

# Loi de dissipation de la chaleur produite dans un palier lisse

par Ch. HANOCQ

Professeur à l'Université de Liège  
Rapporteur de la Commission S. B. M. des Paliers

## INTRODUCTION

Le problème du calcul d'un palier refroidi par convection naturelle, qui constitue le palier normal, ne saurait être abordé que si l'on connaît la loi de dissipation de la chaleur propre à ce palier.

Faute d'avoir résolu au préalable ce problème, il est impossible d'apporter une solution complète et générale à cette question du dimensionnement des paliers.

Or, à la faveur d'erreurs introduites dans l'expérimentation systématique des paliers, menée sur une grande échelle, par une très grande firme allemande de construction, vers 1905, ce problème s'est trouvé embrouillé au point que 40 années ont à peine suffi pour en venir à bout.

La question n'est évidemment pas simple; mais des expérimentateurs qui avaient pris pour évaluer la quantité de chaleur produite par seconde dans un palier, le produit  $A S p f_c V$  au lieu de  $A S p f V$  (\*) devaient aboutir à des erreurs qui, dans certaines conditions, pouvaient atteindre 300 %. On ne s'étonnera pas si, en conclusion de ces recherches, les auteurs en étaient arrivés à admettre que la surface extérieure du palier n'intervenait que peu.

Bien qu'ayant utilisé, dès le début de cette recherche, pour l'évaluation de la quantité de chaleur le produit  $A S p f V$  (faisant ainsi la distinction entre  $f$  et  $f_c$ ), notre travail de synthèse

n'en eût pas moins échoué si nous n'avions pas vu à un certain moment, le rôle de l'arbre dans la dissipation de la chaleur produite par le frottement.

Sans doute, savions-nous que l'arbre jouait un rôle à ce point de vue mais le fait qu'antérieurement, il n'y était jamais fait allusion, nous laissait croire que la partie de la chaleur dissipée ainsi était faible par rapport à celle évacuée par le corps du palier lui-même. Or, lorsque rien ne s'oppose à l'écoulement de la chaleur produite dans la couche d'huile vers l'extérieur par l'intermédiaire de l'arbre, on peut dire qu'il est logique d'admettre que la moitié de la chaleur produite dans la couche d'huile va au coussinet tandis que l'autre moitié est évacuée par l'arbre dont la vitesse périphérique facilite pour le surplus considérablement le phénomène de convection.

On voit, tout de suite, les conséquences de cette remarque : la quantité de chaleur dissipée ne pourra être la même pour un palier d'extrémité que pour un palier intermédiaire, puisque l'arbre ne se prolonge dans le premier cas que d'un seul côté.

Il pourra se faire aussi, quand les paliers sont trop rapprochés, que l'évacuation se fasse moins bien, la surface de l'arbre qui participe aux échanges avec l'air pour l'ensemble des deux paliers voisins, ne correspondant plus au double de la surface normalement réservée à un seul.

Nous serons ainsi amenés, en conclusion, à distinguer dans les applications :

le cas du palier d'extrémité,  
du cas du palier intermédiaire;

(\*) Voir, aux I<sup>re</sup> et II<sup>me</sup> Parties, la distinction à faire entre  $f_c$  coefficient de frottement au coussinet et  $f$  coefficient de frottement à l'arbre.

ou encore :

le cas du palier ventilé d'un seul côté,  
du cas du palier ventilé des deux côtés.

Les formules proposées étant distinctes pour chacun des cas.

## CHAPITRE I.

### ETUDE EXPERIMENTALE SUR LES PALIERS LISSES

#### 1) Etablissement de la formule de base.

Nous n'entreprendrons pas ici de faire un compte rendu des expériences effectuées en vue d'établir ces formules sur des bases rationnelles; on trouvera dans la Revue Universelle des Mines (9<sup>me</sup> série, tome III, n° 7 — 1947) un exposé complet à cet égard; mais nous voudrions dégager, de l'ensemble, la méthode qui nous a conduit à des formules explicites valant pour des applications allant du palier d'un diamètre de 40 mm présentant une surface totale extérieure de 5 dm<sup>2</sup> en chiffres ronds, à un palier du diamètre de 250 mm correspondant à une surface totale extérieure de 470 dm<sup>2</sup>.

La méthode consiste à mettre en mouvement l'arbre porté par le palier à expérimenter, au moyen d'une commande extérieure à la chambre isothermique (fig. 1) de façon à placer le palier dans un milieu à température strictement constante et en dehors de tout déplacement d'air artificiel, ceci afin de connaître les lois de dissipation dans les conditions limites *les plus défavorables*.

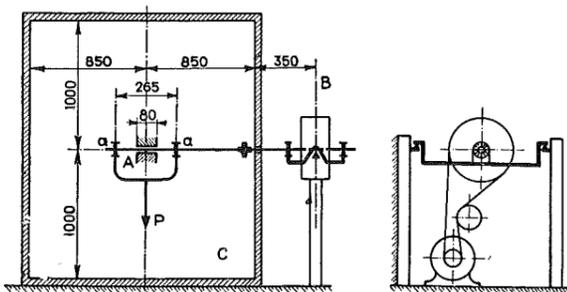


Fig. 1.

Le dispositif extérieur doit être capable de donner une évaluation du coefficient de frottement  $f$  mesuré à l'arbre puisque c'est du calcul de  $ASpfV$  que nous déduirons la quantité de chaleur dissipée par le palier.

Ce dispositif extérieur est constitué par un volant source d'énergie, porté par deux paliers à billes sur un cadre orientable de façon que la réaction sur le palier d'essai situé à l'intérieur de la chambre isothermique, ne soit pas influencé par les réactions de ces paliers. En rompant la commande effectuée par courroie après le nombre d'heures de fonctionnement nécessaire pour atteindre la température de régime, on libère le volant; en relevant ensuite la courbe de ralentissement en fonction du temps, on est en mesure d'évaluer le couple résistant *total* appliqué à l'ensemble.

En décomptant du couple total, le couple absorbé par le volant seul avec ses deux paliers (couple déterminé par des expériences préalables conduites également par ralentissement), on arrive à la détermination du coefficient de frottement  $f$  correspondant :

- à une charge totale  $P$ ,
- à une vitesse de  $N$  tours/sec choisie pour la mise en régime,
- à une température ambiante  $t_a$ ,

pour une huile dont la courbe de viscosité est connue. Cette courbe de viscosité fixe la valeur de  $\mu$  à la température de régime  $t_r$  réalisée dans l'expérience.

Lorsque le régime est strictement établi, on peut dire que l'énergie totale absorbée par le frottement en une seconde, est exprimée par  $(pS)fV$ , et est égale, au facteur  $A$  près, à la quantité de chaleur dissipée par convection et par rayonnement en une seconde.

Nous avons admis que celle-ci pouvait être représentée par une fonction à deux termes : l'un proportionnel à  $(t_r - t_a)$ , l'autre à  $(t_r - t_a)^4$ ,  $t_a$  étant la température ambiante.

Nous admettons également, assez hypothétiquement toutefois, que le premier terme se rapporte uniquement à la convection et que le second représente l'énergie dissipée par rayonnement.

$$SpfV = k_0 S' (t_r - t_a) + k'_0 S' (t_r - t_a)^4 \quad (1)$$

La loi de Stefan, qui régit le rayonnement du corps noir, s'exprime en fonction de la différence des quatrièmes puissances des températures absolues  $(T_r^4 - T_a^4)$ . Dans les limites où nous avons pu opérer, c'est-à-dire en dessous de 80°, la quantité de chaleur dissipée par rayonnement grandit visiblement plus vite que ne l'indiquerait ce dernier terme, et cela parce que, à mesure de l'élévation de température du palier, la sur-

face de l'arbre et du support du palier qui participent *effectivement* aux échanges, prend une importance plus grande, si bien que l'augmentation de la quantité de chaleur rayonnée, qui elle dépend de la quatrième puissance de la température  $T_r$ , vient non seulement de cet accroissement de  $T_r$ , moyen mais encore de l'accroissement réel de la surface extérieure du palier que nous supposons forcément constante et égale à  $S'$ . *Pratiquement*, c'est donc comme la quatrième puissance de la différence  $(t_r - t_a)$  que croît la quantité de chaleur rayonnée, pour autant que l'on se limite à des différences ne dépassant pas 60°, pour fixer les idées.

#### 2) Influence de la nature du métal et de l'état de rodage.

Dans la publication de ces essais faite dans la R. U. M., nous avons été amenés à montrer l'influence, sur les conditions de dissipation de la chaleur :

- a) de la nature du métal du coussinet;
- b) de la nature du frottement.

Sur ce point, nous dirons que, si par un défaut de rodage, un contact direct s'établit entre le métal de l'arbre et le métal du coussinet, le coefficient de frottement grandit et avec lui la quantité de chaleur dissipée par unité de temps.

Il y a là un phénomène très curieux, une sorte d'autodéfense, que nous avons cru pouvoir interpréter en disant que le contact direct des surfaces du coussinet et de l'arbre, facilite l'écoulement de la chaleur vers la paroi extérieure du palier, amenant une température *réelle* de celle-ci plus élevée pour une même température  $t_r$  observée du bain d'huile. Mais cette explication paraît insuffisante et je me demande si, quand il y a contact, c'est-à-dire arrachement des particules et dislocation de ces particules, il n'y a pas là un travail interne à fournir qui n'entre pas en ligne de compte dans la quantité de chaleur à dissiper par le palier.

Quoi qu'il en soit, lorsqu'on se trouve dans les conditions normales de rodage, c'est-à-dire les conditions dans lesquelles on doit se placer pour le calcul d'un palier, la quantité de chaleur dissipée peut être calculée par les formules que nous venons de présenter, avec les valeurs des coefficients  $k_0$  et  $k'_0$ , que nous allons déduire de nos expériences.

Bien que nous ayons eu soin de déterminer la quantité de chaleur produite par le frottement en utilisant la valeur de  $f$  déduite directement de l'expérience par ralentissement du volant, nous n'en avons pas moins confronté les valeurs de  $f$  ainsi établies avec celles déduites des formules présentées dans la première partie; nous avons pu constater une concordance très parfaite des deux valeurs, ce qui permet d'accorder la plus grande confiance à ces formules dans un champ d'applications qui embrasse tout ce que la pratique courante peut désirer.

#### 3) Recherches conduisant aux valeurs numériques de $k_0$ et de $k'_0$ .

Pour pouvoir déterminer  $k_0$  et  $k'_0$  avec certitude, il a fallu opérer sur un grand nombre de paliers de formes, de dimensions et de proportions très différentes, en faisant varier pour chacun d'eux les conditions de fonctionnement, c'est-à-dire le nombre de tours, la charge et dans certains cas la température ambiante.

Nous avons groupé à la planche I les principaux types étudiés et nous avons indiqué à côté de la coupe du palier, les résultats des observations en utilisant pour abscisses  $(t_r - t_a)$  et pour ordonnées  $pfV$ .

L'interprétation de ces courbes n'a pas toujours été aisée et comme nous le disions plus haut, l'effort de synthèse n'a pu aboutir qu'en faisant intervenir la surface de l'arbre dans les surfaces dissipant la chaleur. On trouvera dans l'article de la R.U.M. l'étude détaillée de ces essais et des anomalies apparentes relevées dans certains cas.

Nous nous bornerons à donner ici les résultats résumés en un tableau et la manière dont nous sommes arrivés à les interpréter.

Le **tableau I** donne les caractéristiques de chacun des paliers

$$\frac{l}{d}, \frac{r}{a}, S, S', \frac{S'}{S}$$

ainsi que

$$10^2 \mu \text{ à } 20^\circ$$

en même temps que la provenance des huiles employées. Pour pouvoir déterminer  $k_0$  et  $k'_0$  de la formule (1) ci-dessus, nous avons déduit du tracé de la courbe caractéristique, pour chaque palier, la valeur de  $k$  et  $k'$  de la formule

$$pfV = k (t_r - t_a) + k' (t_r - t_a)^4 \quad (2)$$

pour  $(t_r - t_a) = 30^\circ$  (colonne 11 et 12).

PLANCHE I.

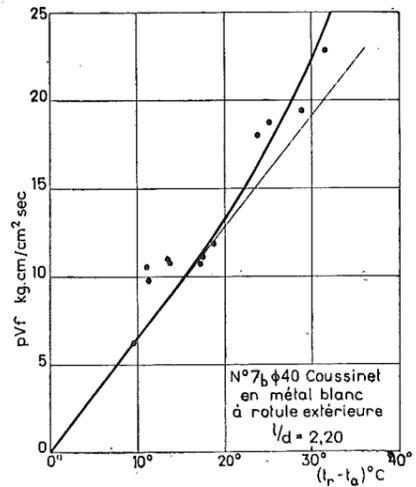
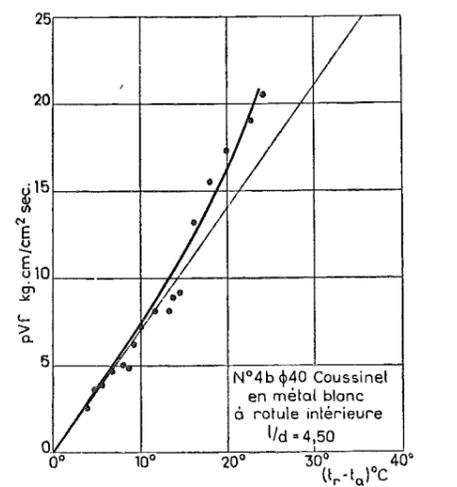
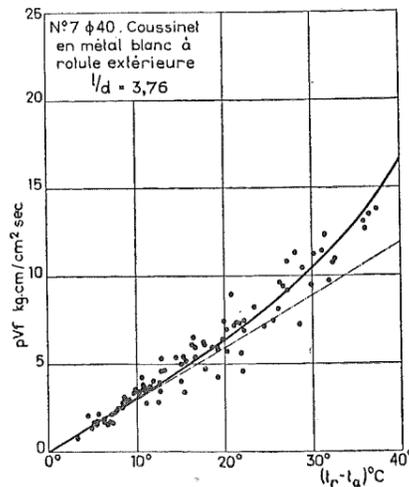
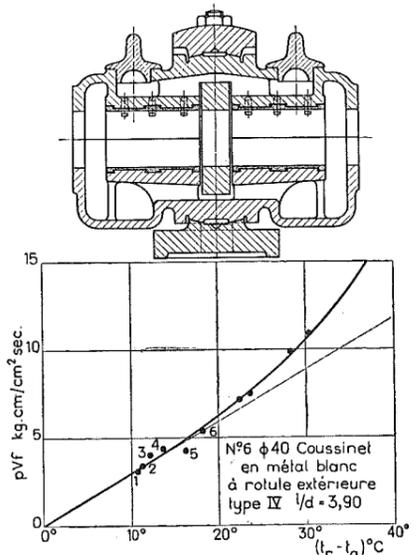
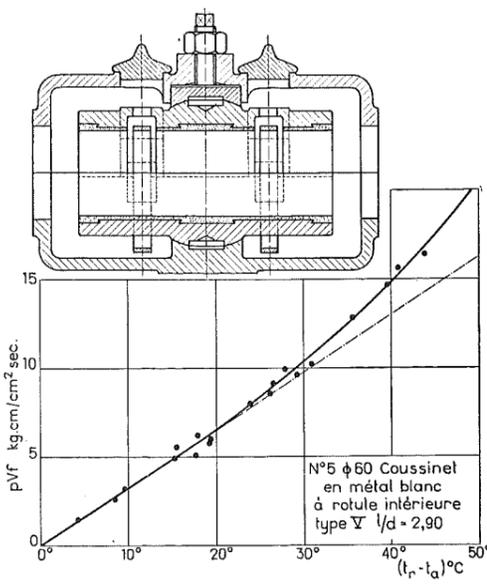
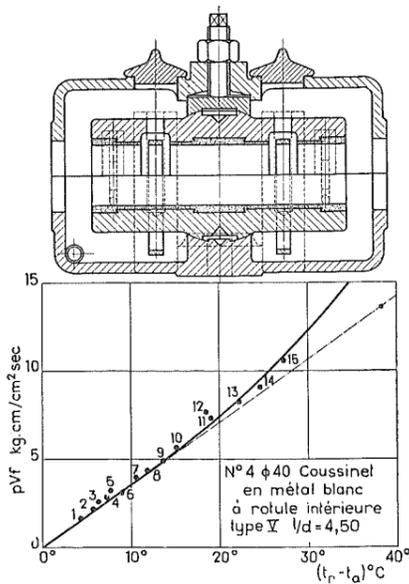
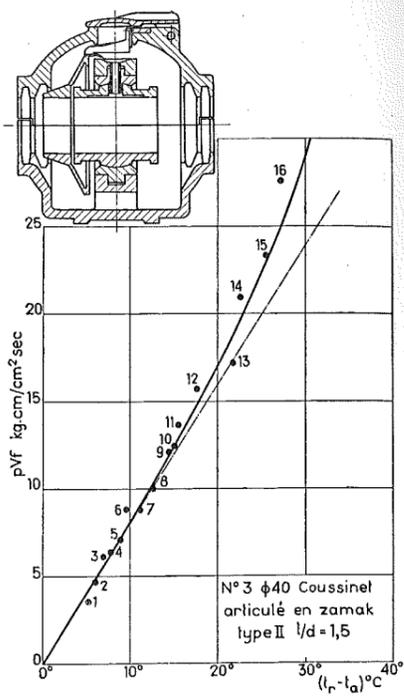
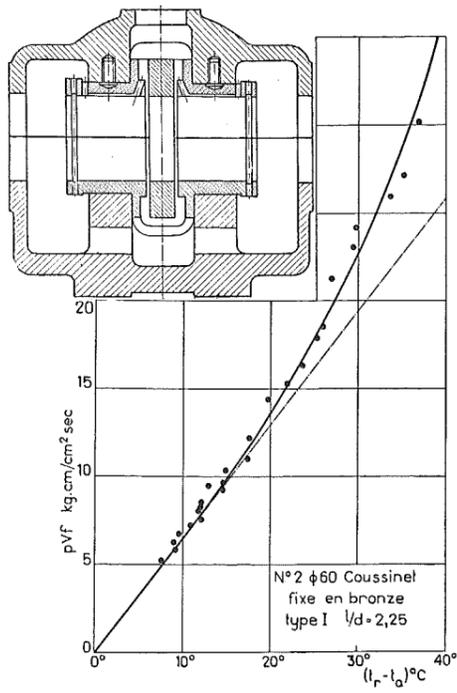
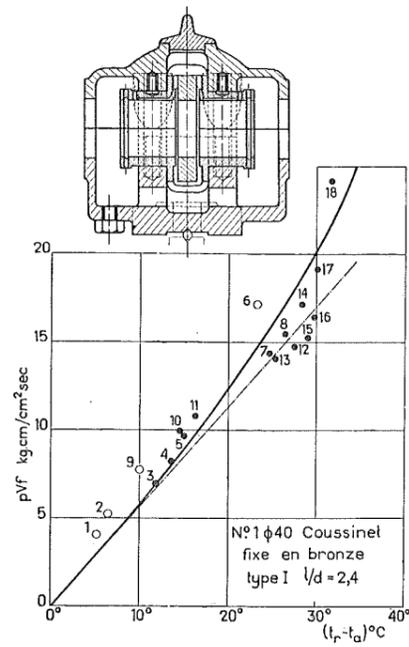


TABLEAU I.

Désignation	Type	N°	d	$\frac{n}{l/d}$ $\frac{n_1}{L/d}$	S cm <sup>2</sup>	r a	Lubrifiant $\frac{\text{Pro-ven.}}{10^2 \mu}$ à 20°	S' cm <sup>2</sup>	S'/S	$\frac{\text{pour } (t_r - t_a)}{50^\circ} = \frac{k}{10^6 k'}$	k <sub>0</sub>	10 <sup>6</sup> k' <sub>0</sub>	y	k <sub>0</sub> calculé $\frac{1,80}{(1+y)}$	K moy.	K <sup>4</sup>	10 <sup>6</sup> k' <sub>0</sub> calculé	Rapport			
coussinet fixe bronze	I	1	40	2,40	25,7	211	Purf.	4,35	772	50,00	0,560	4,20	1,87	14,00	0,176	2,12	0,88	0,915	0,695 · 16,50	0,900	
		2	60	2,25	65,7	150	Pens.	5,75	1719	27,00	0,650	4,50	2,40	15,90	0,405	2,52	0,95				
coussinet à rotule bague fixe	II	5	40	1,50 2,20 <sup>(2)</sup>	24,0	267	Pens.	5,75	862	56,00	0,800	5,90	2,22	16,40	0,455	2,61	0,85	0,850	12,50	1,500	
		5b	40	1,00 1,50 <sup>(3)</sup>	16,4	250	Vasel. Trans.	0,64 4,60	564	54,40	1,240	8,27	5,60	24,10	0,975	5,54	1,02	1,000	24,10	1,000	
coussinet à rotule extérieure bague fixe	IV	6	40	3,90	55,0	170	Purf.	4,55	952 <sup>(1)</sup>	17,50	0,294	2,15	1,70	12,50	0,110	2,00	0,85	0,840	0,497	11,90	1,020
		7	40	3,76	55,0	250	Purf.	4,55	952	17,90	0,297	1,95	1,66	10,80	0,110	2,00	0,85				
coussinet à rotule intérieure bague mobile	V	4	40	4,50	72,8	235	Purf.	2,24	1644	22,60	0,555	1,98	1,57	8,80	0,075	1,95	0,81	0,810	0,450	10,50	0,625
		5	60	2,90 3,90	105,4	115	Pens.	5,75	1808	17,10	0,527	0,70	1,91	4,10	0,310	2,56	0,81				
rotule intérieure	VI	4	40	4,50	72,8	235	Purf.	2,24	1644	22,60	0,555	1,98	1,57	8,80	—	—	—	—	—	—	—
		4b	40	2,00	52,5	135	Purf.	4,55	1644	51,00	0,700	—	1,58	—	—	—	—	—	—	—	—
rotule extérieure	IVb	7	40	3,76	55,0	250	Purf.	4,55	952	17,90	0,297	1,95	1,66	10,80	—	—	—	—	—	—	—
		7b	40	2,20	26,5	250	Purf.	4,55	952	56,00	0,650	4,00	1,74	11,10	—	—	—	—	—	—	—

(1) Nous avons ajouté 112 pour tenir compte de la surface immédiatement en contact avec la rotule extérieure.

(2) et (3) Nous avons tenu compte de la présence de la bague de graissage située ici latéralement et prolongeant en quelque sorte le coussinet, au point de vue de l'écoulement de la chaleur.

Nous en avons tiré

$$k_o = \frac{k}{S'/S} \times 10^2 \quad (3)$$

$$k'_o = \frac{k'}{S'/S} \times 10^2 \quad (4)$$

exprimés ainsi en kgm par m<sup>2</sup> et par seconde.

#### 4) Influence des dimensions sur la valeur de k<sub>o</sub>.

En rapprochant les chiffres ainsi trouvés pour k<sub>o</sub> pour les paliers de 40 et de 60 du même type, nous avons dû noter que k<sub>o</sub> dépendait des

dimensions. Cette constatation serait toutefois insuffisante pour conclure, étant donné qu'elle ne porte que sur un type et sur deux dimensions mais nous avons pu disposer, grâce au bienveillant concours de M. P. Delguste, Sous-Directeur aux A.C.E.C. et membre de la Commission S.B.M. des paliers, des chiffres relevés sur un grand nombre de paliers de machines électriques (tableau II). Il y a lieu d'observer, en effet, que dans ce genre d'application, les conditions de sollicitation sont bien déterminées et que le relevé de la température de régime et de la courbe de viscosité de l'huile employée permet d'établir la valeur de k<sub>o</sub> de la formule. En effet,

TABLEAU II.

	Palier d'extrémité non ventilé	Palier d'extrémité ventilé						Palier de milieu ventilé	
		N° 1	N° 2	N° 3	N° 4	N° 5	N° 6	N° 7	N° 8
d mm	190	190	190	160	160	190	250	190	
l/d	1,7	2,0	2,0	1,7	1,6	1,7	1,9	1,7	
r/a	530 à 800	530 à 800	530 à 800	570 à 800	570 à 800	530 à 800	530 à 800	530 à 800	
N 1/min.	500	750	750	500	750	750	750	750	
P kg	850	5040	5640	2300	1275	1760	10120	3750	
p kg/cm <sup>2</sup>	1,48	7,29	8,16	3,98	3,21	3,05	8,61	6,49	
S dm <sup>2</sup>	5,80	6,92	6,92	5,80	4,00	5,80	11,75	5,80	
S' dm <sup>2</sup>	140	325	325	140	104,3	127,5	470	136,3	
S'/S	24	47	47	24	26	22	40	24	

Le trait fin indique la température ambiante t<sub>a</sub>; le trait fort, la température de régime t<sub>r</sub> observée; les traits pointillés indiquent les deux valeurs limites calculées.

De là, nous pouvons tirer

$$k_o = k_\infty \times \frac{d^3 + a}{d^3 + 2a} \quad (6)$$

qui donne à k<sub>o</sub> la valeur

$$\frac{k_\infty}{2} \text{ pour } d = 0$$

#### 5) Conclusions en ce qui concerne k<sub>o</sub>.

L'explication de la valeur limite que nous venons de trouver est la suivante: quand l'arbre ne joue aucun rôle dans les échanges avec le milieu, la surface totale participant à nos échanges se ramène à la surface S' du corps du palier. Quand le diamètre d tend vers l'infini, k<sub>o</sub> tend vers k<sub>∞</sub>, c'est-à-dire une valeur double, ce qui peut s'interpréter en disant que la surface de l'arbre qui participe aux échanges est de la même importance que la surface S' du corps du palier lui-même.

En d'autres termes, si nous désignons par S'' la surface de l'arbre qui participe aux échanges et par y le rapport S''/S', on peut écrire:

$$k_o = \frac{1}{2} k_\infty \frac{S' + S''}{S'} \quad (7)$$

et

$$\frac{k_o}{\frac{1}{2} k_\infty} = 1 + y = 2 \frac{d^3 + a}{d^3 + 2a} \quad (8)$$

d'où nous pouvons tirer:

$$y = \frac{S''}{S'} = \frac{d^3}{d^3 + 2a} \quad (9)$$

La valeur de a = 150 qui convient pour le palier dont le rapport l/d = 2,5, donne à y les valeurs suivantes très voisines de celles notées ci-dessus:

d = 4 cm	y = 0,176
d = 6 cm	y = 0,420
d = 19 cm	y = 0,960
d = ∞	y = 1,000

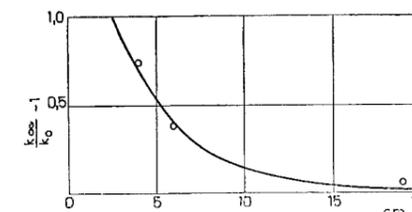


Fig. 2.

si le poids du rotor est connu, on peut trouver aisément et avec certitude la valeur de

$$p = \frac{P}{ld}$$

D'autre part, les températures t<sub>r</sub> et t<sub>a</sub> étant relevées dès la mise en régime et la courbe de viscosité de l'huile étant connue, on dispose de tous les éléments pour fixer

$$X = \frac{\mu N}{p} \left(\frac{r}{a}\right)^2$$

Utilisant les formules donnant la valeur de f en fonction de X, nous pouvions donc déduire f et finalement A S p f V, c'est-à-dire le premier membre de la relation (1). D'où finalement k<sub>o</sub> en se donnant une valeur de k'<sub>o</sub> résultant de nos propres essais.

Ceci exposé en manière de digression, de façon à montrer l'ensemble des documents dont nous disposons, voyons comment il nous a été possible de faire apparaître la valeur de k<sub>∞</sub>/k<sub>o</sub>, k<sub>∞</sub> représentant la valeur de k<sub>o</sub> pour des dimensions infinies de l'arbre.

Le palier type moteur électrique 190 mm de diamètre conduisait à une valeur de k<sub>o</sub> de l'ordre de 3,00; or, ce palier pouvait être rapproché au point de vue des formes, du type I et nous l'avons vu, le type I nous avait conduit à 1,87 pour le diamètre de 40 et 2,40 pour le diamètre de 60.

En admettant que la limite fût représentée par 3,20 pour des dimensions infinies, nous étions en droit de poser pour

$$d = 4 \text{ cm} \quad \frac{k_\infty}{k_o} = 1,71$$

$$d = 6 \text{ cm} \quad \frac{k_\infty}{k_o} = 1,35$$

$$d = 19 \text{ cm} \quad \frac{k_\infty}{k_o} = 1,06$$

Ces valeurs conduisent à la courbe de la figure 2 et à une relation de la forme

$$\frac{k_\infty}{k_o} = \frac{d^3 + 2a}{d^3 + a} \quad (5)$$

d étant exprimé en cm et a prenant la valeur 150.

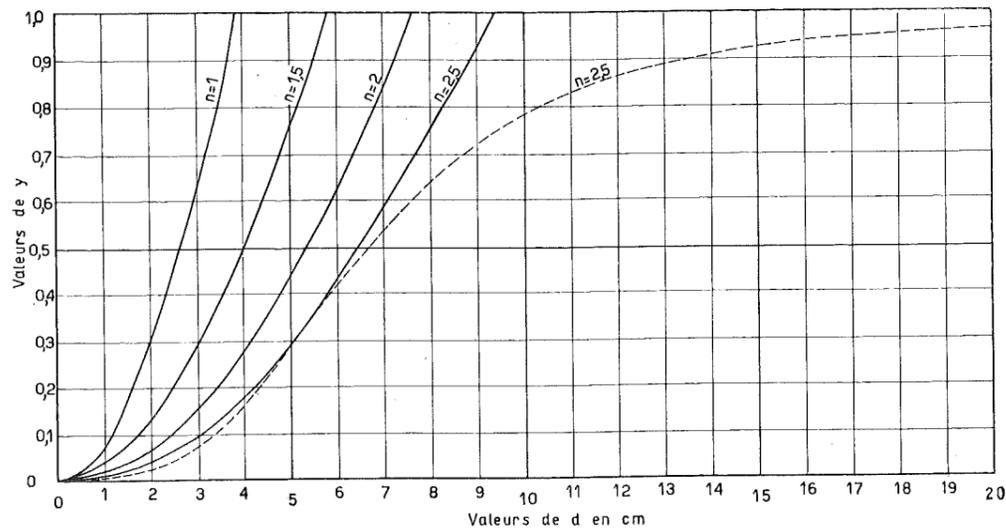


Fig. 3.

La courbe pointillée de la figure 3 montre que le rapport  $y$  tend rapidement vers l'unité et l'on peut prévoir que pour un rapport plus petit que 2,5, la valeur de  $y$  voisine de l'unité est atteinte pour un diamètre beaucoup plus faible. Lorsque le rapport  $l/d$  est assez petit pour que l'écoulement de la chaleur le long de l'arbre vers l'extérieur ne soit pas limité, il apparaît comme naturel que la quantité de chaleur produite dans la couche d'huile voisine de l'arbre s'écoule par l'arbre, tandis que celle produite dans la couche voisine du coussinet s'écoule par le corps même du palier, c'est-à-dire que *quand rien ne s'oppose à l'écoulement le long de l'arbre, de part et d'autre du palier*, la quantité évacuée par l'arbre est égale à la moitié du total.

Nous manquons de données expérimentales malgré le long effort fourni à cet égard pour établir avec certitude la loi qui commande cette variation, en fonction du rapport  $l/d$ . Tout ce que nous pouvons affirmer, c'est que tous les résultats, tant ceux tirés de nos propres expériences que ceux fournis par l'analyse des résultats se rapportant aux paliers de moteurs électriques, sont parfaitement coordonnés quand on adopte :

$$y = \frac{S''}{S'} = \frac{1}{n^2} \left(\frac{d}{d_0}\right)^2 \quad (10)$$

Cette forme plus simple de l'équation qui conduit à admettre que, pour un rapport  $l/d$  donné,  $y$  croît rapidement jusqu'à la valeur égale à l'unité, pour garder cette valeur 1 quel que soit  $d$ , n'est pas en contradiction avec l'équa-

tion (9); cette dernière conduit à la courbe pointillée (fig. 3) pour  $y$  (cas particulier  $n = 2,5$ ) tandis que l'équation (10) conduit à la courbe en trait plein pour le rapport  $l/d = 2,5$ . Pour le rapport  $l/d = 1, 1,5, 2, \dots$ , on obtient avec la relation (10) les courbes 1, 1,5, 2,...

A vrai dire, après un examen plus attentif des chiffres, nous avons dû admettre que ce qui compte au point de vue des échanges de l'arbre avec l'air ambiant, c'est la longueur axiale du corps qui fixe la valeur de  $d_0$  à partir de laquelle  $y = 1$ . En désignant par  $n$  le rapport  $L/d$  de la longueur axiale du corps au diamètre de l'arbre, nous avons pu déduire que la formule à employer, comme conséquence de l'ensemble des résultats d'essai, était la suivante

$$k_0 = \frac{k_\infty}{2} \left[ 1 + \frac{1}{n^2} \left(\frac{d}{d_1}\right)^2 \right] \quad (11)$$

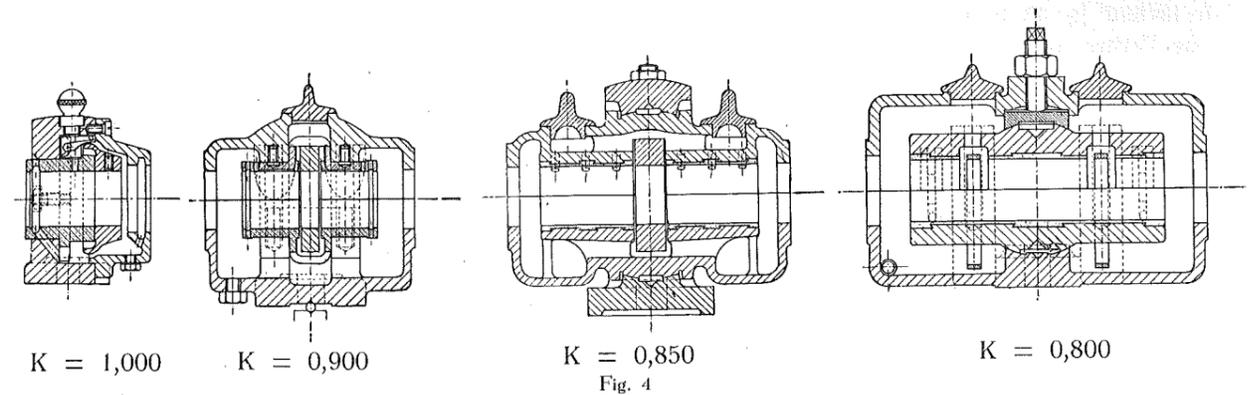
$d_1$  pouvant prendre la valeur 2,7.

La valeur  $k_\infty$  est donc la valeur qui correspond au type le plus parfait au point de vue de l'écoulement de la chaleur du coussinet vers la surface extérieure, c'est-à-dire le type III (fig. 4). Or pour ce type, dont le tracé correspond à  $n = 1,5$ , le terme entre parenthèses est égal à 2, ce qui conduit à  $k_0 = k_\infty = 3,60$ .

Explicitement la formule définitive qui donne la valeur de  $k_0$  est donc la suivante :

$$k_0 = 1,80 \left[ 1 + \frac{1}{n^2} \left(\frac{d}{d_1}\right)^2 \right] \quad \text{avec } d_1 = 2,7 \quad (12)$$

(si l'on exprime  $d$  en cm)



le terme entre parenthèses ne pouvant prendre une valeur supérieure à la valeur 2.

En appliquant la relation ci-dessus aux paliers de 40 puis de 60, nous obtiendrons les valeurs de  $k_0$  que nous aurions dû observer si la température  $t_0$  à la paroi extérieure était égale à la température  $t_r$  du bain d'huile, comme on peut admettre que c'est le cas pour le type III, très trapu et dont le coussinet est en contact sur toute son étendue avec le corps du palier.

Ceci revient à introduire un coefficient  $K$  défini par le rapport

$$K = \frac{t_e - t_a}{t_r - t_a} \quad (13)$$

égal à 1 pour le palier du type III et à une valeur fractionnaire pour tous les autres.

D'après les chiffres tirés des expériences,  $K$  prend la valeur suivante pour le :

type III	$K = 1,000$ ,
type I	$K = 0,900$ ,
type II	$K = 0,850$ ,
type IV	$K = 0,840$ ,
type V	$K = 0,810$ .

#### § 6. — Conclusions en ce qui concerne $k'_0$ .

Si notre conception est juste, il sera nécessaire de distinguer, pour le calcul du terme correspondant au rayonnement, la valeur de  $k'_v$ , valeur vraie du coefficient correspondant de la valeur apparente  $k'_0$ , l'une et l'autre étant reliées par la relation

$$k'_0 (t_r - t_a)^4 = k'_v (t_e - t_a)^4$$

$$= k'_v \left(\frac{t_e - t_a}{t_r - t_a}\right)^4 (t_r - t_a)^4$$

c'est-à-dire

$$k'_0 = k'_v \times K^4 \quad (14)$$

Ce raisonnement suppose, toutefois, que nous ne tenons pas compte de ce que la surface de l'arbre entre également en jeu pour la dissipation de la chaleur par rayonnement; en vérité, en raison de l'influence favorable de la vitesse périphérique de l'arbre sur le coefficient de convection, la valeur réelle de la surface  $S''$  intéressée à la dissipation de la chaleur est beaucoup plus petite que la valeur établie par le calcul ci-dessus qui suppose la surface de l'arbre au repos (étant donné que nous lui avons attribué un coefficient de convection  $k_0$  égal à celui propre à la surface extérieure du palier). Nous commettrions, en définitive, une erreur plus grande en tenant compte du rapport  $y$  qu'en le négligeant pour le calcul du terme en  $(t_r - t_a)^4$ , ce qui justifie la relation (14) ci-dessus.

En utilisant cette valeur, nous avons calculé les valeurs de  $k'_0$ , indiquées colonne 20 du tableau I, en donnant à  $k'_v$  la valeur de 24,10 qui ressort de la valeur observée pour le type III correspondant à  $K = 1$ .

On voit que les écarts entre les valeurs ainsi calculées et les valeurs observées de la colonne 14, peuvent atteindre 30 % et plus, mais il est facile de se rendre compte que l'erreur expérimentale pour ce terme complémentaire très petit, est de cet ordre de grandeur.

## CHAPITRE II.

### CONCLUSIONS GENERALES

De tout ce qui précède, il résulte que pour le calcul de  $p f V$  il faut utiliser la formule (16)

$$p f V = \frac{S'}{S} \left\{ 1,80 \left[ 1 + \frac{1}{2} \frac{1}{n^2} \left(\frac{d}{d_1}\right)^2 \right] K (t_r - t_a) + 24,1 \times 10^{-6} K^4 (t_r - t_a)^4 \right\} \quad (16)$$

le facteur  $\frac{1}{2}$  du terme entre crochets signifiant que l'arbre ne se prolonge que d'un seul côté lorsqu'il s'agit du cas d'un tourillon d'extrémité.

Pour le cas du tourillon intermédiaire, il faut écrire 1 au lieu de  $\frac{1}{2}$  pour évaluer le terme qui tient compte de l'influence de l'arbre.

Si le palier d'extrémité est ventilé d'un seul côté, il faut remplacer 1 du terme entre crochets par  $(1 + \frac{1}{2} \sqrt{v})$ ,  $v$  étant la vitesse de circulation d'air exprimée en m/sec.

Pour le palier intermédiaire ventilé des deux côtés, il faudra remplacer le 1 du terme entre crochets par  $(1 + \sqrt{v})$ . Cette relation signifie que le coefficient  $k_0$ , exprimé en kgm par m<sup>2</sup> et par sec peut à la limite être représenté par

$$k_0 = 1,80 + 1,80 \sqrt{v}$$

lorsqu'il y a ventilation et que la vitesse de circulation peut être prise égale à  $v$ .

Nous voudrions pouvoir montrer le chemin parcouru depuis les résultats analysés par Falz qui admettait pour la quantité de chaleur dissipée par m<sup>2</sup> et par heure

$$Q = 2,83 (t_r - t_a)^{1,30}$$

formule qui conduit dans les conditions normales à des valeurs quatre fois moindres que celles fournies par notre formule, dans le cas du fonctionnement en air calme.

Il nous semble que cette seule remarque est de nature à montrer le progrès réalisé dans l'étude de cette question.

Il subsiste, il est vrai, un facteur d'appréciation  $K$  à introduire dans la formule, qui tient compte des formes plus ou moins déliées du palier, mais, comme on peut s'en rendre compte, pour les paliers relativement courts que l'on réalise aujourd'hui, la valeur de  $K = 0,900$  pourrait être adoptée invariablement.

**SOCIÉTÉ BELGE DES MÉCANICIENS**

(S B M)

21, Rue des Drapiers - BRUXELLES - Téléphone : 11,23,70

---

**Etude théorique et expérimentale  
du  
frottement dans les organes de machines  
et  
Calcul des paliers porteurs**

---

**PRIX : 100 Francs**

**1<sup>re</sup> EDITION**  
**Juin 1949**

Cette brochure peut être obtenue contre versement préalable de son prix  
au compte postal n° 1724.23 de la Société Belge des Mécaniciens