

## ÉTUDE DU FROTTEMENT EN RÉGIME HYDRODYNAMIQUE ET EN RÉGIME ONCTUEUX

par le LABORATOIRE D'ÉLÉMENTS DE MACHINES

Professeur : Ch. HANOCQ  
Chef de Travaux : L. LELOUP

**Résumé.** — Les recherches entreprises par le Laboratoire d'Éléments de Machines avec l'aide du Fonds du Centenaire ont pour objectif essentiel la détermination de la loi de dissipation de la chaleur produite par le frottement dans les paliers à refroidissement naturel, loi dont la connaissance est indispensable pour résoudre le seul et vrai problème technique qui se pose : la détermination de la température de régime en fonction des données.

Dans une première partie de l'exposé, il est rendu compte de la façon dont a été abordée l'étude de ce problème, actuellement achevée pour les arbres de 40 mm de diamètre. Plusieurs mois seront encore nécessaires pour répéter les expériences avec différents autres diamètres et arriver à une solution qui, bien qu'approchée, se montrera suffisante pour les besoins de la pratique.

Dans une seconde partie, le Laboratoire expose les résultats de quatre recherches importantes, entreprises à la demande de l'industrie et menées à bien grâce particulièrement au matériel expérimental créé pour la recherche précitée ; elles sont toutes d'actualité, ayant porté soit sur un lubrifiant, soit sur des matériaux de remplacement. Elles permettent de se faire une idée assez précise du haut degré de connaissance que les recherches expérimentales effectuées à l'Université de Liège dans les quinze dernières années ont permis d'acquérir dans le domaine du graissage.

Ce n'est guère qu'après le transfert des installations dans les nouveaux locaux du Val-Benoît fin 1940, que la possibilité d'utiliser le crédit qui avait été mis à notre disposition par le Fonds du Centenaire pour l'étude des paliers s'est présentée.

Ce problème d'importance au point de vue mécanique, dont l'étude fut commencée il y a une quinzaine d'années et poursuivie de façon continue tant sous son aspect théorique que sous son aspect expérimental, n'avait pu recevoir jusqu'à présent une solution complète. Plusieurs articles parus dans la *Revue Universelle des Mines* ont fait connaître l'état de ces recherches.

Une synthèse très satisfaisante, tenant compte de l'ensemble des résultats établis non seulement en partant des résultats fournis par le Laboratoire d'Éléments de Machines, mais par les principaux laboratoires du monde, anglais et américains notamment, a paru dans les *Annales du Congrès de Méca-*

*nique* de 1930, puis dans les *Publications de la Société belge des Mécaniciens* de 1941 (1).

Nous ne pourrions que rappeler ici l'ultime conclusion pour ce qui regarde le régime hydrodynamique en disant que le coefficient de frottement se présente comme une fonction

$$f \cdot \left(\frac{r}{a}\right) = \varphi \left[ \frac{\mu N}{p} \left(\frac{r}{a}\right)^2 \right]$$

$\mu$ , étant le coefficient de viscosité absolu de l'huile utilisée à la température de régime du palier.

$N$ , le nombre de tours par unité de temps.

$p$ , la pression spécifique définie comme le rapport :

$$p = \frac{P}{l \times d}$$

$r$ , le rayon de l'arbre.

$a$ , le jeu radial.

La figure 1 donne la loi de variation de  $f \cdot \left(\frac{r}{a}\right)$  en fonction de  $\frac{\mu N}{p} \left(\frac{r}{a}\right)^2$ , exprimé dans les unités kg-m-sec.

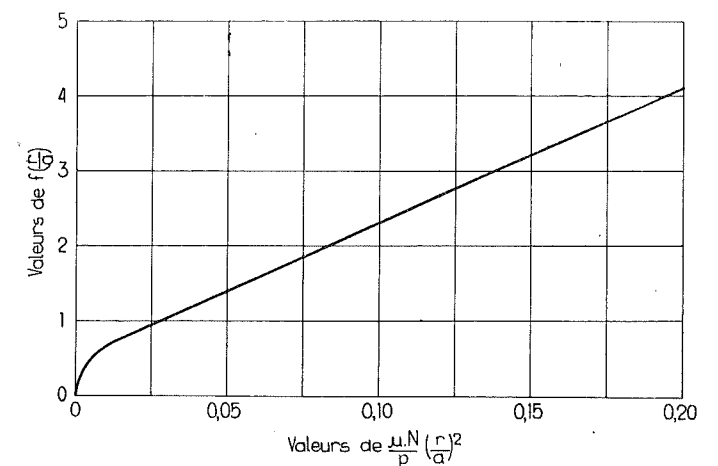


Fig. 1. — Loi de variation du coefficient de frottement vrai  $f$ .

Ces valeurs sont correctes pour tous les paliers dont le rapport  $l/d$  est supérieur à 0,8 pour fixer

(1) Etat actuel de nos connaissances sur le frottement fluide et sur le calcul des paliers de transmission, Ch. Hanocq, Congrès International de Mécanique générale, Août 1930, volume 1.

Le graissage en régime hydrodynamique, Commission des Paliers. Rapporteur : Ch. Hanocq, *Standards*, n° 4, 1941.

les idées et pour tous les jeux relatifs supérieurs à :

$$\frac{a}{r} = \frac{1}{500}$$

Pour des jeux plus faibles, le coefficient de frottement croît d'une quantité  $\Delta f$  constante donnée par la relation :

$$\Delta f = 2,66 \cdot 10^{-13} \left(\frac{r}{a}\right)^3$$

La courbe du coefficient de frottement en fonction de la variable indépendante passe toutefois par un minimum à partir duquel le régime hydrodynamique cesse d'exister; la connaissance de ce point est, on le conçoit, de la plus haute importance et nous indiquerons plus loin les conclusions auxquelles nous sommes arrivés à ce sujet.

La connaissance du coefficient de frottement réalisé dans un palier dont on se donne les dimensions  $l$  et  $d$ , la charge  $P$ , le nombre de tours  $N$  et la courbe de viscosité  $\mu$ , de l'huile employée, détermine en fin de compte la valeur de la quantité de chaleur

$$A P f v$$

produite par seconde par l'action de la force tangentielle de frottement. Or, ce qui importe pour le constructeur, c'est moins la valeur de cette perte que son influence sur la température de régime que va prendre le palier : c'est qu'en effet, de cette température de régime  $t_r$ , va dépendre la sécurité de fonctionnement de celui-ci.

Pour déterminer cette température de régime, il est nécessaire de connaître la loi de dissipation de la chaleur par le palier en fonction de la différence de température

$$t_r - t_a$$

( $t_r$  : température de l'huile dans le palier —  $t_a$  : température de l'air ambiant).

Une telle recherche s'avère donc pour l'étude du palier à refroidissement naturel, de la même importance que celle consacrée à la détermination du coefficient de frottement, qui a mobilisé les plus grands mathématiciens, les plus grandes firmes et les plus importants laboratoires depuis un demi-siècle.

Naturellement cette recherche de la loi de dissipation de la chaleur ne saurait comporter une étude théorique aussi satisfaisante que celle du frottement en régime hydrodynamique et, au point de vue expérimental, on se rend compte a priori, non seulement des difficultés rencontrées qui sont grandes, mais aussi de l'impossibilité d'aboutir à des conclusions aussi nettes, étant donné que de toute façon, les formes extérieures ne sont pas indifférentes et qu'en rapportant la quantité de chaleur produite à la surface projetée du coussinet,

$$A p f v$$

on ne doit pas s'attendre à trouver une quantité indépendante d'une façon absolue du type de palier.

Nous croyons avoir fait comprendre par cette courte introduction pourquoi, à l'heure actuelle encore, la question n'a pas reçu de solution générale satisfaisante au point de vue scientifique. Nous ajouterons que la confusion qui s'était introduite dans certaines études effectuées en grand, dans l'évaluation de la chaleur produite par le frottement, en confondant le coefficient de frottement vrai  $f$  évalué par la méthode de ralentissement et le coefficient de frottement apparent  $f_c$  que l'on mesure plus aisément en évaluant expérimentalement le couple au coussinet, a eu vraisemblablement pour conséquence de retarder la solution qui doit être donnée à cette question.

Disons que la recherche poursuivie grâce à l'appui du Fonds du Centenaire est en bonne voie, ainsi que nous allons le faire ressortir, mais que pour pouvoir donner une solution générale, il est nécessaire que nous disposions de plusieurs mois encore pour répéter, avec différents diamètres d'arbres et avec différents types de paliers, ce qui a été fait avec l'arbre de 40 mm.

## PREMIÈRE PARTIE

### RECHERCHE DE LA LOI DE DISSIPATION DE LA CHALEUR

Nous avons eu l'occasion au cours des essais effectués pendant les années 1927, 1928 et 1929 de tracer la courbe de  $p f v$  en fonction de  $(t_r - t_a)$  et de montrer que la fonction représentant cette quantité comportait deux termes, l'un proportionnel à la différence  $(t_r - t_a)$ , l'autre paraissant croître comme la quatrième puissance de cette différence.

La difficulté d'opérer avec les moyens dont nous disposions alors, c'est que tout repose sur la détermination de la température exacte de régime, puisque tant que l'on n'a pas atteint ce régime, une partie de la chaleur produite n'est pas dissipée mais absorbée par la capacité calorifique du palier lui-même. C'est ainsi que nous avons été conduits à concevoir une chambre isothermique dans laquelle le palier en observation était logé, l'arbre étant commandé directement à l'extérieur par un volant permettant de déterminer directement par la méthode de ralentissement, la valeur du coefficient de frottement  $f$  à l'arbre (figures 2 et 3).

Les essais repris avec cet outillage perfectionné, sur le palier antérieurement essayé, ont confirmé de façon satisfaisante les résultats antérieurs, le second terme de la formule paraissant toutefois un peu plus faible.

Les essais poursuivis avec le même type de palier, mais avec une portée de coussinet moitié moindre — ce qui avait pour conséquence de doubler, pour la même charge totale, la pression spécifique  $p$  —

ont montré l'importance du rôle joué par les surfaces extérieures du palier.

La loi donnant  $p f v$  en fonction de  $(t_r - t_a)$  ne pourrait donc être la même pour tous les types de paliers, ce qui était évident a priori; le problème de chiffrer cette différence reste on le conçoit, à la

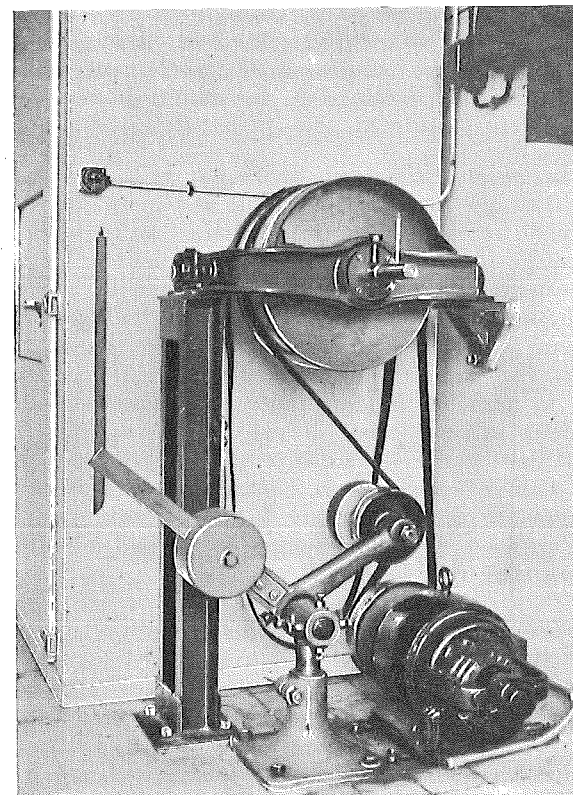


Fig. 2. — Vues d'ensemble de la chambre isothermique et de la commande extérieure.

fois important et difficile. La difficulté d'opérer une synthèse assez large est encore accrue du fait que le passage de la chaleur à l'arbre et au coussinet

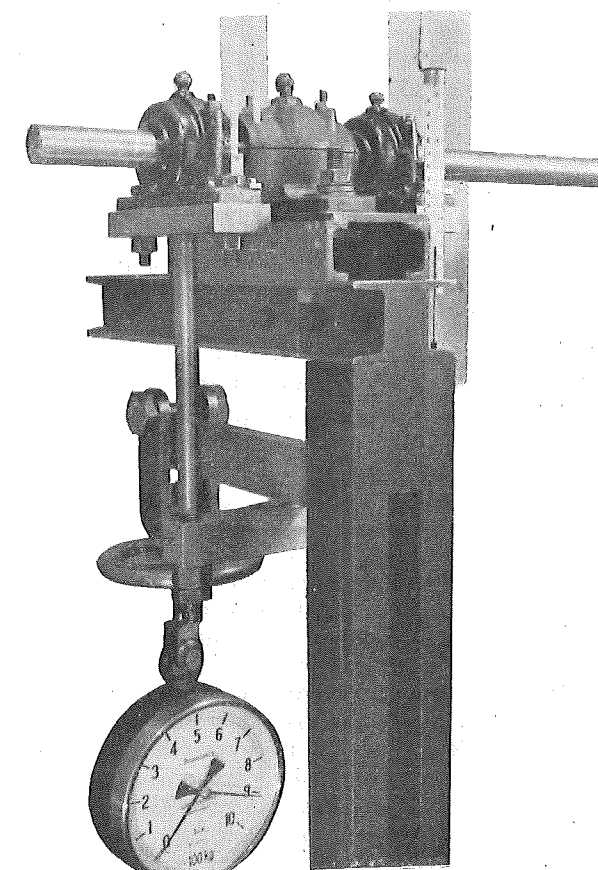


Fig. 3. — Intérieur de la chambre isothermique. Le palier et son dispositif de mise en charge.

se fait à travers une couche d'huile dont l'épaisseur est variable.

On peut concevoir finalement que la différence de température est fonction, si l'on rapporte la quantité de chaleur produite à la surface portante :

- 1<sup>o</sup> de l'épaisseur et de la conductibilité de la couche d'huile;
- 2<sup>o</sup> de la conductibilité du coussinet;
- 3<sup>o</sup> de l'étendue des contacts entre le coussinet et le palier proprement dit rapportée à la surface portante du coussinet;
- 4<sup>o</sup> de la surface extérieure du palier rapportée également à la surface portante du coussinet;
- 5<sup>o</sup> du mode de circulation de l'huile qui en enlevant directement des calories au coussinet égalise la température à l'intérieur et fait que la valeur de la température dans la couche d'huile se rapproche en régime, de la température du bain d'huile  $t_r$ , que nous désignons par convention, comme étant la température moyenne du palier.

On voit par cet exposé que le problème est complexe et ne saurait recevoir qu'une solution approchée mais qui apparaîtra, nous en sommes convaincus, suffisante pour les besoins de la pratique. Pour arriver toutefois à des conclusions scientifiquement établies, il faut opérer avec beaucoup de méthode et en utilisant une série, judicieusement choisie, de paliers de formes différentes.

## SECONDE PARTIE

Le programme que nous venons de justifier et qui est en bonne voie de réalisation, a dû partiellement être interrompu pour répondre à plusieurs demandes qui nous étaient faites par l'industrie. C'est ainsi que nous avons étudié avec le matériel expérimental créé et mis au point par les recherches antérieures, les questions suivantes :

- Possibilité d'utilisation d'une solution colloïdale à très faible viscosité comme lubrifiant de remplacement.
- Comparaison entre le bronze et le Zamak au point de vue de leur utilisation comme coussinets.
- Comparaison entre le métal blanc type « Etat Belge » et un métal de remplacement (phitium).
- Comparaison entre le bronze et un alliage de remplacement au point de vue de l'usure en régime onctueux.

Nous allons donner sur ces recherches importantes, à la fois une idée de la méthode suivie et des conclusions que nous avons pu en tirer avec certitude.

L'étude de la première question reposant tout entière sur l'établissement du point critique et cette étude n'ayant jamais été présentée aux lecteurs de la *R. U. M.*, nous croyons devoir débiter par un rappel des conclusions tirées d'un mémoire qui a paru sur ce sujet dans la revue *Standards* de la Société Belge des Mécaniciens (2).

(2) Le régime onctueux dans les paliers lisses, L. Leloup, *Standards*, nos 5 et 6, 1941.

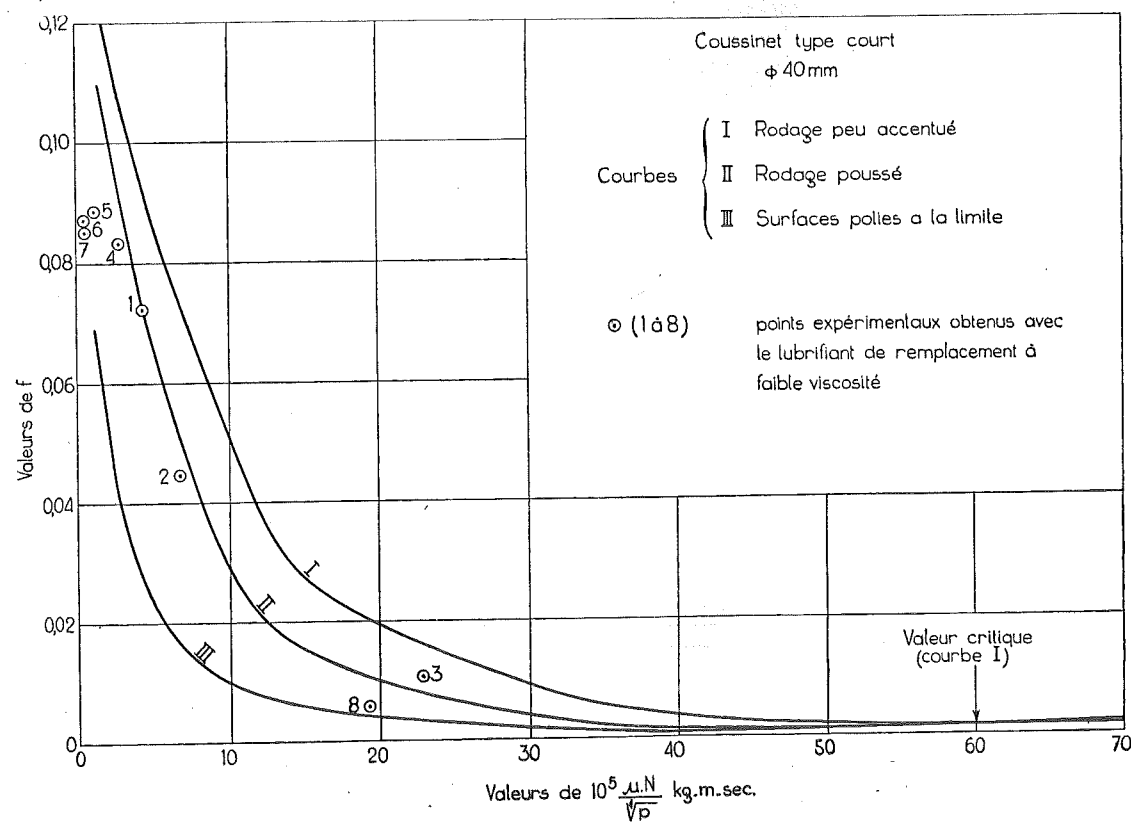


Fig. 4.

## A. — ETUDE DU POINT CRITIQUE

Parmi les problèmes importants à la solution desquels le Laboratoire d'Éléments de Machines a consacré son activité au cours des dernières années, la détermination du *point critique* a donné lieu à une recherche assez étendue.

Cette recherche, dont l'aboutissement est dû à l'appui du Fonds du Centenaire, a fourni non seulement des conclusions précises quant à la fixation du point de passage du régime hydrodynamique au régime onctueux, mais aussi les éléments fondamentaux de l'étude d'un lubrifiant de remplacement.

Le *point critique* est défini par la valeur particulière que prend la variable indépendante dont dépend le coefficient de frottement, au moment du passage du régime hydrodynamique au régime onctueux. Ce point de passage coïncide avec un minimum et c'est ce qui fait que sa détermination prend une telle importance; non seulement tout doit être conditionné pour que la valeur réalisée de la variable indépendante soit supérieure à la valeur critique mais il convient de garder une certaine marge de sécurité, puisque dès que l'on se trouve en deçà, le coefficient de frottement augmente à mesure que la température croît et qu'ainsi l'équilibre de température tend à s'établir à un taux très élevé.

Pour les paliers de 40 mm de diamètre qui ont été expérimentés, nous avons montré :

1<sup>o</sup> que la *valeur critique* s'exprime en fonction d'une variable indépendante qui a pour expression :

$$\frac{\mu N}{\sqrt[4]{P}}$$

avec  $\mu$  : viscosité absolue de l'huile.

N : nombre de tours par unité de temps.

P : pression spécifique

ce qui veut dire que la valeur de  $\frac{\mu N}{P}$  qui fixe, dans le diagramme de f en fonction de la variable  $\frac{\mu N}{P}$ , le point minimum, varie avec la valeur de p.

2<sup>o</sup> que la valeur critique et la loi de variation de f en régime onctueux dépendent de l'état des surfaces et du rapport l/d de la longueur du coussinet à son diamètre.

Les valeurs critiques, pour un état de rodage peu accentué, sont :

$$10^5 \frac{\mu N}{\sqrt[4]{P}} = 48,5 \text{ (kg-m.sec.) pour un coussinet de type long;} \\ = 60,0 \text{ (kg-m.sec.) pour un coussinet de type court.}$$

Quand le rodage est poussé à la limite, ces valeurs peuvent être réduites d'une vingtaine de pour cent et même plus lorsque le poli est extrême.

La courbe du coefficient de frottement en régime onctueux se situe d'autant plus bas que le degré de poli des surfaces est plus poussé. Nous donnons (figure 4) sa loi de variation pour les trois états : rodage peu accentué, rodage poussé, surfaces polies à la limite.

L'influence de la nature du métal dont est constitué le coussinet n'a pu être décelée, tous les essais ayant été exécutés avec coussinets en métal blanc. Toutefois, la recherche effectuée par la suite avec le lubrifiant de remplacement, qui a été faite en employant un coussinet en bronze, a permis d'observer les mêmes résultats, ce qui paraît bien indiquer que la nature du métal ne jouerait pas de rôle appréciable du moment où le poli que peuvent prendre les deux métaux est identique.

En analysant les résultats obtenus par d'autres laboratoires sur des arbres de diamètres différents, nous avons pu généraliser les résultats précédents et proposer l'adoption d'une valeur qui tiendrait également compte du facteur l/d. D'après ces recherches, la *valeur critique* des paliers lisses à coussinet complet serait dans l'état correspondant à leur mise en service, c'est-à-dire sans rodage

$$10^5 \frac{\mu V}{\sqrt[4]{P \cdot \frac{d}{l}}} = 18,5 \text{ (kg-m.sec.)}$$

avec  $\mu$  : coefficient de viscosité absolu, dans les unités kg-m-sec.

V : vitesse périphérique de l'arbre, en m/sec.

P : effort par unité de longueur du coussinet en kg/m.

d et l : diamètre et longueur du coussinet, en m

Telle est la conclusion de ces longues recherches. Nous pouvons ajouter que, comme c'est le cas en régime hydrodynamique, l'huile n'intervient que par sa viscosité. Ainsi, en régime onctueux également, à viscosité égale, les résultats sont identiques.

Ce point n'avait jamais été mis en lumière et nous avons poursuivi très systématiquement cette recherche, ne négligeant rien des facteurs qui auraient pu mettre en doute cette conclusion. Nous avons expérimenté successivement une huile de machine ordinaire, des huiles pour moteur d'automobile, dont certaines à viscosité particulièrement élevée obtenue par traitement spécial (polymérisation) et enfin une huile d'origine végétale (ricin) et sommes arrivés à l'absolue conviction qu'en régime onctueux, le coefficient de frottement ne dépend que de la viscosité de l'huile.

On peut donc affirmer que dans toute l'étendue du phénomène de la lubrification des paliers lisses, à viscosité égale, et quelle que soit l'huile employée le coefficient de frottement garde strictement la même valeur. Ceci ne vaut bien entendu, que pour un fonctionnement normal. Lorsqu'il y a tendance au grippage, nous ne prétendons pas que d'autres qualités de l'huile ne puissent intervenir, car dans ces conditions particulières, le lubrifiant interposé aux points dangereux est porté à une température locale très élevée et il peut se faire que certaines huiles soient capables de mieux résister aux altérations que tend à produire cette élévation de température. La bonne tenue de l'huile peut dépendre dans ces conditions accidentelles d'utilisation, de qualités particulières que nous n'avons pu déceler. Nous nous réservons d'étudier ce point sur un appareil spécial dont nous dirons quelques mots plus loin.

La figure 5 montre les courbes de viscosité I et II des huiles respectivement la plus fluide et la plus visqueuse utilisées au cours des essais. Les valeurs extrêmes de  $\mu$  réalisées sont respectivement de 1,71 et 19,40 poises; le coefficient de viscosité a donc varié de 1 à 12, ce qui donne une idée de l'étendue de nos recherches dans ce domaine.

## Etude d'un lubrifiant de remplacement

Cet exposé étant fait, abordons à présent le problème d'un lubrifiant de remplacement, destiné au graissage des paliers de transmission, de moteurs électriques, etc., qui nous avait été proposé.

Grâce aux recherches que nous venons de rappeler, nous avons le moyen de déterminer a priori les conditions à réaliser pour se tenir dans le régime

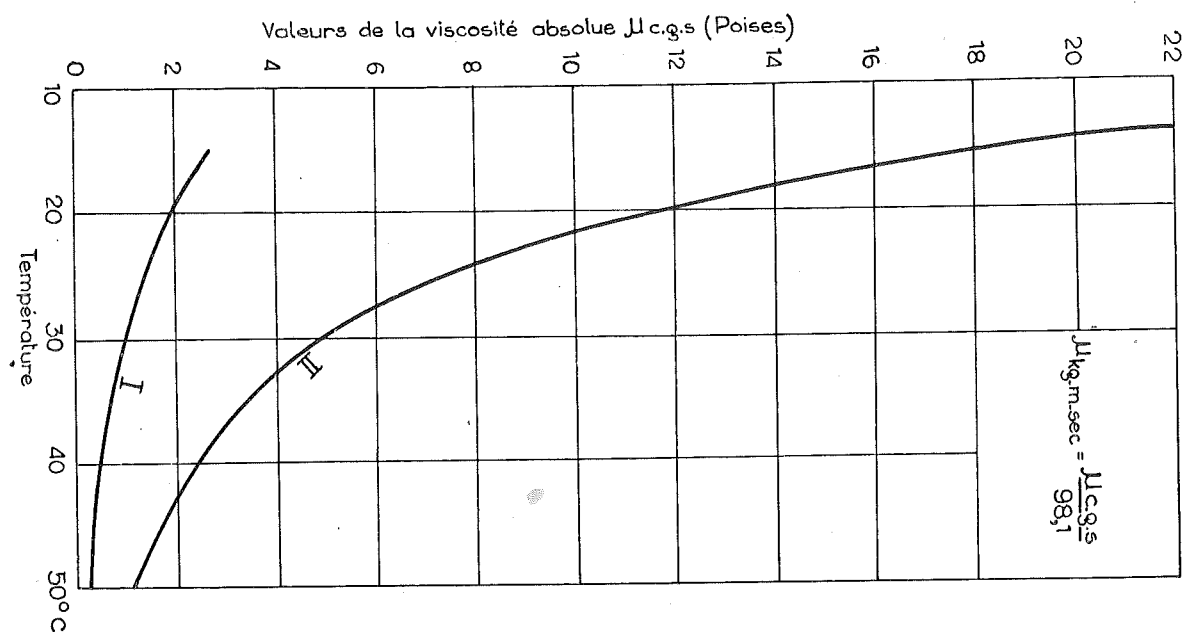


Fig. 5.

de graissage hydrodynamique, puisque celui-ci ne peut exister qu'à partir de la valeur critique, valeur qui pour le cas particulier d'un coussinet de 40 mm de diamètre et de type court est donnée par :

$$10^5 \frac{\mu N}{\sqrt{p}} = 60 \text{ (kg-m-sec) ;}$$

Le lubrifiant de remplacement étudié est une solution colloïdale ayant une viscosité excessivement faible. La figure 6 permet d'en faire la comparaison avec une huile de machine ordinaire ; à 20° C, sa viscosité absolue est de 6,45 centipoises contre 400 à 450 centipoises pour l'huile de machine, c'est-à-dire une viscosité de 60 à 70 fois inférieure à la viscosité normale.

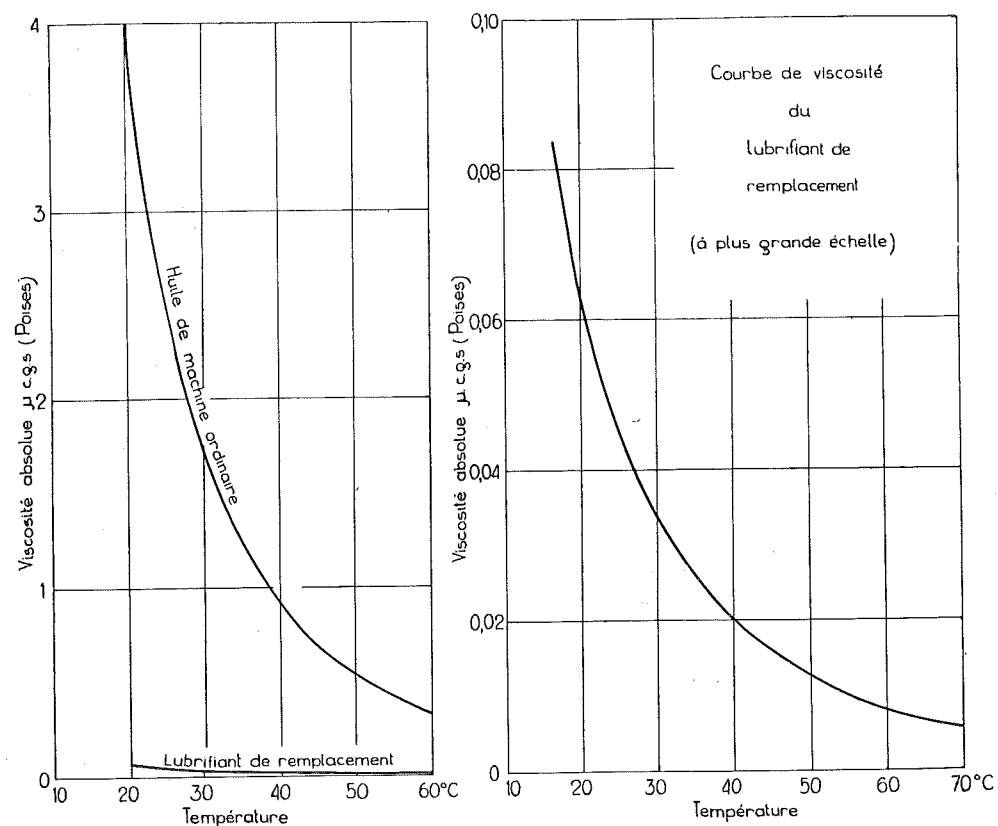


Fig. 6.

La viscosité particulièrement réduite ne permet pratiquement pas d'atteindre la valeur critique, quelles que soient les valeurs réalisées de N et de p. Ainsi pour une valeur très élevée de N (2000 tours/min) et une pression assez réduite (5 kg/cm<sup>2</sup>) il faudrait, pour réaliser

$$10^5 \frac{\mu N}{\sqrt{p}} = 60$$

que la viscosité soit égale à 2,7 centipoises, c'est-à-dire que l'huile soit portée à une température de régime ne dépassant pas 33° C. Or, avec une température ambiante normale, la température de régime réalisée ne pourra jamais rester inférieure à 40-45° C.

On voit donc immédiatement qu'avec une huile d'aussi faible viscosité, le fonctionnement du palier se fera presque exclusivement en régime onctueux avec les inconvénients inhérents :

- coefficient de frottement élevé ;
- usure sensible du coussinet ;
- danger considérable de grippage du coussinet, conséquence du fait que le coefficient de frottement croît très rapidement lorsque la viscosité diminue, c'est-à-dire au fur et à mesure que le palier s'échauffe pour tendre à atteindre sa température de régime, alors que, rappelons-le en passant, c'est le contraire qui se produit en régime hydrodynamique, où le frottement diminue avec l'élévation de température.

Si, à la connaissance de la courbe de viscosité de l'huile (figure 6) et de la loi de variation de f (figure 4), on joint la loi donnant l'élévation de température en fonction de la quantité de chaleur dégagée par le frottement, il est possible par approximations successives de connaître, pour des conditions de fonctionnement déterminées (N, p et t<sub>a</sub>), la température de régime t<sub>r</sub> et par suite le coefficient de frottement f correspondant.

La place nous manque pour examiner cette question en détail. En se basant sur la courbe II de la figure 4, qui caractérise un rodage poussé, et en adoptant la loi de rayonnement du palier :

$$p f v = (t_r - t_a)$$

[p f v en kg/cm<sup>2</sup>.cm/sec. et (t<sub>r</sub> - t<sub>a</sub>) en °C]

obtenue expérimentalement, on trouve par exemple pour :

$$p = 5 \text{ kg/cm}^2 \quad N = 240 \text{ tours/min.} \quad t_a = 28^\circ \text{ C}$$

que :

$$f = 0,068$$

tandis qu'avec une huile de machine ordinaire on aurait dans les mêmes conditions (régime hydrodynamique) :

$$f = 0,005 \text{ à } 0,006$$

soit un coefficient de frottement plus de dix fois plus faible.

Le graissage à l'aide d'un lubrifiant aussi fluide exigerait des conditions très particulières d'utilisation : vitesses très faibles (moins de 100 tours/min., c'est-à-dire 20 cm/sec.) ou bien vitesses très grandes (plus de 1000 tours/min., c'est-à-dire 200 cm/sec.) qui conduisent à des conditions de fonctionnement sensiblement meilleures. Pour les vitesses intermédiaires, la situation pourrait être sans issue si les pressions dépassent quelques kg par cm<sup>2</sup>.

Toutes ces conclusions sont tirées des diagrammes fournis par nos essais antérieurs et les expériences faites en utilisant le lubrifiant de remplacement les ont confirmées pleinement.

Celles-ci ont été entreprises à l'aide d'un coussinet en bronze, de type court et parfaitement rodé au préalable. Les points expérimentaux, numérotés de 1 à 8 dans l'ordre chronologique, ont été reportés dans la figure 4.

Les essais nos 1, 2 et 3, effectués à la pression de 5 kg/cm<sup>2</sup>, respectivement à des vitesses de 240, 475 et 935 tours/min. se groupent parfaitement sur la courbe II, qui s'avère ainsi convenir parfaitement pour le lubrifiant de remplacement au même titre que pour toutes les huiles qui avaient été essayées auparavant, et bien que la viscosité dans le cas présent soit extrêmement réduite.

A la même pression de 5 kg/cm<sup>2</sup>, les points 4 et 5 ont été exécutés ultérieurement avec des vitesses respectives de 97 et 31 tours/min. Ces points fournissent des valeurs de f de plus en plus élevées, comme il fallait s'y attendre, mais ils s'écartent de la courbe II pour se rapprocher de la courbe III. C'est la conséquence manifeste du rodage excessivement poussé qui s'est produit pendant le fonctionnement onctueux aux vitesses relativement grandes adoptées dans la première série d'essais. Ceci est d'ailleurs confirmé par les essais 6, 7 et 8, effectués à charge plus élevée :

- point 6 : 20 kg/cm<sup>2</sup>, 29 tours/min.
- point 7 : 15 kg/cm<sup>2</sup>, 95 tours/min.
- point 8 : 10 kg/cm<sup>2</sup>, 935 tours/min.

L'effet de ce rodage est particulièrement sensible à la vitesse d'un millier de tours/minute : l'essai n<sup>o</sup> 8 n'a donné lieu qu'à un coefficient de frottement de 0,0055 avec une élévation de température de 10° C, alors que si le rodage avait été moins parfait, le coefficient de frottement aurait été au moins quadruplé et la température de régime t<sub>r</sub> portée à 70° C. Dans ces conditions, il est peu probable que, si faible que soit la pression, la vitesse de 1000 tours/min. puisse être réalisée sans rodage préalable.

### Conclusions

Nous concluons :

- 1<sup>o</sup> qu'il est possible de déterminer avec grande précision le point critique ;



- 2<sup>o</sup> que la nature de l'huile n'intervient pas, même en régime onctueux et que seule la viscosité joue ;
- 3<sup>o</sup> qu'en régime onctueux, la question de l'état de rodage est capitale ;
- 4<sup>o</sup> que les courbes de  $f$  dépendent de l'état de rodage et qu'il convient pour faire des prévisions au sujet de la température de régime, de s'appuyer sur celle des courbes I, II et III qui conviennent pour le degré de perfection réalisé pour les surfaces portantes.
- 5<sup>o</sup> qu'il n'est nullement besoin d'expérimenter une huile pour être à même de déterminer son comportement dans un palier, pour autant bien entendu que cette huile ait la stabilité qu'on est en droit d'en attendre.

Ce n'était d'ailleurs pas le cas pour le lubrifiant de remplacement que nous avons analysé. Nous avons dit qu'il s'agissait d'une solution colloïdale. Le liquide de base s'évaporant rapidement, exigeait un remplissage à intervalles rapprochés. A la suite de l'évaporation, le colloïde formait un dépôt consistant qui bientôt obstruait les trous et rainures de graissage, rendant ainsi précaire la lubrification.

#### B. — ESSAIS COMPARATIFS DU COMPORTEMENT DE PALIERS ÉQUIPÉS DE COUSSINETS EN BRONZE OU EN ZAMAK

Un compte rendu détaillé de ces essais a été donné dans une étude publiée très récemment sous le même titre, dans la *R. U. M.* (3). Nous nous bornerons surtout ici à dégager les principes qu'il convient de mettre à la base d'une telle expérimentation.

Le Zamak est un alliage zinc-aluminium-cuivre-magnésium qui possède des propriétés mécaniques (résistance à la traction, dureté), comparables à celles des bronzes normalement employés à la fabrication des coussinets, excepté un allongement à la traction très notablement plus faible ; au point de vue thermique, le coefficient de conductibilité du Zamak est nettement supérieur à celui du bronze ; cet ensemble de propriétés constitue un indice plutôt favorable et incite à croire que le Zamak pourrait convenir comme matériau de remplacement du bronze dans la fabrication des coussinets.

Rien mieux que des essais comparatifs n'est susceptible de convertir cet indice en conviction, mais encore convient-il que ces essais aient une réelle signification. Pour qu'il en soit ainsi, la plus élémentaire logique veut que l'expérimentation soit

poursuivie dans des conditions de fonctionnement rééditant le plus scrupuleusement possible les conditions de la pratique.

Cependant, les essais entrepris antérieurement par d'autres laboratoires à l'étranger n'ont guère tenu compte de cette nécessité ; ces laboratoires ont généralement adopté des conditions expérimentales trop favorables : coussinet, chargé dans son axe, en porte à faux sur l'arbre et extrêmement court, deux conditions qui en réduisant au minimum les déformations par flexion, concourent à conserver le plus strictement possible le parallélisme des génératrices de l'arbre et du coussinet et à réaliser pour ainsi dire de façon parfaite les hypothèses mises à la base de la théorie du graissage hydrodynamique. Ce faisant, on élimine pratiquement toute l'influence que la nature du métal pourrait exercer sur le phénomène de la lubrification et il n'est pas surprenant dès lors, que les essais ainsi entrepris conduisent à conclure à l'équivalence de comportement des deux alliages en cause.

Dans les types commerciaux de paliers, les conditions de fonctionnement sont plus sévères et donnent lieu à des déformations hors de proportions par rapport à celles réalisées au cours des essais précités. Ce sont ces déformations qui, jointes aux erreurs de montage, sont susceptibles, particulièrement en période de rodage, de contrarier la formation du film d'huile et par suite, de faire intervenir l'influence de la nature du métal en provoquant des contacts métalliques. Seuls des essais effectués en provoquant des déformations du même ordre de grandeur peuvent donc fournir des indications valables sur la possibilité de l'emploi de tel ou tel matériau pour exécution du coussinet.

On comprend d'ailleurs pourquoi les expérimentateurs se sont souvent placés dans des conditions aussi idéales ; c'est que ces conditions se rééditent très facilement d'une manière suffisamment rigoureuse pour permettre la comparaison des essais successifs, tandis qu'avec les dispositifs réalisant un mode industriel de fonctionnement, la permanence des conditions d'essai est très délicate à maintenir.

Le Laboratoire de Construction des Machines, après de multiples tâtonnements, a pu mettre finalement au point une méthode d'essai qui donne entière satisfaction à ce point de vue :

Le palier est articulé, afin que la charge soit bien répartie sur les deux moitiés de coussinet situées de part et d'autre de la bague de graissage ; toutefois, pour qu'au point de vue des échanges de chaleur, on puisse le considérer comme étant dans les conditions réalisées avec le palier fixe, la liaison thermique avec le support est assurée par l'intermédiaire d'un bain de mercure.

Le programme de vitesses de rotation comporte une gamme échelonnée de 250 à 1000 tours/minute (palier de 40 mm de diamètre). Les pressions spécifiques n'ont pas dépassé 20 kg/cm<sup>2</sup>, le but poursuivi étant non pas de rechercher des pressions

spécifiques limites mais de s'assurer uniquement du bon fonctionnement dans les limites fixées par les plus hautes pressions atteintes en pratique dans des conditions analogues à celles de l'expérimentation (transmissions, moteurs électriques, etc.).

Ce qui importe avant tout, c'est de s'assurer de la parfaite tenue en régime du coussinet, pour les différentes conditions de fonctionnement. En outre, les aptitudes au rodage doivent être très sérieusement comparées, puisque c'est dans ces conditions de fonctionnement que la nature du métal est particulièrement susceptible de se manifester. Pour acquérir les éléments indispensables à cette étude, il faut déterminer les courbes d'élévation de température en période de rodage et les valeurs du coefficient de frottement.

Enfin, les températures de régime, caractérisant l'aptitude à transmettre les calories produites par le frottement, doivent être évaluées en fonction de la quantité de chaleur dégagée.

Voici les conclusions qui ont pu être formulées à la suite des essais comparatifs :

« Les essais exécutés sur des coussinets de 40 mm de diamètre, l'un en bronze, l'autre en Zamak, dans des conditions de fonctionnement absolument comparables à celles de la pratique courante, pour une gamme de vitesses allant d'environ 250 à 900 tours/min., et des pressions spécifiques comprises entre 10 et 20 kg/cm<sup>2</sup>, ont donné lieu aux observations ci-après :

1<sup>o</sup> En rodage, le Zamak s'est comporté sensiblement de la même manière que le bronze : d'une part, la stabilisation de la température du palier a été obtenue au bout du même laps de temps de fonctionnement ; d'autre part, les coefficients de frottement mesurés en fin d'essai étaient pratiquement équivalents pour les deux métaux.

Toutefois, on a généralement constaté que le Zamak s'est rodé un peu moins facilement que le bronze, la différence de comportement ne pouvant être considérée comme préjudiciable à son emploi, mais devant simplement inciter à conduire la mise en charge du Zamak avec une progressivité plus grande, lorsque les conditions d'utilisation atteignent ou risquent de dépasser la limite des chiffres cités.

2<sup>o</sup> Grâce à la meilleure conductibilité du Zamak, la température de régime atteinte pour une même quantité de chaleur apportée par le frottement est toujours nettement inférieure à celle obtenue pour le bronze.

En d'autres termes, dans les mêmes conditions de fonctionnement, l'élévation de température du palier est moins grande pour le Zamak que pour le bronze, la différence étant d'une quinzaine de pour cent, ce qui est loin d'être négligeable au point de vue de la sécurité. »

#### C. — COMPARAISON DE COUSSINETS GARNIS DE MÉTAL BLANC TYPE « ÉTAT BELGE » ET D'UN MÉTAL DE REMPLACEMENT

##### I.

Ces essais ont été entrepris à la suite de ceux exécutés sur le bronze et le Zamak et ont bénéficié de la mise au point de la méthode expérimentale.

Le métal blanc type « Etat Belge » comprend 83% d'étain.

Le métal de remplacement est le *phitium*, essentiellement à base de plomb, dont voici les principales caractéristiques :

Point de fusion .....	245° C
Dureté Brinell .....	34,6
Limite élastique.....	2,26 kg/mm <sup>2</sup>
Résistance à la compression.	9,25 kg/mm <sup>2</sup>
Résistance au choc.....	0,15 kg/cm <sup>2</sup>

Nous avons fait garnir de ces métaux, deux coussinets à rotule extérieure absolument identiques, de diamètre nominal 40 mm et de surface portante normale de 53 cm<sup>2</sup> (rapport de la longueur de la surface portante au diamètre  $l/d = 3,3$ ), à graissage par bague centrale fixe. Ces coussinets ont été usinés par nos soins, c'est-à-dire alésés et forés de douze trous d'amenée d'huile situés à la partie supérieure. L'opération d'alésage, commencée au tour, a été terminée au moyen d'un alésoir extensible, à la cote 40,14 mm ; les surfaces portantes ont été parachevées par un polissage sommaire à la toile émeri. L'arbre utilisé a un diamètre de 39,98 mm, sa surface portante a été également sommairement polie. Le jeu adopté est de 0,16 mm, ce qui donne  $r/a = 250$ , rapport normal pour une transmission.

Le type de coussinet à rotule a été choisi pour assurer aux essais comparatifs, les conditions les plus strictes d'équivalence, en éliminant au maximum l'influence des erreurs de montage qui pourraient, avec un coussinet fixe, varier d'une série d'essais à l'autre. D'autre part, l'articulation assure une répartition plus uniforme de la charge, répartition nécessaire pour obtenir des résultats ayant une valeur de comparaison suffisamment générale.

Comme dans le cas du Zamak, le palier à expérimenter est monté dans une chambre isothermique (voir détails dans la *R. U. M.*, n<sup>o</sup> 9, 1942).

Pour apprécier au mieux l'influence de la nature du métal, il faut effectuer les essais en période de rodage, dans lesquelles la nature et l'état des surfaces (rugosité) exercent une influence prépondérante. En outre, si un métal devait ne pas posséder les qualités intrinsèques indispensables (point de fusion suffisamment élevé, dureté convenable) pour assurer un fonctionnement normal, les défauts éventuels seraient le plus aisément dépistés en période de rodage.

(3) Essais comparatifs du comportement de coussinets en bronze ou en Zamak, par L. Leloup, *R. U. M.*, 1942 (8<sup>e</sup> série, tome XVIII, n<sup>o</sup> 9).

Les déterminations auxquelles il convient de procéder sont naturellement les mêmes que dans le cas de la comparaison du bronze et du Zamak. Pareillement, la même gamme de vitesses a été conservée. En ce qui concerne les pressions, la firme qui nous avait demandé les essais, désirait connaître les maxima admissibles, l'utilisation industrielle de l'alliage devant permettre des conditions très poussées. Nous avons, avec le coussinet normal, adopté une gamme de pressions allant de 5 à 30 kg/cm<sup>2</sup>, cette dernière pression étant la limite que nous permettaient les roulements à billes utilisés pour transmettre la charge. Il faut d'ailleurs considérer que la pression de 30 kg/cm<sup>2</sup> est réellement élevée, si l'on tient compte de la valeur relativement très forte du rapport  $l/d$ . Elle correspond à une charge de 1600 kg environ sur le palier de 40 mm. Afin d'atteindre des pressions plus élevées, à la suite d'une première série d'essais avec portée

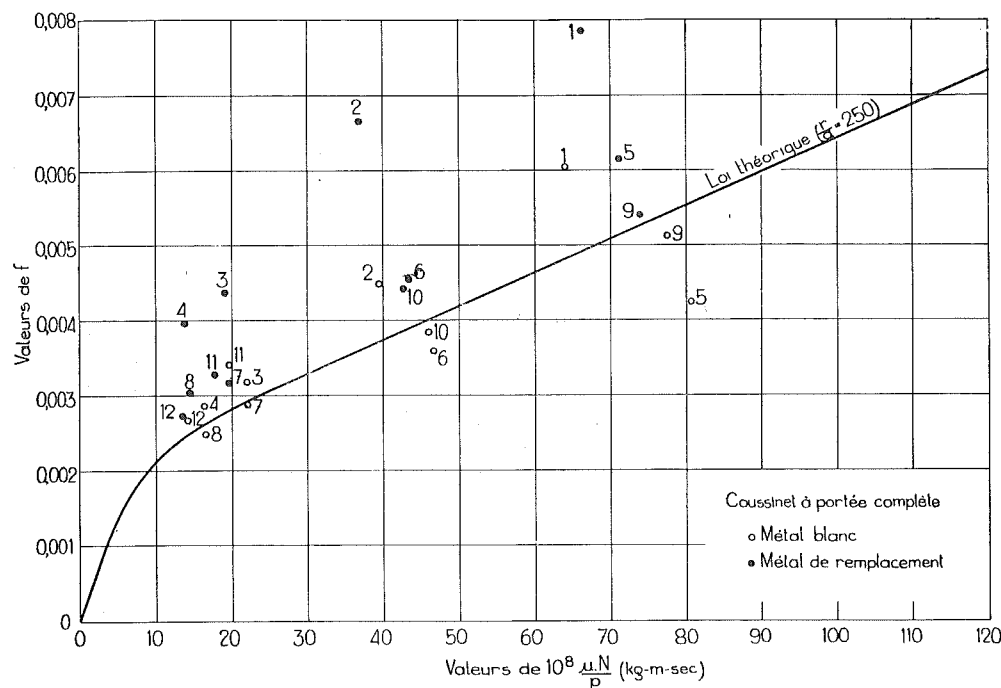


Fig. 7.

complète, nous avons réduit celle-ci à la moitié de sa valeur par suralésage des extrémités du coussinet et pu ainsi réaliser pour la portée réduite des pressions spécifiques allant jusqu'à 60 kg/cm<sup>2</sup>.

Pour provoquer un rodage méthodique, nous avons abordé successivement les vitesses choisies de la plus faible à la plus élevée; pour chacune d'elles, nous avons appliqué les pressions spécifiques dans l'ordre croissant.

Après les essais de rodage, nous avons repris certains points expérimentaux afin de connaître le comportement des coussinets après un rodage prolongé.

Il ne nous est pas possible, étant donné la place dont nous disposons, de mettre sous les yeux du lecteur l'ensemble des résultats expérimentaux acquis; nous devons nous borner à fournir (figure 7), les valeurs expérimentales du coefficient de frottement  $f$  obtenues pour les deux séries de 12 essais effectués avec les coussinets à portée complète. Les points sont numérotés dans l'ordre chronologique des essais. Nous avons représenté également la courbe théorique de  $f$  établie pour la valeur 250 du rapport  $r/a$  réalisé.

Pour l'un comme pour l'autre métal, on constate du point n° 1 au point n° 12, une constante amélioration de  $f$ , qui tend de plus en plus vers la courbe théorique.

Si l'on compare les deux alliages, on observe que systématiquement les valeurs de  $f$  sont plus élevées pour le métal de remplacement que pour le métal

blanc, les différences n'étant réellement sensibles que pour les premiers points exécutés.

Ces observations confirment les allures enregistrées des courbes d'élévation de la température en fonction du temps (non représentées ici), qui accusent le rodage progressif des deux métaux, rodage plus difficile du métal de remplacement dans la période de fonctionnement du début et qui n'est jamais aussi poussé que celui du métal blanc. D'autres indices que nous avons recueillis abondent en outre dans ce sens (degré de poli de la surface du coussinet acquis en fin d'essai, durée des ralentissements de la transmission).

Cependant, l'examen détaillé des courbes d'élévation de température montre que, bien que le

coefficient de frottement du phitium ait été plus élevé, certains essais ont donné lieu à une température de régime plus basse que celle atteinte par le métal blanc. Il faut voir ici, non pas nécessairement l'effet d'une meilleure conductibilité du phitium, mais uniquement la réédition du phénomène déjà signalé lors de l'étude du bronze et du Zamak: à la suite d'un rodage moins poussé, le fonctionnement a plutôt les caractéristiques du régime onctueux, avec épaisseur de film d'huile notablement réduite, et le passage de la chaleur au travers de la couche d'huile vers les surfaces portantes métalliques est facilité. Il en résulte une conductibilité du palier nettement améliorée, susceptible de masquer l'influence, au point de vue de l'établissement de la température de régime, d'une valeur cependant plus élevée, pour le métal de remplacement que pour le métal blanc, du coefficient de frottement.

Nous nous devons d'ajouter immédiatement que seul le souci de stricte rigueur scientifique nous a conduits à exposer les résultats d'essais de cette manière, mais il ne faudrait pas qu'il puisse en subsister une impression qui soit en défaveur du phitium. En effet, si un métal pour coussinets devait même donner lieu à un coefficient de frottement un peu plus élevé qu'un alliage auquel on désirerait le substituer, cela ne pourrait, au point de vue pratique, être un désavantage à prendre en considération, en raison de l'excédent de puissance vraiment minime perdu en frottements. D'ailleurs, les essais exécutés après rodage suffisamment prolongé montrent que les valeurs de  $f$  sont devenues absolument équivalentes, et ce conformément à la théorie hydrodynamique de graissage.

Ce qui importe avant tout pour un coussinet, c'est sa bonne tenue en rodage. Cette bonne tenue s'est parfaitement affirmée à l'égal du métal blanc, même à la pression de 60 kg/cm<sup>2</sup>. Il est en outre nécessaire que la température de régime soit admissible; à ce point de vue, il n'y a certes aucune infériorité par rapport au métal blanc.

C'est ce qui justifie la conclusion du rapport transmis à la firme qui nous avait demandé les essais et que nous reproduisons in extenso ci après.

« Il résulte de l'ensemble de tous les essais effectués que l'on se trouve en présence d'un métal de remplacement jouissant de qualités exceptionnelles et digne de soutenir la comparaison avec le métal blanc type « Etat Belge » à 83% d'étain.

Pour une gamme de pressions très poussées (jusqu'à 30 kg/cm<sup>2</sup> pour le coussinet à portée complète et 60 kg/cm<sup>2</sup> pour le coussinet à portée réduite) jusqu'à atteindre une charge de 1600 kg sur le palier de 40 mm, et une gamme de vitesses allant jusqu'à près de 1000 tours/minute, le rodage du métal de remplacement s'est effectué dans d'aussi bonnes conditions que possible et n'a donné lieu à aucune difficulté.

Comparativement au métal blanc, il est apparu

qu'au début de la période de rodage, le comportement du métal de remplacement est un peu moins satisfaisant tandis qu'aux plus grandes vitesses, à une tenue équivalente finit par succéder un fonctionnement plus favorable pour le métal de remplacement, la température de régime atteinte étant alors assez nettement inférieure à celle du métal blanc.

En fin de compte on peut, au point de vue de l'utilisation pratique, conclure à une parfaite équivalence des deux alliages. »

## II.

En complément à ces essais très complets, il nous a été demandé de procéder à une recherche particulière touchant le comportement du phitium en cas de suppression accidentelle de la lubrification.

Ce problème est assez nouveau, mais particulièrement à l'ordre du jour. Il est fortement question à l'heure actuelle d'alliages à structure « grillagée » permettant la fixation d'une réserve d'huile qui doit être capable de suppléer, pendant un temps assez prolongé, à un manque d'alimentation en huile du coussinet. Nous n'avons jusqu'à présent pas eu l'occasion d'analyser cet aspect délicat du problème de la lubrification, pas plus que celui du graphitage qui doit probablement le rejoindre; il ne nous sera donc pas possible de donner une base scientifique quelconque aux observations que nous allons relater. Nous nous en voudrions cependant de les passer sous silence, étant donné l'intérêt exceptionnel qu'elles présentent.

Nous n'avons pu exécuter qu'un seul essai; il a été entrepris sur la base suivante:

Déterminer le comportement du coussinet garni de métal de remplacement (phitium) par comparaison avec le métal blanc type « Etat Belge » à 83% d'étain, à la suite d'un manque d'alimentation en huile, ce cas pouvant se produire lorsque le niveau de l'huile ayant suffisamment diminué, la bague de graissage ne plonge plus dans le lubrifiant et ne réalimente plus le coussinet.

Pour mener l'expérimentation dans les conditions reproduisant le plus strictement possible le cas pratique, nous avons arrêté le programme suivant:

- amener le palier en régime tout à fait normal de fonctionnement pour les valeurs courantes de  $N$  (475 tours/min.) et de  $p$  (charge de 530 kg, correspondant à 20 kg/cm<sup>2</sup> pour le coussinet à portée réduite);
- provoquer brusquement la suppression de l'alimentation en huile, en enlevant les bouchons destinés à la vidange du palier (écoulement complet de l'huile en une vingtaine de secondes);
- à partir de ce moment, la charge et les mêmes conditions d'entraînement étant maintenues, faire toutes observations capables de permettre l'analyse la plus complète du comportement du coussinet.

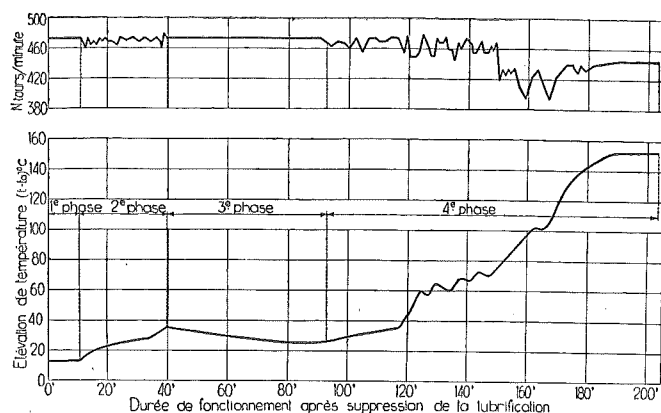


Fig. 8a. — Métal blanc type Etat Belge à 83% d'étain.

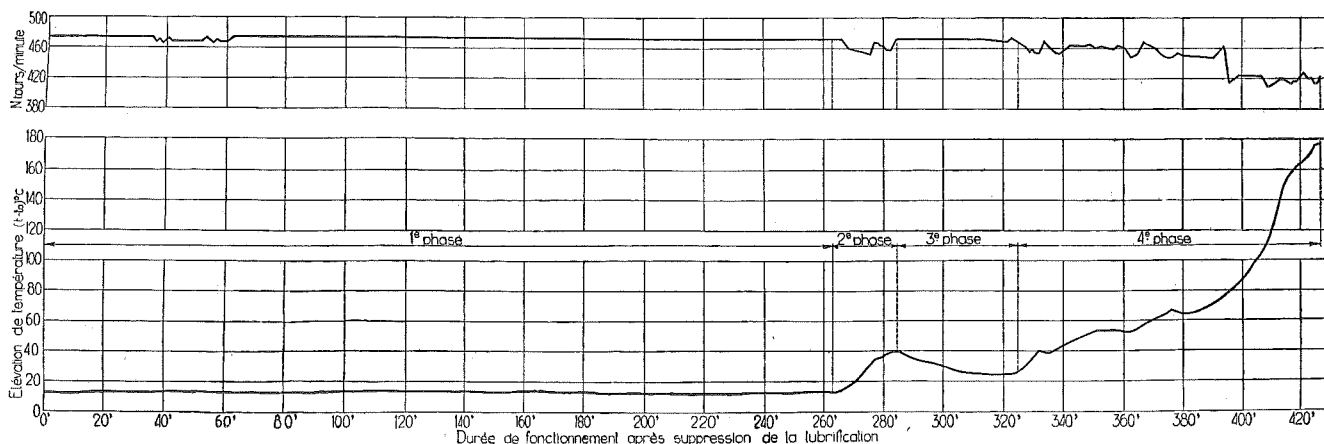


Fig. 8b. — Métal de remplacement (phitium).

Nous avons traduit les résultats d'essais en diagrammes tant pour le métal blanc que pour le métal de remplacement (figures 8a et 8b). Portant en abscisses les durées de fonctionnement à partir du moment de la suppression du graissage, nous avons tracé :

- 1) avec les ordonnées ( $t_r - t_a$ ) °C, la courbe de variation de l'élévation de température du palier en fonction du temps ;
- 2) avec les ordonnées N tours/min., la loi de variation de la vitesse de rotation de l'arbre en fonction de ce même temps de fonctionnement.

Pour l'un comme pour l'autre alliage, on observe la même suite de variations d'allure de la courbe d'élévation de température :

**Première phase :** l'élévation de température s'est maintenue égale à celle qui existait en régime normal de fonctionnement.

**Deuxième phase :** la température est montée assez rapidement jusqu'à un maximum, sensiblement le même dans les deux cas.

**Troisième phase :** la température a diminué lentement jusqu'à un palier, le même pour les deux métaux, qui s'est maintenu pendant une quinzaine de minutes.

**Quatrième phase :** nouvelle ascension de la température qui s'est effectuée par une série de pointes

plus ou moins accentuées. A la fin de cette montée, la température du métal blanc seul s'est stabilisée.

Les variations de vitesse sont évidemment dues aux fluctuations du coefficient de frottement qu'elles traduisent fidèlement ; les courbes de la vitesse de rotation confirment constamment l'allure des courbes d'élévation de la température.

L'examen des coussinets après l'essai a montré que la surface portante a été totalement retravaillée par fusion ; le métal s'est transporté sur toute la longueur du coussinet inférieur qui était, nous

insistons, *initialement à portée réduite*, de telle sorte que s'est réalisée finalement la portée complète. Le métal de remplacement a été remanié beaucoup plus profondément que le métal blanc ; sa surface ne comportait que des plages très réduites présentant un aspect poli. Par contre, pour le métal blanc, une bonne moitié du coussinet, vers les extrémités, était parfaitement polie.

On peut interpréter de la manière suivante le comportement des coussinets dans la période ayant suivi la suppression du graissage :

**Première phase :** dans les premiers temps, le film d'huile continue d'être alimenté et le régime normal de fonctionnement peut se maintenir.

**Deuxième phase :** lorsque l'alimentation du film commence à se tarir, l'épaisseur de ce film diminue et le frottement onctueux se substitue au frottement hydrodynamique. Le coefficient de frottement croît rapidement (voir chute de vitesse correspondante), d'où élévation graduelle de la température.

**Troisième phase :** la valeur maximum atteinte par le coefficient de frottement ne se maintient pas, car il se produit, par suite du rapprochement des surfaces portantes, un nouveau rodage qui amène ces surfaces au maximum de perfection ; il s'ensuit une diminution graduelle de  $f$ , jusqu'à un minimum, correspondant à un palier

assez étendu. On constate que ce palier est le même pour les deux alliages ( $t - t_a = 26^{\circ} \text{C}$ ).

**Quatrième phase :** un tel régime ne peut se maintenir indéfiniment ; l'huile s'élimine toujours davantage et le contact métallique se produit localement ; il en résulte, localement également, des élévations de température considérables, qui ne se traduisent évidemment pas lors des observations (qui n'indiquent que des moyennes), capables d'amener en certains points la fusion du métal. Ce métal fondu, qui peut être déplacé, s'incorpore à nouveau dans la masse, probablement par écrasement, et une situation assez normale se rétablit provisoirement.

Ces phénomènes qui se traduisent par une pointe du diagramme d'élévation de température, se renouvellent constamment, à une cadence toujours accrue, jusqu'à une accentuation telle qu'une grande masse de métal est à la fois en fusion. Dès lors, il pourrait ne pas y avoir de limite à l'élévation de température, autre que celle qui se présenterait lorsque la garniture de métal antifrottement fondrait complètement et que l'arbre viendrait à porter sur la fonte même du coussinet.

Toutefois, ce cas extrême n'a été atteint pour aucun des deux alliages. En ce qui concerne le métal blanc, la surface portante s'est uniformisée sur une grande longueur du coussinet et s'est complètement polie par contact métallique. Il en est résulté un fonctionnement à frottement très élevé, mais ne risquant plus de provoquer la fusion, d'où possibilité d'atteindre un régime de température que l'on constate en fin de la quatrième phase. Pour le métal de remplacement par contre, on tendait certainement vers l'élimination complète de l'alliage, mais l'essai a été suspendu auparavant.

Ce qui importe eu égard au but poursuivi, c'est la durée de la première phase, c'est-à-dire le temps pendant lequel le fonctionnement reste encore normal après suppression de l'alimentation en huile par la bague. Alors que pour le métal blanc, cette durée n'a été que de 10 à 11 minutes, le métal de remplacement a permis de maintenir le régime pendant 265 minutes. Pour un métal ordinaire, il est évident qu'après suppression de l'alimentation en huile par la bague, le film d'huile peut encore, pendant un certain laps de temps, compenser ses pertes par fuites latérales, grâce à une certaine réserve constituée dans les canaux d'alimentation du demi-coussinet supérieur et par la bague elle-même ; cette réserve, rapidement disparue, il ne peut y avoir place que pour un frottement onctueux avec un coefficient de frottement considérablement accru. Si le métal est poreux, cela semble être le cas pour le métal de remplacement, on conçoit qu'il puisse se constituer dans les couches sous-jacentes à la surface portante, une réserve de lubrifiant susceptible de réalimenter le film d'huile par des phénomènes d'écoulement capillaire. Rien

n'indique d'ailleurs que le film d'huile soit encore complet ; il est très possible qu'il se localise davantage et que son épaisseur soit réduite ; dans ces conditions, le coefficient de frottement pourrait bien être accru et le transport des calories produites facilité, l'action opposée des deux facteurs assurant la permanence de la température de régime.

Au point de vue pratique, la comparaison des autres phases présente peu d'intérêt, puisqu'elles conduisent fatalement à la destruction du coussinet. Mais les essais tels que nous les avons conduits présentent toutefois le mérite incontestable de jeter quelque lueur sur la façon dont s'opère le grippage des coussinets ; elles indiquent en outre (quatrième phase) que le métal blanc en cas de grippage, est plus susceptible que le métal de remplacement de se réadapter après fusion locale aux conditions normales de fonctionnement. Ceci confirme une moins bonne aptitude au rodage constatée pour le métal de remplacement au cours des premiers essais.

En conclusion, nous répéterons, avec les réserves qui s'imposent en l'absence d'essais plus systématiques, que tandis que le régime normal cessait d'exister après une dizaine de minutes pour le métal blanc, il s'est maintenu pendant 265 minutes pour le métal de remplacement après la suppression du graissage, la différence de comportement devant certainement être attribuée à la « porosité » du métal de remplacement qui permet la constitution d'une réserve de lubrifiant susceptible de réalimenter le film d'huile.

#### D. — ÉTUDE DE LA QUALITÉ APPROPRIÉE DE L'HUILE ET DE L'USURE DU MÉTAL EN RÉGIME ONCTUEUX

Dans ce domaine où toute théorie mathématique est impuissante à débrouiller le rôle des différents facteurs, un effort avait été tenté de 1932 à 1937 par M. Bodart au moyen d'un appareil mis au point dans le Laboratoire de Construction des Machines. M. Bodart a publié à cette occasion dans la *Revue Universelle des Mines* deux mémoires (\*) montrant les résultats obtenus et analysant les causes vraisemblables d'un des points critiques observés.

Ces recherches auraient pu apparaître comme manquant de caractère général en raison de la manière dont l'appareil d'essai est réalisé. Grâce à une étude subséquente mettant en concordance les résultats obtenus par M. Bodart avec ceux acquis directement par M. Planiol sur un moteur à gaz, il a été possible de faire une synthèse exceptionnelle de l'ensemble de toutes les données expérimentales et de fournir *enfin* une solution au

(\*) Contribution à l'étude du frottement dans la phase onctueuse et semi-fluide, E. Bodart (*R. U. M.*, 1 et 15 juin 1933).

Étude du coefficient de frottement dans la phase onctueuse, E. Bodart (*R. U. M.*, novembre 1938).



problème du calcul du rendement organique dans les machines alternatives <sup>(5)</sup>.

L'appareil d'essai à palettes qui avait été utilisé par M. Bodart va servir, à présent que les résultats acquis au point de vue de l'application aux machines alternatives ne pourraient plus être mis en doute, à étudier le problème capital de la qualité appropriée d'une huile destinée à résister par suite des conditions de service, à de hautes températures « ponctuelles ». De même, il sera possible d'étudier le rôle du métal dans le frottement en régime onctueux.

Comme travail d'approche, nous avons eu récemment l'occasion de déterminer l'usure de matériaux travaillant dans le régime onctueux.

Le problème qui nous avait été posé était de déterminer, en frottement lubrifié, les usures comparées du bronze et d'un matériau de remplacement. Dans une recherche de ce genre, il faut mettre les métaux à étudier dans des conditions permanentes de frottement en régime onctueux, afin d'obtenir dans un temps relativement court, une usure mesurable avec un degré de précision suffisamment élevé. L'appareil à palettes s'y prêtait particulièrement bien et c'est pour cela que nous avons exécuté deux séries de palettes absolument identiques, les unes en bronze, les autres en alliage de remplacement.

Nous avons adopté des conditions qui, d'après les résultats obtenus par M. Bodart, devaient conduire

à des valeurs du coefficient de frottement assez élevées et par suite, nous le supposons, à une usure relativement rapide. Il s'agit d'une vitesse d'environ 10 mètres par seconde et d'une pression spécifique de 2 kg/cm<sup>2</sup>. La température de régime a été maintenue, par circulation d'eau de refroidissement, aux environs de 55° C. Les valeurs de *f* ont constamment oscillé entre 11 et 12 centièmes, c'est-à-dire plus de dix fois plus que dans les conditions habituelles d'utilisation en régime hydrodynamique.

Nous n'avons pas l'intention de donner un compte rendu de nos essais, ni même d'en discuter les résultats, ce qui nous entraînerait à de trop longs développements, d'autant plus que nous devons poursuivre l'expérimentation avec de nouvelles compositions de l'alliage de remplacement.

Nous nous en tiendrons pour le moment à souligner la parfaite possibilité que nous avons de mener à bien des essais de ce genre, grâce au fait que nous pouvons déterminer les usures par pesée et en déduire *très exactement* les usures linéaires.

Un résultat typique vaut cependant d'être cité, car il peut servir de base à l'appréciation de l'ordre de grandeur des usures :

Pour un fonctionnement en régime onctueux, caractérisé par une vitesse d'environ 10 mètres par seconde et une pression spécifique d'environ 2 kg/cm<sup>2</sup>, le frottement bronze (à 13% d'étain) sur fonte donne lieu à une usure de 0,0076 micron/heure, soit un micron en 130 heures de fonctionnement.

<sup>(5)</sup> Etude des pertes par frottement dans les machines alternatives, Ch. Hanocq (S. B. M. Standards, 1942).

Décembre 1942.

## RAPPORT PROVISOIRE

### SUR LES RECHERCHES CONCERNANT LE SÉCHAGE INDUSTRIEL

#### EFFECTUÉES AU LABORATOIRE D'APPAREILLAGE DES INDUSTRIES CHIMIQUES

#### SOUS LES AUSPICES DU FONDS DU CENTENAIRE DE L'ÉCOLE DES MINES

par

J. DANZE,

Ingénieur principal des Mines,  
Professeur à l'Université de Liège

et

V. J. BOUGNET,

Ingénieur A. I. Lg.

**Résumé.** — *Les essais poursuivis ont pour but d'établir des règles pratiques définissant les meilleures conditions du séchage et permettant le calcul des séchoirs industriels. Les auteurs rapportent les résultats qu'ils ont obtenus dans une étude relative à la dessiccation du bois.*

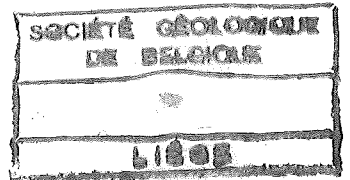
Lorsqu'on traite une matière initialement gorgée d'eau, le séchage comporte trois phases bien distinctes.

Au début, la surface du matériau est couverte d'un film liquide que le courant d'air évapore. Les choses se passent comme si le gaz léchait la surface

d'une nappe d'eau. On constate que, pendant cette période, la vitesse de dessiccation, c'est-à-dire le poids d'eau enlevée par unité de surface en l'unité de temps, reste constante pour des conditions déterminées. Cette vitesse de dessiccation est une fonction de la température du matériau, de la température et de l'état hygrométrique de l'air, de la vitesse et de la direction du courant d'air. On admet généralement qu'elle ne dépend pas de la nature de la matière séchée.

Au fur et à mesure que l'eau, qui imbibe la surface du corps, est enlevée par l'air, le liquide qui gorge les parties internes vient la renouveler.





REVUE UNIVERSELLE

DES

# MINES, DE LA METALLURGIE = DES TRAVAUX PUBLICS, =

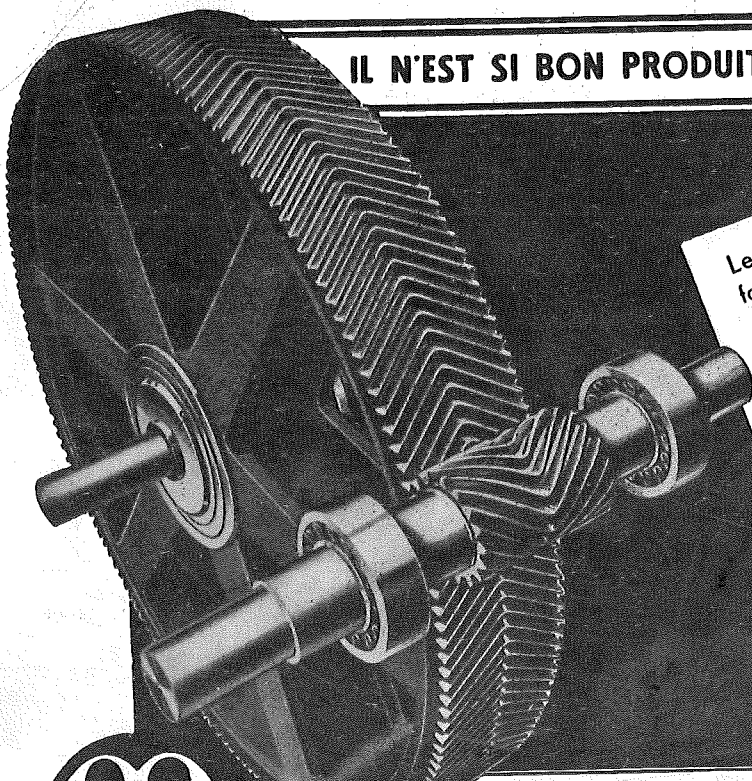
DES SCIENCES ET DES ARTS APPLIQUÉS A L'INDUSTRIE

ORGANE DE L'ASSOCIATION DES INGÉNIEURS SORTIS DE L'ÉCOLE DE LIÈGE (A. I. Lg.)

AFFILIÉ A L'UNION DE LA PRESSE PÉRIODIQUE BELGE, UNION PROFESSIONNELLE RECONNUE

*publié sous la direction du Comité Scientifique de l'A. I. Lg.*

IL N'EST SI BON PRODUIT QU'ON NE DOIVE AMÉLIORER



Les besoins de la technique ne font que croître avec le progrès et celui-ci réclame des produits toujours plus parfaits.

Les Ateliers René de Malzine ont adapté leur fabrication de façon à satisfaire à toutes les exigences de la technique moderne.

La mise au point et le perfectionnement de leurs méthodes tendent moins à faire vendre qu'à

**AMÉLIORER LEURS PRODUITS**

La marque A. R. M. est une garantie dont tout consommateur d'engrenages doit s'assurer.



**ATELIERS RENE DE MALZINE**

S-A  
SCLESSIN PRÉS LIÈGE - BELGIQUE

SOBELPRO

5

39 R 12

ABONNEMENT (UN AN) :  
BELGIQUE ET CONGO BELGE : 150 FRANCS  
ÉTRANGER : 280 FRANCS  
LE NUMÉRO : 50 FRANCS



RÉDACTION ET ADMINISTRATION  
12, QUAI PAUL VAN HOEGAERDEN, LIÈGE  
TÉLÉPHONE : 117.70  
COMPTE CHÈQUE POSTAL N° 24.620

FORMAT A4 (210x297)

L2.24-32