

# Module de Biophysique

2<sup>ème</sup> année de médecine

Faculté de Médecine

Site de ZIANIA - UNIVERSITE ALGER 1

e-mail : [biophysique\\_facmed-alger@hotmail.com](mailto:biophysique_facmed-alger@hotmail.com)

## Partie A : notions et éléments de BIOPHYSIQUE DE LA CIRCULATION

Professeur M. CHEREF



# **Biomécanique des fluides (1)**

Introduction et définitions



# Notion d'états physiques (1)

FORCES D'ATTRACTION  
ENTRE PARTICULES



ATTRACTION

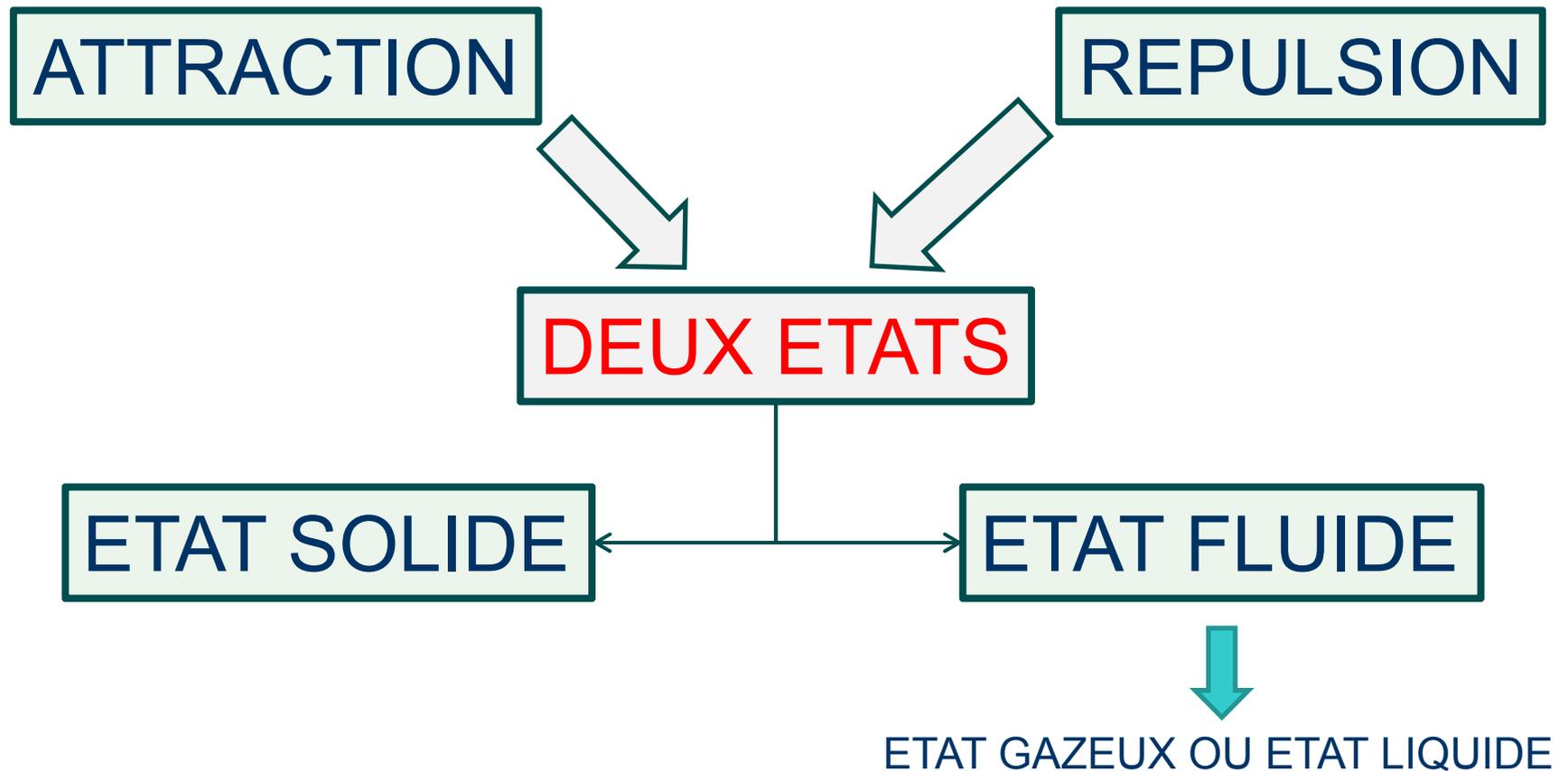
AGITATION THERMIQUE  
FORCES DE REPULSION  
INTERMOLECULAIRES



REPULSION

ETAT DE LA MATIERE

## Notion d'états physiques (2)



# **Biomécanique des fluides (2)**

Rappel de quelques  
notions de base



# Masse volumique $\rho$

La masse volumique  $\rho$  exprime le rapport de la masse  $m$  d'un corps rapporté à son volume  $V$

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$\rho$  s'exprime dans le système SI (MKSA) en  $\text{kg/m}^3$

# Volume massique $V_m$



Le volume massique  $V_m$  exprime le rapport du volume d'un corps rapporté à sa masse  $m$

$$V_m = \frac{V}{m}$$

$V_m$  s'exprime dans le système SI (MKSA) en  $\text{m}^3/\text{kg}$



$V_m$  est l'inverse de  $\rho$

peut être utilisée pour exprimer la compressibilité des matériaux polymères (dépendance vis-à-vis de la température et de la pression)

# Poids volumique $\gamma$

Le poids volumique (ou spécifique) exprime le rapport du poids  $P$  d'un corps rapporté à son volume  $V$

$$\gamma = \frac{P}{V} = \frac{m \cdot g}{V} = \rho \cdot g$$

$\gamma$  s'exprime dans le système SI (MKSA) en  $\text{N/m}^3$



$\rho$  est la masse volumique du corps et «  $g$  » traduit la gravité  
le poids volumique  $P$  dépend de «  $g$  », souvent assimilée à  $9,81 \text{ m/s}^2$

# Densité d

La densité  $d$  d'un corps exprime le rapport de la masse volumique  $\rho$  de ce corps vis-à-vis de la masse volumique d'un corps de référence  $\rho_F$

$$d = \frac{\rho}{\rho_F}$$



$d > 1$  : le corps étudié est plus lourd que le corps de référence  
 $d < 1$  : le corps étudié est plus léger que le corps de référence  
le corps de référence est souvent l'eau ( $\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ )

# **Biomécanique des fluides (3)**

Notions fondamentales



# Mécanique des fluides : définition (1)

dans le cadre de la Théorie de la Mécanique des Milieux Continus,

la Mécanique des fluides constitue une extension de la Mécanique Rationnelle à une catégorie particulière de systèmes déformables,

LES FLUIDES,

dont les propriétés essentielles sont d'exhiber des valeurs de déformation aussi grandes que l'on veut (en d'autres termes d'être continus et de pouvoir s'écouler).

# Notion de « Particule fluide »

## Définition :

Soit une masse déterminée d'un fluide occupant un volume bien défini. Chaque élément de volume (surface fermée infiniment petite) de ce fluide, appelé « particule fluide », est dit macroscopiquement petit.

Cet élément , ou « particule fluide », se caractérise :

I- du point de vue de la cinématique (définis tous deux par rapport à un référentiel galiléen ou non) :

- par sa vitesse
- par son accélération

II- du point de vue dynamique :

- par une masse élémentaire

# Notion de contrainte $\sigma$

## Définition :

Soit une « particule fluide » de surface fermée  $dS$  (et sa normale orientée  $\vec{n}$ ) au sein d'un volume  $V$  de fluide, soumise à une force résultante  $d\vec{F}$  (sur toute la surface  $S$  délimitant le volume  $V$ , le milieu extérieur exerce une action qui se traduit localement par une force  $d\vec{F}$  )

La contrainte  $\vec{\sigma}$  s'écrit comme la limite du rapport  $\frac{d\vec{F}}{dS}$  quand  $dS$  tend vers 0:

ou encore 
$$\vec{\sigma} = \lim_{dS \rightarrow 0} \left[ \frac{d\vec{F}}{dS} \right]$$

# Notion de pression P

## Définition :

Soit une « particule fluide » de surface fermée  $dS$  (et sa normale orientée  $\vec{n}$ ) au sein d'un volume  $V$  de fluide, soumise à une force résultante  $d\vec{F}$  (sur toute la surface  $S$  délimitant le volume  $V$ , le milieu extérieur exerce une action qui se traduit localement par une force  $d\vec{F}$  )

La contrainte de pression (ou tout simplement pression)  $\vec{\sigma}_n$  est définie comme la composante de la contrainte  $\vec{\sigma}$  dans la direction normale à la surface  $dS$ .

$\vec{\sigma}_n$  (plus simplement indiquée  $P$ ) s'exprime comme :

$$P = \left\| \frac{d\vec{F}}{dS} \right\| \quad \text{et plus simplement} \quad P = \frac{F}{S}$$

L'unité de la pression est le Pa dans le système SI ( MKSA)  
[1 Pa = 1 N/mm<sup>2</sup> ; 1 bar = 10<sup>5</sup> Pa ; 1 bar = 1 daN/cm<sup>2</sup>]

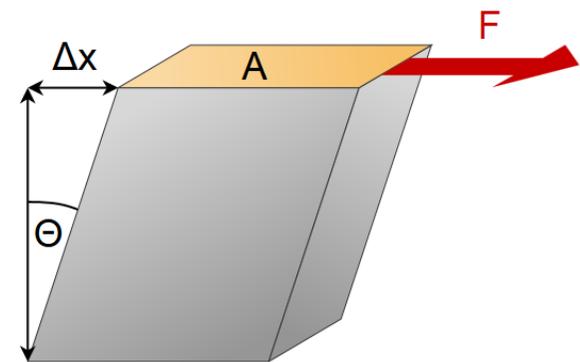
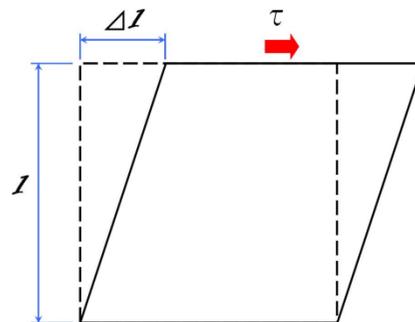
# Notion de cisaillement

## Définition :

Il s'agit d'une contrainte appliquée de manière parallèle ou tangentielle, par opposition à la contrainte dite normale (pression) à la surface  $dS$ .

Sans qu'il soit nécessaire de s'étendre sur cette notion, il semble opportun de la définir, en raison de son rôle comme facteur de diagnostic par exemple : un fort taux de cisaillement au niveau de parois vasculaires peut donner des indications précieuses quant à une éventuelle pathologie.

Visualisation du cisaillement



# Notion de compressibilité

## Définition :

La notion de compressibilité est directement liée à la notion de masse volumique  $\rho = dm/dv$ .

Si celle-ci est constante, on dira que le fluide est incompressible.

Dans le cas contraire, le fluide est dit compressible.



les gaz : compressibles et expansibles

les liquides : souvent considérés comme peu compressibles, voire incompressibles

# Notion de viscosité

## Définition :

Dans le cas de fluides réels, une « particule fluide » en mouvement engendre les effets suivants :

- a- Le mouvement de celle-ci se communique de proche en proche aux régions voisines.
- b- Le mouvement s'affaiblit progressivement si l'on cesse de l'entretenir.

Un liquide réel est donc le siège de frottements internes. On leur donne le nom de viscosité :

si celle-ci est constante, on dira que le fluide est incompressible

dans le cas contraire, le fluide est dit compressible.

# Notions de Fluide : caractérisation (1)



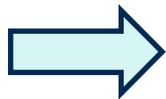
# Notions de Fluide : caractérisation (5)

## Un Fluide réel incompressible

Son volume est indépendant de la pression mais il varie avec la température (dilatation). Pour un liquide à une température donnée, il n'existe qu'une seule masse volumique  $\rho$ . c'est l'image abstraite d'un liquide.

## Un Fluide réel compressible

Son volume varie avec la pression et la température. Pour définir sa masse volumique, il faudra préciser sa température et sa pression. C'est l'image abstraite d'un gaz.



La notion d'incompressibilité au sens rigoureux du terme renvoie à la notion de fluide parfait

# Hydrostatique

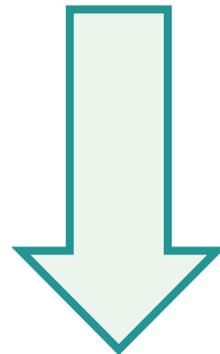
Statique des fluides incompressibles

caractérisation



# Caractérisation : mode d'expression

RELATION FONDAMENTALE DE LA DYNAMIQUE



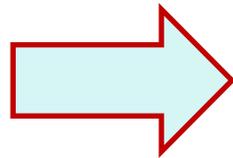
EXPRESSION DE L'EQUILIBRE  
DE CHACUNE DES PARTICULES FLUIDES

LA SOMME DES FORCES APPLIQUEES EST NULLE

# Caractérisation : équation générale (1)

RELATION FONDAMENTALE DE LA DYNAMIQUE

SOMME DES FORCES APPLIQUEES EST NULLE



$$\text{grad } P = \rho \vec{g}$$

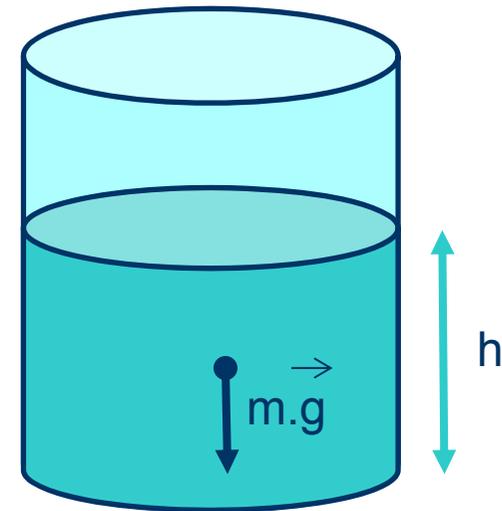
Remarque :

Cette équation exprime la pression en un point d'un fluide en équilibre : la pression  $P$  en un point d'un fluide en équilibre ne dépend que de la hauteur du fluide au dessus du point considéré et de sa masse volumique

# Caractérisation : équation générale (3)

## EXPLICITATION (1)

Pression partielle : exemple simple



### Remarque :

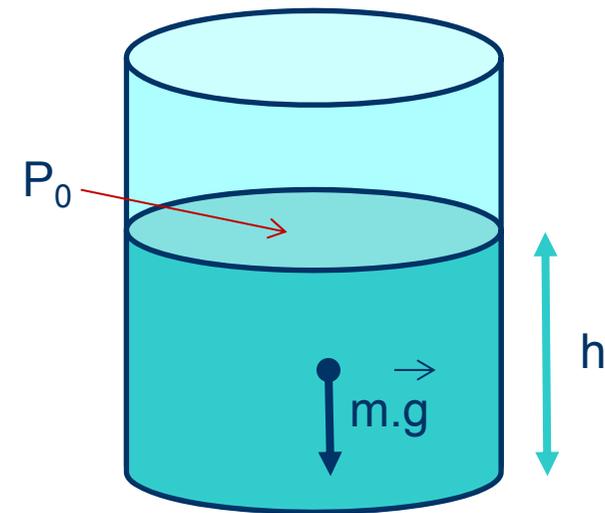
soit un récipient à fond plat de section  $S$ , rempli d'un fluide incompressible de masse volumique  $\rho$  et de hauteur  $h$  par rapport au fond du récipient.

La pression  $P$  (partielle) exercée par ce liquide ne dépend que de  $\rho$ ,  $h$ , et  $g$ , mais aucunement de la section du récipient.

# Caractérisation : équation générale (4)

## EXPLICITATION (2)

Pression totale : exemple simple



### Remarque :

soit un récipient à fond plat de section  $S$ , rempli d'un fluide incompressible de masse volumique  $\rho$  et de hauteur  $h$  par rapport au fond du récipient.

La pression  $P_T$  totale que subit le fond du récipient correspond à celle exercée par ce liquide et celle caractérisée par  $P_0$  :

$$P_T = \rho \cdot g \cdot h + P_0$$

# Equation générale : propriétés

1- en chaque point M d'un fluide, il existe une pression hydrostatique s'exerçant dans toutes les directions.

2- la pression est la même en tout point de même côte  $z$  (suivant l'axe  $z$ ) d'un fluide continu homogène.

Les surfaces isobares et les surfaces équipotentiels de pesanteur sont confondues.

Aussi, la surface libre d'un liquide en équilibre définit localement un plan horizontal (référentiel galiléen).

3- dans un liquide incompressible de masse volumique  $\rho$ , en équilibre, la différence de pression  $\Delta P$  entre deux points A et B est égale au poids d'une colonne de ce liquide, de section unité, dont la hauteur est égale à la différence d'altitude  $h$  entre A et B

Plus simplement :

$$\Delta P = \rho g h$$

# Equation générale : remarques

## Remarque 1 :

Il est indispensable de ne pas oublier l'orientation de l'axe  $z$ , par habitude on écrit la valeur absolue  $h$  de la différence d'altitude entre la cote A et la cote B.

Mais ne pas tenir compte de l'orientation de cet axe peut amener à des absurdités. En clair, il faut retenir l'équation fondamentale de la statique. Le reste n'est que déduction.

## Remarque 2 :

Soient deux points A de cote  $z_A$  et B de cote  $z_B$  d'un même liquide. Si la pression  $P_A$  au point A varie de  $\Delta P$ , alors la pression  $P_B$  au point B variera de  $\Delta P$ . On dit que les liquides transmettent intégralement les variations de pression.

Aussi, la pression va t- elle augmenter avec la profondeur d'une quantité égale à :

$$\Delta P = \rho g(z_A - z_B) = \rho g \Delta z = \rho g h$$

## Remarque 3 :

Surface de séparation de deux liquides non miscibles : La surface de contact entre deux liquides non miscibles au repos est plane.

# Principe de Pascal : caractérisation (4)

## Définition (Blaise PASCAL, 1651)

une pression appliquée à un fluide confiné à l'intérieur d'un récipient fermé est transmise intégralement à travers tout le fluide

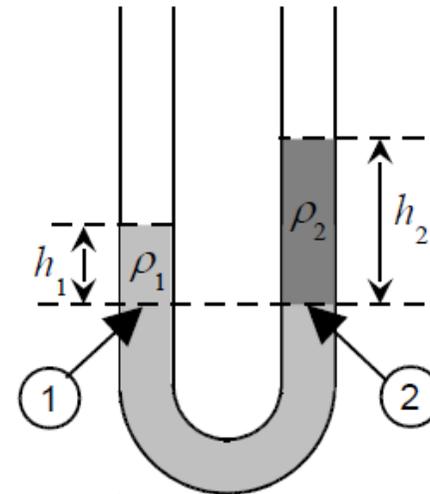
### Remarque :

- 1- le principe de PASCAL explicite la montée égale du liquide dans les quatre tubes. Cette montée de liquide correspond à la pression supplémentaire exercée à l'aide de la poire.
- 2- autre manière de caractériser le principe de PASCAL : dans un liquide incompressible en équilibre, toute variation de pression se transmet intégralement dans toutes les directions.

# Principe de Pascal : application

## Définition (Blaise PASCAL)

Soit un tube en U rempli de deux liquides non miscibles



### Remarque :

1- selon le principe de PASCAL, les pressions mesurées aux points 1 et 2 sont égales.

2- traduction mathématique de cette réalité physique :

$$\rho_1 \cdot g \cdot h_1 + P_{\text{surface 1}} = \rho_2 \cdot g \cdot h_2 + P_{\text{surface 2}}$$

# Principe d'Archimède – Flottabilité (1)

## Notion de poids apparent vis-à-vis du poids réel

### Explicitation :

- 1- soit un corps de masse volumique  $\rho$  immergé dans un fluide (liquide ou gaz) de masse volumique  $\rho_e$ .
- 2- ce corps se caractérise par un poids apparent qui tient compte du volume de fluide déplacé, correspondant au volume du corps considéré.
- 3- trois cas se présentent alors :
  - $\rho < \rho_e$  : la force résultante est orientée vers le haut  
le corps va flotter sur ce liquide (tout en étant partiellement immergé)
  - $\rho > \rho_e$  : la force résultante est orientée vers le bas  
le corps migre vers le bas (compte tenu de la gravité)
  - $\rho = \rho_e$  : la force dite d'Archimède équilibre parfaitement le poids  $P$ . Le corps reste en équilibre dans le fluide en étant entièrement immergé.

# Principe d'Archimède – Flottabilité (2)

## Formulation du principe d'Archimède :

« Tout corps plongé dans un fluide au repos subit une force (dite poussée) ascendante (verticale) de norme égale au poids du volume de fluide déplacé (égal au volume immergé du corps) »

## Traduction mathématique : équation qui régit le principe d'Archimède

dans un champ de pesanteur uniforme, l'expression de la force d'Archimède  $\vec{F}_A$  s'écrit (la norme  $F_A$ ) :

$$F_A = \rho_e \cdot V_i \cdot g$$

# Hydrodynamique

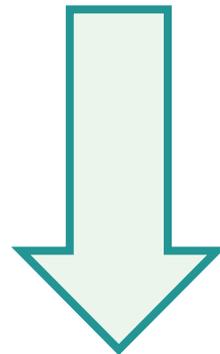
fluides incompressibles en mouvement

caractérisation



# Caractérisation : mode d'expression (1)

RELATION FONDAMENTALE DE LA DYNAMIQUE



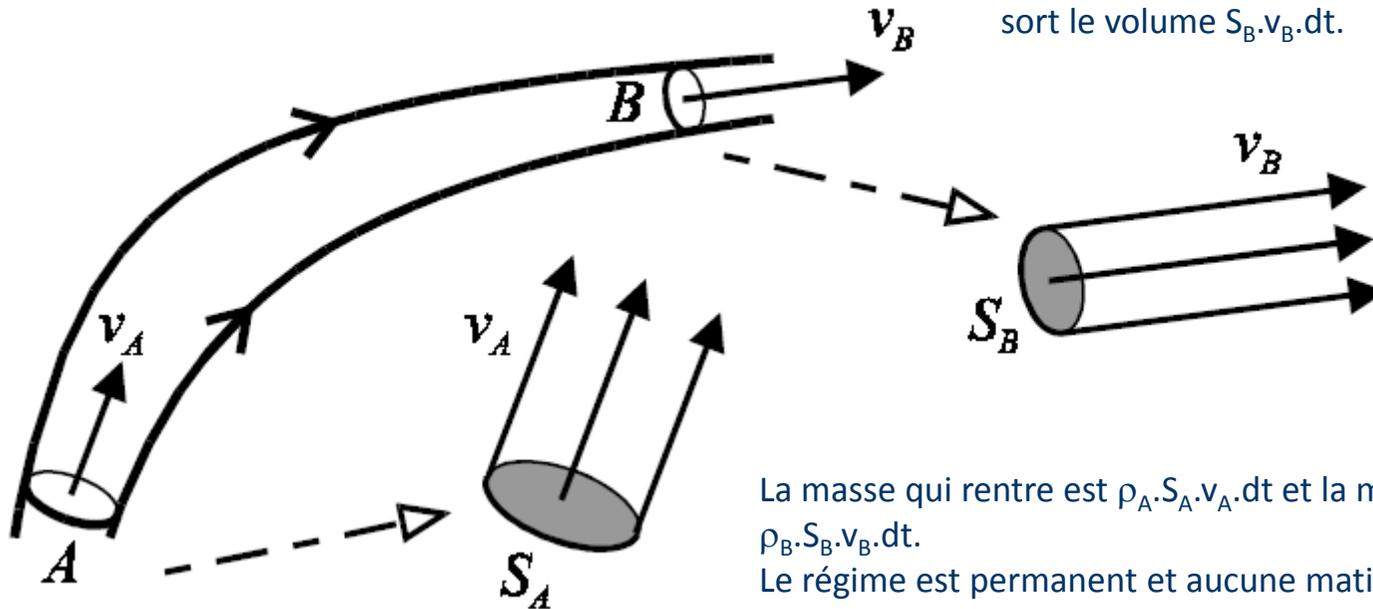
EXPRESSION DE L'EQUATION DE CONTINUITÉ

PRINCIPE DE CONSERVATION DE L'ENERGIE

# Caractérisation : mode d'expression (2)

## Tube élémentaire de courant (fluide parfait)

conservation du débit massique  $Q_m$



Les sections droites A et B d'aires  $S_A$  et  $S_B$ .  
Les vitesses en A et B sont  $v_A$  et  $v_B$ . Pendant le temps  $dt$ , le volume  $S_A \cdot v_A \cdot dt$  entre dans le tube élémentaire et dans le même temps sort le volume  $S_B \cdot v_B \cdot dt$ .

La masse qui rentre est  $\rho_A \cdot S_A \cdot v_A \cdot dt$  et la masse qui sort est  $\rho_B \cdot S_B \cdot v_B \cdot dt$ .

Le régime est permanent et aucune matière ne traverse la surface latérale

La masse du fluide est donc constante entre A et B. il est possible d'écrire alors :  $\rho_A \cdot S_A \cdot v_A \cdot dt = \rho_B \cdot S_B \cdot v_B \cdot dt$ .

# Caractérisation : mode d'expression (5)

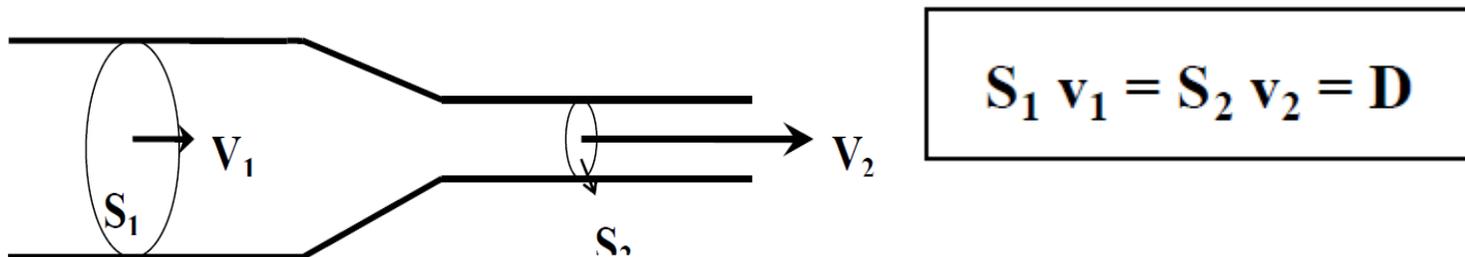
## Remarques

- Le mouvement d'un liquide dit idéal dans un conduit de section  $S$ , caractérisé par un débit  $D$  et une vitesse  $v$  de déplacement de ce fluide permet d'écrire :

$$D = v.S$$

Le débit  $D$  s'exprime en  $m^3/s$  en unités du système international. Cette unité est malgré tout inadaptée dans le cadre de son utilisation en médecine. On lui préfère d'autres unités (exemple du litre ou du millilitre par minute)

- Dans un circuit tel que celui représenté précédemment (dont la section évolue le long de la conduite), la vitesse varie également mais le débit est nécessairement constant (le tube est rigide et indéformable), respectant ainsi l'équation de continuité et qui s'exprime comme :



# Conservation de l'énergie mécanique (1)

## Caractérisation

- Soit un liquide en mouvement. Celui-ci possède trois formes d'énergie liées respectivement à la pression, l'altitude (la hauteur à laquelle il est situé par rapport à un référentiel donnée), et à la vitesse. Les deux premières caractérisent l'énergie potentielle de la particule fluide considérée alors que la troisième exprime l'énergie cinétique de celle-ci.

L'expression de ces énergies se caractérise en unités de pression (tenant compte des énergies respectives par unité de volume).

### Energie potentielle

l'énergie liée à la pression :  $E_{p1} = p$

l'énergie liée à l'altitude :  $E_{p2} = \rho g z$

### Energie cinétique

$$E_c = 1/2 \rho v^2$$

### Remarque

La particule fluide de volume  $dV$  possède la masse  $dm$ . L'expression de l'énergie cinétique (par unité de volume est donc :  $E_c = 1/2 \rho v^2$

# Conservation de l'énergie mécanique (2)

ENERGIE MECANIQUE TOTALE  $E_{mec}$



$$E_{mec} = p + \rho g z + \frac{1}{2} \rho v^2$$

## Remarque

Les deux premiers termes du deuxième membre de cette équation caractérisent l'énergie potentielle

# Conservation de l'énergie mécanique (4)

## Théorème de BERNOULLI

- Par ce théorème, il est possible d'exprimer la conservation de l'énergie mécanique totale de la particule fluide considérée :

L'énergie mécanique totale d'une particule fluide (d'un fluide dit parfait) est constante dans un tube de courant pour lequel le débit est constant au cours du temps.

$$E_{\text{mec}} = p + \rho g z + 1/2 \rho v^2 = \text{Cte}$$

- Entre les points 1 et 2 caractérisant les surfaces A et B d'un tube de courant de ce fluide parfait, le théorème de Bernoulli permet d'écrire l'équation suivante :

$$p_1 + \rho g z_1 + 1/2 \rho v_1^2 = p_2 + \rho g z_2 + 1/2 \rho v_2^2$$

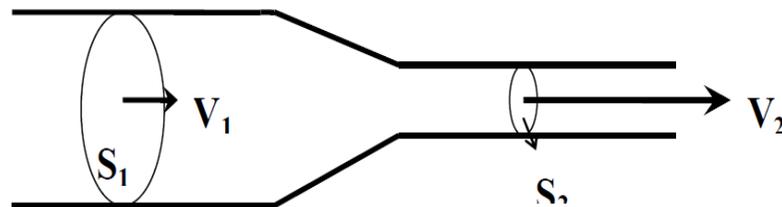
### Remarque

Le théorème de Bernoulli, dans le cas où la vitesse du fluide est nulle (cas de l'hydrostatique) se réduit au principe de Pascal, précédemment établi

# Conservation de l'énergie mécanique (5)

## Conservation de la masse

un fluide en régime stationnaire : la vitesse  $v$  varie selon l'équation suivante



$$S_1 v_1 = S_2 v_2 = D$$

## Théorème de BERNOULLI

$$E_{\text{mec}} = p + \rho g z + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{Cte}$$

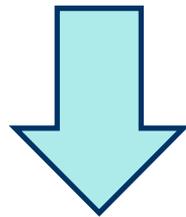
cette équation traduit le fait que l'énergie totale par unité de volume se conserve

# Conservation de l'énergie mécanique (7)

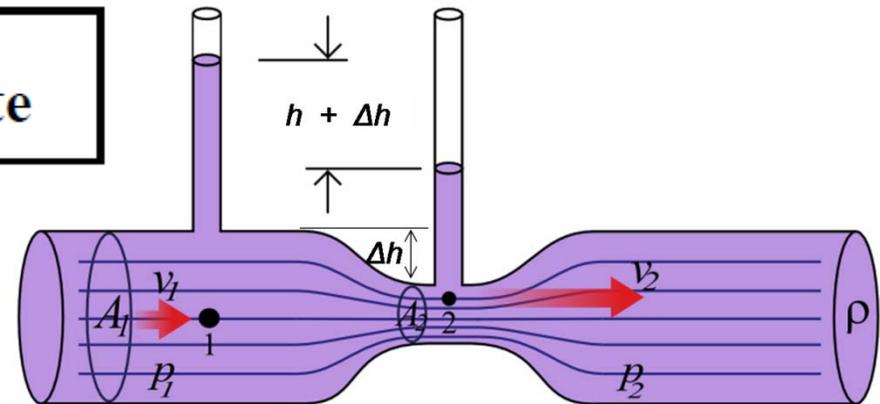
## Application : effet Venturi (1)

- Prenons l'exemple d'un conduit caractérisé par un rétrécissement en son centre. Si ce conduit est positionné horizontalement, les phénomènes de pesanteur entre la position 1 et la position 2 (situées à la même altitude) ne sont pas pris en compte. L'énergie mécanique totale se réduit alors à la prise en compte de la pression  $p$  et de la vitesse de la particule fluide (plus précisément l'expression de l'énergie cinétique)

$$E_{\text{mec}} = p + \rho g z + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{Cte}$$

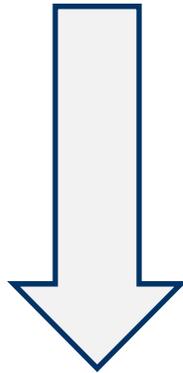


$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$



# Conservation de l'énergie mécanique (8)

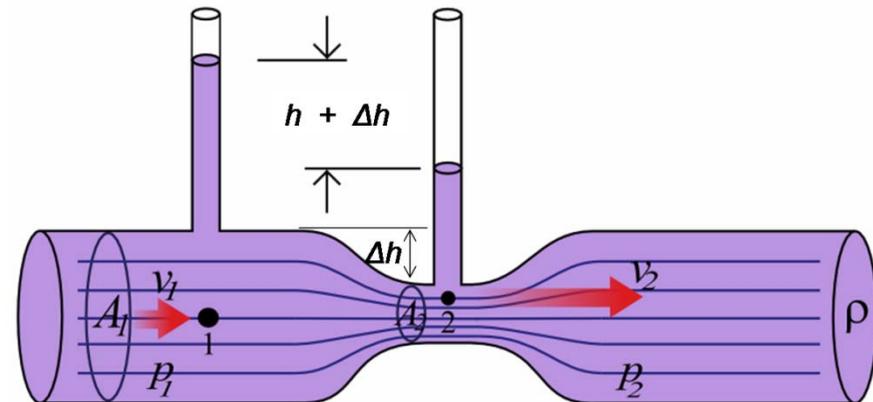
Application : effet Venturi (2)



CONSERVATION DU DEBIT



La pression  $p$  est plus faible au niveau de la section la plus petite  
La vitesse  $v$  est plus grande au niveau de la section la plus petite



# Conservation de l'énergie mécanique (10)

Fluide immobile : la vitesse du fluide est nulle

La pression dynamique ( $1/2 \cdot \rho \cdot v^2$ ) est nulle  $\Rightarrow$  relation de la statique des fluides

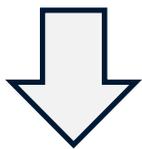
$$E_{mec} = p + \rho g z + 1/2 \rho v^2 = Cte$$

$$\Delta P = \rho g h$$

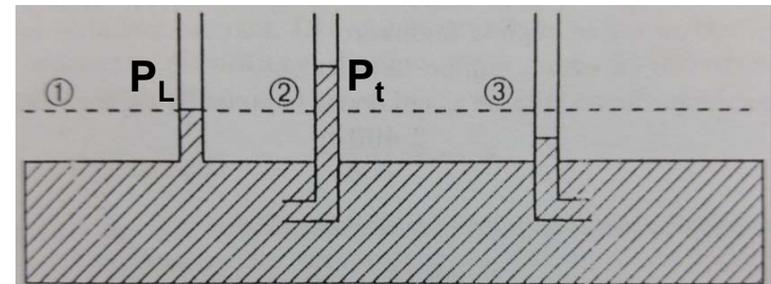
La mesure de la pression dépend de la position du capteur (en condition d'écoulement)

La différence entre la pression latérale  $P_L$  et la pression terminale  $P_t$  :

détermination de la vitesse :  $P_t - P_L = \frac{1}{2} \rho v^2$



[principe du double cathéter de Pitot]



# Hydrodynamique

fluides réels en mouvement

caractérisation



# Caractérisation et définition

FLUIDE REEL



notion de viscosité

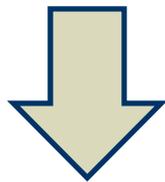
## Remarque

Il est à noter qu'un fluide réel peut être incompressible ou compressible, à la différence d'un fluide parfait nécessairement incompressible

# Notion de viscosité – fluides newtoniens

Dans un fluide en écoulement, la contrainte possède une composante tangentielle dite **contrainte visqueuse**

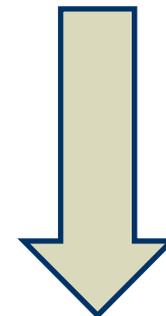
FLUIDE PARFAIT



contrainte qui s'exerce sur la particule fluide

toujours perpendiculaire à la paroi

FLUIDE REEL



contrainte qui s'exerce sur la particule fluide

existence d'une contrainte tangentielle

# Notion de viscosité (Expérience de couette -1)

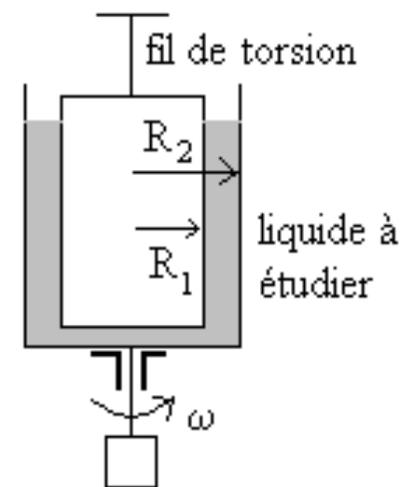
soit un fluide enfermé entre deux cylindres, l'un mobile, l'autre fixé *via* un fil de torsion.

lorsque la cavité cylindrique extérieure est mise en rotation à la vitesse angulaire  $\omega$ , le cylindre intérieur tourne d'un angle  $\alpha$  par rapport à sa position d'équilibre.

Analyse du phénomène :

1. La torsion du fil conduit à l'existence d'un couple dont les forces de pression ne peuvent pas être responsables. Il est nécessaire donc d'admettre l'existence d'efforts tangentiels.
2. Les particules de fluide adhèrent aux parois. Il existe donc un gradient de vitesse au sein de l'écoulement.
3. Pour les fluides dits « simples », l'angle  $\alpha$  augmente proportionnellement à  $\omega$ . Les efforts tangentiels augmentent donc proportionnellement au gradient de vitesse

## Expérience de Couette



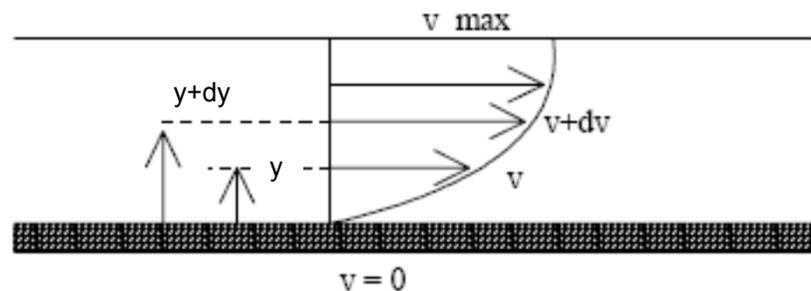
# Notion de viscosité (Expérience de couette -2)

## Explication et Interprétation

*L'expérience montre que, lors de l'écoulement d'un fluide, la pression ne suffit pas à expliquer les phénomènes et qu'il convient d'introduire des forces tangentielles qui s'opposent au mouvement du fluide. Ces forces, de type frottement, dues aux interactions entre particules fluide, sont appelées forces de viscosité.*

- ✓ Le liquide adhère à la paroi et ne glisse pas dessus.
- ✓ Cela génère des frottements.
- ✓ L'action du fluide sur la paroi n'est pas simplement orthogonale mais aussi tangentielle.
- ✓ Cet effet ne se manifeste que lorsque le fluide est en mouvement.

# Notion de viscosité (expérience de couette -3)



La force de frottement entre deux couches s'oppose à leur mouvement relatif.

Le mouvement d'un fluide peut être vu comme le glissement des couches de fluide les unes par rapport aux autres.

il est alors défini la viscosité dynamique  $\mu$ , qui exprime le rapport de la contrainte de cisaillement  $\tau$  au gradient de vitesse perpendiculaire au plan de cisaillement :

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{dv}{dy}}$$

$\mu =$  coefficient de viscosité dynamique  $= M.L^{-1}.T^{-1}$

# Remarques

## 1- Viscosité cinématique :

L'on définit la viscosité cinématique  $\nu$  comme :

$$\nu = \mu/\rho$$

## 2- contrainte visqueuse :

dans un fluide parfait, la contrainte qui s'exerce sur une particule de fluide est toujours perpendiculaire aux parois de celle-ci.

Dans un fluide réel en écoulement, la contrainte possède une composante tangentielle dite contrainte visqueuse

## 3- Valeurs et variations de la viscosité :

Normalement c'est une constante caractéristique du liquide.

Mais elle varie avec la température :  $T^\circ \nearrow \Rightarrow \eta \searrow$

# Caractérisation et différenciation

✓ Liquides newtoniens :  $\mu$  est constante à une température donnée  
ex : Eau  $\eta = 10^{-3}$  Pa.s ou  $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  à  $20^\circ\text{C}$

**MAIS**   $\mu$  peut varier avec  $\Delta v / \Delta x$  !



✓ Liquides non newtoniens :  $\mu$  dépend de  $\Delta v / \Delta x$

exemple du tissu sanguin : les hématies conditionnent (essentiellement) les propriétés mécaniques

 quand  $\Delta v / \Delta x \searrow$ , formation de rouleaux de GR et  $\mu \nearrow$   
(la viscosité  $\mu$  n'a théoriquement plus de sens)

 quand  $\Delta v / \Delta x$  est suffisamment élevé (gros vaisseaux)  
(l'on peut considérer  $\mu$  stable :  $\mu_{\text{sang}} = 3$  ou  $4 \cdot 10^{-3}$  Pa.s à  $20^\circ\text{C}$ )

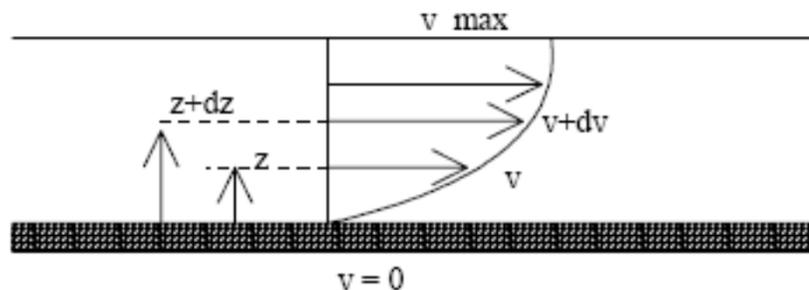
# Notion de viscosité (fluide newtonien)

## Caractérisation du fluide newtonien

entre deux couches successives de fluide en écoulement unidimensionnel à la vitesse  $v$ , il existe des contraintes tangentielles à l'écoulement qui accélèrent la couche la plus lente et ralentissent la couche la plus rapide.

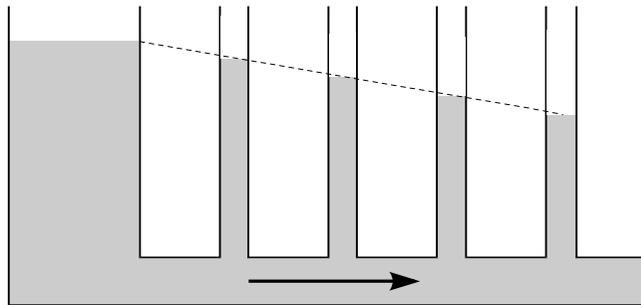
Pour un fluide newtonien, les forces visqueuses sont proportionnelles à la différence de vitesse c'est-à-dire au gradient de vitesse.

Exemple d'un fluide réel incompressible :



# Écoulement d'un fluide (liquide) réel (1)

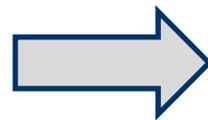
Écoulement d'un fluide réel : LA REALITE



Bernoulli n'est plus vérifié



$$\rho g h + 1/2 \rho v^2 + P \neq \text{cte}$$



$$\rho g h + 1/2 \rho v^2 + P + \text{chaleur}$$

Perte d'énergie utilisable lors de l'écoulement (« perte de charge »)



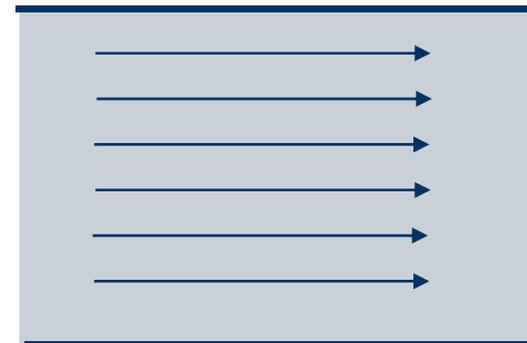
Cette perte est liée à la dissipation d'énergie en chaleur du fait de la viscosité du liquide.

# Écoulement d'un fluide (liquide) réel (2)

## Profils de vitesses (1)

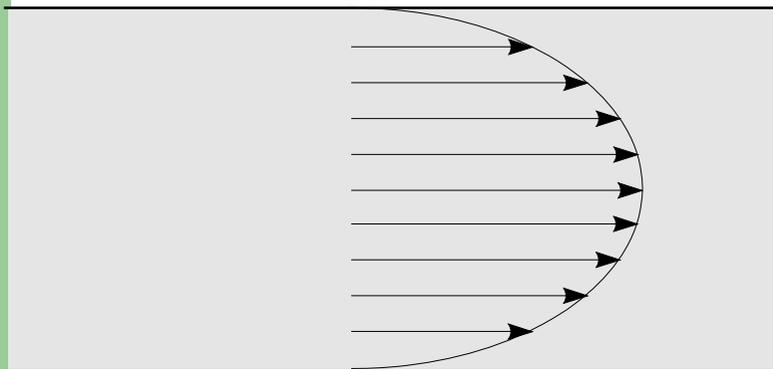
- ✓ Les particules fluide qui s'écoulent à des vitesses identiques définissent un filet liquidien.
- ✓ Chaque filet est représenté par un vecteur dont le module est égal à sa vitesse d'écoulement.
- ✓ L'alignement de ces vecteurs selon un axe définit un profil de vitesse.

Représentation des vitesses à un instant donné, à un endroit donné et selon un axe donné.



# Écoulement d'un fluide (liquide) réel (5)

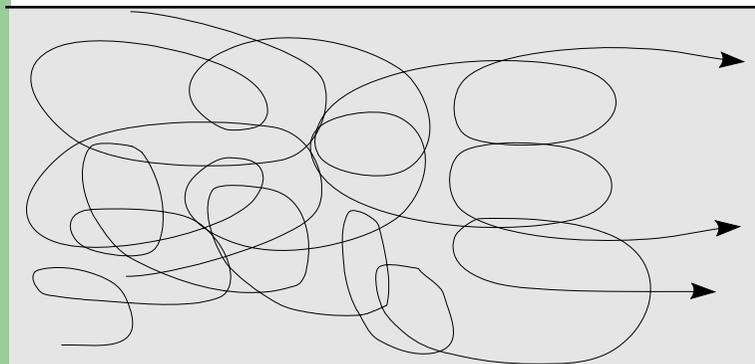
## Profils de vitesses (2)



Profil parabolique des vitesses lié à la viscosité. (écoulement laminaire) :

- une couche infiniment mince au contact de la paroi ne se déplace pas.
- $V$  est maximale au centre.

A vitesse moyenne élevée, l'écoulement devient turbulent



- dans ces conditions, la viscosité n'est plus un facteur de cohérence.
- les particules fluides tourbillonnent sans distribution systématisée des vitesses.

# Écoulement d'un fluide (liquide) réel (6)

Caractérisation de la nature de l'écoulement

nombre de Reynolds  $\mathcal{R}$   
$$\mathcal{R} = \rho \, d \, v / \mu$$

Limites empiriques (SI) :

$\mathcal{R} < 2\,400$  : écoulement laminaire

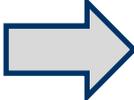
$\mathcal{R} > 3\,000$  : écoulement turbulent

ordres de grandeur mesurés sur tubes rectilignes

Si seule la vitesse varie :

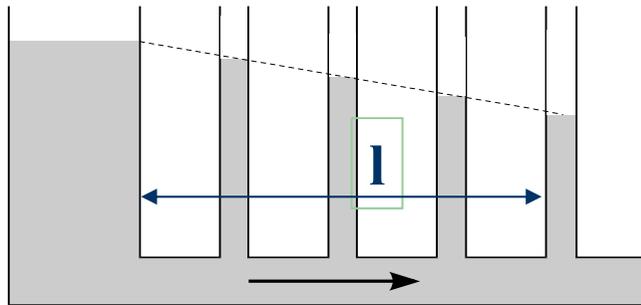
à partir d'une certaine valeur, la cohérence de l'écoulement laminaire est détruite :

c'est la vitesse critique  $v_c$  :

  $v_c = \mathcal{R}_c \mu / \rho d$

# Ecoulement laminaire (de Poiseuille) -1

Canalisation cylindrique où l'écoulement est laminaire (écoulement par lames)



Conduite horizontale  $\Rightarrow \rho g h = \text{cte}$

$$\rho g h + \frac{1}{2} \rho v^2 + P + \text{chaleur}$$



$$\rho g h + \frac{1}{2} \rho v^2 + P + Q = \text{cte}$$

Il n'y a que P qui peut varier

$\mu$  produit une perte d'énergie qui se manifeste par P  $\searrow$  (perte de charge)

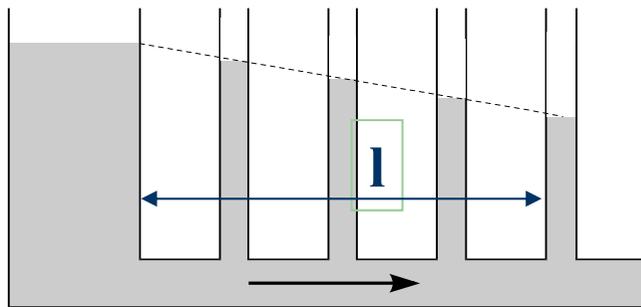
$$D = S v = \text{cte}$$



Loi de Poiseuille  $\Delta P = D \frac{8 \cdot \mu \cdot l}{\pi \cdot r^4}$

# Ecoulement laminaire (de Poiseuille) -3

Résistance à l'écoulement : analogie électrique

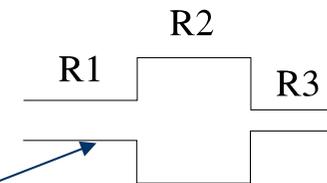


Bernoulli n'est plus vérifié



$$\rho g h + \frac{1}{2} \rho v^2 + P + Q = \text{cte}$$

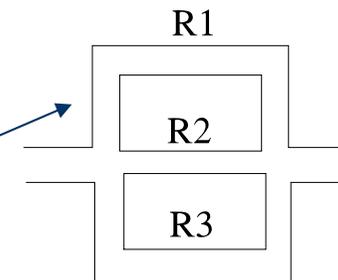
Résistance à l'écoulement laminaire  $\Rightarrow R = \frac{8 \cdot \mu \cdot l}{\pi \cdot r^4}$



Analogie électrique

système de conduits en série  
 $R_t = R1 + R2 + R3$

système de conduits en parallèle  
 $1/R_t = 1/R1 + 1/R2 + 1/R3$



# Écoulement laminaire ou turbulent

## Analyse des régimes d'écoulement

### ➤ **Écoulement laminaire :**

Toute l'énergie consommée est utilisée pour lutter contre la viscosité.

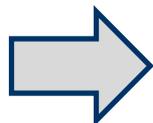
$$(\rho g h + 1/2 \rho v^2 + P + Q = \text{cte})$$

Relation linéaire entre  $\Delta P$  et le débit

### ➤ **Écoulement turbulent :**

Les tourbillons consomment une partie de l'énergie (Q + vibrations  $\Leftrightarrow$  bruits)

Il n'y a plus proportionnalité entre  $\Delta P$  et D : c'est un régime peu efficace



Exemple de la mesure pratique de la pression artérielle