

**Université Colonel Hadj Lakhdar . Batna
Faculté de Médecine
Département de pharmacie
2eme Année
Module BIOPHYSIQUE**

VISCOSITE DES LIQUIDES ET DES SOLUTIONS – HEMORHEOLOGIE

2012-2013

Chapitre II: La viscosité et sa mesure

Introduction

La viscosité permet de faire la distinction entre un fluide parfait et un fluide réel. Dans le cas des fluides parfaits, on considère que l'écoulement se déroule sans perte d'énergie. Dans un fluide réel, il existe des forces dites de **viscosité**. Elles sont dues à des frottements qui existent entre les couches de vitesses différentes et sur les parois.

Ce phénomène est une caractéristique de la matière, quel qu'en soit l'état physique : gazeux, liquide ou à la limite solide. Elle intervient fréquemment dans les équations de la mécanique des fluides. Elle traduit, en bref, la résistance d'un fluide à l'écoulement. car elle ralentit le mouvement du liquide au voisinage des parois.

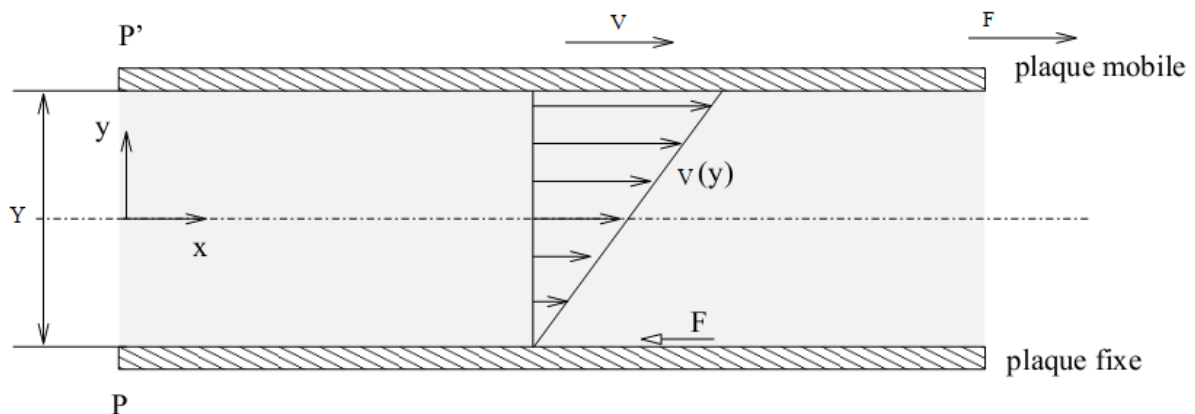
I Définition de la viscosité

- -L'eau, l'huile, le miel coulent différemment : l'eau coule vite, mais avec des tourbillons ; le miel coule lentement, mais de façon bien régulière.
- La **viscosité** (du latin viscum, gui) peut être définie comme la résistance à l'écoulement uniforme et sans turbulence se produisant dans la masse d'une matière.
- La viscosité se manifeste chaque fois que les couches voisines d'un même fluide sont en mouvement relatif, c'est à dire lorsqu'il **s'établit un gradient de vitesse**.

On peut donc dire de la viscosité qu'elle est la mesure du frottement fluide.

a/ Le coefficient de viscosité

La définition du coefficient de viscosité découle de la formule de Newton, fondée sur le modèle de plusieurs plans superposés de surface **S**, distants d'un espace **dy** et dont le plan supérieur est animé d'une vitesse **v**.

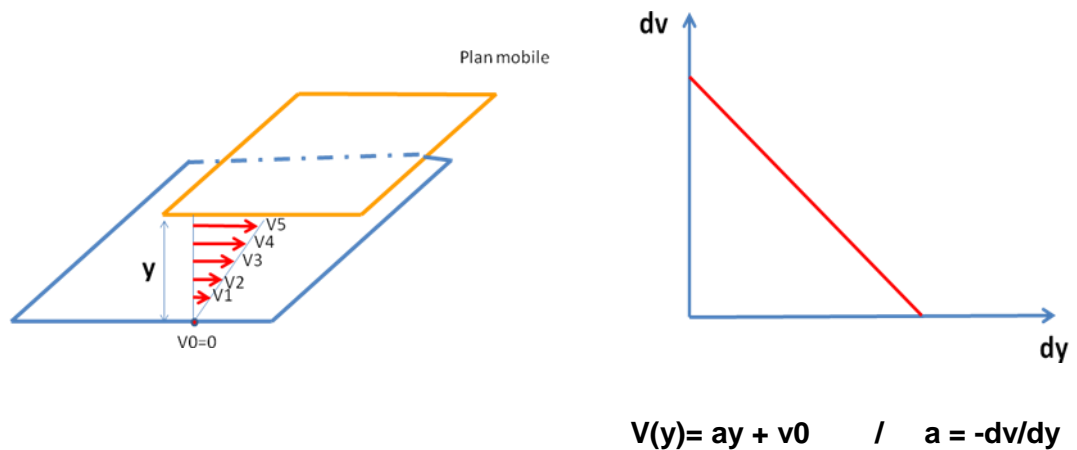


Les plans successifs étant retenus entre eux par les forces de frottement, il s'établit entre eux une **force de cisaillement F** responsables de la diminution de la vitesse de déplacement des plans successifs d'une valeur **dv**.

Lorsqu'on passe de l'un à l'autre. On définit ainsi le gradient de vitesse dv/dx et la formule de Newton définit le coefficient de viscosité η comme étant le coefficient de proportionnalité qui relie la force de cisaillement au gradient de vitesse par l'intermédiaire de la surface des plans qui frottent l'une sur l'autre :

$$\tau = \frac{dF}{dS} = \eta \cdot \frac{\partial v}{\partial y}$$

b/ Démonstration :



$$F \sim V \cdot S / y$$

$$F \sim dV/dy \cdot S \quad (1)$$

$$F = \tau \cdot S \quad (2)$$

$$(1) = (2) \rightarrow \tau \sim dV / dy$$

Par définition, la viscosité, notée η , est ce coefficient de proportionnalité.

$$\tau = \frac{dF}{dS} = \eta \cdot \frac{\partial v}{\partial y}$$

η s'appelle la viscosité dynamique par opposition à la viscosité cinématique, notée ν .

La viscosité cinématique est égale au rapport de la viscosité dynamique par la masse volumique du fluide considéré.

$$\text{viscosité cinématique : } \nu = \frac{\eta}{\rho}$$

II Unités et ordres de grandeur

L'équation aux dimensions de la viscosité dynamique s'écrit:

$$[\eta] = \frac{N \cdot m}{m^2 \cdot (m \cdot s^{-1})} = Pa \cdot s$$

$$[\eta] = M L^{-1} T^{-1} = M L T^{-2} L^{-2} T$$

SI : Poiseuille ($kg / m \cdot s$) ou $Pa \cdot s$

CGS : Poise

1 Poiseuille = 10 Poises

L'équation aux dimensions de la viscosité cinématique s'écrit:

$$[\nu] = \left[\frac{\eta}{\rho} \right] = \frac{N.m}{m^2.(m.s^{-1})} \cdot \frac{m^3}{kg} = m^2.s^{-1}$$

L'unité de la viscosité cinématique, dans le système CGS, est le **Stokes, notée St.**

$$(1 m^2.s^{-1} = 10^4 St).$$

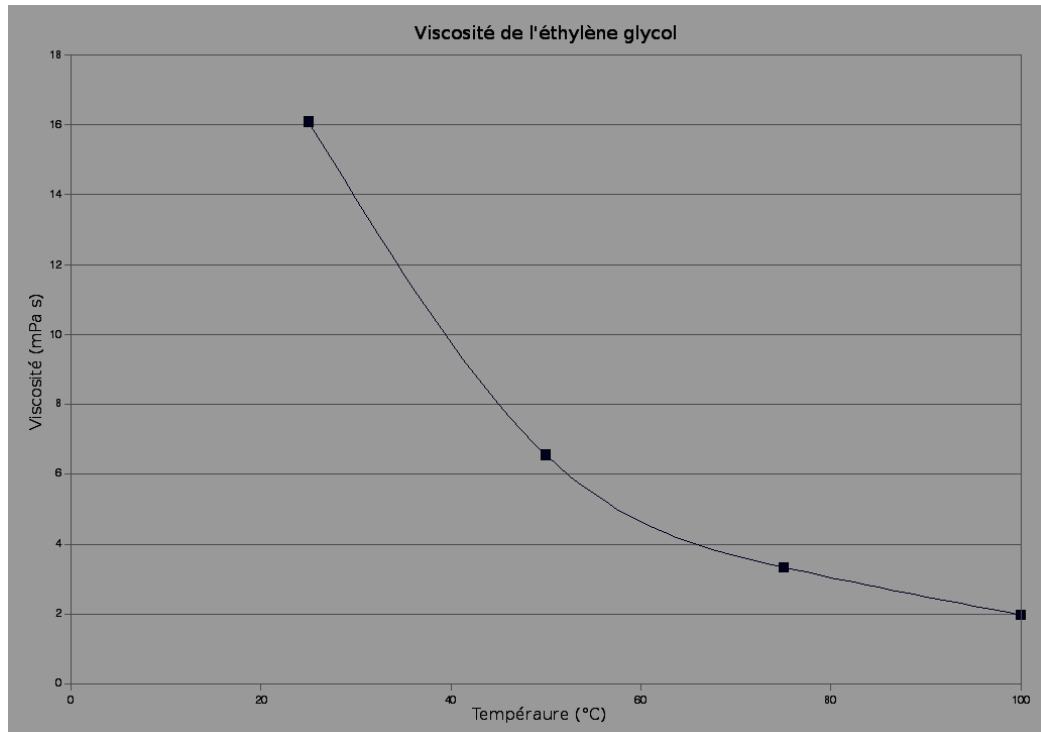
Ordre de grandeurs

Viscosité dynamique de quelques fluides à **20°C** (en **mPa.s**):

- ✿ Eau : 1,005
- ✿ Essence : 0,652
- ✿ Ethanol: 1,2
- ✿ Glycérine : 1490
- ✿ Huile d'olive: 84
- ✿ Lait: 2
- ✿ Mercure :1,554
- ✿ Miel liquide: 6000

III Effet de la température sur la viscosité :

La viscosité dépend fortement de la température. Pour conserver un sens à la mesure, on doit préciser la température à laquelle elle a été faite. Dans un liquide, **la viscosité décroît rapidement en fonction de la température**



IV Mesure de la viscosité :

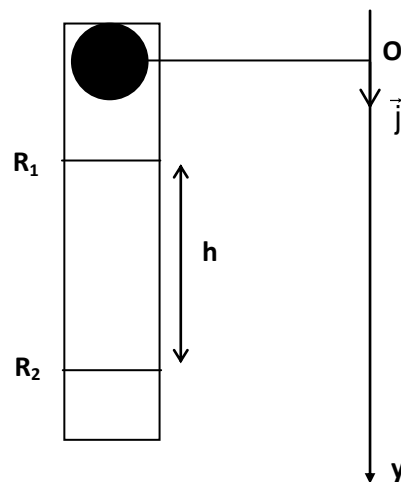
1. Viscosimètre à chute de bille

Principe de fonctionnement :

Le viscosimètre à chute de bille est basé sur le principe de mesure d'Höppler. Une bille sphérique tombe lentement dans un tube bien calibré renfermant le liquide visqueux. On mesure la durée t que met la bille pour parcourir une certaine distance. On montre que la viscosité dynamique η est proportionnelle à la durée t : $\eta = K \cdot t$.

Le tube est monté sur un pivot à roulement à billes qui autorise une rotation à 180° du tube, permettant ainsi de démarrer immédiatement un nouveau test.

Trois mesures sont effectuées puis un temps moyen de chute est retenu.



Etude théorique :

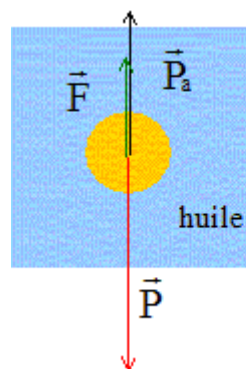
Expression du poids P de la bille en fonction de son volume V et de sa masse volumique ρ :

$$P = V \rho g.$$

$$P_a = V \rho_0 g.$$

La force de frottement, d'après la loi de Stokes, a pour expression $\vec{F} = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R \cdot \vec{v}$

η : est la viscosité dynamique de l'huile (constante si la température est constante),
 R : le rayon de la bille
 v : la vitesse de chute,



Si la vitesse limite est atteinte :

$$\vec{F} + \vec{P} + \vec{P}_a = \vec{0}$$

Relation existant entre le temps de chute mesuré avec le viscosimètre, la distance L entre les deux traits repères, ρ , ρ_0 , V , η , R lorsque la bille a atteint sa vitesse de chute limite.

Lorsque la vitesse limite est atteinte, la bille est pseudo-isolée (la somme vectorielle des forces est nulle d'après la première loi de Newton). Toutes les forces ont la même direction verticale ; le poids est dirigé vers le bas, la poussée et la force de frottement sont dirigés vers le haut .

$$F + P_a = P ; \rightarrow 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R \cdot v_{lim} + V \rho_0 g = V \rho g$$

$$6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R \cdot v_{lim} = V \rho g - V \rho_0 g = V g (\rho - \rho_0)$$

$$v_{lim} = V g (\rho - \rho_0) / (6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R)$$

$$v_{lim} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{R^3 g (\rho - \rho_0)}{(6 \cdot \pi \cdot n R)}$$

$$v_{lim} = \frac{2}{9} \cdot \frac{R^2 g (\rho - \rho_0)}{(n)}$$

de plus, le mouvement étant rectiligne uniforme : $v_{lim} = L / t$ soit $t = L / v_{lim}$ remplacer v_{lim} par son expression d'où :

$$t = \frac{9}{2} \cdot L \cdot n \frac{1}{R^2 g (\rho - \rho_0)}$$

Pour un tube donné, une bille donnée et un liquide de masse volumique donnée, L, R, V, $(\rho - \rho_0)$ sont constants par suite **t = constante * n**.

2. Viscosimetre d'Ubbelohde ou d'Ostwald:

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).

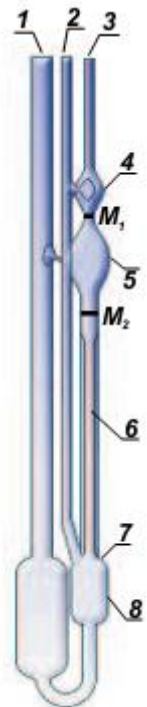
Au dessus et en dessous de la sphère de mesure (5), les marques annulaires M1 et M2 sont imprimées sur le tube (3). Ces marques définissent le volume de contrôle pour les expériences.

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 Δt 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 Δt par :

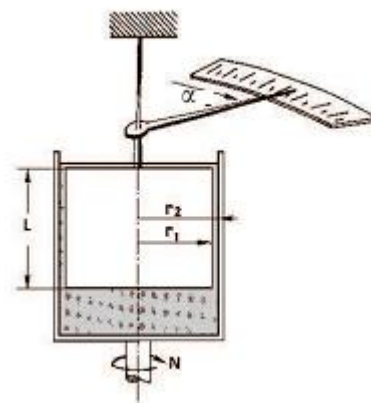
$$\nu = K \Delta t$$

La constante K de l'appareil est donnée par le constructeur du viscosimètre. Si cette donnée est manquante, il est possible de la déterminer préalablement à l'aide d'un fluide dont la viscosité est connue.



3. 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 :

$$n = K \alpha$$

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

V Nature du fluide et de l'écoulement

A /Nature du fluide : Les fluides newtoniens et non newtoniens

Comme on l'a vu, le gradient de vitesse dv/dy intervient dans la définition du coefficient de viscosité. On est ainsi amené à considérer deux cas, selon que la force de cisaillement est **proportionnelle** au gradient de vitesse et donc le coefficient de viscosité constant quelque soit le gradient de vitesse, ou au contraire que cette force de cisaillement diminue lorsque le gradient de vitesse augmente (les plans glissant plus facilement l'un sur l'autre à vitesse élevée qu'à faible vitesse) et dans ce cas **le coefficient de viscosité diminue lorsque le gradient de vitesse augmente.**

Ces considérations permettent de définir :

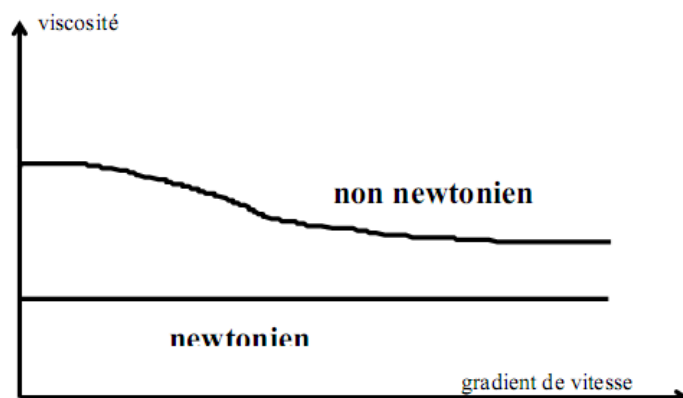
- **Les fluides newtoniens** (premier cas) : le coefficient de viscosité est constant quelque soit le gradient de vitesse.

exemple eau: quand on tourne une cuillère dans un bol, la résistance à l'avancement ne change pas si on change la vitesse de rotation.

- **Les fluides non newtoniens** : la viscosité diminue lorsque le gradient de vitesse augmente.

exemple, on remue du yogourt dans un pot: il devient moins visqueux si on le bat rapidement (il se fluidifie)

Un exemple typique de fluide non newtonien est celui d'une solution macromoléculaire dans laquelle les molécules sont disposées dans tous les sens à faible vitesse circulaire (viscosité élevée) mais s'orientent dans une direction préférentielle - dans le sens du courant - à vitesse plus élevée



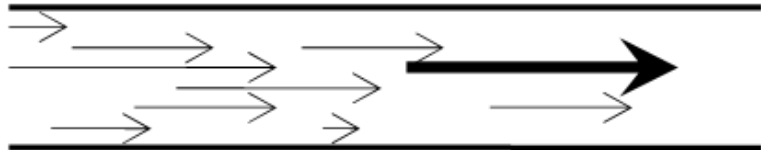
(viscosité moindre dans cette situation). **Le sang est également un liquide non newtonien**, alors que les liquides purs et les solutions micromoléculaires sont en général newtoniens.

B /Nature de l'écoulement:

✿ Ecoulement laminaire :

Dans ce cas toutes les particules se déplacent dans une direction parallèle au sens général de l'écoulement, ce qui veut dire que tous les vecteurs vitesse individuels sont parallèles entre eux et parallèles au vecteur vitesse moyenne;

écoulement laminaire



✿ Ecoulement turbulent :

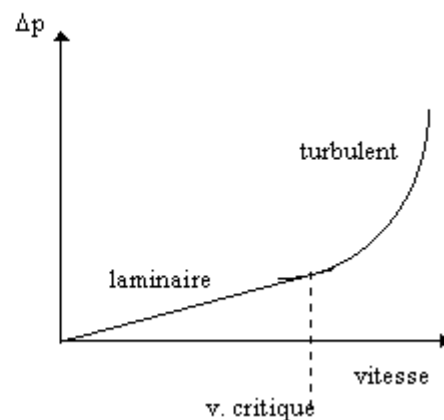
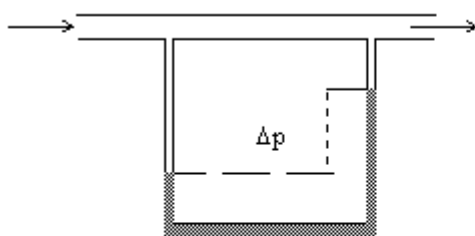
Les vecteurs vitesse peuvent prendre toutes les directions, ce qui se traduit par l'apparition de tourbillons, mais la résultante de ces vitesses reste malgré tout dirigée dans le sens global de l'écoulement.

écoulement turbulent



C Le nombre de Reynolds

Expérience de Reynolds: un fluide coule dans un tube. On augmente progressivement la vitesse du fluide. On évalue sa vitesse par la différence de pression mesurée entre deux points. L'écoulement est d'abord laminaire. A partir d'une certaine valeur de la vitesse, il devient turbulent



Les conditions dans lesquelles le régime d'écoulement d'un fluide se modifie, notamment pour passer d'un régime laminaire vers un régime turbulent, font appel à quatre variables qui participent à la définition du régime d'écoulement :

- la vitesse circulatoire moyenne : V_m
- le diamètre du tuyau : d
- la masse volumique du liquide : ρ
- la viscosité du liquide : η

Les trois premières variables agissent dans **le sens direct** : le régime aura tendance à être turbulent lorsque la vitesse moyenne augmente, lorsque le diamètre du tuyau augmente et lorsque la masse volumique du liquide augmente; la dernière variable, **au contraire** agit en sens inverse : le régime sera d'autant plus volontiers turbulent que la viscosité sera plus faible, c'est à dire que le liquide sera plus "fluide".

Le rapport entre force d'inertie et la force visqueuse est représenté en ordre de grandeur par le nombre de **Reynolds R**

$$R = \rho v_m d / \eta$$

Quand $R \ll 1$, la force visqueuse est dominante

Quand $R \gg 1$, la force d'inertie est dominante

Le nombre de Reynolds est un nombre sans dimensions et selon les valeurs qu'il prend (dans le système international) on pourra caractériser la probabilité pour un écoulement d'être laminaire ou turbulent :

- si $R < 2400$ le régime est probablement laminaire

- si $R > 3000$ le régime est probablement turbulent

- si $2400 > R > 3000$ le régime instable (intermittent), c'est à dire qu'il peut être aussi-bien laminaire que turbulent, en fonction des conditions extérieures : par exemple des vibrations extérieures peuvent conduire à faire passer un régime laminaire instable vers un régime turbulent.

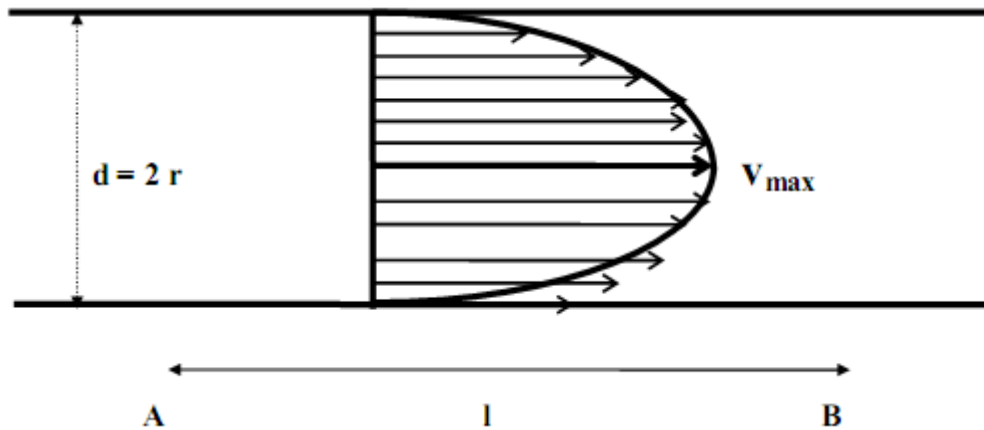
La valeur seuil de 2400 permet de définir une vitesse dite "vitesse critique" en dessous de laquelle le régime est probablement laminaire et au-dessus de laquelle il aura tendance à devenir instable, avec donc une possibilité de devenir turbulent :

$$v_c = 2400 \eta / \rho d$$

D° Le régime laminaire : la loi de Poiseuille

Le régime laminaire, dans le cas d'un liquide newtonien, suit une loi qui précise que:

- la vitesse maximale se situe dans l'axe du tuyau
- la vitesse décroît lorsqu'on s'approche des parois du tuyau
- le profil des vitesses (l'extrémité des vecteurs vitesse) est parabolique.



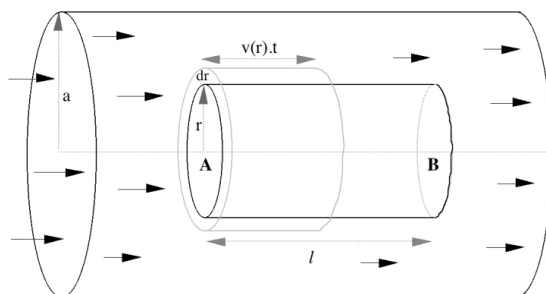
Si l'on considère alors deux points A et B sur ce conduit séparés par une distance l , il existe, du fait des frottements, une "perte de charge" (pression + énergie potentielle liée à l'altitude + énergie cinétique) qui est donnée par la loi de Poiseuille :

$$v_{\max} = r^2 / 4 \eta \cdot \Delta P / \Delta l$$

Cette même loi permet également de trouver le débit d'écoulement par intégration des différentes vitesses sur le profil parabolique de section du tuyau:

$$D = \pi r^4 / 8 \eta \cdot \Delta P / \Delta l$$

Démonstration :



$$v_{\max} = r^2 / 4 \eta \cdot \Delta P / \Delta l$$

$$F_{\text{pression/Ox}} = (p_A - p_B) \cdot \pi r^2$$

$$F_{\text{frottement/Ox}} = F_{\text{fx}} = \eta \cdot S \cdot \frac{dv}{dr}$$

$$= \eta \cdot 2\pi r \cdot l \cdot \frac{dv}{dr}$$

Cylindre en équilibre

$$\implies F_{\text{px}} + F_{\text{fx}} = 0$$

$$D = \frac{dV}{dt}, \quad dV = S \cdot dl, \quad dl = v \cdot dt$$

$$dV = S \cdot v \cdot dt \rightarrow D = \frac{S \cdot v \cdot dt}{dt}$$

$$D = S \cdot v = \pi \cdot r^2 v \quad (1)$$

$$v = \frac{\Delta P}{4nl} \cdot r^2 \quad (2)$$

$$dD = v \cdot dS = \frac{\Delta P}{4nl} \cdot r^2 \cdot 2\pi r dr$$

$$dD = \frac{\Delta P \cdot \pi}{2nl} \cdot r^3 dr$$

$$D = \frac{\Delta P \cdot \pi}{2nl} \cdot \frac{1}{4} r^4$$

$$D = \frac{\Delta P \cdot \pi}{8nl} \cdot r^4 \quad \text{loi de Poiseuille}$$

La résistance à l'écoulement : la loi d'ohm

Il est possible d'établir un parallèle entre l'écoulement d'un fluide dans un tuyau et le passage du courant électrique dans un conducteur :

- la perte de charge ΔP joue un rôle comparable à la différence de potentiel,
- le débit est équivalent à l'intensité électrique

et il s'agit donc simplement de trouver l'équivalent de la résistance électrique pour pouvoir écrire la loi d'Ohm:

$$V = R I$$

et son équivalent hydraulique. Il suffit pour cela d'écrire la loi de Poiseuille sous une forme légèrement différente

$$D = \pi r^4 / 8\eta \cdot \Delta P / \Delta l$$

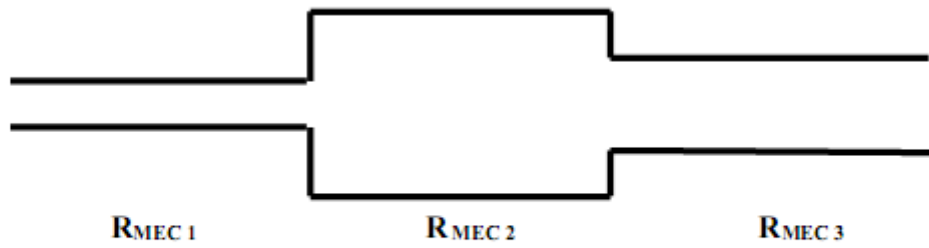
$$\Delta P = 8 \eta \Delta l / \pi r^4 \cdot D$$

expression qui permet de définir la résistance mécanique à l'écoulement :

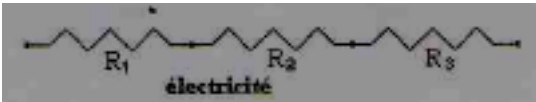
$$R_{\text{mec}} = 8 \eta \Delta l / \pi r^4$$

Comme c'est le cas pour les résistances électriques, les résistances mécaniques peuvent être placées en série ou en parallèle. Les lois valables pour les résistances électriques s'appliquent :

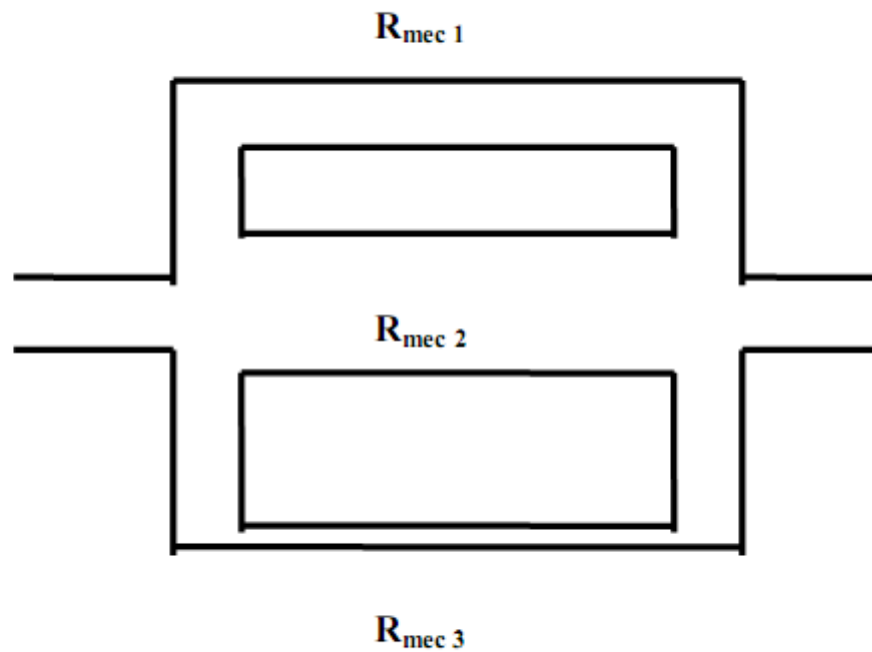
- conduits en série :



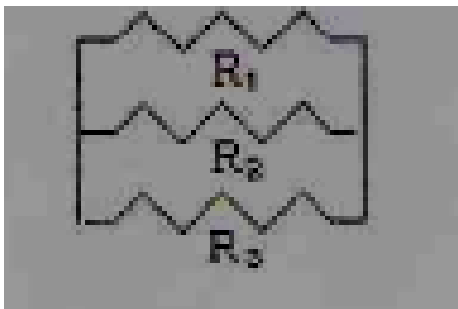
$$R_{MEC\ TOTAL} = R_{MEC 1} + R_{MEC 2} + R_{MEC 3}$$



- conduits en parallèle :

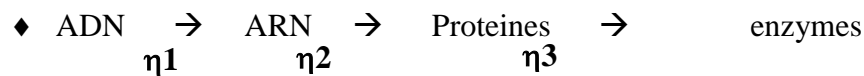


$$1 / R_{MEC\ TOTAL} = 1 / R_{MEC 1} + 1 / R_{MEC 2} + 1 / R_{MEC 3}$$



IV/ Applications ; conséquences

- ♦ La détermination de la viscosité permet l'étude de la structure des polymères biologiques



- ♦ L'acide hyaluronique aide à protéger les articulations en augmentant la viscosité du liquide synovial et en rendant le cartilage plus élastique.

V/ Viscosité et rhéologie du sang.

V.1/ Viscosité relative :

Si η est la viscosité de la solution macromoléculaire, et si η_0 est la viscosité du solvant, on définit la viscosité relative, notée η_r , par :

$$\eta_r = \eta / \eta_0$$

V.2/ Viscosité spécifique :

On définit de même la viscosité spécifique, notée η_{sp} , comme l'accroissement relatif de la viscosité :

$$\eta_{sp} = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0}$$

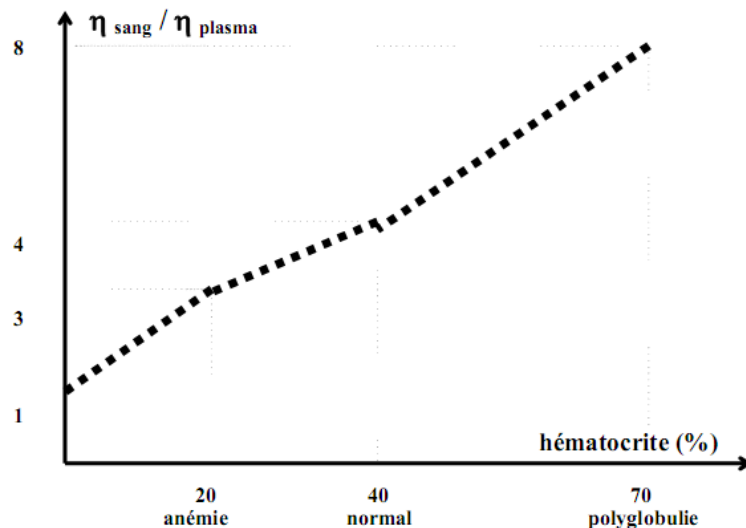
V.3/ ° La viscosité sanguine

La viscosité sanguine est fortement variable avec la concentration en globules rouges (hématocrite). En l'absence de cellules sanguines, le sérum (obtenu après coagulation) ou le plasma (obtenu par centrifugation) ont une viscosité proche de celle de l'eau à 20°C :

- sérum : 1,1 - 1,3 10⁻³ Pa s

- plasma : 1,4 10⁻³ Pa s

Pour ce qui concerne le sang total, il existe une relation entre la viscosité et l'hématocrite que l'on peut représenter approximativement sous la forme graphique suivante:



Viscosité relative du sang :

$$\eta_r = \frac{\eta_{sang}}{\eta_{H_2O}}$$

viscosité spécifique du sang :

$$\eta_{sp} = \frac{\eta_{sang} - \eta_{H_2O}}{\eta_{H_2O}}$$

Dans les **situations pathologiques**, et notamment en cas de **polyglobulie**, la viscosité sanguine peut devenir très élevée, avec comme conséquence une augmentation parallèle des résistances mécaniques, étant donné que la viscosité intervient directement dans l'expression de la résistance mécanique. Ces phénomènes peuvent avoir des conséquences graves sur la perfusion sanguine des tissus et sur l'apport d'oxygène par la circulation

Polyglobulie : Hématocrite ↗ → viscosité ↗ → vitesse ↘ → flux ↘ → temps de circulation de sang ↗

Anémie : Hématocrite ↘ → viscosité ↘ → vitesse ↗ → flux ↗ → temps de circulation de sang ↘

Une autre donnée relative à la viscosité sanguine concerne le caractère non newtonien du sang. La présence de protéines et de cellules se traduit par deux phénomènes caractéristiques de la circulation sanguine (en régime laminaire) :

- Il existe une concentration plus élevée de globules rouges dans la partie centrale du vaisseau par rapport aux bords (concentration axiale des globules rouges)
- sur les bords, en revanche, il existe une couche de protéines (couche de glissement) qui favorise l'écoulement et de ce fait le profil des vitesses s'éloigne du profil parabolique théorique, valable pour un liquide newtonien.

Comment l'aspirine peut-elle protéger le cœur ?

A faible dose, l'aspirine empêche les plaquettes du sang de s'agglutiner entre elles et ainsi former de dangereux caillots dans les vaisseaux : c'est l'effet dit anti-agrégant plaquettaire. On utilise donc l'aspirine au quotidien chez certaines personnes à risque pour fluidifier le sang, ou rendre son coefficient de viscosité normal. Et ce pour prévenir les attaques cardiaques et cérébrales. Dans cette indication, une dose de 80 à 325 mg/jour (sur avis médical) apporte selon plusieurs études, une protection réelle aux personnes de plus de 50 ans qui présentent au moins un facteur de risque cardio-vasculaire comme l'hypertension ou l'obésité.