

## Chap 6

# Frottement des Roulements

## Objectifs

- Evaluer le moment de frottement dans les roulements et les pertes de rendement.
- Valoriser l'effet de lubrification sur le coefficient de frottement.

- Le frottement dans un roulement est le facteur déterminant pour le dégagement de chaleur et, par suite, pour la température de fonctionnement.
- Le frottement dépend de la charge et de plusieurs autres facteurs, dont les plus importants sont le type et la taille du roulement, sa vitesse de rotation, les propriétés du lubrifiant et la quantité de lubrifiant.
- La résistance totale à la rotation est constituée du frottement de roulement et de glissement dans les contacts roulants, dans les zones de contact entre éléments roulants et cage et dans les surfaces de guidage des éléments roulants ou de la cage, du frottement dans le lubrifiant et du frottement de glissement des joints d'étanchéité en cas approprié.

## 1- Estimation du moment de frottement

- Dans certaines conditions :

*charge  $P \approx 0,1 C$ .*

*bonne lubrification.*

*conditions de fonctionnement normales.*

- Le moment de frottement peut être calculé avec une précision suffisante en adoptant une valeur constante pour le coefficient de frottement  $\mu$  à partir de la formule :

Type de roulement	Coefficient de frottement $\mu$
Roulements rigides à billes	0,0015
Roulements à billes à contact oblique	
à une rangée	0,0020
à deux rangées	0,0024
roulements à billes à quatre points de contact	0,0024
Roulements à rotule sur billes	0,0010
Roulements à rouleaux cylindriques	
avec cage, si $F_a \approx 0$	0,0011
à rouleaux jointifs, si $F_a \approx 0$	0,0020
Roulements à aiguilles	0,0025
Roulements à rouleaux coniques	0,0018
Roulements à rotule sur rouleaux	0,0018
Roulements CARB	0,0016
Butées à billes	0,0013
Butées à rouleaux cylindriques	0,0050
Butées à aiguilles	0,0050
Butées à rotule sur rouleaux	0,0018

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

- $M$  = moment de frottement en [Nmm].
- $\mu$  = coefficient de frottement constant du roulement (tableau 1)
- $P$  = charge dynamique équivalente en [N].
- $d$  = diamètre d'alésage du roulement, en [mm].

Tableau 1 : Coefficient de frottement  $\mu$  pour roulements non protégés

## 2- Calcul plus précis du moment de frottement :

- Dans les chapitres suivants, le nouveau modèle **SKF** de calcul des moments de frottement envisage la forme la plus simple des apports de frottement par roulement, par glissement et des joints. Le chapitre suivant décrit l'impact du niveau d'huile dans le roulement, de l'insuffisance de lubrifiant à grande vitesse, de la chaleur produite par le cisaillement d'entrée et de la lubrification mixte.

- Une méthode de calcul précis du moment de frottement d'un roulement consiste à diviser ce moment de frottement en un moment  $M_0$  indépendant de la charge et en un moment  $M_I$  dépendant de la charge et de les additionner par la suite, ce qui donne :

$$M = M_0 + M_I$$

- Il s'agit de la méthode utilisée jusqu'à présent. Il existe toutefois des méthodes plus précises si la décomposition du moment se base sur le type de source de frottement plutôt que sur sa dépendance à la charge.  $M_0$  représente en fait les sources externes additionnelles de frottement ainsi que la composante « **hydrodynamique** » du frottement par roulement, dont une partie est également dépendante de la charge.

- Pour calculer avec précision le moment de frottement dans un roulement, quatre sources différentes doivent être prises en compte :

$$M = M_{rr} + M_{sl} + M_{joint} + M_{traînée}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M = \text{moment de frottement total, [Nmm]}. \\ M_{rr} = \text{moment de frottement par roulement, en [Nmm]}. \\ M_{sl} = \text{moment de frottement par glissement, en [Nmm]}. \\ M_{joint} = \text{moment de frottement des joints, [Nmm]}. \\ M_{traînée} = \text{moment de frottement de la traînée, des turbulences, du barbotage, etc., [Nmm]}. \end{array} \right.$$

- Cette nouvelle méthode identifie et combine les sources de frottement de chaque contact survenant dans le roulement ; le joint d'étanchéité et les sources externes additionnelles peuvent en outre être ajoutés selon les besoins afin de prévoir le moment de frottement global. Le modèle examine chaque contact individuel (*chemins de roulement et épaulements*) ; les modifications apportées à la conception et les améliorations des surfaces peuvent donc être facilement prises en considération, ce qui rend ce modèle plus apte à refléter les améliorations de conception des roulements **SKF** et plus facile à mettre à jour.

- Dans les chapitres suivants, le nouveau modèle **SKF** de calcul des moments de frottement envisage la forme la plus simple des apports de frottement par roulement, par glissement et des joints. Le chapitre suivant décrit l'impact du niveau d'huile dans le roulement, de l'insuffisance de lubrifiant à grande vitesse, de la chaleur produite par le cisaillement d'entrée et de la lubrification mixte.

### 3- Le nouveau modèle SKF de calcul du moment de frottement :

Le nouveau modèle SKF de calcul du frottement permet un calcul plus précis du moment de frottement dans les roulements SKF, selon la formule.

$$M = M_{rr} + M_{sl} + M_{joint} + M_{trainée}$$

- Ce nouveau modèle dérive des modèles informatiques plus avancés développés par **SKF** et est conçu pour fournir des valeurs de référence approximatives dans les conditions d'application suivantes :

- lubrification à la graisse ou méthodes de lubrification à l'huile normales : bain d'huile, air-huile et jet d'huile.
- pour les roulements appariés, calculer séparément le moment de frottement de chaque roulement puis les additionner. La charge radiale est répartie par moitié entre les deux roulements ; la charge axiale est partagée en fonction du montage des roulements.
- charges égales ou supérieures à la charge minimale recommandée.
- charges constantes en intensité et direction.
- jeu de fonctionnement normal.

#### 3-1- Moment de frottement par roulement :

- Le moment de frottement par roulement est calculé à l'aide de l'équation :

$$M_{rr} = G_{rr} \cdot (v \cdot n)^{0,6}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{rr} = \text{moment de frottement par roulement, en [Nmm].} \\ G_{rr} = \text{une variable qui dépend} \\ \quad - \text{du type de roulement} \\ \quad - \text{du diamètre moyen du roulement} \\ \quad \quad d_m = 0,5(d + D), [\text{mm}]. \\ \quad - \text{de la charge radiale } F_r, [\text{N}]. \\ \quad - \text{de la charge axiale } F_a, [\text{N}]. \\ n = \text{vitesse de rotation, [tr/min].} \\ v = \text{viscosité cinématique du lubrifiant à la température de fonctionnement, [mm}^2/\text{s].} \\ \quad (\text{pour la lubrification à la graisse, viscosité de l'huile de base}). \end{array} \right.$$

- Les valeurs pour  $G_{rr}$  peuvent être obtenues en utilisant les équations données dans le **tableau 2** et les constantes géométriques  $R$ , données dans le **tableau 3**. Les deux charges  $F_r$  et  $F_a$ , sont toujours considérées positives.

Tableau 2A

Variables liées à la géométrie, aux charges et aux frottements par roulement et par glissement – roulements radiaux		
Type de roulement	Variables liées au roulement $G_{rr}$	Variables liées au glissement $G_{sl}$
<b>Roulements rigides à billes</b>	quand $F_a = 0$ $G_{rr} = R_1 d_m^{1,96} F_r^{0,54}$ quand $F_a > 0$ $G_{rr} = R_1 d_m^{1,96} \left( F_r + \frac{R_2}{\sin \alpha_f} F_a \right)^{0,54}$ $\alpha_f = 24,6 (F_a/C_0)^{0,24}$ , degrés	quand $F_a = 0$ $G_{sl} = S_1 d_m^{-0,26} F_r^{5/3}$ quand $F_a > 0$ $G_{sl} = S_1 d_m^{-0,145} \left( F_r^{5/3} + \frac{S_2 d_m^{1,5}}{\sin \alpha_f} F_a^4 \right)^{1/3}$
<b>Roulements à contact oblique<sup>1)</sup></b>	$G_{rr} = R_1 d_m^{1,97} [F_r + F_g + R_2 F_a]^{0,54}$ $F_g = R_3 d_m^4 n_2$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,26} [(F_r + F_g)^{4/3} + S_2 F_a^{4/3}]$ $F_g = S_3 d_m^4 n_2$
<b>Roulements à quatre points de contact</b>	$G_{rr} = R_1 d_m^{1,97} [F_r + F_g + R_2 F_a]^{0,54}$ $F_g = R_3 d_m^4 n^2$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,26} [(F_r + F_g)^{4/3} + S_2 F_a^{4/3}]$ $F_g = S_3 d_m^4 n^2$
<b>Roulements à rotule sur billes</b>	$G_{rr} = R_1 d_m^2 [F_r + F_g + R_2 F_a]^{0,54}$ $F_g = R_3 d_m^{3,5} n^2$	$G_{sl} = S_1 d_m^{-0,12} [(F_r + F_g)^{4/3} + S_2 F_a^{4/3}]$ $F_g = S_3 d_m^{3,5} n^2$
<b>Roulements à rouleaux cylindriques</b>	$G_{rr} = R_1 d_m^{2,41} F_r^{0,31}$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,9} F_a + S_2 d_m F_r$
<b>Roulements à rouleaux coniques<sup>1)</sup></b>	$G_{rr} = R_1 d_m^{2,38} (F_r + R_2 Y F_a)^{0,31}$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,82} (F_r + S_2 Y F_a)$
Pour le coefficient de charge axiale Y pour roulements à une rangée → tableaux des produits		
<b>Roulements à rotule sur rouleaux</b>	$G_{rr,e} = R_1 d_m^{1,85} (F_r + R_2 F_a)^{0,54}$ $G_{rr,l} = R_3 d_m^{2,3} (F_r + R_4 F_a)^{0,31}$ quand $G_{rr,e} < G_{rr,l}$ $G_{rr} = G_{rr,e}$ autrement $G_{rr} = G_{rr,l}$	$G_{sl,e} = S_1 d_m^{0,25} (F_r^4 + S_2 F_a^4)^{1/3}$ $G_{sl,l} = S_3 d_m^{0,94} (F_r^3 + S_4 F_a^3)^{1/3}$ quand $G_{sl,e} < G_{sl,l}$ $G_{sl} = G_{sl,e}$ autrement $G_{sl} = G_{sl,l}$
<b>Roulements à rouleaux toroïdaux CARB</b>	quand $F_r < (R_2^{1,85} d_m^{0,78} / R_1^{1,85})^{2,35}$ $G_{rr,e} = R_1 d_m^{1,97} F_r^{0,54}$ autrement $G_{rr,l} = R_2 d_m^{2,37} F_r^{0,31}$	quand $F_r < (S_2 d_m^{1,24} / S_1)^{1,5}$ $G_{sl,e} = S_1 d_m^{-0,19} F_r^{5/3}$ autrement $G_{sl,l} = S_2 d_m^{1,05} F_r$

<sup>1)</sup> La valeur à utiliser pour  $F_a$  est la charge axiale externe

Tableau 2B

Variables liées à la géométrie, aux charges et aux frottements par roulement et par glissement – Butées		
Type de roulement	Variables liées au roulement $G_{rr}$	Variables liées au glissement $G_{sl}$
<b>Butées à billes</b>	$G_{rr} = R_1 d_m^{1,83} F_a^{0,54}$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,05} F_a^{4/3}$
<b>Butées à rouleaux cylindriques</b>	$G_{rr} = R_1 d_m^{2,38} F_a^{0,31}$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,62} F_a$
<b>Butées à rotule sur rouleaux</b>	$G_{rr,e} = R_1 d_m^{1,96} (F_r + R_2 F_a)^{0,54}$ $G_{rr,l} = R_3 d_m^{2,39} (F_r + R_4 F_a)^{0,31}$ quand $G_{rr,e} < G_{rr,l}$ $G_{rr} = G_{rr,e}$ autrement $G_{rr} = G_{rr,l}$	$G_{sl,e} = S_1 d_m^{-0,35} (F_r^{5/3} + S_2 F_a^{5/3})$ $G_{sl,l} = S_3 d_m^{0,89} (F_r + F_a)$ quand $G_{sl,e} < G_{sl,l}$ $G_{sl} = G_{sl,e}$ autrement $G_{sl} = G_{sl,l}$ $G_f = S_4 d_m^{0,76} (F_r + S_5 F_a)$ $G_{sl} = G_{sl} + \frac{G_f}{e^{10^{-6}(n v)^{1,4}} d_m}$



**Tableau 3**

**Constantes géométriques pour moments de frottement par roulement et par glissement**

Type de roulement	Constantes géométriques pour moments de frottement par roulement			Constantes géométriques pour moments de frottement par glissement		
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>
Roulements rigides à billes	Voir tableau 3a			Voir tableau 3a		
Roulements à contact oblique, - à une rangée - à deux rangées - à quatre points de contact	5,03 × 10 <sup>-7</sup> 6,34 × 10 <sup>-7</sup> 4,78 × 10 <sup>-7</sup>	1,97 1,41 2,42	1,90 × 10 <sup>-12</sup> 7,83 × 10 <sup>-13</sup> 1,40 × 10 <sup>-12</sup>	1,30 × 10 <sup>-2</sup> 7,56 × 10 <sup>-3</sup> 1,20 × 10 <sup>-2</sup>	0,68 1,21 0,9	1,91 × 10 <sup>-12</sup> 7,83 × 10 <sup>-13</sup> 1,40 × 10 <sup>-12</sup>
Roulements à rotule sur billes	Voir tableau 3b			Voir tableau 3b		
Roulements à rouleaux cylindriques	Voir tableau 3c			Voir tableau 3c		
Roulements à rouleaux coniques	Voir tableau 3d			Voir tableau 3d		
Roulements à rotule sur rouleaux	Voir tableau 3e			Voir tableau 3e		
Roulements à rouleaux toroïdaux CARB	Voir tableau 3f			Voir tableau 3f		
Butées à billes	1,03 × 10 <sup>-6</sup>			1,6 × 10 <sup>-2</sup>		
Butées à rouleaux cylindriques	2,25 × 10 <sup>-6</sup>			0,154		
Butées à rotule sur rouleaux	Voir tableau 3g			Voir tableau 3g		

**Tableau 3a**

**Constantes géométriques pour moments de frottement par roulement et par glissement des roulements rigides à billes**

Série de roulements	Constantes géométriques pour moments de frottement par roulement		Constantes géométriques pour moments de frottement par glissement	
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>
2, 3	4,4 × 10 <sup>-7</sup>	1,7	2,00 × 10 <sup>-3</sup>	100
42, 43	5,4 × 10 <sup>-7</sup>	0,96	3,00 × 10 <sup>-3</sup>	40
60, 630	4,1 × 10 <sup>-7</sup>	1,7	3,73 × 10 <sup>-3</sup>	14,6
62, 622	3,9 × 10 <sup>-7</sup>	1,7	3,23 × 10 <sup>-3</sup>	36,5
63, 623	3,7 × 10 <sup>-7</sup>	1,7	2,84 × 10 <sup>-3</sup>	92,8
64	3,6 × 10 <sup>-7</sup>	1,7	2,43 × 10 <sup>-3</sup>	198
160, 161	4,3 × 10 <sup>-7</sup>	1,7	4,63 × 10 <sup>-3</sup>	4,25
617, 618, 628, 637, 638	4,7 × 10 <sup>-7</sup>	1,7	6,50 × 10 <sup>-3</sup>	0,78
619, 639	4,3 × 10 <sup>-7</sup>	1,7	4,75 × 10 <sup>-3</sup>	3,6

**Tableau 3b**

**Constantes géométriques pour moments de frottement par roulement et par glissement des roulements à rotule sur billes**

Série de roulements	Constantes géométriques pour moments de frottement par roulement			Constantes géométriques pour moments de frottement par glissement		
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>
12	3,25 × 10 <sup>-7</sup>	6,51	2,43 × 10 <sup>-12</sup>	4,36 × 10 <sup>-3</sup>	9,33	2,43 × 10 <sup>-12</sup>
13	3,11 × 10 <sup>-7</sup>	5,76	3,52 × 10 <sup>-12</sup>	5,76 × 10 <sup>-3</sup>	8,03	3,52 × 10 <sup>-12</sup>
22	3,13 × 10 <sup>-7</sup>	5,54	3,12 × 10 <sup>-12</sup>	5,84 × 10 <sup>-3</sup>	6,60	3,12 × 10 <sup>-12</sup>
23	3,11 × 10 <sup>-7</sup>	3,87	5,41 × 10 <sup>-12</sup>	0,01	4,35	5,41 × 10 <sup>-12</sup>
112	3,25 × 10 <sup>-7</sup>	6,16	2,48 × 10 <sup>-12</sup>	4,33 × 10 <sup>-3</sup>	8,44	2,48 × 10 <sup>-12</sup>
130	2,39 × 10 <sup>-7</sup>	5,81	1,10 × 10 <sup>-12</sup>	7,25 × 10 <sup>-3</sup>	7,98	1,10 × 10 <sup>-12</sup>
139	2,44 × 10 <sup>-7</sup>	7,96	5,63 × 10 <sup>-13</sup>	4,51 × 10 <sup>-3</sup>	12,11	5,63 × 10 <sup>-13</sup>

Tableau 3c

## Constantes géométriques pour moments de frottement par roulement et par glissement des roulements à rouleaux cylindriques

Série de roulements	Constantes géométriques pour moments de frottement		
	par roulement $R_1$	par glissement $S_1$ $S_2$	
<b>Roulement avec cage de type N, NU, NJ et NUP</b>			
2, 3	$1,09 \times 10^{-6}$	0,16	0,0015
4	$1,00 \times 10^{-6}$	0,16	0,0015
10	$1,12 \times 10^{-6}$	0,17	0,0015
12, 20	$1,23 \times 10^{-6}$	0,16	0,0015
22	$1,40 \times 10^{-6}$	0,16	0,0015
23	$1,48 \times 10^{-6}$	0,16	0,0015
<b>Roulements à rouleaux jointifs de type NCF, NJG, NNCL, NNCF, NNC et NNF</b>			
Toutes séries	$2,13 \times 10^{-6}$	0,16	0,0015

Tableau 3d

## Constantes géométriques pour moments de frottement par roulement et par glissement des roulements à rouleaux coniques

Série de roulements	Constantes géométriques pour moments de frottement		par glissement	
	par roulement $R_1$	$R_2$	$S_1$	$S_2$
302	$1,76 \times 10^{-6}$	10,9	0,017	2
303	$1,69 \times 10^{-6}$	10,9	0,017	2
313 (X)	$1,84 \times 10^{-6}$	10,9	0,048	2
320 X	$2,38 \times 10^{-6}$	10,9	0,014	2
322	$2,27 \times 10^{-6}$	10,9	0,018	2
322 B	$2,38 \times 10^{-6}$	10,9	0,026	2
323	$2,38 \times 10^{-6}$	10,9	0,019	2
323 B	$2,79 \times 10^{-6}$	10,9	0,030	2
329	$2,31 \times 10^{-6}$	10,9	0,009	2
330	$2,71 \times 10^{-6}$	11,3	0,010	2
331	$2,71 \times 10^{-6}$	10,9	0,015	2
332	$2,71 \times 10^{-6}$	10,9	0,018	2
LL	$1,72 \times 10^{-6}$	10,9	0,0057	2
L	$2,19 \times 10^{-6}$	10,9	0,0093	2
LM	$2,25 \times 10^{-6}$	10,9	0,011	2
M	$2,48 \times 10^{-6}$	10,9	0,015	2
HM	$2,60 \times 10^{-6}$	10,9	0,020	2
H	$2,66 \times 10^{-6}$	10,9	0,025	2
HH	$2,51 \times 10^{-6}$	10,9	0,027	2
Autres	$2,31 \times 10^{-6}$	10,9	0,019	2

Tableau 3e

## Constantes géométriques pour moments de frottement par roulement et par glissement des roulements à rotule sur rouleaux

Série de roulements	Constantes géométriques pour moments de frottement				par glissement			
	par roulement $R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
213 E, 222 E	$1,6 \times 10^{-6}$	5,84	$2,81 \times 10^{-6}$	5,8	$3,62 \times 10^{-3}$	508	$8,8 \times 10^{-3}$	117
222	$2,0 \times 10^{-6}$	5,54	$2,92 \times 10^{-6}$	5,5	$5,10 \times 10^{-3}$	414	$9,7 \times 10^{-3}$	100
223	$1,7 \times 10^{-6}$	4,1	$3,13 \times 10^{-6}$	4,05	$6,92 \times 10^{-3}$	124	$1,7 \times 10^{-2}$	41
223 E	$1,6 \times 10^{-6}$	4,1	$3,14 \times 10^{-6}$	4,05	$6,23 \times 10^{-3}$	124	$1,7 \times 10^{-2}$	41
230	$2,4 \times 10^{-6}$	6,44	$3,76 \times 10^{-6}$	6,4	$4,13 \times 10^{-3}$	755	$1,1 \times 10^{-2}$	160
231	$2,4 \times 10^{-6}$	4,7	$4,04 \times 10^{-6}$	4,72	$6,70 \times 10^{-3}$	231	$1,7 \times 10^{-2}$	65
232	$2,3 \times 10^{-6}$	4,1	$4,00 \times 10^{-6}$	4,05	$8,66 \times 10^{-3}$	126	$2,1 \times 10^{-2}$	41
238	$3,1 \times 10^{-6}$	12,1	$3,82 \times 10^{-6}$	12	$1,74 \times 10^{-3}$	9 495	$5,9 \times 10^{-3}$	1 057
239	$2,7 \times 10^{-6}$	8,53	$3,87 \times 10^{-6}$	8,47	$2,77 \times 10^{-3}$	2 330	$8,5 \times 10^{-3}$	371
240	$2,9 \times 10^{-6}$	4,87	$4,78 \times 10^{-6}$	4,84	$6,95 \times 10^{-3}$	240	$2,1 \times 10^{-2}$	68
241	$2,6 \times 10^{-6}$	3,8	$4,79 \times 10^{-6}$	3,7	$1,00 \times 10^{-2}$	86,7	$2,9 \times 10^{-2}$	31
248	$3,8 \times 10^{-6}$	9,4	$5,09 \times 10^{-6}$	9,3	$2,80 \times 10^{-3}$	3 415	$1,2 \times 10^{-2}$	486
249	$3,0 \times 10^{-6}$	6,67	$5,09 \times 10^{-6}$	6,62	$3,90 \times 10^{-3}$	887	$1,7 \times 10^{-2}$	180

Tableau 3f

**Constantes géométriques pour moments de frottement par roulement et par glissement des roulements à rouleaux toroïdaux CARB**

Série de roulements	Constantes géométriques pour moments de frottement par roulement		par glissement	
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>
C 22	1,17 × 10 <sup>-6</sup>	2,08 × 10 <sup>-6</sup>	1,32 × 10 <sup>-3</sup>	0,8 × 10 <sup>-2</sup>
C 23	1,20 × 10 <sup>-6</sup>	2,28 × 10 <sup>-6</sup>	1,24 × 10 <sup>-3</sup>	0,9 × 10 <sup>-2</sup>
C 30	1,40 × 10 <sup>-6</sup>	2,59 × 10 <sup>-6</sup>	1,58 × 10 <sup>-3</sup>	1,0 × 10 <sup>-2</sup>
C 31	1,37 × 10 <sup>-6</sup>	2,77 × 10 <sup>-6</sup>	1,30 × 10 <sup>-3</sup>	1,1 × 10 <sup>-2</sup>
C 32	1,33 × 10 <sup>-6</sup>	2,63 × 10 <sup>-6</sup>	1,31 × 10 <sup>-3</sup>	1,1 × 10 <sup>-2</sup>
C 39	1,45 × 10 <sup>-6</sup>	2,55 × 10 <sup>-6</sup>	1,84 × 10 <sup>-3</sup>	1,0 × 10 <sup>-2</sup>
C 40	1,53 × 10 <sup>-6</sup>	3,15 × 10 <sup>-6</sup>	1,50 × 10 <sup>-3</sup>	1,3 × 10 <sup>-2</sup>
C 41	1,49 × 10 <sup>-6</sup>	3,11 × 10 <sup>-6</sup>	1,32 × 10 <sup>-3</sup>	1,3 × 10 <sup>-2</sup>
C 49	1,49 × 10 <sup>-6</sup>	3,24 × 10 <sup>-6</sup>	1,39 × 10 <sup>-3</sup>	1,5 × 10 <sup>-2</sup>
C 59	1,77 × 10 <sup>-6</sup>	3,81 × 10 <sup>-6</sup>	1,80 × 10 <sup>-3</sup>	1,8 × 10 <sup>-2</sup>
C 60	1,83 × 10 <sup>-6</sup>	5,22 × 10 <sup>-6</sup>	1,17 × 10 <sup>-3</sup>	2,8 × 10 <sup>-2</sup>
C 69	1,85 × 10 <sup>-6</sup>	4,53 × 10 <sup>-6</sup>	1,61 × 10 <sup>-3</sup>	2,3 × 10 <sup>-2</sup>

Tableau 3g

**Constantes géométriques pour moments de frottement par roulement et par glissement des butées à rotule sur rouleaux**

Série de roulements	Constantes géométriques pour moments de frottement par roulement				par glissement				
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>
292	1,32 × 10 <sup>-6</sup>	1,57	1,97 × 10 <sup>-6</sup>	3,21	4,53 × 10 <sup>-3</sup>	0,26	0,02	0,1	0,6
292 E	1,32 × 10 <sup>-6</sup>	1,65	2,09 × 10 <sup>-6</sup>	2,92	5,98 × 10 <sup>-3</sup>	0,23	0,03	0,17	0,56
293	1,39 × 10 <sup>-6</sup>	1,66	1,96 × 10 <sup>-6</sup>	3,23	5,52 × 10 <sup>-3</sup>	0,25	0,02	0,1	0,6
293 E	1,16 × 10 <sup>-6</sup>	1,64	2,00 × 10 <sup>-6</sup>	3,04	4,26 × 10 <sup>-3</sup>	0,23	0,025	0,15	0,58
294 E	1,25 × 10 <sup>-6</sup>	1,67	2,15 × 10 <sup>-6</sup>	2,86	6,42 × 10 <sup>-3</sup>	0,21	0,04	0,2	0,54

### 3-2- Moment de frottement par glissement :

- Le moment de frottement par glissement est calculé à l'aide de l'équation :

$$M_{sl} = \mu_{sl} \cdot G_{sl}$$

- M<sub>sl</sub> = moment de frottement par glissement, en [Nmm].
- G<sub>sl</sub> = une variable qui dépend
  - du type de roulement
  - du diamètre moyen du roulement d<sub>m</sub> = 0,5(d + D), [mm].
  - de la charge radiale F<sub>r</sub>, [N].
  - de la charge axiale F<sub>a</sub>, [N].
- μ<sub>sl</sub> = coefficient de frottement de glissement, pouvant être défini pour les applications à lubrification intégrale, c'est-à-dire κ ≥ 2,
  - 0,05 pour une lubrification à l'huile minérale
  - 0,04 pour une lubrification à l'huile synthétique
  - 0,1 pour une lubrification avec des fluides hydrauliques
 Pour les roulements à rouleaux cylindriques ou coniques, il convient d'utiliser les valeurs suivantes :
  - 0,02 pour les roulements à rouleaux cylindriques
  - 0,002 pour les roulements à rouleaux coniques

- Les valeurs pour G<sub>sl</sub> peuvent être obtenues en utilisant les équations données dans le **tableau 2** et les constantes géométriques S, données dans le **tableau 3**.



### 3-3- Moment de frottement des joints :

- Lorsque les roulements sont munis de joints à frottement, les pertes de puissance résultant du joint peuvent dépasser celles du roulement lui-même. Le moment de frottement des joints pour un roulement protégé des deux côtés peut être estimé en utilisant la formule empirique suivante :

$$M_{joint} = K_{S1} \cdot d_s^\beta + K_{S2}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{joint} = \text{moment de frottement des joints, [Nmm]}. \\ K_{S1} = \text{constante définie selon le type de roulement.} \\ K_{S2} = \text{constante définie selon le type de roulement et de joint.} \\ d_s = \text{diamètre d'épaulement.} \\ \beta = \text{exposant dépendant du type de roulement et de joint.} \end{array} \right.$$

- Les valeurs des constantes  $K_{S1}$  et  $K_{S2}$ , le diamètre d'épaulement  $d_s$  et l'exposant  $\beta$  sont indiquées dans le **tableau 4**.

-  $M_{joint}$  est le moment de frottement généré par deux joints. S'il n'y a qu'un seul joint, le frottement généré équivaut à  $0,5 M_{joint}$ .

- Pour les des roulements rigides à billes ayant un diamètre extérieur supérieur à **25 mm**, la valeur  $M_{joint}$  sera utilisée qu'il y ait un ou deux joints.

Tableau 4

Moment de frottement des joints : Exposant et constantes						
Type de joint Type de roulement	Diamètre extérieur du roulement D		Exposant et constantes			Diamètre d'épaule- ment du joint $d_s^{1)}$
	au-des- sus de	jusq. incl.	$\beta$	$K_{S1}$	$K_{S2}$	
<b>Joints RSL</b> Roulements rigides à billes	25	25 52	0 2,25	0 0,0018	0 0	$d_2$ $d_2$
<b>Joints RZ</b> Roulements rigides à billes		175	0	0	0	$d_1$
<b>Joints RSH</b> Roulements rigides à billes		52	2,25	0,028	2	$d_2$
<b>Joints RS1</b> Roulements rigides à billes	62 80 100	62 80 100	2,25 2,25 2,25	0,023 0,018 0,018	2 20 15 0	$d_1, d_2$ $d_1, d_2$ $d_1, d_2$ $d_1, d_2$
Roulements à billes à contact oblique	30	120	2	0,014	10	$d_1$
Roulements à rotule sur billes	30	125	2	0,014	10	$d_2$
<b>Joints LS</b> Roulements à rouleaux cylindriques	42	360	2	0,032	50	E
<b>Joints CS, CS2 et CS5</b> Roulements à rotule sur rouleaux	62	300	2	0,057	50	$d_2$
Rouleaux à rouleaux toroïdaux CARB	42	340	2	0,057	50	$d_2$

<sup>1)</sup> La désignation des dimensions est indiquée dans le tableau des produits

### 3-4- Effets supplémentaires sur les moments des frottements :

- Afin d'observer au plus près le comportement réel du roulement et si un calcul encore plus précis s'avère nécessaire, le nouveau modèle **SKF** est en mesure de prendre en considération des effets supplémentaires qui peuvent être intégrés dans l'équation. Ces effets supplémentaires sont :

- réduction de la chaleur due au cisaillement d'entrée.
  - les effets de la vitesse d'appoint - d'insuffisance de lubrifiant pour la lubrification air-huile, par jet d'huile, à la graisse et par bain à faible niveau d'huile.
  - les effets de perte de résistance de frottement pour la lubrification par bain d'huile.
  - la lubrification mixte pour les vitesses basses et/ou les faibles viscosités.
- Une fois ces sources supplémentaires prises en compte, la formule définitive du moment de frottement total d'un roulement est :

$$M = \Phi_{ish} \cdot \Phi_{rs} \cdot M_{rr} + M_{sl} + M_{joint} + M_{traînée}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M = \text{moment de frottement total du roulement, [Nmm]}. \\ M_{rr} = G_{rr} (v \cdot n)^{0,6}. \\ M_{sl} = G_{sl} \cdot \mu_{sl}. \\ M_{joint} = K_{S1} \cdot d_s^\beta + K_{S2}. \\ M_{traînée} = \text{moment de frottement de la traînée, des turbulences, du barbotage, etc., [Nmm]}. \\ \Phi_{ish} = \text{facteur de réduction de la chaleur due au cisaillement d'entrée}. \\ \Phi_{rs} = \text{facteur de réduction de l'appoint/insuffisance cinématique}. \end{array} \right.$$

- Les facteurs de réduction  $\Phi_{ish}$  et  $\Phi_{rs}$  introduits dans le nouveau modèle de frottement **SKF** permettent de prendre en compte respectivement l'impact de la réduction de la chaleur due au cisaillement d'entrée et de l'appoint/de l'insuffisance de lubrifiant à haute vitesse du frottement par roulement. Le coefficient de frottement par glissement  $\mu_{sl}$  augmente pour des vitesses et/ou une viscosité faible afin de représenter le régime de lubrification mixte.

### 3-5- Facteur de la réduction de chaleur due au cisaillement d'entrée :

- Lorsque le roulement contient suffisamment de lubrifiant, ce dernier ne peut se répandre entièrement jusqu'aux contacts ; seule une petite quantité de lubrifiant sert à constituer l'épaisseur du film. Une partie de l'huile qui se trouve près de l'entrée du contact sera donc rejetée et produira un flux de retour. (fig. 1)

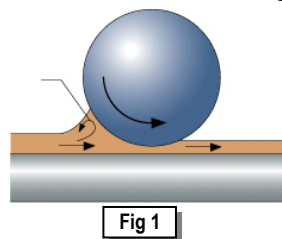


Fig 1

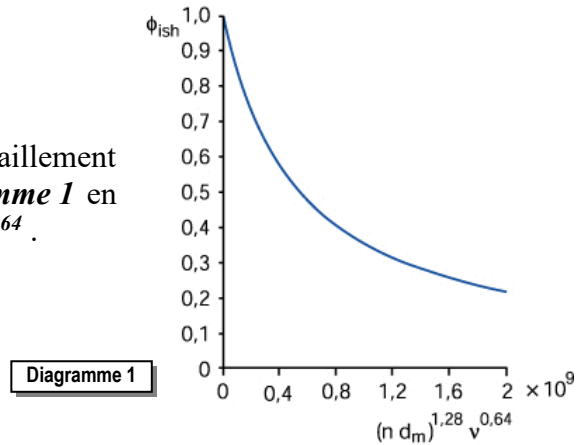
- Ce flux inversé cisaille le lubrifiant, générant de la chaleur qui abaisse le degré de viscosité de l'huile et qui réduit l'épaisseur du film ainsi que la composante de frottement par roulement.

- Pour l'effet décrit ci-dessous, le facteur modérateur « cisaillement-échauffement »  $\Phi_{ish}$  du lubrifiant peut être obtenu approximativement à partir de la formule :

$$\Phi_{ish} = \frac{1}{1 + 1,84 \times 10^{-9} [(n d_m)^{1,28} v^{0,64}]}$$

- $\Phi_{ish}$  = facteur de chaleur due au cisaillement d'entrée.
- $n$  = vitesse de rotation, [tr/min].
- $d_m$  = diamètre moyen du roulement, en [mm].
- $v$  = viscosité cinématique du lubrifiant à la température de fonctionnement, [ $mm^2/s$ ].  
(pour la lubrification à la graisse, viscosité de l'huile de base)

- Les valeurs du facteur de chaleur de cisaillement d'entrée  $\Phi_{ish}$  peuvent être tirées du **diagramme 1** en fonction du paramètre combiné  $(n.d_m)^{1,28} . v^{0,64}$  .



### 3-6- Facteur de la réduction de l'appointe/insuffisance cinématique :

- Dans des conditions de lubrification air-huile, par jet d'huile ou par bain à faible niveau d'huile (*par ex. niveau d'huile plus bas que le centre de l'élément roulant inférieur*) et de lubrification à la graisse, une rotation excessive des chemins de roulement peut éliminer l'excès de lubrifiant. Compte tenu de la vitesse du roulement ou d'une forte viscosité, le lubrifiant qui se trouve sur les bords des contacts pourrait ne pas avoir le temps de remplir les chemins ; il s'agit de l'effet d' « insuffisance (de lubrifiant) cinématique » qui provoque une diminution de l'épaisseur du film et du frottement par roulement.

- Dans les conditions de lubrification décrites ci-dessus, le facteur de réduction de l'appoint/l'insuffisance cinématique s'obtient approximativement à l'aide de l'équation

$$\Phi_{rs} = \frac{1}{e^{K_{rs}} v n (d + D) \sqrt{\frac{K_z}{2(D - d)}}}$$

- $\Phi_{rs}$  = facteur de réduction de l'appoint/insuffisance cinématique
- $e$  = base des logarithmes népériens = 2,718
- $K_{rs}$  = la constante d'appoint/insuffisance  
 $3 \times 10^{-8}$  pour un bain d'huile à faible niveau et une lubrification par jet d'huile  
 $6 \times 10^{-8}$  pour lubrification à la graisse et air-huile
- $K_z$  = constante géométrique liée au type de roulement → (tableau 5)
- $v$  = viscosité cinématique à la température de fonctionnement, [ $mm^2/s$ ].
- $n$  = vitesse de rotation, [tr/min].
- $d$  = diamètre d'alésage du roulement, en [mm].
- $D$  = diamètre extérieur du roulement, en [mm].

**Tableau 5**

Type de roulement	Constantes géométriques $K_Z$ et $K_L$	
	$K_Z$	$K_L$
<b>Roulements rigides à billes</b> - à une rangée et à deux rangées	3,1	-
<b>Roulements à billes à contact oblique</b> - une rangée - deux rangées - quatre points de contact	4,4 3,1 3,1	- - -
<b>Roulements à rotule sur billes</b>	4,8	-
<b>Roulements à rouleaux cylindriques</b> - avec cage - à rouleaux jointifs	5,1 6,2	0,65 0,7
<b>Roulements à rouleaux coniques</b>	6	0,7
<b>Roulements à rotule sur rouleaux</b>	5,5	0,8
<b>Roulements à rouleaux toroïdaux CARB</b> - avec cage - à rouleaux jointifs	5,3 6	0,8 0,75
<b>Butées à billes</b>	3,8	-
<b>Butées à rouleaux cylindriques</b>	4,4	0,43
<b>Butées à rotule sur rouleaux</b>	5,6	0,58 <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Seulement pour roulements montés individuellement

### 3-7- Pertes résultant du brassage d'huile :

- Les pertes résultant du brassage d'huile constituent les sources de frottement additionnelles les plus importantes. Le terme source additionnelle se réduit donc à la composante des pertes de résistance  $M_{trainée}$ .

- Dans une lubrification par bain d'huile, le roulement est partiellement ou, dans certaines situations, complètement immergé. Dans de telles conditions, la taille et la géométrie du réservoir d'huile ainsi que le niveau d'huile utilisé peuvent avoir un impact substantiel sur le moment de frottement du roulement. Pour un bain d'huile de très grandes dimensions, indépendamment d'une quelconque interaction de la taille du réservoir et d'une quelconque influence d'autres éléments mécaniques travaillant à proximité du roulement (*par ex. agitation externe de l'huile, engrenages ou cames*), les pertes de résistance de frottement peuvent être estimées en fonction du niveau d'huile dans le réservoir à partir de la variable  $V_M$  tracée dans le **diagramme 2** en fonction du niveau d'huile  $H$  et du diamètre moyen du roulement  $d_m = 0,5 (d + D)$  indiqués dans la **fig. 2**.

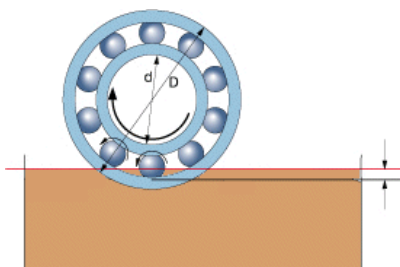


Fig 2

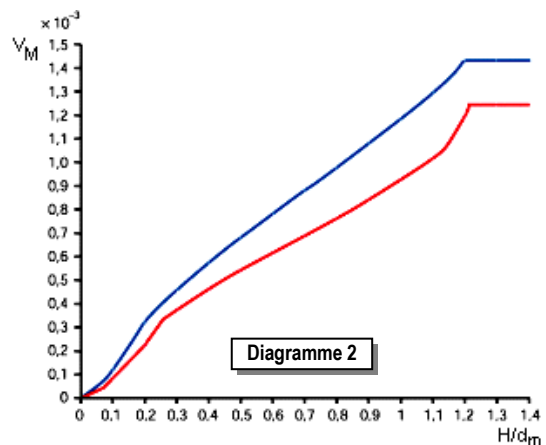


Diagramme 2

- Le **diagramme 2** s'applique à des vitesses allant jusqu'à la vitesse de référence du roulement. Dans le cas de vitesses supérieures et de niveaux d'huile élevés, d'autres effets peuvent influencer considérablement les résultats.

- La variable  $V_M$  du **diagramme 2** est liée au moment de frottement pour les pertes résultant du brassage d'huile :

des roulements à billes par	et des roulements à rouleaux par
$M_{\text{traînée}} = V_M \cdot K_{\text{bille}} \cdot d_m^5 \cdot n^2$	$M_{\text{traînée}} = 10 \cdot V_M \cdot K_{\text{rouleau}} \cdot B \cdot d_m^4 \cdot n^2$

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{\text{traînée}} = \text{moment de frottement résultant du brassage d'huile, en [Nmm]}. \\ V_M = \text{variable dépendant du niveau d'huile, selon le diagramme 2} \\ K_{\text{bille}} = \text{constante liée au roulement à billes, voir ci-dessous} \\ K_{\text{rouleau}} = \text{constante liée au roulement à rouleaux, voir ci-dessous} \\ d_m = \text{diamètre moyen du roulement, [mm]}. \\ B = \text{largeur de la bague intérieure du roulement, en [mm]}. \\ n = \text{vitesse de rotation, [tr/min]}. \end{array} \right.$$

- La constante liée aux roulements à billes se définit suivant la formule :

$$K_{\text{bille}} = (i_{\text{rw}} \cdot K_Z \cdot (D + d)) / (D - d) \cdot 10^{-12}$$

- Tandis que la constante liée aux roulements à rouleaux s'établit suivant la formule :

$$K_{\text{rouleau}} = (K_L \cdot K_Z \cdot (D + d)) / (D - d) \cdot 10^{-12}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{\text{bille}} = \text{constante liée aux roulements à billes.} \\ K_{\text{rouleau}} = \text{constante liée aux roulements à rouleaux.} \\ i_{\text{rw}} = \text{nombre de rangées de billes.} \\ K_Z = \text{constante géométrique liée au type de roulement.} \\ K_L = \text{constante géométrique liée au type de roulement à rouleaux.} \\ d = \text{diamètre d'alésage du roulement, en [mm]}. \\ D = \text{diamètre extérieur du roulement, en [mm]}. \end{array} \right.$$

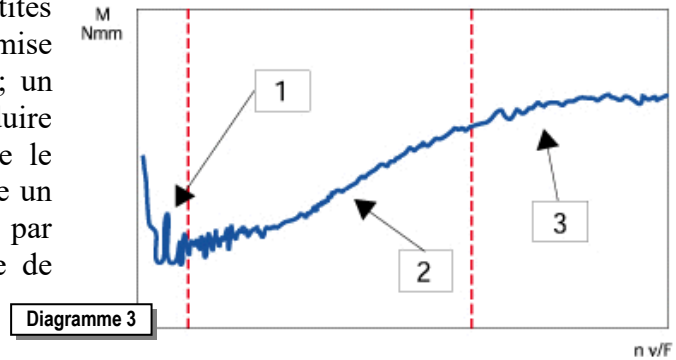
### Remarque :

- Pour calculer les pertes de résistance de frottement dans le cas d'une lubrification à jet d'huile, il est possible d'utiliser le modèle du bain d'huile en spécifiant un niveau d'huile équivalant à la moitié du diamètre du rouleau et en multipliant la valeur ainsi obtenue pour  $M_{\text{traînée}}$  par un facteur deux.

- Dans le cas de montages avec arbre vertical, il est possible de calculer approximativement les pertes de frottement résultant du brassage d'huile en utilisant le modèle relatif aux roulements entièrement immergés. On multiplie alors la valeur  $M_{\text{traînée}}$  ainsi obtenue par un facteur égal à la largeur (*hauteur*) immergée par rapport à la largeur (*hauteur*) totale du roulement.

### 3-8- Lubrification mixte pour vitesses faibles et basses viscosités :

- Pour un fonctionnement avec de petites valeurs  $\kappa (\leq 2)$ , l'application est soumise à un régime de lubrification mixte ; un contact métal sur métal peut se produire occasionnellement, ce qui augmente le frottement. Le **diagramme 3** présente un moment classique de frottement par roulement en fonction de la vitesse de rotation et de la viscosité.



- Pendant la phase de démarrage, alors que la vitesse et la viscosité augmentent, le moment de friction diminue car un film lubrifiant se forme et le roulement entre en plein régime élasto-hydrodynamique (**EHL**). Dans le cas de vitesses ou de viscosités supérieures, le frottement s'intensifie du fait de l'accroissement de l'épaisseur du film jusqu'à ce que l'insuffisance de lubrifiant à haute vitesse et les effets thermiques réduisent à nouveau le frottement.

- Le coefficient de frottement par glissement peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\mu_{sl} = \Phi_{bl} \cdot \mu_{bl} + (1 - \Phi_{bl}) \cdot \mu_{EHL}$$

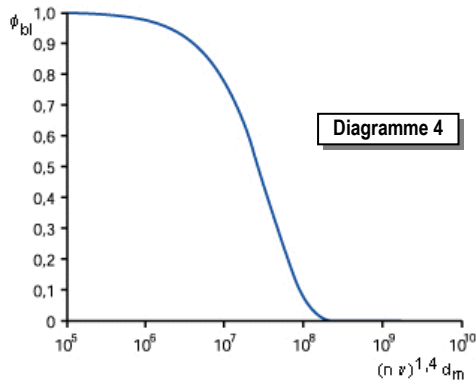
- $\mu_{sl}$  = coefficient de frottement par glissement.
- $\Phi_{bl}$  = facteur de pondération pour le moment de frottement par glissement.
- $\mu_{bl}$  = coefficient dépendant des additifs du lubrifiant, valeur approximative 0,15.
- $\mu_{EHL}$  = coefficient de frottement pour les applications à lubrification intégrale :
  - 0,05 pour une lubrification à l'huile minérale.
  - 0,04 pour une lubrification à l'huile synthétique.
  - 0,1 pour une lubrification avec des fluides hydrauliques.
 Pour des applications avec roulements à rouleaux cylindriques ou coniques, utiliser les valeurs suivantes :
  - 0,02 pour les roulements à rouleaux cylindriques.
  - 0,002 pour les roulements à rouleaux coniques.

- Le facteur de pondération pour le moment de frottement par glissement peut être estimé à l'aide de l'équation.

$$\Phi_{bl} = \frac{1}{e^{2,6 \times 10^{-8} (n v)^{1,4} d_m}}$$

- $\Phi_{bl}$  = facteur de pondération pour le moment de frottement par glissement.
- e = base des logarithmes népériens = 2,718.
- n = vitesse de rotation, [tr/min].
- v = viscosité cinématique du lubrifiant à la température de fonctionnement, [mm<sup>2</sup>/s].  
(pour la lubrification à la graisse, viscosité de l'huile de base)
- d<sub>m</sub> = diamètre moyen du roulement  
= 0,5 (d + D), [mm].

Ou avec le *diagramme 4*.



- Une estimation du facteur de pondération  $\Phi_{bl}$  pour le moment de frottement par glissement peut être faite en utilisant la courbe du *diagramme 4*.

- Pour les butées à rotule sur rouleaux, la constante **2,6** de l'équation doit être remplacée par **100** lors du calcul de  $G_{sl}$  (*pris en compte par le programme de calcul du frottement*).

### 3-9- Effets du jeu et des défauts d'alignement sur le frottement :

- Des modifications effectuées dans le jeu et/ou un défaut d'alignement des roulements modifieront le moment de frottement. Le modèle décrit ci-dessus prend en considération un jeu normal et un roulement aligné. Des températures de fonctionnement du roulement ou une vitesse élevées peuvent toutefois réduire le jeu interne du roulement, et augmenter ainsi le frottement. Un défaut d'alignement augmente généralement le frottement. Dans le cas de roulements à rotule sur billes, de roulements à rotule sur rouleaux, de roulements à rouleaux toroïdaux **CARB** et de butées à rotule sur rouleaux, cette augmentation est toutefois négligeable.

### 3-10- Effets du remplissage de graisse sur le frottement :

- Dans le cas d'une lubrification à la graisse, si le roulement vient d'être lubrifié (*ou relubrifié*) avec la quantité de graisse recommandée, il se peut qu'il produise des valeurs de frottement considérablement plus élevées au cours des premières heures ou des premiers jours de fonctionnement (*selon la vitesse*) que celles calculées au départ. En effet, la redistribution de la graisse à l'intérieur de l'espace libre dans le palier requiert un certain temps ; pendant ce laps de temps, la graisse est agitée et déplacée.

- Multiplier le moment de frottement par roulement initial par un facteur **2** pour les séries légères et par un facteur **4** pour les séries lourdes, permet d'évaluer l'impact de ce phénomène.

- Passée cette période de « *rodage* », le moment de frottement revient toutefois à des valeurs similaires à celles des roulements lubrifiés à l'huile ; dans de nombreux cas, des valeurs inférieures sont même possibles. Si le roulement contient trop de graisse, des valeurs de frottement plus élevées peuvent être relevées.

### 4- Comportement de frottement des roulements hybrides :

- Compte tenu des valeurs plus élevées du coefficient d'élasticité de la céramique, les roulements hybrides auront des zones de contact plus petites, ce qui favorise une réduction des composantes de frottement par roulement et par glissement. De plus, la plus faible densité de la céramique par rapport à l'acier réduit les forces centrifuges, ce qui diminue également le frottement à des vitesses élevées.

- Dans les équations ci-dessus, le moment de frottement des roulements à billes à contact oblique hybrides peut être calculé en substituant les constantes géométriques  $R_3$  et  $S_3$  des roulements tout-acier respectivement par  $0,41.R_3$  et  $0,41.S_3$ .

- Dans les conceptions hautes vitesses avec roulements rigides à billes hybrides, on Précharge axialement le montage. Dans ces conditions, les roulements rigides à billes fonctionnent de la même manière que les roulements à contact oblique avec une réduction similaire du niveau de frottement à hautes vitesses.

### 5- Couple de démarrage :

- Le couple de démarrage d'un roulement est défini comme le moment qui doit être surmonté pour la mise en rotation d'un roulement à l'arrêt. Dans des conditions de température ambiante normales, de  $+20$  à  $+30$  °C, sur la base d'une vitesse nulle et avec  $\mu_{sl} = \mu_{bl}$ , le couple de démarrage peut être calculé en n'utilisant que le moment de frottement par glissement et le moment de frottement des joints, le cas échéant. Donc :

$$M_{\text{démarrage}} = M_{sl} + M_{\text{joint}}$$

$$\begin{cases} M_{\text{démarrage}} & = \text{moment de frottement de démarrage, en [Nmm]}. \\ M_{sl} & = \text{moment de frottement par glissement, en [Nmm]}. \\ M_{\text{joint}} & = \text{moment de frottement des joints, [Nmm]}. \end{cases}$$

- Le couple de démarrage peut toutefois s'avérer considérablement plus élevé pour les roulements à rouleaux avec un grand angle de contact : jusqu'à quatre fois plus élevé pour les roulements à rouleaux coniques des séries **313**, **322 B**, **323 B** et **T7FC**, et jusqu'à huit fois plus élevé pour les butées à rotule sur rouleaux.

### 6- Perte de puissance et température du roulement :

- La perte de puissance dans le roulement due au frottement peut être tirée de :

$$N_R = 1,05 \times 10^{-4} \cdot M \cdot n$$

$$\begin{cases} N_R & = \text{perte de puissance, [W]}. \\ M & = \text{moment de frottement total du roulement, [Nmm]}. \\ n & = \text{vitesse de rotation, [tr/min]}. \end{cases}$$

- Si le facteur de refroidissement est connu (*chaleur à éliminer du roulement par degré de différence de température entre le roulement et l'environnement*), l'augmentation de température de fonctionnement du roulement peut être estimée avec la formule :

$$\Delta T = N_R / W_s$$

$$\begin{cases} \Delta T & = \text{augmentation de température, [°C]}. \\ N_R & = \text{perte de puissance, [W]}. \\ W_s & = \text{facteur de refroidissement, [W/°C]}. \end{cases}$$