

**Zeitschrift:** Helvetica Physica Acta  
**Band:** 26 (1953)  
**Heft:** III-IV  
  
**Artikel:** Sur la Lubrification solide  
**Autor:** Fortrat, M.R.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-112407>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 18.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Sur la Lubrification solide

par M. R. Fortrat

Professeur à la Faculté des Sciences de Grenoble.

(7 IV 1953.)

Pour que le frottement de l'archet sur une corde excite ses vibrations et les entretienne, il faut que le frottement soit assez énergique, mais il faut surtout qu'il soit plus grand au démarrage que pendant le mouvement. Or, dans les frottements solides, il existe un coefficient de frottement qui remplit, au moins approximativement, les conditions suivantes:

il est indépendant de la pression exercée entre les corps qui frottent l'un sur l'autre,  
il est indépendant de leur vitesse relative,  
il est le même au repos et dans le mouvement.

On sait que les musiciens colophanent leur archet; les acrobates se colophanent aussi les mains. Il est donc probable que la colophane ne borne pas son rôle à augmenter le frottement, mais qu'elle rend le frottement au repos plus grand que pendant le mouvement.

Notre but était de vérifier ces deux propriétés. Après la colophane, nous avons cru intéressant d'examiner d'autres substances solides douées comme elle, et même mieux qu'elle, d'onctuosité et nous avons pensé à la cire, au graphite et au talc.

Nous avons organisé des mesures avec un appareil aussi simple que possible. Un plateau en acier poli était entraîné en glissant sur deux rails parallèles d'un mouvement uniforme de vitesse variable jusqu'à 3 cm/s. L'échantillon qui frottait sur lui était taillé en forme de parallépipède, la face en frottement étant soigneusement polie. Il était maintenu vers une position d'équilibre par une verge qui faisait ressort. Quand le parallépipède était écarté de sa position d'équilibre, la verge le rappelait vers elle avec une force proportionnelle à l'écart, et par conséquent mesurable par cet écart.

Dans la suite nous appellerons ce parallépipède le «frotteur».

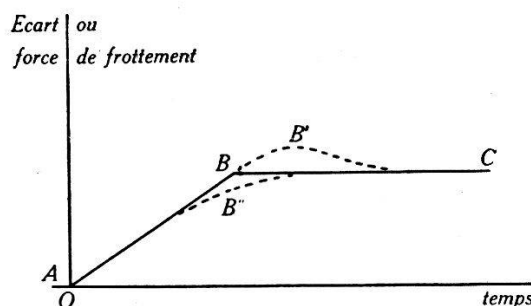
Il était possible de modifier la pression du frotteur sur le plan d'acier en le chargeant avec des poids. Il est clair que le frotteur

associé à la verge formait un pendule dont les constantes se trouvaient modifiées par les surcharges que l'on s'est trouvé amené à poser sur le frotteur.

La verge était prolongée par un léger bras au bout duquel était porté un crayon dont la pointe frottait sur un cylindre enregistreur. On décrivait ainsi des courbes sur lesquelles les abscisses représentaient les temps et les ordonnées la force de frottement.

En effet lorsqu'on met le plateau en mouvement, le frottement entraîne le frotteur qui suit d'abord avec la même vitesse, jusqu'à ce que la tension du ressort atteigne la force de frottement: alors le frotteur reste immobile si le frottement de glissement est justement égal au frottement de décollement ou de démarrage que l'on appelle frottement au repos. Il revient en arrière si ce frottement est plus petit qu'au repos. Il est entraîné de moins en moins vite si le frottement augmente avec la vitesse de glissement: il ne saurait être question de frottement indépendant de la vitesse et supérieur au coefficient au repos.

Dans le cas le plus ordinaire d'un frottement au repos égal au frottement en mouvement, on doit s'attendre à trouver un enregistrement composé de deux segments de droites:  $AB$  et  $BC$ . Le premier est décrit pendant que le frotteur adhère au plan d'acier; sa pente représente justement la vitesse de ce plateau. Le frotteur



décolle quand la tension du ressort devient égale à la force de frottement au repos et il reste immobile si le frottement en mouvement est égal au frottement au repos: l'enregistrement est alors le segment de droite  $BC$  parallèle à l'axe des temps.

Si au contraire le frottement en mouvement est plus faible qu'au repos, le frotteur revient en arrière avant de décrire le segment  $BC$ .

Si enfin le coefficient de frottement en mouvement est plus grand qu'au repos, la vitesse du frotteur, et celle du crayon, diminuent progressivement.

En fait, les deux segments de droites  $AB$  et  $BC$  ne se raccordent pas sous un angle rectiligne. En effet, l'inertie du frotteur l'empêche

de s'arrêter instantanément et elle raccorde les deux segments par un arc de courbe  $B'$  qui est très gênant car il empêche de discerner si le frottement au repos est supérieur ou égal au frottement de mouvement. On supprime cet arc en amortissant convenablement les oscillations du pendule verge-frotteur. Mais il ne faut pas l'amortir trop fortement car le frottement visqueux, s'ajoutant à la force de rappel, décollerait le frotteur du plan d'acier avant que la force de rappel soit égale au frottement et les deux segments se raccorderaient par un arc de courbe  $B''$ , comme si le frottement croissait avec la vitesse.

En réglant l'amortissement à la valeur critique, on trouve de très bons résultats, car, avec des frottements bien connus, comme celui de l'acier sur l'acier, où le frottement de repos est égal au frottement de mouvement, les deux segments se raccordent sous un angle à peine arrondi. Il n'est pas nécessaire de modifier cet amortissement lorsqu'on surcharge le frotteur bien que l'on accroisse ainsi la période du pendule.

Rappelons que la vitesse pouvait croître jusqu'à 3 cm par seconde. Les pressions allaient de 40 à 150 g par  $\text{cm}^2$ .

Dans une première série de mesures, nous avons examiné le frottement de surfaces bien polies d'acier, de laiton et d'aluminium sur l'acier poli. Dans la deuxième série de mesures, les surfaces en contact étaient recouvertes d'un «lubrifiant» solide.

### *I. Frottement métal sur métal.*

Le frottement dépend dans une large mesure de l'état des surfaces et nous n'avons trouvé des résultats fidèles que si les surfaces étaient très soigneusement polies; il fallait que les raies que l'on peut apercevoir au microscope, et qu'il est impossible de faire disparaître tout à fait, aient moins de 3 à 4  $\mu$  de profondeur. Cela se conçoit et semble assez naturel, il paraît évident que le frottement de surfaces rugueuses est plus grand que celui de surfaces polies.

1° *Acier sur acier.* Nous avons trouvé un coefficient de frottement égal à 0,21, indépendant de la vitesse et de la pression, le même au repos et en mouvement.

2° *Laiton sur acier.* Le coefficient se montre indépendant de la vitesse, mais non de la pression. Au repos comme en mouvement il vaut

$$0,15 + 6 \cdot P \cdot 10^{-4}$$

dans la limite des pressions indiquées, la pression  $P$  étant mesurée en grammes par  $\text{cm}^2$ .

3° *Aluminium sur acier*. Jusqu'à des pressions de 100 g/cm<sup>2</sup>, le coefficient de frottement, le même au repos et en mouvement, reste indépendant de la vitesse, mais augmente légèrement avec la pression; il vaut à peu près

$$0,23 + 5 \cdot P \cdot 10^{-4}.$$

Mais quand la pression dépasse 100 g/cm<sup>2</sup>, les résultats deviennent irréguliers. La surface de l'aluminium sort souvent endommagée de l'épreuve; elle porte des rayures, parfois même de petits copeaux, elle est éraillée. L'aluminium n'est pas assez dur pour supporter des pressions supérieures à 100 g/cm<sup>2</sup> sans gripper.

Du reste il arrivait souvent que, lors du frottement sous une forte pression, l'aluminium «chantait» en vibrant irrégulièrement.

## II. Frottement de surfaces avec «lubrifiants» solides.

1° *Colophane*. La surface à colophaner était saupoudrée de fine poussière de colophane, puis frottée avec la base d'un bouchon de liège. On obtenait ainsi des résultats bien comparables.

Comme l'on pouvait s'y attendre, les coefficients de frottement sont très fortement augmentés par la colophane. Mais il est sans doute plus intéressant de remarquer qu'ils sont bien, comme prévu, plus grands au repos qu'en mouvement. Ils sont plus grands au cours de la première friction, lorsqu'on vient de déposer la colophane que lorsqu'elle a déjà frotté une fois. Il faut penser que la première friction organise la surface qui garde sa structure au cours des opérations suivantes.

Dans le tableau suivant des coefficients de frottement mesurés, nous avons mis à part la première mesure d'une part et les autres mesures d'autre part. L'aluminium présente une particularité étrange: les coefficients sont très différents suivant que la pression est inférieure ou supérieure à 80 g/cm<sup>2</sup>; cela viendrait-il de l'adhérence de la colophane?

Quand la vitesse relative est faible, inférieure à 0,6 cm/s, le frotteur oscille sur le plateau d'acier, il décrit des oscillations de relaxation identiques à celles de la corde de violon. Ces oscillations ne se produisent pas quand la vitesse est plus grande parce que leur période est alors plus petite que celle du pendule formé par le frotteur et la verge qui le guide.

Nous avons été surpris de la constance des résultats. Les coefficients sont presque identiques pour l'acier et le laiton et même pour

l'aluminium quand la pression est supérieure à  $80 \text{ g/cm}^2$ : on peut y voir une indication en faveur de l'idée qu'ils sont spécifiques de la colophane et indépendants de son support. Le cas de l'aluminium est étrange, on peut s'étonner surtout que les résultats restent bons aux pressions supérieures à  $100 \text{ g/cm}^2$  sous lesquelles la surface nue de l'aluminium s'éraillait; il semble que la couche très mince de colophane la protège, bien qu'elle augmente le frottement.

|                                        | Repos           | Mouvement   |
|----------------------------------------|-----------------|-------------|
| Acier sur acier: 1re mesure . .        | 0,50            | 0,45        |
| mesures suivantes . . . .              | 0,42            | 0,36        |
| Laiton sur acier: 1re mesure . .       | 0,47            | 0,40        |
| mesures suivantes . . . .              | 0,40            | 0,34        |
| Aluminium sur acier:                   |                 |             |
| $P < 80 \text{ g/cm}^2$ . 1re mesure . | 0,80 à 0,70     | 0,72 à 0,62 |
| mesures suivantes:                     | mêmes résultats |             |
| $P > 80 \text{ g/cm}^2$ . 1re mesure . | 0,70            | 0,60        |
| mesures suivantes . .                  | 0,45            | 0,38        |

2° *Cire*. Pour cirer les surfaces nous les avons frottées soit avec de l'encaustique, soit avec de la cire pure; dans ce dernier cas il vaut mieux chauffer légèrement les surfaces à cirer. La cire était étendue en couche mince, brossée et frottée avec un chiffon de laine, exactement comme l'on fait pour cirer les chaussures.

Les résultats sont analogues à ceux que nous avons obtenus avec la colophane, mais moins nets. Le coefficient est plus grand que celui des surfaces nues; il est un peu plus faible pendant le glissement qu'au démarrage: les écarts sont voisins de 10%; mais ils sont très systématiques et sont confirmés par la naissance d'oscillations de relaxation, moins fréquentes et moins stables qu'avec la colophane. Il semble que les musiciens pourraient à la rigueur cirer leurs archets, il est incontestable que cela ne peut pas leur être recommandé et qu'il vaut mieux les colophaner.

Comme avec la colophane, le coefficient ne prend sa valeur définitive qu'après un premier frottement sous la pression de la mesure. La nature du support de la cire ne joue aucun rôle. Mais au contraire de la colophane, le coefficient de frottement dépend de la vitesse, il diminue quand elle augmente ainsi que quand la pression augmente.



Le tableau reproduit les valeurs du coefficient de frottement au repos.

| pressions en g/cm <sup>2</sup> | $v = 0,65$ cm/s | 1,3 cm/s | 2,6 cm/s |
|--------------------------------|-----------------|----------|----------|
| 60 . . . . .                   | 0,33            | 0,25     | 0,24     |
| 90 . . . . .                   | 0,25            | 0,24     | 0,23     |
| 100 . . . . .                  | 0,24            | 0,24     | 0,23     |
| 120 . . . . .                  | 0,24            | 0,22     | 0,21     |
| 136 . . . . .                  | 0,24            | 0,21     | 0,21     |

Le mouvement diminue ces coefficients très sensiblement de 10%.

3° *Graphite*. Le graphite sec n'adhère pas aux surfaces métalliques, du moins, nous n'avons pas réussi à le faire tenir sur elles de quelque manière que nous nous soyons efforcé de l'appliquer. Par contre, il adhère très bien si l'on en fait une pâte avec de l'eau, de l'alcool, de l'essence, etc. Lorsque cette pâte est sèche, on peut la broser, puis la frotter avec un chiffon de laine, on obtient un «épilamen» brillant et très adhérent, particulièrement sur l'acier d'où l'on ne peut le retirer qu'en grattant très fortement avec un abrasif. Sur le laiton, ou l'aluminium, on peut le retirer en frottant énergiquement avec un tissu très rêche.

Les résultats sont très différents de ceux que nous avons obtenus avec la colophane et la cire. L'onctuosité est de nature différente, ainsi que nous le rappellerons un peu plus loin.

|                                   | $v = 0,65$ cm/s |      | $v = 2,6$ cm/s |      |
|-----------------------------------|-----------------|------|----------------|------|
| Acier sur acier:                  | $f_0$           | $f$  | $f_0$          | $f$  |
| toutes pressions . . .            | 0,18            | 0,28 | 0,18           | 0,31 |
| Laiton sur acier:                 |                 |      |                |      |
| $P = 60$ g/cm <sup>2</sup> . . .  | 0,20            | 0,30 | 0,18           | 0,22 |
| $P = 90$ g/cm <sup>2</sup> . . .  | 0,18            | 0,28 | 0,21           | 0,28 |
| $P = 120$ g/cm <sup>2</sup> . . . | 0,16            | 0,25 | 0,20           | 0,29 |
| Aluminium sur acier:              |                 |      |                |      |
| $P = 40$ g/cm <sup>2</sup> . . .  | 0,14            | 0,15 | 0,27           | 0,33 |
| $P = 60$ g/cm <sup>2</sup> . . .  | 0,18            | 0,24 | 0,24           | 0,28 |
| $P = 90$ g/cm <sup>2</sup> . . .  | 0,20            | 0,25 | 0,20           | 0,27 |
| $P = 120$ g/cm <sup>2</sup> . . . | 0,20            | 0,32 | 0,20           | 0,27 |

Le coefficient de frottement au repos est toujours inférieur au coefficient en mouvement, et il augmente avec la vitesse. Le coeffi-

cient au repos est légèrement inférieur au coefficient des surfaces nues; il est indépendant de la pression dans le frottement acier sur acier, mais il en dépend dans les cas du frottement laiton et aluminium sur acier; cette dépendance serait-elle en relation avec la moins bonne adhérence du graphite sur ces surfaces?

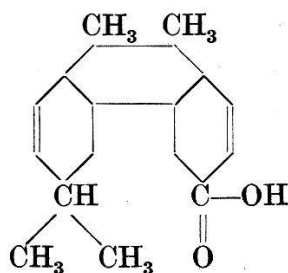
Dans le tableau nous avons réuni les résultats de nos mesures:  $f_0$  représente le coefficient de frottement au repos,  $f$  le coefficient pendant le mouvement.

4° *Talc*. Nous avons voulu essayer aussi le talc parce qu'il est lui aussi onctueux, son onctuosité étant de même nature que celle du graphite. Malheureusement nous n'avons pas pu le faire adhérer aux surfaces métalliques en expérience. Les résultats inconstants peuvent se résumer ainsi: le coefficient de frottement est plus grand qu'avec les surfaces nues; il augmente du démarrage au glissement et augmente avec la vitesse (0,25 à 0,35 au démarrage, 0,30 à 0,40 en mouvement). Il diminue quand la pression augmente, se rapprochant de sa valeur pour les surfaces nues. Ces coefficients ne signifient sans doute pas grande chose car le talc se détache pendant le glissement formant de petits grains sur lesquels les surfaces glissent mal.

### Résumé.

Si l'on veut parler du frottement de surfaces couvertes d'un épilamen solide, il est évident que celui-ci doit être bien formé. On ne peut en parler en tout état de cause que si la substance «lubrifiante» adhère bien à la surface solide et y forme une couche qui résiste aux efforts de frottement. C'est le cas de la cire, de la colophane et du graphite. La cire et la colophane augmentent le coefficient de frottement, mais surtout ce coefficient est moins grand pendant le frottement qu'au démarrage.

Ces deux substances ont des structures assez analogues. La colophane est extraite de la résine du pin. Elle est un mélange d'acides organiques dont le plus important est l'acide abiétique  $C_{19}H_{29}-COOH$  dont la molécule a le squelette du phénanthrène. Ses molé-

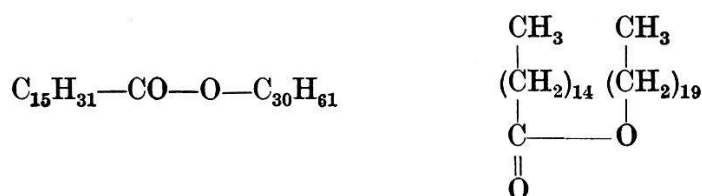


cules ont tendance à s'orienter sur les surfaces métalliques, on les



y aide en les brossant ou en les frottant avec un chiffon doux. Les radicaux  $\text{COOH}$  se collent à la surface du métal, les radicaux méthyl se plaçant à l'extérieur. Il se forme ainsi une première couche monomoléculaire sur laquelle s'organise une deuxième assise de molécules, qui présentent les radicaux méthyl en face de ceux de la première couche, et ainsi de suite. Les couches se succèdent comme dans les huiles organiques. C'est précisément cette stratification qui détermine l'onctuosité de ces huiles, et c'est la raison pour laquelle il semble que l'on puisse étendre le terme aux solides qui forment des couches analogues.

La cire est formée d'ester d'alcools plus complexes que la glycérine. La cire d'abeille contient beaucoup de palmitate de myricyle, molécule avec deux longs bras hydrocarbonés. Les atomes d'oxygène ont tendance à se coller à la surface métallique, sur laquelle les bras se dressent perpendiculairement. Puis, le brossage favorise la stratification en couches alternées, les  $\text{CH}_3$  ou les  $\text{CO}_2$  se plaçant au contact les uns des autres dans deux couches voisines.



L'onctuosité du graphite résulte plus simplement de sa cristallisation en écailles très plates qui glissent les unes sur les autres.

Le talc, silicate de magnésie hydraté de formule  $4 \text{SiO}_2 \cdot 3 \text{MgO} \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$ , présente au toucher la même apparence que le graphite, mais il est moins adhérent et plus «savonneux».

On doit trouver assez naturel que la cire et la colophane d'une part, le graphite et le talc d'autre part, agissent à peu près de la même manière sur le frottement.

Si cette étude préliminaire apporte quelques données numériques, elle montre surtout le nombre important de questions de physique moléculaire qu'elle pose et qui se rapportent à l'adhérence des substances solides l'une sur l'autre et qui rappellent les questions de mouillabilité des solides par les liquides.

Cette étude a été faite avec la collaboration de M. RENÉ BENOÎT qui a construit l'appareil et de M. LASSARA qui a effectué la plupart des mesures.