

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

1- [Le Conservatoire numérique](#) communément appelé [le Cnum](#) constitue une base de données, produite par le Conservatoire national des arts et métiers et protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle. La conception graphique du présent site a été réalisée par Eclydre (www.eclydre.fr).

2- Les contenus accessibles sur le site du Cnum sont majoritairement des reproductions numériques d'œuvres tombées dans le domaine public, provenant des collections patrimoniales imprimées du Cnam.

Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n° 78-753 du 17 juillet 1978 :

- la réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur ; la mention de source doit être maintenue ([Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers - https://cnum.cnam.fr](#))
- la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

3- Certains documents sont soumis à un régime de réutilisation particulier :

- les reproductions de documents protégés par le droit d'auteur, uniquement consultables dans l'enceinte de la bibliothèque centrale du Cnam. Ces reproductions ne peuvent être réutilisées, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.

4- Pour obtenir la reproduction numérique d'un document du Cnum en haute définition, contacter [cnum\(at\)cnam.fr](mailto:cnum(at)cnam.fr)

5- L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment passible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

6- Les présentes conditions d'utilisation des contenus du Cnum sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

NOTICE DE LA REVUE	
Auteur(s) ou collectivité(s)	Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers
Auteur(s)	Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers
Titre	Publication : Laboratoire d'essais
Adresse	Paris : Conservatoire national des arts et métiers, 193.-195.
Nombre de volumes	125
Cote	CNAM-BIB P 1329-B et P 1329-C
Sujet(s)	Conservatoire national des arts et métiers (France) Génie industriel -- 20e siècle
Note	La collection comporte des lacunes : n°24; n°58; n°63; n°67; n°76-n°77
Notice complète	https://www.sudoc.abes.fr/cbs//DB=2.1/SET=17/TTL=3/REL?PPN=261820893&RELTYPE=NT
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-B_P1329-C
LISTE DES VOLUMES	
	N°25 (1936)
	N°26 (1937)
	N°27 (1937)
	N°28 (1937)
	N°29 (1938)
	N°30 (1939)
	N°31 (1936)
	N°32 (1938)
	N°33 (1938)
	N°34 (1938)
	N°35 (1938)
	N°36 (1938)
	N°37 (1938)
	N°38 (1938)
	N°39 (1938)
	N°40 (1939)
	N°41 (1939)
VOLUME TÉLÉCHARGÉ	N°42 (1939)
	N°43 (1939)
	N°44 (1939)
	N°45 (1938)
	N°46 (1940)
	N°47 (1940)
	N°48 (1940)
	N°49 (1940)
	N°50 (1940)
	N°51 (1941)
	N°52 (1941)
	N°53 (1941)
	N°54 (1941)
	N°55 (1942)
	N°56 (1942)
	N°57 (1942)
	N°59 (1942)

	N°60 (1941)
	N°61 (1942)
	N°62 (1943)
	N°64 (1943)
	N°65 (1943)
	N°66 (1943)
	N°68 (1943)
	N°69 (1943)
	N°70 (1943)
	N°71 (1943)
	N°72 (1944)
	N°73 (1943)
	N°74 (1944)
	N°75 (1944)
	N°78 (1944)
	N°79 (1944)
	N°80 (1944)
	N°81 (1944)
	N°82 (1944)
	N°83 (1944)
	N°84 (1944)
	N°85 (1944)
	N°86 (1945)
	N°87 (1945)
	N°88 (1945)
	N°89 (1945)
	N°90 (1945)
	N°91 (1945)
	N°92 (1945)
	N°93 (1945)
	N°94 (1945)
	N°95 (1946)
	N°96 (1946)
	N°97 (1946)
	N°98 (1944)
	N°99 (1945)
	N°100 (1945)
	N°101 (1946)
	N°102 (1946)
	N°103 (1946)
	N°104 (1946)
	N°105 (1946)
	N°106 (1946)
	N°107 (1947)
	N°108 (1947)
	N°109 (1947)
	N°110 et 111 (1947)
	N° 112 (1947)
	N° 113 (1947)
	N° 114 (1947)
	N° 115 (1947)
	N° 116 (1947)
	N° 117 (1947)
	N° 118 (1948)
	N° 119 (1948)
	N° 120 (1948)
	N° 121 (1948)
	N° 122 (1947)

	N° 123 (1948)
	N° 124 (1948)
	N° 125 (1948)
	N° 126 (1948)
	N° 127 (1948)
	N° 128 (1948)
	N° 129 (1948)
	N° 130 (1949)
	N° 131 (1949)
	N° 132 (1949)
	N° 133 (1948)
	N° 134 (1949)
	N° 135 (1948)
	N° 136 (1949)
	N° 137 (1950)
	N° 138 (1950)
	N° 139 (1950)
	N° 140 (1950)
	N° 141 (1950)
	N° 142 (1948)
	N° 143 (1950)
	N° 144 (1950)
	N° 145 (1951)
	N° 146 (1951)
	N° 147 (1951)
	N° 148 (1951)
	N° 149 (1951)
	N° 150 (1951)
	N° 151 (1951)
	N° 152 (1951)
	N° 153 (1952)
	N° 154 (1952)
	N° 155 (1952)

NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ	
Auteur(s) volume	Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers
Titre	Publication : Laboratoire d'essais
Volume	N°42 (1939)
Adresse	Paris : Conservatoire national des arts et métiers, 1939
Collation	1 vol. ([12] p.) : ill. ; 32 cm
Nombre de vues	16
Cote	CNAM-BIB P 1329-B (18)
Sujet(s)	Conservatoire national des arts et métiers (France) Génie industriel -- 20e siècle
Thématique(s)	Histoire du Cnam
Typologie	Revue
Langue	Anglais Français
Date de mise en ligne	10/04/2025
Date de génération du PDF	07/02/2026
Recherche plein texte	Disponible
Notice complète	https://www.sudoc.fr/039014541
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-B.18

...

P1329-B

1^{re} Km. 107 (19)
Salle

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
LABORATOIRE D'ESSAIS



CONTRIBUTION EXPÉRIMENTALE
A L'ETUDE DES RELATIONS
ENTRE LE FROTTEMENT
ET L'ÉTAT DE SURFACE

par J. Prévost



PUBLICATION N° 42

(Extrait de "Mécanique"

Juillet-Août 1939)



SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES MÉCANICIENS

Extrait de « MÉCANIQUE » de juillet-août 1939

Contribution expérimentale à l'étude des relations entre le frottement et l'état de surface⁽¹⁾

Par M. PRÉVOST

Ingénieur E. C. P.

Physicien au Laboratoire d'essais du Conservatoire National des Arts et Métiers

C'est pour la « Société Française des Mécaniciens », un devoir très agréable de remercier ici l'actif et distingué directeur du Laboratoire d'Essais du Conservatoire national des Arts et Métiers qui a bien voulu autoriser, d'une part, son collaborateur M. PRÉVOST, à venir exposer aux membres de la S. F. M., les résultats de ses recherches sur le frottement et l'état de surface, entreprises sous son habile direction, et d'autre part, à en réserver la primeur pour notre bulletin « Mécanique ».

On ne sait pas assez que depuis sa nomination, il y a quatre années à peine, M. BOUTRY a, par un ensemble méthodique et coordonné de réformes et de créations importantes, fait du Laboratoire d'essais, non seulement un organisme de contrôle qui rendait

déjà et continue à rendre des services indispensables à l'industrie, mais aussi un centre de recherches actif, de puissance croissante, capable de mettre en application les nouvelles découvertes de la science pure, tout en contribuant aux progrès mêmes de celle-ci.

En particulier, dans l'étude ci-dessous, M. PRÉVOST montre, avec preuves expérimentales à l'appui, l'existence de relations simples entre le frottement et l'état de surface, dans le cas du frottement onctueux.

Dans le cas du graissage visqueux, l'auteur a utilisé une méthode très originale qui a permis de suivre l'influence des états de surface sur le frottement lubrifié à l'aide de ses nomogrammes.

A. POIRSON.

CHAPITRE PREMIER

Notions sur le frottement

Tout frottement de deux surfaces en mouvement relatif l'une par rapport à l'autre se décompose en frottement de glissement, frottement de roulement, frottement de pivotement. Nous ne nous occuperons aujourd'hui que du frottement de glissement.

L'étude pratique du frottement de glissement dans les mécanismes a amené les distinctions suivantes :

Si les surfaces en mouvement relatif sont indemnes de toute matière étrangère le frottement est dit immédiat ou sec.

Si au contraire les surfaces sont séparées par un corps étranger adhérent aux surfaces, le frottement est dit médiateur et dans le cas où ce corps intermédiaire est un corps gras — lubrifiant — ce frottement médiateur comporte la phase du graissage onctueux et la phase du graissage visqueux, suivant l'épaisseur du lubrifiant interposé.

Si les phénomènes de frottement quoique encore mal connus dans leur essence peuvent néanmoins se définir expérimentalement assez aisément, il n'en est pas de même de la conception des états de surface métalliques.

Notions sur les états de surface

Fin 1937 un cycle de conférences relatives à cette question a été organisé au Conservatoire National des Arts et Métiers — la conférence d'introduction a été faite par M. Boutry, directeur du Laboratoire d'Essais et publiée dans *Métaux et Corrosion*.

Nous donnons quelques extraits de cet exposé en mettant

en relief plus spécialement les passages intéressant le frottement :

« Qu'est-ce que la surface d'un métal ?

« Posée de cette manière directe et simple, mais grossière la question n'a presque aucun sens et ne comporte pas de réponse. »

Suivant l'échelle de grandeur adoptée l'état de surface prend des aspects différents, nous en choisissons trois :

1^o « L'échelle dans laquelle l'électron peut encore être considéré comme un point, mais où le noyau atomique prend des dimensions importantes ; notre unité de mesure la plus commode y sera le dixième d'angström ;

2^o « L'échelle à laquelle l'atome encore discernable paraît petit ; une bonne unité serait ici le centième de micron ;

3^o « Enfin l'échelle, entre très vaste, qui est directement accessible à nos sens, aidés par les instruments que nous possédons, l'échelle du micron. »

Échelle atomique.

A l'échelle atomique, il y a lieu d'étudier le problème sous l'aspect électronique et sous l'aspect atomique.

« L'aspect électronique d'une surface peut être comparé à une outre gonflée par un gaz très comprimé : le gaz est formé par les électrons, l'outre c'est la surface.

« Au point de vue électronique la surface d'un métal se signale par une couche où existe une discontinuité de potentiel, de signe et d'amplitude tels que le champ électrique qu'elle crée arrête dans leur élan vers l'extérieur les électrons les plus rapides. La hauteur de cette couche de passage ou barrière de potentiel est une propriété physique du métal.

« On a pu calculer pour quelques métaux l'amplitude de cette barrière

Al	Cu	Ni	Ag	Au	Cr	Pb
18	17	18	18	17	20	11 Volts

Il est hors de doute que ces considérations de physique jettent un jour singulier sur ce que l'on peut appeler le contact de deux surfaces métalliques et en particulier sur les frottements statiques et sur le frottement sec ou immédiat.

Nous y ferons d'ailleurs allusion dans une partie des expériences que nous exposerons par la suite.

(1) Communication faite à la séance du 7 juin 1939, organisée sous la présidence de M. CHALEIL, Président du Syndicat des Industries Mécaniques de France, par le Groupe : « Fabrications Mécaniques » de la S. F. M.

Aspect atomique proprement dit.

« Abandonnons les électrons pour les atomes, il est clair que, sous ce second aspect, la surface d'un métal doit encore être considérée comme une couche de passage d'épaisseur finie. L'équilibre des forces interatomiques n'est évidemment pas le même pour les atomes placés au voisinage du vide que pour ceux qui se trouvent dans la masse du métal. »

Ce déséquilibre explique les phénomènes d'orientation et d'adsorption.

Langmuir admet la présence d'une couche monomoléculaire stable, fixée à la surface du métal et servant de support à d'autres couches qui viennent s'y ajouter.

Cette nouvelle couche de passage est très solide et ne peut être détruite par exemple pour le platine que par un chauffage de plusieurs centaines d'heures à 1 000°, dans un vide rigoureux.

Nous estimons que cette couche monomoléculaire joue un grand rôle dans l'amélioration du frottement par rodage prolongé au delà de l'état microgéométrique de surface parfaitement lisse, et aussi dans la résistance à la transmission de calories produites par le frottement dans les surfaces métalliques.

Échelle submicroscopique.

Nous allons aborder l'échelle submicroscopique — celle du 1/100 de μ correspondant à l'épaisseur de couches superficielles d'impuretés de deux ou trois dizaines de plans réticulaires.

« A cette échelle où l'atome ne nous paraît plus qu'un point à peine séparable, nous rencontrons trois problèmes dont la solution correcte est d'importance capitale pour l'intelligence de nombreuses questions de mécanique appliquée et en particulier des phénomènes d'adhérence, de frottement statique ou de départ, des phénomènes d'onctuosité qui seront ceux mis en jeu dans les expériences rapportées ci-après, des phénomènes de polissage. »

Nous dirons de suite un mot de cette nouvelle barrière artificiellement constituée par le polissage et le frottement sur les surfaces métalliques et appelée couche amorphe de Beilby dont les propriétés caractéristiques sont les suivantes :

Cette pellicule qui n'apparaît pas sur les surfaces découpées mais sur les surfaces polies par frottement ou par abrasif confère une certaine mobilité aux couches de molécules superficielles.

Pendant qu'elle est à l'état instable, elle jouit de propriétés qui la rapprochent d'un liquide, en particulier elle possède une tension superficielle qui explique son étalement.

Finch a montré que certains métaux peuvent se dissoudre dans ces couches frottées alors qu'ils n'ont aucune action sur les métaux découpés.

L'épaisseur de la couche de Beilby peut atteindre 1/20 de longueur d'onde, soit environ 0,55 μ .

« Étalons maintenant sur cette surface polie un lubrifiant quelconque, ce dernier formera un film relativement épais que nous pouvons considérer comme formé d'assises monomoléculaires superposées. Les premières sont solidement liées au métal, au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la surface, les couches résistent de moins en moins à l'effort tangentiel, à l'arrachement. Un moment vient où leur fluidité prend le dessus ; mais l'expérience montre qu'alors nous sommes déjà bien au-dessus de l'échelle submicroscopique ; aux frontières de celle-ci le film ne commence à manifester son défaut de liaison rigide avec le métal que par son onctuosité. »

Dans les surfaces polluées par un lubrifiant le tapis formé par les molécules grasses orientées forme une nouvelle couche protectrice d'une hauteur de 1 ou 2 molécules, soit d'environ 10^{-7} cm, soit 1/1 000 de μ .

Échelle du micron.

Nous allons maintenant quitter le domaine de la physique pure pour entrer à l'échelle du micron dans les domaines de la métrologie et de la construction mécanique de précision. A cette échelle nos sens du toucher et les yeux aidés ou non par le microscope nous permettent d'apprécier les irrégularités de

l'état de surface. Ces notions ont souvent été exposées à la *Société Française des Mécaniciens* ; nous ne pensons pas utile de nous étendre sur le sujet, bien connu des mécaniciens (1).

CHAPITRE II

Instruments de mesure

Nous allons aborder maintenant la description des instruments de mesure dont nous nous sommes servis.

En 1936, une grande revue de métallurgie a publié un numéro spécial groupant 18 articles d'ingénieurs et métallurgistes distingués, sur les métaux de frottement.

Sur les quelques centaines de pages de l'ouvrage très documenté au point de vue métallurgique, nous n'avons trouvé qu'une seule relation bien courte d'expériences de frottement proprement dit.

Par un raisonnement *a contrario* nous allons demander à M. Henry Le Chatelier la raison de cette carence. En 1933, il disait :

« La métallurgie est certainement l'une des industries dont les progrès ont été les plus directement provoqués par la diffusion des méthodes de mesure. »

Cette remarque appliquée à l'étude du frottement se traduit : La raison pour laquelle les physiciens et mécaniciens se sont désintéressés des études du frottement, c'est qu'il n'existe pas de frictionmètres et de méthodes correctes d'essais permettant d'effectuer des mesures précises, reproductibles de frottement et en particulier d'étudier systématiquement l'influence des diverses variables sur le frottement : pression, vitesse, température, état de surface, épaisseur au micron près du film lubrifiant, etc.

La plupart des machines servant encore à faire ces études reproduisent le système du coussinet. Sous une apparente simplicité, le coussinet est une machine hydrodynamique très compliquée, machine à transformer l'énergie cinétique du lubrifiant en énergie potentielle pour créer une pression permettant de supporter la charge de l'arbre. En réalité, c'est une pompe centrifuge ou plus exactement une famille de pompes, chacune correspondant à une valeur de l'excentricité de l'arbre dans le coussinet. Une conférence suffirait à peine à épuiser la question ; nous en avons exposé quelques aspects dans le n° 267, de février 1937, de *Recherches et Inventions*.

Le coussinet est un organisme des plus importants en mécanique, il comporte ses machines spéciales d'essais et le Laboratoire d'Essais qui en possède déjà, fait construire actuellement une importante machine pour essayer les coussinets, particulièrement poussés des moteurs aéronautiques modernes. Mais pour les études de frottement immédiat, d'onctuosité, de valeur des lubrifiants et des métaux de frottement, nous estimons que la machine idéale est celle qui permet de déterminer avec précision et reproductibilité : le coefficient de frottement en fonction des variables suivantes imposées par la mécanique moderne :

Vitesse relative des surfaces	0 à 20 m/s
Pressions spécifiques	0 à 500 kg/cm ²
Température	20° à 200° C

Mesure de l'épaisseur des films à 1/2 μ près et naturellement ces variables étant indépendantes et constantes dans des limites étroites entre les surfaces en mouvement relatif, ce qu'il n'est pas possible de réaliser dans un coussinet.

À notre connaissance, cette machine n'existe pas encore. Le frictionmètre dont nous nous sommes servis au Laboratoire d'Essais répond néanmoins à un grand nombre de ces desiderata.

Frictionmètre Vollet.

Cette machine, imaginée par M. H. Vollet, chef du Service des Ateliers du Laboratoire d'Essais, est une machine de frottement à pistes. Elle se compose essentiellement de deux

(1) Les irrégularités de surface macro et micro-géométriques ont été définies par M. l'ingénieur en chef NICOLAU, dans *Mécanique*, mars-avril 1937, p. 80 et suivantes.

pistes ou couronnes *a* et *b* qui reçoivent un mouvement de rotation de deux arbres concentriques *c* et *p*.

Entre ces deux couronnes est disposé un anneau *d* que les forces de frottement agissant sur ses deux faces tendent à entraîner dans leur mouvement de rotation. Cet anneau est fixé dans une cuvette *e* qui porte deux bras *f* qui viennent par des butées *g* appuyer sur deux capsules manométriques *h*, en sorte que l'anneau est en équilibre sous l'action des seuls couples :

Couple de frottement sur la face supérieure ;
Couple de frottement sur la face inférieure,
et couple de poussée sur les capsules manométriques.

La charge réglable sur les deux faces de cet anneau est obtenue de la façon suivante : à l'aide d'une presse hydraulique *i* on exerce une pression en *k* sur une membrane qui, par l'intermédiaire de la butée à billes *l*, produit une poussée verticale de haut en bas sur l'arbre commandant la piste supérieure. Cette charge est transmise par l'intermédiaire de l'anneau à la piste inférieure qui a, en plus, à supporter la charge correspondant au poids de la cuvette et anneau intermédiaire.

Le mouvement de rotation est transmis à l'arbre *c* par les engrenages *r*, l'arbre *p* reçoit son mouvement de l'arbre *c* par les organes intermédiaires suivants : un embrayage *m*, deux taquets de butée *t*, et deux galets *n*. Ce dispositif permet le déplacement axial nécessaire par la poussée de la membrane s'exerçant sur cet arbre.

La supériorité de cette machine sur les autres machines à pistes existantes réside dans sa précision et l'étendue de ses possibilités expérimentales.

La température des pistes peut être maintenue entre -20° et 200° C. On peut faire varier la pression spécifique égale sur toute la surface de pistes de 20 cm^2 de $0,200$ à 100 kg/cm^2 . La vitesse relative des pistes varie de 1 mm à 5 m/s .

Cette machine permet d'effectuer d'excellentes expériences de frottement, d'usure, de rodage à sec ou en phase onctueuse. Pour être parfaite en régime de graissage dit parfait, cette machine devrait mesurer l'épaisseur du film.

En attendant ce résultat, nous avons exposé au II^e Congrès Mondial du Pétrole une méthode qui nous permet l'étude des lubrifiants et métaux antifriction indépendamment de la connaissance de cette variable.

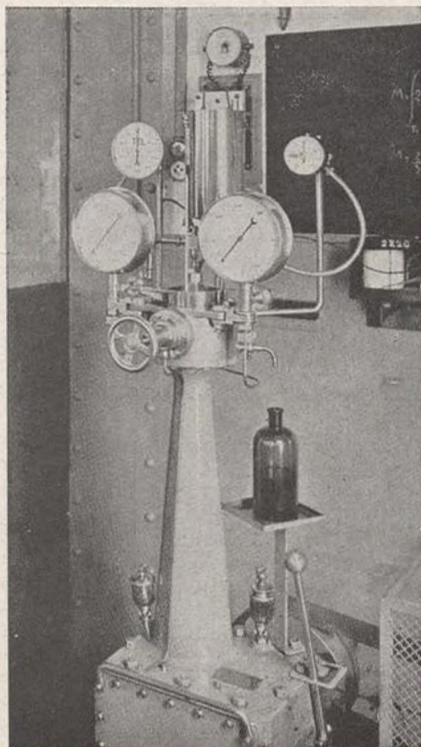


Fig. 1

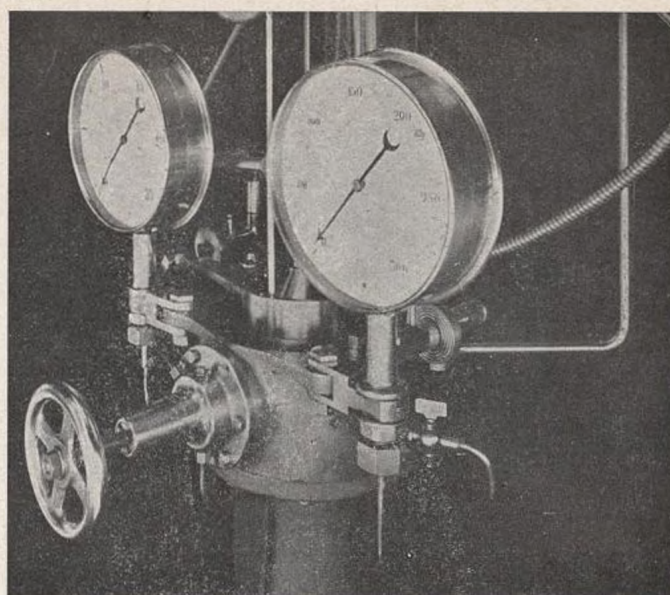


Fig. 2

L'étude complète du comportement d'un lubrifiant ou d'un métal en fonction des quatre variables : frottement, température, vitesse, pression, aboutit à l'établissement d'un nomogramme à 4 échelles, valable pour la phase du graissage parfait.

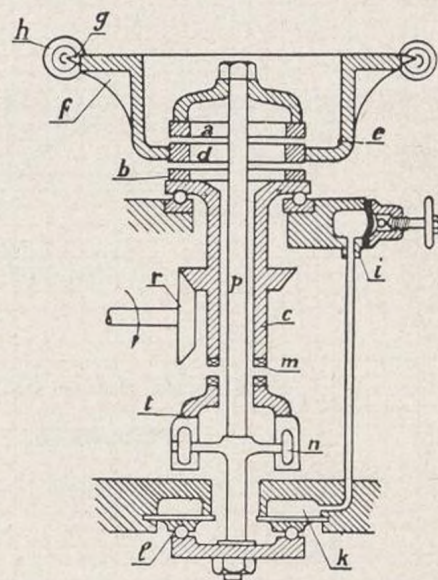


Fig. 3
Schéma du fonctionnement
de la machine

Ces nomogrammes sont complétés par la construction d'un réseau que nous appelons « réseau de sécurité » et qui fait connaître les vitesses, pressions, températures limites au delà desquelles le graissage est mal assuré. Nous reviendrons avec plus de détails sur la construction et l'emploi de ces nomogrammes quand nous décrirons les expériences effectuées au Laboratoire d'Essais pour déterminer l'influence des états de surface sur le frottement visqueux.

Mesure des états de surface

Pour la mesure métrologique de l'état de surface, nous avons utilisé le palpeur intégrateur pneumatique de M. l'ingénieur en chef Nicolau.

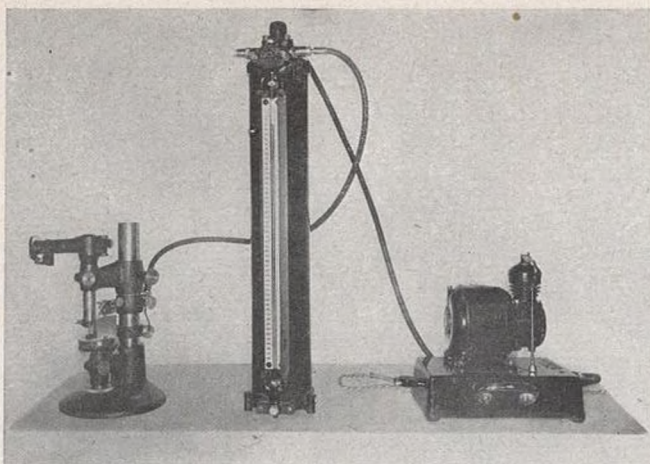


Fig. 4. — Étalonnage de l'appareil de mesure des états de surface à l'aide d'un optimètre de « Zeiss »

Cette méthode de mesure est basée sur l'emploi du micromètre Solex. Un palpeur de section terminale faible, parfaitement plane, de forme annulaire de 5 mm de diamètre, et dont l'évidement central communie avec l'orifice de sortie d'air d'un micromètre Solex est appliqué sur les pistes annulaires à

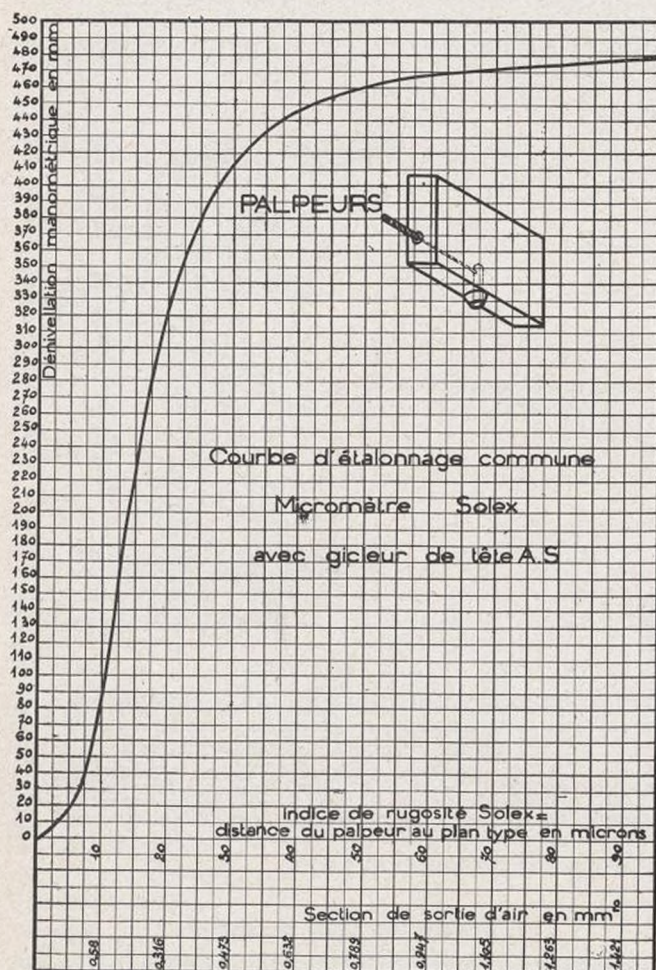


Fig. 5

essayer et qui seront ensuite placées sur le frictiomètre Vollet.

Si la surface palpée est parfaitement plane, le débit d'air est nul ; le chiffre lu sur la colonne manométrique Solex de 1 000 mm détermine le zéro de l'échelle des mesures de l'état de surface. Si ce plan parfait est remplacé par une piste d'essai rugueuse, le palpeur n'adhère plus complètement : il se produit une fuite d'air dont le débit croît avec l'importance des défauts superficiels. La mesure de ce débit, donnée par la division correspondante de l'échelle Solex caractérise l'état de la surface.

L'étalonnage du palpeur dont nous nous sommes servis a été fait au Laboratoire Central des Fabrications d'Armement par M. Prulières, chef des Services de Métrologie, dont la science et l'obligeance nous ont été précieuses dans la réalisation de ces expériences. L'appareil a été étalonné avec un optimètre Zeiss en notant en abscisses la distance en microns d'un plan parfait et en ordonnées la hauteur manométrique du micromètre Solex.

L'appareil étant ainsi étalonné, l'état de surface peut s'exprimer par le nombre de microns n qui correspond à la dénivellation manométrique.

Supposons développé sur le plan de la figure le profil de la surface suivant le contour de la touche du palpeur, et soit $y = f(x)$ l'équation de ce profil et δ le diamètre du palpeur.

$$n, \text{ indice de rugosité} = \frac{1}{\pi \delta} \int_0^{\pi \delta} f(x) dx$$

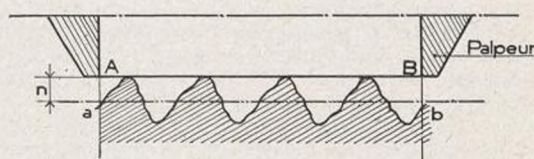


Fig. 6

CHAPITRE III

Expériences de frottement et de mesure des états de surface

Nous allons décrire maintenant les expériences effectuées pour mettre en évidence les relations entre les coefficients de frottement de divers métaux et les états de surface de ces métaux.

Les expériences se divisent en deux catégories :

- 1° Expériences de frottement dans la phase onctueuse entre métaux peu graissés, sans film lubrifiant ;
- 2° Expériences de frottement avec film lubrifiant.

Toutes les expériences qui seront décrites ci-après ont été faites en utilisant sur le frictiomètre Vollet deux couronnes en acier au nickel de 80 mm de diamètre extérieur et 60 mm de diamètre intérieur. Les surfaces frottantes de ces pistes étaient nitrurées, parfaitement planes et donnant au micromanomètre détenteur Solex avec le palpeur intégrateur l'indication 0 du plan de référence.

L'intérêt des expériences était donc reporté sur l'état de surface des anneaux intermédiaires du frictiomètre.

PREMIÈRES EXPÉRIENCES, SANS FILM LUBRIFIANT

Dans cette première série d'expériences les surfaces en contact n'étaient recouvertes que de quelques assises moléculaires de lubrifiant — ayant été graissées puis essuyées sans les frotter — la vitesse était très réduite ; nous étions bien dans les conditions de frottement onctueux, les valeurs obtenues pour les coefficients de frottement le confirment.

Ces conditions de frottement sont également celles qui se présentent en métrologie ou dans les bureaux de contrôle dans

le glissement des cales, tampons, jauges, etc., les aciers choisis dans cette première série d'expériences sont également des aciers employés couramment pour la construction des calibres et autres pièces de contrôle utilisées en métrologie et en mécanique de précision.

Nous décrivons 3 séries d'expériences :

1° Expériences sur des anneaux intermédiaires en acier « KS » au chrome de composition

[C = 1 p. 100 — Si = 0,15 à 0,5 — Mn = 0,25 à 0,5 — Cr = 1,5]

2° Expériences sur des anneaux intermédiaires en acier demi-dur ordinaire DD ;

3° Expériences sur des fontes graphitées :

C total = 3,32 ;

C graphité = 2,68 ;

C combiné = 0,64.

Les deux premières séries d'expériences sur les aciers DD et KS ont été conduites de la façon suivante :

Sur une barre d'acier KS et DD on a usiné 9 anneaux intermédiaires qui ont subi des usinages de finition différents de façon à obtenir des états de surface s'étageant en indices de rugosité de 1 à 7 μ pour les aciers KS et de 1 à 13 μ pour les aciers DD.

Ces anneaux intermédiaires avant d'être placés sur le frictiomètre Vollet ont été essayés à l'aide du palpeur intégrateur Nicolau pour déterminer les caractéristiques de l'état de surface. Ensuite ils ont été nettoyés dans un mélange d'éther et de tétrachlorure de carbone, séchés, puis enduits d'une très légère couche de vaseline pure, et enfin essuyés mais non frottés avec un linge en toile de lin.

On a placé successivement les 9 anneaux intermédiaires DD, KS entre les deux couronnes en acier nitruré poli du frictiomètre.

La vitesse du mouvement relatif entre les 2 couronnes et l'anneau a été maintenue au cours de toutes ces expériences à 1 tour en 75 s ce qui correspond à une vitesse linéaire de 0,002 m/s calculée sur le rayon moyen de l'anneau.

On a déterminé avec cette vitesse relative et à l'aide de la formule :

$$K = \frac{3}{2} 0,250 \frac{1}{q} \frac{r_2^2 - r_1^2}{r_2^3 - r_1^3} \frac{1}{2P + p}$$

RELATION ENTRE L'ÉTAT DE SURFACE MICROGÉOMÉTRIQUE ET LES COEFFICIENTS DE FROTTEMENT DE GLISSEMENT

(Lubrification onctueuse)

Acier KS

Composition : c = 1 p. 100 Si = 0,15 à 0,5 Mn = 0,25 à 0,5 Cr = 1,5 ;

Traitement : trempé à 830° C, revenu à 180° ;

Usinage : rectification sur machine « Précimax » Lund avec meule tangente :

Vitesse de la meule 1 100 t:mn
Diamètre 457 mm
Grain de la meule 46 R
Vitesse de déplacement 2 m: mn

(r_1 et r_2 rayons extérieur et intérieur des anneaux, q poids mesurant le couple de frottement à l'extrémité d'un levier de 0,250 m) les valeurs du coefficient de frottement dynamique des deux surfaces en contact pour diverses valeurs de $2P + p$ correspondent à des pressions unitaires comprises entre 0,200 à 7 kg:cm².

Pour obtenir le coefficient de frottement statique à la fin de chaque mesure on coupait le courant du moteur actionnant le frictiomètre ; on voyait alors le couple de frottement croître très sensiblement pour atteindre son maximum quand la vitesse était nulle.

Nous avons vérifié que la valeur ainsi obtenue est sensiblement la même que celle du coefficient statique obtenu en général en partant du repos et en faisant démarrer la machine à la main. Mais en partant de 0, pour des vitesses croissantes, les lectures sont plus incertaines, des à-coups se produisent inévitablement ; au contraire en laissant la machine s'arrêter sous l'action du freinage provoqué par les forces de frottement on peut suivre facilement la lente progression du couple de frottement.

Il est à noter également que ces expériences de frottement statique ne sont possibles qu'en graissage onctueux.

Les mesures effectuées au cours de ces expériences sont données dans les deux tableaux reproduits ci-contre, elles ont été utilisées :

1° Pour construire des courbes donnant pour chacun des 9 anneaux DD et KS des courbes de variation des coefficients de frottement statique et dynamique en fonction de la pression de contact ;

2° Des courbes où l'on a porté en abscisses soit la moyenne des dénivellations manométriques du palpeur intégrateur exprimées en millimètres d'eau, soit la valeur correspondante de l'indice de rugosité (hauteur moyenne des rugosités le long du contour du palpeur) et en ordonnées, les coefficients de frottement.

Nous ne donnerons pas toutes les courbes de variation du frottement avec la pression. Elles ont toutes la même allure, quel que soit l'état de surface.

Les figures 7 et 8 reproduisent une de ces courbes caractéristiques pour chacun des métaux KS et DD.

	Mesures des états de surface			Mesures des coefficients de frottement pour les pressions de					
	Lectures en mm sur la surface supérieure Ss et sur la surface inférieure Si	Moyenne des lectures	Dénivellation moyenne par rapport au plan parfait	4 kg:cm ²		5 kg:cm ²		6 kg:cm ²	
				dynamique	statique	dynamique	statique	dynamique	statique
Plan parfait	437	437	0						
KS-1	Ss : 480, 440, 518, 520 Si : 462, 465, 490, 448	514 471	77 34 } 55,5	0,143	0,160	0,137	0,157	0,135	
KS-3	Ss : 465, 485, 462, 475 Si : 525, 550, 543, 500	472 530	35 93 } 64	0,157	0,200	0,152	0,199	0,153	
KS-4	Ss : 442, 442, 445 Si : 445, 445, 448	443 446	6 9 } 7,5	0,111	0,141	0,111	0,142	0,113	0,145
KS-5	Ss : 452, 455, 452 Si : 450, 451, 450	453 450	16 13 } 14,5	0,116	0,145	0,118	0,153	0,120	0,160



RELATION ENTRE L'ÉTAT DE SURFACE MICROGÉOMÉTRIQUE ET LES COEFFICIENTS DE FROTTEMENT DE GLISSEMENT (Lubrification onctueuse) **Acier DD**

Composition : demi-dur du commerce ;
 Traitement : trempé à 850° à l'eau, revenu de stabilisation à 150° pendant 1 1/2 h ;
 Usinage : rectification sur machine « Precimax » Lund, grain de meule 46. R, mêmes vitesses que pour acier KS. Les disques DD2 et DD3 ont été excentrés sur le plateau.

Repères	Mesures des états de surface			Mesure des coefficients de frottement pour les pressions de					
	Lectures en mm au micromètre Solex sur la surface supérieure : Ss sur la surface inférieure : Si	Moyenne des lectures	Dénivellation moyenne par rapport au plan parfait	4 kg/cm ²		5 kg/cm ²		6 kg/cm ²	
				dynamique	statique	dynamique	statique	dynamique	statique
D D-1	Ss : 448, 448, 455, 449 Si : 444, 444, 445	450 444	13 } 10 7 }	0,136	0,157	0,134	0,153	0,134	
D D-2	Ss : 732, 736, 745, 689 Si : 730, 710, 722, 715	725 719	288 } 285 282 }	0,141	0,195	0,142	0,190	0,144	
D D-3	Ss : 695, 610, 642, 682, 630 Si : 658, 728, 662, 590, 695	652 666	215 } 222 229 }	0,143	0,187	0,139	0,167	0,139	0,148
D D-4	Ss : 443, 441, 443 Si : 441, 460, 455	442 452	5 } 10 15 }	0,116	0,140	0,117	0,141	0,120	0,144
D D-5	Ss : 445, 442, 445 Si : 445, 445, 445	444 445	7 } 7,5 8 }	0,115	0,148	0,115	0,145	0,117	0,145

On constate sur toutes, que le coefficient de frottement croît très vite à mesure que la pression tend vers 0. Ce fait rend les mesures correctes impossibles aux très faibles pressions.

On peut néanmoins, sans erreur, terminer ces courbes par une branche d'asymptote pour $P = 0$.

En effet, l'action réciproque des épilamens de molécules grasses provoque une résistance au glissement qui conserve une valeur finie au numérateur de la valeur $\frac{F}{P}$ du coefficient de frottement statique ou dynamique, alors que le dénominateur tend vers 0.

Pour comparer les coefficients de frottement et les états de surface nous avons extrait de toutes ces courbes les coefficients de frottement correspondant pour chaque échantillon à la même pression de 5 kg/cm², pression spécifique apparente.

Dans le frottement sec et onctueux le lubrifiant n'est pas en quantité suffisante pour répartir comme dans le graissage visqueux la pression entre les pleins et les creux des surfaces portantes, il y a lieu de procéder à une correction de pression.

Pour ces expériences effectuées avec les aciers DD et KS la forme particulière des courbes de frottement et le choix de la pression d'expérience nous a permis d'éviter cette correction.

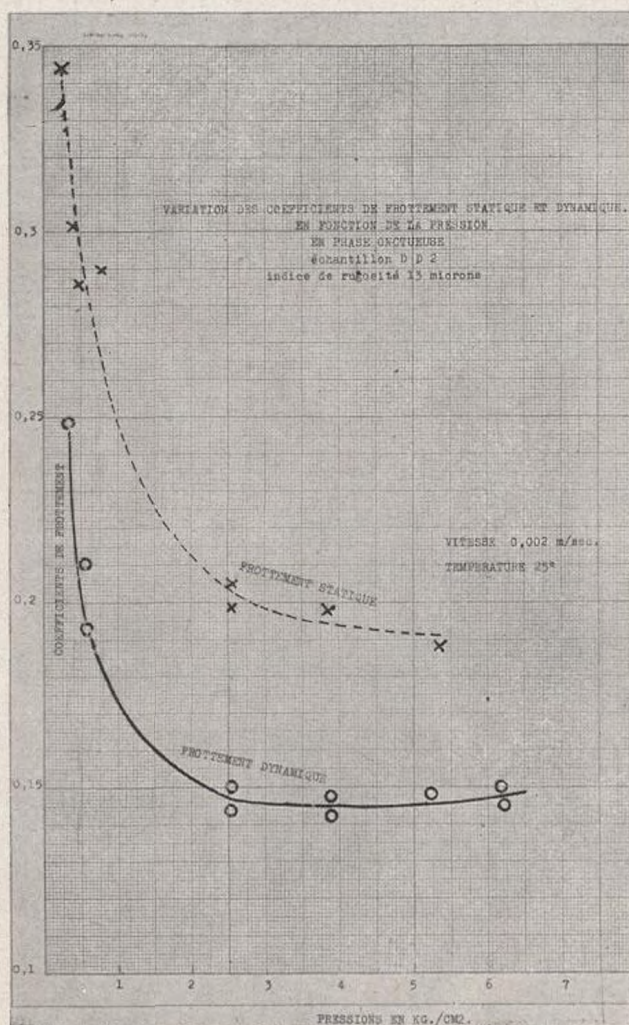


Fig. 7

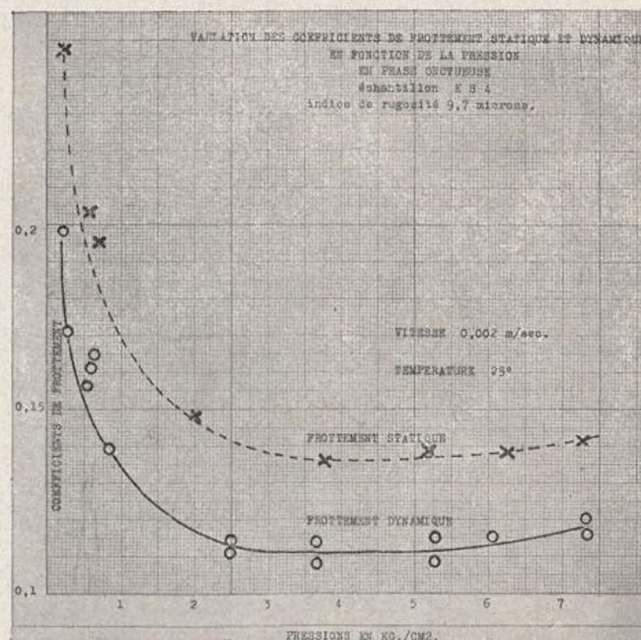


Fig. 8

Entre 2 et 7 kg/cm² toutes ces courbes présentent un palier bien marqué. En choisissant la pression moyenne apparente de 5 kg/cm² sur le palier, nous éliminons la correction de pression.

Cette correction serait nécessaire pour des pressions correspondant aux branches ascendantes ou descendantes de ces courbes.

Comparaison des résultats des mesures de frottement et d'intégration pneumatique des surfaces.

Les courbes reproduites à la figure 9 ont été tracées en portant en abscisses, soit des millimètres de dénivellation de l'intégrateur pneumatique, soit l'indice de rugosité correspondant, en microns et en ordonnées les valeurs des coefficients de frottement.

Le fait que des courbes correctes peuvent être tracées avec les points ainsi déterminés indique qu'il existe une fonction continue entre les deux variables.

Expériences faites sur des anneaux en fonte graphitée, dans la phase de graissage onctueux.

Cette seconde série d'expériences a été exécutée de la façon suivante :

On a pris un anneau de fonte dont l'état de surface était très imparfait, correspondant à une dénivellation moyenne de 525 mm d'eau mesurée au micromètre Solex et par des rodages successifs on a amélioré l'état de surface de cette même piste jusqu'à la dénivellation 0.

Pour chacun des états de surface de 520-500-400-330-300-180-93-10 et 0 mm du micromètre on a tracé la courbe des coefficients de frottement en fonction des pressions et sur chacune de ces courbes on a déterminé les coefficients de frottement correspondant à la pression réelle de 1,3 kg/cm².

Comme précédemment on a tracé une courbe en portant en abscisses les dénivellations moyennes mesurées à l'aide du palpeur pneumatique intégrateur et en ordonnées les coefficients de frottement correspondant aux mêmes états de surface (fig. 10).

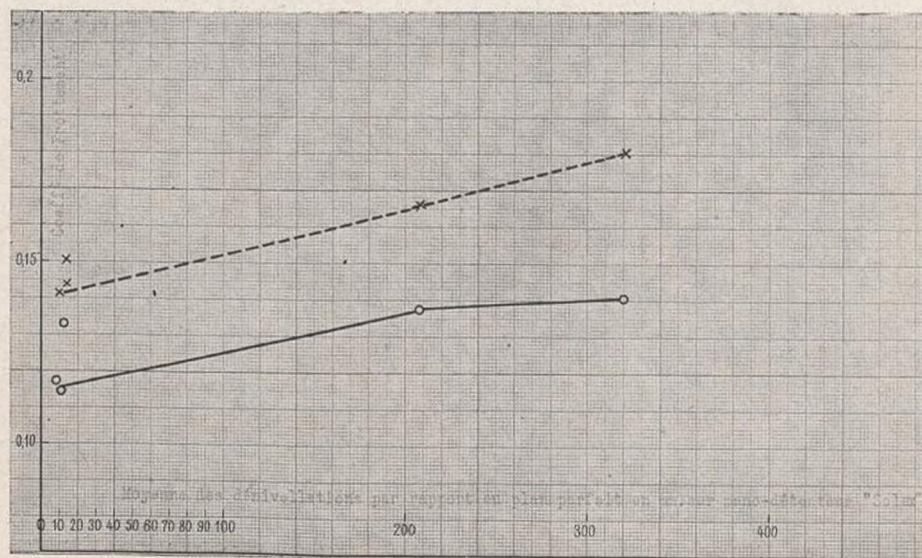


Fig. 9

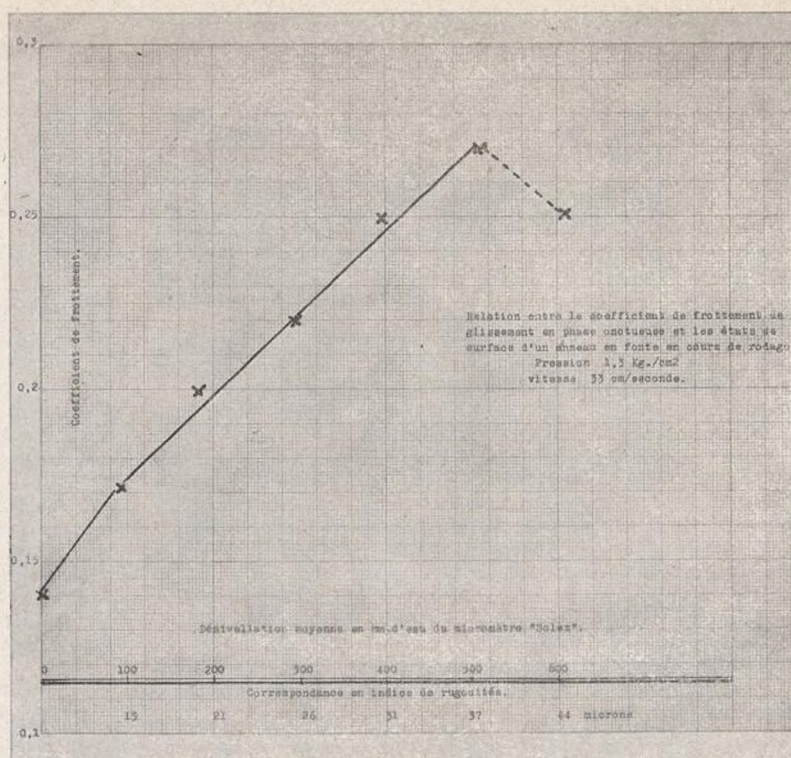


Fig. 10

Applications pratiques de ces expériences

Le résultat de ces expériences présente en métrologie et en mécanique de précision l'intérêt suivant :

Le contrôle de l'exactitude des pièces usinées en série exige le glissement de ces pièces dans des calibres, jauges, tampons de formes les plus diverses.

Sur quantité d'assemblages certaines pièces ont à subir de fréquents montages ou démontages.

Le frottement onctueux se présente même normalement sur quantité de pièces mécaniques en mouvement relatif.

Dans ces différents cas il est intéressant de repérer les coefficients de frottement dont la connaissance permet le calcul des forces de frottement, quand on connaît les surfaces et pressions de contact.

Ces connaissances sont utiles dans la zone normale du frottement et indispensables à connaître pour éviter la zone du grippage, éviter les serrages ou dilatations de pièces entraînant des pressions à partir desquelles le grippage entraîne une usure et détérioration très rapides des pièces.

La relation entre les frottements et l'état de surface étant établis en laboratoire pour les métaux à utiliser :

Le coefficient de frottement exigé par le mécanicien pourra être repéré par lui à l'aide d'une mesure d'état de surface beaucoup plus facile à exécuter qu'une mesure de coefficient de frottement et ce quelle que soit la forme des pièces, laquelle forme rendrait impossible certaines mesures de frottement.

EXPÉRIENCES AVEC FILM LUBRIFIANT

Relation entre l'état de surface et le frottement visqueux

Dans les expériences précédentes nous nous sommes appliqués à n'interposer entre les surfaces frottantes que quelques assises de molécules grasses.

Dans les expériences que nous allons décrire maintenant nous avons recherché le graissage abondant de façon à nous mettre dans les conditions du graissage dit parfait ou visqueux.

Si les expériences dans la phase onctueuse sont faciles à conduire et à interpréter, dans la phase visqueuse il n'en est pas de même, tant à cause de l'imperfection des machines d'essais que de la façon de les utiliser.

Aussi beaucoup de mécaniciens ont abandonné les essais mécaniques des lubrifiants pour reporter toute leur confiance dans des essais physico-chimiques ; quoique utiles nous estimons que ces essais, devraient céder la première place aux essais mécaniques conduits rationnellement.

Pour tenter d'apporter quelque clarté dans ce domaine nous avons étudié au Laboratoire d'Essais une méthode nouvelle dont nous ne vous imposerons pas les calculs et aspects mathématiques, nous ne vous exposerons que le côté expérimental.

Les expériences exécutées pendant trois années avec le frictionmètre Vollet nous ont montré que :

Si nous appelons f le coefficient de frottement dans la phase du graissage parfait (I)

V la vitesse de déplacement ;

T la température du lubrifiant ;

p la pression par cm^2 d'application des surfaces parallèles, nous pourrions écrire :

$$\log f = \text{const} + n \log V + bT - m \log p$$

En adoptant des échelles logarithmiques pour f , V , p et une échelle linéaire pour T la surface qui représente f en fonction de deux quelconques des autres variables sera un plan étant entendu que cette représentation n'est valable que dans la phase du graissage parfait.

En coupant chacun de ces plans correspondant à une vitesse donnée par des plans isothermes $T_n = \text{constante}$ ou isobares $P_n = \text{constante}$ on obtient les réseaux de droites parallèles qui figurent à gauche sur la figure 11 et qui figureront dans les expériences décrites par la suite.

Cette représentation géométrico-logarithmique du frottement lubrifié le simplifie singulièrement dans le cas d'une variable maintenue constante (la vitesse dans le cas présent) mais puisqu'il faut également connaître l'influence de la variation de la vitesse, nous aurons à considérer soit un grand nombre de plans semblables pour diverses vitesses ou trouver une autre représentation correspondant à une géométrie à quatre dimensions.

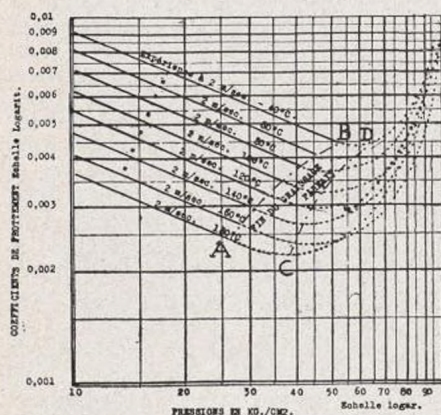


Fig. 11
Résultat des expériences de frottement. Variation de f en fonction de la pression $\log f = A - n \log p$. A constante pour une même vitesse et même température.

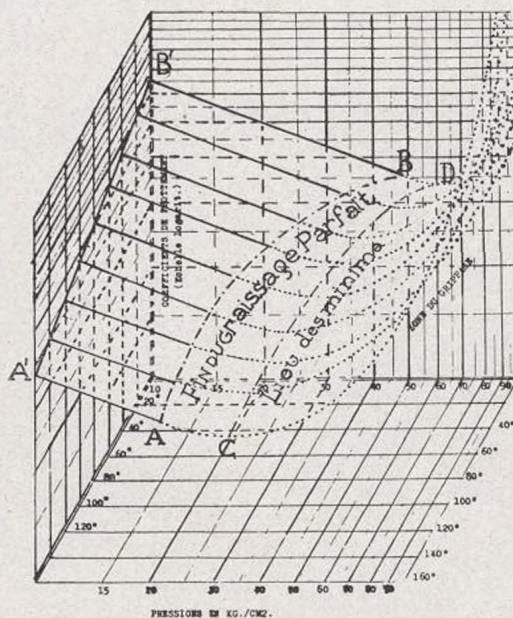


Fig. 12

Représentation géométrique de la fonction $\log f = C' + n \log V + bT - m \log p$. Pour une vitesse V constante on a avec les coordonnées choisies des plans tels que : $AB A'B'$

Abaques représentatives de la phase du graissage parfait

C'est ce qui nous amène à transformer cette représentation géométrique en abaques quadrangulaires.

Nous avons exposé au II^e Congrès du Pétrole la méthode employée pour construire ces abaques en partant des expériences faites à vitesse et température constantes, le temps nous manquerait pour vous exposer la méthode très simple employée, nous vous donnons seulement un résumé de la méthode graphique permettant de les établir.

Construction des nomogrammes.

La construction des nomogrammes en partant des droites $\log f = A - n \log p$ représentant les expériences repose sur l'application de la proposition suivante, dont la démonstration est élémentaire. Etant donnés deux points A et B de coordonnées respectives $x_1 y_1$, $x_2 y_2$ si de l'un de ces points on mène AC quelconque et de B, BD perpendiculaire à AC coupant l'axe des y en D, on a ainsi défini par OC et OD les coordonnées X et Y d'un point M dont le lieu géométrique est une droite de coefficient angulaire $\frac{x_2}{y_1}$.

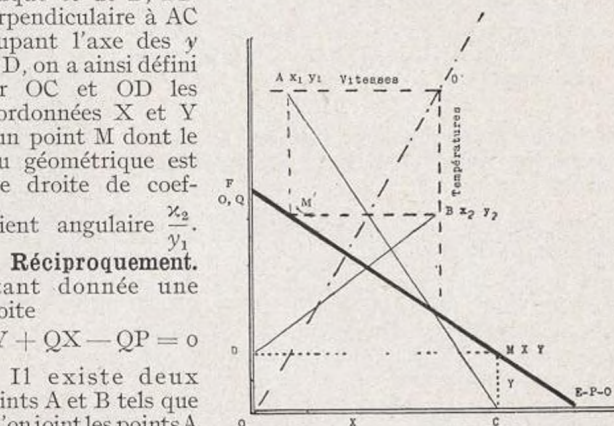


Fig. 12. — Construction des nomogrammes

Réciproquement.

Etant donnée une droite

$$PY + QX - QP = 0$$

Il existe deux points A et B tels que si l'on joint les points A et B à C et D abscisse et ordonnée d'un point M quelconque de la droite, les droites AC et BD sont perpendiculaires.

Corollaire. Sur la droite OO' perpendiculaire à la droite EF on peut choisir un point quelconque O'. Les points A et B seront les coordonnées sur les axes O'A et O'B d'un point M' de la droite EF.

Ce corollaire facilite la construction des nomogrammes en partant des droites expérimentales EF.

(1) Si nous posons :

$$\log f = y$$

$$\log v = x$$

$$\log p = z$$

l'échelle logarithmique des vitesses est en général différente des échelles de f et p que l'on peut se fixer identiques.

On a un système équivalent :

$$y = \text{const} + nx + bT - mz$$

Lorsque deux variables sont maintenues constantes, on a trois systèmes de droites telles que :

$$y = A + nx$$

$$y = B + bT$$

$$y = C - mz$$

Si, comme dans l'exemple donné on ne maintient constante qu'une seule variable on aura de même trois systèmes de plans tels que :

$$y = A + bT - mz$$

Réseau de sécurité

Les expériences exécutées sur le frottement nous font connaître pour chaque vitesse et chaque température, donc sur chaque droite représentative des expériences la fin du graissage parfait, c'est-à-dire les points extrêmes des branches rectilignes. La surface lieu de ces points forme le réseau de sécurité au delà duquel le graissage n'est plus bien assuré et après lequel si l'on augmente l'une des variables par exemple la pression on aborde le grippage.

En définitive l'ensemble de ces abaques et de ces réseaux de sécurité donnent la synthèse du comportement d'un ensemble d'essais de frottement lubrifié pour une huile et deux métaux, soit un nomogramme faisant connaître les valeurs du frottement et ses variations dans le graissage parfait et un réseau de sécurité faisant connaître les possibilités extrêmes du lubrifiant et des métaux avant d'aborder le grippage.

Toutes les expériences que nous avons effectuées jusqu'ici au Laboratoire d'Essais, soit pour comparer des lubrifiants ou des métaux de frottement l'ont été après un rodage parfait des surfaces.

Il était intéressant de voir comment avec des états de surface moins parfaits, se modifiaient les nomogrammes représentatifs de la phase du graissage parfait et les limites de sécurité du graissage.

Dans ce sens nous avons procédé à deux séries d'expériences les unes sur des pistes en fonte, les autres sur un métal anti-friction à base d'étain qui a une excellente réputation en aviation, 90 p. 100 d'étain, 10 p. 100 Sb-Cu-Ni.

Dans les deux cas les expériences ont été conduites de la même façon.

Pour chaque état de surface de l'anneau étudié nous avons constitué un réseau aussi complet que possible d'expériences avec les vitesses admissibles entre 1 m et 5 m/s, les températures entre 50° et 120° C et les pressions entre 5 et 50 kg/cm².

Ces expériences étant reportées graphiquement sur un quadrillage logarithmique nous avons utilisé les branches rectilignes des courbes ainsi tracées pour construire pour chaque état de surface le nomogramme représentatif du graissage parfait et en même temps l'extrémité de ces droites nous permettait de tracer le réseau de sécurité.

Nous n'avons pas cru devoir faire de correction de pression d'application des surfaces frottantes.

Nous avons pensé que le film de lubrifiant relativement épais devait répartir la pression sur toute la surface. Une remarque s'impose néanmoins dans le cas des indices de rugosité élevés. Dans le cas du graissage onctueux la correction de pression est à effectuer dans le sens des pressions plus élevées.

Dans le cas du graissage visqueux et dans le cas de fortes rugosités la surface effectivement lubrifiée est supérieure à la surface théorique, la correction est à faire dans le sens de moindres pressions.

Ces divers nomogrammes donnent une vue d'ensemble de l'influence des rugosités de surface sur les deux facteurs principaux du frottement lubrifié : son rendement mécanique qui

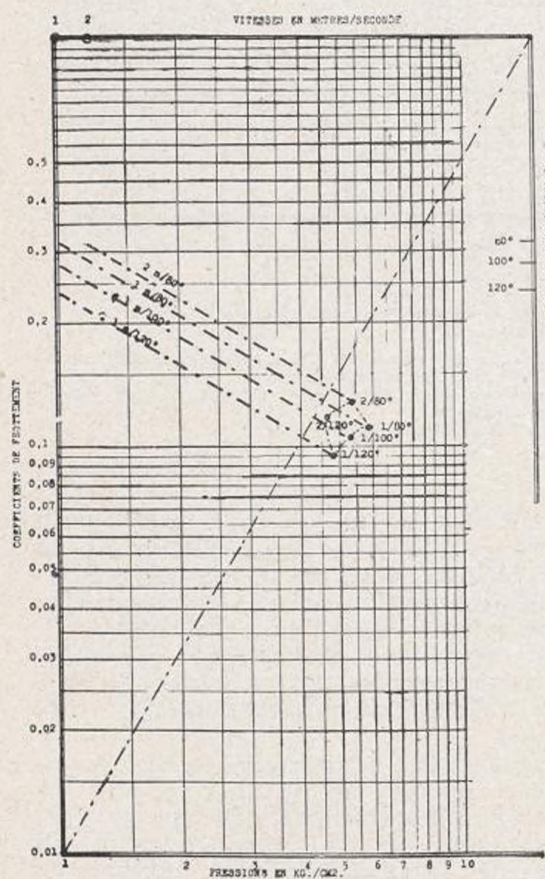


Fig. 13

Relation entre l'état de surface et le frottement lubrifié. 2 anneaux acier nitruré poli parfait. Anneau intermédiaire fonte non rodée

Dénivellation moyenne du micromètre Solex mesurée avec le palpeur pneumatique intégrateur Nicolau 525 mm, $n = 38 \mu$.
Remarques : Inclinaison anormale des droites représentant les expériences dans la phase du graissage parfait. Coefficients de frottement très élevés. Les essais n'ont pu être faits à des vitesses dépassant 2 m/s. Les films de lubrifiant résistent moins à 2 m qu'à 1 m/s, en cas d'état de surface correct c'est généralement le contraire.

Huile utilisée : Spidolène

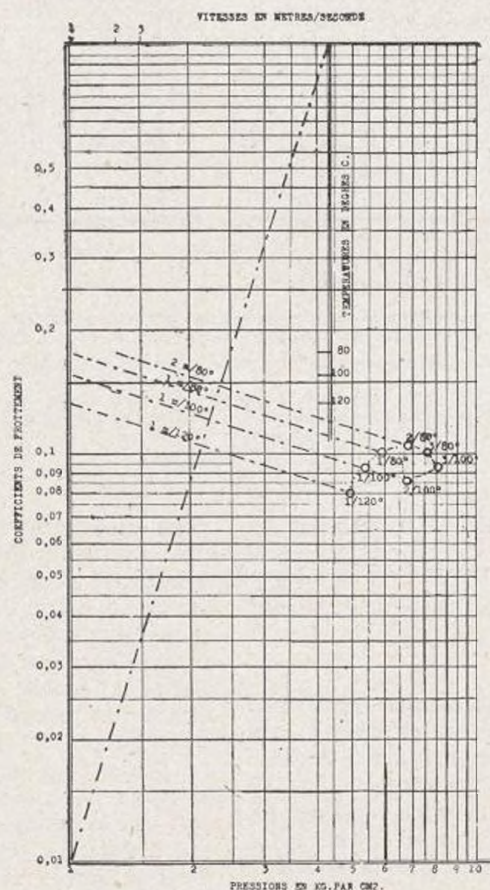


Fig. 14

Dénivellation moyenne du micromètre Solex mesurée avec le palpeur pneumatique Nicolau 220 mm, $n = 22 \mu$.
L'ensemble des coefficients de frottement a baissé. Les essais à 2 m/s sont devenus corrects à 80°-100°. Les essais à 3 m/s devenus possibles ne sont portés qu'à titre indicatif.
Huile utilisée : Spidolène

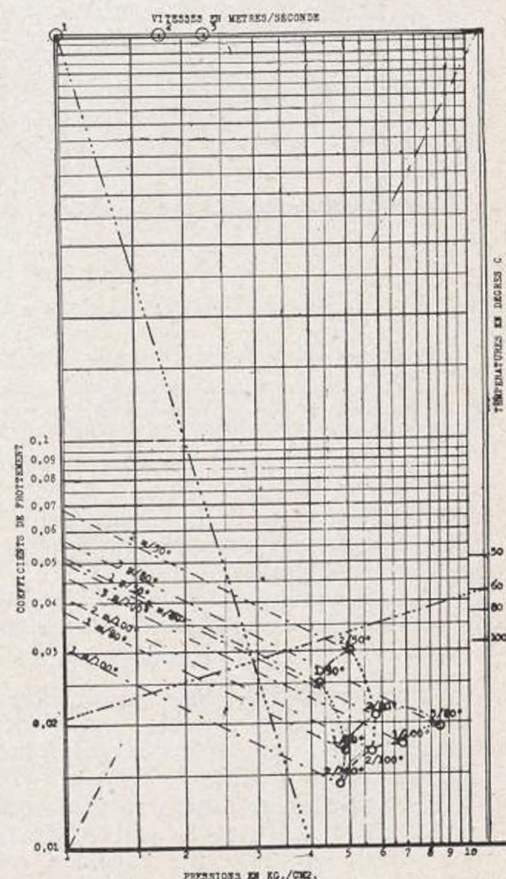


Fig. 15

Dénivellation moyenne du micromètre Solex mesurée avec le palpeur pneumatique Nicolau 70 mm, $n = 14 \mu$.
Les courbes de frottement sont descendues dans les régions des faibles coefficients de frottement, région habituelle du graissage visqueux. Le réseau de sécurité est devenu plus normal en ce sens que les grandes pressions admissibles s'obtiennent avec les plus grandes vitesses. Ce réseau est plus développé et s'étend jusqu'aux pressions de 8 kg/cm². Les expériences n'ont pu être poussées à de plus grandes vitesses ni aux températures supérieures, un grippage ayant détérioré les pistes.
Huile utilisée : Spidolène

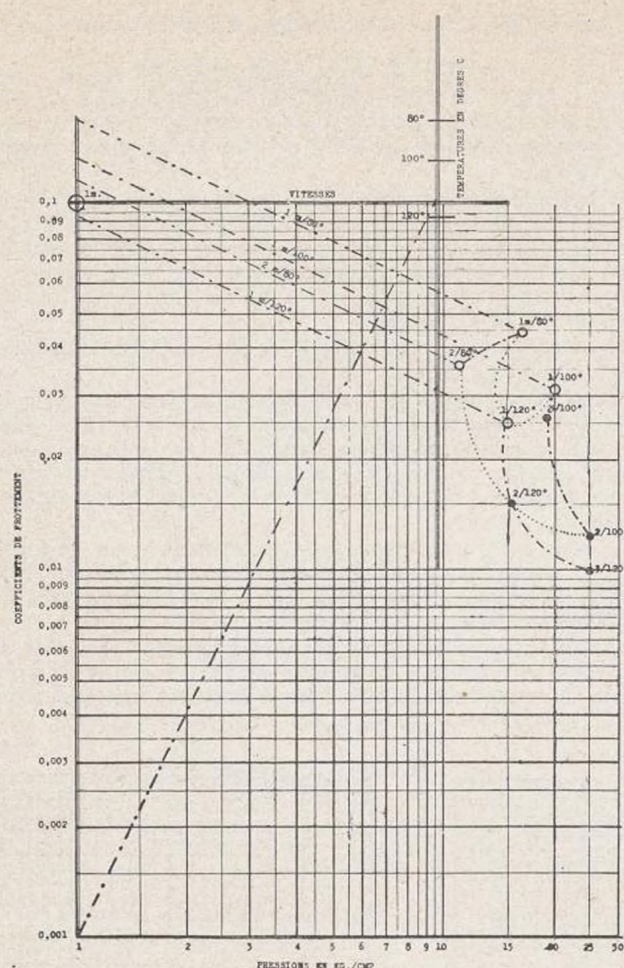


Fig. 16

Relation entre l'état de surface et le frottement lubrifié. 2 anneaux acier nitruré poli parfait, anneau intermédiaire métal antifriction X

Légende commune aux figures 16, 17 et 18 : Fin du graissage visqueux O, Début du grippage ●

Dénivellation moyenne du micromètre Solex mesurée avec le palpeur pneumatique intégrateur Nicolau 420 n = 32 μ.

Coefficient de frottement élevé pour un métal antifriction. Les essais n'ont pu être transcrits en abaque que pour la vitesse de 1 m/s. L'état de surface imparfait se traduit en outre par le désordre relatif du réseau de sécurité et par la situation irrégulière de courbes telles que celles de 2 m 80° C situées au-dessous de 1 m 80° C.

Huile utilisée : Spidolène

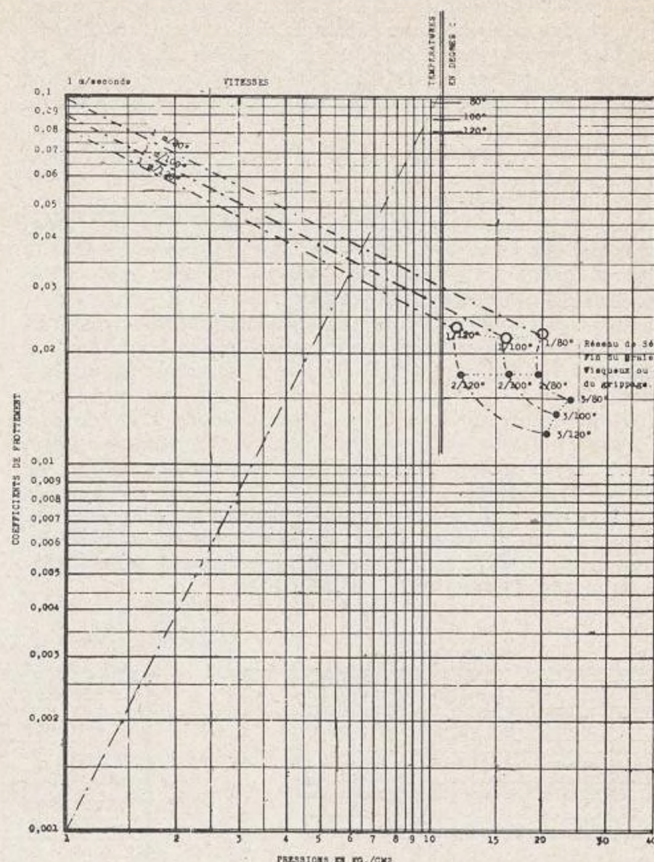


Fig. 17

Avec cet état de surface imparfait les essais corrects, tels qu'ils se présentent en graissage visqueux n'ont pu être effectués qu'à 1 m/s, seule vitesse figurant sur l'abaque.

Les points indiqués sur le réseau de sécurité aux vitesses de 2 et 3 m/s sont les points minima de frottement au delà desquels commence le grippage.

Huile utilisée : Spidolène

doit tendre à obtenir de faibles coefficients de frottement, la sécurité qu'il assure au mécanicien pour les pressions, vitesses, températures élevées.

Ces nomogrammes regroupent 4 variables en réalité ils sont la transcription graphique de la fonction

$$f = \varphi(V, p, T)$$

Nous avons éliminé l'épaisseur du film qui est elle-même une fonction des trois variables précédentes, les exposants qui figureront dans l'expression de cette fonction peuvent se déduire de l'inclinaison des diagonales de nos nomogrammes.

Les expériences faites montrent que la variation sur un même métal de l'état de surface, toutes choses étant égales par ailleurs entraîne une variation continue de la fonction précédente.

Les études plus poussées permettraient de nous faire connaître sur quels facteurs cette influence se fait sentir.

Nous nous contenterons de donner une suite de nomogrammes de frottement que vous verrez évoluer, se transformer au fur et à mesure avec l'état de surface.

Ces nomogrammes se rapportent aux deux séries d'expériences décrites ci-dessus et exécutées sur des pistes en fonte et en métal antifriction.

Comme nous vous le disions tout à l'heure, nous n'avons pas effectué un nombre suffisant d'expériences et d'études

pour tenter d'introduire dans nos abaques une échelle nouvelle des nombres mesurant les états de surface, nous pensons que cela serait possible à condition de ne pas aborder des états de surface donnant des dénivellations trop élevées et en raccordant si possible les mesures faites à l'échelle du micron avec le palpeur intégrateur de M. l'ingénieur en chef Nicolau à des mesures faites à l'échelle atomique pour les états de surface physico-chimiques mesurés à l'aide de mesures photo-électriques ou de diffraction électronique.

Ces expériences peuvent être utilisées pour établir avec les mesures de frottement exécutées aux mêmes vitesses et aux mêmes pressions des courbes semblables à celles qui vous ont été présentées en frottement onctueux, reliant les coefficients de frottement et les dénivellations moyennes mesurant les états de surface.

Conclusion

L'ensemble de ces expériences, tant en graissage onctueux, qu'en graissage visqueux montre qu'il existe des relations pouvant se traduire par des fonctions continues entre l'état de surface microgéométrique et le frottement de glissement.

Le frottement lui aussi intègre les irrégularités des surfaces frottantes sur toute leur étendue sans omettre un seul point, néanmoins l'inspection des courbes semble indiquer une

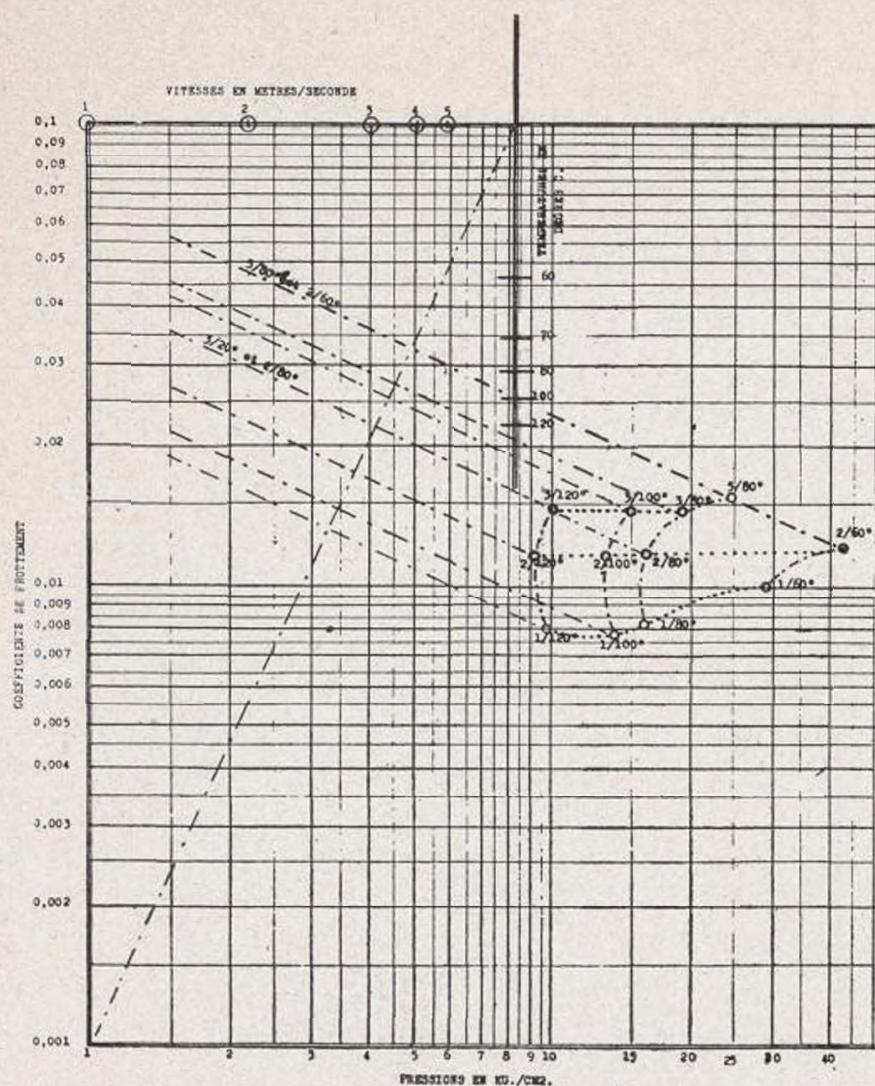


Fig. 18. — Relation entre l'état de surface et le frottement lubrifié
2 anneaux acier nitruré poli parfait. Anneau intermédiaire métal antifricition X
Dénivellation moyenne du micromètre Solex mesurée avec le palpeur pneumatique intégrateur Nicolau O.
Huile utilisée : Spidoline

plus grande sensibilité pour la méthode pneumatique que pour la méthode du frottement.

Ces expériences si imparfaites et si réduites soient-elles montrent un champ très vaste à exploiter, en opérant sur divers métaux, en répétant de nombreuses expériences pour déduire les lois exactes de la relation notamment dans le graissage onctueux, et dans le graissage parfait en étudiant particulièrement les états de surface voisins de la dénivellation O. Il sera également intéressant d'appliquer les méthodes photo-électriques, ou de diffraction électronique pour étudier les états de surface améliorés par le rodage et le glaçage.

Nous avons été heureux, en effectuant ces expériences, en liaison entre le Laboratoire d'Essais et le Service des Fabrications d'Armement, d'avoir pu donner un exemple d'utile collaboration entre deux grands laboratoires français. Nous remercions la Société Française des Mécaniciens de nous avoir donné l'occasion d'en publier ici les résultats.

J. PRÉVOST,

Ingénieur des Arts et Manufactures
Physicien au Laboratoire d'Essais
du Conservatoire national des Arts et Manufactures,
Chef d'escadron de réserve
au Laboratoire central des Fabrications d'Armement.

BIBLIOGRAPHIE

- La structure des surfaces métalliques, par G.-A. BOUTRY. *Métaux et Corrosion*, vol. XIII, n° 152, avril 1938.
Application du micromètre Solex à la mesure de l'état des surfaces, par M. P. NICOLAU. *Mécanique*, n° 271, mars-avril 1937.
Structure moléculaire et onctuosité des lubrifiants, par Jean-J. TRILLAT. *Revue générale des Sciences*, février 1937.
Machine à essayer les huiles et à mesurer les frottements (système Vollet), par M. J. PRÉVOST. *Recherches et Inventions*, n° 267 de février 1937.
Machine H. Vollet pour les essais mécaniques des lubrifiants et des divers métaux de frottement, par M. J. PRÉVOST. *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, nos 5-6 de mai-juin 1937.
Présentation monographique des essais mécaniques d'huiles et métaux antifricition. *Mémoire présenté en juin 1937*, par M. J. PRÉVOST, au II^e Congrès Mondial du Pétrole, section II.
Travaux récents sur le frottement médiat, par J. M. PRÉVOST. *Technique Moderne*, t. XXX, n° 18, septembre 1938.

Extrait de « MÉCANIQUE »
Bulletin de la Société Française des Mécaniciens
Juillet-Août 1939
Édité par « Science et Industrie »



