



# Frottements et viscosité

### UN PEU D'HISTOIRE



**Aristote** (384-322 av. J.-C.), avait remarqué que « le corps en mouvement s'arrête quand la force qui le pousse ne peut plus agir de façon à le pousser ». Mais est-ce bien vrai dans l'absolu ? Par ses travaux, **Newton** (1642-1727) mettra en évidence le contraire, avec le



principe d'inertie : « Tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite, à moins qu'il ne

soit déterminé à changer cet état par des forces agissant sur lui ». Cela signifie donc que si un corps n'est soumis à aucune force (ou s'il est soumis à différentes forces qui s'annulent entre elles, ce qui revient au même), soit celui-ci est immobile, soit il avance en ligne droite à vitesse constante. Lorsque l'on fait glisser un livre sur une table, celle-ci compense exactement le poids du livre et donc, a priori, une fois que l'on arrête de pousser le livre, il devrait continuer de glisser indéfiniment, en ligne droite et avec une vitesse constante. Pourtant ce n'est pas ce que l'on observe... Si le livre finit par s'arrêter, c'est parce que la table ne fait pas que compenser son poids. Elle lui applique une autre force, qui n'est neutralisée par rien d'autre et qui tend à arrêter le mouvement : c'est la force de frottement. Comme les frottements sont omniprésents dans notre environnement, Aristote n'a

pas pu le reconnaître comme phénomène particulier, mais les a implicitement pris en compte comme une sorte de donnée inhérente au monde.

### IMPLICATION DU FROTTEMENT

#### MANIFESTATIONS DU FROTTEMENT

Les frottements sont partout dans notre quotidien. On peut les mettre en évidence de différentes manières. On a déjà cité le livre glissant sur une surface et qui finit par s'arrêter. On pourrait encore faire le même genre d'expérience avec un pendule. Si on lui fait effectuer de larges oscillations et qu'on le laisse évoluer librement, on remarquera que l'amplitude des oscillations va fortement diminuer, jusqu'à l'arrêt complet. Là encore, les frottements sont responsables. Ils impliquent une dissipation d'énergie du système, et agissent ainsi « contre » le mouvement.

#### UN MONDE SANS FROTTEMENTS

Difficile d'imaginer vivre dans un monde sans frottements. Non seulement on ne pourrait saisir aucun objet, mais il serait également impossible de se déplacer : le monde serait une vaste patinoire (et encore, même sur une patinoire, des frottements existent !). Si c'est grâce aux frottements entre le **pneu** et la



route qu'un vélo peut avancer – la roue prenant en quelque sorte « appui » sur le sol – c'est aussi

grâce à eux qu'il peut s'arrêter. En effet, parce qu'ils dissipent de l'énergie, les frottements ont un rôle essentiel dans le système de freinage.

#### INCONVÉNIENTS

Cette inévitable dissipation d'énergie n'est pas toujours appréciée, certains cherchent même à la minimiser en réduisant au maximum les frottements. Il s'agit en effet d'un facteur limitant, notamment pour les machines : non seulement les frottements dégradent les pièces, mais ils dissipent de l'énergie sous forme de chaleur. Cela implique la perte d'une partie de l'énergie fournie à la machine, qui ne peut plus être récupérée ou utilisée. Outre cela, il faut faire attention à ce que l'échauffement ne soit pas trop important, pour ne pas détériorer le système.

### QU'EST CE QUE LE FROTTEMENT ?

#### ORIGINE

La surface des objets lisses en apparence est en réalité très chaotique. Si on l'examine au niveau microscopique, elle présente de nombreuses aspérités, de tailles variables et réparties aléatoirement. Ainsi, lorsque deux solides entrent en contact, les protubérances de l'un peuvent combler les enfoncements de l'autre, et vice versa. Pour les faire glisser l'un sur l'autre, il faut fournir suffisamment d'énergie pour que ces protubérances sortent de leur logement, voire détruisent les obstacles (d'où un phénomène d'usure).

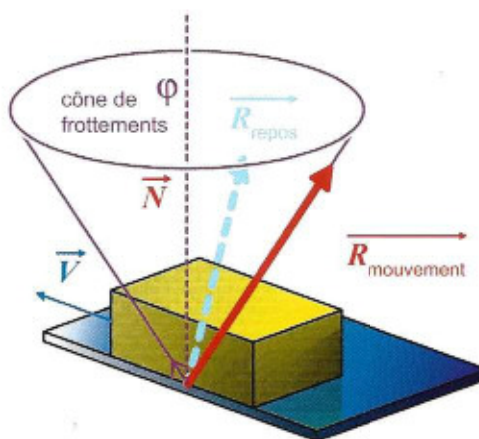
#### DIFFÉRENTS TYPES DE FROTTEMENTS

On catégorise les frottements selon la nature des contacts : on dit ainsi que deux solides en contact sont soumis à un « frottement solide », tandis que le frottement intervenant lors du déplacement d'un solide dans un fluide (liquide ou gaz) est en toute logique qualifié de « frottement fluide ». Concernant le frottement solide, on distingue usuellement deux cas : si les deux solides sont initialement au repos, on parle de frottement statique, mais s'ils glissent l'un sur l'autre, on parle plutôt de frottement cinétique. Des frottements interviennent également au sein même d'un fluide, ils sont à l'origine de la viscosité.

#### FORCE DE FROTTEMENT

Les frottements contribuent à une dissipation d'énergie et s'opposent de ce fait au mouvement. On a donc décidé de les modéliser par une force qui possède la même direction que la vitesse, mais ayant un sens

### Le cône de frottements



opposé. On a tenté de calculer la valeur de cette force à partir de considérations microscopiques (en tenant compte des micro aspérités), mais tous les efforts en ce sens sont restés vains : les modèles qui en résultaient n'arrivaient pas à rendre compte de la réalité. Ceci est dû à la très grande complexité de la distribution des atomes (et donc des aspérités) dans les zones de contacts. Pour décrire l'action macroscopique des frottements, celle qui nous intéresse au quotidien, on se contente donc de lois phénoménologiques, c'est-à-dire qui ont été établies non pas par des calculs, mais suite à de nombreuses expériences.

### FROTTEMENT SOLIDE

#### FROTTEMENT CINÉTIQUE

Les lois expérimentales décrivant les frottements solides ont été établies par **Charles Augustin de Coulomb** en 1779 et sont appelées « Lois de Coulomb ». Lorsque deux solides glissent l'un sur l'autre, par exemple un livre sur une table, la force de contact **R** se décompose en deux « sous-forces » perpendiculaires : l'une, **N**, est normale à la zone de contact, l'autre, dite « tangentielle » et notée **T**, correspond à la force de frottement cinétique. On appelle **V** la vitesse de glissement des deux solides (en considérant l'un comme fixe, **V** est la vitesse de l'autre). Loi du frottement cinétique : la force de frottement **T** a la même direction que **V**, dirigée à l'opposée de celle-ci, et de valeur égale à celle de

l'action de contact normale **N** multipliée par une constante  $f_c$  caractéristique de la nature des surfaces en contact.  $f_c$  est appelé « coefficient de frottement de glissement ». On remarque donc que la valeur de la force de frottement dépend de la force normale : il sera d'autant plus difficile de faire glisser le livre que l'on appuie dessus en même temps. Elle dépend aussi de la nature des surfaces. Ainsi **T** sera différent si la table est en bois ou si elle est en métal. En revanche, elle ne dépend pas de la surface de contact : elle est identique, que le livre glisse sur la couverture ou sur la tranche.

#### FROTTEMENT STATIQUE

Si les deux solides en contact sont immobiles l'un par rapport à l'autre, c'est-à-dire  $V=0$ , les valeurs des forces normale et de frottement vérifient l'inéquation suivante, dans laquelle  $f_s$  correspond au coefficient de frottement statique :  $T \leq f_s N$ . Pour comprendre cette inéquation, on peut reprendre l'exemple du livre sur la table et imaginer qu'on lui applique une force **F** de plus en plus forte parallèlement au support, pour essayer de le faire bouger. La loi de Coulomb prédit que le livre ne bougera pas tant que la valeur de **F** est plus petite que  $f_s N$ . Ici, les frottements « empêchent » le mouvement de s'établir. Dès que  $F = f_s N$ , les solides glissent l'un par rapport à l'autre, et on retrouve le cas du frottement cinétique.

#### COEFFICIENT DE FROTTEMENT ET CÔNE DE FROTTEMENT

Les coefficients de frottement statique et de glissement ne dépendent que de la nature des solides en contact (bois sur bois, métal sur métal...), et sont a priori différents :  $f_s > f_c$ . Cependant, cette

### Qui s'y frotte s'y chiffre

1687



Newton énonce le principe d'inertie.

1779



Présentation des Lois de Coulomb.

1883

Introduction du nombre de Reynolds.

1,72.10<sup>5</sup> Pa.s

Viscosité de l'air à 20 °C.

0,2

Coefficient de frottement du métal sur métal sans lubrifiant.

0,05

Coefficient de frottement du métal sur métal avec lubrifiant.

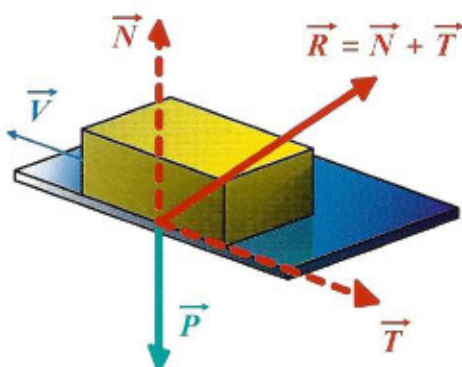
L'huile OW50



Elle supporte des températures allant de -35 °C à +60 °C.

Une huile la plus résistante

### Loi du frottement cinétique



$$N = P$$

$$R = f_c N$$



différence n'est que très légère, et, étant donné que les lois ont été établies par des expériences et ont donc un caractère très approximatif, on confond généralement les deux valeurs en parlant du coefficient de frottement  $f$ . Ce coefficient peut s'écrire de la manière suivante :

$f = \tan \varphi$ , où  $\varphi$  représente un angle. Le cône ayant pour axe la normale au contact et pour demi angle au sommet  $\varphi$  est appelé cône de frottement. Lorsque les deux solides sont immobiles l'un par rapport à l'autre, la force de contact  $R$  se situe dans ce cône. Lorsqu'il y a glissement,  $R$  est située sur ce cône.

#### EXPÉRIENCE POUR DÉTERMINER LE COEFFICIENT DE FROTTEMENT

Pour déterminer cet angle  $\varphi$ , et donc le coefficient de frottement entre deux matériaux, il suffit de placer un objet sur un support plan et sec et de faire doucement basculer ce support. Lorsque l'objet commence à glisser, on mesure l'angle formé par le support et le sol : cet angle est égal à  $\varphi$ .

#### FROTTEMENT FLUIDE

Les lois du frottement fluide décrivent la résistance à l'avancement d'un solide en mouvement par rapport à un fluide. On appelle  $V$  la vitesse relative du solide par rapport au fluide. Cela signifie que l'on considère que le solide bouge et que le fluide est immobile (mais cela reste valable si le solide est au repos et le fluide en mouvement par exemple). La force qui rend compte des frottements fluides est proportionnelle à  $V$  ou à  $V^2$ , selon le cas, et s'oppose au mouvement. Le coefficient de proportionnalité dépend de la masse volumique du fluide, de la surface du solide, ainsi que du nombre de Reynolds, qui sera explicité par la suite.

#### QU'EST CE QUE LA VISCOSITÉ ?

##### MANIFESTATIONS DE LA VISCOSITÉ

Lorsque l'on renverse de l'eau sur une table, on remarque qu'il se forme très rapidement une tache étendue. En revanche, si c'est du miel que l'on renverse, il faut plus de temps pour que la tache ait la même taille. De même, lors de certaines éruptions volcaniques,

la lave dévale les versants du volcan à très grande vitesse, alors que pour d'autres, la coulée de lave est très



lente. Dans ces deux exemples, les différents comportements ont la même origine : des viscosités différentes.

##### ORIGINE DE LA VISCOSITÉ

La viscosité correspond à la capacité de résistance à l'écoulement d'un fluide. Les frottements à l'intérieur même du fluide, liés aux interactions entre molécules, ont pour effet de dissiper une partie de son énergie, ce qui freine son écoulement. Lorsqu'un fluide réel s'écoule sur une surface, on remarque que la vitesse du fluide est nulle au niveau de la paroi, et augmente régulièrement quand on s'en éloigne, jusqu'à une vitesse limite  $V_0$ . Cette zone du fluide dans laquelle la vitesse varie est appelée couche limite. Au-delà, le fluide se comporte comme un fluide parfait, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de variation de vitesse quand on s'éloigne de la paroi : c'est la zone de fluide sain. Pour comprendre ce qui se passe, on peut imaginer le fluide comme étant composé d'un empilement de couches de molécules. La viscosité a pour effet de faire « accrocher » le fluide à la paroi, au niveau de la première couche. Tout se passe ensuite comme si les branches successives de molécules s'entraînaient les unes les autres.

##### COEFFICIENT DE VISCOSITÉ CINÉMATIQUE/DYNAMIQUE

La paroi exerce une force retardatrice sur le fluide, qui se fait de moins en moins sentir plus on s'en éloigne, et qui dépend de la viscosité du fluide et de la surface  $S$  de contact :  $F = -\mu S (dv/dy)_{y=0}$ . Cette force dépend donc également de la variation de vitesse du fluide quand on s'écarte très légèrement de la paroi ( $(dv/dy)$  est appelé gradient de vitesse).  $\mu$  correspond à la viscosité dynamique. Son unité est le Pascal seconde (Pa.s). Cependant, pour simplifier certaines équations on utilise un autre coefficient, appelé coefficient de viscosité

cinématique :  $\nu = \mu/\rho$ , où  $\rho$  est la masse volumique du fluide.

##### DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DU COEFFICIENT DE VISCOSITÉ

Si on place une bille dans un tube vertical rempli de liquide visqueux, elle est soumise à différentes forces dont les expressions sont connues : son poids, la poussée d'Archimède, et la force de frottement liée à la viscosité, qui dépend évidemment du coefficient de viscosité, mais aussi de la vitesse de la bille. Cette force apparaît quand la bille se met en mouvement, et augmente jusqu'à ce que sa vitesse atteigne une valeur limite (il faut donc que le tube soit suffisamment long). À ce moment, les forces de frottement et la poussée d'Archimède compensent exactement le poids, et, en mesurant la vitesse limite et la masse volumique du liquide, on peut calculer son coefficient de viscosité.

##### PARAMÈTRES INFLUENÇANT LA VISCOSITÉ

###### LA PRESSION

L'influence de la pression sur la viscosité des liquides est négligeable. Elle l'est moins pour les gaz. Lorsque la pression d'un gaz augmente, il y a plus de frottements internes et par conséquent la viscosité augmente un peu. Par exemple, à 20 °C, la viscosité de l'air sous une pression de 1 atm (1 atmosphère, c'est-à-dire la pression moyenne à laquelle nous sommes soumis à la surface de la Terre) est de  $1,72 \cdot 10^{-5}$  Pa.s, et passe à  $1,82 \cdot 10^{-5}$  Pa.s sous une pression de 20 atm !

###### LA TEMPÉRATURE

Pour un gaz, plus la température est élevée, plus la viscosité augmente, mais ces variations restent faibles. Ainsi, la viscosité  $\mu$  de l'air à 20 °C est de  $1,72 \cdot 10^{-5}$  Pa.s, alors qu'à 100 °C, elle passe à  $2,79 \cdot 10^{-5}$  Pa.s. La viscosité n'est même pas doublée avec un écart de température de 40 °C. En ce qui concerne les liquides, c'est l'inverse : plus la température augmente, plus un liquide est fluide. On peut observer ce phénomène en mettant de l'huile dans une poêle : quand la poêle n'est pas très chaude, on a du mal à répartir l'huile sur toute la surface, mais en chauffant, l'huile semble plus fluide et il est plus facile de la faire se déplacer au fond de la poêle. Pour les liquides, les variations sont plus importantes que pour les gaz : en augmentant la

pour les lubrifiants, comme les huiles. Plus l'indice de viscosité est élevé, plus la viscosité est stable en dépit de l'augmentation de température. Pour déterminer l'indice de viscosité d'une huile, on la compare à deux autres huiles qui servent de références, et dont les indices ont été arbitrairement fixés respectivement à 0 et 100.

##### THIXOTROPIE ET RHÉOFLUIDITÉ

La viscosité d'un fluide peut également varier dans le temps sous certaines conditions, car les modifications de structure au niveau microscopique ne sont pas toujours instantanées. Ainsi, on dit qu'un fluide est thixotrope si sous une contrainte constante sa viscosité évolue au cours du temps. Laissez au repos, le fluide thixotrope se « restructure » jusqu'à avoir l'aspect d'un solide, mais soumis à une contrainte suffisante pour passer la



structure, on assiste à une déstructuration, jusqu'à un état fluide. Par exemple, la mayonnaise ou la peinture sont des fluides thixotropes. Il ne faut cependant pas confondre thixotropie et rhéofluidité, qui correspond à la variation de viscosité d'un fluide quand on le soumet à des contraintes qui varient.

##### DIFFÉRENTS TYPES D'ÉCOULEMENTS

###### DIFFÉRENTS RÉGIMES

Reynolds a mis en évidence en 1885 différents comportements d'écoulement fluide avec l'expérience suivante : sur l'axe d'un tube parcouru par un fluide, on injecte un colorant. Sous certaines conditions, les gouttes de colorant restent alignées sur l'axe du tube, l'écoulement est alors qualifié de « laminaire ». Sous d'autres conditions, le colorant envahit la totalité du tube, l'écoulement est alors dit « turbulent ». Si les gouttes de colorant restent alignées, c'est parce que leur vitesse est parallèle aux bords du tube, et ainsi, elles ne peuvent pas « s'échapper ». À l'inverse, dans le régime turbulent, les vitesses des gouttes ne sont plus parallèles aux bords et elles sont entraînées un peu partout dans le fluide.

###### NOMBRE DE REYNOLDS

Reynolds a établi que ces phénomènes dépendent de la vitesse  $V$  du fluide – plus elle est importante, plus on a de chance d'avoir un régime turbulent – mais également de sa viscosité dynamique  $\mu$  et de sa masse volumique  $\rho$  (ou, ce qui revient au même, de sa viscosité cinématique  $\nu$ ). En effet, plus le liquide est visqueux, plus il est difficile pour les gouttes de « s'échapper transversalement ». De la même manière, le diamètre  $D$  du tube a un impact : lorsque le tube est fin, les mouvements transversaux sont gênés. Ceci a conduit Reynolds à définir un critère, lié au nombre de Reynolds  $Re$  :  $Re = VD/\nu$  ou  $Re = VD\rho/\mu$ . On peut remarquer que le nombre de Reynolds compare les forces de viscosité et les forces d'inertie.

Si  $Re < 2000$ , le régime est laminaire, si  $Re > 3000$ , le régime est turbulent, et enfin, si  $2000 < Re < 3000$ , on parle de régime intermédiaire. Le plus souvent, les écoulements fluides sont turbulents. On peut néanmoins observer des écoulements laminaires lorsque le fluide est très visqueux, ou que le tube est très fin.

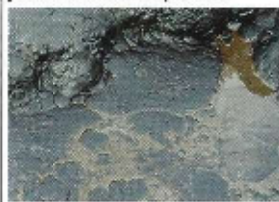
##### CONSÉQUENCES DE LA VISCOSITÉ

###### L'HUILE DE MOTEUR

Dans un moteur, l'huile joue entre autres un rôle de lubrifiant. En formant un film protecteur entre deux pièces en mouvement, elle évite le contact direct acier-acier, et diminue ainsi les frictions, c'est-à-dire les frottements solides. À froid, par exemple au démarrage d'une voiture, cette huile doit être suffisamment fluide pour pouvoir se répartir rapidement dans tout le moteur, et protéger les pièces. Au fur et à mesure que le moteur chauffe, le coefficient de viscosité de l'huile diminue. Il ne faut cependant pas que cette dernière soit trop fluide, sinon le film protecteur qu'elle constitue risque d'être rompu : sa viscosité doit être suffisante pour qu'elle continue d'adhérer à toutes les parois. Sur les bidons d'huile pour moteur, on peut lire une inscription telle que : 5W50. Le W signifie « Winter » (hiver), le premier chiffre indique la viscosité de l'huile à froid, et le second sa viscosité à chaud. Pour que le moteur soit bien protégé à froid et à chaud, il faut donc que le premier chiffre soit le plus petit possible et, qu'à l'inverse, le deuxième soit le plus grand possible.

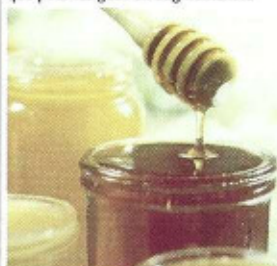
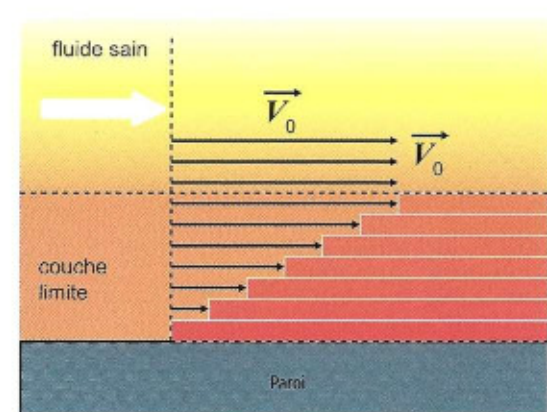
###### PÉTROLE ET VISCOSITÉ

Il y a autant de pétroles bruts différents qu'il y a de gisements. Pour rendre compte de la qualité d'un pétrole brut, l'American Petroleum Institute (Institut américain du pétrole) a défini un indice, l'API, qui permet de classer le pétrole selon ses composantes



majoritaires et la mesure de sa viscosité. On définit ainsi toute une gamme de pétroles, depuis le pétrole « léger », ceux que l'on raffine le plus facilement, jusqu'au pétrole « extra lourd ». La viscosité du pétrole est liée à la longueur de ses chaînes carbonées : plus elles sont longues, plus le pétrole est lourd (donc visqueux). Les processus de raffinage comportent souvent une étape de viscosité, ou visbreaking, sous haute température et haute pression, qui transforme en partie les produits lourds en produits plus légers et réduit la viscosité du résidu. On comprend maintenant pourquoi les conditions météorologiques, notamment la température, influent sur l'impact d'une marée noire : plus il fait chaud, plus la viscosité des hydrocarbures est faible, et plus ils se déplacent.

### Viscosité - Couche limite



température du miel de 1 °C, on divise sa viscosité par 10 !

###### INDICE DE VISCOSITÉ

L'indice de viscosité VI (pour Viscosity Index) caractérise justement la variation de viscosité d'un liquide avec la température. On l'utilise souvent