

## 2. La température → modérée

Au-delà de son point de goutte, la graisse perd sa consistance et s'écoule. Il est recommandé que la température de service (ou de fonctionnement) :  $T_s < T_{pt\ de\ goutte} \rightarrow 60^\circ C$

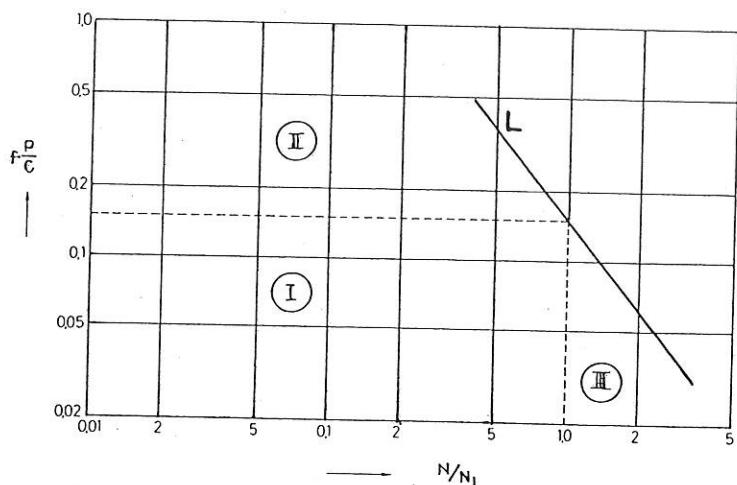
Des températures très basses provoquent un durcissement. Il convient dans ce cas d'utiliser des bases lubrifiantes très fluides, à bas point d'écoulement.

## 3. La charge → en général < charge critique

Si :  $C/P < 5$  billes  
 $< 8$  rouleaux (ou  $k < 1$ ) → graisses avec additif E.P. ou avec une huile de base de  $V_{40^\circ C} \geq 150 \text{ mm}^2/\text{s}$

$C/P > 30$  rouleaux → graisses synthétiques (très faibles charges)  
 (graisse à base d'huile de silicium uniquement si  $C/P > 30$ )

### Choix d'une graisse



Détermination de la graisse à l'aide de la vitesse et de la charge (d'après FAG)

$f=1$  si  $F/F_a \leq 1$   
 charge radiale prédominante

$f=2$  si  $F/F_a > 1$   
 charge axiale prédominante

$N_l$  = vitesse de rotation limite

#### Zone I charges normales, $N < N_l$

- graisses à base d'huile minérale et de savon traditionnel
  - $-20 < T_s < 60^\circ C$  savon de calcium et si  $Ndm < 400000$
  - $-10 < T_s < 100^\circ C$  savon de sodium } et si  $Ndm < 500000$
  - $-30 < T_s < 130^\circ C$  savon de lithium }
- + additifs anti-oxydant et anti-corrosion si milieu humide.

N.B. Au voisinage de la droite limite L,  $T_s$  sera élevée.  
 → graisses avec huile de base de forte viscosité

#### Zone II charges élevées, $N/N_l \leq 2/3$

- graisses identiques à celles de zone I mais avec additif E.P.

#### Zone III charges faibles, $N > N_l$ (vitesses élevées)

- graisses avec huile de base de très faible viscosité (minérale ou synthétique)
- + additif d'adhérence

N.B. Pour des températures de service :

$T_s \rightarrow 180^\circ\text{C}$  avec  $N/N_L \leq 1/3 \rightarrow$  graisses synthétiques à savon de bentone et huile très visqueuse ou huile de silicium.

$T_s \rightarrow 220^\circ\text{C}$  avec  $N_{dm} < 10^4 \rightarrow$  produits de synthèse

$T_s \rightarrow -60^\circ\text{C}$  avec  $N/N_L \leq 2/3 \rightarrow$  graisses avec huile de base de très faible viscosité ( $\nu_{40^\circ\text{C}} \sim 10 \text{ à } 15 \text{ mm}^2/\text{s}$ )

### Consistance d'une graisse pour roulement

- Roulements à billes  $\rightarrow NLGI 2$  si  $dm < 100$   
 $NLGI 3$  si  $dm > 100$  ou si  $dm < 100 +$  vibrations  
 $NLGI 1$  si  $T_s$  faible, nécessite joints efficaces

- Roulements à rouleaux  $\rightarrow NLGI 1$  ou  $2$

- Roulements à aiguilles  $\rightarrow NLGI 1$  ou  $2$ , si  $T_s < 80^\circ\text{C}$  et  $dm < 50$   
 $NLGI 3$  si  $T_s > 80^\circ\text{C}$

- Douilles à billes  $\rightarrow NLGI 1$  ou  $2$  si  $C/P > 8$   
 $NLGI 2$  ou  $3$  si  $C/P < 8$

\* Pour des systèmes de graissage centralisé  $\rightarrow NLGI 2$  maxi ou  $NLGI 1$  à 0 si petits tubes ou si  $T_a$  basse.

\* Pour les montages avec arbre vertical  $\rightarrow NLGI 3$  + chicane sous le roulement pour éviter que la graisse ne s'en échappe.

### Intervalle de graissage

La relubrification doit toujours être effectuée alors que le roulement est encore lubrifié de façon satisfaisante. La durée séparant deux graissages successifs dépend de nombreux facteurs dont les relations sont complexes. On peut citer le type de roulement et la dimension, la vitesse, la température de service, le type de graisse, l'espace autour du roulement et l'environnement.

Les intervalles de graissage  $t_f$  pour des roulements montés sur arbres horizontaux dans des machines stationnaires sous charge normale à  $T_s < 70^\circ\text{C}$  sont :

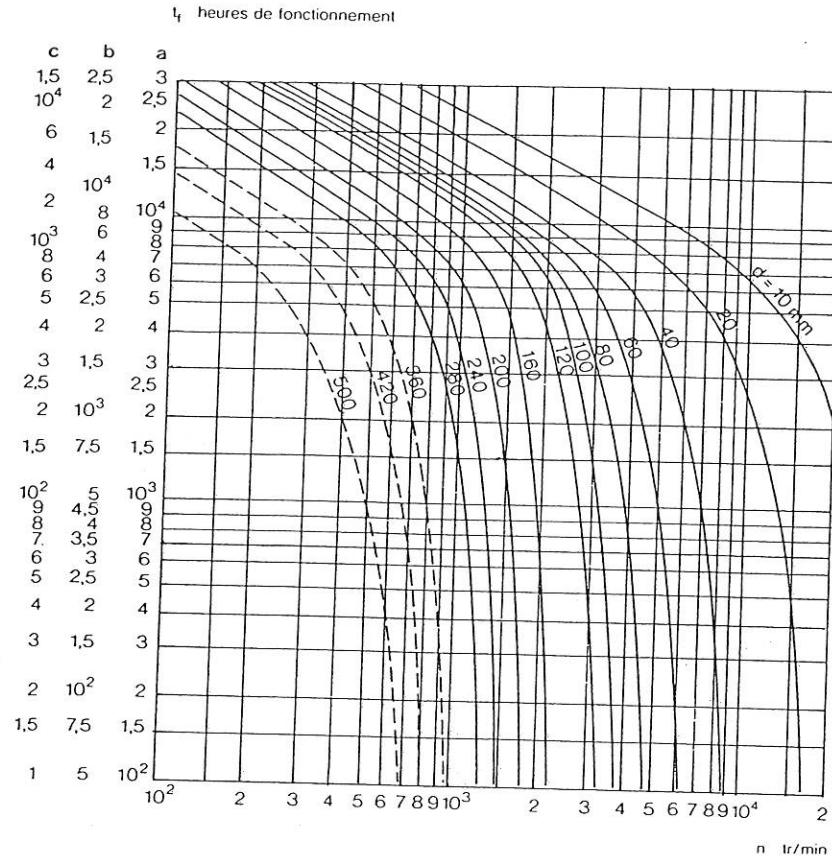
$$\rightarrow t_f (\text{h}) = K \left( \frac{14 \cdot 10^6}{N \sqrt{d}} - 4d \right) \quad d = \phi \text{ alésage en mm} \quad N = \text{vitesse de rotation en tr/min}$$

$K = 10$  roulements à billes

$K = 5$  " à rouleaux cylindriques ou à aiguilles,

$K = 1$  " roule sur rouleaux, rouleaux coniques, butées à billes.

$\rightarrow t_f$  par lecture de l'abaque p. 41 (d'après SKF)  
 ne s'applique qu'à des graisses au lithium de bonne qualité ( $t_f \approx L_{10}/2$ )  
 voir graisses SKF



Echelle a: roulements à billes radiaux

Echelle b: roulements à rouleaux cylindriques, roulements à aiguilles

Echelle c: roulements à rouleaux sur rouleaux, roulements à rouleaux coniques, bulées à billes, roulements à rouleaux cylindriques jointifs (O-R-I)

roulements à rouleaux cylindriques jointils (0.2 t<sub>1</sub>);  
roulements à rouleaux cylindriques croisés avec cage (0.2 t<sub>1</sub>)

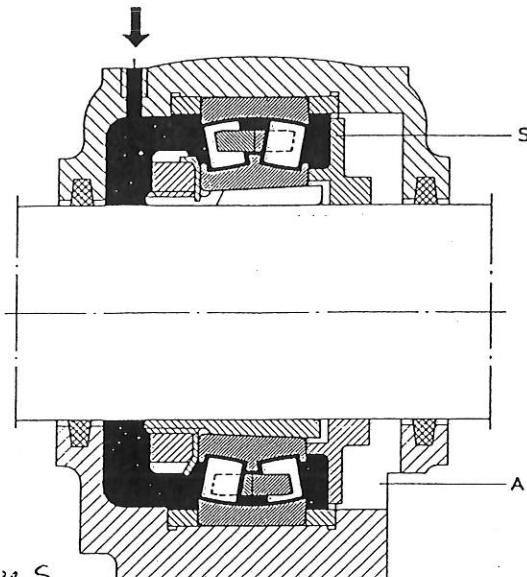
## Hypothèses et recommandations

- arbres horizontaux sur machines stationnaires
  - charge normale,  $T_s < 70^\circ\text{C}$
  - graisses au lithium de bonne qualité.
  
  - Si  $T_s > 70^\circ\text{C}$  mais  $< T_{\text{limite}}$   
 →  $t_f / 2$  pour chaque augmentation de  $15^\circ$
  - Si arbres verticaux  
 →  $t_f$  abaque / 2
  - non valable si pénétrations d'eau et/ou de particules possibles ⇒ renouveler fréquemment la graisse pour éliminer les impuretés
  - éviter des  $t_f > 20000\text{ h}$
  - Si  $d > 300$  retenir de préférence une lubrification continue.  
 (graissage centralisé)

- Si  $t_f < 6$  mois  $\Rightarrow$  apponts réguliers à  $0,5 t_f$ . Après 2 à 3 apponts la graisse devrait être entièrement renouvelée.  
quantité de graisse par appont :  
 $G(g) = 0,005 \cdot D \cdot B$ 
    - $D = \phi_{\text{extérieur du rouleau}}$  (mm)
    - $B = \text{largeur du rouleau}$  (mm)  
=  $H$  si butées.
  - Si  $t_f > 6$  mois  $\Rightarrow$  enlever toute la graisse usée et la remplacer par de la graisse neuve
  - Quantité de graisse à fournir en permanence si lubrification continue  
 $G_k(g/h) = (0,3 \text{ à } 0,5) \cdot D \cdot B \cdot 10^{-4}$

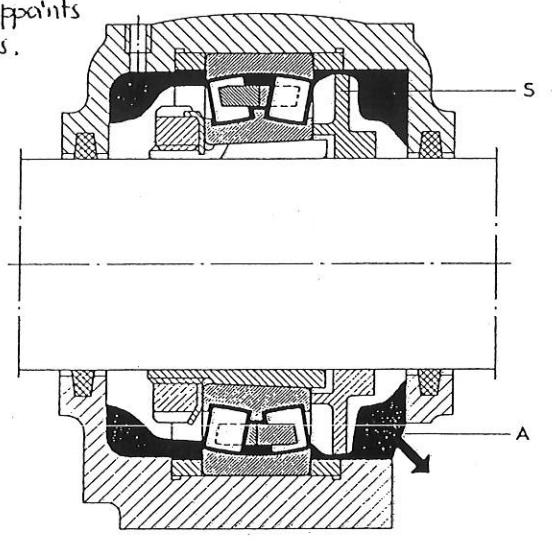
Graisses SKF	LGMT2	LGMT3	LGEP2	LGEM3	LGLT2	LGHT3
savon	lithium	lithium	lithium	lithium	lithium	lithium complexe
T <sub>s</sub> en continu (°C)	-30 + 120	-30 + 120	-30 + 110	-20 + 120	-55 + 110	-30 + 150
Consistance NLGI	2	3	2	2	2	3
η <sub>40°C</sub> de l'huile de base (mm <sup>2</sup> /s)	91	120	195	510	16	10
	← huile de base			minérale		→

## Dispositions constructives pour lubrification à la graisse



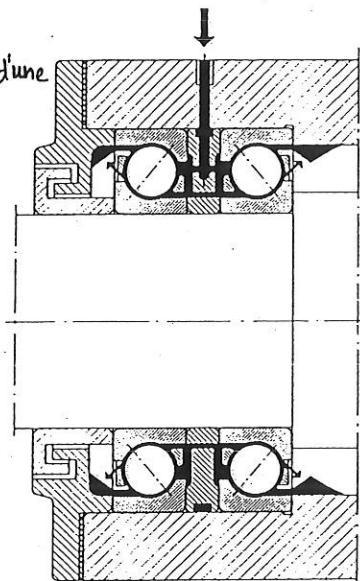
Le disque S fait office de souffle à graisse.  
Indiqué pour les cas à apponts fréquents.

avant le démarrage

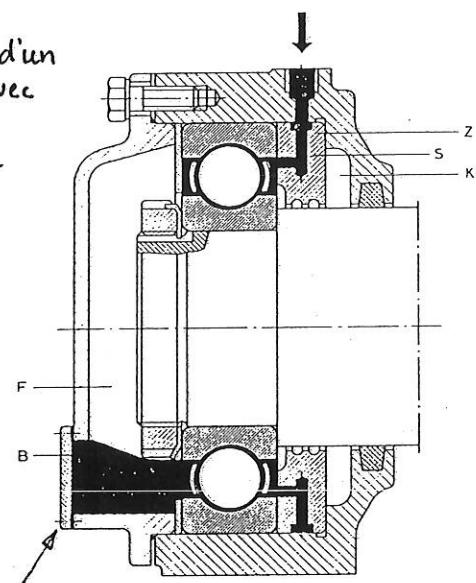


pendant le service

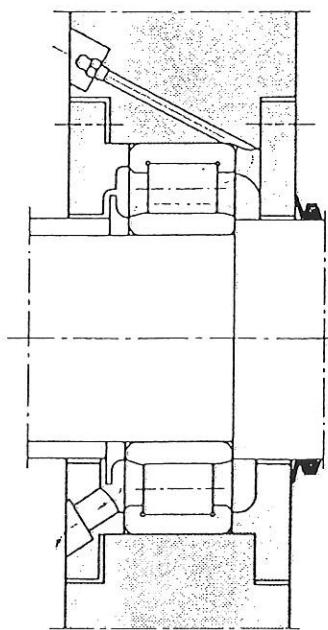
Graissage d'une paire de roulements par trou médian



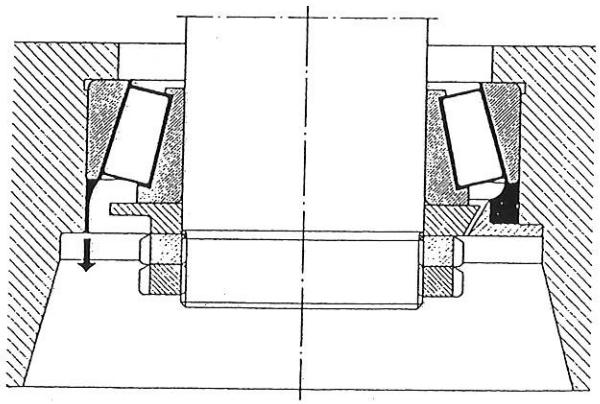
Montage d'un disque avec trous de graissage



accumulation de la graisse refoulée par la nouvelle charge. Vidange périodique par orifice B.



### Arbre vertical



→ disque de refoulement

### 10.3 - Lubrification à l'huile

La lubrification à l'huile s'impose lorsque les vitesses de rotation ou les températures de fonctionnement sont trop élevées pour permettre l'emploi de la graisse. Il en est de même lorsque les éléments voisins (engrenages par exemple) sont également lubrifiés à l'huile.

#### Modes de lubrification

##### • Bain d'huile ou barbotage (si $T_s < 70^\circ\text{C}$ )

→ procédé le plus simple, l'huile est entraînée par les éléments rotatifs. A l'arrêt le niveau d'huile doit atteindre le centre de l'élément rotatif le plus bas.

##### • Circulation

→ à retenir pour les vitesses élevées. Assure un meilleur refroidissement du roulement et une plus grande longévité du lubrifiant ( $\Delta T$  plus faible).

Permet la filtration du lubrifiant mais nécessite une pompe.

##### • Injection et brouillard d'huile ( $N_{dm} > 800000$ )

→ nécessaire aux très grandes vitesses pour éviter une élévation de température et une perte de puissance injustifiée.

Injection → plusieurs gicleurs, vitesse du lubrifiant  $> 15 \text{ m/s}$

Brouillard → quantité d'huile dosée injectée à des intervalles déterminés par un groupe doseur.

Avec les lubrifications par circulation, par jet ou brouillard d'huile, il est nécessaire de vérifier que le lubrifiant qui s'échappe du roulement peut quitter le montage par des canaux convenablement dimensionnés.

#### Choix du lubrifiant

- Détermination de la viscosité requise pour assurer une lubrification adéquate à la température de service  $T_s$ .

→ abaque p. 44, valable pour des huiles minérales de  $VI \geq 85$

- Détermination du type d'huile en fonction des conditions d'utilisation (milieu humide, roulement chargé...)

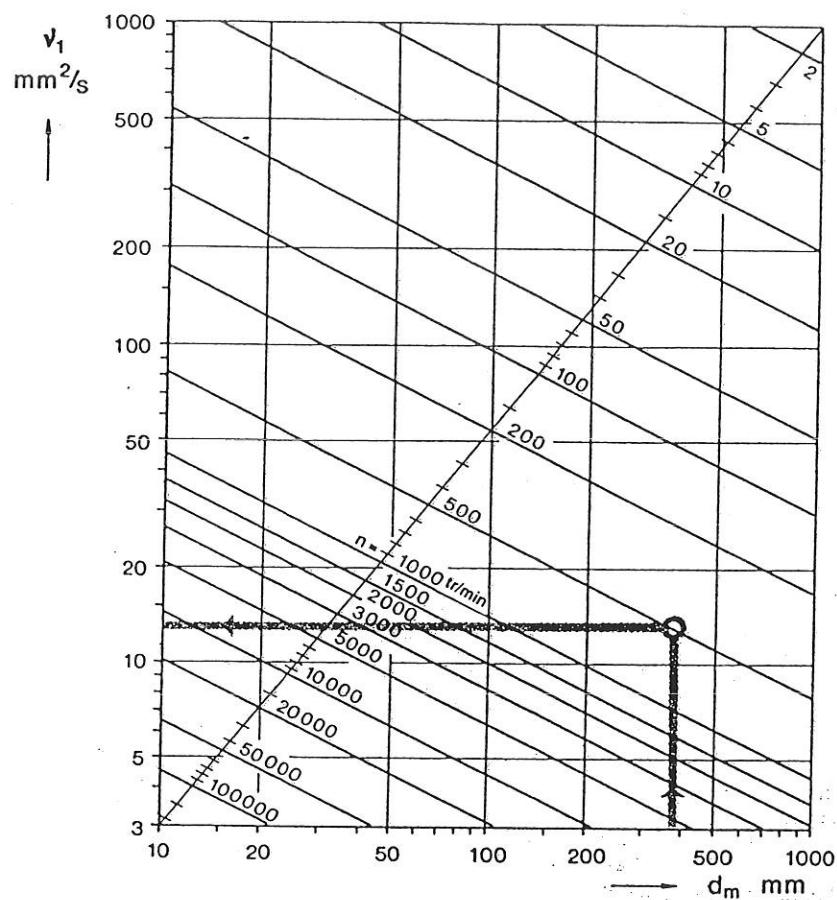
$T_s \geq 80^\circ\text{C}$  → additif anti-oxydants + additif stables thermiquement  
 $\eta_p < 5$  ou  $k = \nu/\nu_1 < 1$  → additif E.P.

#### Recommandations

- Utiliser de l'huile filtrée à  $20 \mu\text{m}$  qui circule 3 à 6 fois / heure.  
 Éviter les petites réserves d'huile ( $< 2 \text{ l}$ ) en raison de l'altération et du refroidissement. ( $q_r = P_d (\rho C_p \Delta T)^{-1}$  avec  $\Delta T \leq 10^\circ\text{C}$ )

- La fréquence de vidange dépend principalement de  $T_s$  et/ou du degré de pollution qui doit rester  $< 0,2\%$ .

$T_s < 70^\circ\text{C}$  → 1 an maxi } dépend également de la quantité d'huile.  
 $T_s > 80^\circ\text{C}$  → 2 à 3 mois }



Abaque donnant la viscosité requise à  $T_s$ .

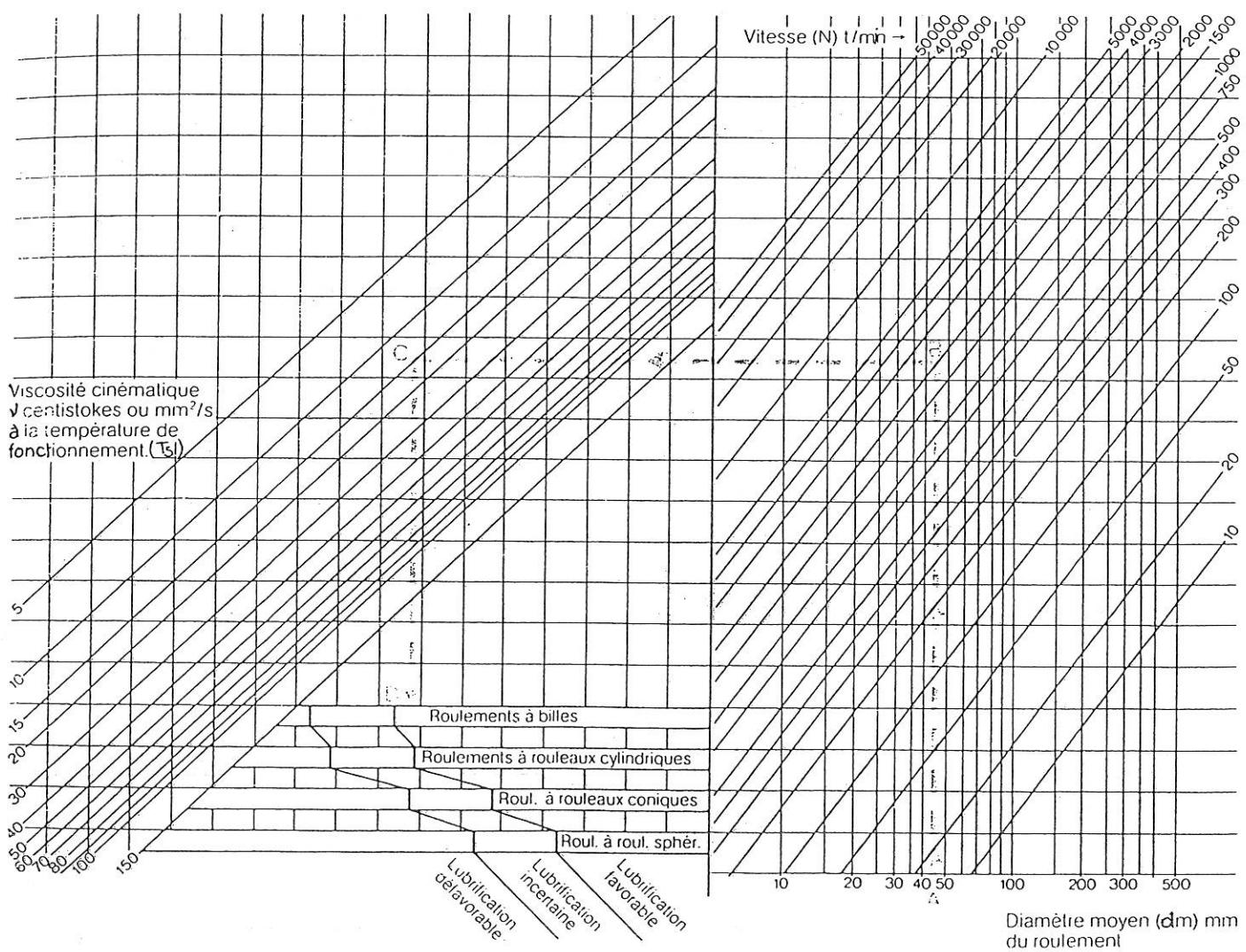
$N < 1000 \text{ tr/min}$

$$v_1 = \frac{4500}{\sqrt{N} d_m} \sqrt[3]{1000}$$

$N > 1000 \text{ tr/min}$

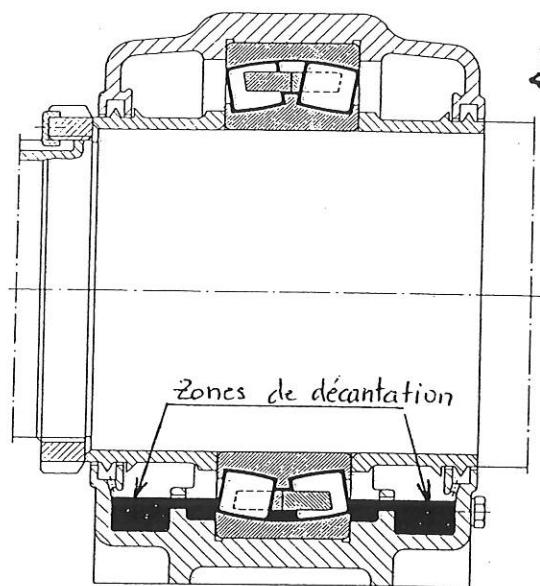
$$v_1 = \frac{4500}{\sqrt{N} d_m}$$

Diagramme tiré de la théorie EHD permettant de vérifier l'efficacité du lubrifiant choisi.



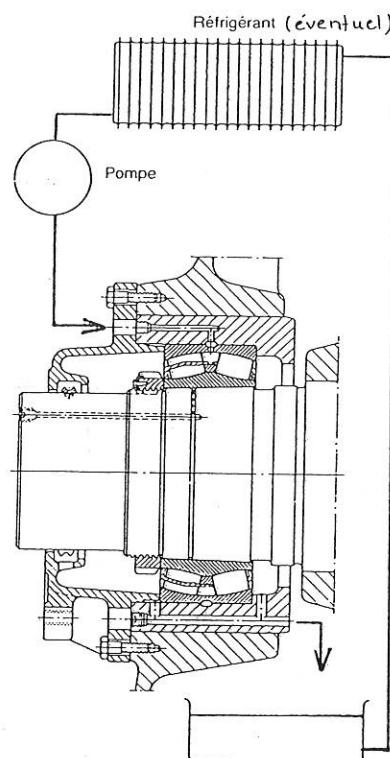
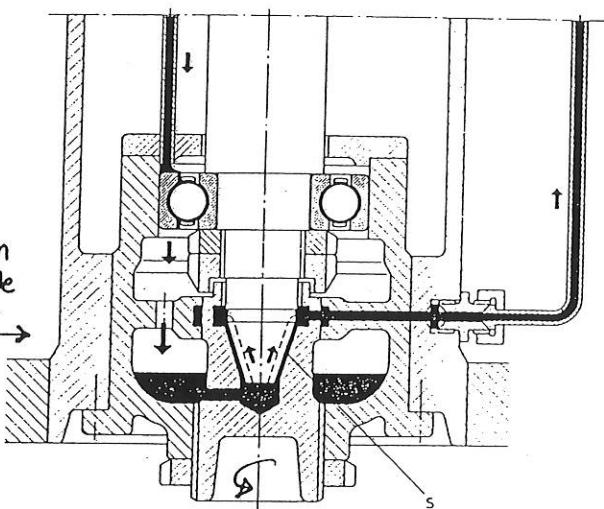
Diamètre moyen ( $d_m$ ) mm du roulement

## Dispositions constructives pour lubrification à l'huile

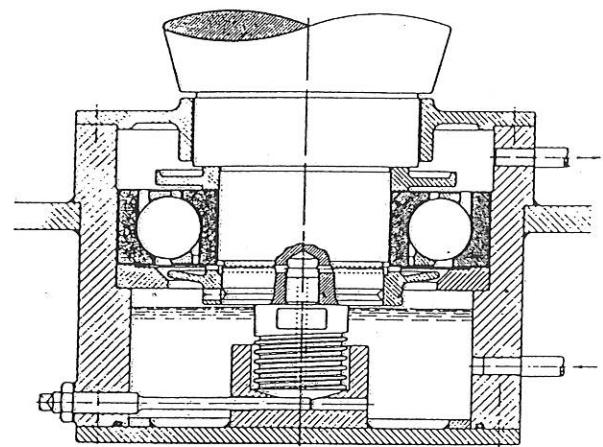


Bain d'huile

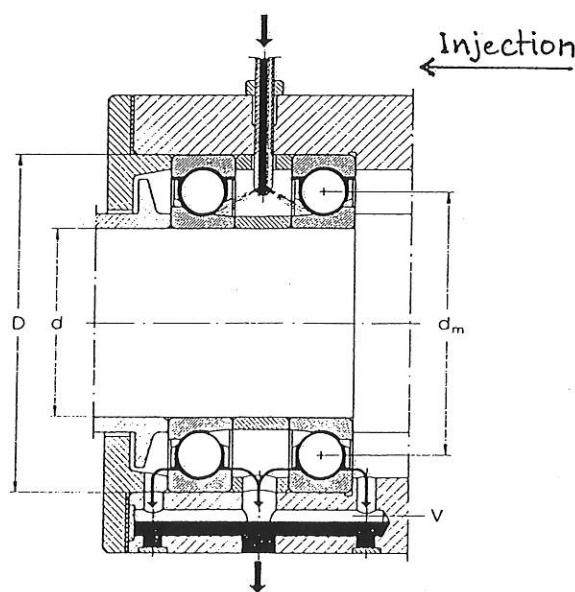
circulation par cône de refoulement  
arbre vertical, de N élevée



circulation

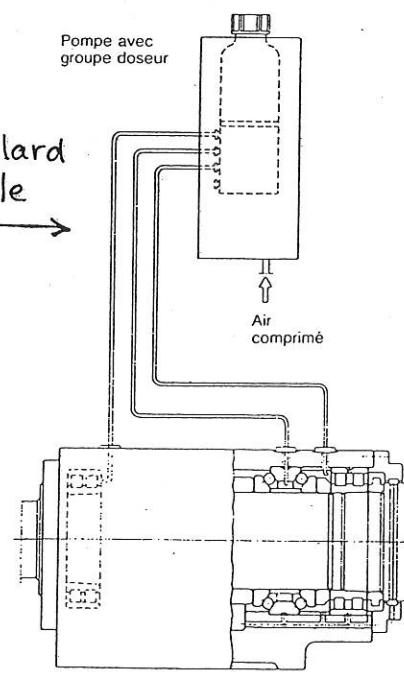


Palier inférieur d'une machine verticale.  
Lubrification par circulation d'huile assurée par une vis.



Injection

Brouillard d'huile



## 10.4- Durée de vie corrigée

$$L_{na} = a_1 a_2 a_3 L_{10} \quad \text{avec } L_{10} = \text{durée de vie nominale}$$

$a_1$  = facteur de correction relatif à la fiabilité

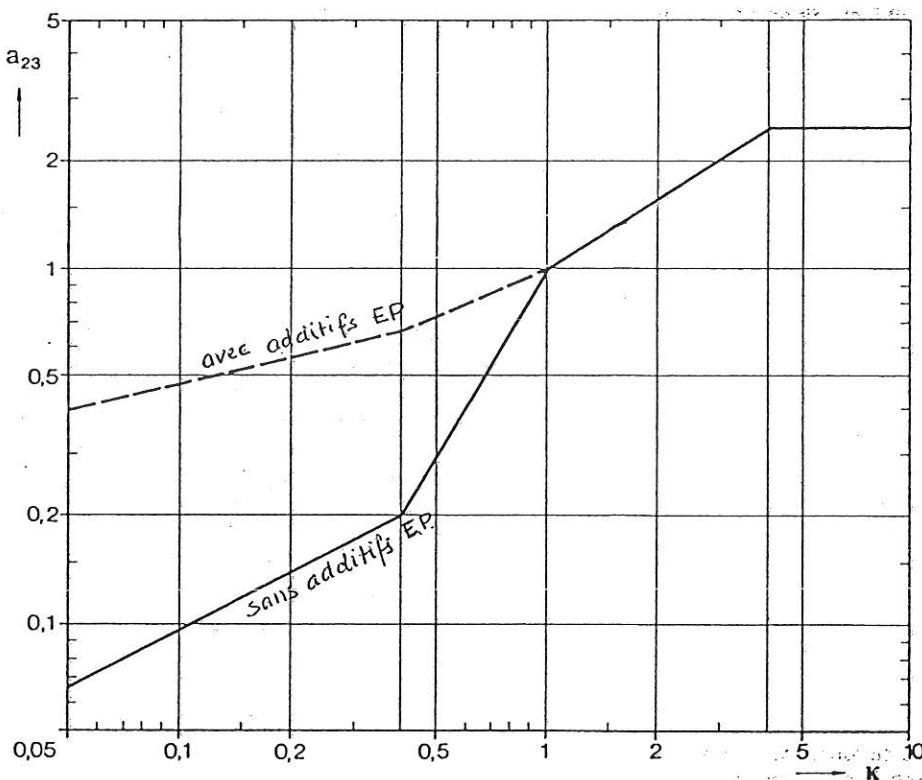
$a_2$  = facteur de correction relatif à la matière

$a_3$  = facteur de correction relatif aux conditions de fonctionnement.

F %	90	95	96	97	98	99
$a_1$	1	0,62	0,53	0,44	0,33	0,21
$L_{na}$	$L_{10}$	$L_{50}$	$L_{40}$	$L_{30}$	$L_{20}$	$L_{10}$

les facteurs  $a_2$  et  $a_3$  étant interdépendants, SKF remplace le produit  $a_2 \cdot a_3$  par un facteur unique  $a_{23}$ . La durée corrigée devient donc:

$$L_{na} = a_1 \cdot a_{23} \cdot L_{10} \quad \text{avec } a_{23} \text{ tiré du diagramme suivant en fonction de } K = \nu / \nu_1$$



$\nu$  = viscosité du lubrifiant utilisé  
 $\nu_1$  = viscosité requise

### Nouvelle théorie SKF

Prise en compte de la charge limite de fatigue  $P_u$ , en dessous de laquelle le fatigue ne se produira pas dans le roulement.

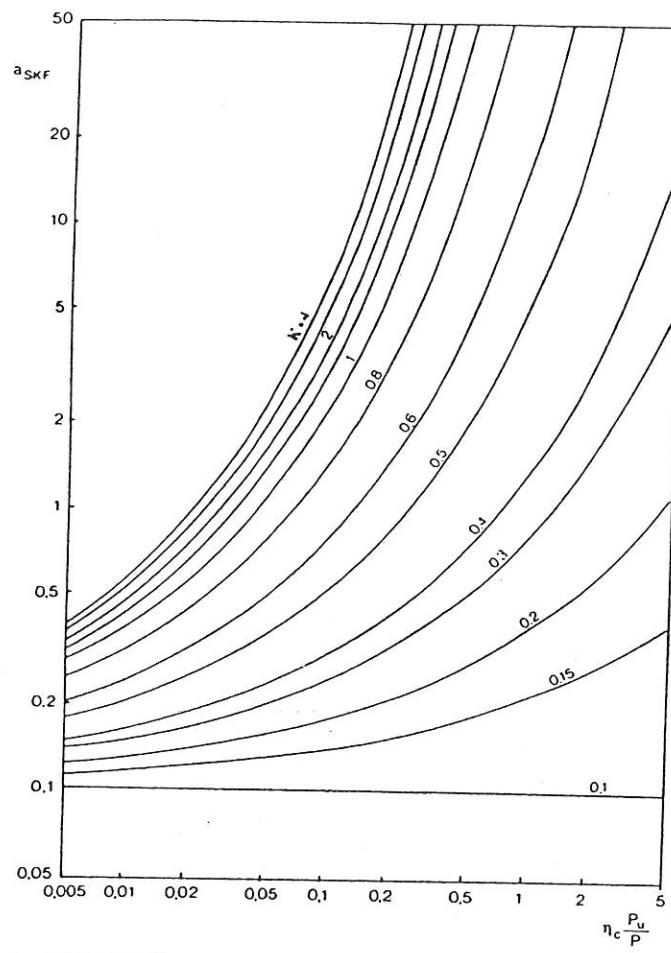
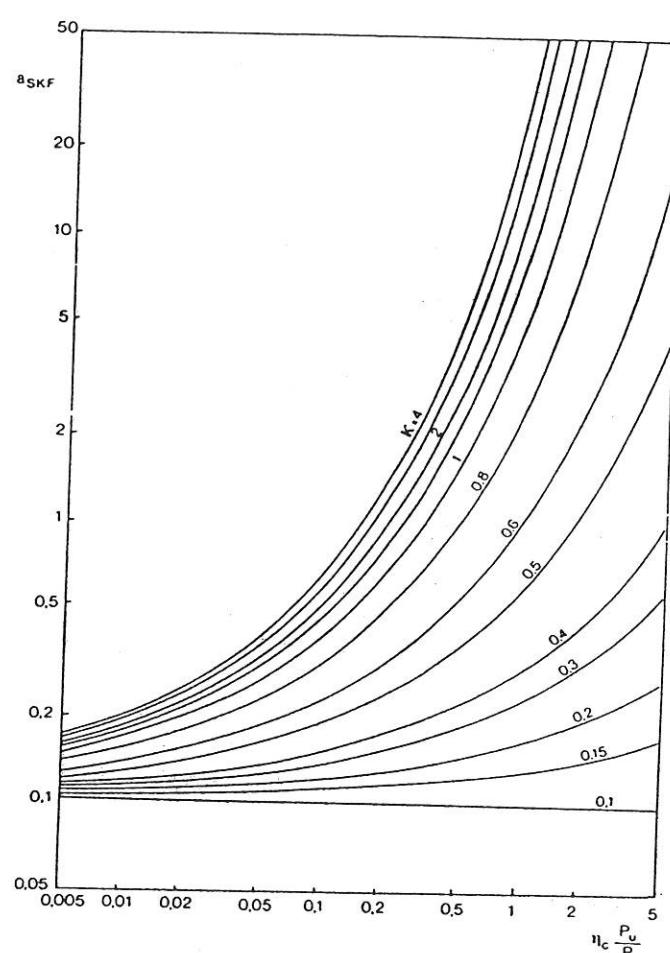
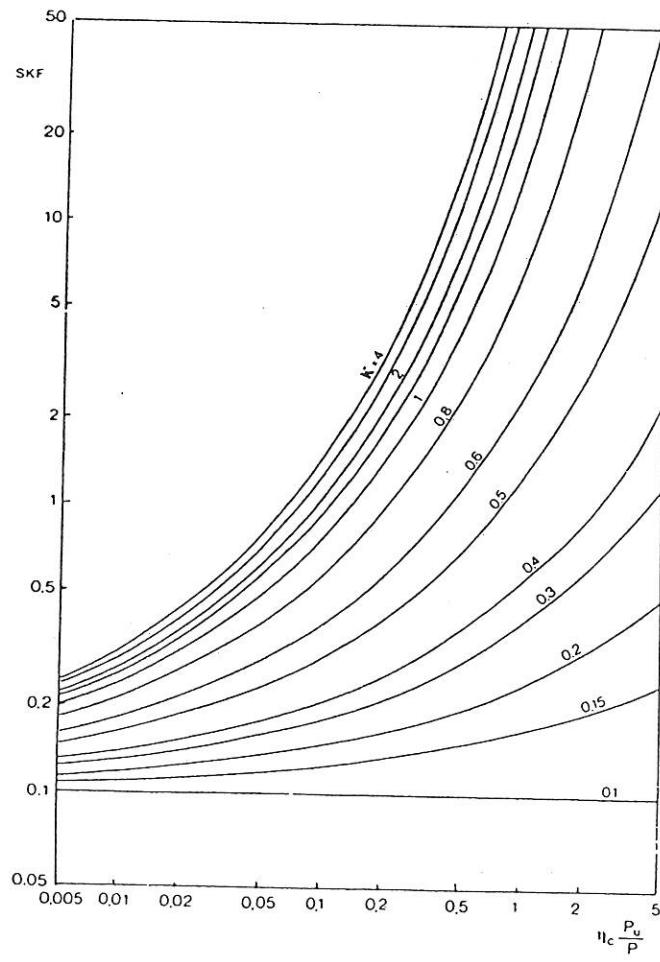
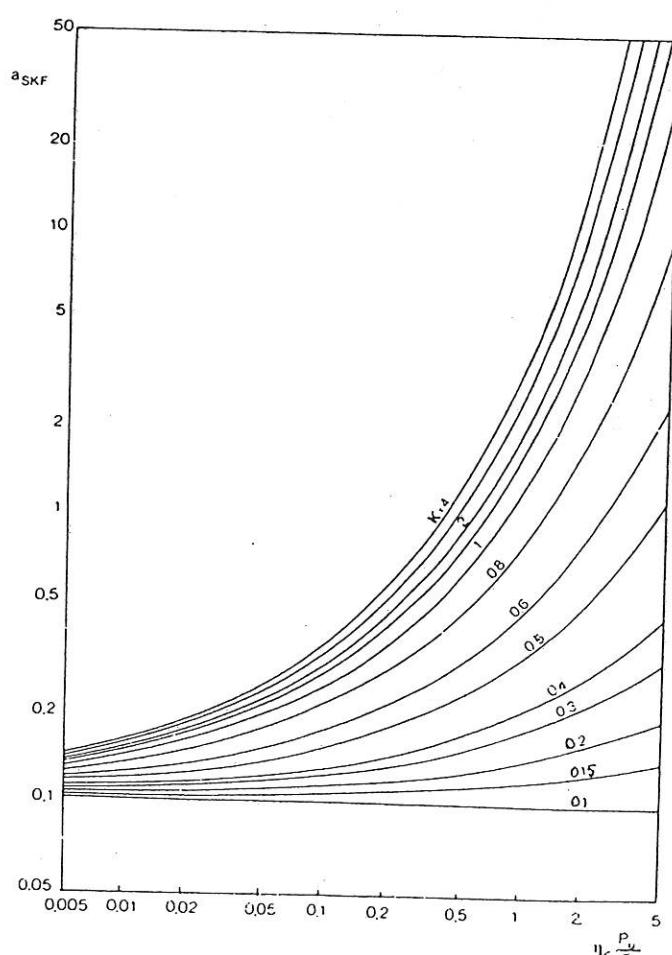
$$\rightarrow L_{naa} = a_1 a_{SKF} L_{10}$$

$a_{SKF}$  = facteur représentant un ensemble interdépendant très complexe de plusieurs paramètres incluant les conditions de lubrification.

$a_{SKF}$  est donné en fonction de  $\eta_c(P_u/p)$  pour différentes valeurs de  $K$  dans les 4 diagrammes de la page suivante.

$P_u$  est donnée dans le catalogue SKF.

Condition	$\eta_c$
Très propre La taille des impuretés est de l'ordre de l'épaisseur du film lubrifiant	1
Propre Conditions typiques des roulements graissés à vie, munis de joints	0,8
Normale Conditions typiques des roulements graissés à vie, munis de flasques	0,5
Polluée Conditions typiques des roulements sans joints ni flasques intégrés; filtration sommaire du lubrifiant et/ou entrée de particules provenant de l'environnement	0,5 ... 0,1

ur  $a_{SKF}$  pour roulements à billes radiauxFacteur  $a_{SKF}$  pour roulements à rouleaux radiaux $a_{SKF}$  pour butées à billesFacteur  $a_{SKF}$  pour butées à rouleaux

## 10.5. Frottement

### • Estimation du moment de frottement

$$M = \mu \cdot 0,5 d \cdot F$$

La précision peut être suffisante si  
 $P \approx 0,1 C$  avec une bonne lubrification  
et des conditions de fonctionnement normales.

$d = \phi$  alésage du roulement

$F =$  charge appliquée sur le roulement

Type de roulement	Coefficient de frottement $\mu$
Roulements rigides à billes	0,0015 <sup>1)</sup>
Roulements à rotule sur billes	0,0010 <sup>1)</sup>
Roulements à billes à contact oblique une rangée deux rangées	0,0020 0,0024 <sup>1)</sup>
Roulements à quatre points de contact	0,0024
Rouleaux à rouleaux cylindriques avec cage à rouleaux joints	0,0011 <sup>2)</sup> 0,0020 <sup>1)2)</sup>
Roulements à aiguilles	0,0025 <sup>1)</sup>
Roulements à rotule sur rouleaux	0,0018
Roulements à rouleaux coniques	0,0018
Butées à billes	0,0013
Butées à rouleaux cylindriques	0,0050
Butées à aiguilles	0,0050
Butées à rotule sur rouleaux	0,0018

✓ Valable pour rouleaux sans joints  
✓ Valable pour rouleaux sous charge axiale  
✓ Valable pour rouleaux sans charge axiale

### • Calcul plus précis du moment de frottement

$$M = M_0 + M_1$$

$M_0$  = moment provenant des pertes hydrodynamiques dans le lubrifiant, et indépendant de la charge.

$M_1$  = moment provenant des déformations élastiques et des mouvements de glissement dans les zones de contact, et dépendant de la charge.

Type de roulement	Facteur $f_0$ Lubrification à la graisse <sup>1)</sup>	Lubrification air-huile	Lubrification par bain d'huile	Lubrification par bain d'huile (arbre vertical) ou jet d'huile
Roulements rigides à billes une rangée deux rangées	0,75 ... 2 <sup>2)</sup> 3	1 2	2 4	4 8
Roulements à rotule sur billes	1,5 ... 2 <sup>2)</sup>	0,7 ... 1 <sup>2)</sup>	1,5 ... 2 <sup>2)</sup>	3 ... 4 <sup>2)</sup>
Roulements à billes à contact oblique une rangée deux rangées; une rangée, appariés	2 4	1,7 3,4	3,3 6,5	6,6 13
Roulements à quatre points de contact	6	2	6	9
Roulements à rouleaux cylindriques avec cage séries 10, 2, 3, 4 série 22 série 23	0,6 0,8 1	1,5 2,1 2,8	2,2 3 4	2,2 <sup>3)</sup> 3 <sup>3)</sup> 4 <sup>3)</sup>
Roulements à rouleaux cylindriques joints une rangée deux rangées	5 <sup>4)</sup> 10 <sup>4)</sup>	- -	5 10	- -
Roulements à aiguilles	12	6	12	24
Roulements à rotule sur rouleaux série 213 série 222 séries 223, 230, 239 série 231 série 232 série 240 série 241	3,5 4 4,5 5,5 6 6,5 7	1,75 2 2,25 2,75 3 3,25 3,5	3,5 4 4,5 5,5 6 6,5 7	7 8 9 11 12 13 14
Roulements à rouleaux coniques une rangée une rangée, appariés	6 12	3 6	6 12	8 ... 10 <sup>2)3)</sup> 16 ... 20 <sup>2)3)</sup>
Butées à billes	5,5	0,8	1,5	3
Butées à rouleaux cylindriques	9	-	3,5	7
Butées à aiguilles	14	-	5	11
Butées à rotule sur rouleaux série 292 E série 292 série 293 E série 293 série 294 E série 294	- - - - - -	- - - - - -	2,5 3,7 3 4,5 3,3 5	5 7,4 6 9 6,6 10

$$\cdot \nu N \geq 2000 \text{ mm}^2/\text{s} \cdot \text{tr/min}$$

$$\rightarrow M_0 = 10^{-7} f_0 (\nu N)^{2/3} \text{ dm}^3$$

(lub. hydrodynamique)

$$\cdot \nu N < 2000 \text{ mm}^2/\text{s} \cdot \text{tr/min}$$

$$\rightarrow M_0 = 160 \cdot 10^{-7} f_0 \text{ dm}^3$$

(lub. limite)

$$\nu = \text{viscosité à } T_s$$

S'il s'agit d'une graisse utiliser la viscosité de l'huile de base.

$f_0$  = facteur dépendant du type de roulement et du mode de lubrification

<sup>1)</sup> Valeurs applicables dans des conditions d'équilibre. Pour de nouveaux roulements garnis de graisse ou immédiatement après relubrification, utiliser (2 ... 4)  $f_0$ .

<sup>2)</sup> Utiliser la petite ou la grande valeur selon que le roulement, pour un alésage donné, a une faible ou forte section.

<sup>3)</sup> Valable pour lubrification par jet d'huile. Pour lubrification par bain d'huile et arbre vertical, doubler la valeur.

<sup>4)</sup> Valable pour les faibles vitesses, jusqu'à approximativement 20% de la vitesse de base (voir tableaux de roulements, pages 380 à 400). Aux vitesses supérieures, utiliser approximativement deux fois la valeur  $f_0$ .

$$M_1 = f_1 \cdot P_1^a dm^b$$

avec  $f_1$  = facteur dépendant du type de roulement et de la charge appliquée  
 $P_1$  = charge déterminant le moment de frottement  
 $a, b$  = exposants dépendant du type de roulement.

Type de roulement	$f_1$	$P_1^{1)}$	Type de roulement	Exposants a	Exposants b
Roulements rigides à billes	(0,0006 ... 0,0009) $(P_0/C_0)^{0,55^2}$	$3 F_a - 0,1 F_r$	Tous (sauf roulements à rotule sur rouleaux)	1	1
Roulements à rotule sur billes	0,0003 $(P_0/C_0)^{0,4}$	$1,4 Y_2 F_a - 0,1 F_r$	Roulements à rotule sur rouleaux		
Roulements à billes à contact oblique une rangée deux rangées; une rangée, appariés	0,001 $(P_0/C_0)^{0,33}$ 0,001 $(P_0/C_0)^{0,33}$	$F_a - 0,1 F_r$ $1,4 F_a - 0,1 F_r$	série 213	1,35	0,2
Roulements à quatre points de contact	0,001 $(P_0/C_0)^{0,33}$	$1,5 F_a + 3,6 F_r$	série 222	1,35	0,3
Roulements à rouleaux cylindriques avec cage série 10	0,0002	$F_r^{(3)}$	série 223	1,35	0,1
série 2	0,0003	$F_r^{(3)}$	série 230	1,5	-0,3
série 3	0,00035	$F_r^{(3)}$	séries 231, 232, 239	1,5	-0,1
séries 4, 22, 23	0,0004	$F_r^{(3)}$	séries 240, 241	1,5	-0,2
Roulements à rouleaux cylindriques jointifs	0,00055	$F_r^{(3)}$			
Roulements à aiguilles	0,002	$F_r$			
Roulements à rotule sur rouleaux série 213	0,00022				
série 222	0,00015	$1,35 Y_2 F_a$ , si $F_r/F_a < Y_2$			
série 223	0,00065	$F_r [1 + 0,35 (Y_2 F_a/F_r)^3]$ , si $F_r/F_a \geq Y_2$			
séries 230, 241	0,001	(valable pour toutes les séries)			
série 231	0,00035				
série 232	0,00045				
série 239	0,00025				
série 240	0,0008				
Roulements à rouleaux coniques une rangée	0,0004	$? YF_a$	on retient la valeur la plus élevée de $P_0 = F_r$		
une rangée, appariés	0,0004	$1,2 Y_2 F_a$	ou $P_0 = X_0 F_r + Y_0 F_a$		
Butées à billes	0,0008 $(F_a/C_0)^{0,33}$	$F_a$			
Butées à rouleaux cylindriques, butées à aiguilles	0,0015	$F_a$			
Butées à rotule sur rouleaux série 292 E	0,00023	$F_a (F_{r\max} \leq 0,55 F_a)$			
série 292	0,0003				
série 293 E	0,0003				
série 293	0,0004				
série 294 E	0,00033				
série 294	0,0005				

#### Symboles:

$P_0$  = charge statique équivalente, N (voir textes dans la section "Tableaux de roulements")  
 $C_0$  = charge statique de base, N (voir tableaux de roulements)  
 $F_a$  = composante axiale de la charge dynamique, N  
 $F_r$  = composante radiale de la charge dynamique, N  
 $Y, Y_2$  = coefficient axial (voir tableaux de roulements)

1) Si  $P_1 < F_r$ , prendre  $P_1 = F_r$

2) Utiliser la petite ou la grande valeur selon que le roulement, pour un alésage donné, a une faible ou forte section

3) Pour les roulements soumis en outre à des charges axiales, se reporter au chapitre "Roulements à rouleaux cylindriques chargés axialement".

## Roulements à rouleaux cylindriques chargés axialement

$$M = M_0 + M_1 + M_2$$

avec  $M_2$  = moment de frottement dépendant de la charge axiale

$$M_2 = f_2 F_a dm$$

$f_2$  = facteur dépendant du type de roulement et de la lubrification

hypothèses:  $k \geq 1,5$ ;  $F_a/F_r < 0,5$  exécution EC;  $F_a/F_r < 0,4$  si cage;  $F_a/F_r < 0,25$  rouleaux jointifs

## Roulements avec joints d'étanchéité

$$M_3 = \left( \frac{d+D}{f_3} \right)^2 + f_4$$

= moment de frottement des joints

Roulement (exécution)	Facteurs $f_3$	Facteurs $f_4$
Roulements rigides à billes (2RS1), roulements à rotule sur billes (2RS1), roulements à billes à contact oblique (2RS1), roulements Y (séries 17262(00)-2RS1 et 17263(00)-2RS1)	20	10
Roulements Y (toutes autres séries), roulements à aiguilles (2RS)	20 <sup>1)</sup>	25 <sup>1)</sup>
Roulements à rouleaux cylindriques jointifs (2LS)	10	50

## 11. La lubrification des chaînes et des câbles

La durée de vie d'une chaîne, ou d'un câble, dépend en grande partie d'une lubrification bien adoptée et d'un entretien régulier. Le film de lubrifiant doit subsister dans l'articulation d'une chaîne, ou entre les fils et toron d'un câble, tout au long du fonctionnement, quelle que soit la charge appliquée. Le lubrifiant peut alors limiter l'usure, assurer une protection contre la corrosion et un fonctionnement silencieux.

### 11.1 Les lubrifiants

- pour longue durée d'utilisation

→ lubrifiants stables dans le temps avec additifs d'ouctuosité anti-norille et anti-oxydation (additif d'adhérence pour câbles)

chaînes sous cañer → ISO VG 15-32 pour  $T_s = T_a + 25^\circ\text{C}$  avec  $-15 < T_a \leq 0^\circ\text{C}$   
 ISO VG 46-100 " "  
 ISO VG 150-320 " "

chaînes à découvert → ISO VG 220 minimum

câbles → ISO VG 460 et plus.

chaînes lentes → graisse avec  $\text{MoS}_2$ , ou graphite colloïdal, ou phosphate de calcium, ou PTFE.

- pour pressions superficielles élevées

→ lubrifiants avec additif E.P. et anti-usure et anti-corrosion

- pour utilisation à haute température

→ huiles ou graisses synthétiques (bonne résistance au vieillissement et stabilité élevée à l'oxydation)

- pour utilisation à basse température

→ revêtements antifroissement pour les très basses températures  
 ⇒ chaînes à rotation lente

- pour les zones fortement exposées aux poussières

→ graisse non collante, ne gouttant pas

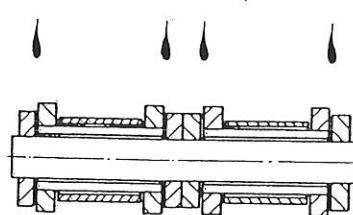
### 11.2 Procédés d'application sur les chaînes à rouleaux

- Graissage manuel

Peu fiable, le graissage manuel à la brosse ou au pinceau doit être réservé aux transmissions discontinues et aux vitesses réduites

- Graissage goutte à goutte

L'huile est appliquée de manière ciblée au-dessus des rangées de plaques du bin inférieur (bin libre)  
 4 à 10 gouttes/min si  $T_s < 60^\circ\text{C}$

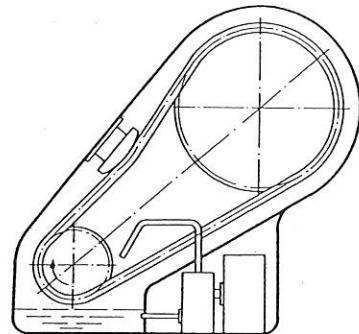


- Graissage par bain d'huile

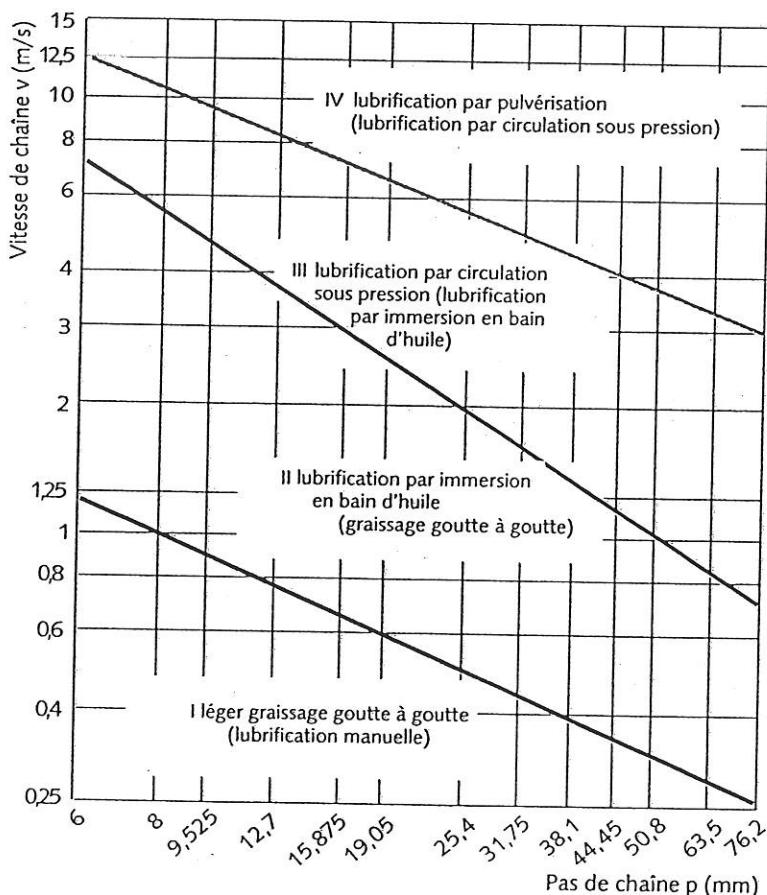
la chaîne traverse un bain d'huile. Elle n'immerge que jusqu'au milieu des articulations. Une immersion plus profonde provoquerait un échauffement et une oxydation prématuree de l'huile ainsi qu'une perte de puissance.

- Graissage par circulation sous pression

L'huile est répartie, sous forme de flux régulier au moyen d'un système de lubrification centralisé ou par un raccordement à une pompe. L'injection se fait sur la face intérieure du briu menant dans le sens de la rotation.



### Choix du procédé d'application en fonction de la vitesse et du pas.



N.B. le graissage par brouillard d'huile est connu pour sa rentabilité, mais il est polluant.

## 12 La lubrification de mécanismes

### 12.1 Lubrification des compresseurs d'air

La lubrification interne des compresseurs d'air est indispensable. Elle doit réduire l'usure et l'échauffement des organes en mouvement, parfaire l'étanchéité et protéger contre la corrosion (gaz humide et à effet corrosif). Dans tous les cas, les compresseurs d'air soumettent le lubrifiant à l'action de l'oxygène sous pression partielle et à température élevée. C'est pourquoi la lubrification des compresseurs est un problème délicat.

#### Les compresseurs alternatifs

Il y a lieu de distinguer deux types d'organes dont la lubrification est généralement faite séparément (sauf pour les petits compresseurs à refroidissement par air).

- les mouvements
- les cylindres.

grainage des mouvements →
 

- barbotage ; petits compresseurs, en particulier si le grainage des cylindres est assuré par projection
- circulation sous pression

grainage des cylindres →
 

- projection ; ne permet pas de réglage de débits → pollution rapide de l'huile carter.
- graineur mécanique ou circulation

Le débit d'huile à injecter dans un cylindre doit être aussi faible que possible pour minimiser la formation de dépôts sur les clapets. Le débit est proportionnel à la surface balayée :

$$Q (\text{cm}^3/\text{h}) = 10^{-3} S \cdot T_g$$

avec  $S = 2\pi D L \cdot N \cdot 60$  en  $\text{m}^2/\text{h}$

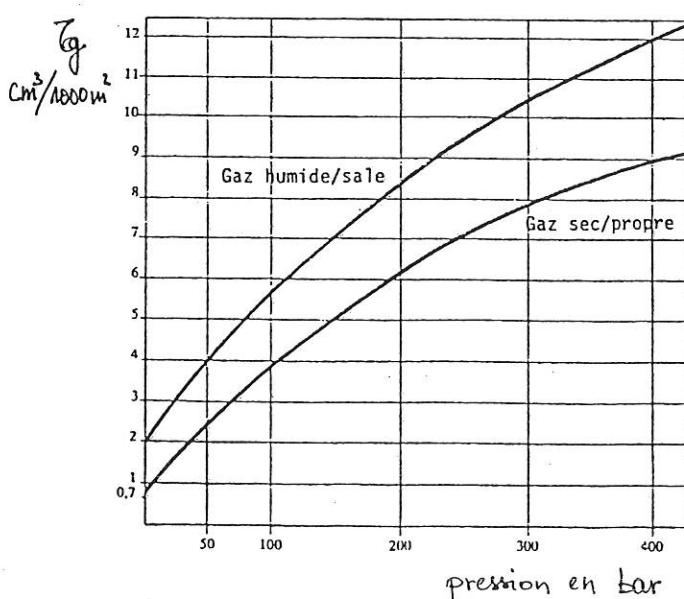
$\varphi_{\text{piston}}$  en m       $\text{tr}/\text{min}$   
 $\text{course}$  en m

$T_g$  = taux de grainage  
en  $\text{cm}^3/1000 \text{m}^2$  balayé

Pour des pressions  $\leq 10$  bar on retient pour un gaz propre et sec :

$$T_g = 0,8 \text{ à } 1 \text{ cm}^3/1000 \text{ m}^2$$

N.B. Pour la compression de gaz solvants ou très humides on retiendra pour les cylindres une huile 180 VG 220 à 460



## les compresseurs rotatifs

Il faut distinguer deux types de matériel.

1- Le lubrifiant n'est pas en contact avec l'air comprimé

→ compresseur Roots, hélico-compresseur

Pour ces compresseurs la lubrification se limite aux engrenages de synchronisation.

2- Le lubrifiant est injecté dans l'air comprimé

→ compresseurs à vis ou compresseurs à palettes

le lubrifiant sera de grade 180 VG 32 à 68 (10 à 22 pour des vitesses > 3000 tr/min) et aura des propriétés anti-usure renforcées, une bonne stabilité chimique et thermique et un indice de viscosité élevé (base paraffinique)

## les turbo compresseurs

Qu'ils soient axiaux ou centrifuges, il n'y a pas de contact entre l'air comprimé et le lubrifiant. Le problème se ramène à une lubrification de paliers, d'engrenages à grande vitesses peu chargés et d'accouplements.

## 12.2 Lubrification des compresseurs frigorifiques

Pour des raisons économiques, les compresseurs frigorifiques sont très souvent de type alternatif à cylindres lubrifiés. C'est le cas des compresseurs ménagers, de chambres froides et de climatisation. Ce sont en général des compresseurs "hermétiques" ou "semi-hermétiques". Les compresseurs de forte puissance adoptent les technologies des compresseurs à air.

Le lubrifiant pouvant passer dans le fluide frigorifique, il faut d'une part, qu'il y ait compatibilité chimique entre les deux produits et d'autre part, que le lubrifiant n'obstrue pas les faisceaux de l'évaporateur. On retiendra donc un lubrifiant de faible viscosité ( $\nu_{40^\circ\text{C}} = 32 \text{ à } 46 \text{ mm}^2/\text{s}$ ), miscible avec les chlorofluorés ou autres fluides frigorifiques, et ayant un bas point d'écoulement (inférieur à la température de fonctionnement de l'évaporateur, de l'ordre de  $-30^\circ\text{C}$ ) ainsi qu'une faible teneur en paraffine.

## 12.3 Outils et machines pneumatiques

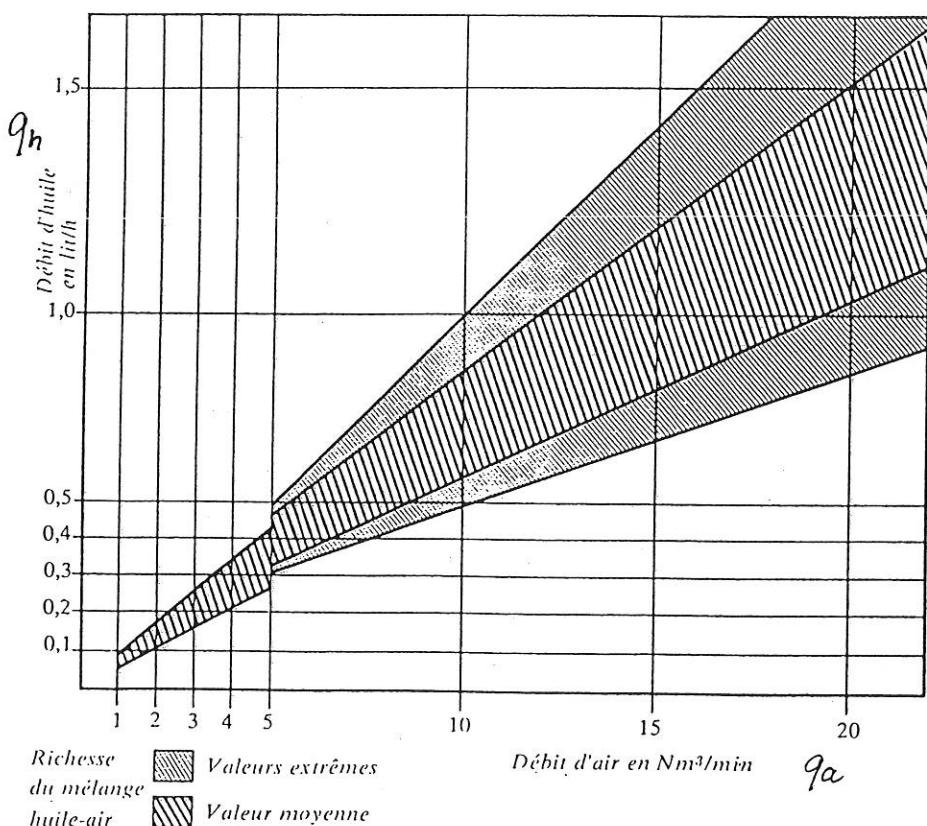
Ces outils et machines sont :

- des moteurs et outils rotatifs ; moteurs à turbine 5000 à 200 000 tr/min  
moteurs à palettes 4000 à 20000 tr/min  
moteurs à pistons et engrenage
- des outils et matériels alternatifs ; matériel à percussion  
perforateurs  
verins

Ces matériaux nécessite une lubrification en régime ducteux. Il importe donc d'assurer la formation permanente d'un film lubrifiant par apport continu et régulier. Ceci est obtenu, en général, au moyen d'un lubrificateur qui permet d'amener le lubrifiant sous forme de brouillard par l'air d'alimentation. Le lubrificateur est souvent précédé d'un purgeur d'eau condensée.

Le débit d'huile à injecter devrait théoriquement être proportionnel à la surface balayée par les différents organes en mouvement. Pour des raisons pratiques on contrôle le débit d'huile en fonction du débit d'air nécessaire à l'alimentation du matériel.

$$q_h (\text{cm}^3/\text{h}) = (50 \text{ à } 90) q_a \quad \text{avec } q_a = \text{débit d'air consommé en } \text{Nm}^3/\text{min}$$



On retiendra une huile de grade :

- ISO VG 10 - 22  
→ matériel peu chargé à grande vitesse
- ISO VG 32 - 46  
→ outillage portatif et petit matériel T.P. en période hivernale
- ISO VG 68 - 100  
→ matériel T.P.

avec les propriétés suivantes :

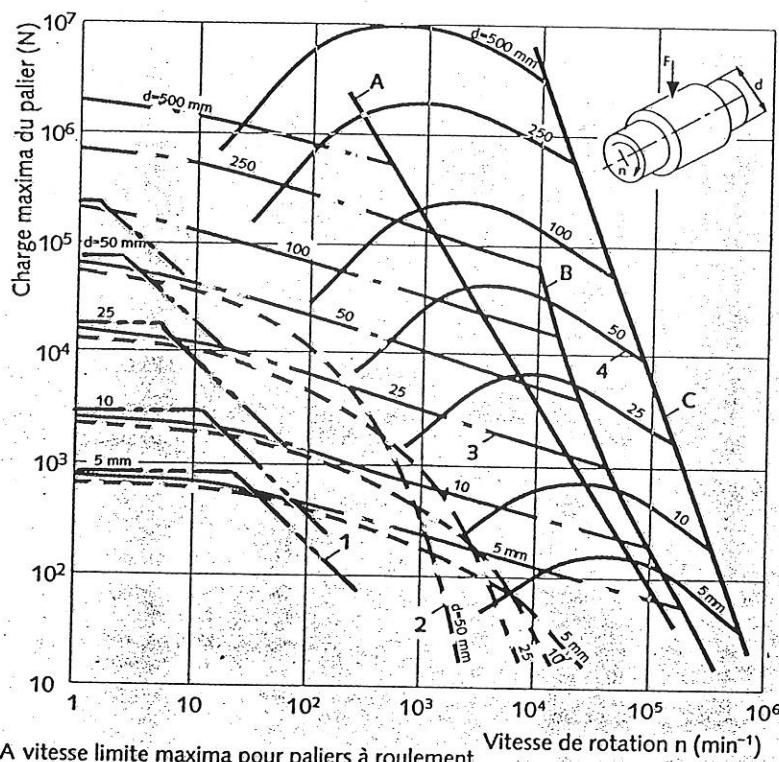
- bonne ductilité
- anti-usure et E.P.
- anti-corrosion
- excellente résistance au délavage
- grande stabilité chimique
- anti-givrage
- non polluant pour l'atmosphère.

## 12.4 Paliers lisses

Au niveau d'un palier lisse, divers régimes de lubrification peuvent exister en fonction du lubrifiant, de la vitesse et de la pression. Ces régimes sont :

- lubrification solide ; fonctionnement à sec avec matériau apprié.
- lubrification limite ou onctueuse ; contact partiel entre tourillon et coussinet, huile ou graisse.
- lubrification hydrodynamique ; en régime permanent le tourillon est porté par un "coul de fluide".
- lubrification hydrostatique ; alimentation en lubrifiant sous pression

Une caractérisation des paliers radiaux peut se faire à partir des courbes ci-dessous.



A vitesse limite maxima pour paliers à roulement

B vitesse limite maxima pour roulements à billes haute vitesse

C limite habituelle pour matériaux d'arbres

- 1 Paliers à sec
- - - 2 Paliers frittés imprégnés d'huile (paliers métalliques poreux)
- - 3 Paliers à roulement
- 4 Paliers lisses à fonctionnement hydrodynamique

## Choix du lubrifiant

### A. En régime hydrodynamique

L'équation de Reynolds pour un palier radial admet une solution en fonction du nombre de Sommerfeld ( $S$ ). Ce nombre sans dimension rend compte de toutes les variables que le concepteur peut changer ( $h, \gamma, \eta, g, \phi, p$ ).

$$S = \frac{\gamma LDN}{W} \left( \frac{R}{a} \right)^2$$

$\gamma$  = viscosité dynamique du lubrifiant  
 $L, D, R$  = longueur,  $\phi$  et rayon du palier  
 $N$  = rotation en tr/s  
 $W$  = charge radiale  
 $a$  = jeu radial =  $j_r = R - r$

En régime hydrodynamique ou hydrostatique, on recommande que l'épaisseur minimale du film  $h_{min} \approx 10 \text{ Ra}$  du tourillon pour éviter tout contact métal-métal.

$$\text{Ex. } \text{Ra} = 0,2 \mu\text{m} \Rightarrow h_{min} = 2 \mu\text{m}$$

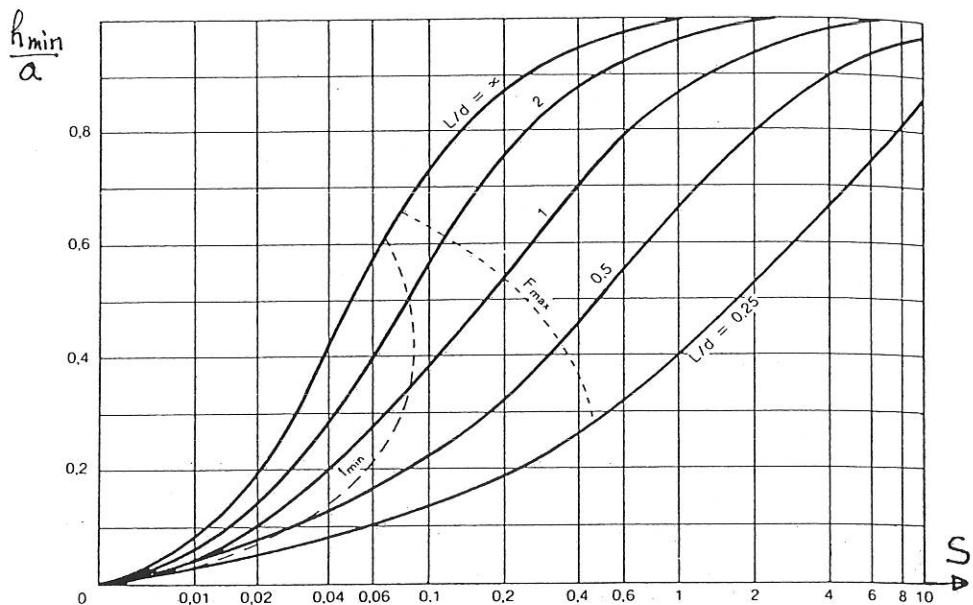
Si l'huile utilisée n'est filtrée qu'à  $5 \mu\text{m} \Rightarrow$  particules solides de dimensions 2,5 fois supérieures à l'espace disponible.

d'où une seconde règle :

Maintenir l'épaisseur du film 1 à 2 fois supérieure à la capacité de filtration absolue du filtre.

- Variation de l'épaisseur minimale de film  $h_{min}$  en fonction du nombre de Sommerfeld  $S$ .

N.B. En général on retient  $R_a \approx 10^3$



### Valeurs minimales de S

	Matériau	$S_{min}$	Remarques	$HB_{min}$ tourillon	$P_{adm}$ (MPa)	$T_{adm}$ (°C)
Régule	à l'étain	0,05	Couche mince sur fond en bronze Charge moyenne	150	5 à 10	150
	au plomb	0,06	Faible charge Grande vitesse	250	5 à 8	150
Bronze	à l'étain	0,10	Charge importante Basse vitesse Base pour régule	300 à 400	25 à 50	250
	au plomb	0,01	Couche mince sur base en acier Charge importante Grande vitesse Nécessite un arbre durci	300	20 à 30	230 à 250
Cadmium		0,01	Couche mince sur fond en acier Charge très importante Arbre durci	200 à 250	10 à 15	250

Valeurs minimales de S en fonction du fini de surface du tourillon

$Fini, R_a (\mu\text{m})$	$S_{min}$
4 à 5 (tourné)	0,38
1 à 2 (meulé)	0,06
0,1 à 0,5 (rodé)	0,0012
0,02 à 0,05 (poli)	0,0008 à 0,0001

la détermination de la viscosité du lubrifiant nécessite le calcul de la température du film  $T_{film}$ .

Bilan thermique d'un palier en fonctionnement stabilisé :

$$P_f = P_e$$

$$= P_{huile} + P_{surface}$$

si on néglige la conduction à travers le fourreau

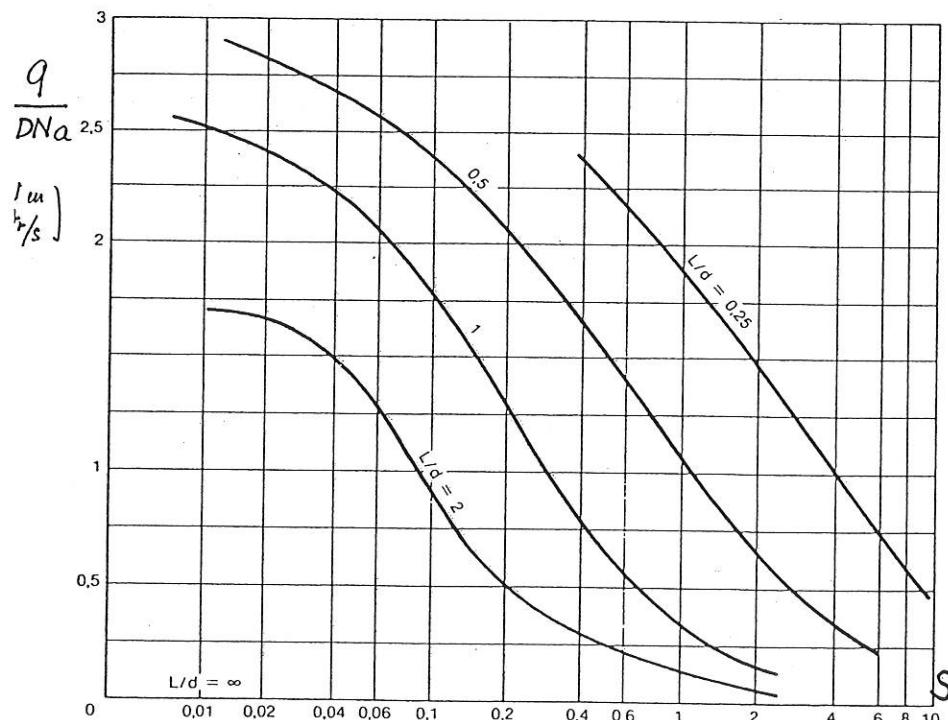
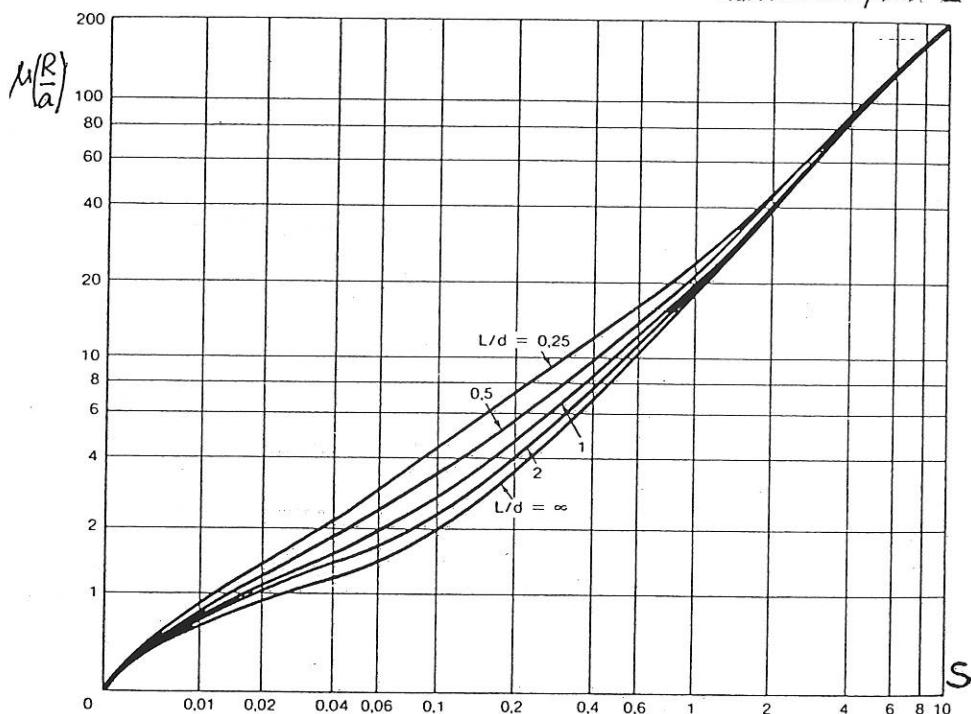
$$\mu \cdot W \cdot V = \underbrace{Pq C_p (T_{film} - T_e)}_{\text{puissance perdue par frottement}} + \underbrace{\alpha S (T_{palier} - T_a)}_{\text{convection et radiation à la surface externe du palier}}$$

puissance perdue par frottement

puissance évacuée par le lubrifiant alimenté à  $T_e$

convection et radiation à la surface externe du palier

Variation du facteur de frottement  $\mu$  et du débit de fuite  $q$  en fonction du nb. de Sommerfeld  $S$



$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r$$

• coefficient de convection

$$\alpha_c = 22 \text{ W/m}^2 \text{ °C} \text{ si } D = 20 \text{ mm}$$

$$\alpha_c = 11 \text{ W/m}^2 \text{ °C} \text{ si } D = 100 \text{ mm}$$

pour  $V_{air} \leq 1 \text{ m/s}$

• coefficient de radiation

$$\alpha_r = 5 \text{ à } 10 \text{ E}_m \text{ en } \text{W/m}^2 \text{ °C}$$

↑ émissivité des matériaux

acier  $E_m = 0,5$

fonte  $E_m = 0,7$

alu  $E_m = 0,2$

Surface couverte d'un film d'huile mince  $E_m = 0,2$ , épaisseur  $E_m = 0,6$

$$S = (15 \text{ à } 35) LD \text{ en } \text{m}^2$$

(valeur moyenne à 30)

Détermination de  $T_{film}$  par la relation empirique

$$T_{film} - T_{palier} = b(T_{palier} - T_a)$$

b	alimentation
1,6	capillaire
0,9	anneau
0,2	barbotage

$$\Rightarrow P_{surface} = \alpha S \frac{T_{film} - T_a}{b+1}$$

finalement :

$$T_{film} = \frac{P_f + Pq C_p T_e + \frac{\alpha S T_a}{b+1}}{Pq C_p + \frac{\alpha S}{b+1}}$$

pour les lubrifiants

$$C_p = 2100 \text{ J/kg °C}$$

## B. En régime limite ou onctueux

On peut affirmer qu'un palier cesse de fonctionner en régime hydrodynamique lorsque l'une ou l'autre situations suivantes se présente :

1. La charge est trop élevée,
  2. la vitesse du tourillon est trop faible,
  3. la viscosité est trop faible,
  4. le jeu radial est trop important,
  5. L'alignement coussinet-tourillon est défectueux  $\Rightarrow$  (contact métal-métal)
  6. le débit d'huile est insuffisant  $\Rightarrow h_{min} \rightarrow$
- $\Rightarrow S \downarrow$   
 $h_{min} \downarrow$

Valeurs limites de fonctionnement en régime onctueux (graisse ou huile) pour quelques matériaux de coussinets.

Matériau	$p_{max}$ (MPa)	$T_{2max}$ (°C)	$v_{max}$ (m/s)	$(pv)_{max}$ [N/(m*s)]
Bronze solide	30	160	7,5	$1,7 \times 10^6$
Bronze fretté	30	65	7,5	$1,7 \times 10^6$
Acier fretté	55	65	4	$1,7 \times 10^6$
Phénoliques	40	90	12,5	$0,50 \times 10^6$
Nylon	6,9	90	5	$0,10 \times 10^6$
Téflon (PTFE)	3,4	260	0,5	$0,03 \times 10^6$
Téflon armé	17	260	5	$0,35 \times 10^6$
Téflon tissé	410	260	0,25	$0,88 \times 10^6$
Acétal	6,9	80	5	$0,10 \times 10^6$
Graphite	4	400	12,5	$0,50 \times 10^6$
Bois	14	65	10	$0,50 \times 10^6$

Selon la vitesse du tourillon on peut faire les recommandations suivantes :

- $V < 0,7 \text{ m/s}$  - lubrifiant solide graphite,  $\text{MoS}_2$ , revêtement anti-friction ou graisse et huile
- $0,4 < V < 2 \text{ m/s}$  - graisse éventuellement avec additif E.P. si charge élevée ou huile
- $0,5 < V < 10 \text{ m/s}$  - huile pour machine avec additif E.P. si charge élevée, anti-rouille, anti-oxydation si  $T_f$  élevé et ayant une bonne résistance à l'eau suivant configuration du palier
- $10 < V < 30 \text{ m/s}$  - huile pour turbines ou broches (huile assez fluide,  $V_{40^\circ\text{C}} = 22 \text{ à } 68 \text{ mm}^2/\text{s}$  avec de propriétés anti-oxydation, anti-corrosion, une bonne désémulsibilité et désaération, + anti-mousse)
- $V > 30 \text{ m/s}$  - huile pour broches, éventuellement eau ou air

### Lubrification à l'huile

- construction coûteuse avec bonne étanchéité
- $p < 100 \text{ MPa}$ ,  $V$  élevée
- bonne évacuation de chaleur et des particules d'usure
- système de graissage ou apport manuel
- lubrification hydrodynamique possible
- mauvais amortissement bruits et vibrations

### Lubrification à la graisse

- structure simple, étanchéité simple
- $p < 150 \text{ MPa}$ ,  $V < 2 \text{ m/s}$
- mauvaise évacuation de chaleur et des particules d'usure
- grainage centralisé uniquement ou manuel
- bon amortissement des bruits et vibrations

## 13. Surveillance et maintenance d'un lubrifiant

Au cours du temps un lubrifiant se dégrade et est contaminé. Il faut donc effectuer des prélevements représentatifs de la charge de lubrifiant en service dans le circuit et les faire analyser.

→ comparaison avec du lubrifiant neuf ou avec des prélevements antérieurs.

### Analyse de la dégradation d'un lubrifiant industriel.

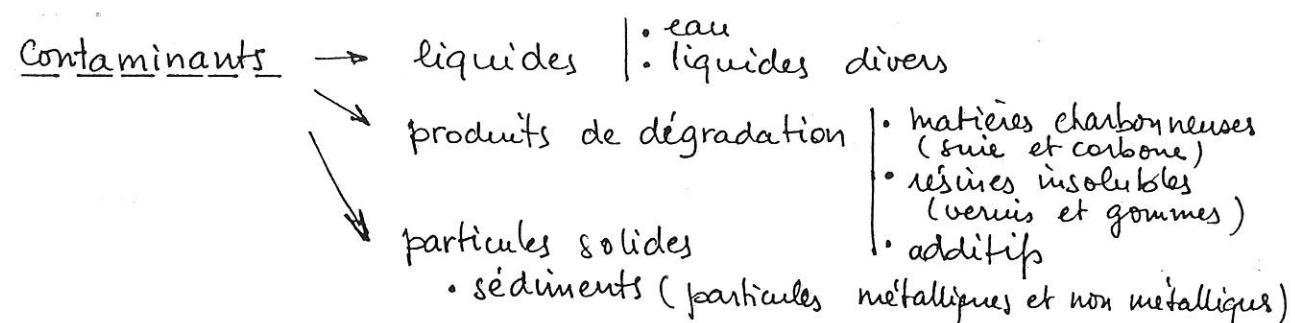
#### 1. Mesure de caractéristiques physico-chimiques

- viscosité
- indice d'acide
- indice de base (pour huiles moteurs principalement, exprime la réserve d'alcalinité)
- point d'éclair

#### 2. Analyse spectrométrique infrarouge

- permet de suivre l'évolution des molécules du lubrifiant et des additifs
- permet d'identifier une huile (nature de l'hydrocarbure, nature de l'additif)
- permet de suivre un lubrifiant en service (formation de produits d'oxydation, consommation des additifs, contamination par d'autres produits).

### Analyse de la contamination d'un lubrifiant industriel



### Méthodes d'analyse

- centrifugation → séparation du volume d'eau + sédiments
- gravimétrie → filtrer sous vide un volume connu de fluide sur 2 membranes identiques superficielles  
⇒ teneur en impuretés solides = différence de masse.
- spectrométrie d'émission → détermination rapide des concentrations en ppm des différents éléments métalliques présents dans le lubrifiant.
- analyse par ferrographie → consiste à fixer les particules métalliques magnétiques contaminantes d'un échantillon pour en évaluer l'importance et observer la morphologie des particules d'usure.
- comptage des particules → au microscope (particules retenues par une membrane de porosité d'arrêt absolue  $\leq 8\text{ }\mu\text{m}$  pour  $100\text{ ml}$ )  
→ au compteur automatique (mesure de la variation de lumière provoquée par le passage des particules).

le comptage des particules est surtout utilisé pour les fluides hydrauliques. On définit des classes de pollution selon le code ci-dessous. Il faut noter que le coffret du compteur automatique est étalonné avec un fluide contenant une quantité connue de particules de taille déterminée (sphères de latex ou terre d'Arizona ACFTD).

Code des polluants solides (d'après ISO/DIS 4406)

Code	Nombre de particules par 100 ml de taille supérieure à			
	5 µm		15 µm	
	Plus de	jusqu'à	Plus de	jusqu'à
20/17	500x10 <sup>3</sup>	1x10 <sup>6</sup>	64x10 <sup>3</sup>	130x10 <sup>3</sup>
20/16	500x10 <sup>3</sup>	1x10 <sup>6</sup>	32x10 <sup>3</sup>	64x10 <sup>3</sup>
20/15	500x10 <sup>3</sup>	1x10 <sup>6</sup>	16x10 <sup>3</sup>	32x10 <sup>3</sup>
20/14	500x10 <sup>3</sup>	1x10 <sup>6</sup>	8x10 <sup>3</sup>	16x10 <sup>3</sup>
19/16	250x10 <sup>3</sup>	500x10 <sup>3</sup>	32x10 <sup>3</sup>	64x10 <sup>3</sup>
19/15	250x10 <sup>3</sup>	500x10 <sup>3</sup>	16x10 <sup>3</sup>	32x10 <sup>3</sup>
19/14	250x10 <sup>3</sup>	500x10 <sup>3</sup>	8x10 <sup>3</sup>	16x10 <sup>3</sup>
19/13	250x10 <sup>3</sup>	500x10 <sup>3</sup>	4x10 <sup>3</sup>	8x10 <sup>3</sup>
18/15	130x10 <sup>3</sup>	250x10 <sup>3</sup>	16x10 <sup>3</sup>	32x10 <sup>3</sup>
18/14	130x10 <sup>3</sup>	250x10 <sup>3</sup>	8x10 <sup>3</sup>	16x10 <sup>3</sup>
18/13	130x10 <sup>3</sup>	250x10 <sup>3</sup>	4x10 <sup>3</sup>	8x10 <sup>3</sup>
18/12	190x10 <sup>3</sup>	250x10 <sup>3</sup>	2x10 <sup>3</sup>	4x10 <sup>3</sup>
17/14	64x10 <sup>3</sup>	130x10 <sup>3</sup>	8x10 <sup>3</sup>	16x10 <sup>3</sup>
17/13	64x10 <sup>3</sup>	130x10 <sup>3</sup>	4x10 <sup>3</sup>	8x10 <sup>3</sup>
17/12	64x10 <sup>3</sup>	130x10 <sup>3</sup>	2x10 <sup>3</sup>	4x10 <sup>3</sup>
17/11	64x10 <sup>3</sup>	130x10 <sup>3</sup>	1x10 <sup>3</sup>	2x10 <sup>3</sup>
16/13	32x10 <sup>3</sup>	64x10 <sup>3</sup>	4x10 <sup>3</sup>	8x10 <sup>3</sup>
16/12	32x10 <sup>3</sup>	64x10 <sup>3</sup>	2x10 <sup>3</sup>	4x10 <sup>3</sup>
16/11	32x10 <sup>3</sup>	64x10 <sup>3</sup>	1x10 <sup>3</sup>	2x10 <sup>3</sup>
16/10	32x10 <sup>3</sup>	64x10 <sup>3</sup>	500	1x10 <sup>3</sup>
15/12	16x10 <sup>3</sup>	32x10 <sup>3</sup>	2x10 <sup>3</sup>	4x10 <sup>3</sup>
15/11	16x10 <sup>3</sup>	32x10 <sup>3</sup>	1x10 <sup>3</sup>	2x10 <sup>3</sup>
15/10	16x10 <sup>3</sup>	32x10 <sup>3</sup>	500	1x10 <sup>3</sup>
15/9	16x10 <sup>3</sup>	32x10 <sup>3</sup>	250	500
14/11	8x10 <sup>3</sup>	16x10 <sup>3</sup>	1x10 <sup>3</sup>	2x10 <sup>3</sup>
14/10	8x10 <sup>3</sup>	16x10 <sup>3</sup>	500	1x10 <sup>3</sup>
14/9	8x10 <sup>3</sup>	16x10 <sup>3</sup>	250	500
14/8	8x10 <sup>3</sup>	16x10 <sup>3</sup>	130	250
13/10	4x10 <sup>3</sup>	8x10 <sup>3</sup>	500	1x10 <sup>3</sup>
13/9	4x10 <sup>3</sup>	8x10 <sup>3</sup>	250	500
13/8	4x10 <sup>3</sup>	8x10 <sup>3</sup>	130	250
12/9	2x10 <sup>3</sup>	4x10 <sup>3</sup>	250	500
12/8	2x10 <sup>3</sup>	4x10 <sup>3</sup>	130	250
11/8	1x10 <sup>3</sup>	2x10 <sup>3</sup>	130	250

Remarque

les phénomènes de dégradation et de contamination peuvent conduire à des variations inverses d'une caractéristique. Lorsqu'ils se produisent conjointement, les variations peuvent s'annuler, la stabilité apparente de la caractéristique masquant les phénomènes de dégradation.

Quelques cas d'interprétation difficiles des résultats d'analyse.

<b>Cas n° 1 : Viscosité stable</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) huile moteur : phénomènes conjoints d'oxydation et de dilution</li> <li>b) huile hydraulique à haut VI : «cisaillement» des «polymères améliorants de VI» et oxydation</li> </ul>	
	<b>Cas n° 2 : Indice d'acide</b> Huile anti-usure au dithiophosphate de zinc (DTPZn)
	1 <sup>ère</sup> phase : l'indice d'acide diminue. Il y a consommation de l'additif (qui par sa nature réagit lors de la mesure). 2 <sup>ème</sup> phase : l'indice d'acide augmente. L'oxydation de l'huile compense la baisse d'indice d'acide. L'indice d'acide retrouve approximativement la valeur initiale (fluide neuf), puis il continue à augmenter.
<b>Cas n° 3 : Concentration</b> Fluides aqueux pour le travail des métaux. La concentration apparente (réfractomètre) paraît stable, mais le fluide appauvri lors de son utilisation peut être fortement contaminé par une huile étrangère.	
<b>Cas n° 4 : Spectrométrie d'émission</b> Huiles de graissage et fluides hydrauliques. Les faibles résultats obtenus par analyse par spectrométrie d'émission indiquent une faible contamination apparente. Mais l'échantillon peut être contaminé par des particules de dimensions importantes (15 µm) qui n'ont pas été prises en compte lors de l'analyse en passage direct. Une «mise en solution» préalable des particules par attaque acide permet généralement d'obtenir des résultats plus représentatifs.	
Beaucoup de cas pourraient être cités dans cet encart. L'utilisateur pourra lui-même détecter des anomalies de ce type lors de l'interprétation en recherchant la cohérence des observations (examens visuels) et des résultats d'analyses. Sans cette cohérence, l'interprétation des résultats risque d'être erronée.	

## Organisation pratique de la surveillance

Dans une première étape, il faut considérer les recommandations du constructeur de la machine ou de l'installation (éventuellement celles du fournisseur du lubrifiant).

La durée de service préconisée peut servir de base pour définir un point de prélèvement pour analyse du fluide. Mais, d'un point de vue économique, il n'est pas toujours possible de rentabiliser ces opérations de surveillance.

- si volume < 250 l      économie discutable pour une analyse  
→ changement de la charge de lubrifiant à intervalles fixes.
- Si volume > 250 l      une analyse régulière permet d'espacer les vidanges → économie.

La fréquence des prélèvements dépend de nombreux facteurs. Le tableau ci-dessous donne la périodicité des prélèvements par type d'application.

APPLICATION (selon ISO 6743/0)		PÉRIODICITÉ DES PRÉLÈVEMENTS (*)	
		Surveillance du lubrifiant	Surveillance des machines
C	Engrenages	1 500 h à 3 000 h	1 500 h à 3 000 h
D	Compresseurs	Alternatifs	—
	Rotatifs	500 h à 1 000 h	
	Frigorifiques	2 000 h à 3 000 h	
E	Moteurs (véhicules industriels)	Variée en fonction du type de lubrifiant et des conditions de service.	— à chaque vidange (lorsqu'elle se fait avant 10 000 km) — prévoir un contrôle supplémentaire entre deux vidanges lorsque celles-ci sont espacées.
H	Hydraulique	Huiles minérales et F.D.I. anhydres	500 h ( $t > 90^\circ$ à 4 000 h ( $t < 60^\circ$ ))
		F.D.I. aqueux	1 000 h à 1 fois par an
M	Travail des métaux	Huiles entières	500 h à 1 000 h
		Fluides aqueux	1 semaine à 15 jours
N	Isolation électrique	Après 3 mois puis tous les ans	Après 3 mois puis tous les ans
Q	Transfert de chaleur	1 500 h à 3 000 h (cela dépend de la température)	
T	Turbines	3 000 h à 5 000 h	3 000 h à 5 000 h
U	Traitement thermique	1 fois par an	

(\*) Ces périodicités sont données à titre indicatif. Il est recommandé d'effectuer au moins un contrôle annuel.

• le fluide n'est pas limpide

- l'émulsion est en partie haute au repos  $\Rightarrow$  émulsion d'air  $\Rightarrow$  échauffement
- l'émulsion est en partie basse au repos  $\Rightarrow$  émulsion d'eau ou additif anti-oxydation en dose forte  $\Rightarrow$  échauffement et oxydation
- $\rightarrow$  test de répétition (immersion d'un fil de fer chauffé au rouge dans une petite quantité d'huile)

N.B. Si ces émulsions ne se décaissent pas en une journée dans une éprouvette, il faut changer le fluide.

• Noircissement du fluide + odeur d'huile "rauqe"

$\rightarrow$  oxydation et augmentation de la viscosité.

L'oxydation comporte les 4 étapes suivantes :

1 - formation d'acides

2 - formation de bouses  $\rightarrow$  début des incidents  $\Rightarrow$  mesure de l'indice d'acide + vidange éventuelle

3 - formation de gommes  $\Rightarrow$  incidents probables

4 - formation de laques

la vitesse d'oxydation est multipliée par 1,5 à 2 pour une augmentation de 10°C

• Noircissement du fluide + odeur de "brûlé"

$\rightarrow$  décomposition thermique = disparition de certains additifs, généralement formation de produits corrodés et augmentation de la viscosité.

N.B. les additifs anti-usure et E.P. disparaissent en remplissant leur rôle ou sont détruits par oxydation ou par décomposition thermique.  
les additifs anti-rouille, de désémulsibilité et anti-mousse se dégradent au cours du vieillissement du fluide.

• fluide non limpide + odeur aigre désagréable

$\rightarrow$  fluide véhicule des défauts et favorise la formation de verus  $\Rightarrow$  fluide inadapté ou détérioré.

• Viscosité

la viscosité augmente si

- mélange avec un fluide plus visqueux
- oxydation
- évaporation de l'eau pour les solutions aquueuses

la viscosité diminue si

- mélange avec fluide moins visqueux ou solvant de nettoyage ou de nettoyage cisailllement.

$\rightarrow$  test à l'aide d'un viscosimètre à bille

• fluide aqueux

- pH (indication sur l'oxydation)  $\rightarrow$  papiers indicateurs
- contamination par les micro-organismes  $\rightarrow$  indicateurs du commerce
- concentration  $\rightarrow$  refractomètre de poche

• Contamination par les particules métalliques  $\rightarrow$  valise de tissu "Millipore"

Limiter Ts  
Choix fluide compatible (résistance à l'oxydation) pour éviter les vidanges  
Eviter Ts > 50°C

Une bonne connaissance des points chauds (limiteur de p et de q...) permet d'utiliser un lubrifiant de stabilité thermique suffisante.