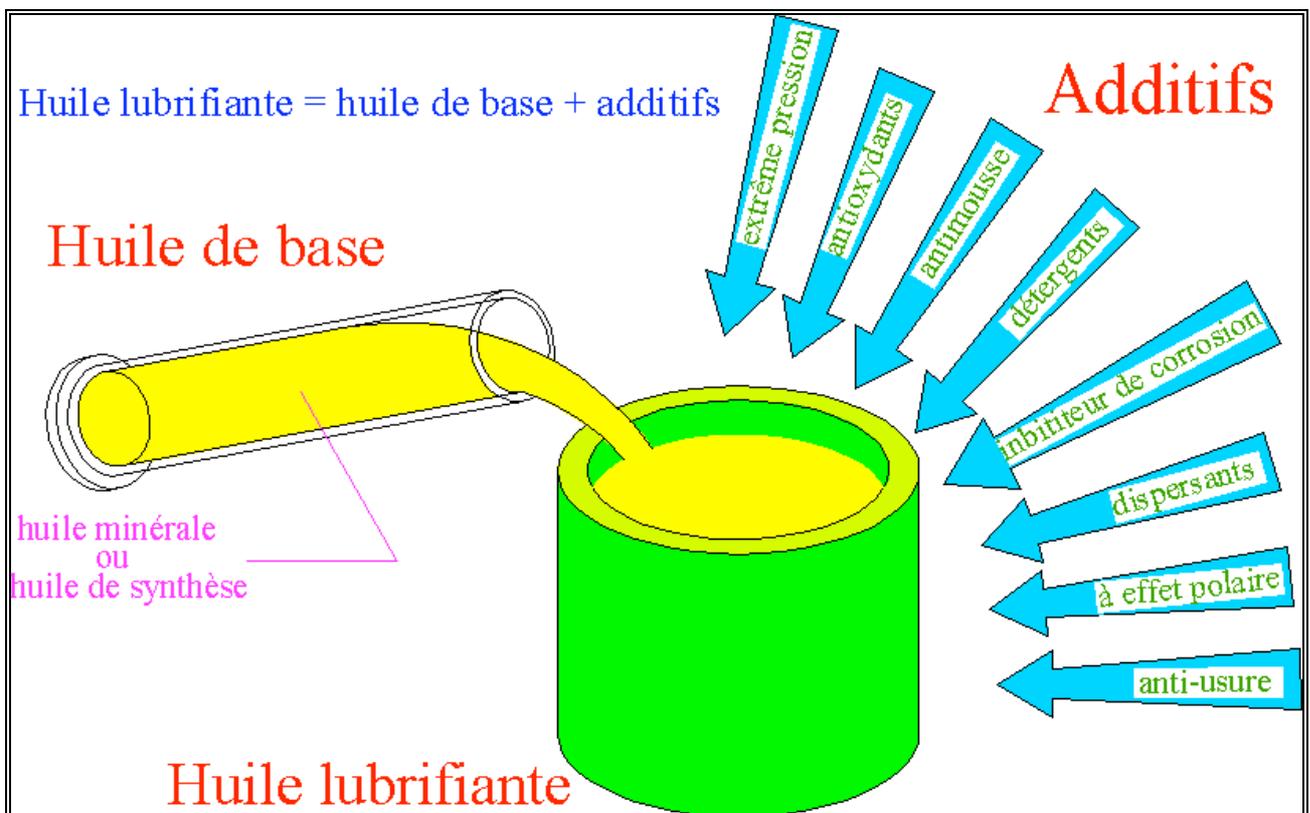


Figure 12 : Principe de composition d'une huile

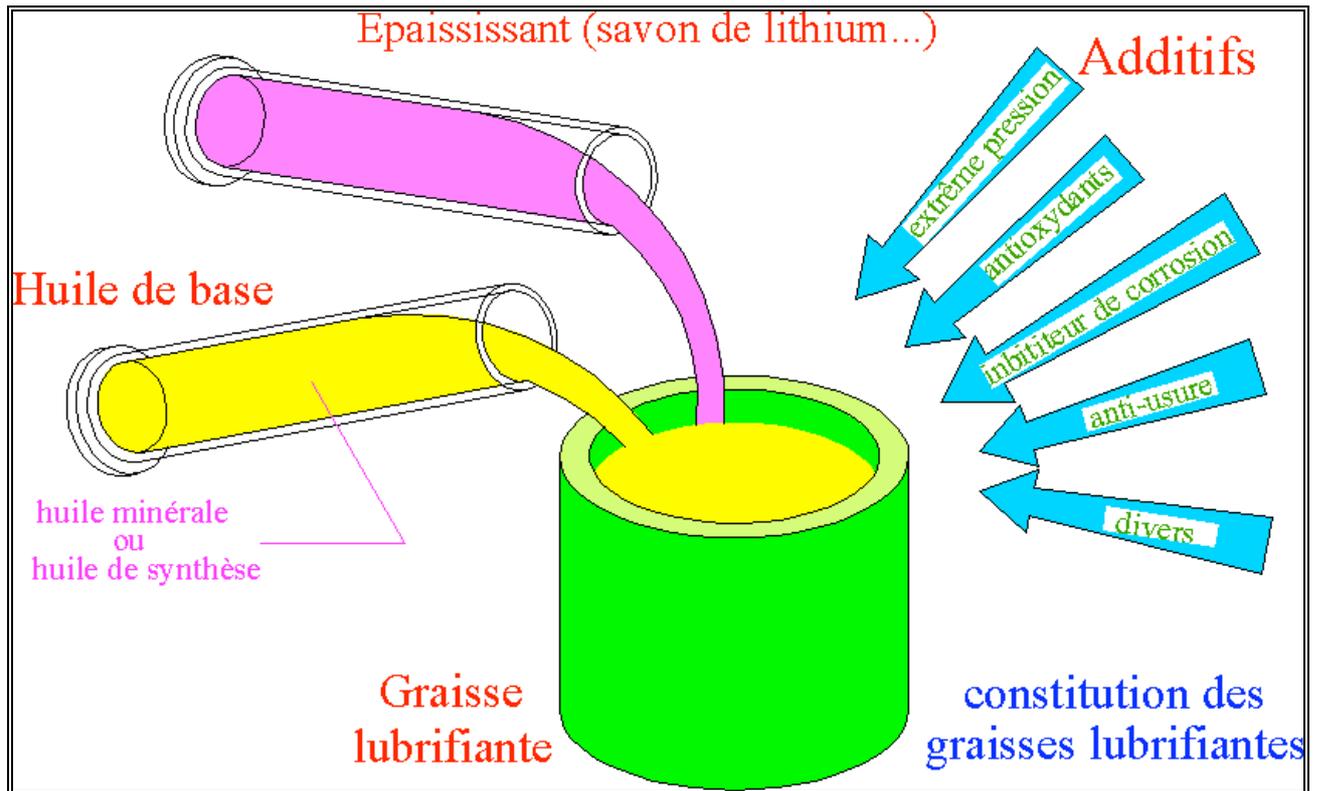


Figure 13 : Principe de composition d'une graisse

Les lubrifiants classiques, huiles et graisses, qui ne sont pas des corps gras (au sens chimique du terme) sont élaborés dans des unités spécialisées intégrées à certaines raffineries de pétrole. Des coupes plus ou moins lourdes de pétrole brut, selon que l'on souhaite aboutir à une huile ou à une graisse, subissent des traitements successifs en vue d'éliminer les impuretés, les composés les moins onctueux, ou les composés présentant une trop forte variation de leur viscosité en fonction de la température.

On incorpore au lubrifiant des additifs divers en fonction de son utilisation ; ceux-ci ont notamment pour effet de protéger contre l'oxydation, d'améliorer ses propriétés anticorrosives, son onctuosité (additif dit extrême pression), son indice de viscosité (stabilité de celle-ci en fonction de la température), ou de lui conférer un pouvoir nettoyant (huiles détergentes de moteur à combustion interne). La tendance actuelle consiste, pour les utilisations les plus exigeantes, à élaborer directement les lubrifiants eux-mêmes, par synthèse chimique.

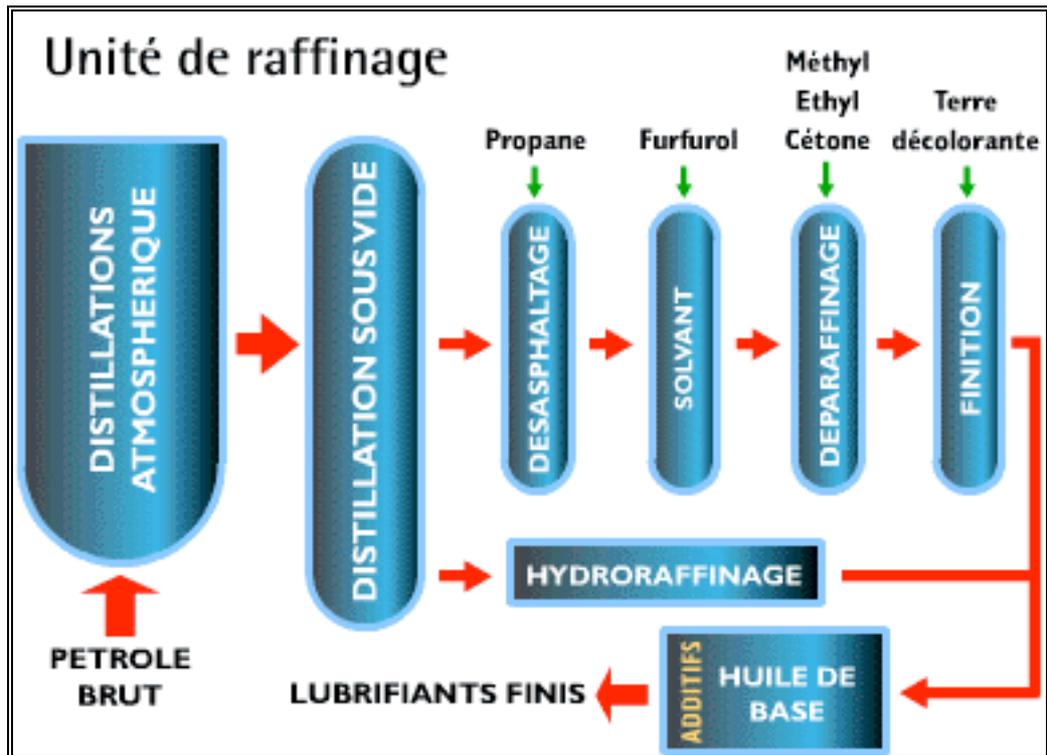


Figure 14 : Processus de fabrication d'un lubrifiant

Il existe aussi quelques lubrifiants solides comme le graphite, ou dans les domaines des lubrifiants de synthèse, les polyamides.

2.1 Principaux lubrifiants

Le tableau ci-dessous résume les principaux lubrifiants utilisés aujourd'hui.

	solides	Liquides	Pâteux
Lubrifiants naturels	Graphite Cires Résines	Huiles minérales issues du pétrole	Graisse issue du pétrole Pâtes lubrifiantes Lanoline
Lubrifiants de synthèse	Plastiques fluorés Polyamides Vernis	Huiles synthétiques (esters par exemple) Huiles composées	Graisses de synthèses (silicone)

Tous les lubrifiants liquides et pâteux « mouillent » les surfaces concernées et y adhèrent fortement en constituant ainsi des épilames minces, ne présentant que quelques molécules d'épaisseur : cette caractéristique essentielle est qualifiée d'onctuosité.

2.2 Classification des lubrifiants

Selon leur utilisation, les lubrifiants sont, dans la pratique, classés en deux grandes catégories.

La première est destinée à la lubrification des véhicules automobiles ; elle est représentée surtout par les huiles pour moteurs (à essence, Diesel, « multi-usages » pour matériels agricoles et de travaux publics). Selon leurs caractéristiques viscosimétriques à froid et à chaud, ces huiles peuvent être dites « monogrades » (en régression) ou « multigrades » (en expansion) : les premières répondent aux exigences d'un seul grade de viscosité de la classification américaine S.A.E (Society of Automotive Engineers) tandis que les secondes répondent à la fois aux exigences d'un grade d'hivers W (winter) et à celle d'un grade d'été (Exemple 15W 40 : grade hivers S.A.E 15 W et grade d'été S.A.E 40). Les autres lubrifiants pour véhicules automobiles sont essentiellement les huiles de transmission comme les huiles de boîte de vitesses, de différentiels, boîtes automatiques ou coupleurs : les liquides de frein et les graisses pour châssis automobiles appelées « multifonctionnelles » ou «multipurpose » car elles assurent le graissage de nombreux organes.

La seconde catégorie est constituée par les lubrifiants industriels, vaste ensemble regroupant des produits très divers comme :

- les fluides hydrauliques classés selon la norme Afnor (Association française de normalisation)
- les lubrifiants pour engrenages industriels sont des huiles minérales inhibées ou mieux des huiles « extrême pression » (E.P). des huiles de synthèse commencent à remplacer ces dernières.
- Les lubrifiants pour le travail des métaux constituent une famille de produits très hétérogènes et très diversifiés.
- Les huiles pour compresseurs peuvent être des huiles à base minérale ou des lubrifiants de synthèse selon le type de compresseur et la nature du fluide comprimé.
- Les huiles pour turbines terrestres sont des huiles minérales très raffinées contre la rouille et l'oxydation.
- Les graisses industrielles ont des emplois très variés ; roulements, paliers lisses, chaînes de transmission etc...
- Les huiles de graissage des machines outils et de machines diverses (huiles pour glissières, huiles de broches).
- Les huiles de démoulage de matériaux divers (décoffrage du béton par exemple).
- Les lubrifiants divers pour horlogerie, pour l'imprégnation des câbles électriques, les produits dégrippants etc..

Selon leur état physique, les lubrifiants peuvent être classés en quatre groupes : les lubrifiants liquides (huiles minérales, fluides synthétiques, fluides aqueux), les graisses, les lubrifiants solides et les lubrifiants gazeux.

À titre de comparaison, le tableau ci-dessous donne la comparaison entre les graisses et les huiles :

Avantages	Inconvénients
Permettent un graissage à vie Application aisée du lubrifiants Supportent mieux les chocs et vibrations Peuvent participer à l'étanchéité Simplicité de conception et installation Prix de revient modique	Tendance au vieillissement Ne conviennent ni aux vitesses élevées avec charges élevées, ni pour les cas où il y a des échauffements, des températures élevées avec des calories à évacuer

a) Classification des huiles

Nous ne présentons que les deux principales classifications des huiles : **ISO** et **SAE**. Les huiles sont classées en fonction de leurs propriétés caractéristiques. La plus importante est bien évidemment la viscosité cinématique ν ou dynamique μ mesurées respectivement en Stoke (St) et Poise (P) avec :

- 10 000 St = 1 m² /s
- 1 P = 0,1 Pa * s

Les autres propriétés principales des huiles sont les suivantes :

- point d'écoulement : c'est la température à partir de laquelle une huile, chauffée puis refroidie dans des conditions bien précises cesse de couler (début de cristallisation ou de solidification).
- Index de viscosité : il caractérise la variation de viscosité en fonction de la température (100 pour une variation très faible, 0 pour une très grande variation).
- Autres propriétés : onctuosité, résistance à l'oxydation, à la corrosion.

Classification ISO

Elle classe les huiles à partir de leur viscosité. La désignation normalisée est la suivante : ISO VG suivi d'un nombre précisant la viscosité moyenne exprimée en Centistocke à 40° C.

Classification SAE

C'est une classification essentiellement utilisée pour l'automobile et les véhicules industriels. Cette classification a été définie par la SAE. La désignation est

la suivante : lettres SAE suivi de son grade qui caractérise la viscosité à froid, puis la lettre W (winter), et un deuxième nombre qui caractérise la viscosité à chaud. Un exemple est donné par le tableau ci-dessous :

Code de produit	420-060	Méthode ASTM
Masse volumique à 15 °C, kg/m ³	859	
Point d'écoulement, °C	-42	D 97
Point d'éclair, vase ouvert Cleveland, °C	255	D 92
Viscosité - Cinématique		D 445
- cSt (mm ² /s) à 40 °C	110	
- cSt (mm ² /s) à 100 °C Simulateur de démarrage à froid		
- cP (mPa.s) à -15 °C	19,4	
	3 100	
Indice de viscosité	175	D 2270

Huile multigrade AEROSHELL W 15W 50 (huile multigrade dispersante pour moteurs à pistons d'aéronefs)

2.3 Principales fonctions d'un lubrifiant

- 🍏 Réduire les frottements, tout en favorisant le mouvement ou le glissement afin d'éviter le grippage entre deux surfaces frottantes (par exemple pour les moteurs à combustion interne, diminuer la consommation de carburant).
- 🍏 Protéger les organes mécaniques contre l'usure et la corrosion (garantir la longévité et l'efficacité du composant).
- 🍏 Maintenir la propreté, garantir la longévité du composant en maintenant l'ensemble des pièces dans un bon état de propreté tout en évacuant les impuretés vers un filtre à huile, en assurant des vidanges régulières et le remplacement du filtre.
- 🍏 Participer à l'étanchéité (indispensable pour assurer un fonctionnement correct).
- 🍏 Évacuer efficacement la chaleur (refroidir le composant pour éviter la déformation des différentes pièces : ceci nécessite souvent un échangeur de chaleur).

2.4 Principaux critères de choix

La démarche de choix d'un lubrifiant est très délicate car des facteurs influents comme la température, sont mal ou peu connus en phase de conception. En général les fabricants proposent des produits spécialement développés pour chaque application (Moteur 2 temps, 4 temps, huiles pour engrenages, huiles de transmission pour chaînes, huiles de coupes etc...). Il reste quand même à valider que le produit est compatible avec les autres organes (attention à l'incompatibilité de certains produits,

impliquant une étanchéité entre plusieurs volumes). Un exemple de démarche de choix vous est donné ci-dessous (recopie de page du site de SHELL).

L'hydraulique
À VOTRE SERVICE²



Sélection d'une huile hydraulique

Directives

- Sélectionnez le fabricant du matériel:
- Sélectionnez le modèle de pompe:
- Inscrivez la température maximale du réservoir à laquelle le circuit est appelé à fonctionner: °C
- Inscrivez la température minimale du réservoir à laquelle le circuit est appelé à fonctionner: °C
- Inscrivez la température minimale à laquelle le matériel doit démarrer: °C
- Quand vous êtes prêt, cliquez sur Soumettre; pour effacer, cliquez sur Remettre à l'état initial:

3. Les dispositifs de lubrification

3.1 Lubrification à l'huile

Dans ce dispositif, on utilise les propriétés de l'huile, viscosité, onctuosité pour son entraînement vers les surfaces à lubrifier, soit par l'organe même (engrenages par exemples cf figure 15), soit par un organe interposé (chaîne, anneau, disque centrifuge etc...). La figure 15 propose un système de lubrification classique appelé communément, lubrification par barbotage.

Souvent, il faut refroidir aussi le lubrifiant : un exemple de refroidissement forcé est donné par la figure 16, correspondant à un réducteur Roue Vis sans fin de 24,5 Kw pour $N = 1500$ tr/mn et $i = 20$.

Les organes essentiels sont :

- (1) vis sans fin, (2) roue dentée, (3) moyeu, (4) carter avec ailettes de refroidissement, (5) ventilateur, (6) bouchon de vidange, (7) remplissage d'huile, (8) & (9) diverses étanchéités, (10) disque chasse-gouttes, (11) retour d'huile, (12) roulements à billes, (13) roulements à galets coniques, (14) rondelles de réglage de la position axiale de la roue.

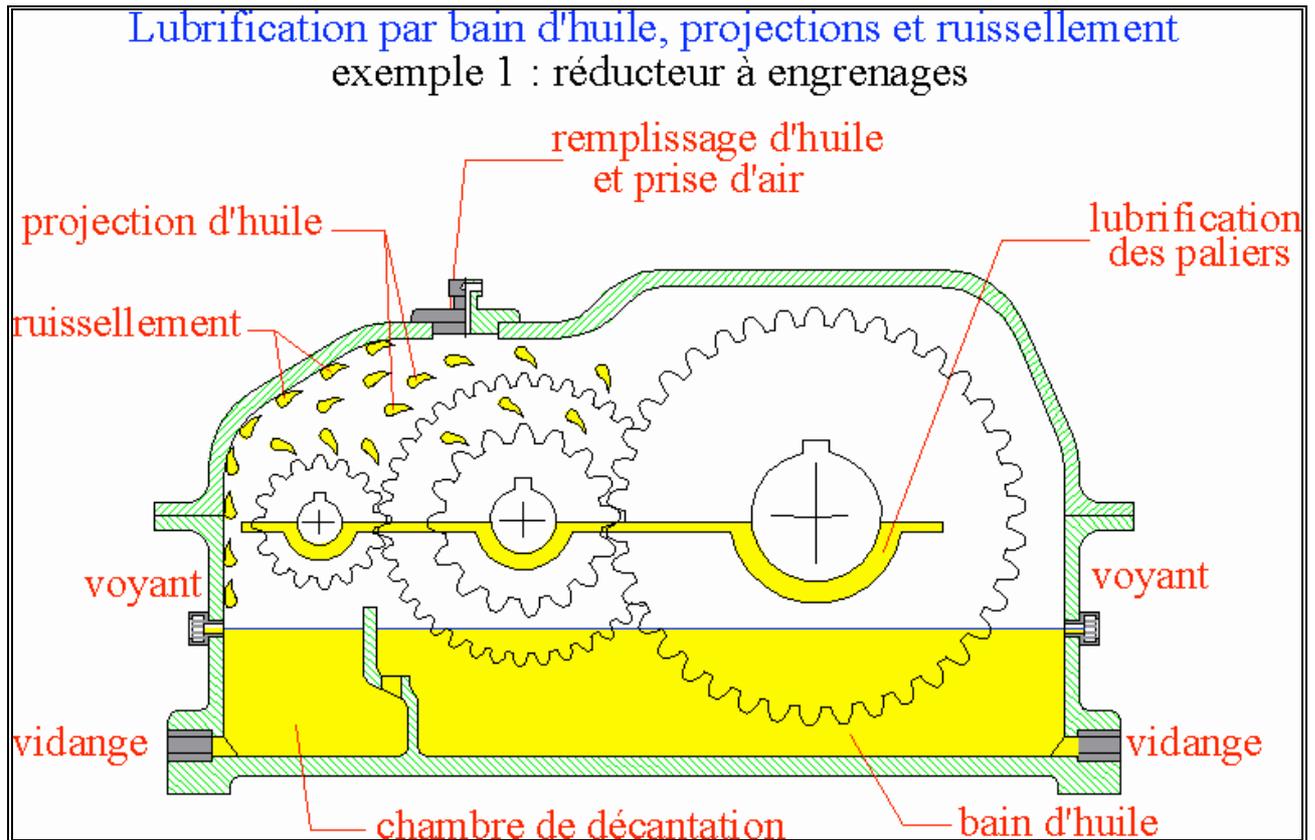


Figure 15 : Principe de lubrification d'un réducteur à engrenages

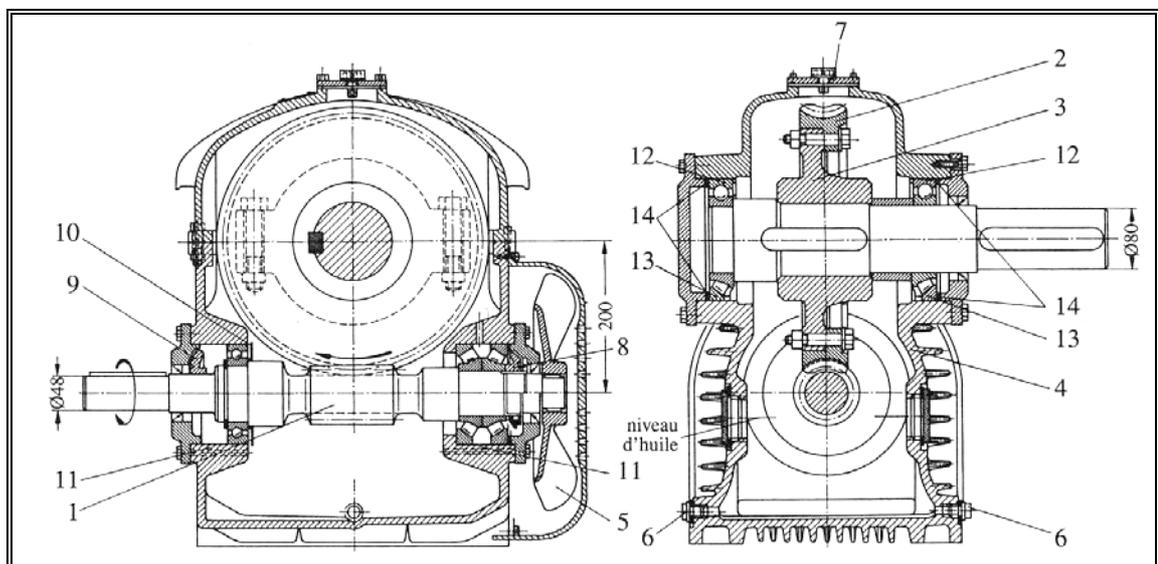


Figure 16 : Réducteur à roue vis sans fin (doc Flender)

Les deux exemples suivants, figures 17 & 18, montrent le principe de circulation de l'huile, avec la récupération.

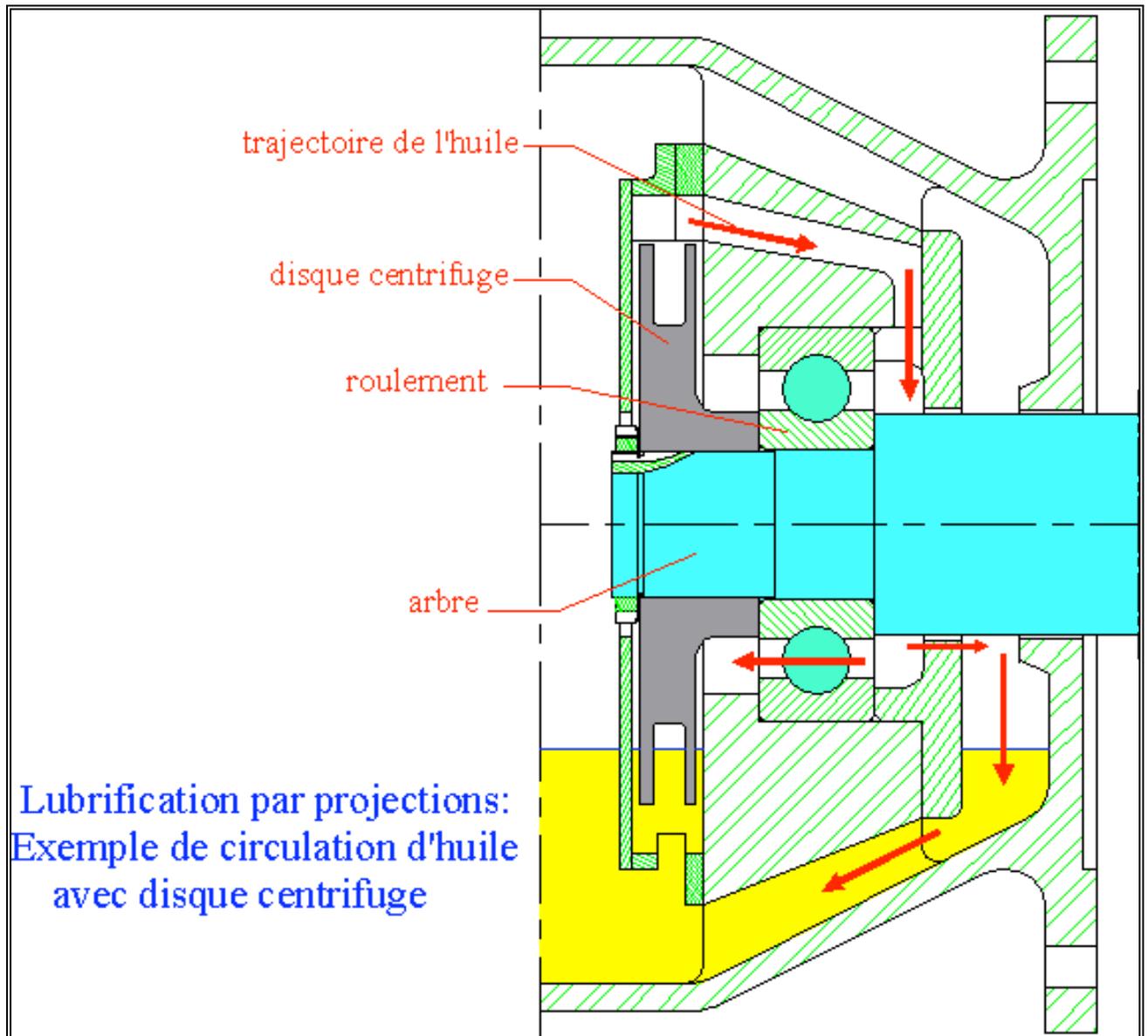


Figure 17 : Principe de lubrification par projection

L'exemple suivant, figure 18, nous montre les différentes solutions technologiques employées dans différents systèmes pour cette lubrification. Enfin, la figure 19 montre le principe d'une lubrification par brouillard d'huile, très souvent utilisée dans les mécanismes ayant des vitesses élevées.

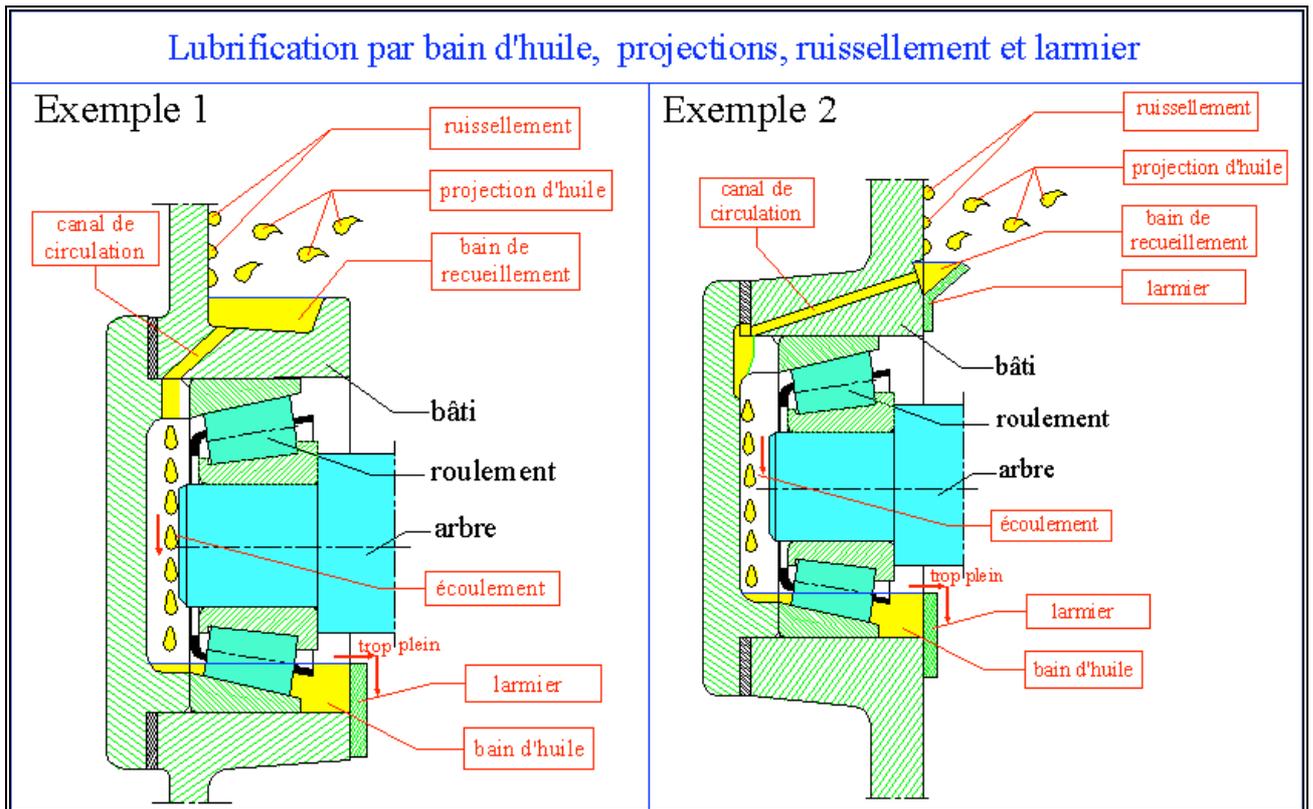


Figure 18 : Principe de lubrification par projection et ruissellement

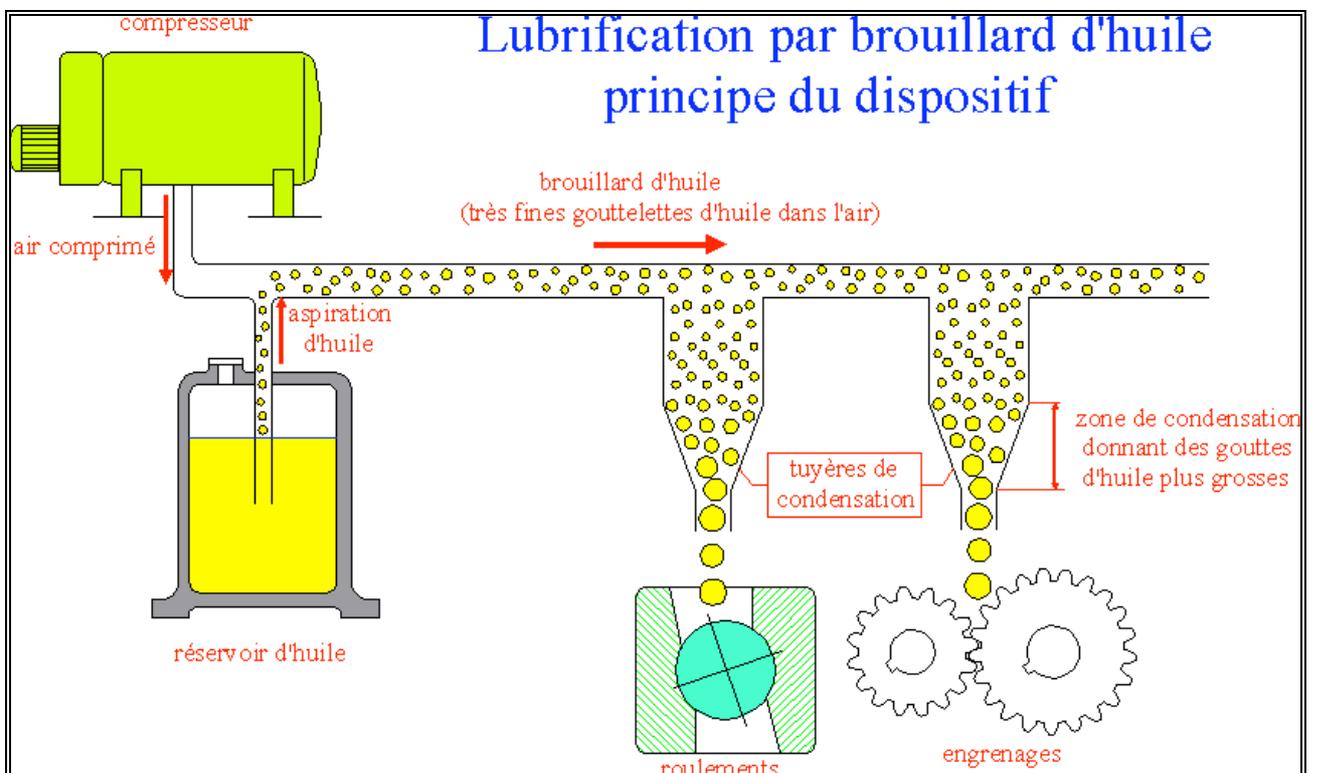


Figure 19 : Principe de lubrification par brouillard d'huile

3.2 Lubrification à la graisse

La lubrification à la graisse permet une simplification des divers mécanismes d'amenée du lubrifiant. Toutefois, cette simplification n'est possible que pour des vitesses moyennes et des échauffements limités.

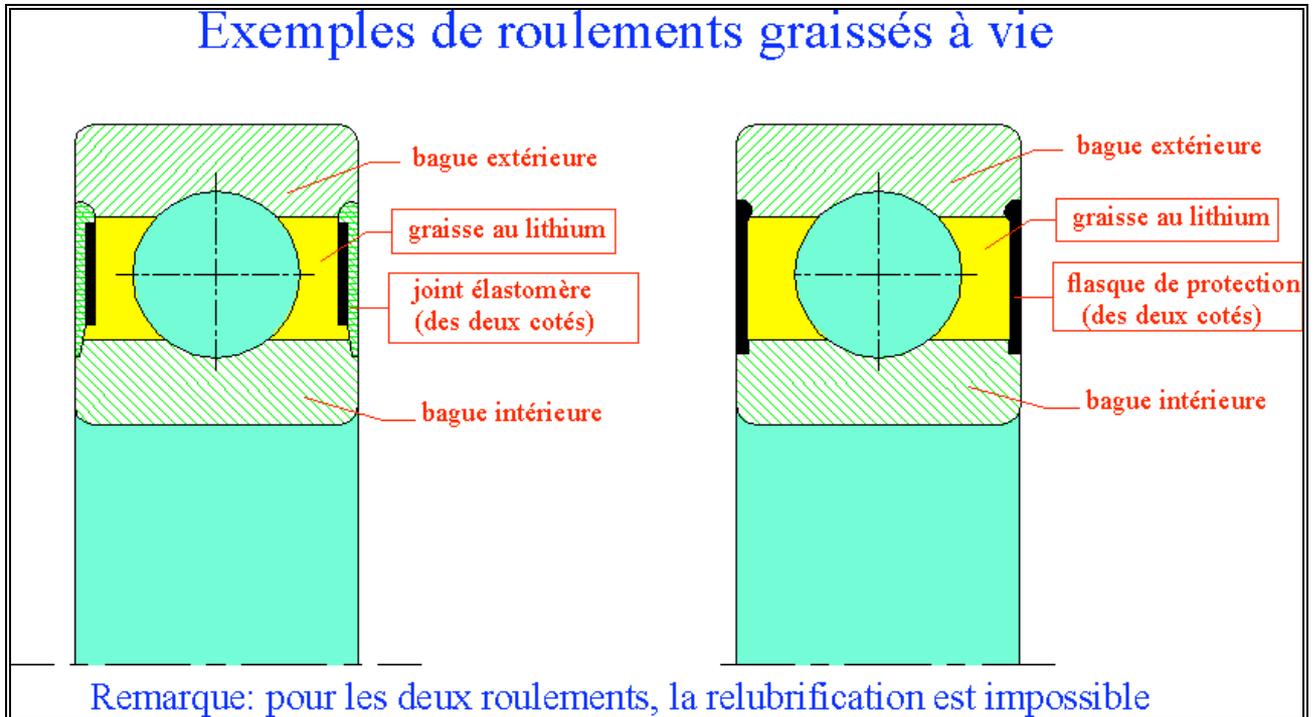
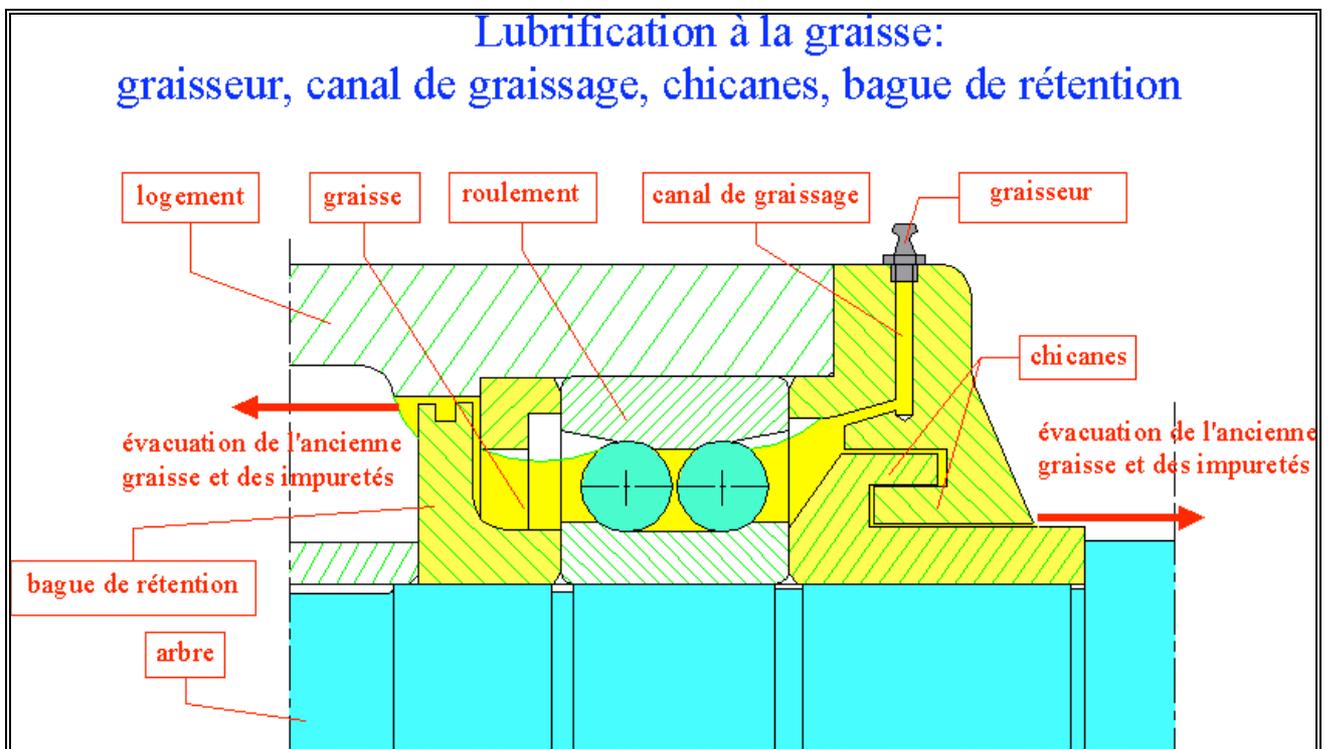


Figure 20 : Exemple sur des roulements rigides à billes



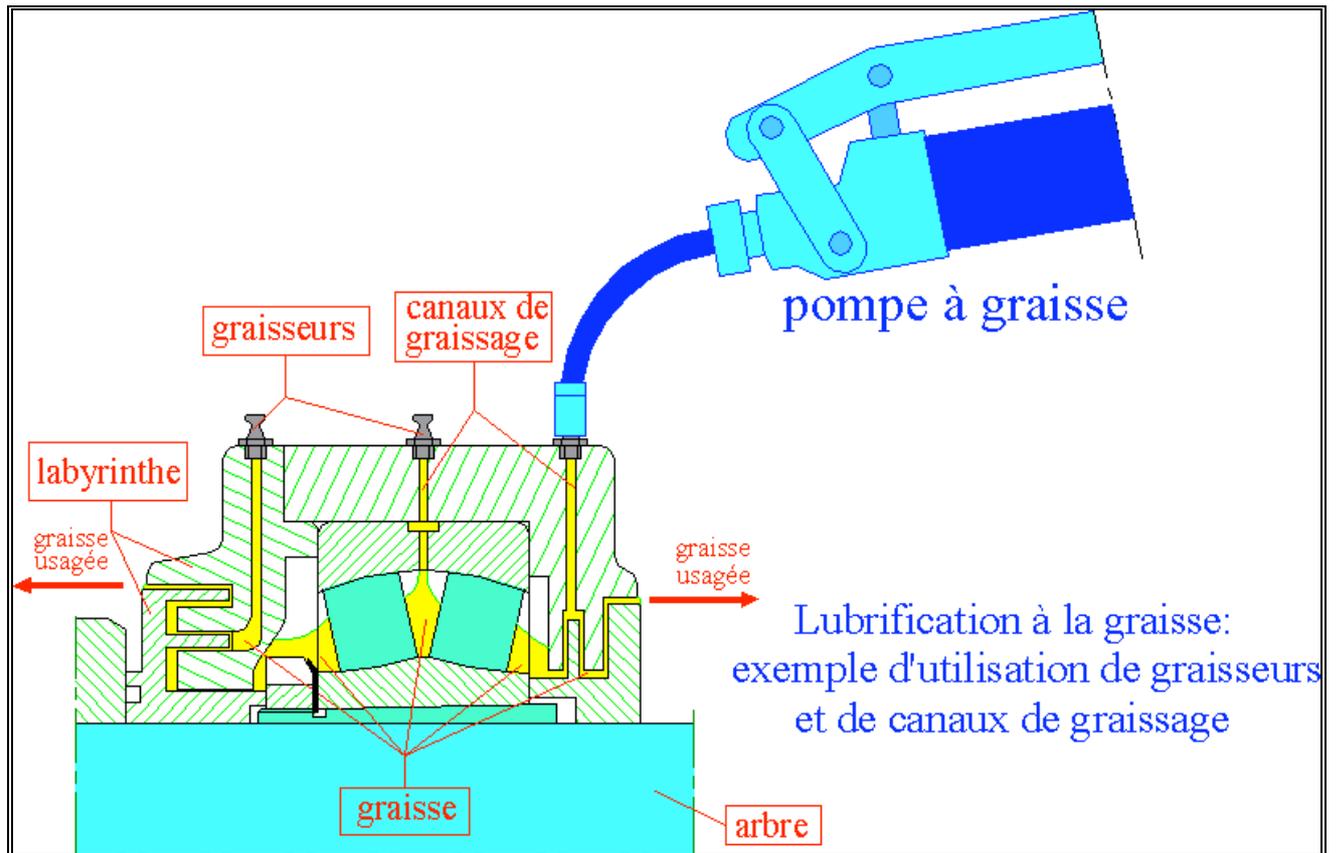


Figure 22 : Graissage d'un palier de roulement

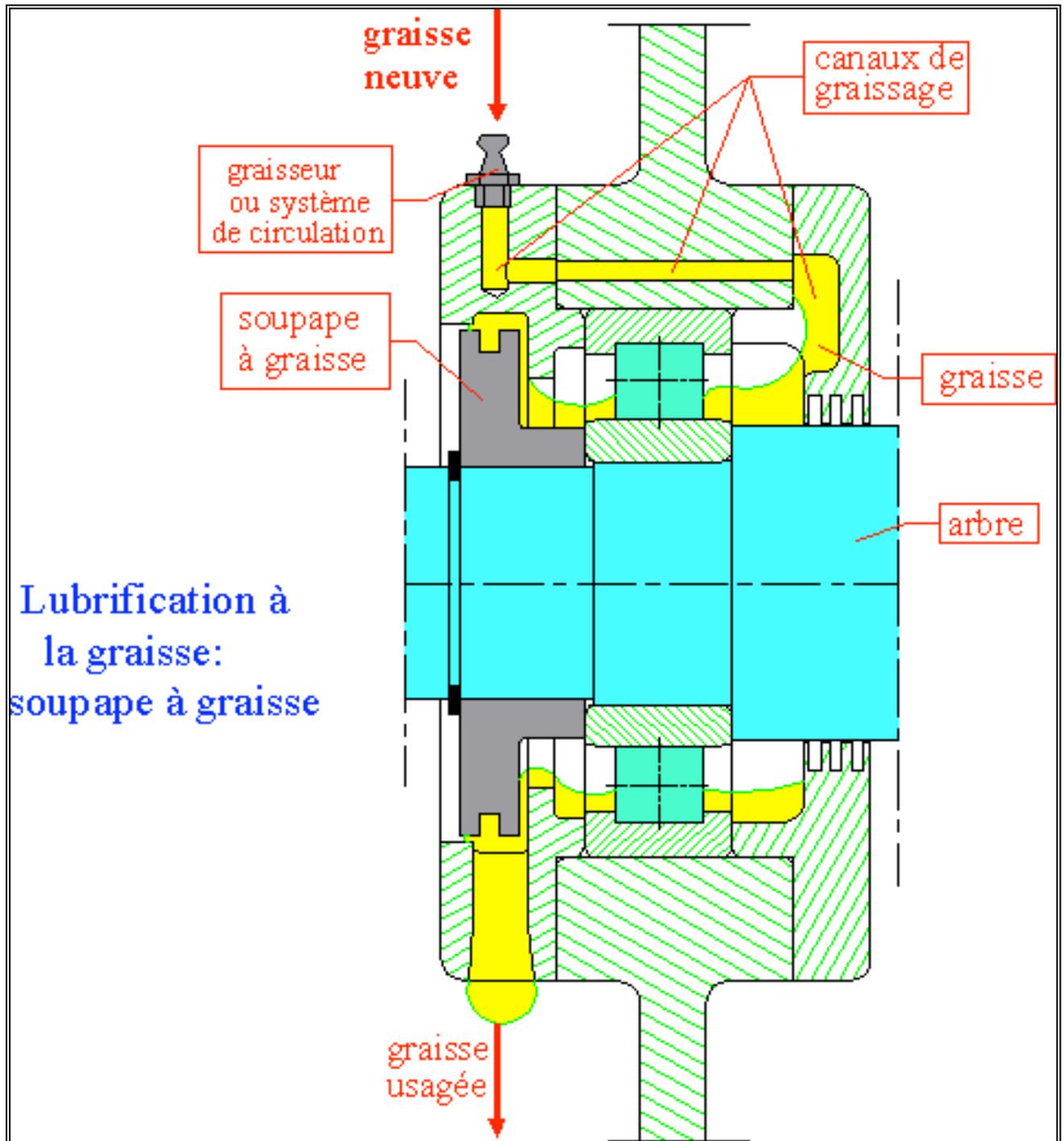


Figure 23 : Exemple avec soupape à graisse

4. ANNEXES

Glossaire concernant les lubrifiants

Bibliographie

Mécanique expérimentale des fluides : R.Comolet Tome II

www.shell.ca/code/products/commercial/lubricants/dir_pb_commercial_lubricants_f.html

www.lubrifiants.elf.com/fr/

www.hutchinson.fr/

P.A. BOUCARD : Lubrification - Etanchéité (Cours Préparation agreg mécanique)

INA Roulements : catalogue général

BP Lubrifiants industriels

Catalogue MOLYCOTE édition française

Guide des STI Fanchon - Afnor Nathan

Conception des machines (Principes et applications) : Tome II G Spinnler