

- B. — Répétons que pour faire un bon rail Thomas :
- la fonte doit être de *bonne* qualité régulière et pauvre en soufre. Le spiegel doit contenir le minimum de phosphore. La chaux doit être exactement cuite avec peu d'impuretés.
 - l'acier doit être coulé « froid ».
 - Les lingotières doivent être très propres, sans fissures, avoir des dimensions appropriées et une température convenable. Le lingot doit séjourner dans la lingotière un temps déterminé.
 - Les lingots ne doivent pas être enfournés trop jeunes dans les puits et l'atmosphère du four doit être maintenue réductrice.

- La température de laminage doit être exactement réglée.
- Le chutage doit être tel qu'il enlève toute trace de retassure et de ségrégation.

C. — Comme nous le disons au début de cette étude, il semble bien que la campagne menée contre les rails Thomas a pris naissance dans les pays ne possédant pas les matières premières demandées par le procédé Thomas et où le prix de revient des rails fabriqués en acier Martin est beaucoup plus élevé que celui des rails Thomas fabriqués sur le continent européen.

Elle n'a d'autre but que de combattre une concurrence très forte et de défendre des intérêts propres, sans que la réalité d'une preuve scientifique ou d'essais pratiques lui procure une base solide.

LES RECHERCHES EXPÉRIMENTALES DU LABORATOIRE DE CONSTRUCTION DES MACHINES SUR LE " FROTTEMENT FLUIDE "

(SUITE ET FIN)

par Ch. HANOCQ

Ingénieur A. I. Lg., Professeur à l'Université de Liège

CHAPITRE V

Exposé des résultats fournis par les essais sur les paliers lisses

A présent que par un exposé de la théorie mathématique j'ai pu dégager quelle devait être la variable indépendante en fonction de laquelle il convenait de rapporter tous les résultats trouvés, que par ce moyen supérieur de synthèse j'ai pu créer un fil conducteur solide pour orienter de nouvelles recherches, qu'enfin j'ai pu élucider la raison d'être de cette différence constatée entre le couple appliqué à l'arbre et le couple appliqué au coussinet, il est possible de présenter rapidement les résultats des essais qui ont pris de nombreux mois répartis sur près de trois années, et qui, s'ils n'avaient pu être groupés en fonction de $\frac{\mu N}{p}$, n'auraient pu être communiqués qu'en

utilisant une montagne de papiers.

Voici tout d'abord les points obtenus (fig. 15) par la *méthode directe* sur un palier de 40 mm. à graissage par bague fixe, présentant une surface projetée de 55 cm².

Ces points se groupent sensiblement sur une droite jusqu'à une valeur de $10^8 \frac{\mu N}{p} = 500$, à partir de laquelle la courbe qui les relie, s'incurve nettement.

Remarquant toutefois que les points entourés d'un cercle sont les seuls points qui correspondent à des

observations sur le palier *en régime*, et que ces points sont tous sur la première courbe, nous avons pu comprendre assez rapidement la raison d'être de cette discordance.

Pour calculer les valeurs de μ , nous utilisons le diagramme de viscosité établi par le laboratoire de chimie industrielle pour l'huile employée, et nous admettons comme température de l'huile, celle relevée par un thermomètre *plongé dans le fond du palier*.

Or la température de l'huile qu'il conviendrait d'employer est celle du film d'huile, toujours plus élevée. En confondant l'une avec l'autre, nous faisons nécessairement une erreur négligeable lorsque le palier était en régime de température, relativement élevée lorsqu'au contraire la température de l'huile du palier était très inférieure à la température de régime.

Pour comprendre que c'est bien là l'explication de l'écart entre les deux courbes, il suffit de calculer quelle différence de température il faudrait admettre entre la température du film et celle du bain d'huile, pour faire coïncider la partie de la courbe hors régime, avec la courbe normale relevée sur le palier en régime.

Nous avons tracé (fig. 16) en fonction de l'écart entre la température du bain et la température de régime, la différence ($t_r - t_b$) qu'il faudrait admettre, et l'on voit que celle-ci est tout à fait raisonnable et qu'elle tend progressivement vers zéro lorsqu'on se rapproche du régime.

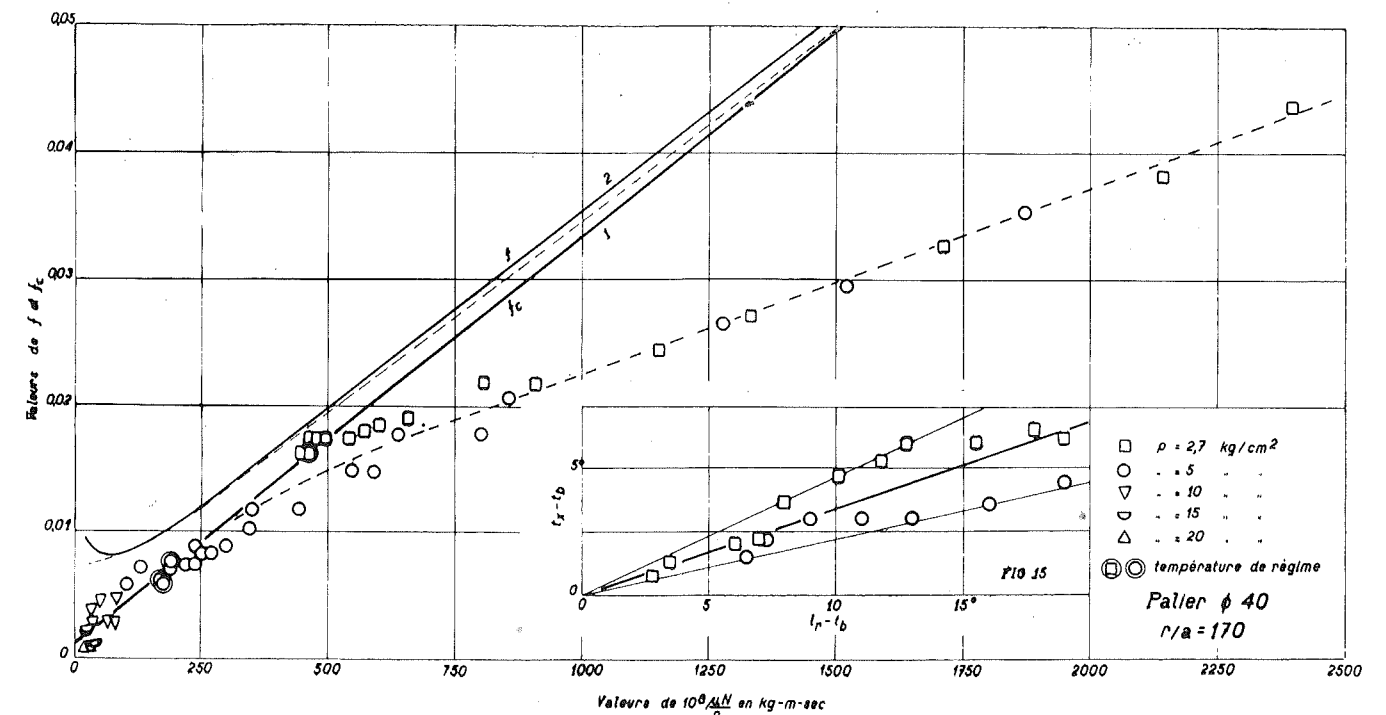


Fig. 15 et 16

Ainsi il nous paraît que nous pouvons conclure qu'il y a concordance complète entre l'allure de la courbe théorique et celle de la courbe expérimentale pour autant que l'on adopte pour température, la température du film d'huile, comme le suppose évidemment la théorie.

Voyons à présent comment se traduisent les résultats fournis par la *méthode de ralentissement*.

Afin d'éliminer une source d'erreur dans les calculs du coefficient déduit de la courbe de ralentissement, nous avons cherché à évaluer pour chaque valeur de $\frac{\mu N}{p}$ la valeur du rapport f/f_c et nous avons obtenu

la courbe d'allure hyperbolique de la figure 17. Pour le tracé de cette courbe, nous avons tenu compte de tous les points observés, n'en écartant aucun sous aucun prétexte; mais tenant compte de la densité des points nous avons rapproché la courbe de l'axe des abscisses dans la région des faibles valeurs de $\frac{\mu N}{p}$.

Mise en coordonnées logarithmiques la courbe ainsi tracée a pu se traduire par une droite, ainsi que le montre la figure 18; nous en avons déduit l'équation :

$$f = f_c \left[\frac{178}{\left(10^8 \frac{\mu N}{p}\right)^{1,16}} + 1 \right] \quad (35)$$

Utilisant les valeurs de f_c trouvées expérimentalement et indiquées par la courbe 1 de la figure 15, nous avons déduit de cette relation les valeurs de f et tracé la courbe 2 (fig. 15).

On peut voir que pour des valeurs voisines de $10^8 \frac{\mu N}{p} = 50$, qui sont des valeurs normales dans les paliers de transmission, le rapport f/f_c atteint 3, ce

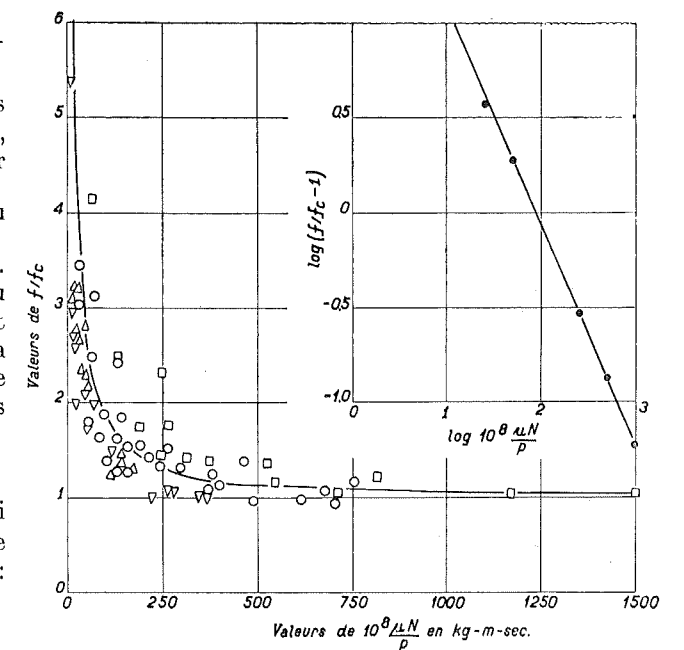


Fig. 17 et 18

qui veut dire que le moment appliqué à l'arbre est égal à trois fois le couple appliqué au coussinet, le seul qui avait été déterminé jusqu'à présent et qui était confondu dans toutes les conclusions émises

par les expérimentateurs qui m'ont précédé, avec le premier.

La conclusion est donc formelle : les déductions tirées de la théorie et des expériences sont concordantes qualitativement tout au moins.

En est-il de même au point de vue quantitatif ? Pour y répondre, force est de connaître avec exactitude le jeu a entre l'arbre et le coussinet.

Nous dirons plus loin un mot de la manière dont nous avons réalisé des jeux parfaitement contrôlés de $\frac{5}{100}$, $\frac{10}{100}$...

Pour le palier qui a servi à tous nos essais de la première période, nous n'avons pu établir ce jeu qu'en faisant exécuter un mandrin présentant des diamètres croissants de $\frac{4}{100}$ et en recherchant le diamètre qui s'appliquait le mieux dans le demi-coussinet inférieur.

Utilisant la diamètre du coussinet ainsi trouvé, nous avons pu déduire le jeu $(R - r) = a$ et partant le jeu relatif $\frac{r}{a}$. Cette valeur étant connue (égale à 170), nous avons pu calculer par la théorie la valeur de f en fonction de $\frac{\mu N}{p}$; les résultats obtenus sont traduits par la courbe tracée en pointillé très voisine comme on peut le voir de la courbe fournie par les expériences, surtout dans la région d'utilisation pour laquelle la coïncidence est complète.

Nous nous proposons de poursuivre ces recherches pour des paliers géométriquement semblables présentant des jeux relatifs plus petits ou plus grands; afin d'être sûr de la valeur de R nous avons fait exécuter des bagues calibrées aux diamètres de 40 5/100, 40 1/10, 40 2/10, 40 3/10 et 40 4/10; ces bagues permettent de régler un mandrin extensible au diamètre voulu et d'effectuer un alésage du coussinet à ce diamètre avec une exactitude mathématique peut-on dire.

Pour pouvoir raccourcir la durée des essais, il importerait toutefois d'opérer avec le dispositif de l'arbre à deux volants mais en utilisant deux paliers lisses aux extrémités, et un dynamomètre de traction placé au milieu, de façon à diminuer l'erreur relative. En doublant le dispositif destiné à mesurer le couple M_c , de manière à l'appliquer à chacun des paliers, on introduirait également un moyen de vérification qui écarterait toute erreur accidentelle. C'est ce que nous sommes occupé à réaliser. En attendant nous donnerons les résultats obtenus avec le palier de 55 cm² de surface portante et un jeu de 0,05 mm. soit un rapport $\frac{r}{a} = 800$.

La figure 19 indique en trait fort la courbe moyenne pour le palier en régime, en trait pointillé la courbe obtenue pour les essais effectués en dehors du régime.

Les points noirs se rapportent aux valeurs trouvées par la méthode de ralentissement et expriment donc les résultats trouvés pour f . On voit que cette fois, les valeurs de f se confondent avec les valeurs de f_c ; elles sembleraient même se trouver systématiquement plus faibles mais ce n'est là évidemment que l'effet du hasard résultant de ce que les points donnés par la méthode de ralentissement sont beaucoup moins nombreux que ceux obtenus par la méthode directe.

Quoi qu'il en soit, l'accord entre la théorie et les faits expérimentaux est encore satisfaisant en ce sens que pour des jeux très faibles, les valeurs de f et de f_c coïncident pratiquement. On ne pourrait dire toutefois qu'il y a concordance satisfaisante entre les courbes théoriques indiquées en traits faibles et la courbe expérimentale moyenne, tout au moins au delà de valeurs de $\frac{\mu N}{p}$ supérieures à 150.10⁻⁸. Pour

les valeurs observées aux très faibles valeurs de $\frac{\mu N}{p}$ il n'y a pas lieu de s'étonner qu'elles soient plus élevées que la théorie ne l'indique, car à partir d'un certain minimum la théorie n'est plus applicable, la rupture du film tendant à se produire.

Bien que nous proposons de revoir cette question, il nous paraît légitime de dire, en attendant, que la concordance entre la théorie et l'expérience, est non seulement satisfaisante mais inespérée dans les limites que nous venons d'indiquer.

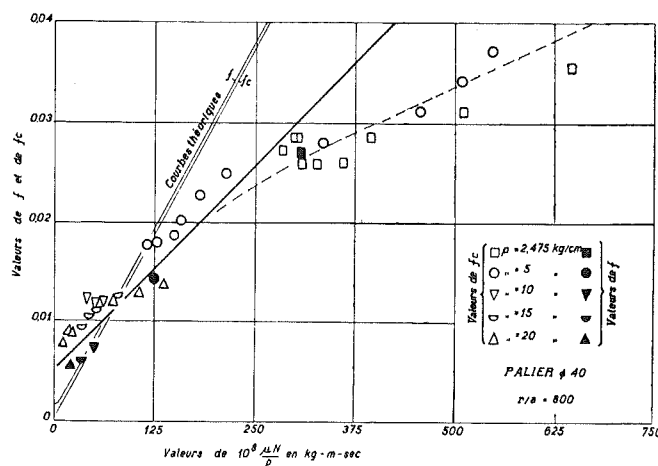


Fig. 19

Des expériences américaines exécutées sur des coussinets très courts, présentant un rapport l/d égal à l'unité environ, nous ont d'ailleurs permis de confirmer ces conclusions.

Ces expériences exécutées par M. S. A. Mc Kee au Laboratoire du Bureau of Standards et publiées dans le numéro de décembre 1927 du *Mechanical Engineering*, ont été effectuées avec un dispositif particulièrement précis, inutilisable malheureusement avec des paliers à graissage par bagues. Elles n'ont fourni comme toutes les expériences connues à ce jour, que la valeur du coefficient de frottement

apparent f_c , mais en portant abscisse $\frac{\mu N}{p} \left(\frac{r}{a}\right)^2$ et $f_c \left(\frac{r}{a}\right)$ en ordonnées nous avons obtenu la courbe 2 (fig. 20) pour le rapport $\frac{r}{a} = 450$, c'est-à-dire une

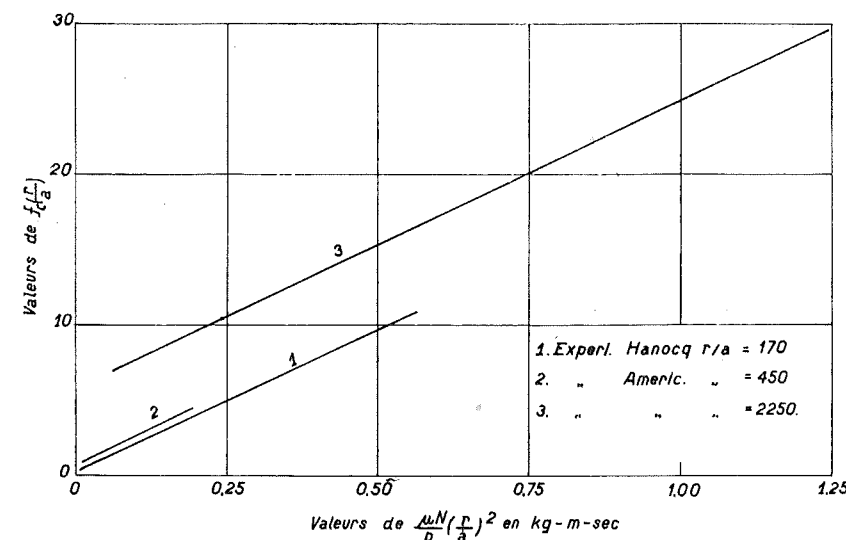


Fig. 20

courbe identique peut-on dire à celle que nous avons trouvée pour $\frac{r}{a} = 170$ (courbe 1).

Pour le jeu extrêmement réduit, moins de 0,02 mm. sur un diamètre de 40 mm. qui conduit à un rapport $\frac{r}{a} = 2250$, la courbe obtenue par les expérimentateurs américains est par contre beaucoup plus élevée et paraît lui être parallèle.

Il semblerait d'après cela que, dès que les jeux deviennent très faibles, le coefficient de frottement observé est égal au coefficient théorique augmenté d'une quantité constante qui va croissant rapidement à mesure que le jeu relatif diminue, comme si au phénomène du frottement fluide venait se superposer un phénomène analogue au frottement sec.

Ces expériences méritent d'être reprises de façon à élucider ce dernier point.

Je pourrais en tout cas conclure dès maintenant que dans les limites d'utilisation des paliers de transmission, avec les jeux couramment employés, les valeurs fournies par la théorie peuvent être regardées comme remarquablement exactes et qu'elles ne nécessitent l'introduction d'aucun coefficient de correction.

Il faut d'ailleurs noter que dans une telle étude, il serait vain de vouloir pousser les recherches trop loin au point de vue de la vérification de la théorie : on peut même dire qu'au delà d'une certaine approximation, celle-ci perd toute signification, comme c'est le cas d'ailleurs dans toutes les questions techniques que nous envisageons. Nous parlons de température du palier et nous entendons par là la température du bain d'huile parce qu'ainsi définie

elle est facile à établir, mais il est évident que ce qui intéresse la théorie, c'est la température du film d'huile, et celle-ci varie en chaque point, si l'on veut pousser très loin l'exactitude.

En introduisant dans la théorie une valeur de μ , on suppose donc une valeur moyenne qui peut être différente de la valeur établie en tablant pour le calcul sur la valeur de la température du bain d'huile.

Lorsque nous parlons de jeu, nous supposons un arbre absolument cylindrique et parfaitement rigide dans un coussinet rigoureusement cylindrique, toutes conditions qui ne peuvent être qu'imparfaitement réalisées.

Comme aucune recherche de cette nature ne peut présenter d'intérêt philosophique ni contribuer à l'avancement des sciences pures, il est légitime de dire qu'il n'y a aucune raison de pousser ces recherches au delà de l'approximation que nous avons adoptée, et en se plaçant au point de vue technique de conclure que les valeurs fournies par la théorie, complétée comme nous l'avons

fail, dépassent en approximation tout ce qui est nécessaire pour la pratique.

Cette conclusion, je le sais, écarte bien des considérations émises au sujet de l'onctuosité et de quelques propriétés extraordinaires, mystérieuses même, de certaines huiles; je ne la maintiens pas moins, en me hâtant toutefois d'ajouter que cette conclusion ne vaut avec certitude que pour les paliers lisses à graissage abondant dans lesquels la couche d'huile atteint normalement 1/100 de mm. et plus.

Lorsqu'il s'agit d'organes de machines comme les cercles de piston frottant dans un cylindre par l'intermédiaire d'une couche d'huile dont l'épaisseur est de l'ordre du micron vraisemblablement, cette conclusion n'est certainement pas valable : les essais que j'ai entrepris en vue d'élucider cette question et qui ne sont qu'à leur début, ont montré d'une façon assez nette en tout cas que les lois du frottement lorsque le film d'huile ne peut se former, sont nettement distinctes de celles énoncées plus haut.

Les expériences sur les paliers lisses montrent d'ailleurs qu'il existe une valeur de $\frac{\mu N}{p}$ critique à partir de laquelle le coefficient de frottement grandit rapidement et suivant une loi absolument distincte. Cette constatation est particulièrement visible sur la figure 21 qui donne les résultats obtenus par Stribeck sur un palier de 70 mm. de diamètre, résultats que nous avons mis en diagramme en employant comme variable indépendante $\frac{\mu N}{p}$.

On peut remarquer que les points sont assez épars à partir du minimum, dans la région montante et il n'est pas vraisemblable que ces points se groupent sur une droite en fonction de $\frac{\mu N}{p}$. Ce qu'on peut dire

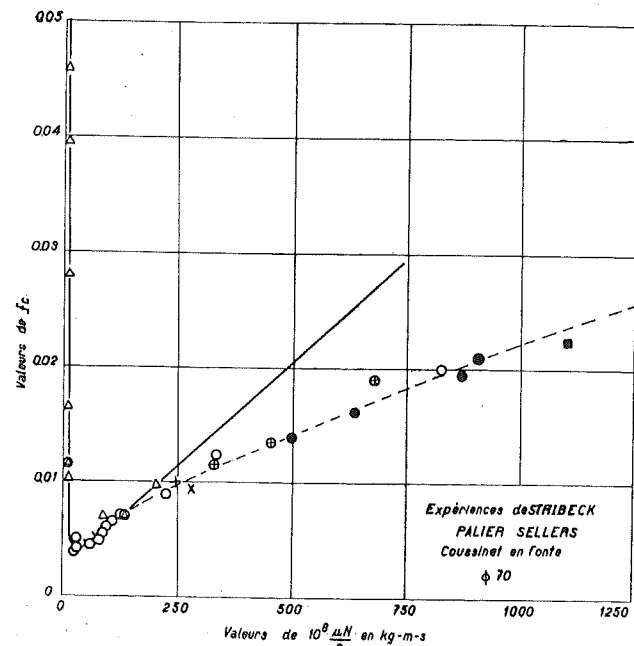


Fig. 21

c'est que la limite vers laquelle tend ce coefficient, est la valeur admise pour le frottement sec.

La conclusion au point de vue du graissage des paliers doit donc être celle-ci : qu'il convient à tout prix de s'écartier sensiblement de cette valeur critique qui paraît se présenter pour des valeurs de $10^8 \frac{\mu N}{p} \left(\frac{r}{a}\right)^2$ égales à environ 0,005.

Nous montrerons au surplus en conclusion, qu'il existe pour des conditions définies de fonctionnement, un rapport $\frac{l}{d}$ plus favorable et une valeur $\left(\frac{r}{a}\right)$ qu'il convient d'adopter pour une valeur normale de $\frac{\mu N}{p}$.

Pour le moment, je voudrais attirer l'attention sur le problème technique important qui reste à traiter : celui de la détermination de la température de régime pour des conditions déterminées de fonctionnement.

CHAPITRE VI

Etude de la température de régime

La solution de ce problème suppose la connaissance de la loi de rayonnement du palier.

Le phénomène est extrêmement complexe car la quantité de chaleur dissipée par le palier dépend de l'état d'agitation de l'atmosphère aux environs de celui-ci, et dans une certaine mesure de la conductibilité du support sur lequel il est posé.

Il est inutile de dire que les tentatives faites en vue de rechercher la quantité de chaleur dissipée par la masse du palier isolé de son arbre, au moyen de la mesure de la quantité de chaleur apportée au centre du coussinet, n'ont pas donné de résultats valables, les conditions de production de la chaleur et de sa circulation à travers la masse étant profondément modifiées par l'absence de l'arbre.

En fait, si le coefficient de frottement vrai est connu, la détermination de la quantité de chaleur produite par seconde est facile à évaluer puisqu'elle est égale à :

$$APfv.$$

v désignation dans ce qui va suivre la vitesse périphérique de l'arbre.

Dès lors il est aisé de fixer la loi de rayonnement en portant en abscisse la différence entre la température t_r du bain d'huile et la température ambiante t_a , et en ordonnée le produit

$$pfv$$

donnant à un coefficient près la quantité de chaleur rayonnée par seconde par cm^2 de surface du coussinet.

La figure 22 indique les valeurs obtenues par les différentes expériences effectuées sur le palier de 40 mm. avec le rapport $\frac{r}{a} = 170$, soumis aux différentes charges utilisées au cours des essais, et pour les différentes vitesses employées.

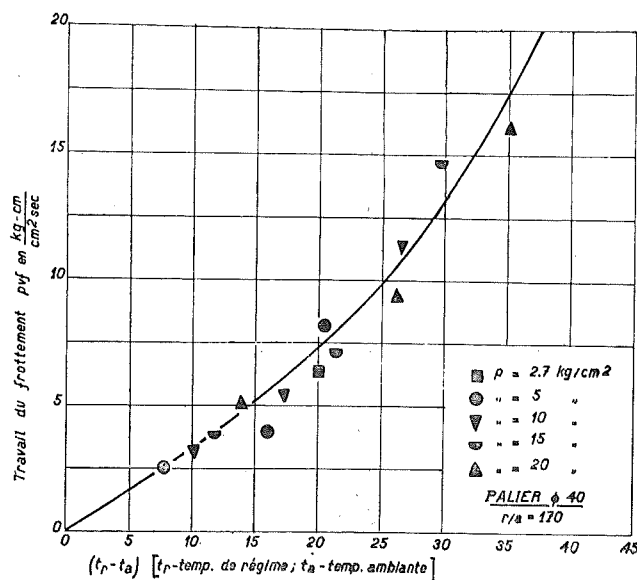


Fig. 22

Comme on le voit, tous les points se groupent d'une façon satisfaisante sur une courbe unique, d'allure parabolique. Il conviendrait évidemment pour généraliser, de s'assurer que la courbe reste la même pour des paliers géométriquement semblables.

Nous nous proposons de poursuivre cette recherche en employant des paliers de 60 et de 80 mm. de

diamètre, puis en opérant sur des paliers de 40 mm. de différents types.

En attendant, nous pouvons faire comprendre combien la question est délicate et combien il serait vain de vouloir rechercher une loi vraie au delà d'une approximation relativement grossière, en relatant les faits suivants que nous avons pu observer au cours des essais :

1° En traçant une courbe analogue pour des paliers de 40 du même type mais présentant des jeux différents, nous avons trouvé une courbe unique sensiblement au-dessus de la courbe que nous venons d'indiquer. Cette remarque qui nous avait intrigué et dérouté tout d'abord, trouve son explication dans le fait que le métal blanc adhérait moins parfaitement dans le premier palier essayé, et était sur une bonne partie de son étendue séparé de la masse du palier par une pellicule d'huile perceptible.

2° En expérimentant sur les paliers à billes par la méthode des 4 paliers, nous avons pu observer que les paliers appliqués à la chaise pendante servant à la traction, se maintenaient à une température de régime supérieure de 1 1/2 à 2° environ rien que parce que ces paliers étaient isolés de la masse de la chaise par une planchette en bois de 4 mm. d'épaisseur.

3° En traçant la courbe de la chaleur dissipée par les paliers à billes par cm^2 de surface extérieure et en la comparant à la courbe obtenue pour le palier de 40 dans les mêmes conditions (c'est-à-dire par cm^2 de surface extérieure) nous avons dû constater que les paliers à billes rayonnent sensiblement davantage par cm^2 que le palier lisse, ce qui peut s'expliquer si l'on fait cette remarque que toute la quantité de chaleur produite par frottement le long de l'arbre dans le palier lisse, ne peut atteindre la surface extérieure qu'en traversant la couche d'huile, alors que dans le palier à billes cette quantité de chaleur produite sur le chemin de roulement interne, peut passer à l'extérieur en traversant les billes dont le contact est peut-on dire direct, la couche d'huile à cet endroit n'ayant qu'une épaisseur pratiquement nulle.

Ces quelques observations suffisent pensons-nous à renforcer cette idée, qu'il serait vain de poursuivre l'étude présente au delà d'une certaine approximation; elles appellent aussi cette remarque qu'une huile peut déterminer une température de régime plus basse sans pour cela donner lieu à un coefficient de frottement plus faible, toutes choses égales, et cela parce que cette huile jouirait d'une conductibilité plus grande.

Avant de clore ce chapitre nous voudrions faire observer que la valeur de la quantité de chaleur dissipée par cm^2 a été sous-évaluée par les expérimentateurs antérieurs du fait qu'ils confondaient la valeur de f_c avec celle de f . Si en effet, nous portons pvf_c en ordonnée au lieu de pvf , nous obtenons par les expériences sur le palier de 40, les points épars de la figure 23. Ces points ne peuvent évidemment se grouper sur une courbe unique puisque pvf_c ne

représente pas la quantité de chaleur produite, et que partant il n'y a aucune relation entre les valeurs portées en ordonnées et les valeurs portées en abscisses.

Nous avons tracé en pointillé la courbe donnée par Lasche pour un palier analogue à celui que nous avons

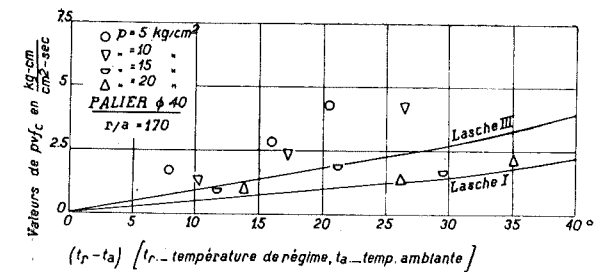


Fig. 23

expérimenté et qui passe sensiblement au milieu des points observés, constatation naturelle puisque Lasche employait pour l'évaluation de la quantité de chaleur pvf_c confondant f avec f_c .

Conclusions

Nous voudrions conclure des essais dont nous venons de rendre compte qu'un grand pas a été fait dans la connaissance du coefficient de frottement vrai pour les paliers lisses et dans l'établissement des lois de rayonnement en fonction de la différence de température entre le bain d'huile et la température ambiante.

A) Pour ce qui concerne la valeur de f nous pouvons dire qu'on peut se fier à la valeur fournie par la théorie sans l'introduction d'aucun coefficient de correction et avec une approximation qui dépasse les besoins de la pratique.

Lorsque les jeux sont très faibles, inférieurs à $\frac{a}{r} = \frac{1}{800}$ pour fixer les idées, le coefficient de frottement paraît augmenter d'une quantité constante, variable avec le rapport $\frac{a}{r}$, mais suivant une loi que nous ne pourrions formuler dans l'état actuel de nos connaissances.

Comme la formule théorique est d'un emploi peu commode, nous proposons de lui substituer la relation suivante :

$$f_c = 0,3 \frac{a}{r} + 18,5 \frac{\mu N}{p} \frac{r}{a} \quad (36)$$

qui donne des valeurs on peut dire identiques à celles de la théorie.

Connaissant f_c nous pourrions déduire la valeur de f de la formule (35) empirique établie expérimentalement pour le palier de 40 avec un rapport $\frac{r}{a} = 170$,

et transformée en admettant que la constante 178, qui figure au numérateur, varie proportionnellement à $\frac{a}{r}$

$$f/c = \frac{30250 a/r}{\left(10^8 \frac{\mu N}{p}\right)^{1,16}} + 1 \quad (37)$$

Cette relation conduit à la valeur :

$$f = 0,3 \frac{a}{r} + 0,185 \cdot 10^{-6} \left(10^8 \frac{\mu N}{p}\right) \frac{r}{a} + 9,075 \cdot 10^3 \left(10^8 \frac{\mu N}{p}\right)^{-1,16} + 0,56 \cdot 10^{-2} \left(10^8 \frac{\mu N}{p}\right)^{-0,16} \quad (38)$$

Il est possible de déduire de cette formule la valeur de $\frac{a}{r} = x$ la plus favorable en fonction de $10^8 \frac{\mu N}{p}$ que nous désignerons par m .

En égalant à 0 la dérivée par rapport à x de la fonction, nous obtiendrons l'équation :

$$x^3 - \frac{1,62 \times 10^6}{m} x - \frac{9,81 \times 10^{10}}{m^{2,16}} = 0 \quad (39)$$

Cette équation donne pour $m = 50$ qui représente une valeur normale dans les paliers de transmission, $x = 316$.

D'après ce chiffre, le jeu le plus favorable pour le palier de 40 serait de 13/100 sur le diamètre. Cela correspond assez bien à ce qui est admis dans une construction très soignée.

B) Pour ce qui concerne la loi de rayonnement nous proposons d'adopter provisoirement pour la quantité de chaleur rayonnée par cm^2 de surface du coussinet exprimée en kg/cm. par sec. , la relation :

$$pof = 1/3 (t_r - t_a) + 4 \cdot 10^{-6} (t_r - t_a)^4 \quad (40)$$

Cette relation traduit la loi observée pour le palier de 40 mm, avec $\frac{r}{a} = 170$ plus particulièrement étudié.

Les valeurs numériques des coefficients de la formule doivent être considérées comme valables pour tous les paliers géométriquement semblables, jusqu'à plus ample expérimentation, lorsque ces paliers sont pourvus d'un graissage par bague fixe avec circulation dans le couvercle. Ces valeurs représentent vraisemblablement une limite car dans les paliers d'autres types la circulation est moins active et la masse rayonnante proportionnellement moins importante.

Nous n'avons pas cherché à donner une forme rationnelle à la fonction; nous nous sommes borné à établir les coefficients et l'exposant du second terme qu'il convenait d'adopter pour obtenir une coïncidence aussi rigoureuse que possible avec la courbe moyenne tracée figure 21 en vue de tenir compte de tous les points observés.

Nous pouvons ajouter que l'exposant 4 conduit à une coïncidence rigoureuse sur toute l'étendue de la courbe.

Il ne saurait être question d'autre part, car nous avons examiné la question, de substituer au second

terme, une différence des 4^{es} puissances des températures absolues T_r et T_a , même en ajoutant un terme pour tenir compte de la convection dépendant de $(t_r - t_a)^{1,23}$. La courbe expérimentale monte plus rapidement que ne l'indiquerait une formule contenant un terme $(T_r^4 - T_a^4)$, cela est certain, et cela se vérifie également pour le palier à billes qui donne, soit dit à nouveau, une quantité de chaleur rayonnée par cm^2 de surface extérieure beaucoup plus considérable que le palier lisse, autre fait certain quelle qu'en soit l'explication.

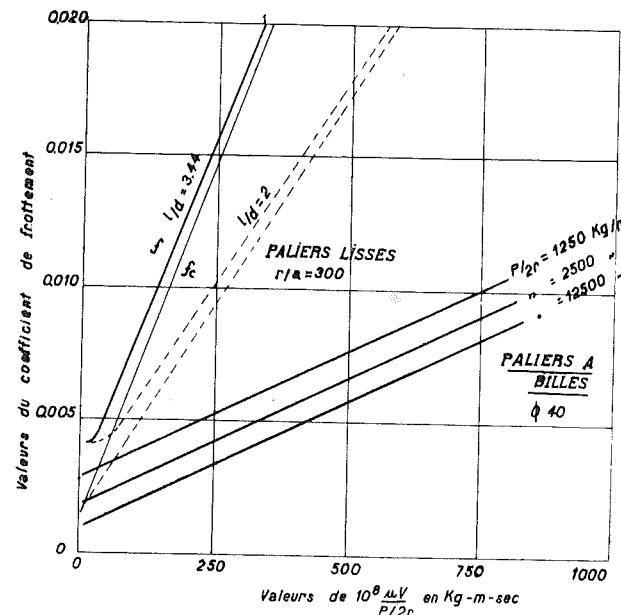


Fig. 24

C) Il nous reste à établir une comparaison au point de vue du coefficient de frottement, entre les paliers lisses et les paliers à billes.

Dans ce but nous avons porté en abscisse le coefficient $\frac{\mu V}{P/2r}$ et en ordonnée les valeurs de f pour le palier à billes de 40 mm, expérimenté (fig. 24). Nous avons obtenu le faisceau des droites parallèles en trait fort, l'ordonnée à l'origine dépendant de $P/2r$ d'après la formule (8) :

$$f = k \left(1 + \frac{P_0/2r}{P/2r}\right) + \left(K n \frac{\rho \rho}{r e}\right) \frac{\mu V}{P/2r} \quad (41)$$

Pour ce qui concerne le palier lisse nous avons vu que f pouvait se mettre sous la forme d'une fonction de $\frac{\mu N}{p}$. Or si nous désignons par P la charge supportée par le palier, nous pouvons écrire :

$$\frac{\mu N}{p} = \frac{1}{\pi} \frac{\mu V}{P/2r} \left(\frac{l}{d}\right) \quad (42)$$

d étant mis pour $2r$.

Ainsi la courbe des valeurs de f dépend du rapport l/d , du moment où l'on prend pour abscisse $\frac{\mu V}{P/2r}$

Nous avons donc été amené pour faire la comparaison, à fournir les courbes de notre palier d'essai dont le rapport $l/d = 3,44$ et celles se rapportant au palier normal correspondant au rapport $l/d = 2$. Nous avons toutefois pris pour courbes de comparaison celles qui seraient obtenues

avec le rapport $\frac{r}{a}$ le plus favorable calculé plus haut, c'est-à-dire 300 en chiffres ronds. Cela conduit à des chiffres plus favorables dans la région des faibles valeurs de $\frac{\mu V}{P/2r}$ (inférieures à 40 ou 50), mais cela donne des valeurs plus élevées que celles observées pour les valeurs $\frac{\mu V}{P/2r}$ de 100 et plus.

Les courbes en trait faible se rapportent aux valeurs de f_c .

Comme on peut le voir, les valeurs de f pour les roulements à billes sont toujours plus faibles pour une même abscisse que celles fournies par les paliers lisses dans les conditions les plus favorables, pour autant, bien entendu, que l'on envisage des paliers à billes sans feutres de protection.

Pour les valeurs de $10^8 \frac{\mu V}{P/2r}$ égales ou inférieures à 40 qui sont normales dans les paliers de transmission, la différence est toutefois assez faible, surtout avec des paliers peu chargés. Dans les limites d'utilisation pratique, nous pourrions dire que le palier à billes conduit normalement à des valeurs du coefficient de frottement égales à la moitié de celles observées dans les mêmes conditions pour un palier lisse.

Il ne me paraît pas utile pour le moment de pousser plus loin la comparaison et je voudrais m'en tenir à ces conclusions.

Il ne me reste pour terminer, qu'à remercier mes collaborateurs de l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée au cours de ces dernières années; ces remerciements vont plus particulièrement à mes assistants M. Demars et M. Kestlicher qui m'ont prêté un concours dévoué, le premier pour la réalisation des expériences, le second pour la mise au point de la théorie et le groupement en diagrammes des résultats.

Une telle recherche ne peut être conduite à bien que par un travail en équipe bien orienté et poursuivi avec persévérance pendant plusieurs années.

BULLETIN

LES TENDANCES ACTUELLES DANS LA CONSTRUCTION DES SUPERCENTRALES ELECTRIQUES

(SUITE ET FIN)

par L. LE PAIGE,

Ingénieur (A. I. Lg.) Chef de service à la Société Financière de Transports et d'Entreprises Industrielles

VIII. — Les tuyauteries

L'exécution des tuyauteries et de la robinetterie constitue un des problèmes les plus difficiles qu'a fait surgir l'emploi de pressions et de températures élevées. Pour résister aux pressions internes, il faut adopter des épaisseurs de parois renforcées. Ceci réduit la souplesse des tuyauteries, alors que d'autre part leurs déformations augmentent avec la température. De plus, le métal qui doit résister aux tensions résultant des pressions internes et des déformations, perd une grande partie de sa résistance dès que l'on dépasse 300° C.

A 450° C. l'acier S. M. doux avec lequel on lamine les tuyaux, n'a plus qu'une limite d'écoulement (Streckgrenze) de 6 kg/mm^2 environ.

En outre, on a constaté que les métaux soumis aux températures élevées à une charge dépassant une cer-

taine limite continuent à se déformer, à « couler » très lentement, jusqu'à ce que la rupture se produise, après un temps de sollicitation parfois très long. Les Anglo-Saxons, appellent ce phénomène le « Creep ». Il y a lieu d'éviter que tout organe, sollicité mécaniquement, le soit au-dessus de la « creep limit » correspondant à la température de service. Ceci concerne les éléments de turbines, de chaudières, surchauffeurs et tuyauteries. Mellamy et Kerr ont publié à ce sujet une étude très intéressante (*Engineering*, 28 janvier 1927).

Les usines « Crane » et d'autres expérimentateurs, ont étudié systématiquement les déformations lentes des métaux à haute température. Mais le sujet n'est pas épuisé.

Quoi qu'il en soit, on calcule les tuyauteries des installations modernes avec un coefficient de sécurité de deux au moins, par rapport à la « limite d'écou-



f

REVUE UNIVERSELLE
DES
MINES, DE LA MÉTALLURGIE
= DES TRAVAUX PUBLICS =

DES SCIENCES ET DES ARTS APPLIQUÉS A L'INDUSTRIE

paraissant le 1^{er} et le 15 de chaque mois

ANNUAIRE DE L'ASSOCIATION DES INGÉNIEURS SORTIS DE L'ÉCOLE DE LIÈGE (A.I.L.G.)
publié sous la direction du Comité Scientifique de l'A.I.L.G.

ACIÉRIES RÉUNIES DE BURBACH--EICH--DUDELANGE
USINES DE DOMMELDANGE (G^D-DUCHÉ DE LUXEMBOURG)

ACIER A HAUTE TENEUR EN
MANGANÈSE

« MANAX »

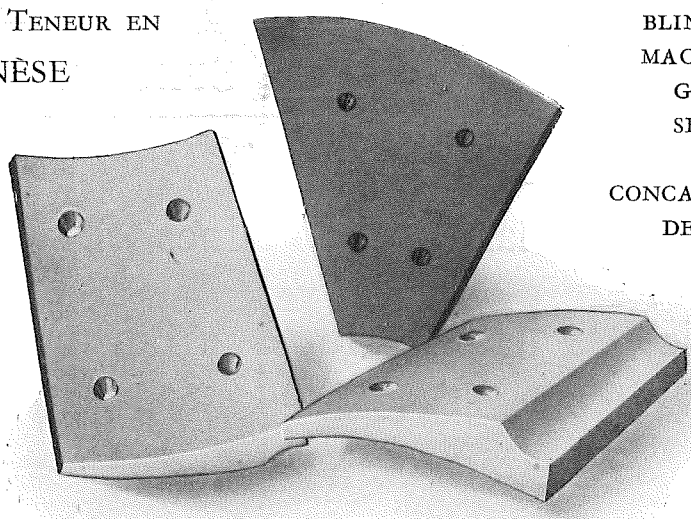
POUR

PIÈCES

D'USURE

EN

PIÈCES COULÉES
OU LAMINÉES



BLINDAGES POUR TUBES
MACHOIRES - MARTEAUX
GRILLES-BANDAGES
SEGMENTS DENTÉS

POUR

CONCASSEURS ET BROYEURS
DE TOUTES MARQUES

—
CROISEMENTS
DE VOIES

—
TÔLES PERFORÉES
POUR
CRIBLES ET TROMMELS

TÔLES D'USURE
BRUTES OU FAÇONNÉES

FABRICATION AU FOUR ÉLECTRIQUE

LA BELGO-LUXEMBOURGEOISE S. A.

9, QUAI DU COMMERCE

BRUXELLES

TÉL. : 180.76

18

414 R 24

SOMMAIRE : *Mémoires* : HACHA, L., La fabrication des rails en acier Thomas, p. 161. — HANOCQ, Ch., Les recherches expérimentales du Laboratoire de Construction des Machines sur le "Frottement fluide" (*suite et fin*), p. 166. — *Bulletins* : LE PAIGE, L., Les tendances actuelles dans la construction des Supercentrales électriques (*suite et fin*), p. 173. — MOULTROP, I. E., Les enseignements de la Centrale Edgar, p. 183. — *Revue des Périodiques techniques*, p. 188 à 192. — (*Voir sommaire détaillé page 192*). — *Répertoire des annonces*, pp. A. C. D. (du premier carnet).

DÉPOSITAIRE POUR LA FRANCE ET SES COLONIES
LIBRAIRIE H. LE SOUDIER
174-176, BOULEVARD SAINT-GERMAIN
PARIS (6^e)



RÉDACTION ET ADMINISTRATION
16, QUAI DES ÉTATS-UNIS, 16, LIÈGE
TELEPHONE : 1770
COMPTE CHÈQUE-POSTAL N^o 24.620