

1.Introduction

Un liquide est le siège de frottements internes. Si l'on met en mouvement une région d'un liquide on constate 2 choses :

- Ce mouvement se communique de proche en proche aux régions voisines.
- Qu'il s'affaiblit progressivement si l'on cesse de l'entretenir.

Ces frottements liquidiens sont dus aux forces d'attractions de Van der Waals (attraction moléculaire) qui s'opposent aux mouvements relatifs des molécules voisines. Ces frottements internes des fluides sont appelés viscosité.

2.Viscosité d'un fluide

La viscosité peut être définie comme la résistance d'un fluide à l'écoulement lorsqu'il est soumis à une force. Elle peut être considérée comme le frottement interne qui résulte du glissement d'une couche de fluide sur une autre couche. Un liquide très visqueux est un liquide qui présente un frottement interne élevé. C'est-à-dire, les fluides de grande viscosité à l'écoulement et les fluides de faible viscosité s'écoulent facilement. Selon leurs viscosités, les écoulements sont classés dans deux types, l'écoulements laminaires et l'écoulements turbulents.

3.Ecoulement laminaire

L'écoulement est dit **laminaire** (du mot lame) s'il se fait sous forme de lames parallèles glissant les unes sur les autres et leurs vecteurs vitesses de déplacement restent parallèles par rapport à la direction de l'écoulement (**Figure.1**). C'est-à-dire, dans ce cas toutes les particules se déplacent dans une direction parallèle au sens général de l'écoulement, ce qui veut dire que toutes les vectrices vitesses individuelles sont parallèles entre eux et parallèles à la vectrice vitesse moyenne.

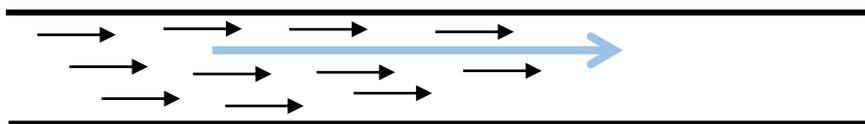


Figure.1 Ecoulement laminaire

4.Écoulement turbulent :

Dans ce type d'écoulement les vecteurs vitesses des particules de fluides ont des orientations aléatoires par rapport à la direction de l'écoulement, c'est-à-dire Les vectrices vitesses peuvent prendre toutes les directions, ce qui se traduit par l'apparition de tourbillons, mais la résultante de ces vitesses reste malgré tout dirigée dans le sens global de l'écoulement.



Figure.2 Ecoulement turbulent

Il existe un troisième régime, c'est le régime transitoire (ou intermédiaire) qui représente le régime de transition entre l'écoulement laminaire et turbulent.

Le nombre de Reynolds

La transition d'un écoulement laminaire au régime turbulent est prévoyé en calculant le nombre de Reynolds R_e qui est donné par la formule suivante :

$$R_e = \rho \frac{v D}{\eta}$$

Ou bien en fonction de la viscosité cinématique $\nu = \eta/\rho$ comme suit :

$$R_e = \frac{v D}{\nu}$$

Où : ρ est la masse volumique du fluide en kg m^{-3} .

v est la vitesse d'écoulement en m s^{-1} .

D est le diamètre du canal en m.

η est la viscosité dynamique du fluide en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

ν est la viscosité cinématique $\nu = \eta/\rho$

Le nombre de Reynolds est une grandeur adimensionnelle.

Notons que le passage d'un type d'écoulement à un autre se fait progressivement.

O.Reynolds en 1883 a observé expérimentalement que pour une conduite de forme

cylindrique la transition entre les régimes d'écoulement se fait comme suit :

- Si $R_e < 2000$, l'écoulement est laminaire.
- Si $2000 < R_e < 3000$, l'écoulement est intermédiaire.
- Si $R_e > 3000$, l'écoulement est turbulent.

Exemple :

Dans les conditions normales ou la vitesse du sang $v = 30 \text{ ms}^{-1}$, le diamètre de l'aorte $D = 2 \text{ cm}$, la viscosité $\eta_{\text{sang}} = 4 \times 10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ et la masse volumique $\rho_{\text{sang}} = 1.04 \text{ g cm}^{-3}$, on trouve le nombre de Reynolds $R_e = 1560 < 2000$, ce qui indique que le régime d'écoulement du sang est laminaire.

Résistance à l'écoulement et mesures de la viscosité

a- Résistance à l'écoulement

On définit la résistance à l'écoulement par la grandeur R_e :

$$R_e = \frac{8\eta L}{\pi R^4} = \frac{128\eta L}{\pi D^4} \quad \text{avec } D=2R$$

Ou bien

$$R_e = \frac{\Delta P}{Q_v}$$

On distingue deux cas :

- Système de conduites en séries : dans ce cas la résistance à l'écoulement R_e est la somme des résistances à l'écoulement de chaque partie de rayon R_i (voir **Figure.3**).

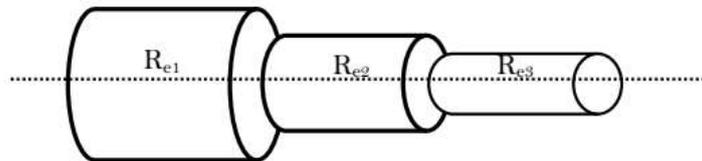


Figure.3

$$R_e = \sum_{i=1}^n R_{ei} = R_{e1} + R_{e2} + R_{e3} + \dots + R_{en}$$

- Système de conduites en parallèles : dans ce cas l'inverse de la résistance à l'écoulement R_e est la somme des inverses des résistances à l'écoulement de chaque partie de rayon R_i (voir **Figure 4**).

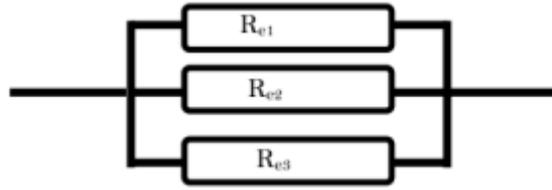


Figure.4

Dans le cas d'un système d'écoulement en parallèles la résistance totale à l'écoulement est donnée par :

$$\frac{1}{R_e} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{ei}} = \frac{1}{R_{e1}} + \frac{1}{R_{e2}} + \frac{1}{R_{e3}} + \dots + \frac{1}{R_{en}}$$

b- Mesures de la viscosité

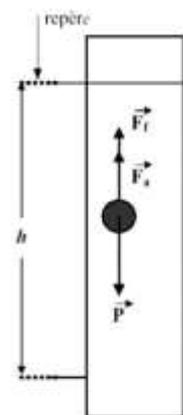
Il existe plusieurs méthodes pour mesurer la viscosité d'un fluide, nous citons le viscosimètre d'Ubbelohde ou d'Ostwald (loi de poiseuille), le viscosimètre rotatif ou viscosimètre de Couette et le viscosimètre à chute de bille.

➤ Viscosimètre à chute de bille

Le principe du viscosimètre à chute de bille est basé sur la mesure de la vitesse limite de chute v d'une bille de rayon r et de masse volumique ρ_{bille} dans un liquide de masse volumique $\rho_{liquide}$, suffisamment visqueux pour que cette vitesse soit faible et soit dans le domaine d'application de la loi de Stokes. La bille est lâchée avec une vitesse initiale nulle ($V_{initiale}=0$ m/s) dans un liquide visqueux de viscosité dynamique η . Au début, la bille est animée d'un mouvement uniformément accéléré, et au bout de quelques centimètres, la résistance est égale et opposée au poids, le mouvement devient rectiligne et uniforme (la vitesse de la bille devient constante).

Les trois forces appliquées à la bille, lors de la chute, sont les suivantes (voir **Figure.5**) :

1. La poussée d'Archimède : $|\vec{F}_a| = \frac{4}{3}\pi r^3 g \rho_{liquide}$
2. La force de viscosité (force de Stokes) : $|\vec{F}_f| = 6\pi \eta r v$
3. Le poids : $|\vec{P}| = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{bille} g$



Avec :

ρ_{liquide} et ρ_{bille} sont les masses volumiques, respectivement du liquide et de la bille en kg m^{-3} .

η : est le coefficient de viscosité dynamique du liquide en Pa s.

h : est l'hauteur de chute en m.

v : est la vitesse de la bille en ms^{-1} .

r : est le rayon de la bille en m.

g : est l'accélération de la pesanteur en m s^{-2} .

Appliquant le principe fondamental de la dynamique à la bille :

$$\sum \vec{F}_{\text{Ext}} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$$

Alors :

$$\vec{F}_a + \vec{F}_f + \vec{P} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$$

Par projection :

$$\left(\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{bille}} g\right) - \left(\frac{4}{3}\pi r^3 g \rho_{\text{liquide}}\right) - (6\pi \eta r v) = m \frac{dv}{dt} \quad \dots\dots(1)$$

Au bout de quelque centimètre, le mouvement de la bille devient rectiligne uniforme, ce qui implique que :

$$\frac{dv}{dt} = 0$$

Et l'équation (1) permis d'exprimer la viscosité dynamique par la formule :

$$\eta = \frac{2r^2 g}{9v} (\rho_{\text{bille}} - \rho_{\text{liquide}})$$

Pratiquement, pour mesurer le coefficient de viscosité dynamique η , il faut d'abord mesurer le temps t de chute de la bille sur une distance h (voir **Figure.5**) puis calculer sa vitesse $v=h/t$ et injecter la valeur obtenue de v dans la relation.

Connaissant la viscosité dynamique η on déduit la viscosité cinématique ϑ et le nombre de Reynolds R_e :

La viscosité cinématique :

$$\vartheta = \frac{\mu}{\rho_{\text{liquide}}}$$

Le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{vd}{\nu} = \frac{vd\rho}{\mu}$$

ν : est la vitesse de la bille et d son diamètre

➤ Viscosimètre d'Ostwald

L'appareil la plus utilisée, pour mesurer la viscosité, est le viscosimètre d'OSWALD (Voir figure).

Le viscosimètre est constitué principalement de trois parties tubulaires (1, 2 et 3), du tube capillaire (6) avec la sphère de mesure (5), de la sphère des avant-coulants (4) et du vase à niveau (8). Au-dessus et en dessous de la sphère de mesure (5), les marques annulaires M1 et M2 sont imprimées sur le tube (3). Ces marques définissent le volume de contrôle pour les expériences. Le tube capillaire (6) se termine par la calotte sphérique (7) du vase à niveau (8). Par la surface intérieure de cette calotte sphérique (7), l'échantillon s'écoule du tube capillaire (6) sous la forme d'un mince film liquide.

On mesure la durée d'écoulement t d'un volume V de liquide à travers un tube capillaire. On montre que la viscosité cinématique ν est proportionnelle à la durée d'écoulement t par :

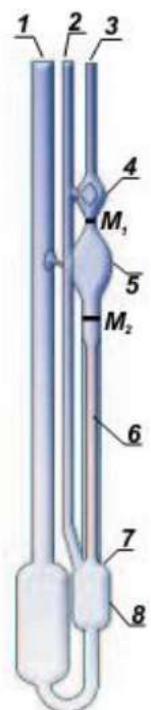
$$\nu = K \Delta t$$

La constante K de l'appareil est donnée par le constructeur du viscosimètre.

➤ Viscosimètre rotatif ou viscosimètre de Couette

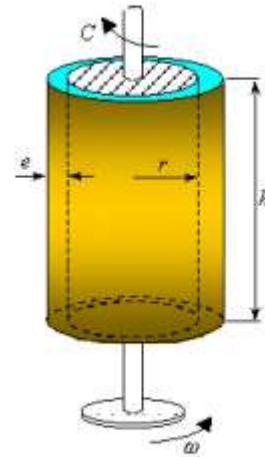
Un récipient cylindrique tourne autour de son axe de rotation. Il contient le liquide visqueux et un cylindre plein. Ce cylindre, mobile sur son axe de rotation, est entraîné par le fluide. Cependant un ressort fixé sur ce cylindre le tient en équilibre.

On montre que la viscosité dynamique n est proportionnelle à l'angle de rotation :



$$\eta = K \alpha$$

L'angle α est d'autant plus grand que la viscosité du liquide placé entre les deux cylindres est plus grande.

**Exercice 1 :**

Une bille métallique de masse volumique $7,8 \text{ g.cm}^{-3}$ et de 4 mm de diamètre descend d'une hauteur de 1m à travers une huile de densité 1,12 sous l'effet de la pesanteur pendant 55s. Calculer la viscosité de l'huile.

Exercice 2:

Une bille métallique de $7,5 \text{ g.cm}^{-3}$ de masse volumique descend à travers de l'eau dans un tube et met 2 s pour atteindre le fond. La bille met 9 s lorsque le tube est rempli de sang. Calculer la viscosité du sang si sa densité est de 1,06 et la viscosité de l'eau 10^{-2} po.