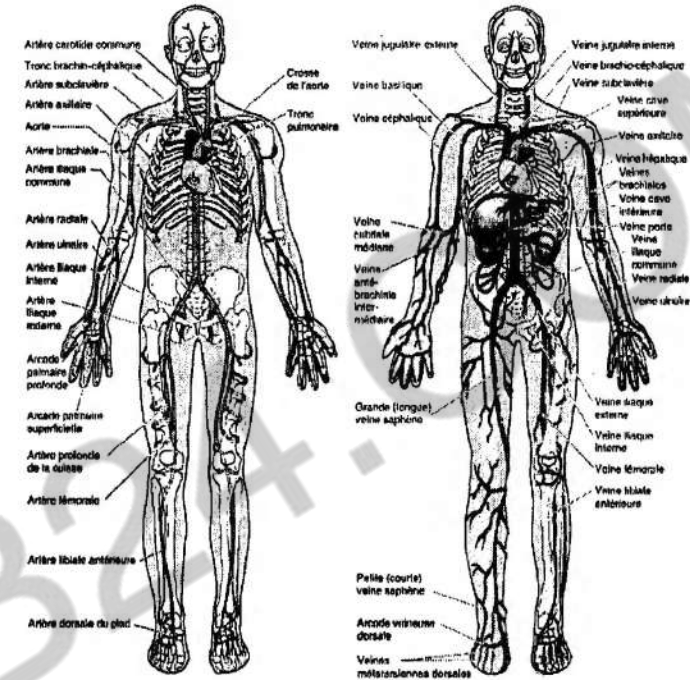


# HEMODYNAMIQUE CIRCULATOIRE

## S3-Module BIOPHYSIQUE



2/117

## La circulation

### Introduction

- Le système circulatoire est composé du sang, des vaisseaux sanguins, du cœur et du système lymphatique.
- Au cours du développement humain, l'appareil circulatoire est l'un des premiers à s'ébaucher. Il alimente en effet les tissus en formation et draine les résidus de la nutrition.
- Très vite le cœur est fonctionnel.

## système cardiovasculaire

- Le cœur constitue l'organe moteur du système cardiovasculaire. Le terme cardio désigne le cœur, et le terme vasculaire, les vaisseaux sanguins (ou un apport sanguin abondant).
- le cœur humain pompe 30 fois son propre poids (300 g) chaque minute, environ 5 litres de sang sont envoyés aux poumons et le même volume au reste du corps. À ce rythme, le cœur pourrait pomper plus de 7 000 litres de sang par jour et 5 millions de litres par an.
- Le système cardiovasculaire fournit la « pompe » qui fait circuler du sang constamment «neuf» dans 100 000 kilomètres environ de vaisseaux sanguins.
- En circulant dans les tissus du corps, le sang fournit les nutriments et l'oxygène au liquide interstitiel puis aux cellules. En même temps, il recueille les déchets, le gaz carbonique et la chaleur.
- La cardiologie (cardio : cœur) est la branche de la médecine qui étudie le cœur et les maladies qui y sont associées.

## La circulation sanguine

- Chez les unicellulaires les échanges avec le milieu extérieur se font par convection et par diffusion ;
- Dans un organisme complexe les mouvements de convection et de diffusion sont insuffisants :
  - ▶ Hill a calculé que par diffusion, l'oxygène pour atteindre le centre d'un tissu (sous forme de cylindre) de 1 cm de diamètre il lui faut 3 heures ;
  - ▶ Pour un tissu de 0.7 mm de diamètre il lui faut 54 secondes et pour ;
  - ▶ Un tissu de 7  $\mu\text{m}$  il lui faut 0,0054 seconde.

5/117



## La circulation

- Le myocarde de grenouille est peu épais, le sang qui pénètre a travers les cavités cardiaques oxygène les parois de ces cavités, qui sont minces et larges, les gaz passent directement par diffusion vers le myocarde lui même ;
- chez les mammifères le cœur est très épais et très dense, donc pour s'auto-irriguer et s'auto-oxygéner, il lui faut un système particulier : le système des vaisseaux coronaires.

## La circulation

- Notre système de convection est l'appareil cardiovasculaire, qui fait pénétrer tout dont on a besoin à l'intérieur des cellules avec une grande efficacité.
- Pour un homme au repos, un même érythrocyte (transportant l'oxygène) passe à travers les capillaires pulmonaires en 0,75<sup>seconde</sup> et ;
- Si le sujet est en activité, le temps de passage est seulement de 0,3<sup>seconde</sup>.
- Il faut une minute pour un globule rouge donné qui vient de quitter le cœur pour parcourir tout le système de la circulation sanguine et revenir au cœur.

6/117

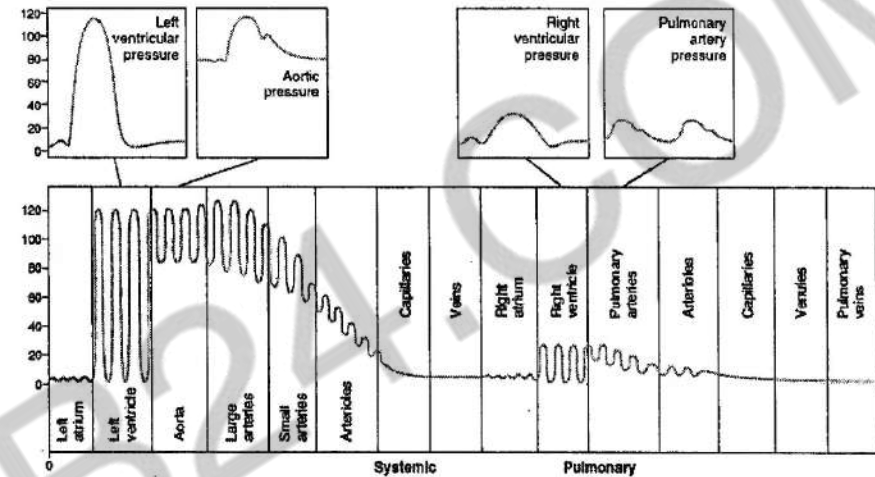
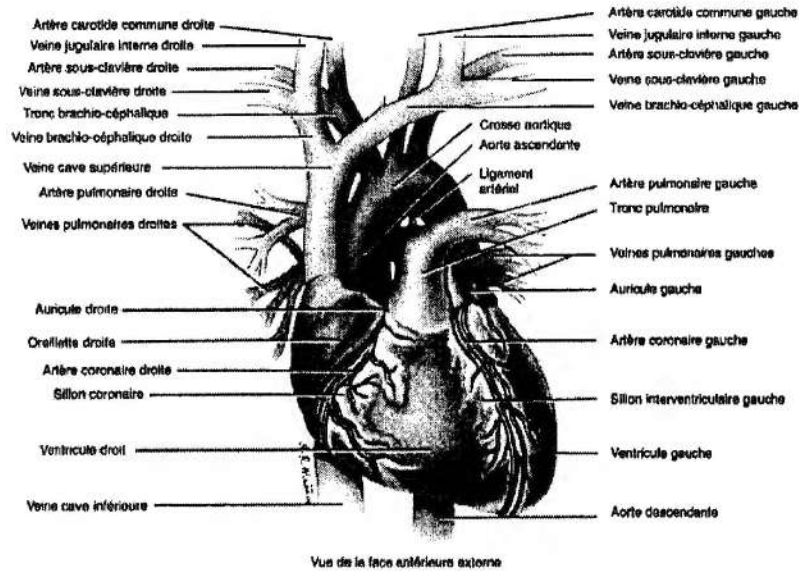


## Fonctions du système cardiovasculaire (SCV)

### 1. Fonctions de transport

- Transport d'oxygène des poumons vers les cellules du corps et du CO<sub>2</sub> des cellules vers les poumons ;
- Transport de nutriments du tube digestif vers les cellules ; les déchets sont récupérés dans la veine porte hépatique propulsés et filtrés au niveau du foie.
- Transport d'hormones et médicaments, ils sont propulsés d'un organe à un autre,
- Transport rapide de cellules : Le SCV permet le transport des globules rouges, des globules blancs, des lymphocytes qui jouent un rôle dans la défense naturelle de l'organisme contre les agressions microbiennes et dans la défense immunitaire.
- Transport de chaleur : la chaleur provient pour une bonne partie de la force de friction des couches de du sang les unes sur les autres et sur la paroi des vaisseaux. Il y a échange de chaleur entre le sang central (tout ce qui n'est pas sous la peau) et périphérique par contre courant

## La pression dans le système circulatoire (en mmHg)



Normal blood pressures in the different portions of the circulatory system when a person is lying in the horizontal position.

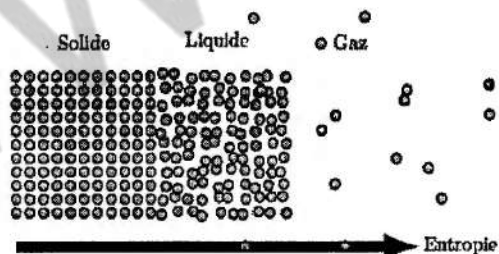
9/117

« »

## L'état fluide

### L'état fluide

Le terme fluide désigne un comportement qui s'oppose au comportement élastique ou plastique associé aux solides. Par définition, on dit que la matière est fluide lorsqu'elle se déforme aussi longtemps que lui sont appliquées des contraintes tangentielles. En termes simples on peut dire qu'un fluide coule quand un solide se déforme.



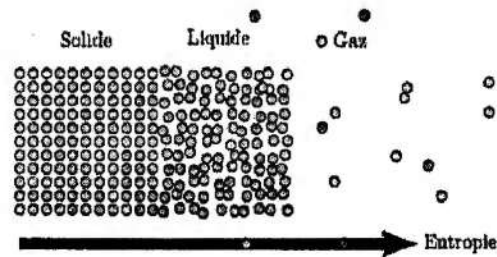
10/117

« »

## Les états de la matière

- L'état solide est un état organisé de la matière : les arrangements entre molécules présentent un ordre relativement stable dans le temps.
- Les états gazeux et liquide représentent la matière en désordre :
  - ▶ il n'existe pas d'ordre privilégié dans l'agencement des molécules car celles-ci sont perpétuellement en mouvement. Un fluide au repos à l'échelle humaine est en fait, à l'échelle moléculaire, en perpétuelle agitation.
  - ▶ Les états gazeux et liquide présentent des similarités : ce sont des fluides.
  - ▶ Un liquide n'a pas de forme propre : placé dans un récipient, il adopte les formes du récipient.
  - ▶ Il existe également des différences notables : un liquide a une surface libre; si l'on place un liquide dans un bol, on observe une interface nette, appelée surface libre, entre ce liquide et le gaz environnant.
  - ▶ Un gaz a tendance à occuper tout le volume qui s'offre à lui. Un gaz n'a donc pas de surface libre.

## Les états de la matière



À l'échelle atomique, ces différences peuvent s'expliquer assez simplement :

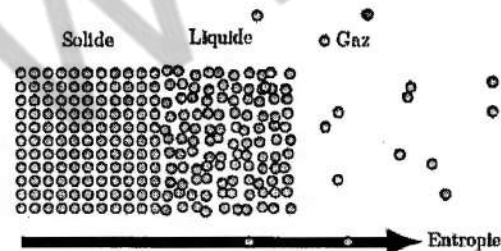
- Un gaz est une collection très diluée de molécules ou d'atomes. Si  $d$  représente la taille d'une molécule, alors la distance entre deux molécules est de l'ordre de  $10d$ .
- Dans le cas d'un liquide, cette distance intermoléculaire est beaucoup plus faible, de l'ordre de  $d$  en général. Cela a des répercussions considérables sur les interactions entre molécules.

13/117

< >

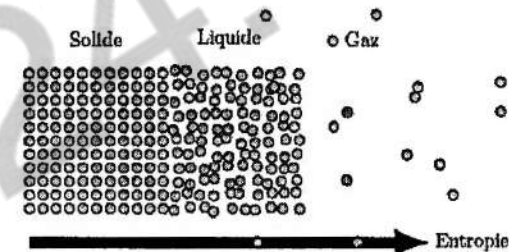
## Le gaz : matériau à température suffisamment élevée et à faible pression

Dans un gaz, les particules interagissent peu, l'énergie est avant tout cinétique. Les distances interatomiques sont grandes ce qui explique qu'à l'inverse des liquides, les gaz sont très compressibles.



## Liquides : matériau à température moyenne et pression suffisamment élevée

- Dans un liquide, les interactions (l'interaction de Van der Waals, la liaison hydrogène, l'interaction électrostatique dans une solution électrolytique etc ...) jouent un rôle clé.
- L'interaction est telle que les molécules sont quasi en contact ce qui explique le caractère quasi-incompressible des liquides : les liquides présentent un volume propre.



14/117

< >

## Approximation courantes

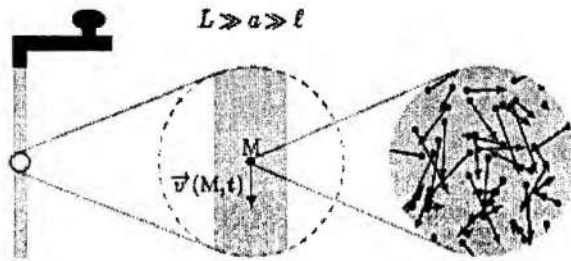
- Cas des liquides :  $\rho \approx$  constante :
  - ▶ Les variations du volume  $V$  ou de la masse volumique  $\rho$  avec la pression et la température se mesurent à l'aide du coefficient de dilatation et du coefficient de compressibilité ;
  - ▶ Pour la compressibilité de l'eau, par exemple, il faut augmenter la pression de 227 bars pour voir la masse volumique augmenter de 1% ;
  - ▶ La masse volumique de l'eau est maximum pour 4 °C ;
  - ▶ Les liquides ont également un coefficient de dilatation très faible.
- Cas des gaz : modèle du Gaz Parfait

$$pV = nRT \Rightarrow \rho = \frac{Mp}{RT} \text{ avec } R = 8,315 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

- La masse volumique d'un gaz varie considérablement avec la température et la pression.

## Les trois échelles de l'étude des fluides : macroscopique, mésoscopique et échelle des collisions I

Dans les situations courantes on peut, en général, distinguer trois échelles :



- 1 L'échelle macroscopique  $L$ . Par exemple  $L$  est le diamètre du tuyau quand on étudie l'écoulement dans un tuyau.

17/117

## Statique des fluides : Définition

- La Statique des Fluides a pour objectif l'étude de l'équilibre des fluides au repos ou des fluides uniformément accéléré.
- Il n'y a pas de contraintes dues au frottement entre les particules. On ne tient pas compte alors de la viscosité du fluide.
- Les forces en jeu sont uniquement les forces de surface dues à la pression.

## Les trois échelles de l'étude des fluides : macroscopique, mésoscopique et échelle des collisions II

- 2 L'échelle des collisions  $l \lll L$ .  $l$  est le libre parcours moyen, c'est-à-dire la distance moyenne parcourue par une molécule entre deux collisions successives. À cette échelle, les grandeurs varient de façon discontinue et imprévisible.
- 3 L'échelle mésoscopique  $a$  telle que  $l \lll a \lll L$ . À cette échelle, les fluctuations sont lissées de sorte que l'on peut définir des grandeurs locales continues.

18/117

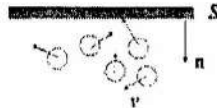
## Statique des fluides

Origine physique de la pression dans les fluides

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

## Notion de pression I

- Lorsqu'on place une paroi solide, les molécules vont entrer en collision avec cette paroi et donc, si on fait la moyenne au cours du temps de toutes ces différentes impulsions, il en résulte une force moyenne dite **force de pression**.



- On s'intéresse aux liquides considérés comme incompressible et on distingue :

- ▶ **Fluide parfait (ou idéal)** : on suppose qu'il n'y a pas de frottements moléculaires  
 $\Rightarrow$  viscosité = 0  $\Rightarrow$  écoulement sans perte d'énergie; (eau)
- ▶ **fluide réel**: glissement des molécules les unes sur les autres  
 $\Rightarrow$  frottements  $\Rightarrow$  viscosité  $\neq 0 \Rightarrow$  écoulement avec dégagement de chaleur.

21/117

## La pression est une énergie volumique I

- La pression peut s'exprimer comme :
    - ▶ Une *force* (N) exercée par unité de *surface* : ( $N \cdot m^{-2}$ );
    - ▶ Une *énergie* (J) contenue dans une unité de *volume* d'un fluide ( $J \cdot m^{-3}$ ) (c'est l'énergie des molécules du fluide).
    - ▶ Le Travail a pour unité le Joule, le Travail décrit une force appliquée sur une distance.
- Note :** Un Travail de 1 joule correspond a une force de 1 newton déplaçant un objet sur 1 mètre. (La force étant appliquée parallèlement au déplacement)
- ▶ L'énergie d'un objet représente le travail (joules) qui peut être produit par cet objet, l'énergie se mesure donc dans la même unité que le travail, en joules.

$$W = F \cdot L \text{ et } F = P \cdot S \text{ donc } W = P \cdot S \cdot L = P \cdot V \text{ alors}$$

$$P = \frac{W}{V} = \frac{E}{V}$$

22/117

## Notion de pression II

### Pression

- Toute surface en contact avec un fluide subit de la part de celui-ci une force pressante perpendiculaire à la surface quelle que soit l'orientation de celle-ci, cette force est proportionnelle à la surface  $S$  et le facteur de proportionnalité est  $P$  :

$$F = P \cdot S$$

$$P = \frac{F}{S}$$

- ( $P$  : La pression en pascal (Pa),  $S$  : la surface en  $m^2$ ,  $F$  : en N)
- 1 pascal = 1 newton par mètre carré ( $1 Pa = 1 N \cdot m^{-2}$ )

22/117

## La pression est une énergie volumique II

- L'équation aux dimensions donne :

$$\frac{[Energie]}{[Volume]} = P = \frac{[Force]}{[Surface]}$$

$$[P] = \frac{M \cdot [acc]}{L^2} = \frac{MLT^{-2}}{L^2} = Kg \cdot s^{-2} \cdot m^{-1} = N \cdot m^{-2}$$

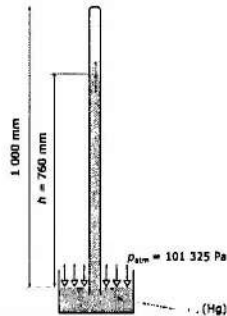
- L'unité de la pression est le *pascal* ( $Pa = N \cdot m^{-2}$ ), dont il existe plusieurs équivalents :

$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$	$1 \text{ cmH}_2\text{O} = 0.98 \cdot 10^{-4} \text{ bar}$
$1 \text{ mmHg} = 133 \text{ Pa}$	$1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar}$
$1 \text{ atm} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$	$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 1 \text{ bar}$

24/117

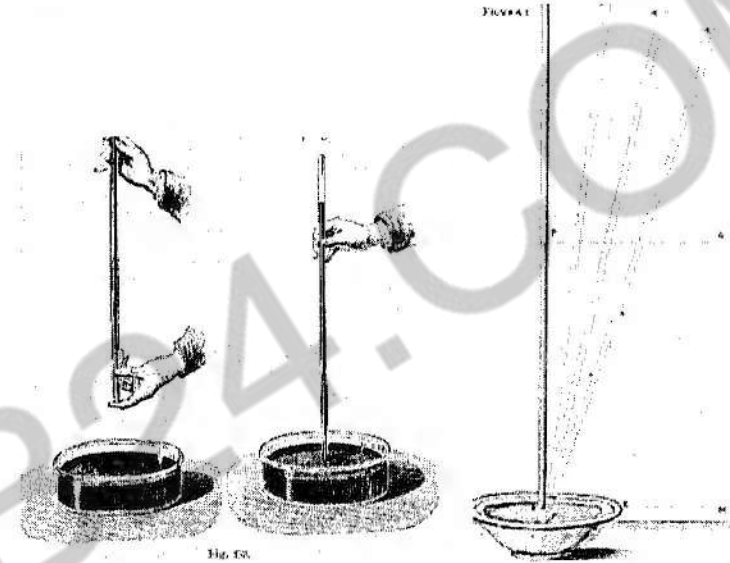
## La Pression atmosphérique

- Elle est mesurée à l'aide du baromètre de Toricelli (1644) et correspond :
  - ▶ au poids de la colonne d'air (qui s'exerce sur le mercure dans le récipient) ;
  - ▶ au poids de la colonne de mercure.



25/117

## Expérience de Torrecilli



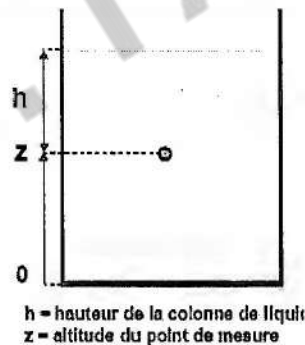
26/117

## La pression statique dans un liquide

- Elle correspond au poids de la colonne de liquide qui s'applique en un point. Elle varie avec l'altitude du point de mesure et est donnée par :

$$P_z = \rho g h$$

- $\rho$  = masse volumique en  $\text{Kg m}^{-3}$
- $g$  = accélération de la pesanteur ( $= 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ )
- $h$  = hauteur de la colonne de liquide en m



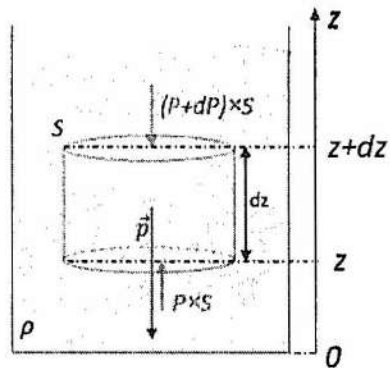
- Démonstration :
- Important : la pression statique augmente avec la profondeur (si  $h$  augmente et si  $z$  diminue)

## Deux types de pression : Pression absolue et Pression relative

- La pression absolue (en pascal), c'est la pression réelle qu'exerce un fluide sur une surface, elle se mesure par un baromètre. C'est la pression par rapport à la pression zéro dans du vide (vacuum).  
La pression absolue = pression relative + pression atm
  - ▶ Pression de l'air =  $P_r \text{ Atm} : P_0 = 1015 \text{ hPa} \approx 1 \text{ bar}$
  - ▶ Pression du vide (pas de molécules et pas de chocs) :  $P_{\text{vide}} = 0 \text{ Pa}$
- La pression relative est la pression par rapport à la pression barométrique du moment (pression atm), mesurée par un manomètre.  
 $\Delta P = P_{\text{absolue}} - P_0$ , mesurée avec un manomètre.
- Exemple de pression relative : Pneu de voiture gonflé à 2 bar, donc  $\Delta P = 2 \text{ bar}$  mais en réalité le pneu est gonflé à 3 bar càd  $P_{\text{absolue}} = P_{\text{relative}} + P_0 = 2 \text{ bar} + 1 \text{ bar} = 3 \text{ bar}$ , donc 2 bar de plus que la pression atmosphérique.
- NB : On peu avoir des pression relative négative mais la pression absolue est toujours positive.

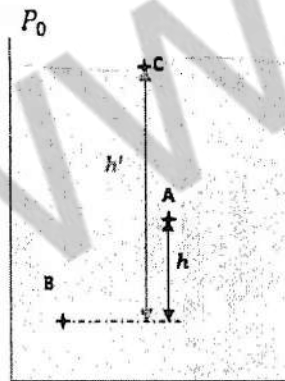
## Principe fondamental de la statique des fluides (PFS), 1ère loi de pascal ou loi de l'hydrostatique I

- Considérons un fluide de masse volumique  $\rho$  au repos. considérons une portion fluide à l'intérieur d'un cylindre imaginaire de hauteur  $h$  et de section  $S$ .



29/117

## Principe fondamental de la statique des fluides (PFS), 1ère loi de pascal ou loi de l'hydrostatique III



entre les points B et C ( $P_C = P_0 = P_{atm}$ )

31/117

## Principe fondamental de la statique des fluides (PFS), 1ère loi de pascal ou loi de l'hydrostatique II

- A l'équilibre on a

$$\Sigma \vec{F}_{ext} = \vec{0}$$

, par projection sur Oz on trouve :

$$\begin{aligned} P \cdot S - (P - dP) S - mg &= 0 \\ P \cdot S - (P - dP) S - \rho \cdot S \cdot dz \cdot g &= 0 \\ -dP - \rho g dz &= 0 \\ dP &= -\rho g dz \\ P &= -\rho g z + Cte \\ P + \rho g z &= Cte \end{aligned}$$

- on peut écrire entre deux points A et B

$$P_A + \rho g z_A = P_B + \rho g z_B = Cte$$

$$P_B - P_A = \rho g (z_A - z_B)$$

30/117

## Principe fondamental de la statique des fluides (PFS), 1ère loi de pascal ou loi de l'hydrostatique IV

$$\begin{aligned} P_B - P_C &= \rho g (z_A - z_B) \\ P_B &= \rho g h' + P_C \\ P_B &= \rho g h' + P_0 \end{aligned}$$

32/117



## Relation fondamentale de l'hydrostatique

- La différence de pression entre deux points A et B d'un fluide homogène en équilibre est égale au produit du poids volumique  $\rho$  du fluide (masse volumique fois l'accélération de la pesanteur  $g = 9,81$ ) par la différence de niveau entre les deux points :

$$P_B - P_A = \rho \cdot g \cdot (z_A - z_B)$$

$h_A$  et  $h_B$  sont les profondeurs respectives de A et B par rapport à la surface libre du liquide.

- Conséquence 1 : pour un fluide donné, tous les points qui sont au même niveau (même profondeur) sont à la même pression.
- Conséquence 2 : un liquide (incompressible) transmet intégralement les pressions dans toutes les directions (Principe de Pascal)

33/117

## Lois de Pascal (1623-1662) II

Elles rendent compte de la variation de P avec l'altitude

### **Théorème fondamental de l'hydrostatique :**

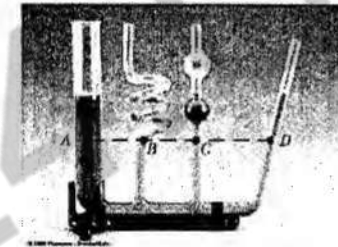
la différence de pression entre 2 points situés à des altitudes différentes est proportionnelle à cette différence d'altitude :

$$P_1 + \rho g z_1 = P_2 + \rho g z_2 \Leftrightarrow \Delta P = P_2 - P_1 = \rho g (z_1 - z_2)$$

## Lois de Pascal (1623-1662) I

Elles rendent compte de la variation de P avec l'altitude

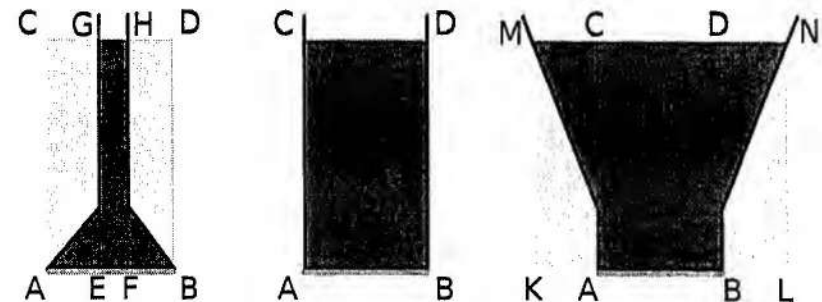
- $\rho g h + \rho g z = \text{cte} \Leftrightarrow P_{\text{stat}} + \rho g z = \text{cte} \Leftrightarrow E_{\text{pression}} + E_{\text{pesanteur}} = \text{cte}$
- la pression est la même pour tous les points situés à la même altitude, quelle que soit la forme du récipient (la pression est isotrope) ;



34/117

## "Paradoxe" hydrostatique

A surface de fond identique (et même hauteur de liquide), la force de pression exercée par un liquide sur le fond du récipient est indépendante de la forme du récipient.



## Expérience de creve-tonneau de Pascal I

37/117

## Expérience de creve-tonneau de Pascal III

- Loi fondamentale de l'hydrostatique entre A (haut du tube) et B (bas du tube = surface supérieure du tonneau)

$$\begin{aligned}P_B - P_A &= \rho g (z_A - z_B) \\P_B &= \rho g (z_A - z_B) + P_A \\P_B &= \rho g H + P_A\end{aligned}$$

- La pression en B a été augmenté de  $\Delta P = \rho g H$
- Le résultat ne dépend pas du diamètre du tube, donc il faut choisir un tube avec un diamètre très petit pour économiser le liquide, ici l'eau.
- L'augmentation de la pression se répartit intégralement sur toutes les parois du tonneau.

38/117

## Expérience de creve-tonneau de Pascal II

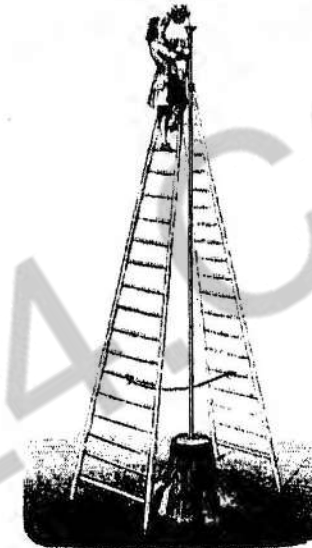


Fig. 15.—Hydrostatiké pascal. Pascal's experiment.

38/117

## Expérience de creve-tonneau de Pascal IV

**Application :** surface du tonneau  $S = 1 \text{ m}^2$ ; Hauteur du tube  $H = 5 \text{ m}$ ; la force  $F$  appliquée sur  $S$  :

$$F = \Delta P \cdot S$$

$$\begin{aligned}\Delta P &= \rho g H \\ \Delta P &= 1000 \times 10 \times 5 = 5 \cdot 10^4 \text{ Pa} \\ F &= P \cdot S = 5 \cdot 10^4 \times 1 \\ F &= 5 \cdot 10^4 \text{ N}\end{aligned}$$

Ce qui correspond à la même force que le poids exercé par une masse  $m$  :

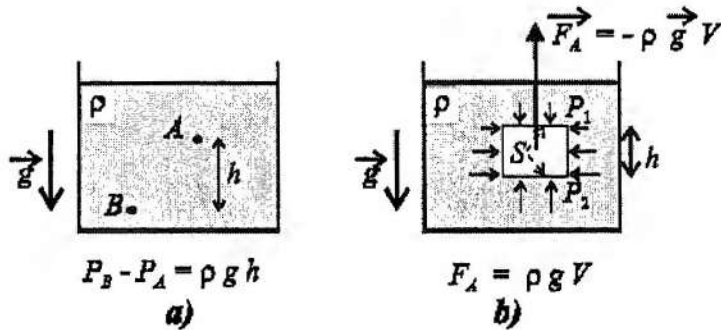
$$m = \frac{F}{g} = \frac{5 \cdot 10^4}{10} = 5 \cdot 10^3 \text{ Kg} = 5 \text{ tonnes}$$

40/117

## La poussée d'Archimède I

Archimède : 287-212 av J.C

- Immergeons un petit parallélépipède rectangle dans un fluide de masse volumique  $\rho$ , au repos (fig. 1 b). L'aire de la base (horizontale) est  $S$ .
- Les forces qui s'exercent sur les bases sont verticales; elles ont pour norme  $F_1 = P_1 S$  sur la face supérieure et  $F_2 = P_2 S$  sur la face inférieure. Les forces latérales se compensent.



41/117

## La poussée d'Archimède III

Archimède : 287-212 av J.C

### Définition

tout corps immergé dans un fluide en équilibre est soumis à une poussée verticale, dirigée vers le haut et d'intensité égale au poids du volume de fluide déplacé.

## La poussée d'Archimède II

Archimède : 287-212 av J.C

- La résultante de toutes les forces est donc une force verticale,  $F_{Arch}$ , dirigée du bas vers le haut, appelée "poussée d'Archimède" :

$$F_{Arch} = (P_2 - P_1)S \quad \text{avec} \quad P_2 - P_1 = \rho_f g h.$$

- Toutes les forces latérales s'annulent les unes les autres.
- Le volume du parallélépipède est  $Sh$ . On obtient donc

$$F_{Arch} = \rho_f g V_i$$

$V_i$  est le volume (immergé) de fluide déplacé par le parallélépipède,  $\rho V_i$  est la masse de ce volume.

- C'est une force dirigée vers le haut.

42/117

## Poussée d'Archimède

- Cette propriété est générale, quelle que soit la forme du corps immergé.
- **Attention !** : L'expression de la poussée d'Archimède suppose que le volume immergé est complètement entouré par le fluide. S'il repose au fond, seule la pression  $P_1$  agit, créant une force qui pousse le corps vers le bas.
- Ainsi, si un baigneur colle son dos au sol d'une piscine il se trouve plaqué au fond.
- A une profondeur de  $2m$ , compte tenu de la pression atmosphérique ( $1,01310^5$  Pa), sur une surface de  $50 \times 20cm^2$  la force est approximativement égale au poids sur Terre d'une masse de  $1213$  kg (plus d'une tonne! ( $g = 10$  N/m<sup>2</sup>)).
- Le baigneur ne pourrait pas se dégager. Fort heureusement un contact parfait entre le dos du baigneur et le sol de la piscine, sur une telle surface, est difficilement réalisable.

## Applications de la poussée d'Archimède

Mesure de la masse volumique et de la densité

### Définition

tout corps immergé dans un fluide en équilibre est soumis à une poussée verticale, dirigée vers le haut et d'intensité égale au poids du volume de fluide déplacé.

45/117

## Application de la poussée d'Archimède : Mesure de la densité du corps humain

- La mesure de la densité du corps humain permet de déterminer le % de masse grasse et de masse maigre ;
- Mesure de la densité par pesée à l'air et dans l'eau ;
- Pour déterminer le volume du corps humain, l'individu est immergé dans l'eau ;
- Le volume du corps est égale au poids du volume d'eau déplacée ;
- Le poids du sujet dans le liquide, diminuera d'une quantité mesurée par ce que pèse un volume de liquide déplacé égal à celui du corps.

47/117

## Définitions

### Masse volumique

La masse volumique  $\rho$  (lire "rho") est définie par le rapport de la masse d'un corps sur son volume :  $\rho = \frac{m}{V}$  Unités :  $\rho$  en  $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , ( $m$  en Kg et  $V$  en  $\text{m}^3$ ).

- La masse volumique d'un liquide varie peu avec la pression et la température.  $\rho$  augmente légèrement avec la température.

### La densité

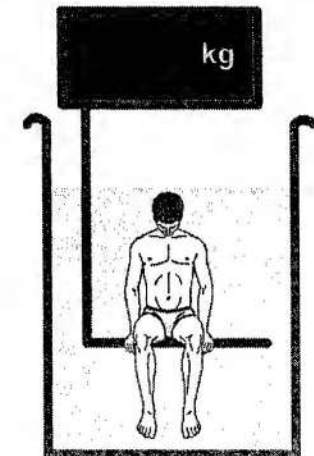
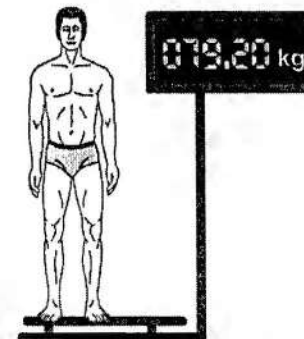
C'est le rapport de la masse d'un corps sur la masse du même volume d'un corps de référence :  $d = \frac{\rho}{\rho_{\text{ref}}}$

- Pour les liquides et les solides le corps de référence est l'eau (à  $4^\circ\text{C}$  ;  $\rho_0 = \frac{1000 \text{ Kg}}{1 \text{ m}^3}$ );
- Pour les gaz la référence est l'air sec pris dans les mêmes conditions de température et de pression ( $\rho_0 = 1,293 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$  à  $0^\circ\text{C}$  et 1013 hPa)

46/117

## Mesure de la densité du corps entier : D

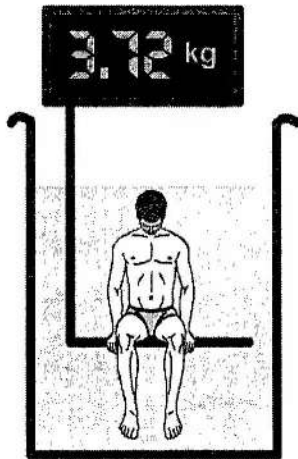
1. Hydrodensitométrie : Il s'agit plutôt de la mesure de la masse volumique (density)



49/117

## Mesure de la densité du corps entier : D

### 1. Hydrodensitométrie (3)



49/117

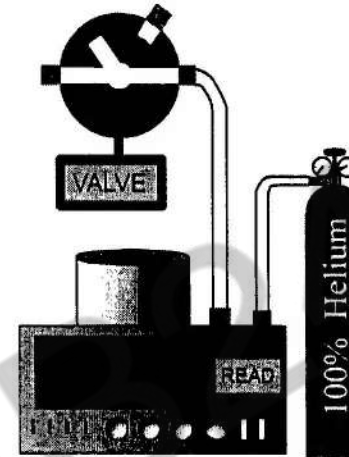
## calcul du volume et de la densité du corps

- Le volume est égale à la diminution du poids dans l'eau (par rapport à la pesée dans l'air)/masse volumique de l'eau à 38 celsius :
- $79,20 - 3,72 = 75,48$  kg avec  $1 \text{ kg} = 1 \text{ L}$  donc  $V = 75,48 \text{ L}$  et
$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{79,20}{75,42} = 1,050$$
- La densité :  $D = \frac{\rho}{\rho_{\text{eau}}} = \frac{1,050}{0,99296} = 1,0576$
- En tenant compte du volume d'air respiratoire et des gazes du tube digestif  $D = 1,0669$

49/117

## Mesure de la densité du corps entier : D

### 1. Hydrodensitométrie (4)



Recorded Data	
Wt in air =	79.20 kg
Water Temp =	38 °C
Water Density =	0.99296
Volume He added =	800 ml
Initial He Conc =	0.0769
Final He Conc =	0.0638
FRC =	2136 ml
ERV =	455 ml
RV =	1681 ml
Underwater Wt =	3.72 kg

REWIND    BACK    NEXT

TABLE OF CONTENTS

50/117

## Mesure de la densité du corps entier : D

### 2. Pléthysmographie (1)

- Mesure la densité :

$$D = \text{Masse} / \text{Volume}$$

- Utilise la loi de Boyle-Mriote :

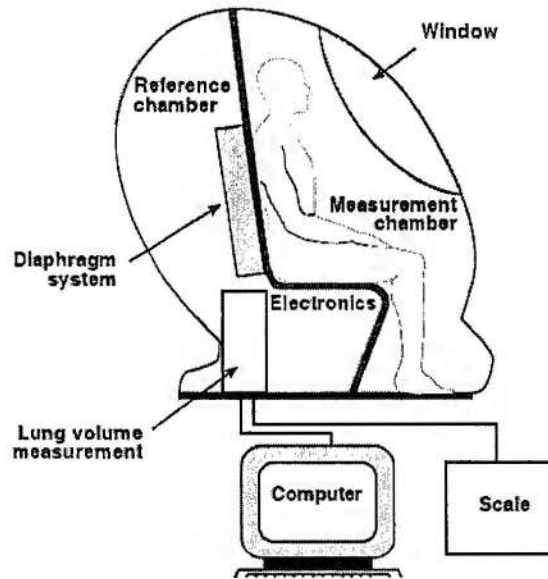
$$PV = \text{Constante}$$

- Le sujet est introduit dans une cabine de volume connu, la pression de la cabine varie proportionnellement au volume du sujet

50/117

## Mesure de la densité du corps entier : D

### 2. Pléthysmographie (2)



53/117

## Viscosité

### Définition

La viscosité d'un fluide peut se définir comme la propriété de résistance d'un fluide à l'écoulement. La viscosité peut donc être considérée comme le frottement interne qui résulte du glissement d'une couche de fluide sur une autre. Un liquide très visqueux est un liquide qui présente un frottement interne élevé.

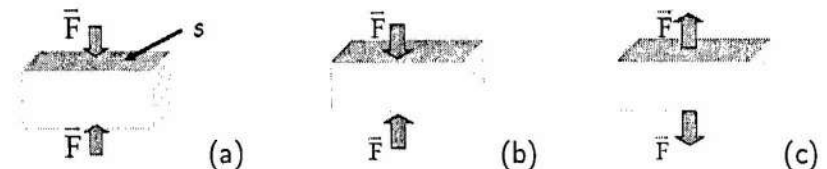
## Fluide parfait (ou idéal) et fluide réel

- Pour les fluides réels : glissement des molécules les unes sur les autres  $\Rightarrow$  frottements  $\Rightarrow$  VISCOSITE  $\Rightarrow$  écoulement avec dégagement de chaleur (avec perte de charge).
- Pour les fluides parfaits, on suppose qu'il n'y a pas de frottements moléculaires  $\Rightarrow$  VISCOSITE = 0  $\Rightarrow$  écoulement sans perte d'énergie (sans perte de charge).

54/117

## Notion de contrainte

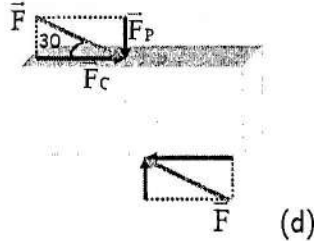
- Soit un solide ou un liquide de section  $S$  soumis de part et d'autre de  $S$  à une force  $F$  perpendiculaire à  $S$  :



- Contrainte (effort, pression) :  $\sigma = \frac{F}{S}$  (fig.a) Unité :  $N m^{-2}$  ou Pa. On distingue :
  - ▶ Contraintes de Pression (compression) : forces dirigées vers le corps solide ou liquide (fig.b) ;
  - ▶ Contraintes de Tension : forces dirigées vers l'extérieur (fig.c) ;

## Exemple : angle de 30 degré entre F et S

- Si  $F$  non perpendiculaire à  $S$  : 2 composantes élémentaires :



- ▶ Contraintes de Pression ou de Tension : perpendiculaire à  $S$  ;
- ▶ Contraintes de Cisaillement : tangentielle à  $S$ .

Dans la figure (d) on a :

- ▶ Composante pression :  $F_p = \sin(30) \cdot F$

$$\sigma = \frac{F}{2S}$$

- ▶ Composante cisaillement :  $F_c = \cos(30) \cdot F$

$$\sigma = \frac{\sqrt{3}F}{2S}$$

57/117

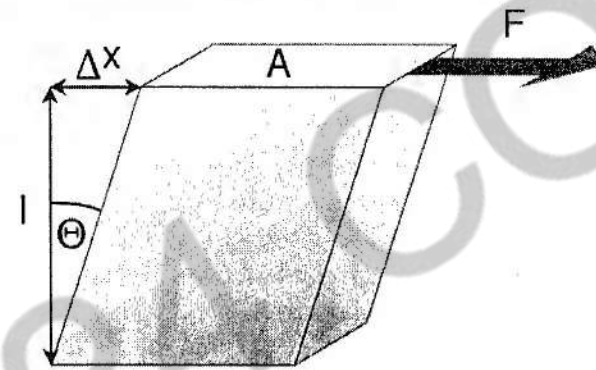
## Déformation d'un fluide : introduction



- Microscopiquement une déformation rapproche A-B et éloigne B-C des objets fluides.
- Ces objets étant en interactions les distances entre eux variant, ceci entraîne à l'échelle macroscopique l'apparition d'une contrainte.

58/117

## Schéma de principe du cisaillement d'un matériau (F est la force tangentielle à la surface A)



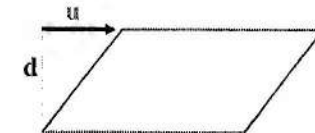
Une force  $F$  tangentielle (ou parallèle à la surface) est appliquée au sommet du carré original, tandis que le bas de ce même carré reste immobile. Le mouvement de la partie supérieure, résultant de la force initiale, crée une déformation du carré, le transformant ainsi en parallélogramme.

58/117

## Déformation simple



Structure initiale



Déformation  $\gamma = u/d$

- La déformation s'exprime comme une variation du déplacement dans l'espace :

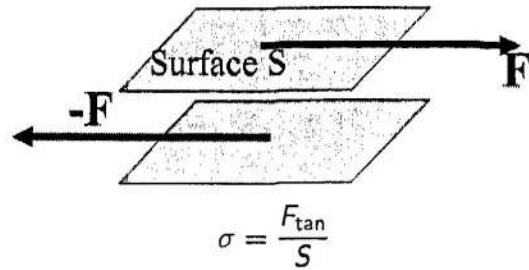
$$\gamma = \frac{u}{d}$$

- $u$  et  $d$  ont les dimensions d'une longueur ;
- $\gamma$  : sans dimension, c'est un nombre, on l'exprime parfois en %.

59/117

## Contrainte de cisaillement notée $\tau$ ou $\sigma$

- Pour exprimer "la force" exercée par le fluide, on utilise la **contrainte de cisaillement** (= effort de cisaillement, pression de cisaillement) qui est une force tangentielle par unité de surface



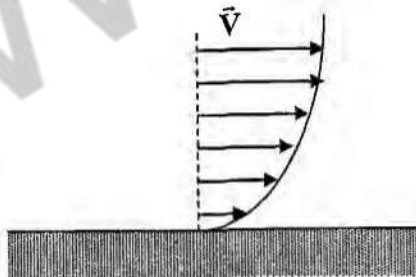
- ▶  $\sigma$  (lettre grecque « sigma ») est la contrainte de cisaillement, ou cission (pascals (Pa));
  - ▶  $F$  est la force tangentielle appliquée (newtons (N));
  - ▶  $S$  est l'aire de la section au droit de force ( $m^2$ ).
- L'unité de la contrainte est la même que l'unité de la pression, c'est le pascal;

61/117



## Fluides visqueux

- L'expérience montre que la vitesse du fluide diminue près de la paroi et s'annule sur la paroi.
- Dans le cas où la paroi est mobile, la vitesse du fluide est égale à celle de la paroi.



## Écoulement permanent ou stationnaire et écoulement uniforme

### Écoulement permanent ou stationnaire

L'écoulement du fluide est permanent ou stationnaire si ses composantes de vitesse sont indépendantes de la variable temps.

### Écoulement uniforme

L'écoulement du fluide est uniforme si ses composantes de vitesse sont indépendantes des coordonnées d'espace.

62/117



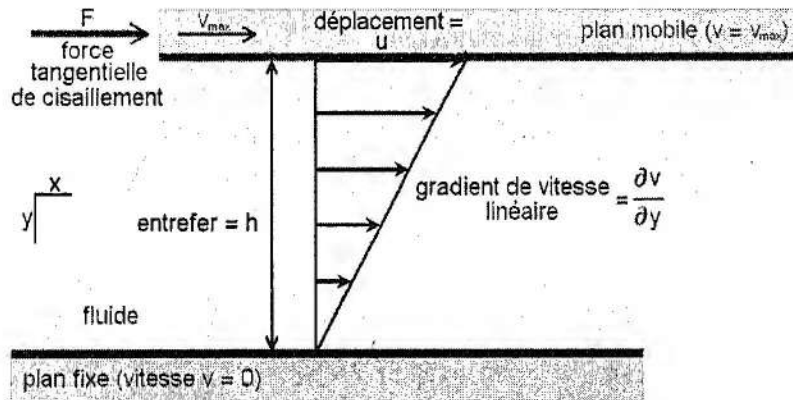
## Contrainte de cisaillement pour un fluide

- Pour tout fluide réel possédant une viscosité (exprimée en  $\text{Pa}\cdot\text{s} = \text{Poiseuille}$ ), il existe des contraintes de cisaillement;
- En effet, même si un fluide est en mouvement, il doit avoir une vitesse nulle dans la zone de contact avec des solides;
- Et toute différence de vitesse au sein d'un fluide visqueux entraîne des contraintes de cisaillement : les particules fluides allant plus vite sont freinées par celles allant moins vite ce qui crée un gradient de vitesse, plus souvent appelé taux de cisaillement;
- C'est d'ailleurs pour cela qu'il faut exercer une certaine force pour mettre un fluide en mouvement;
- Microscopiquement, on décompose un liquide en mouvement en des lames de fluide qui circulent parallèlement et à des vitesses différentes à cause des forces de frottement  $F$  :

$$F = \eta S \frac{dv}{dy}$$



Taux de cisaillement ou vitesse de cisaillement ou gradient de vitesse dans un écoulement stationnaire :  $(\dot{\gamma} = \frac{\partial v}{\partial y})$  I

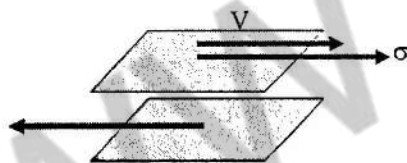


$$\dot{\gamma} = \frac{u}{h}$$

$$v_{max} = \frac{du}{dt}$$

### Viscosité dynamique I

#### Viscosité



- Lorsque l'on applique un taux de cisaillement constant dans le temps, de nombreux fluides répondent avec une **contrainte**  $\sigma = \frac{F_{\text{tan}}}{S}$  proportionnelle au **taux de cisaillement**.

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

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

Taux de cisaillement ou vitesse de cisaillement ou gradient de vitesse dans un écoulement stationnaire :  $(\dot{\gamma} = \frac{\partial v}{\partial y})$  II

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} = \frac{d}{dt} \left( \frac{u}{h} \right) = \frac{1}{h} \cdot \frac{du}{dt} = \frac{v_{max}}{h} = \frac{\partial v}{\partial y}$$

- $\frac{\partial v}{\partial y}$  : est la variation de vitesse perpendiculairement à la direction d'écoulement, on l'appelle aussi "gradient de vitesse" ou taux de cisaillement ;
- Son unité est l'unité de fréquence, elle s'exprime en  $s^{-1}$  ;
- Un taux de cisaillement de  $1 s^{-1}$  signifie qu'en une seconde, le système a été déformé d'une unité (ou de 100%).

### Viscosité dynamique II

- Le coefficient  $\eta$  est appelé **viscosité dynamique**, son unité est le **pascal.seconde** ( $Pa \cdot s$ ).
- Exemples de  $\eta$  :

Eau :  $\eta = 10^{-3} Pa \cdot s$

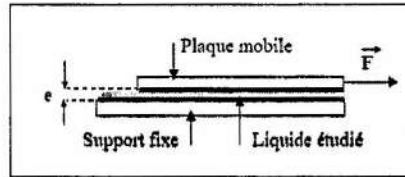
Plasma :  $\eta \simeq 1.510^{-3} Pa \cdot s$  (ou 1.5 cP)

Sang total (Ht : 40 à 45%) :  $\eta \simeq 3.210^{-3} Pa \cdot s$  (ou 3.2 cP)

## Viscosité dynamique : démonstration simple

Cette expérience de base peut être réalisée simplement en prenant du miel au de l'huile pour moteur

On met un fluide entre deux plaques (l'une fixe, l'autre mobile) et l'on étudie la force  $F$  qu'il faut appliquer pour déplacer la plaque mobile à une vitesse **constante**  $v$ . On fait varier l'épaisseur  $h$  de liquide et aussi la surface  $S$  de la plaque mobile.



- L'expérience montre que  $F$  est proportionnel à  $v$  et  $S$ , mais inversement proportionnel à l'épaisseur  $h$  du liquide. On peut traduire ces observations par une expression mathématique :

$$F = \eta \cdot S \frac{v}{h} \quad \text{et} \quad \sigma = \frac{F}{S} = \eta \dot{\gamma} = \eta \frac{v}{h}$$

- avec  $F$  en newton,  $S$  en  $m^2$ ,  $v$  en  $m \cdot s^{-1}$  et  $h$  en  $m$ .
- $\eta$  est le coefficient de viscosité dynamique.

69/117

◀ ▶

## Viscosité relative

On rencontre parfois le terme de viscosité relative : c'est un nombre sans dimension qui est définie par le rapport de la viscosité dynamique d'un fluide à la viscosité d'un fluide de référence :

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_0}$$

70/117

◀ ▶

## Variation de la viscosité avec la température et la pression :

- Pour les liquides, la viscosité dynamique diminue avec la température ;
- Pour les gaz, la viscosité augmente avec la température (à cause du nombre de chocs entre molécules qui augmente occasionnant un "frottement" plus important) ;
- La viscosité ne varie pratiquement pas avec la pression (jusqu'à environ 20 bars pour les gaz et 40 bars pour les liquides), ensuite elle augmente un peu avec la pression

## Viscosité cinématique

- Par définition la viscosité cinématique  $\nu$  (lire "nu") est le rapport de la viscosité dynamique par la masse volumique :

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

- L'unité SI de viscosité cinématique est le  $m^2 \cdot s^{-1}$  et n'a pas de nom spécifique.

## Liquides réels newtoniens et non newtoniens I

- En principe la viscosité est une caractéristique du liquide ;
- En réalité la viscosité varie avec la température, si la température augmente la viscosité diminue.

### Liquides newtoniens et non newtoniens

- Liquides newtoniens : la viscosité est constante à une température donnée. Ex : l'eau, le plasma...
- Liquides non newtoniens : la viscosité varie avec la température et le taux de cisaillement ! Ex : le sang car ce sont les globules rouges qui conditionnent les propriétés mécaniques : quand  $\frac{dv}{dy}$  diminue, il y a formation de rouleaux et  $\eta$  augmente.

73/117

## Particularités du sang : liquide non newtonien

- Le sang est une suspension de cellule dans une solution macromoléculaire (= le plasma. C'est un fluide non newtonien (car présence de globules rouges) ;
- Le Plasma est un fluide newtonien  $\eta = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$  ;
- L'hématocrite =  $\frac{\text{volume des cellules (GR)}}{\text{volume du sang total}} = 0,45$ .

75/117

## Liquides réels newtoniens et non newtoniens II

### Viscosité apparente

On définit la viscosité apparente comme la viscosité qu'aurait un fluide newtonien pour le débit et la pression d'un fluide non newtonien.

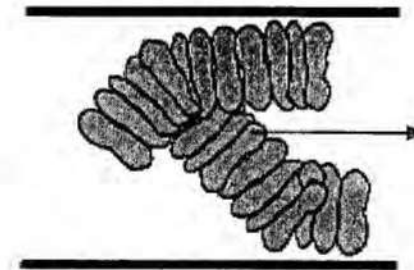
$$\text{Viscosité apparente du sang} = 4.10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s} \text{ à } 20^\circ\text{C}$$

Le sang est un liquide non newtonien et peut être en écoulement laminaire (physiologiquement) ou en écoulement turbulent (si vous mettez un garot autour de votre bras par exemple ou qu'un caillot bouche l'artère).

74/117

## Viscosité sanguine I

- La représentation de la viscosité apparente du sang en fonction de la vitesse de déformation lors d'expériences (cisaillement simple) met en évidence une viscosité élevée pour les faibles vitesses de déformation, due en grande partie à la formation de « rouleaux d'hématies ».

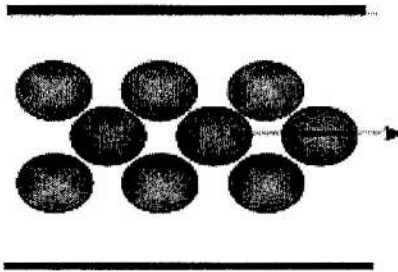


- Débit faible : formation de rouleaux. Dans ce cas, le taux de cisaillement diminue, ce qui entraîne une agrégation des GR et une augmentation de la viscosité.

76/117

## Viscosité sanguine II

- Débit élevé : circulation axiale.



Dans ce cas, le taux de cisaillement augmente ce qui entraîne une diminution de la viscosité. On appelle cela la rhéofluidification

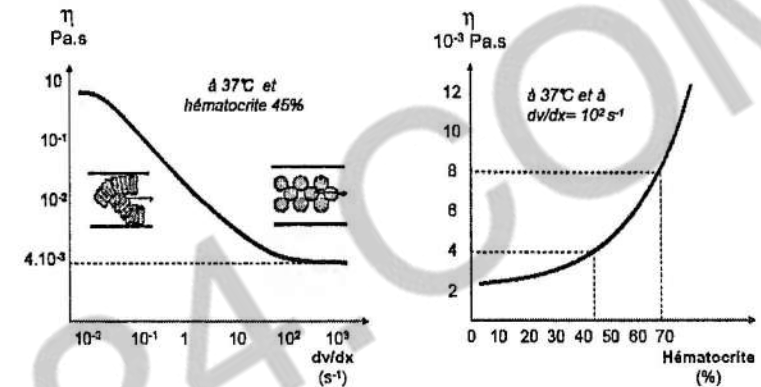
- Cette viscosité décroît rapidement pour devenir pratiquement constante pour des contraintes de cisaillement élevées.

77/117

Les principaux facteurs dont dépend la viscosité apparente du sang sont :

- la concentration en volume des cellules (paramètre à distinguer de la valeur classique de l'hématocrite) ;
- les propriétés mécaniques des hématies dont les principaux déterminants seront précisés plus loin ;
- la vitesse de déformation appliquée ;
- la viscosité du plasma, qui est elle-même fonction de la concentration et de la nature des protéines qu'il renferme, en particulier le fibrinogène et l'albumine dont les effets influent sur la formation des rouleaux.

## Viscosité sanguine III



- En fait, ce phénomène de viscosité élevée aux faibles vitesses de déformation ne sera important que dans des circonstances pathologiques à bas débits.

78/117

Dynamique des fluides

## Généralités sur l'écoulement des fluides

- En observant un petit morceau de bois emporté par un cours d'eau (ou par l'eau d'un caniveau), on distingue deux types d'écoulements :
  - ① L'écoulement laminaire (ou lamellaire) : Lorsque la vitesse n'est pas trop grande, le bout de bois emporté par le courant suit une trajectoire bien définie ; son mouvement est prédictible.
    - Si vous lâchez un autre bout de bois du même endroit, il décrira la même trajectoire que le premier bout de bois.
    - La trajectoire du bout de bois matérialise une "**ligne de courant**". Les lignes de courant sont les lignes suivies par un petit volume du fluide qui s'écoule.
  - ② L'écoulement turbulent : Observez maintenant le mouvement du bout de bois derrière un galet qui affleure (ou mettez le pied dans le cours d'eau). Les mouvements sont désordonnés et imprédictibles. L'écoulement est dit turbulent.

81/117

## Écoulement laminaire et écoulement turbulent II

- ▶ profil parabolique des vitesses.
- Écoulement turbulent : si vitesse d'écoulement élevée :
  - ▶ les molécules tourbillonnent à des vitesses différentes et sans direction précise ;
  - ▶ la vitesse moyenne diminue ;
  - ▶ les lignes se croisent.

82/117

## Écoulement laminaire et écoulement turbulent I

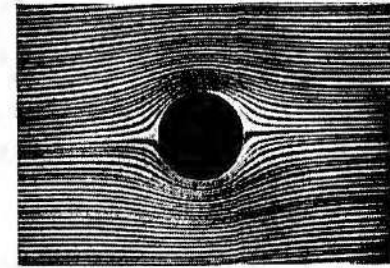


Figure: (a) Écoulement d'un fluide à la vitesse d'un millimètre par seconde autour d'un obstacle cylindrique.

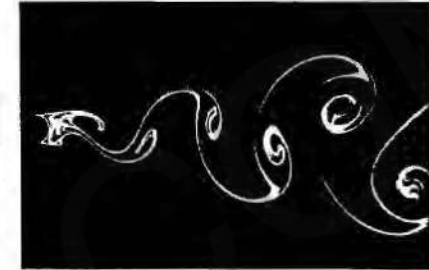


Figure: (b) Allée tourbillonnaire produite par un écoulement suffisamment rapide autour d'un obstacle cylindrique.

- Écoulement laminaire : si faible vitesse d'écoulement :
  - ▶ une couche très mince en contact avec la paroi ne se déplace pas ;
  - ▶ la vitesse est maximale au centre ;
  - ▶ les lignes de courant sont parallèles ;

82/117

## Écoulement laminaire et turbulent : nombre de Reynolds I

- Le nombre de Reynolds  $\mathfrak{R}$  est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides. Il a été mis en évidence en 1883 par Osborne Reynolds. Il caractérise un écoulement, en particulier la nature de son régime (laminaire, transitoire, turbulent).



84/117

## Ecoulement laminaire et turbulent : nombre de Reynolds II

- Lorsque un liquide s'écoule dans un tube, le type d'écoulement laminaire ou turbulent dépend du nombre de Reynolds (sans unité) :

$$\Re = \frac{vD}{\nu}$$

- $v$  : vitesse d'écoulement caractéristique du fluide [m/s]
- $D$  : Diamètre d'une conduite, ou la dimension d'un obstacle [m].
- $\nu$  : viscosité cinématique du fluide [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

avec :  $\nu = \frac{\eta}{\rho}$

- $\rho$  : masse volumique [ $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $\eta$  : viscosité dynamique
- $\eta$  ; viscosité dynamique du fluide [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$  ou  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ]  
ou poiseuille Pl]

85/117



## Application : écoulement laminaire et turbulent

- Un souffle cardiaque, ou souffle au cœur, est un bruit supplémentaire et anormal perçu à l'auscultation cardiaque. Il témoigne de l'existence de turbulences lors du passage du sang au travers d'une valvule ou d'une cloison intra-cardiaque. Par extension (et improprement) il est habituel d'englober également dans cette appellation les souffles vasculaires naissant dans la portion proche du cœur d'une artère ou d'une veine.
- Lorsqu'elles naissent au niveau des valves cardiaques, ces turbulences résultent habituellement soit d'un rétrécissement (sténose) soit d'une fuite (régurgitation valvulaire, insuffisance valvulaire), soit enfin de l'association des deux.
- L'anémie diminue la viscosité ( $\Re$  augmente) : souffle cardiaque systolique.
- La mesure de la pression artérielle par sphygmomanométrie est basée sur les turbulences du flux sanguin provoquées par le gonflement du brassard.

## Ecoulement laminaire et turbulent : nombre de Reynolds III

d'où la formulation classique :

$$\Re = \frac{\rho Dv}{\eta}$$

- Dans le système SI :
  - $\Re < 2000$  : Ecoulement toujours laminaire
  - $\Re > 4000$  : Ecoulement toujours turbulent
  - Pour  $2000 < \Re < 4000$ , on observe un régime de transition, où l'écoulement fluctue entre le régime laminaire et le régime turbulent.
- Attention aux unités / !

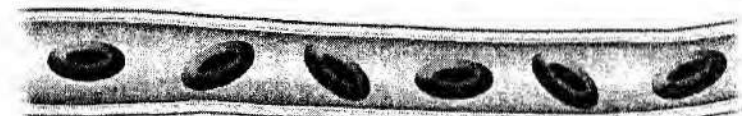
86/117



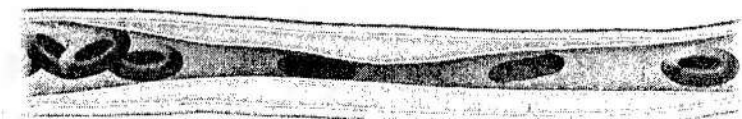
## Application à la plaque d'athérome

L'athérosclérose est une maladie (cause dominante de la majorité des affections cardiovasculaires) où le diamètre des artères diminue localement et progressivement par la formation d'une plaque d'athérome : accumulation de lipides et de tissu fibreux, pouvant conduire à une sténose artérielle, voire une thrombose (obstruction totale du flux sanguin qui peut donner une embolie, AVC, infarctus...).

Artère saine



Athérosclérose



## Application à l'artériosclérose (ou athérosclérose)

Mécanisme

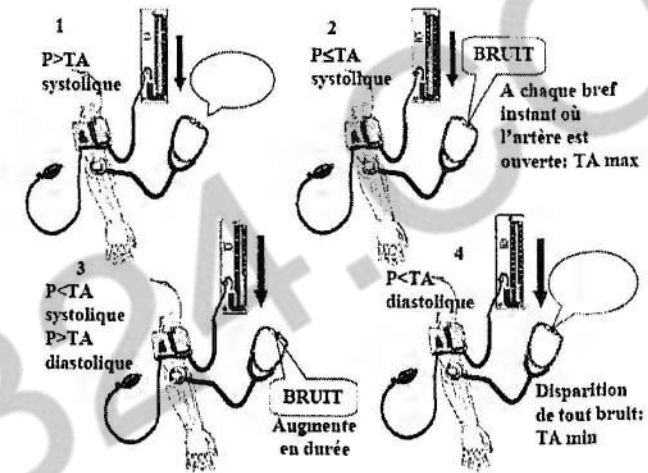
- Sans plaque d'athérome, la couche musculaire enrobant l'artère (la média) est suffisamment tonique pour réguler la pression et le débit sanguin (sans cela l'artère serait molle, flasque, et le sang ne serait pas « conduit » tout le long de l'artère);
- Lorsque la plaque d'athérome se forme, le flux sanguin est peu à peu obstrué : sténose artérielle  $\Rightarrow$  chute de tension par effet-Venturi à l'intérieur de la sténose
- la couche musculaire exerce toujours la même pression qu'à l'état normal, alors qu'à l'intérieur la pression a diminué  $\Rightarrow$  sous la pression externe, l'artère se ferme, le sang s'accumule;
- sous la poussée du sang accumulé, l'artère s'ouvre à nouveau, libérant violemment le sang : régime turbulent, le sang va dans tous les sens, « cognant » les parois de l'artère et engendrant un bruit audible à l'auscultation
- de nouveau, l'artère se ferme progressivement, puis s'ouvre, puis se referme...  $\Rightarrow$  on entend un souffle à l'auscultation.

89/117

## Mesure indirecte de la tension artérielle

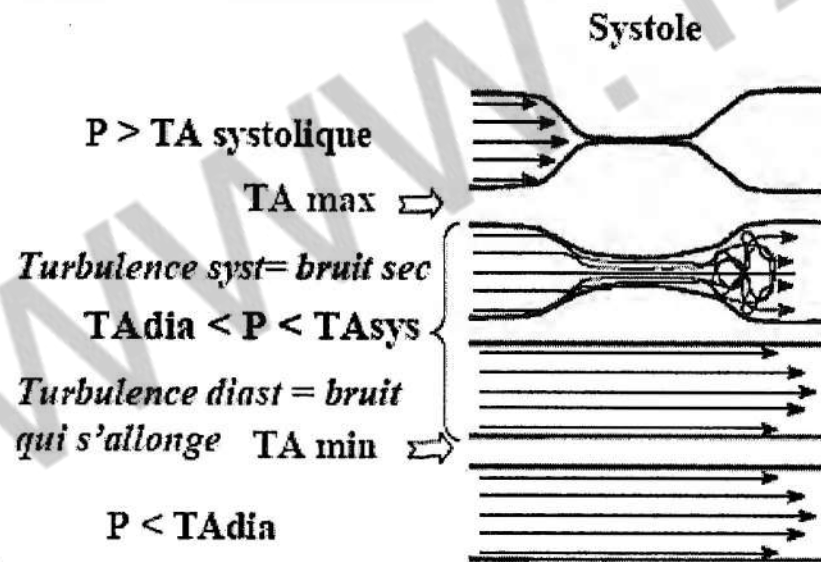
Basée sur la création artificielle d'une sténose par compression de l'artère humérale

P = Pression dans le brassard,



90/117

## Bruit de Korotkov



Dynamique des fluides parfaits

89/117

90/117

## Notion de débit ou flux

- Flux de liquide : débit liquide (canalisation) ou débit-volume ;
- Flux d'électrons : Intensité électrique (câble) ;
- Flux de photons :  $\simeq$  Intensité optique ;
- Flux de chaleur :  $\simeq$  puissance thermique.

### Définition du débit-volume $Q_v$

C'est le volume de fluide  $Q_v$  qui traverse une section  $S$  par unité de temps :

$$Q_v = \frac{dV}{dt}$$

et de dimension  $L^3 T^{-1}$ , l'unité est  $m^3 s^{-1}$ .

93/117

## Conservation de la matière, débit et vitesse d'un liquide II

Attention :  $v$  : vitesse et  $V$  : volume

- Les particules qui vont traverser  $S$  pendant le temps  $dt$  sont toutes celles situées en amont de  $S$  à une distance au plus égale à

$$dl = v \cdot dt$$

$$dV = S \cdot dl = Sv \cdot dt$$

$$Q_v = \frac{dV}{dt} = \frac{Sv \cdot dt}{dt} = S \cdot v$$

- 2 relations pour le débit :

$$Q_v = \frac{dV}{dt} = S \cdot v : \text{Unité } [S][v] = L^2 \times L \times T^{-1} = L^3 \cdot T^{-1}$$

- Le débit ( $Q_v$ ), la vitesse moyenne du liquide  $v$  et la section  $S$  de la canalisation sont reliés par la relation suivante :

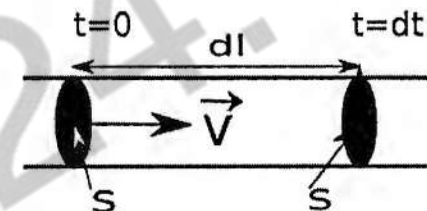
$$Q_v = v \cdot S$$

## Conservation de la matière, débit et vitesse d'un liquide I

Attention :  $v$  : vitesse et  $V$  : volume

- Par suite de la conservation de la matière entre deux points A et B d'un écoulement, les débits massiques sont identiques entre les deux points. En ajoutant l'hypothèse de fluide incompressible, on montre donc que les débits volumiques sont constants le long de l'écoulement.

$$Q_{mA} = Q_{mB} \Leftrightarrow \rho_A \cdot Q_{VA} = \rho_{VB} \Rightarrow Q_{VA} = Q_{VB} \text{ car } \rho_A = \rho_B$$



- Soit  $v$  la vitesse du fluide,

94/117

## Conservation de la matière, débit et vitesse d'un liquide III

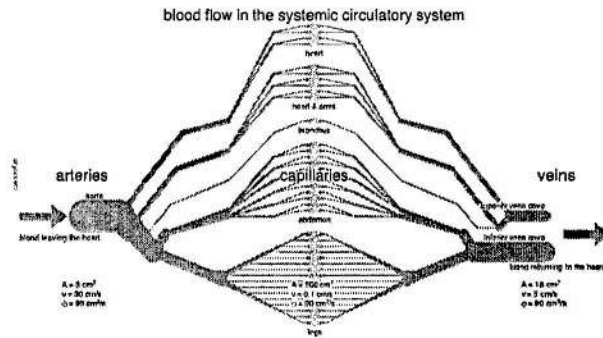
Attention :  $v$  : vitesse et  $V$  : volume

- Le débit volumique (ou massique) d'un liquide est identique en tous points d'une canalisation où le liquide circule. La canalisation peut présenter des différences de diamètres, le débit volumique sera toujours identique. Seule la vitesse du liquide va varier : elle augmente quand la section de canalisation diminue et inversement.



## Conservation du débit

- Le débit d'un fluide incompressible le long d'un tube se conserve : Le débit total arrivant sur un point est égal au débit sortant.



- de manière générale, si  $M$  canalisations incidentes ( $Q_{in}$ ) se divisent en  $N$  canalisations sortantes ( $Q_{out}$ ) :

$$\sum_{i=1}^M Q_{in,i} = \sum_{i=1}^N Q_{out,i}$$

97/117

## Loi de Bernoulli : On s'intéresse à l'énergie dans le cadre d'un liquide en écoulement I

- L'énergie interne est nécessairement proportionnelle au volume  $V$  du système considéré. Par définition, cette énergie volumique est la « pression »  $P$  : c'est donc la capacité du système à accumuler une énergie mécanique statique par son volume :  $E = PV$

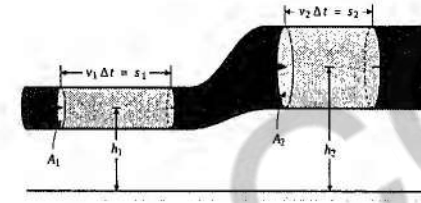
### Charge d'un liquide en un point

La charge d'un liquide en un point A d'une canalisation représente en fait l'idée de la quantité d'énergie "contenue" par un liquide en ce point. Cette énergie peut aussi s'exprimer en unité de pression ou en unité de longueur (hauteur de liquide circulant équivalente à la mesure de pression). Ainsi, une pression correspond à une énergie par unité de volume tandis qu'une longueur correspond à une énergie par unité de poids.

98/117

## Conservation du débit d'un fluide incompressible

Conservation du débit  $Q_{A1} = Q_{A2}$  malgré le changement de section



Conservation du débit  $Q_{A1} = Q_{A2}$   
relation débit-vitesse  $Q = S \cdot v$  }  $S_{A1} \cdot v_1 = S_{A2} \cdot v_2$

$$v_2 = v_1 \cdot \frac{S_{A1}}{S_{A2}} = v_1 \cdot \frac{\pi r_{A1}^2}{\pi r_{A2}^2} = v_1 \cdot \left( \frac{r_{A1}}{r_{A2}} \right)^2$$

$$r_{A1} < r_{A2} \Rightarrow \frac{r_{A1}}{r_{A2}} < 1 \Rightarrow \left( \frac{r_{A1}}{r_{A2}} \right)^2 \ll 1$$

donc  $v_2 < v_1 \Rightarrow$  La vitesse diminue quand le diamètre de la canalisation augmente

98/117

## Loi de Bernoulli : On s'intéresse à l'énergie dans le cadre d'un liquide en écoulement II

- Elle est composée de trois termes correspondant respectivement à l'énergie due aux forces de pression, à l'énergie potentielle et à l'énergie cinétique du liquide. On a donc les expressions suivantes :
- $E_c$  : E. cinétique, est possédée par un corps du fait de sa vitesse ;
- $E_p$  : E. potentiel est stockée avec l'interaction entre deux objets liés par une force conservatrice. A l'échelle macroscopique la formule la plus palpable est l' $E_p$  d'altitude, issue du travail fourni par une masse contre son poids.
- $E_{Pr}$  de pression statique :  $Pr = \frac{E}{V}$ ;  $E_{Pr} = Pr \cdot V$
- Soit une petite particule d'eau : Quelles sont les différents type (E) :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

$$E \text{ potentielle de pesanteur} = mgh$$

$$E \text{ liée à la pression} = P$$

$$E_T = \frac{1}{2}mv^2 + mgh + Pr V$$

100/117

## Loi de Bernoulli : Principe de conservation de l'énergie I

Au lieu de raisonner sur les masses par unité de volume, on va raisonner sur les énergies par unité de volume

$$\frac{\text{Energie}}{\text{Volume}} = P = \frac{F}{S}$$

donc :

$$P = \frac{E_T}{V}$$

$$P = \frac{E_T}{V} = \frac{1}{2} \frac{m}{V} v^2 + \frac{m}{V} gh + \frac{PV}{V}$$

$$P = \frac{E_T}{V} = \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh + P_r$$

$$P = E. \text{ volumique} = \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh + E. \text{ liée à la Pression}$$

- On considère les énergies volumique (énergie par unité de volume) :

$$E_c = \frac{1}{2} \rho v^2 : \text{Energie cinétique}$$

$$E_p = \rho gh : \text{Energie de pesanteur}$$

$$E_{p_r} = P_r : \text{pression (tout court) ou latérale ou transmurale ou statique}$$

$$\begin{aligned} [E_p] &= [\rho][g][h] \\ &= ML^{-3}[g]L = ML^{-2}[g] \end{aligned}$$

$$101/117 \quad E_{p_r} : [P] = \frac{[F]}{[S]} = \frac{M[g]}{L^2} = ML^{-2}[g]$$

## Loi de Daniel Bernoulli, 1738

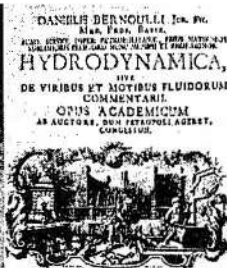
Energie totale = Cte pour un Liquide parfait (sans frottements)  $\eta = 0$

- $E_T = E_c + E_p + E_{p_r} = \text{Cte}$
- Pour un fluide parfait incompressible, l'énergie volumique totale se conserve :  $E_T = E_c + E_p + E_{p_r} = \text{Cte}$

$$E_{TA1} = E_{TA2}$$

$$P_{A1} + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_{A2} + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho gh_2$$

- L'énergie totale du fluide en mouvement est appelé charge.



## Loi de Bernoulli : Principe de conservation de l'énergie II

Au lieu de raisonner sur les masses par unité de volume, on va raisonner sur les énergies par unité de volume

- Unité de pression (Pa) :

$$P_A + \rho g h_A + \frac{\rho v_A^2}{2}$$

- Unité de longueur (m) :

$$\frac{P_A}{\rho \cdot g} + h_A + \frac{v_A^2}{2 \cdot g}$$

- L'expression en unité de longueur est appelée la hauteur manométrique en A  $h_A$  ou la charge totale du liquide en A (altitude de A (m) par rapport à un niveau zéro de référence)

102/117

## Conséquence de la loi de Bernoulli

1. Fluide au repos  $v = 0$  (loi de Pascal = cas particulier du théorème de Bernoulli) :

$$P + \rho gh = \text{Cte}$$

2. Écoulement considéré comme continu  $v = \text{cte}$  :

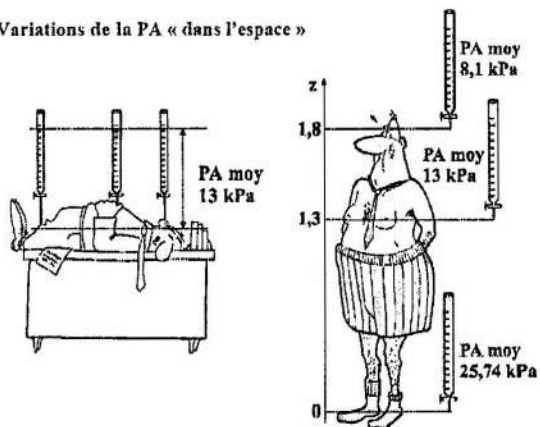
$$\rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 + P = \text{constante}$$

$$\rho gh + P = \text{constante} - \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{cte}$$

3. Variation de la Pression Artérielle (PA) avec la station debout et Bernoulli :(voir démonstration)

## Variation de la Pression Artérielle (PA) avec la station debout

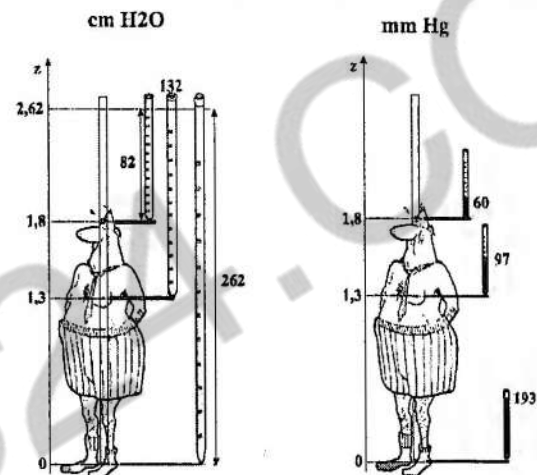
Variations de la PA « dans l'espace »



105/117

## Variation de la Pression Artérielle (PA) avec la station debout

PA selon le manomètre à colonne choisi (à Mercure ou à l'Eau)



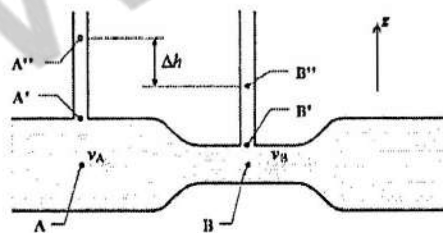
106/117

## Effet Venturi : Bernoulli simplifiée

Une dépression se crée là où le fluide s'écoule rapidement :  $\Delta P = -\frac{1}{2}\rho\Delta v^2$

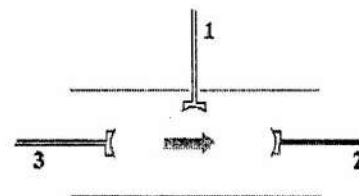
Soit un tuyau horizontal de section variable :

principe de Bernoulli



107/117

## Écoulement horizontal : Orientation des capteurs



- 1 : Pression latérale =  $P$
- 2 : Pression terminale = pression totale  $P_{ter} = P + \frac{1}{2}\rho v^2$
- 3 : Pression d'aval =  $P - \frac{1}{2}\rho v^2$ .

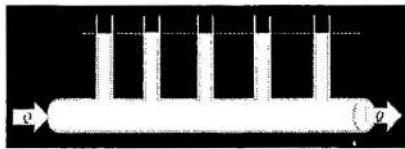
Application : Mesure de la pression artérielle en écoulement horizontal par cathétérisme. La pression terminale est plus facile à mesurer (capteur face au courant). Ce qui intéresse le cathétériseur, c'est la  $P$  latérale.

108/117

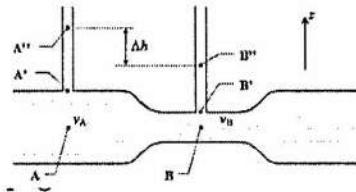
## Ecoulement d'un fluide parfait

Dans un écoulement d'un liquide parfait sans frottement dans un tube horizontal, l'énergie totale est conservée (loi de Bernoulli) :  $E_T = E_{vol} = \text{charge}$

$E_{TA} = E_{TB}$  et  $P_A + \frac{1}{2}\rho v_A^2 + \rho gh = P_B + \frac{1}{2}\rho v_B^2 + \rho gh$   
 -  $h = \text{Cte} \Rightarrow \rho gh = \text{Cte} \Rightarrow P + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{Cte}$  - Section diminue  $\Rightarrow v$  augmente  
 $\frac{1}{2}\rho v^2 = \text{Cte}$  et comme la section  $\Rightarrow \frac{1}{2}\rho v^2$  augmente donc  $P$  diminue  
 Cte et donc  $P = \text{Cte}$  : donc  $\frac{1}{2}\rho v^2 = \text{minue}$  :

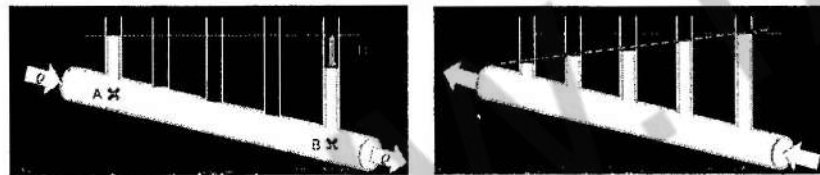


charge Bernoulli



109/117

## Ecoulement d'un fluide réel



$$P_A + \frac{1}{2}\rho v_A^2 + \rho g z_A = P_B + \frac{1}{2}\rho v_B^2 + \rho g z_B + \Pi$$

$$P_B = P_A + \rho g(z_A - z_B) - \Pi$$

$$\frac{P_B}{\rho} g = \frac{P_A}{\rho} g + z_A - z_B - \frac{\Pi}{\rho g}$$

D'après la loi de l'hydrostatique  $P = \rho gh$  :

$$h_B = h_A + z_A - z_B - \frac{\Pi}{\rho g}$$

## Ecoulement d'un fluide réel : perte de charge

- Dans le cas d'un liquide réel il y a une perte de l'énergie utilisable lors de l'écoulement (= perte de charge) liée à la dissipation d'énergie en chaleur du fait de la viscosité du liquide. L'énergie totale  $E_T$  ne se conserve pas :

$$E_{TA} > E_{TB}$$

$$E_{TA} = E_{TB} + \Pi$$

$\Pi$  : Energie perdue = perte de charge

- Si diamètre = ct  $\Rightarrow$  vitesse = cte  $\Rightarrow$  Energie cinétique = cte et  $h = \text{cte}$ , alors ce qui varie c'est la pression entre A et B

$$E_{TA} = E_{TB} + \Pi$$

$$P_A + \frac{1}{2}\rho v_A^2 + \rho gh = P_B + \frac{1}{2}\rho v_B^2 + \rho gh + \Pi$$

$$P_A = P_B + \Pi$$

$$\Pi = P_A - P_B = \Delta P$$

- $\Pi = \Delta P$  : Perte de charge entre A et B (= unité de pression)

110/117

## Loi de Poiseuille : l'énergie totale n'est pas conservée : il y a une perte de charge

(Jean-Léonard-Marie Poiseuille, 1779-1869)

- Entre A et B il y a une perte de charge  $\Pi = \Delta P$  pour un débit moyen  $Q$

$$\Pi = R_p \cdot Q$$

- Le débit  $Q$  et la perte de charge sont proportionnelles = Loi de Poiseuille.  $R_p$  : résistance de Poiseuille.

$$\Delta P = R_p \cdot Q$$

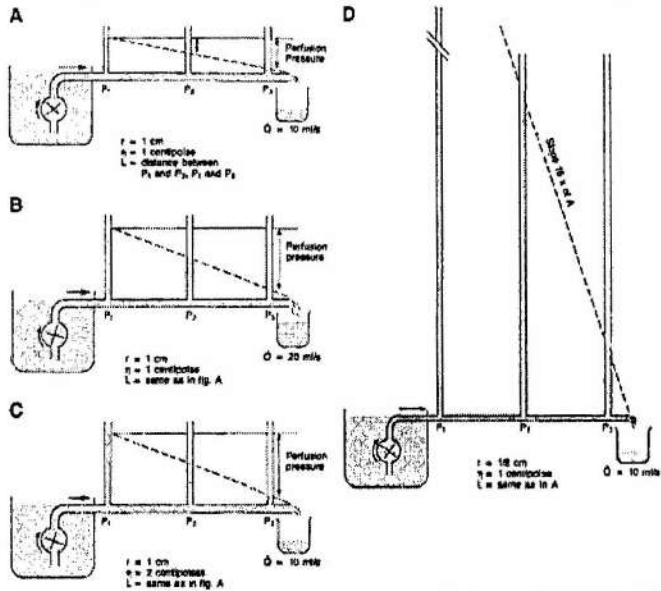
$$R_p = \frac{8\eta l}{\pi r^4}$$

Valable qu'en régime



# Loi de poiseuille

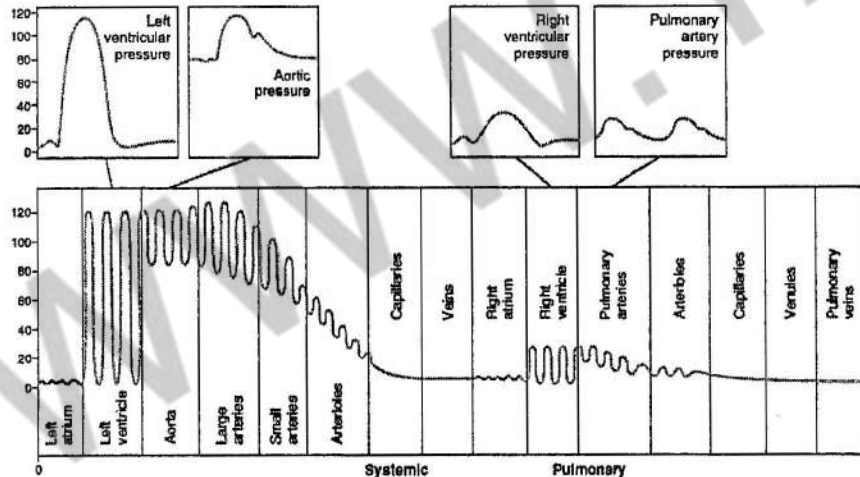
Démonstration empirique : expériences de Poiseuille



113/117

# Conséquences de la loi de poiseuille

Pressions le long du circuit vasculaire systémique



Normal blood pressures in the different portions of the circulatory system when a person is lying in the horizontal position.

115/117

# Calculs des pertes de charges

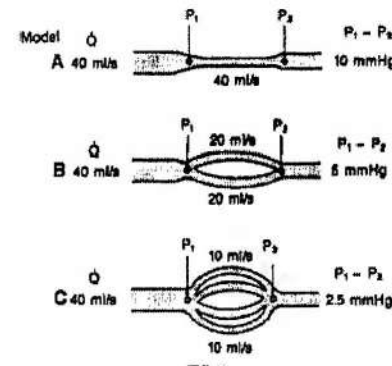
Expérimentalement on constate que les pertes de charge générales dépendent des éléments suivants :

- longueur de la canalisation : la perte de charge est logiquement directement proportionnelle à la longueur de la canalisation : elle augmente quand la longueur de canalisation augmente.
- viscosité du liquide : plus le liquide est visqueux, plus les frottements donc la perte de charge augmente.
- diamètre intérieur : quand le diamètre diminue, la perte de charge augmente considérablement. Le liquide a plus de difficultés à s'écouler donc les frottements augmentent pour un débit identique.
- débit : plus le débit augmente, plus les forces de frottements augmentent pour un diamètre identique.
- rugosité de la canalisation : la rugosité correspond à la notion habituelle de présence plus ou moins importante d'aspérités sur une surface. On constate ici que lorsque la rugosité d'une canalisation augmente les frottements seront plus nombreux donc la perte de charge augmentera. La perte de charge est donc fonction du matériau de la canalisation.

114/117

# Conséquences de la loi de poiseuille

Combinaison des résistances à l'écoulement



$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}$$

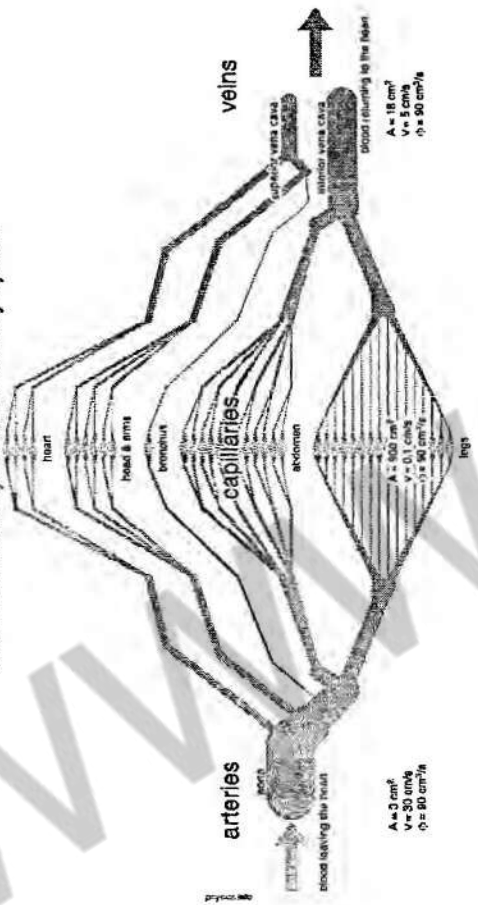
Si  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$   
alors

$$R_T = \frac{R_1}{4}$$

FIG. 5. Other things being equal (Q, diameter, L and η), viscous flow pressure gradients vary inversely with the number of "parallel" tubes (reproduced, with permission, from H. K. Bader and D. H. Petzel, *Am J Nephrol* 15: 99, 1995).

116/117

blood flow in the systemic circulatory system



WWW.TALIB24