



**HAL**  
open science

# Le frottement et l'usure dans le cadre de la physique des surfaces

André Marcelin

► **To cite this version:**

André Marcelin. Le frottement et l'usure dans le cadre de la physique des surfaces. *J. Phys. Phys. Appl.*, 1951, 12 (S8), pp.1-16. 10.1051/jphysap:019510012080100 . jpa-00212577

**HAL Id: jpa-00212577**

**<https://hal.science/jpa-00212577>**

Submitted on 4 Feb 2008

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# LE JOURNAL DE PHYSIQUE

ET

## LE RADIUM

PHYSIQUE APPLIQUÉE

### LE FROTTEMENT ET L'USURE DANS LE CADRE DE LA PHYSIQUE DES SURFACES

Par M. ANDRÉ MARCELIN.

Docteur ès Sciences,  
Laboratoire Chimie Physique.

**Sommaire.** — Il est rarement traité du frottement dans les revues scientifiques; de l'usure, il n'est jamais question; le frottement et l'usure rentrent cependant dans le cadre de la Physique des surfaces car, si le frottement relatif de deux surfaces solides débute par un accrochage des aspérités, tandis que l'usure résulte d'abord de la décapitation de ces aspérités, le phénomène change rapidement d'aspect pour devenir un corps à corps à l'échelle moléculaire.

L'évolution dans le temps du frottement et de l'usure permet de qualifier les états de surface, d'apprécier la qualité des métaux de frottement et de déterminer les lubrifiants les mieux appropriés aux diverses applications.

Il paraît logique d'admettre que l'ordre de grandeur du rayon d'action des champs de forces superficiels des métaux se confond avec l'épaisseur d'un stratofilm susceptible de neutraliser ces derniers au point que le coefficient de frottement ait la même valeur, quels que soient les métaux sous-jacents. Cet ordre de grandeur est le millième de micron.

#### I. Les lois du frottement :

##### Le frottement sec et les trois régimes du frottement lubrifié.

mou sur le métal dur ait nivelé la surface de ce dernier, ce qui modifierait les données du problème,

1. **Le frottement sec.** — On est tenté d'attribuer le frottement sec à l'accrochage réciproque des aspérités présentées par les surfaces frottantes; cette interprétation est valable au départ, mais après un temps de fonctionnement généralement court, les aspérités ayant été décapitées, le frottement s'exerce suivant un plan (*fig. 1*) sur lequel viennent affleurer les aspérités tronquées appartenant aux deux surfaces; il n'y a plus alors d'accrochage, et c'est dans des actions intermoléculaires que doit être cherchée la cause du frottement; tel paraît être du moins le cas le plus général; il s'ensuit qu'il semble préférable que les duretés des métaux en présence ne soient pas trop différentes, de manière à ce que la décapitation des aspérités puisse se poursuivre suivant les deux surfaces; s'il en était autrement, c'est-à-dire si l'un des métaux était très dur comparativement à l'autre, l'usure du métal mou se poursuivrait indéfiniment, où tout au moins jusqu'à ce qu'un apport de métal

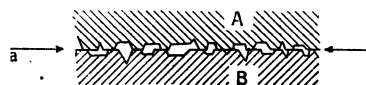


Fig. 1.

Le frottement sec est régi par la loi de Amontons-Coulomb :

La force  $F$  qu'il faut vaincre pour que deux pièces frottantes entrent en mouvement relatif est égal au produit du coefficient de frottement  $K$ , par la charge  $P$  qui presse les deux surfaces frottantes l'une contre l'autre

$$F = KP \text{ kg.}$$

Le frottement est donc indépendant de la surface de portée et de la vitesse relative.

Il revient au même de dire que le frottement est proportionnel à l'étendue de la surface frottante et à la charge unitaire

$$F = KS \frac{P}{S}.$$

La surface s'élimine et l'on retrouve le premier énoncé.

L'expérience montre que la loi est exacte, et non pas seulement approchée; toutefois, son champ d'application se trouve singulièrement réduit par cette condition restrictive qu'elle n'est applicable qu'à la condition que les surfaces frottantes restent inchangées, c'est-à-dire qu'il n'y ait ni déformation permanente ni usure. L'un des buts que nous nous sommes proposés était précisément de rechercher ce qu'il advient lorsqu'il en est autrement.

**2. Le frottement lubrifié. Le régime hydrodynamique.** — Le frottement lubrifié peut se poursuivre dans trois régimes distincts, régis chacun par des lois qui leur sont propres.

De ces trois régimes, le régime hydrodynamique, régime du frottement visqueux, est celui qui a fait l'objet des études les plus anciennes : l'arbre qui tourne vite flotte sur le film liquide, un peu à la manière d'un aquaplane, porté par la pression qui se développe dans le coin d'huile compris entre les surfaces de l'arbre et du palier, décentrées l'une par rapport à l'autre sous l'action de la charge. Les théories bien connues de Reynolds, Gümbel, etc. ne sont que l'application de la loi de Newton au système arbre-palier décentré et permettent de calculer le couple de frottement et le décentrement relatif, compte tenu de la longueur de l'arbre, de son diamètre, du jeu, de la viscosité du lubrifiant et de la vitesse.

La loi de Newton, appliquée à une feuille liquide comprise entre deux surfaces parallèles glissant l'une par rapport à l'autre, s'exprime par la relation :

$$F = VS \frac{dv}{dh},$$

où  $F$  désigne la force de frottement,  $V$  le coefficient de viscosité,  $S$  la surface suivant laquelle s'exerce le frottement et  $\frac{dv}{dh}$  le rapport de la vitesse relative  $dv$ , à la distance  $dh$  des deux surfaces.

L'usure est nulle dans le régime hydrodynamique; il peut cependant en être autrement lorsqu'il s'agit d'une rotation rapide et d'un lubrifiant très visqueux; le frottement, en dernière analyse, consiste en effet en une traction tangentielle qu'exerce le lubrifiant sur les molécules ou parcelles qui occupent les surfaces des corps solides en présence; si cette traction est supérieure à la cohésion de ces molécules ou parcelles, il peut y avoir arrachement de ces dernières; cela peut se produire notamment dans le cas d'un métal antifriction de nature composite présentant peu de cohésion, ou dans le cas d'un antifriction dont l'élévation de température a provoqué le ramollissement.

Il peut aussi arriver, en régime hydrodynamique, que des contraintes résultant de mauvais alignements

ou de vibrations d'un arbre qui ne « tourne pas rond », apportent des perturbations en provoquant des ruptures du film liquide, susceptibles d'entraîner des contacts solides accidentels; dans ce cas, c'est à ces contacts qu'il convient d'attribuer les usures, le régime hydrodynamique proprement dit étant hors de cause.

**3. Le régime du film liquide minimum.** — Lorsque l'arbre tourne trop lentement ( $1 \text{ t} : \text{s}$ ) pour que s'exerce encore la portée hydrodynamique, on pourrait s'attendre à ce qu'il vienne se poser sur le palier.

L'expérience montre qu'il n'en est rien et, au contraire, que l'arbre reste porté par un film liquide minimum, sorte de coussin fluide, qui résiste à la charge qui devrait l'écraser jusqu'à ce que cette charge dépasse une certaine valeur critique (il s'agit d'un véritable point physique) pouvant atteindre, ou même dépasser,  $100 \text{ kg} : \text{cm}^2$ .

Notre microfilmomètre nous a permis de mettre directement en évidence ce coussin fluide et de mesurer son épaisseur ainsi que sa charge de rupture pour toutes sortes de lubrifiants. L'ordre de grandeur de l'épaisseur du film liquide minimum est le micron, mille fois supérieur à l'ordre de grandeur des molécules intéressées.

Lorsqu'on dépasse la charge de rupture du film liquide minimum, celui-ci cède tout d'un coup et les surfaces entre lesquelles il s'intercalait viennent en contact, ou plus exactement en pseudocontact, puisque subsistent alors, fortement adhérentes aux surfaces, quelques assises moléculaires, le plus souvent une seule, constituant les stratofilms.

Nous pensons, sans donner cette explication pour certaine, que l'épaisseur du film liquide minimum mesure la profondeur de l'association moléculaire, dont le taux statistique est fonction de la température, lorsque cette association prend racine sur les surfaces métalliques. Dans cette hypothèse, le frottement consisterait en un mouvement interne au sein de l'association moléculaire, alors que le frottement visqueux consisterait en un mouvement relatif entre des associations de molécules.

Cette interprétation expliquerait que le frottement obéisse à des lois différentes dans le régime hydrodynamique et dans le régime du film liquide minimum.

L'expérience montre que l'usure est nulle dans le régime du film liquide minimum qui est par nature le régime des vitesses lentes, sans contact entre les surfaces et pratiquement sans frottement.

**4. Le régime des stratofilms.** — Dans ce régime, la charge ayant été suffisante pour écraser le film liquide minimum, le frottement s'exerce au travers de deux glacis de molécules solidement adhérents aux surfaces, ces glacis pouvant être

formés par une ou plusieurs couches monomoléculaires (*stratofilms* d'ordre 1, 2, 3, ...).

Ce régime régit, par exemple, le frottement d'une sphère sur un plan, en bain d'huile, même sous faible charge. Nous ignorons si le *stratofilm* épouse les aspérités de la surface ou si, au contraire, il nivelle cette dernière à la manière d'un verglas sur une route (fig. 2).

Quoi qu'il en soit, le régime du *stratofilm primaire* est comparable au frottement sec, à cette différence près que la surface métallique est remplacée par une couche monomoléculaire du lubrifiant dont les molécules, par leur adhérence au métal, participent en fait à l'état solide de ce dernier; toutefois, le coefficient de frottement lorsqu'il y a *stratofilm* est très inférieur au coefficient de frottement à sec.

Hardy et I. Doubleday ont montré que la loi de Amontons-Coulomb s'applique encore dans ce cas, mais leurs expériences portaient sur le frottement relatif d'une sphère et d'un plan sous faible charge, c'est-à-dire dans le cadre des conditions restrictives



Fig. 2.

mentionnées à propos du frottement sec, à savoir : ni déformation ni usure des pièces frottantes; leurs expériences étaient limitées à la mesure unique de la force « de décollement » nécessaire pour amorcer le glissement; dans ce cas encore, nous nous sommes proposé d'étudier le frottement dans le régime des *stratofilms*, non pas seulement au démarrage mais en marche, et dans le cas où les charges sont assez élevées pour qu'il y ait usure des pièces frottantes.

M. Woog a mis en évidence le rôle des couches monomoléculaires de lubrifiant adhérentes aux parois métalliques, et a établi la distinction entre le frottement *onctueux* qui s'exerce entre les surfaces solides lorsque le film liquide est écrasé et le frottement *visqueux* réalisé lorsqu'il y a film liquide; peut-être n'est-il pas inutile de rappeler que la *viscosité* est une propriété physique mesurable, alors que l'*onctuosité*, ainsi que le fait d'observer M. Woog, est une qualification qui englobe un certain nombre de propriétés distinctes; autrement dit, que le « coefficient de viscosité » est une réalité, mais que ce serait un non sens que de parler d'un « coefficient d'onctuosité ».

Le frottement dans le régime des *stratofilms* est un frottement *onctueux*; le mot *stratofilm* suggère la multiplicité des couches monomoléculaires superposées à compter du *stratofilm primaire* directement adhérent à la surface solide considérée.

Le frottement et l'usure, à sec et dans le régime des *stratofilms*, sont seuls étudiés dans ce Mémoire, à l'exclusion, par conséquent, du frottement dans le

régime hydrodynamique et dans le régime du film liquide minimum.

## II. Le frictiographe à mouvement alternatif.

Le frottement sec, ainsi que le frottement lubrifié dans le régime des *stratofilms*, ont été étudiés à l'aide de notre frictiographe à mouvement alternatif.

Si loin que soit poussée la finition de deux surfaces portant l'une sur l'autre, le contact de deux surfaces, à sec ou dans le régime des *stratofilms*, n'est pas réalisable à l'échelle moléculaire; le contact, sous faible charge, s'établit par quelques points, en principe trois; lorsque la charge augmente, chacun des points de contact devient une petite surface, en même temps que le nombre de ces points augmente.

Nous appelons frottement élémentaire le frottement en un de ces points de contact.

Le frottement peut donc être considéré comme l'intégration de frottements élémentaires et nous nous sommes proposé de réaliser et d'étudier un frottement élémentaire obtenu en faisant porter, comme l'avaient fait Hardy et I. Doubleday, une surface sphérique sur un plan. Il va de soi que là où une charge considérable serait nécessaire pour obtenir une charge unitaire élevée sur une grande étendue, une charge de quelques centaines de grammes suffit pour obtenir une charge unitaire élevée dans un frottement élémentaire. C'est ainsi qu'une charge de 900 g représente 90 kg : cm<sup>2</sup> pour une surface de contact de 1 mm<sup>2</sup> et atteint 360 kg : cm<sup>2</sup> pour une surface de contact égale au quart d'un millimètre carré.

Nous avons bientôt reconnu qu'il était difficile d'obtenir des surfaces planes identiques dont la finition soit susceptible d'être exactement décrite; nous avons alors substitué aux plans, les surfaces cylindriques d'arbres en acier dont les modes de finition pouvaient être définis, le frottement s'exerçant suivant une génératrice de ces arbres; à partir du moment où nous avons fait cette substitution, les écarts expérimentaux se sont trouvés réduits dans une forte proportion.

Les pièces frottantes que nous utilisons ont toujours été, d'une part, des arbres cylindriques en acier de 34 mm de diamètre et de 80 mm de longueur évidés sur toute leur longueur, et d'autre part, des molettes de 15 mm de diamètre à profil circulaire mesurant 5 mm de rayon de courbure.

Nos expériences antérieures nous ayant appris que les conditions favorables à la stabilisation du frottement lubrifié dans le régime des *stratofilms* étaient : une charge élevée, des vitesses lentes, avec des arrêts et des départs fréquents, nous avons réalisé ces conditions dans une machine à mouvement alternatif dans laquelle la fréquence des alternances est de l'ordre de quelques unités par seconde.

La molette porte sur l'arbre de telle façon que



Après un certain temps de frottement, apparaît sur la molette une facette approximativement

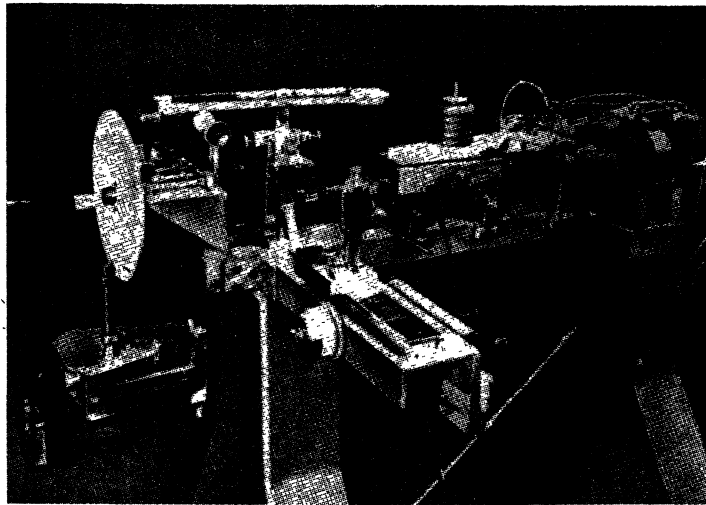


Fig. 4.

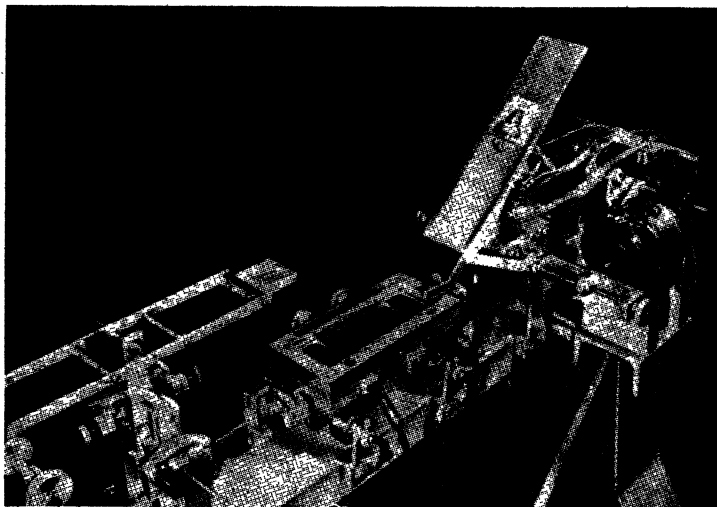


Fig. 5.

elliptique dont la surface, exprimée en millimètres carrés servira de mesure à l'usure.

A titre d'exemple sont présentées deux séries de frictiogrammes (fig. 6) qui se rapportent l'une au frottement sec, mettant en évidence l'augmentation du frottement au fur et à mesure que l'expérience se poursuit, l'autre au frottement lubrifié, mettant en évidence la diminution du frottement au fur et à mesure que l'expérience se poursuit, toutes choses égales dans l'une et l'autre expérience. Ces aspects du frottement sec et du frottement lubrifié ont un caractère général.

### III. Évolution du frottement et de l'usure à sec.

Le schéma du frottement sec est, en principe,

Frictiogrammes montrant le frottement d'une molette en anti-friction E 2  
Évolution en fonction du nombre d'alternances

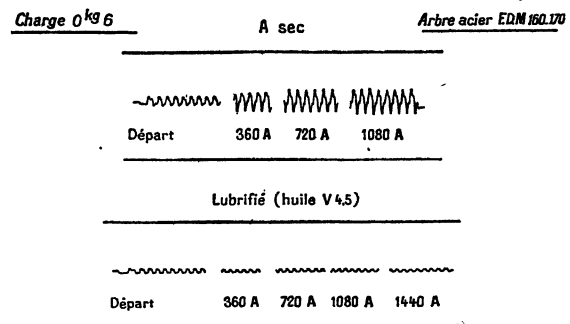


Fig. 6.

très simple (fig. 7); les deux surfaces frottantes, dès qu'elles sont nivelées, peuvent être considérées comme liées l'une à l'autre par un nombre immense de chaînes moléculaires identiques, et le mouvement relatif des surfaces implique nécessairement la rupture de ces chaînes en leur point le plus faible; cette chaîne comporte :

1° Une liaison entre la molécule ou parcelle appartenant au solide A, et les molécules ou parcelles voisines;

2° Une liaison entre la molécule ou parcelle *a* et la molécule ou parcelle *b* appartenant au solide B;

3° Une liaison entre la molécule ou parcelle *b* et les molécules ou parcelles voisines appartenant au solide B.

Si la rupture de la chaîne se fait au niveau 1, il y a arrachement de la molécule ou parcelle *a*, qui reste adhérente au solide B; si elle se fait au niveau 3, la molécule ou parcelle *b* vient adhérer au solide A;

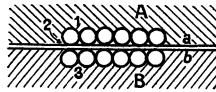


Fig. 7.

il est évident que le transport des molécules ou parcelles appartenant au corps A sur le corps B, a pour effet de modifier la surface de B et, par suite, de modifier les conditions de frottement qui devient un frottement AA; il en est de même s'il y a transport de molécules ou parcelles de B sur A, auquel cas le frottement devient un frottement BB. L'autosoudure et, par suite, le grippage relatif de deux surfaces devenues A et A ou B et B est à prévoir. La soudure *a, b* au niveau 2 entraîne également le grippage. Une égale résistance des liaisons 1 et 3, toutes deux inférieures à la résistance de la liaison 2, peut donner lieu à un arrachement de métal et à la formation d'un dépôt pulvérulent. Un métal qui se prête sans y opposer une trop grande résistance à l'arrachement unitaire des parcelles ou molécules qui occupent sa surface, s'use sans qu'il y ait grippage; cela semble être le cas des métaux dits « antifrictions ». Ces différents aspects : frottement sec sans usure; frottement sec avec usure, mais sans grippage; transports métalliques de A sur B ou de B sur A (on a souvent observé des transports de bronze sur la surface d'un arbre en acier); grippage; formation de dépôts pulvérulents, ont tous été observés.

Une élévation de la température résultant de la chaleur dégagée par le frottement semble intervenir en favorisant, soit le grippage, soit l'arrachement unitaire des molécules ou parcelles superficielles par suite d'une fusion locale des métaux de frottement.

Remarquons que le couple de métaux frottants

se trouve placé dans une atmosphère gazeuse, l'air en général, et que l'oxydation des surfaces frottantes qui se renouvellent au fur et à mesure que l'usure se poursuit, modifie nécessairement les conditions du frottement. Ainsi qu'on va le voir,

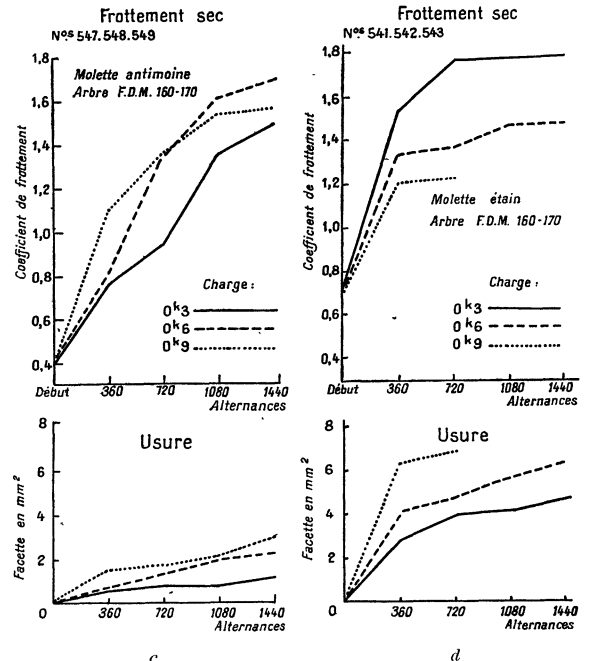
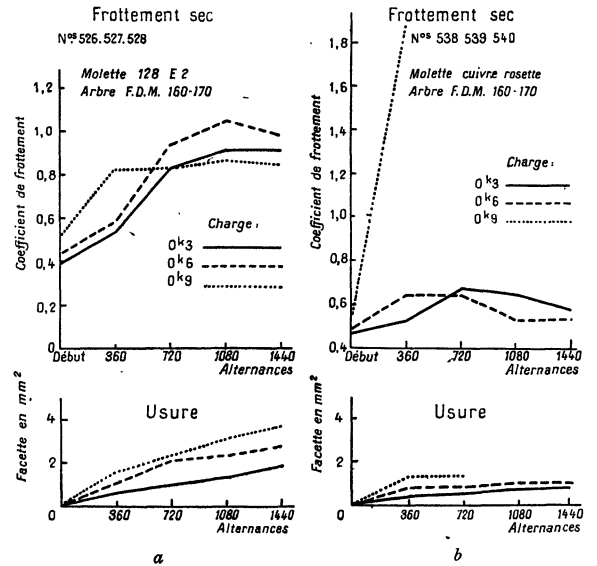


Fig. 8.

l'évolution du frottement et de l'usure de métaux différents frottant sur des arbres semblables sont pratiquement imprévisibles, mais caractéristiques de chacun des couples de métaux étudiés.

Nous avons étudié un alliage antifriction classique, désigné E<sub>2</sub> de composition Cu<sub>10</sub> Sb<sub>10</sub> et Sn solide, ainsi que les trois métaux purs constituant

cet alliage (fig. 8 a, b, c et d) et nous présentons les courbes représentant l'évolution du coefficient de frottement et de la facette d'usure, à sec, en fonction de la charge appliquée sur la molette et du nombre d'alternances. L'arbre était en acier nickel-chrome demi-dur. Nous ne portons sur nos graphiques que les points expérimentaux, et nous les joignons par des traits rectilignes. Ce qui frappe d'abord, c'est la coïncidence presque parfaite des coefficients de frottement au départ, pour E<sub>2</sub>, et plus parfaite encore pour les trois constituants de l'alliage. Ils ont pour valeurs respectives : de 0,4 à 0,5 pour l'alliage E<sub>2</sub>, 0,5 pour le cuivre, 0,4 pour l'antimoine et 0,7 pour l'étain. La loi de Amontons-Coulomb s'applique donc parfaitement au départ; elle ne s'applique plus ensuite puisque les courbes divergent : pour l'alliage E<sub>2</sub>, le coefficient de frottement, partant de 0,4 à 0,5, croît en fonction du nombre d'alternances, mais tend vers une valeur limite de l'ordre de 0,9 atteinte après 720 alternances. Ce résultat est très important car il démontre que l'alliage antifriction, à sec, ne peut pas donner lieu à un blocage; le classement des ordonnées des trois courbes ne suit pas le classement des charges. L'évolution de la facette d'usure se poursuit suivant une loi approximativement linéaire qui ne semble pas être liée à l'évolution du coefficient de frottement. Les coefficients angulaires des droites représentatives de l'usure se classent dans le même ordre que les charges appliquées.

Les courbes relatives au constituant cuivre pur permettent une observation intéressante : alors que le coefficient de frottement paraît indépendant de la charge, lorsqu'elle celle-ci reste inférieure à 600 g, on obtient presque instantanément le grippage sous 900 g; il y a donc, avec le cuivre pur, une charge critique à ne pas dépasser; au-dessous de cette charge, le cuivre se comporte bien.

Avec l'antimoine, la convergence des courbes, au départ, est remarquable, mais le coefficient de frottement s'élève sans interruption au fur et à mesure que l'expérience se poursuit, sans qu'une limite ait été atteinte.

Avec l'étain, la convergence des courbes, au départ, est également remarquable, mais le coefficient de frottement atteint une valeur limite après 360 alternances et, par la suite, conserve cette valeur; c'est sans doute ce caractère qui réapparaît dans l'alliage E<sub>2</sub>. L'usure avec l'étain pur est élevée.

Une étude détaillée de l'évolution de l'usure durant les premières alternances a donné des résultats inattendus (1) :

Partant pour chaque nouvelle expérience d'un contact neuf, on s'est proposé de mesurer les surfaces des facettes d'usure, non pas comme précé-

demment après 360 alternances, mais après une seule alternance, puis après 2, 5, 10, 20, 30 et 60 alternances. Ces expériences ont été faites avec une molette de bronze frottant sur un arbre en acier à roulement trempé très dur. Les résultats sont représentés par des courbes (fig. 9).

*Il est remarquable, sous 300 g de charge par exemple, qu'une usure égale aux deux tiers de celle qui sera obtenue après 60 alternances se trouve déjà réalisée après une seule alternance.*

Sous 300 g de charge, on remarque :

- 1° Une usure presque instantanée obtenue après une seule alternance (facette 0,84);
- 2° Une progression rapide de l'usure jusqu'à 10 alternances (facette 1,10);
- 3° Une progression plus lente jusqu'à 60 alter-

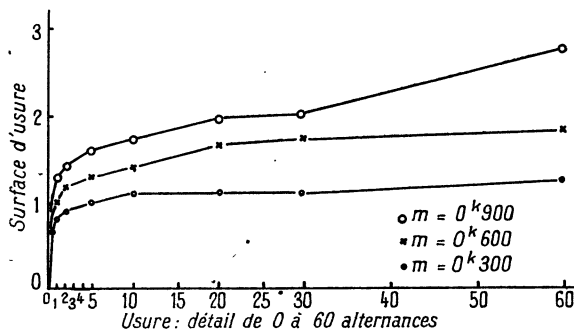


Fig. 9.

nances (facette 1,20), l'usure paraissant alors tendre vers la saturation.

Sous 600 g de charge :

- 1° Une usure presque instantanée après une alternance (facette 1,03);
- 2° Une progression rapide de 1 à 20 alternances (facette 1,45);
- 3° Une progression lente de 1 à 60 alternances (facette 1,60).

Sous 900 g de charge :

- 1° Une usure presque instantanée après une alternance (facette 1,23);
- 2° Une usure progressive de 1 à 30 alternances (facette 1,84);
- 3° Une progression rapide de l'usure de 30 à 60 alternances (facette 2,50); parallèlement à cette progression de l'usure, on a noté une aggravation, du frottement; le grippage était proche; la charge de 900 g était donc, dans les conditions de l'expérience, une charge critique à ne pas dépasser.

*Cette notion de charge critique dans le frottement sec est à retenir.*

(1) Cette étude a été faite sous ma direction, par MM. Bodin, Bry et Cardinal, élèves ingénieurs à l'École Supérieure de l'Armement.



#### IV. Évolution du frottement et de l'usure en bain d'huile, dans le régime des stratofilms.

Le schéma du frottement lubrifié dans le régime des stratofilms est en apparence plus compliqué que celui du frottement sec, puisqu'il fait intervenir le

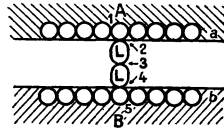


Fig. 10.

facteur lubrifiant (fig. 10); en réalité il est plus simple, et cela pour deux raisons :

La première est l'absence du facteur « atmosphère gazeuse » dont le rôle était mal défini dans le frottement sec;

La seconde est que le schéma ne laisse prévoir aucune possibilité de transfert de matière de l'un à l'autre des deux métaux frottants; l'expérience le confirme et c'est là un fait essentiel.

Comme dans le cas du frottement sec, les deux surfaces frottantes peuvent être considérées comme reliées l'une à l'autre par un nombre immense de chaînes moléculaires identiques, et le mouvement relatif des surfaces implique nécessairement, comme dans le cas du frottement sec, la rupture de ces chaînes en leur point le plus faible.

La chaîne élémentaire comporte :

- 1° Une liaison entre la parcelle ou molécule *a* appartenant au solide A et les molécules ou parcelles voisines;
- 2° Une liaison entre la molécule *a* et une molécule du lubrifiant *L*;
- 3° Une liaison entre deux molécules *L* qui se font vis-à-vis;
- 4° Une liaison entre une molécule *L* et la molécule ou parcelle *b* appartenant au corps B;
- 5° Une liaison entre la molécule ou parcelle *b* appartenant au corps B, et les molécules ou parcelles voisines.

Si la rupture des chaînes se fait au niveau 2, 3 ou 4 (la rupture en 3 est la plus probable) : il y a glissement sans usure.

Si la rupture se fait au niveau 1, il y a arrachement de métal A; si elle se fait au niveau 5, il y a arrachement de métal B; dans les deux cas, il y a usure par dispersion de la matière A ou de la matière B, mais sans transfert de matière de A vers B ou de B vers A; ainsi s'explique que la matière arrachée reste en suspension dans l'huile.

L'impossibilité du transfert de matière de l'une à l'autre des surfaces limitant les surfaces solides des corps frottants est le caractère fondamental

du frottement lubrifié dans le régime des stratofilms. Il en résulte que si la finition du métal dur n'est pas parfaite, l'usure du métal mou par les aspérités du métal dur (ce que l'on pourrait appeler l'effet de limage) se poursuivra indéfiniment puisque l'on ne pourra pas compter sur un apport du métal mou pour venir niveler la surface du métal dur; ainsi s'expliquent les avantages de la super finition.

Il en résulte également, si la finition du métal dur ne doit pas être très poussée, que l'on doit faire en sorte que les duretés du métal dur et du métal

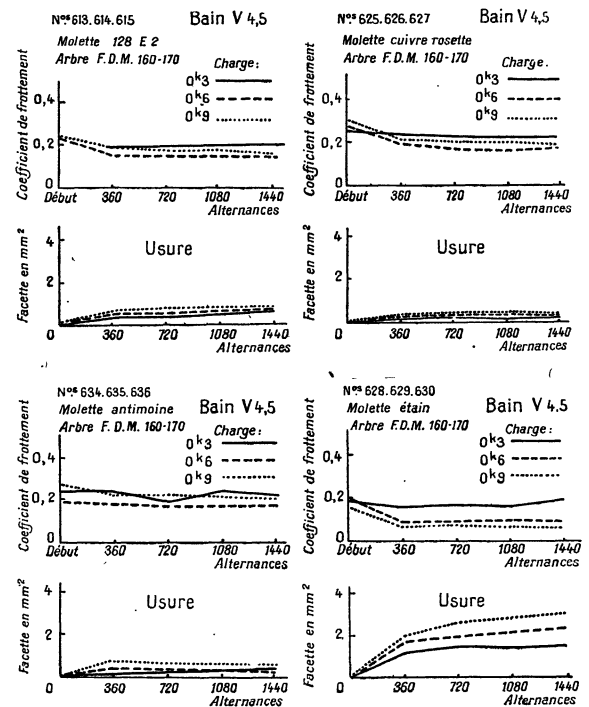


Fig. 11 a, b, c, d.

mou ne soient pas trop différentes, de manière à ce que la décapsulation des aspérités puisse être obtenue presque simultanément sur les deux surfaces, auquel cas l'usure ne se poursuivra plus ultérieurement que lentement.

Nous avons repris les couples de métaux que nous avons étudiés à sec; à savoir, frottant en bain d'huile sur un arbre en acier nickel-chrome demi-dur, des molettes en alliage E<sub>2</sub> de composition : Cu<sub>10</sub>Sb<sub>10</sub>Sn solde, ainsi que des molettes de chacun des trois métaux constituants pris isolément : Cu, Sb et Sn. Le bain d'huile était constitué par une huile minérale demi-fluide, dénommée 4,5 de viscosité 200 C.S. (fig. 11 a, b, c et d).

Plusieurs remarques s'imposent à notre attention lorsque nous examinons les courbes obtenues :

- 1° Au départ, on peut en première approximation admettre que la loi de Amontons-Coulomb se vérifie et que le coefficient de frottement est indé-

pendant de la charge; toutefois, la vérification est moins précise qu'en frottement sec;

2° Au départ encore, les coefficients de frottement, pour l'alliage E<sub>2</sub> et pour ses trois constituants, ont des valeurs très voisines comprises entre 0,2 et 0,3 (leurs valeurs à sec, toutes choses égales s'échelonnaient entre 0,4 et 0,7); ceci s'explique puisque, dans les quatre cas, le frottement s'exerce entre les *stratofilms* recouvrant les surfaces; cette remarque faite, il est remarquable que le coefficient de frottement pour le cuivre soit voisin de 0,3, et qu'il soit voisin de 0,2 pour l'étain et l'antimoine; *il faut en conclure que le métal n'est pas neutralisé complètement par le stratofilm et, par suite, que le champ de force des molécules occupant les surfaces des métaux exerce son action au travers d'un stratofilm dont l'épaisseur est de l'ordre du millième de micron;*

3° Les courbes relatives à l'alliage E<sub>2</sub> et aux trois constituants qui présentaient les unes par rapport aux autres, à sec, des aspects très différents, ont ici des aspects similaires :

Un abaissement du coefficient de frottement durant les premières alternances (contre une élévation en frottement sec) est suivi par une stabilisation de ce coefficient;

Toutefois, celui-ci n'est pas indépendant de la charge; précisons qu'au fur et à mesure que l'usure se poursuit et que, par conséquent, la surface de contact augmente, le coefficient de frottement reste invariable, ce qui est conforme à la loi de Amontons-Coulomb qui prévoit que le coefficient de frottement est indépendant de la surface de contact; que par contre, le coefficient de frottement diminue lorsque la charge augmente (nous disons bien coefficient de frottement  $\frac{F}{P}$ ,  $P$  désignant la charge, et non pas le frottement qui, lui, augmente avec la charge), alors que la loi de Amontons-Coulomb imposerait que le coefficient de frottement soit indépendant de la charge;

4° L'usure, importante durant les 360 premières alternances, semble se poursuivre lentement suivant une loi linéaire; elle est d'autant plus accentuée que la charge est élevée (il y aura lieu de continuer l'expérimentation au delà de 1640 alternances); elle dépend de la nature du métal de la molette : elle est très faible pour le cuivre et très élevée pour l'étain;

5° Aucune des courbes présentées ne révèle de tendance au grippage; *cette observation peut être extrapolée, et l'on peut affirmer qu'un grippage est toujours le résultat d'un manque d'huile, quelle qu'en soit la cause* (ne pas confondre le grippage avec le serrage d'un piston dans un cylindre, par exemple, dû à des dilatations inégales de ces deux organes).

L'absence de grippage dans le régime des *stratofilms* résulte de l'impossibilité, lorsqu'il y a interposition de *stratofilms*, que la matière se transporte de l'une à l'autre des surfaces frottantes.

6° La régularité des résultats obtenus en bain

d'huile conduit à penser que c'est plus particulièrement en bain d'huile qu'il conviendra de qualifier les états des surfaces par le frottement.

En ce qui concerne les métaux de frottement, ils devront être étudiés à sec, puis en bain d'huile, car il est utile de connaître leur comportement lorsque l'huile vient à manquer, soit qu'il s'agisse d'une cause permanente, soit qu'il s'agisse d'une cause accidentelle.

## V. Applications. Présentation réduite.

Nous avons fait remarquer que le lubrifiant constituant le *stratofilm*, le métal sur lequel s'exerce le frottement (l'arbre cylindrique) et le métal de frottement (la molette), forment un triplet; nous avons fait varier séparément chacun des termes du triplet de manière à mettre en évidence : le rôle des différents types de lubrifiants dans le régime des *stratofilms*, le rôle des états de surfaces des arbres sur lesquels s'exerce le frottement (en bain d'huile) et le rôle des métaux de frottement formant les molettes (à sec et en bain d'huile).

Il n'était pas possible, si instructif que puisse être leur examen, de présenter toutes les courbes représentant les évolutions du frottement et de l'usure dans les divers cas étudiés, aussi avons nous adopté un autre mode de représentation.

Les résultats vont être réunis dans des tableaux où apparaissent sur une même ligne horizontale et pour chaque expérience, en regard de la variable : nature du métal frottant ou nature du lubrifiant, ou état de surface de l'arbre et, pour chacune des trois charges adoptées (300, 600 et 900 g), d'une part, comptées à partir de 0, les valeurs des coefficients de frottement au départ (signe X), au milieu de l'expérience (signe :) et en fin d'expérience (signe I); selon les cas, les expériences ont été poussées jusqu'à 360, 720 ou 1440 alternances. D'autre part, l'évolution de la surface de la facette d'usure, dont la valeur exprimée en millimètres carrés est également comptée à partir de 0, au milieu de l'expérience (signe :) et en fin d'expérience (signe I).

Nous avons fait en sorte que les tableaux se rapportant à un même objet, soit en frottement sec soit en frottement lubrifié, aient la même présentation, de manière à faciliter les comparaisons.

Chacun des signes ×, : et | portés dans les tableaux représente la moyenne de trois à cinq résultats expérimentaux.

## VI. Première variable : le lubrifiant.

1. Divers lubrifiants. — Les invariants dans ces expériences étaient : la molette de frottement en alliage E<sub>2</sub>. Composition, Cu<sub>10</sub>, Sb<sub>10</sub>, Sn solide; l'arbre en acier nickel-chrome demi-dur traité

pour 160-170 kg : mm<sup>2</sup>; la charge sur la molette, 0,600 kg; le nombre d'alternances, 720.

Nous présentons (tableau I) les résultats obtenus avec quatre huiles minérales classées par ordre de viscosités croissantes, avec l'huile de colza, avec l'huile de ricin, et enfin avec l'essence minérale.

L'examen de ce tableau suggère les observations suivantes :

Le coefficient de frottement, au départ, est pratiquement le même avec les quatre lubrifiants minéraux (environ 0,3); il diminue en fin d'expérience dans le cas des huiles fluides V<sub>2</sub> et V<sub>5</sub> (0,2); il est resté pratiquement inchangé dans le cas de l'huile demi-fluide V<sub>10</sub>, et il a augmenté dans le cas de l'huile minérale la plus épaisse V<sub>20</sub> (0,4); cette

augmentation, de même que l'augmentation du coefficient de frottement en cours d'expérience signalée plus loin à propos des huiles végétales, semble pouvoir être attribuée à la tendance plus marquée des huiles minérales visqueuses et des huiles végétales à former des produits d'altération qui adhèrent aux surfaces et aggravent le frottement.

Quant à l'usure, elle a pratiquement la même valeur dans les quatre cas, d'où cette conclusion : *la viscosité n'a pas d'importance lorsque la lubrification doit se faire dans le régime des stratofilms (pistons, pieds de bielles, roulements à billes, etc.).*

On sait qu'au contraire la viscosité est favorable à l'entretien du régime hydrodynamique (paliers lisses).

TABLEAU I.

χ Frottement départ  
| après 720 alternances

Frictiographe alternatif C.E.C.

N° 818 à 833  
Novembre 1948

Variables : Lubrifiants purs - Mélanges essence et huile V10 - Colza et huile V5  
Constantes : Molette anti-friction E2 - arbre acier E.D.M. 160:170 - Charge 0<sup>166</sup> - 720 alternances

## Lubrifiants purs

Variable	Coefficient de frottement $\mu = F/P$	Facette d'usure en mm <sup>2</sup>	Charge finale kg/cm <sup>2</sup>
V 2	0,2	0,5	130,5
V 5	0,2	0,5	153,3
V 10	0,3	0,5	142,3
V 20	0,4	0,5	133,2
Colza	0,3	0,5	180,5
Ricin	0,3	0,5	150
Essence	0,3	0,5	104,4

Colza et ricin donnent, au départ, des coefficients de frottement moitié moins élevés que ceux que l'on obtient avec les huiles minérales (0,15), mais les usures sont du même ordre de grandeur que celles obtenues avec les huiles minérales, légèrement inférieures cependant.

L'essence se comporte un peu moins bien que les huiles minérales : coefficient de frottement 0,35; usure 0,58 contre 0,4, avec V<sub>5</sub>, V<sub>10</sub> et V<sub>20</sub>; on peut donc la considérer comme un lubrifiant déjà satisfaisant dans le régime des stratofilms.

**2. Mélange en proportions variables d'huile et d'essence.** — Nous présentons (tableau II) les résultats obtenus avec des mélanges en proportions variables d'essence minérale et d'huile minérale V<sub>10</sub>. Il est remarquable que les écarts entre les coefficients de frottement au départ et en fin d'expérience soient plus accentués dans le cas des mélanges que dans le cas des produits purs, huile ou essence; les résultats obtenus présentent une dispersion qui s'est manifestée à chaque fois que nous avons refait des expériences portant sur de tels mélanges, ce qui semblerait indiquer qu'une certaine anarchie se manifesterait alors dans la manière dont s'orga-

nisent les stratofilms; on semble gagner en fin de compte, mais la proportion d'huile dans l'essence devrait atteindre au moins 20 pour 100 pour que le gain fut notable; en ce qui concerne l'usure, un gain ne semble se manifester qu'à partir d'une proportion de 60 pour 100 d'huile dans l'essence.

On peut tirer de ces expériences deux conclusions :

La première est qu'il est sans inconvénient, du point de vue des organes graissés dans le régime des stratofilms (pieds de bielles, pistons), de mélanger de l'essence à l'huile comme cela se pratique dans l'aviation, au départ;

La seconde est qu'il est sans intérêt de mélanger de l'huile à l'essence pour graisser les têtes de bielles montées sur rouleaux des moteurs à deux temps; il ne faudrait pas aller jusqu'à conclure qu'il est également sans intérêt de mélanger de l'huile à l'essence pour lubrifier le frottement piston-cylindre de ces moteurs; l'extrême division du mélange huile-essence, lors du temps d'aspiration, permet vraisemblablement la libération de molécules d'huile pure qui, sélectivement, viennent tapisser les parois; il semble qu'un mélange à 4 pour 100 d'huile suffise pour assurer l'entretien du tapis d'huile.

3. **Mélanges en proportions variables d'une huile minérale et d'une huile végétale.** — Nous présentons (tableau III) les résultats obtenus avec des huiles « compoundées » obtenues en mélangeant, à l'huile minérale V<sub>5</sub>, de l'huile de colza dans des proportions variables comprises entre 0 et 5 pour 100. Le résultat de ces expériences est négatif, tant au point de vue usure qu'au point de vue frottement,

TABLEAU II.  
Mélanges essence et huile V<sub>10</sub>

Variable	Coefficient de frottement $\mu = \frac{F}{P}$	Facette d'usure en mm <sup>2</sup>	Charge initiale finale kg p.cm <sup>2</sup>
Essence	0,1	104,4	104,4
Essence+4%V <sub>10</sub>	0,15	117,7	117,7
- + 8%	0,2	107	107
Essence 80 V <sub>10</sub> , 20	0,25	116,5	116,5
- 60 - 40	0,3	126,4	126,4
- 40 - 60	0,4	144,6	144,6
- 20 - 80	0,5	172	172
V <sub>10</sub>	0,6	142,3	142,3

et aucun des mélanges ne se rapproche des propriétés du colza pur; contrairement à ce que l'on pourrait attendre, c'est ici l'huile minérale qui semble imposer ses propriétés.

Ce résultat semble en contradiction avec ce que l'on savait des mélanges d'huiles végétales et d'huiles minérales pour lesquels les observations faites à l'aide des rayons X ont montré que les huiles végétales, dites polaires, viennent sélectivement s'adsorber sur les surfaces en formant des strates superposés; il faut en conclure que ces constructions stratifiées qui prennent naissance dans des liquides en repos sont fragiles, qu'elles ne résistent pas au mouvement ni aux efforts de cisaillement et qu'une image de la lubrification représentant des feuillets plats glissant les uns sur les autres ne correspond pas à la réalité.

VII. Deuxième variable :  
État de surface de l'arbre.

1. **Influence des états de surface.** — On a comparé en frottement lubrifié (tableau IV) des arbres semblables ayant fait l'objet de finitions différentes.

Les invariants ont été : la nature de la molette en bronze au plomb; la charge, 0,600 kg; le nombre des alternances limité à 360; le métal de l'arbre, acier nickel-chrome demi-dur traité pour 160-170 kg : mm.

Le lubrifiant était une huile minérale V<sub>2</sub> (viscosité 70 centistokes à la température des expériences).

L'amélioration progressive du coefficient de frottement au départ, au fur et à mesure que la finition s'améliore, est très nette; le coefficient de frotte-

TABLEAU III.  
Mélanges colza et huile V<sub>5</sub>

Variable	Coefficient de frottement $\mu = F/P$	Facette d'usure en mm <sup>2</sup>	Charge initiale finale kg p.cm <sup>2</sup>
V <sub>5</sub>	0,1	153,3	153,3
V <sub>5</sub> +1%colza	0,15	170,4	170,4
- + 3%	0,2	168,7	168,7
- + 5%	0,25	161	161
Colza	0,3	180,5	180,5

ment, dans tous les cas, s'abaisse au fur et à mesure que les expériences se poursuivent et tend vers une même valeur limite; c'est donc au départ et en bain d'huile que les états de surface sont le mieux différenciés.

La classification par les usures des molettes est également très nette; la mesure des coefficients de frottement et des usures en bain d'huile paraît être

un bon moyen pour caractériser les états de surface.

2. **Le poli électrolytique.** — On sait que le poli électrolytique consiste en une sorte de pelage des surfaces, et qu'on peut le caractériser par l'épaisseur moyenne de la couche de matière enlevée; celle-ci, dans les arbres que nous avons expérimentés, était de 2/100°, 5/100° et 10/100°. Nous sommes partis des mêmes arbres que ceux qui

TABLEAU IV.

Constantes : Molette bronze . Arbre acier F.D.M. 160.170 . Lubrifiant bain V2 . 360 alternances . Charge 0<sup>g</sup>6  
Variables : État de surface des arbres

Variable	Coefficient de frottement $\mu = F/P$	Facette d'usure en mm <sup>2</sup>
Charioté	—	—
Rectificat <sup>o</sup> moyenne	—x	—
Rectification fine	—	—
Rodé	—x	—

avaient été utilisés pour la comparaison des diverses finitions; le poli électrolytique a donc été appliqué à des arbres ayant fait l'objet de finitions mécaniques initiales différentes : chariotage, rectification moyenne, rectification fine, rodage. Les arbres et polis avaient été exécutés par la société Hispano-Suiza, conformément aux procédés de MM. Jacquet et Mondon.

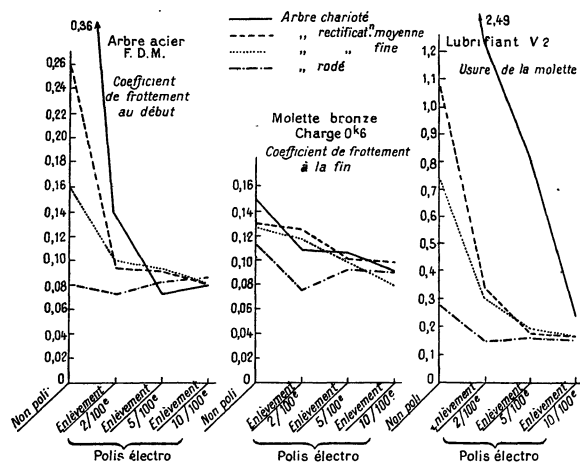


Fig. 12.

Les résultats obtenus en frottement lubrifié, dans le régime des stratofilms, sont présentés dans un ensemble de trois séries de trois courbes particulièrement démonstratives (fig. 12). Les premières de ces courbes se rapportent au frottement mesuré au début des expériences, les secondes au frottement mesuré en fin d'expériences, et les troisièmes aux usures mesurées en fin d'expériences.

Les premières courbes (frottement départ) montrent que les coefficients de frottement, très différents au départ selon la qualité de la finition, se rapprochent au fur et à mesure que le poli électrolytique est approfondi, et tendent vers une limite commune atteinte pour un enlèvement de 10/100<sup>e</sup>.

Les secondes courbes (frottement en fin d'expériences) montrent que les différences observées pour les frottements départ se sont atténuées, que les coefficients de frottement tendent vers une limite qui paraît atteinte pour un enlèvement de 10/100<sup>e</sup>, limite qui coïncide avec la limite atteinte dès le départ pour un enlèvement de 10/100<sup>e</sup> également.

Enfin l'observation des courbes d'usure met en évidence les résultats suivants :

Pour l'arbre charioté, l'usure finale de la molette diminue au fur et à mesure que le poli est approfondi et tend vers une limite qui paraît presque atteinte pour un enlèvement de 10/100<sup>e</sup>.

Pour les deux arbres rectifiés (moyenne et fine), l'usure diminue au fur et à mesure que le poli est approfondi, mais l'effet total est obtenu pour un enlèvement de 5/100<sup>e</sup> et il paraît inutile de poursuivre plus loin le poli.

Enfin pour l'arbre rodé, l'usure diminue également lorsque l'on passe de l'arbre non poli à l'arbre 2/100<sup>e</sup>, mais on ne gagne plus en poursuivant plus loin le poli.

Il est remarquable que les usures des molettes soient les mêmes dans tous les cas lorsque le poli est poussé jusqu'au degré qui convient, compte tenu de la finition initiale.

Il va de soi que ces résultats, valables pour un type d'arbre et un type de molette déterminés, disons pour un triplet déterminé ne sauraient être généralisés sans imprudence.

### VIII. Troisième variable : Les métaux de frottement.

1. Métaux purs, à sec et en bain d'huile. — Les invariants, pour ces expériences ainsi que pour les suivantes se rapportant au métal constituant la molette, ont été : arbre acier nickel-chrome demi-dur traité pour 160-170 kg : mm<sup>2</sup>.

En frottement lubrifié, on a utilisé un bain d'huile minérale V<sub>4,5</sub> (viscosité 200 centistokes à la température des expériences).

A sec (tableau V). — 1° Nous retrouvons dans la colonne des coefficients de frottement, et pour chacun des métaux déjà mentionnés Cu, Sb, Sn un alignement vertical correct des signes × indiquant que la loi de Amontou-Coulomb se vérifie, au départ;

2° Le même alignement des signes × est également réalisé pour les métaux Pb, Cd, Ag, Zn et Mg. Il ne l'est pas pour Al sous 900 g de charge;

3° La coïncidence des trois signes ×, : et | pour Mg sous 600 et 900 g de charge indique que le coefficient de frottement de ce métal reste constant depuis

le début jusqu'à la fin de l'expérience. *A priori*, l'emploi de ce métal comme « antifriction » devrait pouvoir être envisagé;

4° Les usures à sec sont toujours considérables, sauf pour le cuivre et l'argent, ce qui tendrait à faire envisager l'emploi de ces deux métaux comme

TABLEAU V.

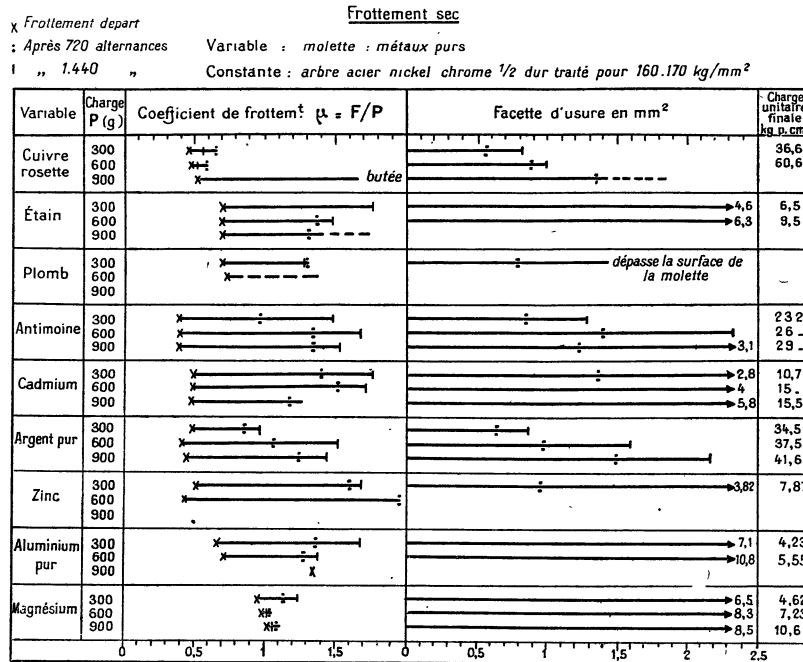
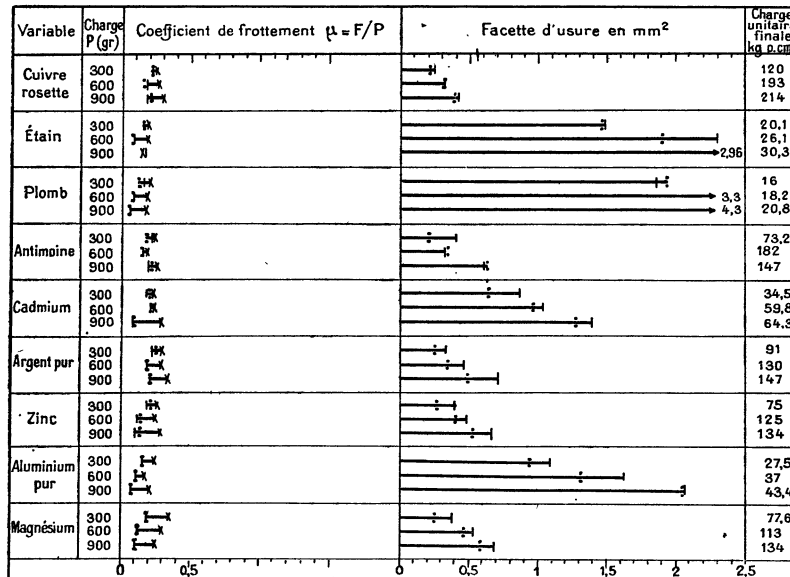


TABLEAU VI.

Frottement lubrifié

χ Frottement départ  
: Après 720 alternances Variable : Molette : métaux purs  
I „ 1440 „ Constante : Arbre acier nickel chrome 1/2 dur traité pour 160.170 kg/mm<sup>2</sup>

Lubrifiant : bain V 4,5



antifricctions; toutefois, le cuivre est à éliminer en raison de sa tendance à gripper dès que la charge s'élève (60 kg/cm<sup>2</sup>);

5° Le zinc donne lieu à grippage sous 600 g de charge.

En bain d'huile (tableau VI). — 1° L'alignement des signes  $\times$  qui correspondent au coefficient de frottement au départ, peut être considéré comme réalisé dans tous les cas, aux erreurs d'expériences près;

2° Le coefficient de frottement final, indiqué par le signe | est toujours très inférieur au frottement de départ;

3° Il est très fréquent que les signes : et | coïncident, ce qui indique que le coefficient de frottement s'est stabilisé en cours d'expérience;

4° Une remarque semble pouvoir être considérée comme une loi expérimentale, tout au moins dans les cas de Cu, Cd, Ag, Zn, Al, Mg : l'usure finale (mesurée par la surface de la facette signe |) est propor-

tionnelle à la charge, tout au moins entre 300 et 900 g;

5° La coïncidence des signes : et | indiquerait que l'usure aurait atteint une valeur limite en cours d'expérience; cette condition ne semble s'être réalisée qu'accidentellement;

6° Le magnésium et surtout l'argent, qui s'étaient signalés à notre attention, à sec, se comportent bien en frottement lubrifié; pour l'un comme pour l'autre, les usures sont faibles.

**2. Quatre antifrictions classiques, à sec et en bain d'huile.** — Les résultats obtenus avec ces antifrictions sont consignés dans le tableau VII pour les essais à sec et dans le tableau VIII pour les essais en bain d'huile.

TABLEAU VII.

Frottement sec

$\times$  Frottement départ  
: Après 720 alternances  
! " 1440 "

Variable : Molette : quatre antifrictions classiques  
Constante : Arbre acier nickel chrome 1/2 dur traité pour 160.170 kg/mm<sup>2</sup>

Variable	Charge P (gr)	Coefficient de frottement $\mu = F/P$	Facette d'usure en mm <sup>2</sup>	Charge unitaire finale kg.p.cm <sup>2</sup>
128 E 1 Cu 3,5 Sb 6,5 Sn solde	300	$\times$ —	—	15,4
	600	$\times$ —	2,8	21,4
	900	$\times$ —	3,4	26,5
128 E 2 Cu 10 Sb 10 Sn solde	300	$\times$ —	—	16,7
	600	$\times$ —	2,7	22,2
	900	$\times$ —	3,7	24,3
128 E 3 Cu 4,5 Pb 15,5 Sb 7 Sn solde	300	$\times$ —	—	12
	600	$\times$ —	3,4	19,4
	900	$\times$ —	3,7	26,6
128 E 4 Cu 1,28 Sb 14,5 Sn 11 Pb solde	300	$\times$ —	—	7,25
	600	$\times$ —	4,18	9,23
	900	$\times$ —	8,25	10,9

TABLEAU VIII.

Frottement lubrifié

$\times$  Frottement départ  
: Après 720 alternances  
! " 1440 "

Variable : Molette : quatre antifrictions classiques  
Constante : Arbre acier nickel chrome 1/2 dur traité pour 160.170 kg/mm<sup>2</sup>

Lubrifiant bain V 4,5

Variable	Charge P (gr)	Coefficient de frottement $\mu = F/P$	Facette d'usure en mm <sup>2</sup>	Charge unitaire finale kg.p.cm <sup>2</sup>
128 E 1 Cu 3,5 Sb 6,5 Sn solde	300	$\times$ —	—	46,8
	600	$\times$ —	—	62,5
	900	$\times$ —	—	78,2
128 E 2 Cu 10 Sb 10 Sn solde	300	$\times$ —	—	50,8
	600	$\times$ —	—	88,2
	900	$\times$ —	—	108,5
128 E 3 Cu 4,5 Pb 15,5 Sb 7 Sn solde	300	$\times$ —	—	48,3
	600	$\times$ —	—	64,5
	900	$\times$ —	—	83,4
128 E 4 Cu 1,28 Sb 14,5 Sn 11 Pb solde	300	$\times$ —	—	83,3
	600	$\times$ —	—	111
	900	$\times$ —	—	112,4

Les formules des alliages sont portées dans les tableaux; ce sont des « régules » à base de cuivre, étain et antimoine, et des « bronzes au plomb ».

On constate que ces alliages frottent fortement à sec, mais sans gripper, tout comme les métaux purs autres que le cuivre et le zinc; que les usures, à sec également, sont toujours importantes, aussi élevées qu'avec le magnésium, et plus élevées qu'avec l'argent.

On constate enfin que les coefficients de frotte-

ment au départ (signe  $\times$ ) ne s'alignent pas verticalement quelle que soit la charge pour chaque alliage, comme nous l'avions constaté presque dans tous les cas pour les métaux purs; cela ne saurait nous surprendre étant donné que les alliages de frottement n'ont pas l'homogénéité des métaux purs.

En bain d'huile, du point de vue du frottement et de l'usure ils ne se comportent ni mieux, ni plus mal que certains métaux purs tels que l'antimoine, le cadmium, l'argent, le zinc et le magnésium.

Si l'emploi des réguls et bronze au plomb s'est généralisé concurremment avec les métaux purs ci-dessus mentionnés, et particulièrement l'argent et le magnésium, c'est qu'ils se distinguent de ces derniers par des avantages supplémentaires qui sont : d'être moins coûteux que l'argent et d'adhérer sur la surface du cuivre ou de l'acier.

En résumé, la propriété essentielle des alliages antifrictions est de ne pas gripper à sec si l'huile, pour une raison quelconque, même pendant un laps

de temps très court, vient à manquer; ils jouent le rôle d'un fusible de sécurité qui fond sous l'action de la chaleur et protège la machine contre un arrêt brutal qui, résultant d'un grippage, provoquerait des avaries graves, peut-être irréparables.

**3. Alliages frittés Delaplace, à sec et en bain d'huile.** — Les alliages Delaplace se distinguent des autres antifrictions par leur structure microgéométrique, par leur composition centési-

TABLEAU IX.

Frottement sec

Variable : Molette : alliages Delaplace  
 Constante : Arbre acier nickel chrome 1/2 dur traité pour 160.170 kg/mm<sup>2</sup>

Variable	Charge P (gr)	Coefficient de frottement $\mu = F/P$	Facette d'usure en mm <sup>2</sup>	Charge unitaire finale kg.p.cm <sup>2</sup>
1	300	0,45	53,5	53,5
	600	0,45	70,1	70,1
	900	0,45	86,8	86,8
2	300	0,45	56,6	56,6
	600	0,45	90,8	90,8
	900	0,45	102	102
3	300	0,45	136	136
	600	0,45	202	202
	900	0,45	317	317
4	300	0,45	176	176
	600	0,45	306	306
	900	0,45	333	333

TABLEAU X.

Frottement lubrifié

Variable : Molette : alliages Delaplace  
 Constante : Arbre acier nickel chrome 1/2 dur traité pour 160.170 kg/mm<sup>2</sup>

Lubrifiant : bain V4,5

Variable	Charge P (gr)	Coefficient de frottement $\mu = F/P$	Facette d'usure en mm <sup>2</sup>	Charge unitaire finale kg.p.cm <sup>2</sup>
1	300	0,45	43,2	43,2
	600	0,45	70,1	70,1
	900	0,45	86,7	86,7
2	300	0,45	46,8	46,8
	600	0,45	63,8	63,8
	900	0,45	77,6	77,6
3	300	0,45	160	160
	600	0,45	291	291
	900	0,45	337	337
4	300	0,45	200	200
	600	0,45	222	222
	900	0,45	290	290

male, et par le procédé qui permet de les obtenir, qui précisément détermine cette structure et permet de faire varier les compositions centésimales au delà des limites imposées par la miscibilité des constituants lorsque l'on opère par fusion. Ces alliages ont, à sec et en bain d'huile, des propriétés très particulières qui les différencient des métaux purs et des antifrictions classiques, et qui suggèrent des applications. Voici comment on les obtient : En principe, un tube en cuivre pur est rempli avec de la poudre de plomb, d'étain ou d'antimoine, et l'on fait en sorte que la proportion unitaire (par centimètre de longueur, par exemple) de cuivre pur et de chacun des autres métaux soit égale à la proportion de chacun de ces corps que l'on désire

trouver dans l'alliage; ces proportions peuvent varier à l'infini. Le tube est tréfilé, et le fil est passé dans un pistolet à pulvérisation. Le jet de métal est projeté dans l'eau où l'on trouve finalement une poudre composée de petits sphérules microscopiques dont la composition centésimale correspond précisément à la composition unitaire des divers constituants dans le tube de cuivre initial. L'alliage constituant les sphérules peut être considéré comme une solution solide en surfusion stabilisée par la trempe dans l'eau froide. La poudre séchée peut être agglomérée sous l'action combinée de la chaleur et de la pression, et permet de préparer des pièces frittées de formes diverses.

L'épreuve au frictiographe, à sec, des molettes



constituées par quelques-uns de ces alliages (tableau IX) montre, plus particulièrement pour l'alliage n° 4 :

1° que le coefficient de frottement de ces alliages, à sec, reste constant, quelle que soit la charge et quelle que soit la durée de l'expérience autrement dit que des signes  $\times$ ,  $:$  et  $|$  sont confondus et alignés verticalement; la loi de Amontons-Coulomb se vérifie donc rigoureusement même après de nombreuses alternances; d'un tel fait, nous ne connaissons aucun autre exemple;

2° que l'usure, à sec, est beaucoup plus faible que celle qui avait été obtenue avec les métaux purs et les antifrictions classiques; la confrontation des tableaux V, VII et IX est, à ce double point de vue, saisissante.

L'épreuve en bain d'huile (tableau X) révèle une usure plus faible que celle obtenue avec les métaux purs et les antifrictions classiques ainsi que le confirme la confrontation des tableaux VI, VIII et X : Les coefficients de frottement en bain d'huile, comparativement aux coefficients de frottement à sec, sont à peu près réduits de moitié.

Cet ensemble de qualités désigne avantageusement ces alliages pour leur application aux bagues et coussinets, et il les désigne également pour leur application aux freins et embrayages. Nous aboutissons ainsi à ce résultat d'apparence paradoxale, qu'un bon métal « antifriction » peut être en même temps un bon métal de frottement.

### Conclusions.

Le frottement et l'usure rentrent dans le cadre de la physique des surfaces; ils sont de nature à nous renseigner sur les résultats d'un corps à corps moléculaire lorsqu'il s'agit de deux partenaires

(frottement sec) ou de trois partenaires (frottement lubrifié).

Les schémas que nous avons proposés pour expliquer l'usure, à l'échelle moléculaire, soit en frottement sec, soit en frottement lubrifié, ont conduit à des conclusions que l'expérience a vérifiées, à savoir en particulier *que le frottement sec s'accompagne presque toujours d'un transfert de matière de l'une à l'autre des surfaces des deux solides frottants, transfert qui ne peut jamais avoir lieu lorsque le frottement se poursuit en bain d'huile.*

Notre appareillage et nos méthodes expérimentales ont permis de retrouver des résultats auxquels avaient conduit une longue pratique et de les chiffrer; c'est ainsi, par exemple, qu'il suffit de se reporter à nos résultats pour comprendre que le cuivre pur serait un bon métal de frottement s'il n'avait l'inconvénient de gripper à sec lorsque la charge dépasse une valeur critique que nous déterminons; que l'emploi du zinc est absolument contre-indiqué, que l'argent qui a été employé en couches minces est peut-être le seul parmi les métaux purs dont l'emploi, comme métal de frottement, puisse être envisagé.

Lorsque nous avons abordé des problèmes nouveaux (poliélectrolytique, alliages globuleux frittés de M. Delaplace), les solutions que nous avons données n'ont jamais été contredites par l'expérience entreprise à l'échelle industrielle.

Ce travail a été exécuté dans le laboratoire de l'Institut de Chimie-Physique dirigé par M. E. Bauer à qui je suis heureux d'exprimer ici ma reconnaissance.

Quelques-uns des clichés illustrant ce mémoire ont été gracieusement mis à notre disposition par la revue *Mécanique*, publication *Science et Industrie*.

Manuscrit reçu le 2 juin 1951.

### BIBLIOGRAPHIE:

HARDY W. B. et DE DOUBLEDAY I. — *C. R. Roy. Soc.*, Londres, série A, vol. G, 1922.

WOOG P. — Contribution à l'étude du Graissage, Delagrave, Paris, 1926.

MARCELIN A. — *Mécanique*, éd. *Science et Industrie*, 1942,

n° 295, 296, 298, 299, 300, *Machines et métaux*, 1948, *ibid.*, 1948; *J. Chim. Phys.*, 1943, 40; *C. R. Acad. Sc.*, 1947, 225, 225; *ibid.*, 1948, 226, 1584 et 1978; *ibid.*, 1949, 228, 650.

DELAPLACE R. — *C. R. Acad. Sc.*, 1947, 225, 1075.