

2009 / 2010

LES FROTTEMENTS SECS ET VISQUEUX

**de LACHEZE Vladimir
DAS Noël**

Introduction

Tout d'abord qu'est-ce que le frottement ? Par définition c'est l'action de deux corps en contact et en mouvement l'un par rapport à l'autre.

Le mot tribologie désigne la science qui étudie les phénomènes susceptibles de se produire lorsque deux corps en contact sont animés de mouvements relatifs, c'est donc la science et la technologie du frottement, de l'usure et de la lubrification. Ce TIPE est donc basé sur cette science.

Les phénomènes de frottement font partis intégrante de notre vie. Ils interviennent dans de nombreuses applications quotidiennes et industrielles telle que la marche, une roue qui roule, un tire-bouchon, un roulement à bille, une chaîne de vélo, une courroie, une vis... Ce frottement peut être utile comme parasite. Il est utile à la marche mais parasite dans le cas des roulements et d'usures de pièces mécaniques.

Le phénomène de frottement n'est pas un phénomène unique. En effet, il existe différentes sortes de frottements :

- Le frottement sec (figure 1), mis en évidence par Coulomb apparaît lorsque deux surfaces physiquement distinctes sont en contact et peuvent glisser l'une contre l'autre. Ce frottement est dû à l'encastrement des petites irrégularités positives d'une des surfaces dans les irrégularités négatives de l'autre surface.

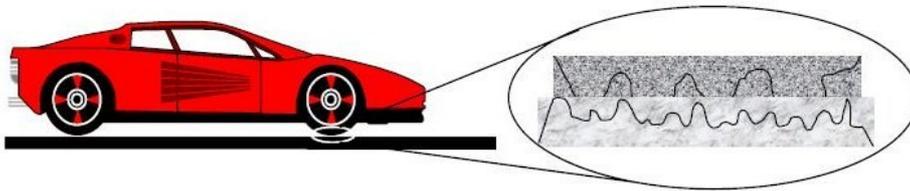


Figure 1 : Frottements secs, vue microscopique de la zone de contact

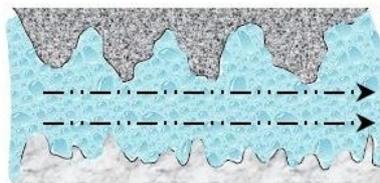


Figure 2 : Frottement visqueux, vue microscopique

- Le frottement visqueux (figure 2) apparaît lorsqu'un fluide sépare les deux surfaces en contact. Le frottement visqueux est généralement moins important que le frottement sec. Il est dû à la viscosité du fluide. La viscosité est une notion qui sera abordée plus tard.

- Le frottement interne apparaît au sein du matériau lorsque celui-ci est

soumis à des contraintes. Cependant ce phénomène relève plus de la résistance des matériaux, c'est pourquoi nous n'aborderons uniquement les deux précédents.

Problématiques : Dans quelles situations et comment s'appliquent les frottements secs et visqueux ?

Plan :

I) Théorie

- 1- Frottements secs
- 2- Frottements visqueux
- 3- Frottements internes, glissements

II) Causes et effets du frottement

- 1- Rugosité/ viscosité
- 2- Manifestation du frottement

III) Illustrations

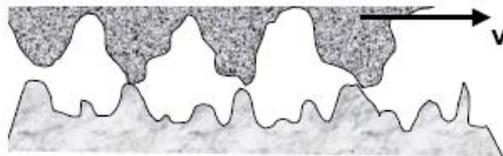
- 1- Frottements secs
- 2- Frottements visqueux
- 3- Technologie

I) THEORIE

1-Frottement secs

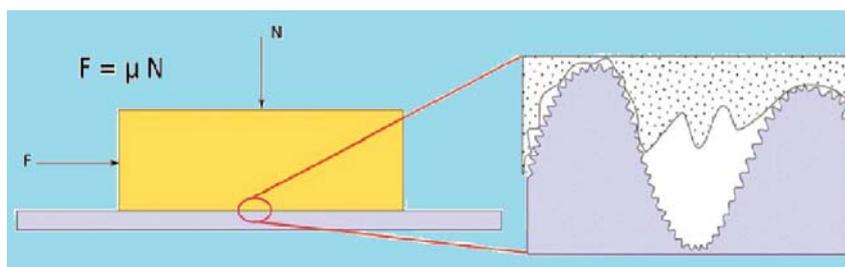
Pour commencer, rappelons que ce frottement n'apparaît que lorsque deux surfaces matériellement distinctes sont en contact et ont tendance à glisser l'une contre l'autre. Ce phénomène en lui-même n'est pas un phénomène unique, c'est une combinaison de plusieurs effets :

- Tout d'abord, la cause la plus intuitive du frottement réside dans le fait que les surfaces de contact ne sont pas parfaites, elles présentent des crêtes et des creux de hauteur et de géométrie variable (cela est regroupé sous le terme de rugosité, une notion importante que nous détaillerons plus tard). Ainsi lorsque les surfaces sont mises en mouvement l'une par rapport à l'autre, les crêtes de l'une viennent se placer dans les creux de l'autre ce qui ralentit le mouvement.



Vue microscopique de l'interface de contact lorsque les deux surfaces sont en mouvement l'une par rapport à l'autre

- Sous l'action du poids les corps en contact se déforment légèrement, ainsi les crêtes de l'un viennent s'encastrent plus profondément dans les creux de l'autre.

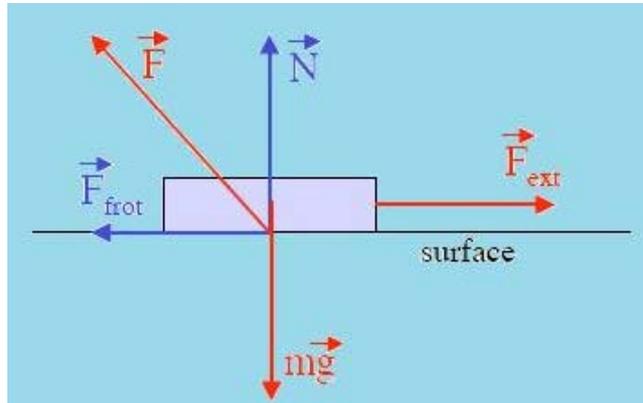


Représentation microscopique du contact entre deux surfaces

- Le troisième effet et qu'au niveau des points de contact, les atomes des matériaux d'une des surfaces se trouvent dans le voisinage très proche des atomes de l'autre surface. Il apparaît donc une attraction atomique entre les deux surfaces au niveau des points de contact. Ceci explique pourquoi il est faux de penser que si les deux surfaces sont parfaitement lisses (jusqu'au niveau macroscopique), le glissement pourra s'opérer parfaitement.

De ces considérations, nous pouvons tirer plusieurs conclusions :

Tout d'abord, les forces de frottements n'apparaissent que lorsqu'un mouvement tangentiel ou une tendance au mouvement tangentiel existe. Par exemple lorsqu'une pierre repose sur le sol, la réaction du sol sur la pierre est uniquement verticale. La force de frottement horizontale n'apparaît qu'au moment où l'on essaie de faire bouger la pierre sur le sol en lui appliquant une force horizontale.



- composante normale à la surface N = réaction (force de liaison)
- composante tangente à la surface F_{frot} = force de frottement sec

On peut aussi en tirer que pour diminuer le frottement, il ne faut pas forcément diminuer la taille des crêtes et des creux des deux surfaces. En effet si l'on diminue la taille des crêtes et des creux, on augmente les forces atomiques entre les deux surfaces et on peut obtenir l'effet inverse de l'effet recherché.

Pour diminuer les frottements, il vaut mieux diminuer la surface totale de contact des deux matériaux. On peut ainsi dans cette optique :

- utiliser un matériau possédant une surface très lisse avec de toute petites crêtes et creux en combinaison avec un matériau dont la surface est plutôt rugueuse avec de grosses crêtes et des creux profonds et larges.
- utiliser des matériaux durs moins déformables de manière à éviter que le frottement augmente sous l'effet combiné de la force normale et la déformation locale du matériau.

De toutes ces considérations, Coulomb a déduit et vérifié les lois qui portent son nom. Ces lois sont expérimentales. Les expériences réalisées par Coulomb ont visé à mesurer la force de frottement en fonction de la force horizontale appliquée à un solide posé sur un plan horizontal et soumis à la pesanteur verticale. Elles ont montré que la force de frottement égalait toujours la force horizontale jusqu'à une valeur maximale de la force de frottement. Ensuite, le solide se met en mouvement et la force de frottement garde une valeur constante dans une plage de vitesses pas trop élevée. Enfin, lorsque la vitesse augmente encore, la force de frottement diminue.

Coulomb a établi que la force de frottement statique maximum était proportionnelle à la force normale (le poids dans ses expériences) selon un coefficient de proportionnalité dépendant du couple de matériaux utilisé et qui est appelé coefficient de frottement statique : $F_{max} = \mu_s N$. Étant donné que la force de frottement ne peut mettre en mouvement le solide, elle ne peut dépasser la force P (le poids). Donc la force de frottement va toujours essayer de réaliser l'équilibre dans la mesure de ses possibilités c'est-à-dire en restant toujours inférieure à la

force de frottement maximale admise selon la loi de Coulomb. On en déduit donc que la première loi de Coulomb s'exprime plutôt de la manière suivante :

$$\text{si } v = 0 : F_{\text{frot}} \leq F_{\text{frot}}^{\text{max}} = \mu_s N$$

μ_s = coefficient de frottement statique

Une question se pose : pourquoi la force de frottement dynamique est-elle inférieure à la force de frottement statique maximale ? Intuitivement, on peut penser que lorsqu'il y a mouvement, les deux surfaces ne sont en contact que par l'intermédiaire des crêtes de leurs irrégularités.

De la même manière, la force de frottement va s'opposer au mouvement au maximum de ses possibilités sans toutefois arrêter le solide. C'est pourquoi, cette fois la seconde loi de Coulomb s'exprime sous la forme d'une égalité

$$\text{si } v \neq 0 : \vec{F}_{\text{frot}} = -\mu_c N \frac{\vec{v}}{v}$$

μ_c = coefficient de frottement cinétique (ou dynamique)

Si une distinction est faite ici dans la notation entre les coefficients de frottement statique et dynamique, il arrive souvent qu'aucune distinction dans la notation ne soit faite.

Coefficient de frottement

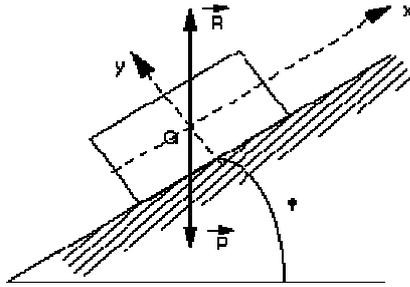
a) mesure du coefficient de frottement statique

En posant un corps sur un plan incliné dont l'angle peut être modifié, on obtient la valeur du coefficient de frottement statique entre le corps et le plan par la relation : $\mu_s = \tan(\alpha_s)$ où α_s est l'inclinaison du plan au moment où le corps perd son équilibre (il suffit d'écrire l'équilibre du corps assimilé à un point matériel et de se placer à l'équilibre limite, c'est-à-dire à l'instant où la force de frottement atteint son maximum).

Si on incline le plan de façon progressive, dans un premier temps la masse ne se déplace pas.

Puis, à partir d'un certain angle, la masse entre en mouvement. On dit que l'on se situe alors "à la limite de l'équilibre".

Si l'on isole la masse "à la limite de l'équilibre", on obtient le schéma (avec les moments exclus, les forces s'appliquent au centre d'inertie du solide).



D'après le principe fondamental de la statique on obtient:

$$\begin{aligned} \{r_x\}_G + \{r_y\}_G &= \{0\}_G \\ \begin{bmatrix} R \sin \varphi & 0 \\ R \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_G + \begin{bmatrix} -P \sin \varphi & 0 \\ -P \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_G &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_G \end{aligned}$$

Soit : $R \sin \varphi = P \sin \varphi$ & $R \cos \varphi = P \cos \varphi$ on a alors $\frac{R_x}{R_y} = \frac{P_x}{P_y} = \frac{R \sin \varphi}{R \cos \varphi} = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \operatorname{tg} \varphi = f$

Avec f : coefficient de frottement

b) mesure du coefficient de frottement dynamique

Pour mesurer μd on peut tirer à vitesse constante le corps disposé sur un plan horizontal. A l'aide d'un dynamomètre on mesure la force nécessaire pour produire le mouvement, on a donc une mesure directe du module de la force de frottement. En faisant le quotient de cette mesure par le module de la réaction normale (ici le poids du corps) on obtient le coefficient de frottement dynamique μd

Notons enfin que ces coefficients de frottement dépendent de beaucoup de paramètres d'origine diverse :

- La nature des matériaux en contact
- La rugosité des surfaces de contact
- L'état des surfaces de contact (sèches, lubrifiées)
- Température.

Le coefficient de frottement est indépendant de :

- La taille et la forme des surfaces de contact
- La valeur de l'effort normal au contact
- La vitesse de glissement du solide

Leur mesure est donc délicate et les valeurs obtenues souvent incertaines.

Il faut noter que le coefficient de frottement dynamique est toujours plus petit que le coefficient de frottement statique.

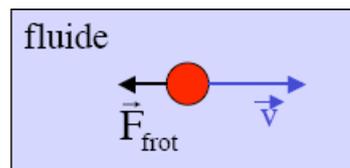
Voici quelques exemples de coefficients

Coefficients de frottement statique et cinétique		
Surface	μ_s	μ_c
Acier sur Acier (sec)	0.6	0.4
Acier sur Acier (lubrifié)	0.1	0.05
Téflon sur Acier	0.041	0.04
Acier sur bois	0.6	0.2
Pneu sur pavé sec	1.0	0.8
Bois sur Bois	0.35	0.15
Acier sur glace	0.03	0.01

2-Frottement visqueux

Un frottement fluide est une force de frottement qui s'exerce sur un objet qui se déplace dans un fluide ; elle dépend de la viscosité du fluide mais aussi de la vitesse relative de l'objet et du fluide. De plus elle est proportionnel à la vitesse de l'objet lorsqu'elle est relativement faible et au carré de la vitesse lorsqu'elle est plus importante. C'est pour cela que si on lève un peu le pied lorsque le conduit, on économise du carburant.

L'exemple typique est celui d'une bille qui tombe dans un liquide visqueux : plus elle va vite, plus la force de frottement fluide qui s'exerce sur elle est importante, jusqu'à ce que soit atteint un régime d'équilibre où la force de frottement compense exactement la force de gravitation : la vitesse de la bille devient alors constante.



Si l'on place une sphère de rayon R dans un fluide visqueux qui s'écoule suivant un régime laminaire avec une vitesse de module v , on montre que le module de la résultante des forces de frottement qui s'exerce sur la surface de la sphère est donné par :

$$F = 6\pi\eta Rv \quad \text{C'est la **formule de Stokes**.$$

Si maintenant on considère le fluide immobile et la sphère se déplaçant à vitesse constante v , correspondant à un écoulement laminaire, le liquide exerce sur la bille une force de frottement qui a la même expression que précédemment. La formule de *Stokes* permet donc de déterminer la vitesse limite v_L atteinte par une sphère tombant dans un fluide de viscosité η .

En effet, les forces qui s'exercent sur la bille immergée qui tombe sont :

– son poids : force dirigée vers le bas et de module $\rho V g$

- la poussée d'*Archimède* : force dirigée vers le haut et de module $\rho_0 V g$
- la force de frottement : force dirigée en sens inverse du mouvement (donc vers le haut si la bille tombe) et de module $6\pi\eta Rv$

où l'on a noté V le volume de la bille, ρ la masse volumique de la bille, ρ_0 la masse volumique du fluide (on supposera, pour que la bille tombe, que $\rho > \rho_0$) et g l'accélération de la pesanteur.

L'équation du mouvement selon la verticale descendante est donc :

$$\rho V \frac{dv}{dt} = (\rho - \rho_0)Vg - 6\pi\eta Rv$$

La force de frottement augmente à mesure que la vitesse v augmente sous l'action du poids diminué de la poussée d'*Archimède*. L'accélération diminue donc progressivement pour finalement s'annuler. On atteint alors une vitesse limite v_L donnée par :

$$6\pi\eta Rv_L = (\rho - \rho_0)gV$$

c'est-à-dire compte tenu de $V = \frac{4\pi R^3}{3}$:

$$\underline{v_L = \frac{2R^2}{9\eta}(\rho - \rho_0)g}$$

Cette formule n'est applicable que si la vitesse limite n'est pas trop grande, c'est-à-dire si le mouvement correspond bien à un régime laminaire. Si elle est trop forte le régime devient turbulent (des turbulences sous forme de tourbillons se forment derrière le passage de la bille) et la formule de *Stokes* n'est plus applicable.

On a alors la formule suivante :

$$\vec{F}_{\text{frot}} = -C_x \frac{1}{2} \rho v^2 S \hat{v}$$

Le régime laminaire pour lequel la formule de *Stokes* est établie est caractérisé par un **nombre de Reynolds**, Re , très faible ($Re < 1$). Ce nombre est un nombre sans dimension qui traduit le rapport entre forces d'inertie et forces de viscosité (le régime devient d'autant plus laminaire que la viscosité est grande, et d'autant plus turbulent que les forces d'inertie sont grandes).

Dans le cas de la chute d'une sphère, on peut le définir par :

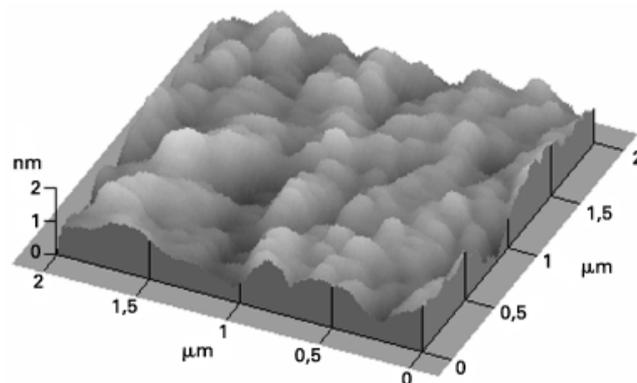
$$Re = \rho v L D / \eta$$

Où $D = 2R$ est le diamètre de la sphère.

Les frottements fluides se produisent dans un grand nombre de contextes, mais il arrive qu'en fonction de l'importance relative des diverses forces en présence, l'influence du frottement fluide soit considérée comme négligeable. Comme toutes les forces de frottement, cette force dépend fortement de la géométrie de l'objet considéré, de sa surface.

IDCAUSES ET EFFETS DU FROTTEMENTS

1-Rugosité



C'est à la surface d'un solide que se produisent les réactions chimiques qui la font évoluer et que se manifestent les phénomènes de frottements.

Les surfaces usinées ne sont jamais parfaites, elles présentent au contraire des défauts de toutes sortes dus aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, etc. On sait depuis longtemps que ces défauts influent profondément sur la tenue en service des mécanismes et la bonne exécution de leurs fonctions tels que guidages ou l'étanchéité.

La confusion est souvent faite entre le degré de propreté et la rugosité d'une surface. Il importe de se rappeler que ces deux notions sont différentes et totalement indépendantes l'une de l'autre :

- la propreté est une caractéristique chimique.
- la rugosité est une caractéristique physique.

On désigne par rugosité les aspérités et les creux d'une surface mesurés par rapport à la surface moyenne assimilée localement à un plan.

L'évaluation de ce paramètre sera d'autant plus sûre qu'elle sera faite sur un domaine étendu, mais on se heurte alors aux défauts de forme de la surface qui ne permettent plus d'assimiler la surface moyenne à un plan.

La rugosité ou l'état de surface est caractérisée par des défauts de surfaces de faibles amplitudes.

Les défauts de rugosité possèdent une grande influence sur les fonctions des surfaces.

Des caractéristiques très diverses telles que :

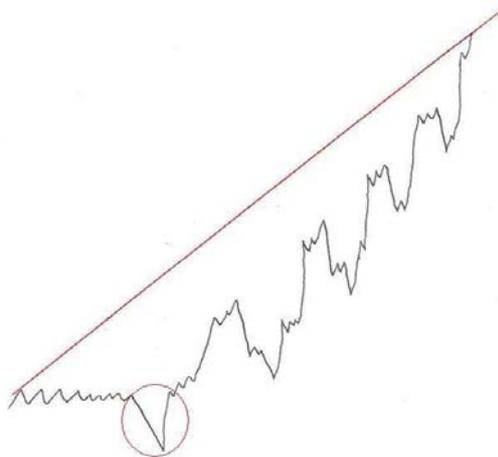
- le frottement de glissement et de roulement,
 - l'étanchéité,
 - la résistance à l'écoulement des fluides,
 - la facilité d'accrochage des revêtements,
- dépendent de la rugosité.

La rugosité de surface constitue deux types de défauts :

-Stries et sillons dus à l'avance de l'arête coupante de l'outil, ou à des vibrations hautes fréquence. On les nomme défaut du troisième ordre (entouré en jaune sur la figure suivante)



-Fentes et piqûres dues au mauvais affûtage de l'outil, aux chocs de l'outil sur la pièce ou à l'empreinte du système de serrage. On les nomme défaut du quatrième ordre (entouré en violet sur la figure).



Les défauts du premier ordre (écart de forme ou de position) et du deuxième ordre (ondulations périodiques) ne sont pas inclus dans la rugosité car ils ne constituent pas des défauts microscopiques.

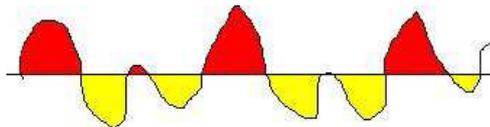
Lignes de référence

Ce sont les lignes à partir desquelles les paramètres du profil sont déterminés. Il y a deux types de ligne.

- Les lignes moyennes : Moyenne arithmétique
Moyenne des moindres carrés
- Les lignes enveloppes : Enveloppe supérieure
Enveloppe inférieure

La ligne moyenne arithmétique :

C'est la ligne de référence qui a la forme du profil géométrique et qui divise le profil de telle sorte que l'aire des crêtes au dessus d'elle et l'aire des creux en dessous soit égale.



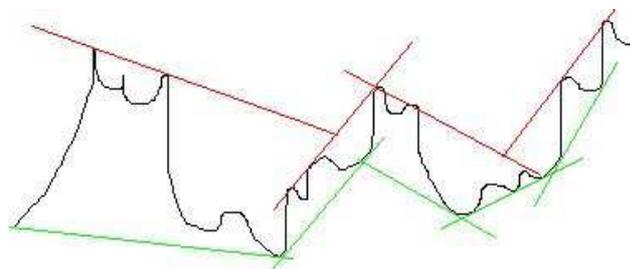
Ici, par exemple, l'aire sous la ligne moyenne arithmétique équivaut à celle située au dessus.

La ligne enveloppe supérieure :

C'est la somme des segments de droite qui joignent les points les plus hauts des crêtes du profil.

La ligne enveloppe inférieure :

C'est la somme des segments de droite qui joignent les points les plus bas des creux du profil.



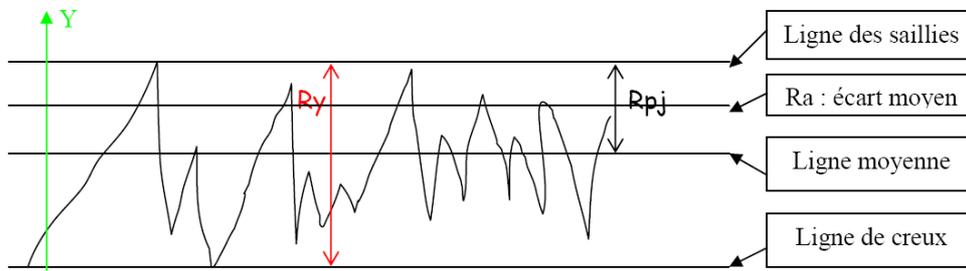
Enveloppe inférieure
Enveloppe supérieure

Plusieurs paramètres dépendent sont liés à la ligne moyenne :

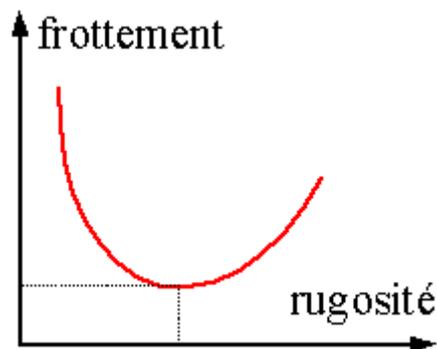
R_{pj} : distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne

Ra : écart moyen arithmétique du profil

Ry : distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux



Tout ces paramètres sont utilisés afin de créer des profils de surfaces pour permettre de les étudier de façon plus exacte.



Ci-dessus l'évolution du frottement en fonction de la rugosité (ici est représenté en pointillés la rugosité optimal)

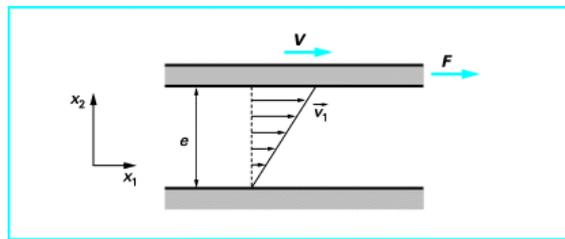
2-Viscosité

La viscosité est le critère qui différencie un fluide réel d'un fluide parfait. Elle est la cause des frottements internes qui entraînent la dissipation d'énergie mécanique en chaleur.

Dans un fluide parfait, les éléments de volume infiniment petits que l'on peut découper par la pensée ne sont soumis qu'à des actions de contact normales à leurs surfaces extérieures, qu'ils soient ou non en mouvement. Dans un fluide visqueux, ceci n'est vrai qu'à l'arrêt ; en mouvement, ces actions ne sont pas partout normales

On ne dispose d'aucune théorie satisfaisante sur la véritable nature des frottements dans les fluides.

On peut définir la viscosité à partir de l'expérience suivante.



Variation de la vitesse d'un fluide contenu entre deux plans parallèles infinis dont l'un est mobile, l'autre fixe

Soit un fluide réel contenu entre deux plans parallèles, de très grandes dimensions, dont l'un est fixe et l'autre mobile avec une vitesse V . Pour que la vitesse V de la plaque soit constante, il est nécessaire d'appliquer une force F parallèle aux plans. Pour certains fluides et tant que V reste inférieure à une valeur critique, l'expérience montre que F est proportionnelle à la vitesse.

Par ailleurs, si l'épaisseur e du film de liquide diminue, la force doit augmenter. Si la plaque supérieure a une surface S , l'expérience montre que F est aussi proportionnelle à S . Ainsi :

$$F = \mu \frac{SV}{e}$$

Le coefficient de proportionnalité μ est appelé coefficient de viscosité dynamique. Son équation aux dimensions est : $[\mu] = [M] [L]^{-1} [T]^{-1}$.

L'unité dans le système international (SI) est le pascal-seconde ($\text{Pa} \cdot \text{s}$).

Cependant, on utilise également le poiseuille ($[\text{Pl}] = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) qui lui est équivalent ($1 \text{ Pl} = 1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$).

Dans le système CGS (centimètre-gramme-seconde), c'est le poise $[\text{Po}] = \text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;
 $1 \text{ Pl} = 10 \text{ Po}$

Viscosité cinématique

Le coefficient de viscosité cinématique est défini à partir du coefficient de viscosité dynamique μ par la relation :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{où } \rho \text{ est la masse volumique du fluide}$$

Sur le plan dimensionnel, on note que : $[\nu] = [L]^2 [T]^{-1}$

Dans un fluide macroscopiquement au repos, on constate que les molécules qui constituent le fluide sont, en réalité à l'échelle microscopique, perpétuellement en mouvement les unes par rapport aux autres. Ce mouvement, qui se superpose à l'écoulement macroscopique du fluide,

crée des chocs, d'une part, entre les parois matérielles et les particules du fluide, d'autre part, entre les particules elles-mêmes.

Lors de tels chocs, il y a échange de quantité de mouvement entre les particules et entre les particules proches d'une paroi et la paroi elle-même : ainsi, ces particules notamment acquièrent, au contact de la paroi, la vitesse de la paroi.

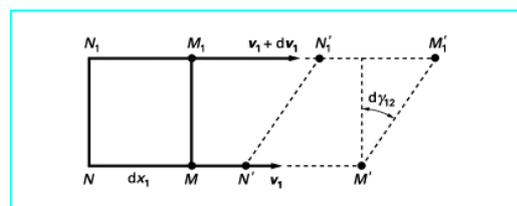
Il doit donc exister, dans la direction x_2 , une variation continue de la vitesse v_1 des particules qui peuvent alors être groupées (fictivement) en couches .

À cause du mouvement à l'échelle microscopique, dit encore mouvement diffusif, les molécules d'une couche peuvent passer dans la couche adjacente. Les molécules changent alors de vitesse de façon à avoir celle de la couche où elles se trouvent après ce transport. Ce changement de vitesse dv_1 s'accompagne d'une évolution de la quantité de mouvement mdv_1 qui, comme toutes les évolutions de quantité de mouvement, est liée à un effort qui s'exerce sur l'élément de masse m . C'est cet effort qui constitue la force de viscosité.

Ainsi, la viscosité apparaît comme étant la traduction de l'échange de quantité de mouvement entre les « couches » de particules s'écoulant à des vitesses différentes.

La relation qui introduit le coefficient de viscosité dynamique, peut être généralisée arbitrairement, la force de frottement F étant ramenée à une contrainte de cisaillement τ . La force de friction éliminée en faisant glisser une «couche» le long d'une autre, comme dans tout écoulement de liquide.

C'est l'équation empirique de Newton. Elle indique que la contrainte de cisaillement entre deux couches de fluide qui s'écoulent à des vitesses différentes est proportionnelle à la vitesse de déformation des particules de fluide.



Déformation d'un élément de volume de fluide en écoulement

En effet, soient deux points M et M_1 (diapo) qui, à l'instant t , ont la même abscisse x_1 . M se déplace à la vitesse $v = v_1 x_1$ et M_1 à $v + dv = (v_1 + dv_1)x_1$. Au bout du temps dt , le point M sera déplacé de la quantité $v_1 dt x_1$, alors que le point M_1 se sera déplacé de la longueur $(v_1 + dv_1)dt x_1$.

La déformation angulaire $d\gamma_{12}$ vaut :

$$d\gamma_{12} = \frac{dv_1 dt}{dx_2}$$

Comme la vitesse de déformation angulaire est par définition $\frac{dv_1}{dx_2}$, on voit que la contrainte de cisaillement s'écrit :

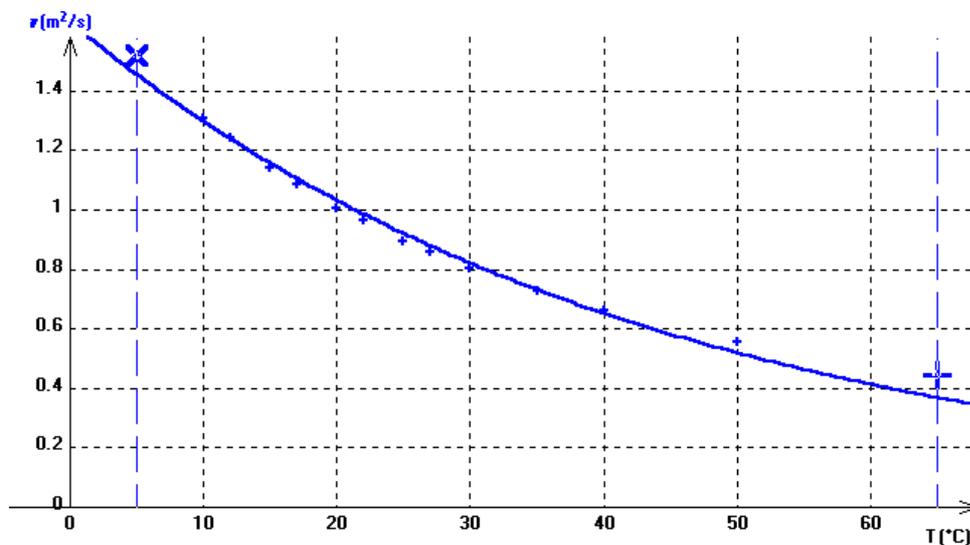
$$\tau = \mu \frac{dv_1}{dx_2}$$

La viscosité dépend avant tout de la nature du fluide, elle est faible pour les liquides dits « mobiles » comme l'eau, l'essence, l'éther éthylique, et beaucoup plus forte pour les sirops, les huiles, l'acide sulfurique concentré ou la glycérine. Elle dépend de nombreux facteurs, dont le plus important pour les applications pratiques est la température.

Ci-dessous, voici le tableau de l'évolution de la viscosité dynamique de l'eau liquide avec la température

ϑ (en °C)	0	10	20	50	100	150	200
μ (en mPa · s)	1,83	1,33	1,03	0,56	0,28	0,18	0,14

Et voici la courbe représentant la variation de la viscosité cinématique de l'eau avec la température



L'on peut remarquer que plus la température augmente, plus la viscosité dynamique diminue.

3-Manifestation du frottement

L'usure

L'usure est la perte progressive de matériau due à l'interaction de surfaces en mouvement l'une par rapport à l'autre.

Elle est mesurée par le taux d'usure spécifique W_s d'un matériau.

De nombreux phénomènes indépendants participent à l'usure d'un matériau:

* usure par abrasion: C'est une "coupure" provoquée par des irrégularités sur la surface. Cette forme de dégradation est généralement combattue, mais aussi utilisée pour l'usinage : des taux d'usure importants sont recherchés et obtenus avec des outils abrasifs en rectification, affûtage, etc. L'abrasion coûte très cher, on lui attribue à peu près le tiers du total des pertes économiques dues à l'usure. Elle concerne de nombreux mécanismes fonctionnant dans des conditions sévères : machines agricoles, matériels de travaux publics, matériel minier .

Les surfaces présentent des sillons de profondeur variable, parallèles au déplacement. L'usure est assez constante au cours du temps, le volume des débris croît linéairement avec la charge appliquée et la distance parcourue. La vitesse n'intervient que si l'échauffement modifie les caractéristiques du matériau.



Conséquence de l'usure par abrasion

* usure par fatigue: C'est la rupture du matériau due à des contraintes répétées exercée par des irrégularités sur la surface.

L'usure par fatigue est lente et habituellement masquée par l'abrasion ou l'adhésion. Induite par le frottement de roulement ou de roulement avec glissement sous fortes charges répétées, on la rencontre essentiellement dans les engrenages et les roulements dont elle constitue le mode normal de destruction.

Une longue phase de vieillissement précède les accidents visibles. Une pièce peut être atteinte irrémédiablement tout en gardant jusqu'au dernier moment une apparence intacte. Il existe cependant un certain nombre de manifestations extérieures qui permettent, dans certains cas, un suivi des pièces en service.

* *usure par adhérence*: Le matériau d'une pièce est transféré et solidement soudé sur l'autre. Les pièces peuvent être immobilisées par un grippage, dont la forme n'est reconnaissable qu'au début, avant que les surfaces ne soient complètement défigurées.

Contrairement à ce qui se passe dans le cas de l'abrasion, de brusques changements de régime d'usure peuvent résulter de légères modifications des paramètres. Pour des surfaces non lubrifiées, le coefficient de frottement n'est pas multiplié par plus de vingt mais le taux d'usure peut varier d'un facteur un million.

Il faut insister sur la solidité des soudures formées par usure adhésive.



Conséquence de l'usure par adhésion

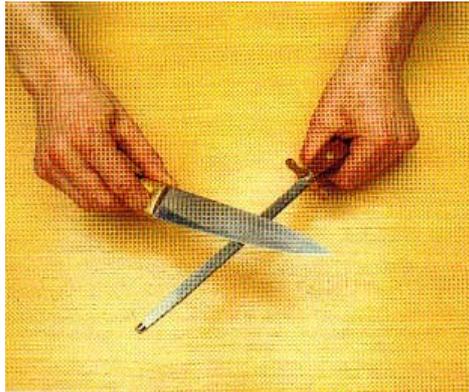
L'usure est un ensemble complexe de phénomènes difficiles à interpréter. L'usure a pour conséquence une émission de débris avec perte de masse, de cote, de forme, le tout s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces.



Comme nous pouvons le constater, l'usure a entraîné des transformations physique du pneu (l'on remarque particulièrement bien la perte de matière a travers la taille des sillons).

L'usure ne varie généralement pas de manière progressive en fonction de paramètres tels que la vitesse, la température ou le temps. Certaines formes d'usure sont relativement régulières, alors que d'autres, au contraire, connaissent des sauts très brutaux, dans des rapports pouvant aller parfois de 1 à 100 000 ou plus, lorsque certaines valeurs critiques sont franchies.

L'usure est généralement combattue à cause de ses effets négatifs mais elle présente aussi des aspects favorables. L'affûtage d'un outil, la finition d'une surface par rectification, l'écriture de la craie sur le tableau ou du crayon sur le papier sont des exemples d'usures abrasives utiles.



Affutage d'un couteau

La plupart du temps, l'usure globale d'un mécanisme est due à plusieurs processus qui agissent simultanément, plus rarement à un processus bien défini et identifiable. L'effet de ces actions simultanées est souvent plus important que la somme des effets que l'on produirait en faisant agir séparément les divers processus, on parle parfois de « suradditivité ». À l'opposé, certaines formes d'usure s'excluent mutuellement : par exemple, les dents s'usent principalement par carie et par abrasion, mais ces deux processus ne coexistent absolument pas, les zones abrasées ne sont jamais cariées.

Le bruit

Dans de nombreuses applications où une pièce glisse, le bruit émis est indésirable et l'on cherche à le réduire. Le bruit étant une notion difficile à définir, il est important d'en distinguer deux types:

* Le bruit mécanique, qui n'est pas lié aux frottements, mais aux chocs qui se produisent entre les pièces en mouvement. Si l'on est dans le cas de mouvements à fréquence élevée, ce type de bruit peut ressembler à un grincement. Une meilleure conception des pièces permet souvent de le réduire. Une autre solution consiste à utiliser des matériaux plus souples dotés d'un meilleur pouvoir d'amortissement.

* Le grincement, qui est dû au frottement et lié au coefficient de frottement. En règle générale, on peut affirmer que si le coefficient de frottement dynamique est plus élevé que le coefficient de frottement statique, le mouvement entre les deux surfaces peut être discontinu (l'on appelle cela l'effet de broutement, ou le stick-slip).

L'échauffement

L'énergie mécanique perdue par frottement, transformée en chaleur, est généralement irrécupérable et parfois très difficile à évacuer. Les calories produites par le frottement d'un crayon sur une feuille de papier ne sont pas dérangeantes, mais il n'en est pas de même lors de la conception des freins d'un train à grande vitesse ou de ceux d'un avion de ligne. Les aspects thermiques du frottement peuvent avoir des conséquences inattendues. Pour commencer, cela provoque une usure plus rapide des pièces, voir une déformation de celles-ci. De plus, l'échauffement peut être la cause de transformation chimique des matériaux de l'outil.

Les vibrations

Lors du frottement, des vibrations se créent, causant ainsi un bruit ou des sons musicaux. Par exemple le grincement d'une porte est dû aux vibrations qui sont créés lors de l'ouverture de celle-ci.

Les odeurs

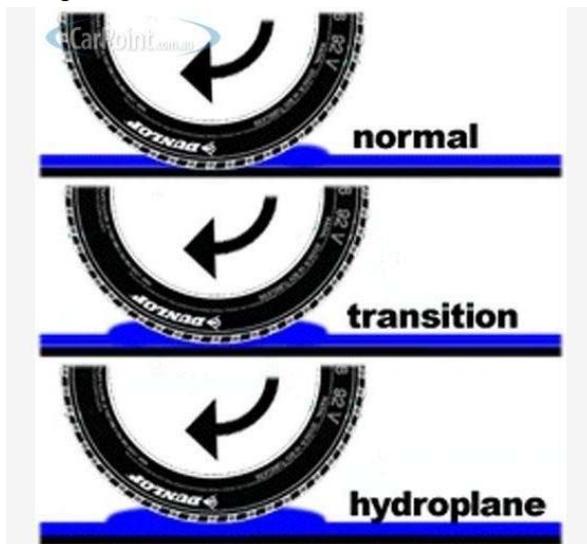
Parfois, lors du frottement des odeurs sont dégagées. On peut le remarquer surtout lorsque l'on perce ou chauffe une pièce de plastique.

III) ILLUSTRATIONS

Il existe de nombreuses illustrations des frottements secs et visqueux. En voici quelques exemples.

Aquaplaning

L'aquaplaning est un phénomène courant lors de fortes pluies. Il y a lors de l'aquaplaning, une perte d'adhérence très rapide qui déstabilise souvent le conducteur. L'aquaplanage consiste en une perte de contact entre la roue et le sol, causée par une barrière d'eau.



Sur la première image, l'on est dans une situation de frottement sec. On passe ensuite à un régime onctueux où une fine couche d'eau vient entre le pneu et la route mais celle-ci n'est pas assez épaisse pour éviter à la roue de toucher le sol. Lors de ce régime, il y a présence de frottements secs et visqueux. Enfin sur la troisième, il y a aquaplaning, nous sommes dans un régime hydroplane, le pneu ne touche plus le sol.

Le pneu ne peut plus évacuer cette eau accumulée en trop importante quantité. Le véhicule reprendra son adhérence lors de sa perte de vitesse, sur une zone moins détrempée.

Matériaux de frein

Un frein est un système permettant de ralentir, voire d'immobiliser, les pièces en mouvement d'une machine ou un véhicule en cours de déplacement.

Son fonctionnement repose sur la dissipation de l'énergie cinétique du véhicule en énergie thermique. Le frottement de pièces mobiles (ici les rotors) sur des pièces fixes (stators) est généralement utilisé.

Le frein est donc un système d'absorption de chaleur. Son efficacité est liée à la capacité de ses constituants d'absorber et de résister de la chaleur et au coefficient de frottement entre eux.

Les freins constituent un organe de sécurité important :

- sur les véhicules, ils permettent de réguler la vitesse, et de s'arrêter, donc notamment d'éviter une collision (freinage d'urgence)
- sur les machines ayant des pièces en mouvement, la gestion du mouvement est un élément important du travail de la machine, et en cas de défaillance ou d'accident, l'arrêt de la machine est une nécessité absolue.

Il existe plusieurs technologies de frein dont le frein à disque.



Frein à disque

Le frein à disque est un système de freinage performant pour les véhicules munis de roues en contact avec le sol : automobile, avion, train, etc. et pour diverses machines.

Les plaquettes de freins équipent tous les véhicules munis d'un frein à disques. Elles ont pour rôle de serrer (frottement) les disques lors du freinage afin de ralentir sa vitesse ou d'immobiliser le véhicule.

Ce travail use la plaquette sur la garniture qui est en contact avec le disque. La garniture s'amincit à chaque freinage sous l'effet du frottement et de la chaleur engendrée.

Pour le freinage, on utilise le frottement sec.

Sur l'image au dessus, on peut remarquer les nombreux trous fait dans le disque. Ils permettent à la chaleur d'être évacué beaucoup plus rapidement.

Phénomènes aérodynamiques

En-dessous de 1000 km/h, le frottement de l'air sur les ailes des avions ne pose pas de problème particulier mais il n'en est pas de même aux vitesses supersoniques. La dilatation de la structure est le premier problème auquel doivent faire face les ingénieurs. L'avion supersonique Concorde volant à sa vitesse de croisière s'allongeait de quelques 25 cm sous l'effet du frottement de l'air, ce qui est évidemment loin d'être négligeable.

Les conditions deviennent particulièrement sévères lorsqu'un véhicule spatial lancé à plusieurs kilomètres par seconde pénètre dans l'atmosphère de la Terre ou d'un autre corps céleste.



Navette Discovery depuis la Station Spatiale Internationale

Un exemple récent est celui du bouclier thermique qui a permis à la sonde Huygens de se poser sur Titan, un satellite de la planète Saturne, le 14 janvier 2005. Ce bouclier a été le premier fabriqué en Europe. En trois minutes environ, le frottement atmosphérique sur ce bouclier a permis de faire passer la vitesse de la sonde de 6 km/s à 400 m/s.

Cette pièce avait la forme d'une soucoupe de 2,75 m de diamètre, réalisée en fibres de carbone avec un structure d'aluminium en nid d'abeilles, et comportant une couche de protection thermique de moins de 20 mm d'épaisseur. Celle-ci était constituée d'environ 200 dalles d'un composé ablatif (qui disparaît au fur et à mesure du fonctionnement) à base de fibres de silice dans une matrice de résine phénolique. Ce matériau est à la fois très solide, très léger et très isolant.

Bien que sa masse n'ait pas dépassé 80 kg, ce bouclier a supporté un flux thermique de l'ordre de 1 MW/m² pendant l'entrée dans l'atmosphère de Titan, avec des températures de surface pouvant atteindre 1500°C. La température du plasma provoqué par l'onde de choc en avant du

bouclier était supérieure à celle de la surface du Soleil ... De plus, les caractéristiques chimiques de l'atmosphère traversée étaient très différentes de celles de l'atmosphère terrestre.

De telles décélérations correspondent à la dissipation d'une énorme énergie. Une partie de celle-ci chauffe l'atmosphère traversée, évidemment sans conséquence, mais le reste est absorbé par le véhicule lui-même, d'où un échauffement très important. Pour éviter que les véhicules spatiaux soient désintégrés ou consumés à la manière des météorites qui se transforment en étoiles filantes dans l'atmosphère terrestre, il est important de calculer la trajectoire de pénétration de façon à réduire le plus possible les pics de température, mais aussi d'utiliser des formes appropriées et surtout des matériaux très particuliers.

Le frottement dans l'atmosphère n'a pas que des mauvais côtés. L'environnement de la Terre est en effet pollué par d'innombrables débris mis en orbite au cours des quelques 5000 lancements d'engins spatiaux de tous types. Parmi ces débris, dont la masse totale est estimée à environ 3000 tonnes, ceux qui se trouvent aux altitudes les plus basses sont freinés de plus en plus efficacement et promis à la désintégration dans les couches plus denses de l'atmosphère ; seuls quelques éléments plus massifs que les autres atteignent le sol de notre planète. Ce processus peut demander quelques jours, quelques mois ou quelques années, mais il aboutit toujours à « nettoyer » la très haute atmosphère

Technologie

Il existe différentes technologies qui permettent de diminuer les frottements indésirables. Ci-dessous nous allons en étudier quelques uns.

Étanchéité

Le problème de l'étanchéité se pose chaque fois que l'on doit séparer deux volumes caractérisés par deux pressions ou deux milieux différents. La différence de pression existant entre ces deux volumes entraîne l'apparition d'un courant de débit qui doit être étanché.

-S'il n'y a pas de vitesse entre les solides on parle d'étanchéité statique :
On va rencontrer le problème du maintien du contact entre les solides et donc de l'uniformité de la pression.

- Si il y a une vitesse entre les solides on parle d'étanchéité dynamique :
On va rencontrer le problème du frottement du joint sur la surface et donc celui de la rugosité.
De plus le joint entraîne la dissipation de la puissance.
On est ici en présence de frottement visqueux.

Lubrification

Le but de la lubrification est de diminuer les frottements, en réduisant l'usure et en améliorant le rendement (c'est-à-dire que l'on cherche plus de puissance et moins de consommation). C'est la fonction la plus évidente de l'huile.

Il résulte de tout ce qui précède concernant les lois du frottement sec et les inconvénients du frottement entre les corps mobiles tel que l'usure ou l'échauffement, qu'il s'avère très nécessaire d'interposer une couche fluide entre les surfaces frottantes permettant de diminuer considérablement la résistance au glissement donc de protéger contre l'usure adhésive les pièces en contact.

Le lubrifiant doit remplir certaines conditions, afin d'être vraiment efficace, tels que :

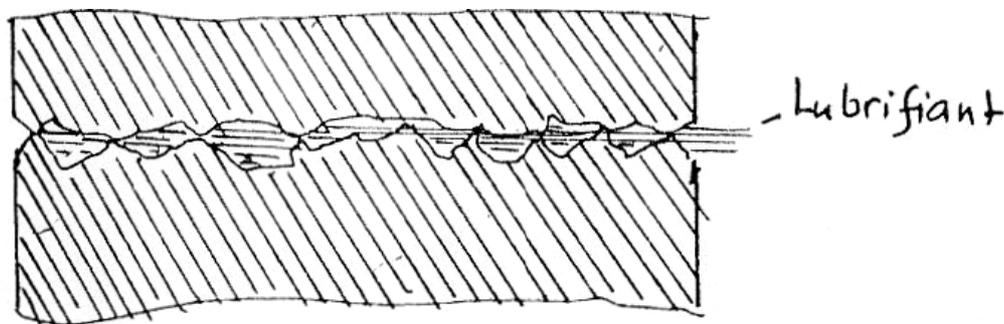
- une température d'ébullition assez élevée,
- une température de solidification relativement basse,
- une faible affinité pour l'oxygène de l'air,
- être passif vis à vis des surfaces frottantes de façon à assurer un long usage sans modification notable des propriétés,
- adhérer aux surfaces de frottements

Pratiquement, seules les huiles et graisses d'origine minérale remplissent suffisamment ces conditions pour pouvoir être utilisées comme lubrifiants.

Il existe deux types de lubrification :

-Le régime onctueux

Lors de ce régime, l'épaisseur de la couche lubrifiante est inférieure à la hauteur des aspérités des surfaces frottantes. Les surfaces restent en contact par leurs aspérités auxquelles adhère une faible couche de lubrifiant offrant une résistance mécanique non négligeable à l'écrasement et l'arrachement et c'est cette résistance qui définit l'onctuosité du lubrifiant ou le pouvoir graissant en couche mince.

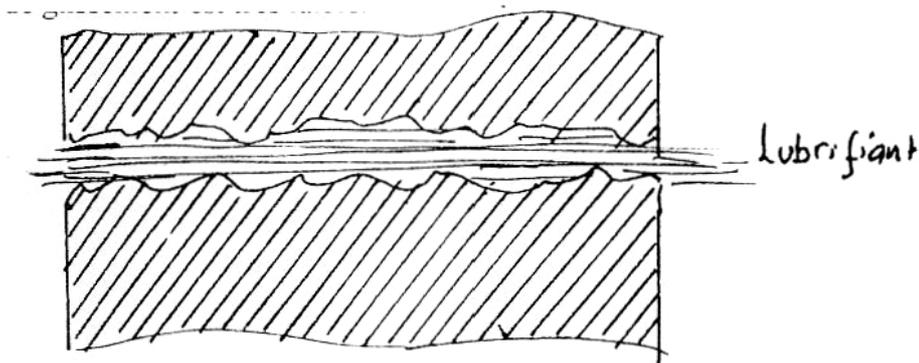


Voici un exemple de régime onctueux. On voit bien que la couche de lubrifiant est

inférieure à la hauteur des aspérités.

-Le régime hydrodynamique

Lors de ce régime, la couche d'huile est suffisamment grande pour que les aspérités des pièces ne puissent venir en contact, l'épaisseur du film d'huile est alors 1000 fois plus élevée que dans le régime onctueux et la résistance de glissement est très faible. C'est ce régime qui est utilisé dans les moteurs.



Traitement anti-usure

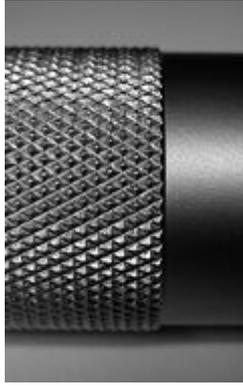
Un traitement anti-usure est un procédé visant à améliorer la résistance d'un métal à l'usure. Il peut être mécanique, des métaux ferreux ou électrochimique (par exemple l'électropolissage).

Certain diminue le coefficient de frottement alors que d'autre amplifie l'action des lubrifiants.

Le traitement des métaux ferreux augmente la dureté superficielle et la résistance à l'oxydation et à la corrosion.

Le traitement mécanique tel que le moletage améliore le poli, la dureté et la résistance.

Le moletage est une opération qui consiste à réaliser des stries sur une surface, il améliore le poli, la dureté et la résistance.



Voici un exemple de moletage

L'électropolissage est un procédé électrochimique de grande utilité, avec lequel on obtient un éclat et un poli sans altérer la couche superficielle d'une construction de pièces métalliques.

Après ce traitement chimique, on constate :

- une résistance plus marquée à l'usure
- une augmentation de la résistance à la corrosion des métaux
- une rugosité divisée par 2.

Réduction des frottements



Moteur de voiture

Les frottements s'opposent à l'avancement de la voiture et le moteur doit les vaincre, ce qui requiert de sa part un surcroît de puissance pénalisant pour la consommation. Tous les éléments en mouvement d'une voiture, de son moteur à ses pneumatiques en passant par la transmission, sont à la source de frottements. S'il n'est pas possible de les éliminer totalement, leur réduction optimise le rendement global du véhicule et minimise ainsi ses émissions.

Il serait utopique de vouloir éliminer totalement les frottements. Cependant, les réduire permet d'accroître le rendement global du système mécanique. En automobile, ce point se traduit par une réduction de la puissance que doit développer le moteur dans des conditions de roulage identiques, et conduit donc à une réduction de ses émissions. Les études que mène Renault pour réduire les frottements de ses véhicules concernent de nombreux éléments de la consommation et, par voie de conséquence, les émissions.

Les recherches se porte sur :

- Le moteur qui comporte de nombreuses pièces en mouvement. Or, les frottements sont directement liés à leurs surfaces en contact. Réduire la taille des pistons, entre autres, permet de réduire ces surfaces de contact et ainsi les frottements.

- La distribution qui elle aussi est une importante source de frottements dans le moteur est constitué d'arbre à cames et de courroie, réduira encore les frottements internes du moteur.

- La boîte de vitesses qui fait aussi l'objet d'études pour minimiser ses frottements internes. De plus, de nouvelles solutions, comme les boîtes de vitesses robotisées, permettent de limiter la puissance que consomme la boîte au strict nécessaire pour assurer le changement des rapports

- L'aérodynamique qui joue aussi un rôle important. En facilitant la pénétration dans l'air de la voiture, elle réduit la résistance à l'avancement à vitesse élevée, que l'on peut assimiler à un frottement avec l'air.

- L'huile ou les pneus qui ont un impact direct sur les frottements comme nous avons pu le voir auparavant.

- Pour les pneumatiques, une pression inadaptée, outre le danger qu'elle présente, peut accroître considérablement la résistance à l'avancement des roues. Les pneus doivent jouer sur l'équilibre entre adhérence et résistance à l'avancement. Or, un bon compromis ne peut être obtenu que pour une surface de contact précise entre le pneu et la route, directement liée à sa pression. Deux points que le conducteur doit surveiller de près pour préserver le bon rendement global de sa voiture.

Conclusion

Les frottements interviennent dans la grande majorité des phénomènes physiques de la vie courante. Ils sont quelquefois exploités (par exemple pour le freinage, le sciage, le polissage, le lavage, etc.), mais ils ont aussi des conséquences fâcheuses (usure, perte d'énergie et de rendement, échauffement, etc.) pour les êtres vivants et de nombreuses applications technologiques et économiques.

C'est pour cela que dans certains cas on recherche encore à minimiser ces frottements. En 2004 les chinois ont inauguré un train à sustentation magnétique est un train qui utilise les forces magnétiques pour se déplacer, ce qui lui permet de ne pas être en contact avec des rails, contrairement aux trains classique. Ce procédé permet de minimiser les frottements et d'atteindre des vitesses plus élevées : 350 km/h contre 320 km/h pour un TGV



Le Transrapid de Shanghai

BIBLIOGRAPHIE

- <http://fr.wikibooks.org/wiki/Tribologie> (livre sur internet)
- <http://mathias.bavay.free.fr/these/html/node192.html>
- <http://www.palais-decouverte.fr/index.php?id=176>
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Frottement_fluide
- <http://www.techno-science.net/?onglet=ouvrages&ID=2271056683>
- http://www-lpmcn.univ-lyon1.fr/~lbocquet/tribologie_Bocquet
- http://www.jdotec.net/s3i/Mecanique/ActionsMeca/Lois_du_frottement.php
- www.lgit.univ-savoie.fr/PageHTML/.../hassani_lste3_TP2.pdf -
- www.lgit.univ-savoie.fr/PageHTML/.../hassani_lste3_TP1.pdf -
- <http://www.cegep-ste-foy.qc.ca/profs/rfoycapsules/frott.html>
- <http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/physique/PHYS/Term/Mecaflu/Poly-mecaflu.htm>
- <http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/physique/Tp-phys/Term/TP-fluid/visco-eau.htm>
- <http://fr.wikipedia.org/wiki/Viscosit%C3%A9>
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Viscosit%C3%A9_cin%C3%A9matique
- <http://www.biochimie.univ-montp2.fr/deug/viscosite/index.htm>
- <http://aleph2at.free.fr/index.html?http://aleph2at.free.fr/glossaire/viscosite.htm>
- <http://bensaada.123.fr/documentation/document25.pdf>
- <http://www.techniques-ingenieur.fr/>
- http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89tat_de_surface
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Rugosit%C3%A9_et_adh%C3%A9sion
- <http://www.ac-creteil.fr/lycees/94/ebranlycreteil/cours/techno/html/rugosite00.htm>
- <http://uptv.univ-poitiers.fr/web/data/pièces/ps1024161332.pdf>
- <http://bensaada.123.fr/documentation/document23.pdf>
- <http://web.univ-pau.fr/~nancy/frottement/frottement.htm>
- <https://documents.epfl.ch/groups/l/la/lastro-unit/www/PhysGenII/cours/physmaths03bsmall.pdf>
- http://beams.ulb.ac.be/beams/teaching/meca100/More/seminaire_frottements.pdf
- <http://espace-prepa.ifrance.com/textes/etudedesurface.pdf>
- <http://pagesperso-orange.fr/christian.chamayou/chameca/Cours/Frottement.pdf>
- <http://espace-prepa.ifrance.com/textes/etancheite.pdf>
- <http://pagesperso-orange.fr/christian.chamayou/chameca/Cours/Etancheite.pdf>
- <http://fr.wikibooks.org/wiki/%C3%89tanch%C3%A9it%C3%A9>
- <http://www.caradisiac.com/Renault-la-reduction-des-frottements-augmente-le-rendement-global-et-minimise-les-emissions-1223.htm>
- <http://www.tunisianindustry.nat.tn/fr/Guides/IMM/1.pdf>
- <http://fr.wikipedia.org/wiki/Frein>
- <https://sites.google.com/a/cambien.net/triumph/Home/astuces/les-huiles>
- http://ici-chine.com/articles/tout_sur_la_chine/technologie/le-train-a-sustentation-magnetique.php