

I. Introduction

L'hémodynamique est la science qui traite les propriétés physiques de la circulation sanguine de l'être humain. La connaissance des propriétés physiques de ce mouvement sanguin nous permet de nous renseigner sur le fonctionnement de notre système cardio-vasculaire. Cette connaissance est basée essentiellement sur la compréhension, de l'écoulement du sang, de l'élasticité des vaisseaux et de l'activité électrique du cœur. A cet égard, on note que l'étude de l'hémodynamique est principalement soumise aux lois de la mécanique des fluides et ses résultats sont bien déterminés par les variables des vitesses, débits, viscosité et pressions dans les vaisseaux sanguins[1].

II. Etude de la viscosité

1. Définition

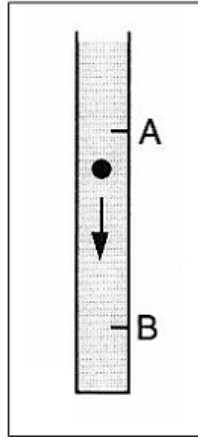
La viscosité est une grandeur physico-chimique qui caractérise les frottements internes du fluide, autrement dit sa capacité à s'écouler. Elle caractérise la résistance d'un fluide à son écoulement lorsqu'il est soumis à l'application d'une force tangentielle au sens de son écoulement. C'est à dire, les fluides de grande viscosité résistent à l'écoulement et les fluides de faible viscosité s'écoulent facilement.

La viscosité est déterminée par la capacité d'entraînement que possède une couche en mouvement par rapport aux autres couches adjacentes. Donc les forces de résistance qui dépendent de la nature du fluide et qui apparaissent lors des déplacements entre les différentes couches de fluide (analogie avec les frottements des solides) sont dues à la viscosité du fluide[7].

A ce stade, on donne l'expression du module de cette force s'exerçant sur une surface S parallèlement à la vitesse du fluide mais en sens contraire (signe -): $F = -\mu S \frac{dU}{dY}$

2. Mesure de la viscosité :

Dans l'intérêt de déterminer la valeur de la viscosité de n'importe quel fluide, il est commode d'utiliser l'appareil appelé *Viscosimètre à chute de bille*. Le principe de cet appareil est de faire tomber une sphère de rayon r dans un tube vertical transparent contenant le liquide à étudier (de masse volumique ρ). Lorsqu'on laisse tomber la sphère, elle atteint très vite une vitesse limite V_L (lorsque les forces de frottement compensent la résultante du poids et de la poussée d'Archimède). On mesure alors le temps que mets la sphère pour parcourir à vitesse constante la distance entre deux points A et B. (voir figure suivante)



Finalement avec un simple calcul, la viscosité dynamique (elle est dite dynamique car elle est calculée pendant un mouvement) du liquide à étudier est donnée par :

$$\mu = k \frac{(\rho_s - \rho) \cdot r^3}{V} = k \frac{(\rho_s - \rho) \cdot r^3}{L} \Delta t$$

Où : k est un coefficient déterminé par un calcul ou par un étalonnage.

ρ_s est la masse volumique de la sphère.

Remarque :

On note ici, que la force de frottement que subit la sphère lors de son mouvement est donnée par la relation de Stokes: $F = 6\pi\mu rV$

Avec r est le rayon de la sphère, V sa vitesse et μ la viscosité dynamique du liquide.

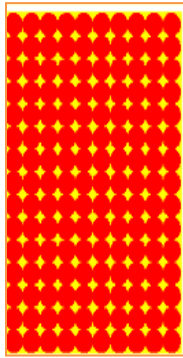
III. Mécanique des fluides

Au niveau microscopique, le fluide peut être considéré comme étant formé d'un grand nombre de particules matérielles, très petites et libres qui se déplacent les unes par rapport aux autres. Un fluide est donc un milieu matériel continu, déformable, sans rigidité et qui peut s'écouler facilement. Afin de déterminer le type et l'état d'un fluide, il est très utile de connaître les trois états fondamentaux de la matière pour un corps simple :

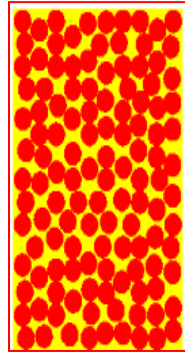
1. *Etat solide*: dans le matériau à faible température, les particules sont rapprochées, liées par des forces très importantes.
2. *Etat liquide*: dans le matériau à température moyenne et pression suffisamment élevée, les particules sont désordonnées, rapprochées et faiblement liées.
3. *Etat gazeux*: dans le matériau à température suffisamment élevée et à faible pression ; les particules sont désordonnées, espacées et presque non-liées.

On note ici, que l'état solide est un état organisé de la matière, c.-à-d., les arrangements entre les molécules présentent un ordre partiellement stable dans le temps.

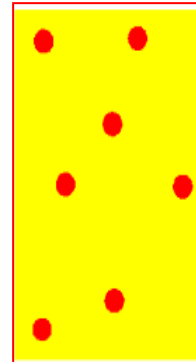
Par contre les états gazeux et liquide représentent des états désordonnés de la matière, c.-à-d., il n'existe pas un ordre qui favorise l'agencement des molécules, car ces molécules sont constamment en mouvement.



Solide



Liquide



Gaz

En d'autres termes, les fluides peuvent être classés en deux grandes familles selon leur viscosité: La famille des fluides "newtoniens" (comme l'eau, l'air et la plupart des gaz) ayant une viscosité constante et qui ne peut varier qu'en fonction de la température. La deuxième est la famille des fluides "non newtoniens" (quasiment tout le reste. le sang, les gels, les boues, les pâtes, les suspensions, les émulsions) qui ont la particularité d'avoir une viscosité variable en fonction de la vitesse et des contraintes qu'ils subissent durant leur écoulement.

Nous pouvons aussi différencier les types de fluides, par analogie avec celles des gaz, tels que:

- *Fluide parfait* : Un fluide est dit parfait s'il est possible de décrire son mouvement sans prendre en compte les effets de frottement.
- *Fluide réel* : Dans un fluide, réel les forces tangentielles de frottement interne qui s'opposent au glissement relatif des couches du fluide sont prises en considération. Ce phénomène de frottement visqueux apparaît lors du mouvement du fluide.

On peut aussi utiliser une autre classification selon la réaction à la pression :

- *Fluide compressible*: Un fluide est dit compressible lorsque le volume occupé par une masse donnée varie en fonction de la pression extérieure. Les gaz sont des fluides compressibles. Tels que: l'air, l'hydrogène, le méthane à l'état gazeux...etc.
- *Fluide incompressible*: Un fluide est dit incompressible lorsque le volume occupé par une masse donnée ne varie pas en fonction de la pression extérieure (masse volumique

constante). Exemple, les liquides peuvent être considérés comme des fluides incompressibles (eau, huile, etc.)

1- Les Propriétés des Fluides

a- La Masse volumique

La Masse volumique d'une substance est la quantité de matière contenue dans une unité de volume de cette substance : $\rho = \frac{M}{V}$, $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

b- Densité relative :

La densité relative représente la masse volumique d'un corps exprimée par rapport à celle d'un corps de référence : $D = \frac{\rho}{\rho_{référence}}$; (sans unité)

c- Pression des fluides :

À l'échelle moléculaire, on a vu qu'un fluide au repos est composé de molécules qui, si leur vitesse moyenne V_{moy} est nulle, sont animées d'une vitesse aléatoire $V_{aléatoire}$ résultant des interactions entre elles (collisions, répulsions de Van der Waals, etc.).

Pour comprendre la notion de pression au sein d'un fluide au repos, il faut examiner de plus près le comportement des molécules qui composent ce fluide. La vitesse des particules est fluctuante au gré des interactions et elle est d'autant plus grande que la température est grande. En fait, du point de vue thermodynamique, la température n'est qu'une mesure de cette agitation moléculaire. Lorsqu'on place une paroi solide, les molécules vont entrer en collision avec cette paroi et donc, si on calcule la moyenne au cours du temps de ces différentes impulsions, il en résulte une force moyenne dite force de pression.

d- Théorème de Pascal :

Dans un fluide incompressible en équilibre, toute variation de pression en un point entraîne la même variation de pression en tout autre point.

e- Théorème D'Archimède:

Tout corps plongé dans un fluide reçoit de la part de ce fluide une force (poussée) verticale π_A vers le haut dont l'intensité est égale au poids du volume de fluide déplacé (ce volume est donc égal au volume immergé du corps): $\pi_A = \rho_{fluide} \cdot g \cdot V_{corps}$

Exemple

Une particule de diamètre $10 \mu m$ et de masse volumique $\rho = 8,5 \text{ Kg/l}$ descend (mouvement uniforme) dans un tube contenant de la glycérine.

- Calculer sa vitesse limite?

- Si on suppose que la longueur du tube $l=10\text{cm}$ déterminer le temps parcouru par la molécule? On donne: masse volumique de la glycérine $\rho_0 = 1,32 \text{ Kg/l}$, viscosité de la glycérine $\eta = 0,83 \text{ poise}$, $g=9.8 \text{ m/s}^2$. ($1 \text{ poise} = 10^{-1} \text{ Pa.s}$).

- D'après la deuxième loi de Newton: $\sum \vec{F} = m\vec{a}$.

Pour un mouvement uniforme cette loi devient : $\vec{a} = \vec{0} \Rightarrow \sum \vec{F} = \vec{0}$.

Qui nous donne : $\vec{p} + \vec{F}_s + \vec{\pi}_A = \vec{0}$

Avec une simple projection sur l'axe YY', on obtient

$$p - F_s - \pi_A = 0 \Rightarrow mg - 6\pi\eta rV - m_{\text{fluide}}g = 0$$

$$m = \rho_{\text{bille}} V_{\text{bille}} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{\text{bille}}$$

Où :

$$m_{\text{fluide}} = \rho_{\text{fluide}} V_{\text{fluide déplacé}} = \rho_{\text{fluide}} V_{\text{bille}} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{\text{fluide}}$$

Par substitution, on a donc : $V = \frac{2r^2 g (\rho_{\text{bille}} - \rho_{\text{fluide}})}{9\eta}$ *loi de Stokes.*

$$\text{Application numérique : } V = \frac{2(5 \cdot 10^{-6})^2 9,8(8,5 - 1,32) \cdot 10^3}{9 \cdot 0,83 \cdot 10^{-1}} = 4,71 \cdot 10^{-6} \text{ m/s.}$$

Si on suppose que $l=10\text{cm}$, le temps de parcours pour la molécule est :

$$x = Vt \Rightarrow t = \frac{x}{V} = \frac{0,1}{4,7 \cdot 10^{-6}} = 354,61 \text{ min.}$$

2- Statique des fluides

On dit qu'un fluide est en équilibre, si quel que soit le volume de fluide considéré, la résultante des forces agissant sur ce volume est nulle. Ces forces sont :

- ✓ Les forces de pression.
- ✓ Le poids du volume du fluide étudié.

Donc on conclut que la statique des fluides est basée principalement sur les résultats suivants:

- La différence de pression entre deux points est proportionnelle à leur différence d'hauteur ; cette condition doit être vraie pour tout volume infinitésimal dv autour d'un point M. On va appliquer le principe fondamental de la dynamique à une particule fluide (référentiel galiléen, il n'y a pas de forces d'inertie). Ainsi, comme la particule fluide est au repos:

$$\overline{dF}_{\text{poids}} + \overline{dF}_{\text{pression}} = \vec{0}$$