

Une introduction à la viscosité

Des fluides simples aux fluides complexes

par **Hélène PIOT-DURAND**, **Noémie DAGÈS**, **Ariane GAYOUT**, **Simon VINCENT**

Laboratoire de physique
École normale supérieure de Lyon - 69007 Lyon
helene.piot-durand@ens-lyon.fr

et **Samuel BOURY**
Courant Institute of Mathematical Sciences
New York University - 10012 New York (USA)

UN VERRE d'eau qui se renverse et c'est la catastrophe, mais s'il s'agit d'un pot de miel on a largement le temps de le remettre debout avant que le contenu ne se soit étalé sur la table : pourquoi ? Ce constat simple met en évidence que tout ne coule pas à la même vitesse ni de la même façon. L'eau et le miel n'ont pas la même viscosité, et c'est cette caractéristique qui rend leur comportement si différent. Dans cet article, nous proposons une approche simple et pédagogique des notions de fluide et de viscosité, en expliquant tout d'abord ce qu'est un fluide, puis en discutant des fluides simples (newtoniens) et des fluides complexes (non-newtoniens) autour d'expériences visuelles et facilement reproductibles. Cette démarche est adaptée de présentations données chaque année à la Fête de la science à l'École normale supérieure de Lyon, dans le but de permettre à de jeunes élèves (élémentaire, collège, lycée) et à un public non-initié de réfléchir autour de l'idée de fluide et d'aptitude à couler, tout en introduisant et en discutant de leur viscosité.

1. LE MONDE DES FLUIDES

1.1. Qu'est-ce qu'un fluide ?

La définition exacte d'un fluide est une question qui a fait couler beaucoup d'encre. Les réponses à cette question s'appuient surtout sur des exemples variés : un liquide, de l'eau, un gaz... or, ces différents exemples n'ont pas nécessairement de points communs évidents, ce qui est instructif sur la difficulté même de la définition. En réalité, un fluide est le regroupement de toutes ces réponses, auxquelles on peut encore ajouter les plasmas, les verres...

La définition la plus générale d'un fluide est peut-être finalement celle de ne pas être solide. Cela renvoie bien sûr à la définition même d'un solide, qui n'est d'ailleurs pas forcément celle à laquelle nous sommes habitués : le solide cristallin. Un cristal est un « solide » (au sens générique) particulier qui possède une structure rigide de combinaison des atomes qui le composent (par exemple un cristal de sel (NaCl)). Aucun

déplacement des atomes n'est possible au sein du cristal sans en casser la structure. Le solide cristallin est à différencier du « solide amorphe » (par exemple, le verre), où l'agencement des atomes est aléatoire et les déplacements intra-solide sont possibles. Une définition plus précise du fluide est donc ne pas être un solide cristallin.

Malheureusement, une telle définition ne permet pas vraiment ni d'appréhender l'idée de ce qu'est un fluide, ni d'en comprendre les propriétés qui le rendent différent du cristal. Pour aboutir à une définition plus intuitive, il nous faut revenir sur nos exemples précédents, les liquides et les gaz. On peut alors définir un fluide comme étant ce qui peut s'écouler. Cet écoulement peut s'effectuer sur des temps courts (comme pour l'eau liquide ou le miel), mais aussi sur des temps longs qui dépassent l'échelle d'une vie humaine (par exemple la glace d'eau, comme le montre l'écoulement de l'*Elephant Foot Glacier* au Groenland, visible en figure 1).



Figure 1 - Un glacier en train de couler au Groenland (Romer Lake).

1.2. L'expérience de la goutte de poix

La distinction entre *fluide* et *solide* n'est donc pas toujours évidente. C'est pour le démontrer qu'en 1927, Thomas Parnell, professeur à l'Université du Queensland, a mis au point une expérience devenue célèbre sous le nom de l'expérience de la goutte de poix (*pitch drop experiment*), toujours en cours aujourd'hui (cf. figure 2, page ci-contre) [4-6]. Il s'agit désormais de la plus longue expérience continue en laboratoire et elle devrait encore durer un siècle.

Le principe de l'expérience est très simple : de la poix (matériau proche du bitume) chaude, liquide, est versée dans un entonnoir bouché. La poix est laissée telle quelle à température ambiante pendant trois ans, avant que le bas de l'entonnoir ne soit coupé (en 1930). La poix ne semble tout d'abord pas couler par cette ouverture, se comportant ainsi comme un solide. Cependant, la poix finit par lentement former une

goutte. Celle-ci tomba en 1938. Depuis, une goutte tombe environ tous les dix ans. Aucune de ces chutes n'a encore pu être observée en direct, mais il est possible de regarder la neuvième goutte se former en temps réel sur le site de l'Université de Queensland [5].

La poix n'est donc pas un solide, mais un fluide qui coule très lentement, sur une échelle de temps très longue, rendant le phénomène imperceptible de prime abord. Comme le dit l'adage : il faut se méfier des apparences !

2. LES FLUIDES NEWTONIENS

L'expérience de la goutte de poix montre que tous les fluides ne coulent pas de la même façon, et qu'il leur faut parfois un temps très long. Par exemple, on dit souvent de manière intuitive que le miel est plus « visqueux » que l'eau, car il va couler moins rapidement. Les images en figure 3 illustrent ce phénomène. En fait, plus un fluide est visqueux, plus il va présenter une résistance au mouvement, et plus il met du temps à couler. La poix est ainsi un fluide particulièrement visqueux (les estimations sont autour deux cent trente mille milliards de fois plus visqueux que l'eau). Mais à quoi correspond vraiment cette « viscosité » ?



Figure 2 – Expérience de la goutte de poix.



Figure 3 - Comparaison de deux fluides en train de couler : **A** du miel⁽¹⁾ ; **B** de l'eau⁽²⁾.

(1) <https://www.pickpik.com/honey-delicious-spoon-food-nectar-liquid-125482>

(2) <https://pxhere.com/en/photo/1056186>

2.1. Définition de la viscosité dans le cas d'un fluide « simple »

La viscosité (du latin *viscum*, glu) est une mesure de la résistance d'un fluide à sa propre déformation. Pour mieux le comprendre, intéressons-nous à une expérience simple consistant à placer des billes dans des tubes à essai remplis de fluides de différentes viscosités. Ces tubes sont fermés hermétiquement puis retournés. On constate alors que la vitesse de chute des billes dépend de la viscosité de chaque fluide (cf. figure 4). Plus le fluide est visqueux, plus la bille tombera lentement, car il lui faudra vaincre une résistance plus grande. On voit donc que la viscosité correspond à un coefficient de proportionnalité entre les contraintes issues du déplacement dans le fluide et la vitesse de ce déplacement.

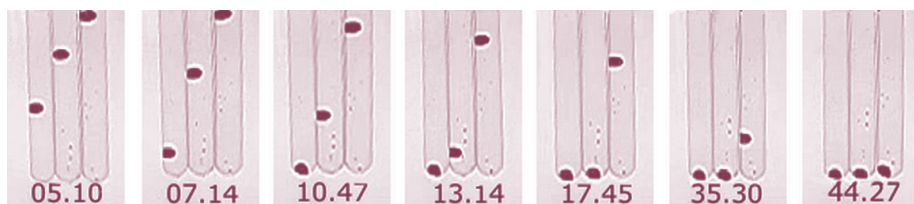


Figure 4 - Chronophotographies de la chute de billes dans des tubes à essai remplis d'un fluide visqueux. Sur chaque image, la viscosité du fluide de chaque tube augmente de gauche à droite. Le temps indiqué est en secondes.

Un fluide « simple », dont le comportement peut être décrit à l'aide de sa seule viscosité, est donc un fluide dont la loi d'écoulement ne dépend pas de l'intensité des forces extérieures qui agissent sur lui. Ces fluides sont aussi appelés *fluides newtoniens*, en hommage à Isaac Newton qui a été le premier à en établir les propriétés. Le tableau 1 présente les ordres de grandeur de viscosité de quelques fluides communs. La viscosité d'un fluide newtonien donné n'est toutefois pas constante : elle dépend de la pression atmosphérique et, surtout, de la température.

Fluide considéré	Air	Eau (liquide)	Miel
Viscosité à 20 °C et 1 bar (Pa.s ou PI)	10^{-6}	10^{-3}	10^3 à 10^4
Fluide considéré	Bitume / Poix	Glacé d'eau	Manteau terrestre
Viscosité à 20 °C et 1 bar (Pa.s ou PI)	10^{11}	10^{13}	10^{18} à 10^{20}

Tableau 1 - Ordres de grandeur des viscosités de fluides usuels.

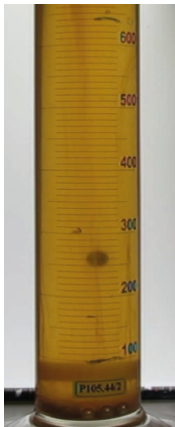
De façon générale, les gaz ont une faible viscosité qui augmente avec la température. En effet, l'augmentation de la température provoque une augmentation de l'agitation thermique, et donc des probabilités de chocs entre molécules. Cela revient à une plus forte résistance à la déformation. Les liquides, eux, ont une viscosité plus

élevée qui diminue avec la température. En effet, lorsque la température augmente, les molécules dont est constitué le fluide s'écartent les unes des autres (car le fluide se dilate) et la résistance à la déformation est moindre.

2.2. Mesurer la viscosité : l'exemple du viscosimètre à billes

Le principe du viscosimètre à bille a déjà été introduit précédemment en figure 4 : la vitesse de chute d'une bille dans un fluide dépend de la viscosité de celui-ci. En mesurant simplement cette vitesse, il est donc possible comme nous allons le voir de remonter directement à la viscosité. La figure 5 montre le dispositif expérimental utilisé : une éprouvette graduée est remplie d'huile siliconée (un fluide suffisamment visqueux pour que l'expérience soit réalisable sur des temps de l'ordre de la minute) dans lequel des billes sphériques sont lâchées sans vitesse initiale. Après un régime transitoire initial, lors duquel la vitesse de la bille augmente, le régime de chute libre est atteint et la bille a une vitesse de chute constante, nommée vitesse limite, exactement comme pour la chute d'un objet massif dans l'air.

[A]



[B]

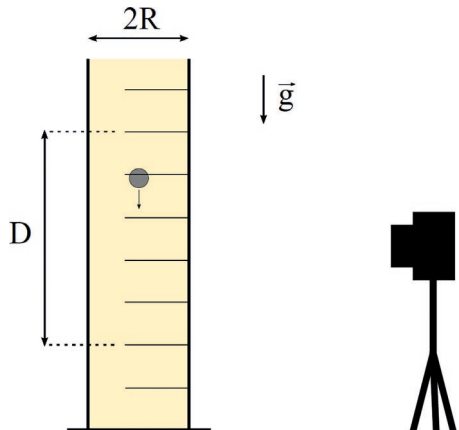


Figure 5 - Expérience du viscosimètre à billes :

[A] Photographie de l'expérience en cours - [B] Schéma expérimental.

On suppose ici que l'écoulement du fluide reste laminaire après le passage de la bille, et que l'influence des parois du tube sur cet écoulement et sur la chute de la bille peut être négligée. Sous ces conditions, la chute de la bille est simplement mise en équation par la seconde loi de Newton :

$$m\mathbf{a} = \mathbf{P} + \mathbf{\Pi} + \mathbf{F},$$

avec m la masse de la bille, \mathbf{a} son accélération, $\mathbf{P} = m\mathbf{g}$ le poids de la bille (\mathbf{g} est l'accé-

lération de la pesanteur), Π la poussée d'Archimède exercée par le fluide sur la bille, et \mathbf{F} la force de frottement fluide, classiquement modélisée par la formule de Stokes $\mathbf{F} = -6\pi\eta r\mathbf{v}$, avec r le rayon de la bille, \mathbf{v} sa vitesse, et η la viscosité dynamique du fluide. En considérant le régime de chute libre, pour lequel l'accélération de la bille est nulle, on déduit de la seconde loi de Newton la vitesse limite v_{lim} atteinte par la bille lors de sa chute :

$$v_{\text{lim}} = \frac{2g}{9\eta} (\rho_{\text{bille}} - \rho_{\text{fluide}}) r^2,$$

en fonction de ρ_{bille} et ρ_{fluide} , les masses volumiques de la bille et du fluide, respectivement. Cette formule, obtenue dans le cas d'un milieu infini, n'est cependant pas tout à fait valable dans notre expérience : la proximité des parois entraîne des recirculations du fluide lors de la chute de la bille, qui ont un effet non négligeable. Ce dernier peut être pris en compte par une correction de la formule de Stokes [1] :

$$\mathbf{F} = -6\pi\eta r\mathbf{v} \left(1 + 2,1 \frac{r}{R}\right),$$

faisant intervenir le rayon R de l'éprouvette graduée. Avec cette modélisation, et en considérant le régime permanent atteint, on obtient à partir de la seconde loi de Newton l'expression de la vitesse limite suivante :

$$v_{\text{lim}} = \frac{2g}{9\eta} (\rho_{\text{bille}} - \rho_{\text{fluide}}) r^2 \left(1 - 2,1 \frac{r}{R}\right).$$

La figure 6 montre les résultats de notre expérience. Chaque point correspond à la moyenne sur cinq chutes de billes de même rayon. Deux ajustements sont proposés :

- ◆ un ajustement sans la correction liée aux recirculations, en r^2 (ligne pointillée orange) ;
- ◆ un ajustement avec ladite correction, en $r^2 \left(1 - 2,1 \frac{r}{R}\right)$.

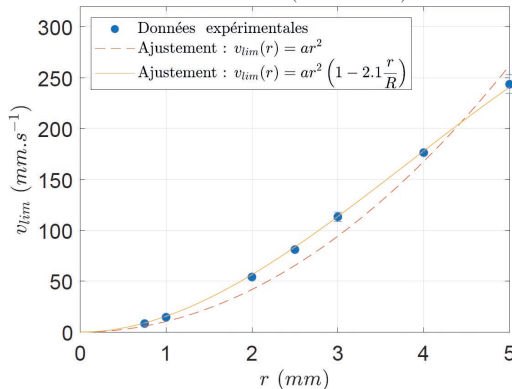


Figure 6 - Vitesse limite v_{lim} de chute d'une bille dans le viscosimètre, en fonction du rayon de la bille. La courbe orange, en pointillés, est issue de la modélisation à partir de la loi de Stokes. La courbe jaune présente le modèle comportant une correction liée aux recirculations de fluide.

On voit d'après ces courbes que l'évolution de la vitesse limite v_{lim} est bien mieux

modélisée lorsque la correction liée aux recirculations de fluide est prise en compte. On remarque finalement que d'après cette formule, en connaissant la densité du fluide (qui peut être déduit par son poids/volume) ainsi que les caractéristiques de la bille utilisée (densité et rayon) on peut directement déduire d'une mesure de ν_{lim} la viscosité d'un fluide.

Dans notre cas, la loi de vitesse non corrigée donne une estimation de la viscosité $\eta_{\text{mesurée}}^{\text{non corrigée}} = 1,42 \pm 0,15$ Pa.s, à comparer à l'estimation issue de la loi corrigée $\eta_{\text{mesurée}}^{\text{corrigée}} = 0,87 \pm 0,02$ Pa.s. Cette deuxième valeur est très proche de la mesure de référence réalisée au rhéomètre (cf. sous-paragraphe 3.3) dans les mêmes conditions de température, *i.e.* à 28 °C, $\eta_{\text{référence}} = 0,908 \pm 0,001$ Pa.s. Ces deux mesures sont de plus cohérentes avec la valeur tabulée pour l'huile utilisée, $\eta_{\text{tabulée}} = 1,0$ Pa.s à 25 °C, une viscosité légèrement plus faible étant attendue pour une température plus élevée. La méthode présentée ici permet donc, en se plaçant dans les bonnes approximations, de mesurer efficacement la viscosité d'un fluide newtonien.

3. LES FLUIDES NON-NEWTONIENS

La notion de viscosité telle que présentée précédemment permet de décrire la plupart des fluides appelés fluides simples, mais elle ne suffit pas toujours. Il existe une autre famille de fluides, dits fluides complexes, dont le comportement est variable en fonction des contraintes ressenties, jusqu'à être parfois contre-intuitif. Pour illustrer ce phénomène, prenons l'exemple de la farine de maïzena qui, mélangée à l'eau dans de bonnes proportions ($\frac{1}{3}$ d'eau pour $\frac{2}{3}$ de farine environ), a un comportement singulier. Lorsque l'on prend ce mélange dans une main il coule entre les doigts (cf. figure 7A), mais s'il est malaxé rapidement en le faisant passer d'une main à l'autre par exemple, il cesse de couler et peut même se fracturer (cf. figure 7B). Cet exemple de mélange maïzena/eau est ce qu'on peut appeler un *fluide non newtonien* ; c'est un fluide dont la

A



B



Figure 7 - A Mélangé de maïzena et d'eau qui coule entre les doigts - B Même mélange, malaxé sous forme de boule.

notion de viscosité ne peut pas être définie aussi simplement que dans le cas des fluides newtoniens vus précédemment.

3.1. Définition de la viscosité dans le cas général

Pour rendre compte du résultat de l'exemple précédent, il faut introduire les deux grandeurs généralement utilisées pour décrire le comportement visqueux des fluides : d'une part la contrainte σ , *i.e.* la force surfacique appliquée au fluide, d'autre part le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ correspondant à la déformation locale tangentielle au mouvement du fluide.

Comme déjà mentionné plus haut, dans le cas d'un fluide simple (ou newtonien) l'évolution de la contrainte σ est linéaire avec le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$. Le coefficient de proportionnalité est constant, c'est la viscosité, et on écrit :

$$\sigma = \eta \dot{\gamma}$$

C'est le cas de la plupart des fluides dont nous avons l'intuition dans la vie quotidienne, l'eau, l'air, l'huile...

Pour un fluide complexe en revanche (ou non-newtonien) la contrainte σ n'est pas linéaire avec le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$. En d'autres termes, les déformations du fluide ne sont pas proportionnelles aux forces qui lui sont appliquées. Ces fluides peuvent avoir des comportements très variés, parfois étonnants, et l'on distingue notamment :

- ◆ *Les fluides à seuil* : la contrainte est une fonction affine du taux de cisaillement, la viscosité est constante, mais il y a un seuil de contrainte à dépasser pour que le fluide « coule » (par exemple : les ciments, le gel de coiffeur, des crèmes cosmétiques, la mayonnaise...).
- ◆ *Les fluides rhéoépaississants* : la viscosité effective du fluide augmente avec la contrainte (par exemple : les fécules de maïs comme la maïzena, certaines suspensions colloïdales, certains miels...).
- ◆ *Les fluides rhéofluidifiants* : la viscosité effective du fluide diminue avec la contrainte, et il « coule » alors plus facilement (par exemple : la lave, le sang, la peinture, le ketchup...).

Ces différentes lois sont résumées par le schéma figure 8 (cf. page ci-contre). Les fluides à seuil peuvent être décrits par le modèle de Bingham, qui introduit une contrainte seuil σ_s :

$$\sigma = \sigma_s + \eta \dot{\gamma}.$$

Les rhéoépaississants, les rhéofluidifiants, et les fluides newtoniens peuvent être décrits par le modèle d'Ostwald-de Waele :

$$\sigma = k \dot{\gamma}^n$$

avec $n > 1$ pour un fluide rhéoépaississant, $n = 1$ pour un fluide newtonien, et $0 < n < 1$

pour un fluide rhéofluidifiant. La viscosité « effective » du fluide est alors donnée par le ratio $\sigma/\dot{\gamma}$; elle est constante pour un fluide newtonien, mais ne l'est pas pour un fluide rhéofluidifiant ou rhéoépaississant.

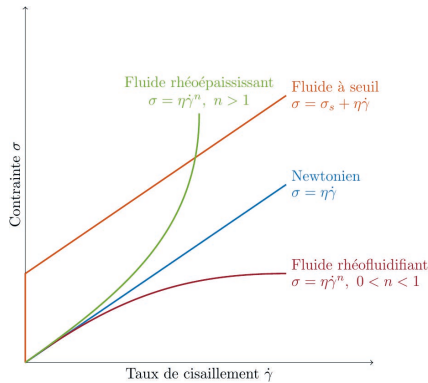


Figure 8 - Les différents comportements de fluides newtoniens (en bleu) et non newtoniens (fluide à seuil en orange ; fluide rhéoépaississant en vert ; fluide rhéofluidifiant en rouge).

3.2. Un exemple de rhéoépaississant viscoélastique : la *silly putty*

La *silly putty* (pâte bête), aussi connue sous le nom de « pâte intelligente » en France, est un exemple célèbre de fluide complexe. Il s'agit d'un exemple particulièrement intéressant quant à ses propriétés, et très démonstratif, à tel point que ce matériau est maintenant vendu de façon commerciale comme un jouet pour enfants.

Faite à partir de polymères, il s'agit d'une pâte facilement malléable, qui a la propriété de rebondir contre un obstacle rigide. Le rebond est causé par la propriété d'élasticité de la pâte, qui lui permet de subir une déformation tout en retrouvant sa structure initiale. La pâte peut néanmoins être cassée en tirant brusquement dessus, atteignant alors un régime de rupture. Moins connu, et plus surprenant, cette pâte rebondissante peut également s'écouler sur une échelle de temps de l'ordre de plusieurs dizaines de minutes, comme le montrent les chronophotographies en figure 9 (cf. page ci-après). Prises à différents temps, ces images permettent de voir la *silly putty* en train de couler au travers du support, mettant en évidence sa faible viscosité. En l'occurrence, la *silly putty* est un fluide rhéoépaississant (sa viscosité effective augmente avec la contrainte) viscoélastique (elle a des propriétés élastiques en plus de ses propriétés visqueuses).

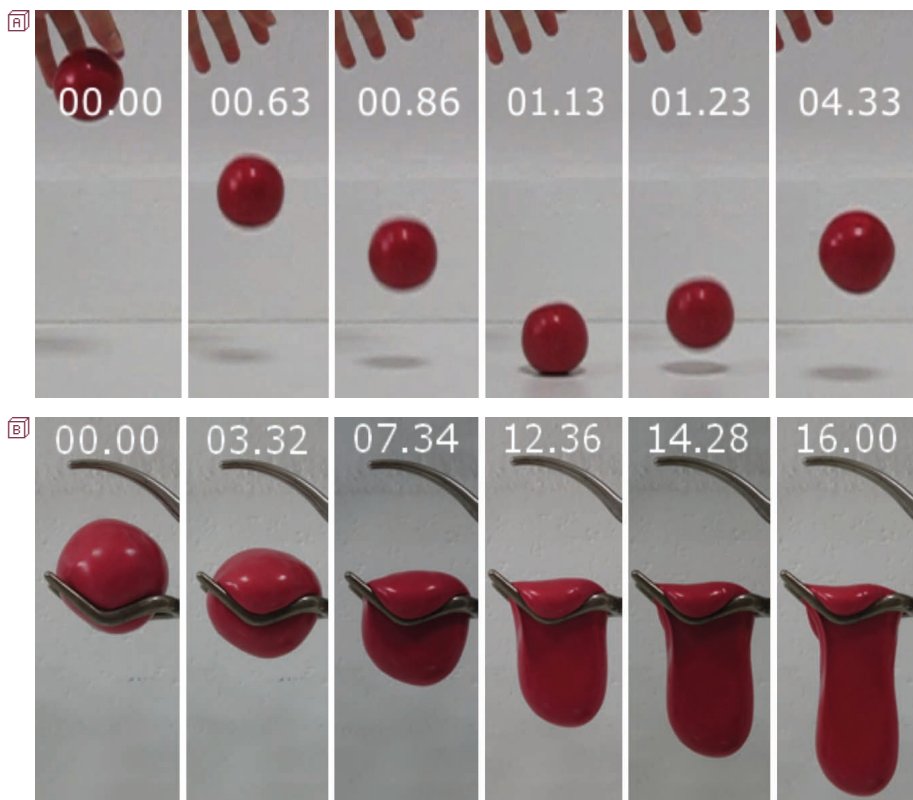


Figure 9 - Chronophotographies montrant **A** un rebond de *silly putty* (temps en secondes) - **B** et la *silly putty* en train de couler (temps en minutes).

3.3. Mesures de courbes de viscosité : l'exemple du rhéomètre

Comme nous venons de le voir, la viscosité d'un fluide non newtonien n'est pas une valeur constante, fixée uniquement par la température et la pression ; elle ne peut donc pas être mesurée aussi facilement que dans l'exemple du sous-paragraphe 2.2. Dans ce cas, une mesure complète de viscosité doit tenir compte des différents comportements du fluide en fonction de la contrainte qui lui est appliquée. Cela peut être réalisé grâce à un rhéomètre.

Le rhéomètre est un appareil permettant de mesurer différentes propriétés d'un fluide, et peut être utilisé dans différentes configurations. Pour accéder à la viscosité d'un fluide par exemple il est préférable d'effectuer la mesure avec une géométrie dite cône-plan, comme sur la figure 10 (cf. page ci-contre). Le fluide est alors placé entre une plaque conique mobile (appelée rotor) et un support fixe (appelé stator) afin d'être

soumis à un cisaillement : sous l'action d'un couple Γ , le rotor est mis en mouvement et tourne d'un angle $\theta(t)$ correspondant à une vitesse de rotation $\Omega(t) = \dot{\theta}(t)$. Ces grandeurs sont respectivement reliées à la contrainte de cisaillement σ , à la déformation γ et au taux de déformation $\dot{\gamma}$ par les relations suivantes :

$$\sigma(\dot{\gamma}) = \frac{3 \cos(\alpha) \Gamma}{2\pi R^3} ; \gamma = \frac{\theta}{\tan \alpha} \text{ et } \dot{\gamma} = \frac{\Omega}{\tan \alpha},$$

où α est l'angle formé entre le cône et le plan, et R le rayon du cône (cf. figure 10). Ainsi, à partir des trois paramètres Γ , θ et Ω mesurées par le rhéomètre, il est possible de calculer différentes grandeurs nous donnant des informations sur le fluide. Il est notamment possible d'obtenir la viscosité donnée par $\eta = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}}$.

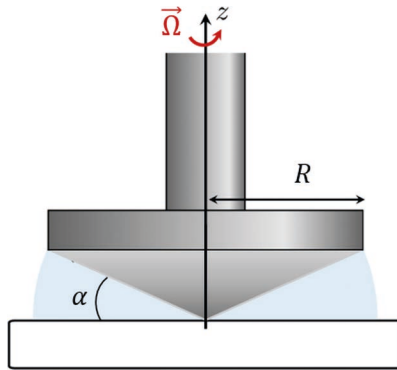


Figure 10 - Schéma d'un rhéomètre en configuration cône-plan.

La figure 11 (cf. page ci-après) présente les résultats obtenus au rhéomètre pour trois fluides différents : le miel, la mayonnaise et un mélange maïzena/eau. Le tracé de $\sigma(\dot{\gamma})$ en échelles logarithmique-logarithmique permet de mettre en évidence les lois de puissance du type $\dot{\gamma}^n$. On remarque que ces fluides ont des comportements très différents. Pour le miel, la contrainte est proportionnelle au taux de cisaillement ($n=1$), il s'agit donc d'un fluide newtonien. Pour la maïzena et la mayonnaise, cette proportionnalité n'est plus vérifiée. Pour la maïzena, à fort taux de cisaillement, la contrainte augmente en $\dot{\gamma}^3$: il s'agit donc bien d'un fluide rhéoépaississant comme vu en introduction de la partie 3. Quant à la mayonnaise, la contrainte augmente selon $\dot{\gamma}^{0,14}$: c'est donc un fluide rhéofluidifiant. La mayonnaise présente également une contrainte seuil de 80 Pa. En dessous de cette valeur, elle ne peut pas couler : c'est pour cette raison qu'il faut appuyer sur le tube de mayonnaise pour qu'elle coule dans l'assiette !

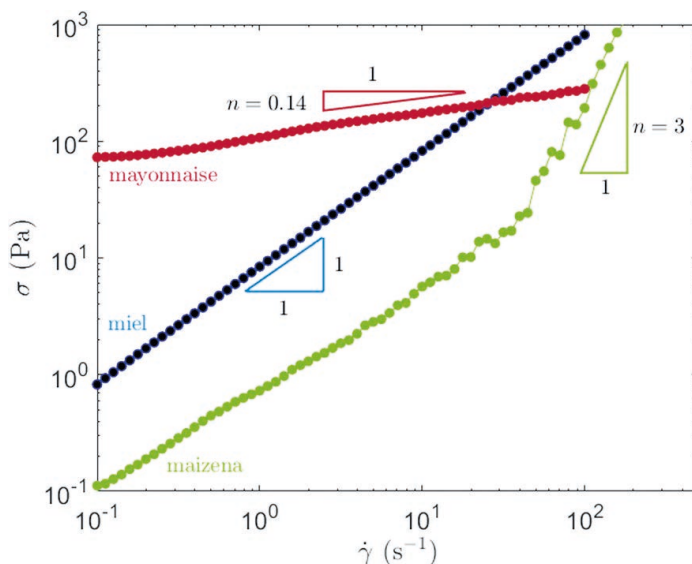


Figure 11 - Contrainte en fonction du taux de cisaillement pour trois fluides usuels : le miel, la maizena et la mayonnaise. La courbe est en échelles log-log.

CONCLUSION

Qu'est-ce qu'un fluide ? Qu'est-ce que la viscosité ? Deux questions en apparence simple auxquelles il n'est pas facile de répondre. Comme expliqué dans cet article, le fluide est à distinguer du solide cristallin dont les atomes sont organisés en une structure fixe. Les fluides ont une aptitude à couler, et sont caractérisés par leur viscosité, qui constitue une mesure de leur résistance à l'écoulement : plus un fluide est visqueux, plus il mettra de temps à couler. Les échelles de temps mises en jeu peuvent, selon la viscosité, varier de plusieurs ordres de grandeur : un verre d'eau coule en quelques secondes, un verre de miel en quelques minutes, un verre de poix (*pitch drop experiment*) en plusieurs dizaines d'années.

Les fluides peuvent ensuite être classés en deux grandes familles : les fluides newtoniens pour lesquels la déformation évolue linéairement avec la contrainte appliquée, et les fluides non newtoniens aux comportements plus singuliers. Et bien que la plupart des fluides usuels soient newtoniens, et que notre intuition de la notion de viscosité soit principalement basée sur ceux-ci, nous n'en sommes pas moins exposés à de nombreux fluides complexes au quotidien : le sang, la peinture, la confiture, le dentifrice, le ciment... L'introduction à la viscosité présentée dans cet article donne des bases élémentaires pour comprendre ces fluides qui nous entourent.

BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

- [1] E. Guyon, J.-P. Hulin et L. Petit, *Hydrodynamique physique*, 3^e édition, EDP Sciences, 2012.
- [2] E. Guyon, J.-P. Hulin et L. Petit, *Ce que disent les fluides*, 2^e édition, Belin, 2011.
- [3] M. Fruchart, P. Lidon, E. Thibierge, M. Champion et A. Le Diffon, *Physique expérimentale : optique, mécanique des fluides, ondes et thermodynamique*, Deboeck, 2016.
- [4] R. Edgeworth, B.J. Dalton and T. Parnell, “The pitch drop experiment”, *European Journal of Physics*, p. 198-200, 1984.
- [5] La page consacrée à l’expérience de la goutte de poix, sur le site de l’Université du Queensland (QLD, Australie) : <https://smp.uq.edu.au/pitch-drop-experiment>
- [6] La page consacrée à l’expérience de la goutte de poix, sur Wikipédia : https://fr.wikipedia.org/wiki/Exp%C3%A9rience_de_la_goutte_de_poix

**Hélène PIOT-DURAND***Doctorante*

Laboratoire de physique
École normale supérieure de Lyon
Lyon (Rhône)

**Noémie DAGÈS***Doctorante*

Laboratoire de physique
École normale supérieure de Lyon
Lyon (Rhône)

**Ariane GAYOUT***Doctorante*

Laboratoire de physique
École normale supérieure de Lyon
Lyon (Rhône)

**Simon VINCENT***Doctorant*

Laboratoire de physique
École normale supérieure de Lyon
Lyon (Rhône)

**Samuel BOURY***Assistant professor*

New York University
New York (USA)