Module de Biophysique

Département de Médecine Dentaire
Faculté de Médecine
UNIVERSITE ALGER 1
e-mail : biophysique_facmed-alger@hotmail.com

BIOMECANIQUE DES FLUIDES

circulation de fluides et physiologie : hydrostatique – hydrodynamique

- notions à retenir -

Professeur M. CHEREF

1ère année de médecine dentaire

Biomécanique des fluides (1)

Introduction et définitions

Notion d'états physiques (1)

FORCES D'ATTRACTION
ENTRE PARTICULES

AGITATION THERMIQUE

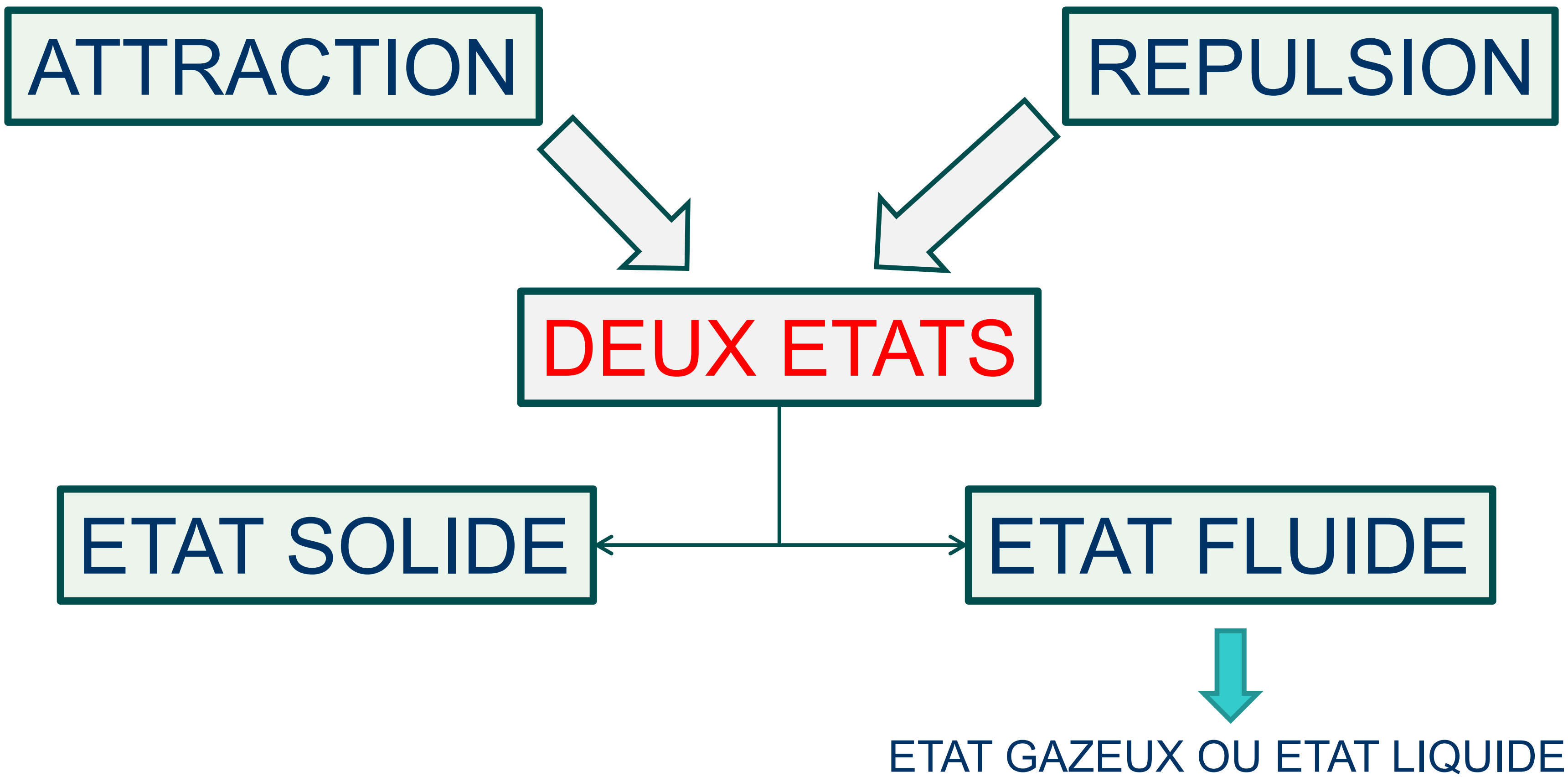
FORCES DE REPULSION
INTERMOLECULAIRES

ATTRACTION

REPULSION

ETAT DE LA MATIERE

Notion d'états physiques (2)



Biomécanique des fluides (2)

Rappel de quelques notions de base

Masse volumique ρ

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

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

ρ s'exprime dans le système SI (MKSA) en 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 m^3/kg

V_m est l'inverse de ρ

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

Poids volumique γ

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

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

γ s'exprime dans le système SI (MKSA) en N/m^3

ρ est la masse volumique du corps et « g » traduit la gravité
le poids volumique P dépend de « g », souvent assimilée à 9,81 m/s²

Densité d

La densité d d'un corps exprime le rapport de la masse volumique ρ de ce corps vis-à-vis de la masse volumique d'un corps de référence ρ_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 (ρ_{eau} = 1000 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 σ

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 $\frac{\overrightarrow{dF}}{dS}$ quand dS tend vers 0:

ou encore $\vec{\sigma} = \lim_{dS \to 0} \left[\frac{\overrightarrow{dF}}{dS} \right]$

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) $\overrightarrow{\sigma_n}$ est définie comme la composante de la contrainte $\vec{\sigma}$ dans la direction normale à la surface dS.
$\overrightarrow{\sigma_n}$ (plus simplement indiquée P) s'exprime comme :

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

L'unité de la pression est le Pa dans le système SI (MKSA)
[1 Pa = 1 N/mm² ; 1 bar = 10^5 Pa ; 1 bar = 1 daN/cm²]

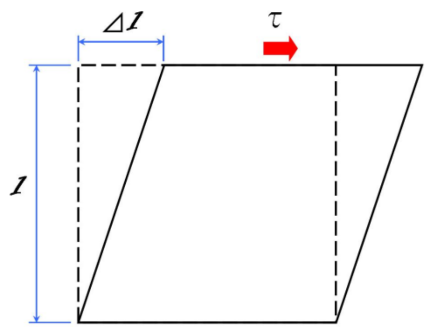
Notion de cisaillement

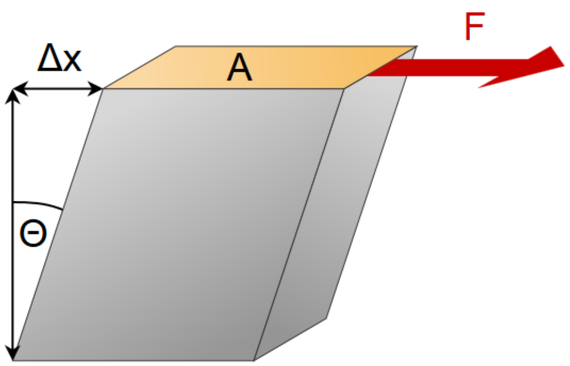
Définition :

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)

LES FLUIDES

- FLUIDES PARFAITS
- FLUIDES REELS INCOMPRESSIBLES
- FLUIDES REELS COMPRESSIBLES

dans le sens de l'application des principes fondamentaux de la mécanique des fluides

Notions de Fluide : caractérisation (3)

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 ρ.
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

$\Downarrow$

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

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

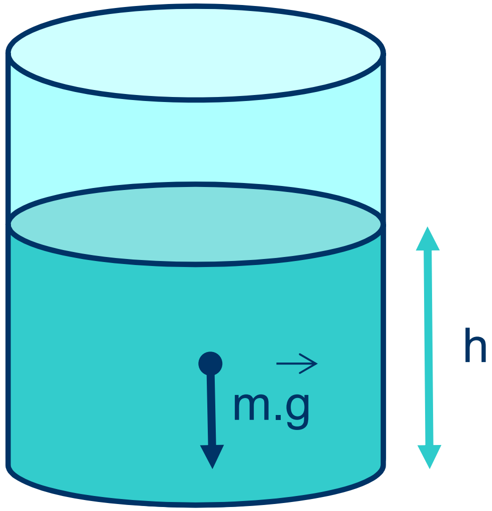
Remarque :

Cette expression mathématique traduit 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 (2)

EXPLICITATION (1)

Pression partielle : exemple simple



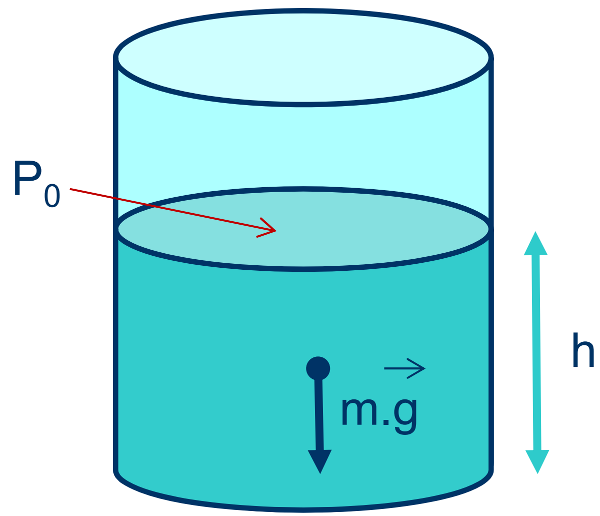
Remarque :

soit un récipient à fond plat de section S, rempli d'un fluide incompressible de masse volumique ρ et de hauteur h par rapport au fond du récipient.
La pression P (partielle) exercée par ce liquide ne dépend que de ρ, h, et g, mais aucunement de la section du récipient.

Caractérisation : équation générale (3)

EXPLICITATION (2)

Pression totale : exemple simple



Remarque :

soit un récipient à fond plat de section S, rempli d'un fluide incompressible de masse volumique ρ 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 :

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

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 équipotentielles 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 ρ, en équilibre, la différence de pression ΔP 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 : $\boxed{\Delta P = \rho g h}$

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 côte A et la côte 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 :

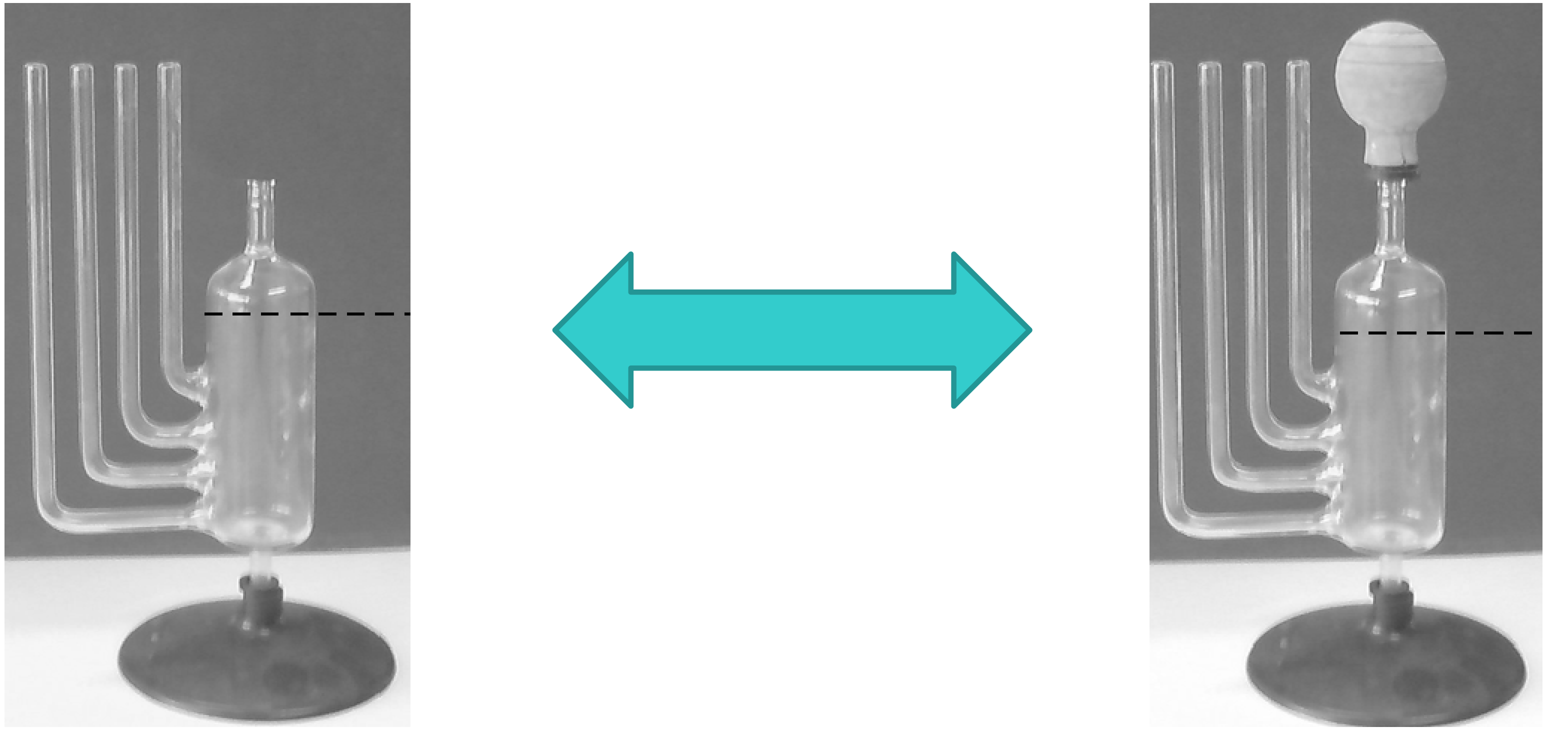
Soient deux points A de côte z_A et B de côte z_B d'un même liquide. Si la pression P_A au point A varie de ΔP, alors la pression P_B au point B variera de ΔP. On dit que les liquides transmettent intégralement les variations de pression.
Aussi, la pression va t- elle augmenter avec la profondeur d'une quantité égale à :

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

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 (1)



A

B

schématisation

Principe de Pascal : caractérisation (2)

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 :

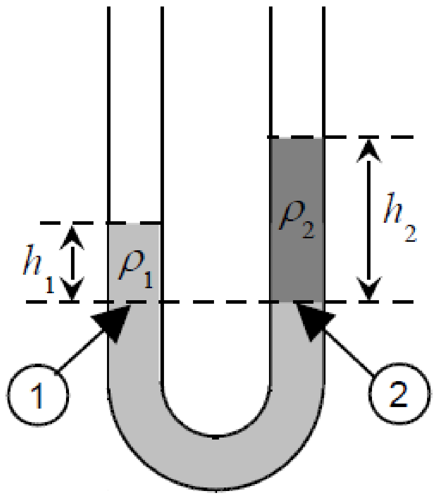
1- le principe de PASCAL explicite la montée égale du liquide dans les quatre tubes. Cette montée de liquide correspond à la pression supplémentaire exercée à l'aide de la poire.

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 ρ immergé dans un fluide (liquide ou gaz) de masse volumique ρ_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) »

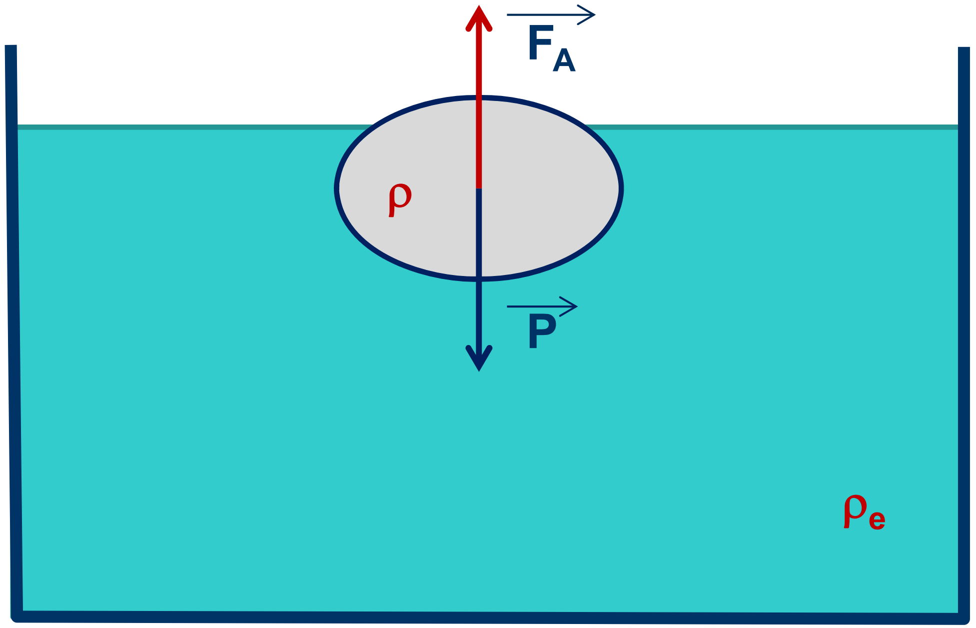
Traduction mathématique : équation qui régit le principe d’Archimède

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

$$\mathbf{F_A = \rho_e \cdot V_i \cdot g}$$

Principe d'Archimède – Flottabilité (3)

Formulation du principe d'Archimède : schématisation



Hydrodynamique

fluides incompressibles en mouvement

caractérisation

Caractérisation : mode d'expression (1)

RELATION FONDAMENTALE DE LA DYNAMIQUE

↓

EXPRESSION DE L'EQUATION DE CONTINUITE

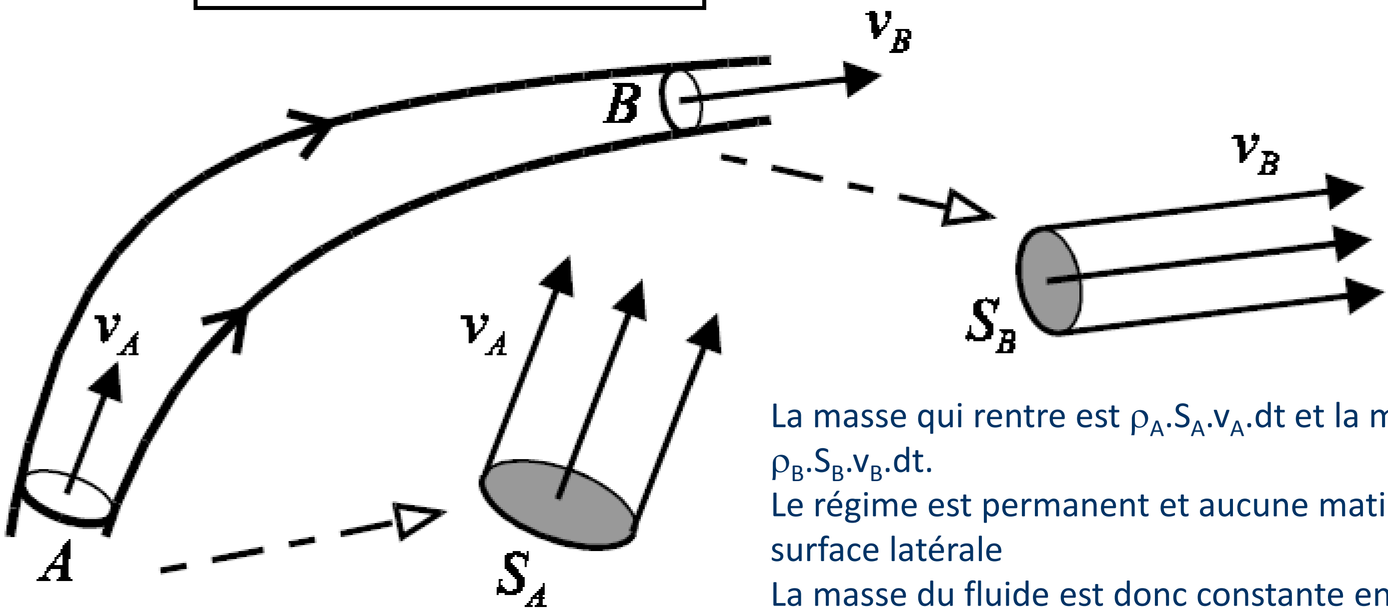
PRINCIPE DE CONSERVATION DE L'ENERGIE

Caractérisation : mode d’expression (2)

Tube élémentaire de courant (fluide parfait)

conservation du débit massique Q_m

$$\boxed{Q_m = \rho_A S_A v_A = \rho_B S_B v_B}$$



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

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

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

<u>Remarque</u>

La particule fluide de volume dV possède la masse dm. L'expression de l'énergie cinétique (par unité de volume est donc : Ec = ½ ρ v²

Conservation de l'énergie mécanique (2)

ENERGIE MECANIQUE TOTALE E_{mec}

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

Remarque

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

Conservation de l'énergie mécanique (3)

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.

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

- 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 :

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

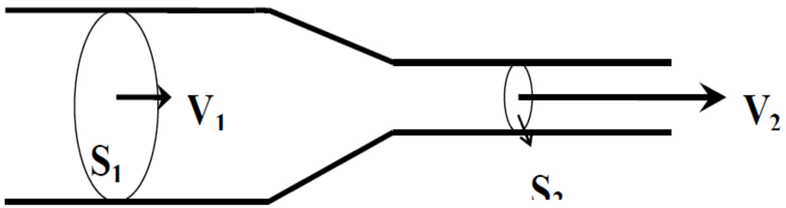
<u>Remarque</u>

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 -3bis

<u>Conservation de la masse</u>

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



$$S_1\, v_1 = S_2\, v_2 = D$$

<u>Théorème de BERNOULLI</u>

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

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

Conservation de l'énergie mécanique (4)

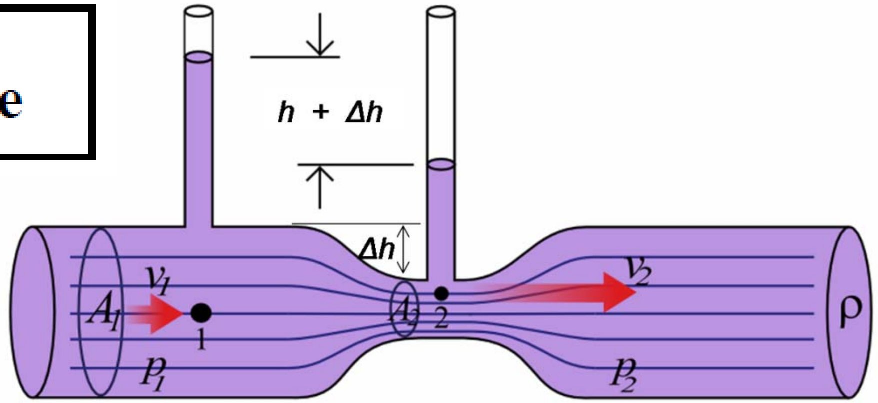
Application : effet Venturi (1)

- 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)

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

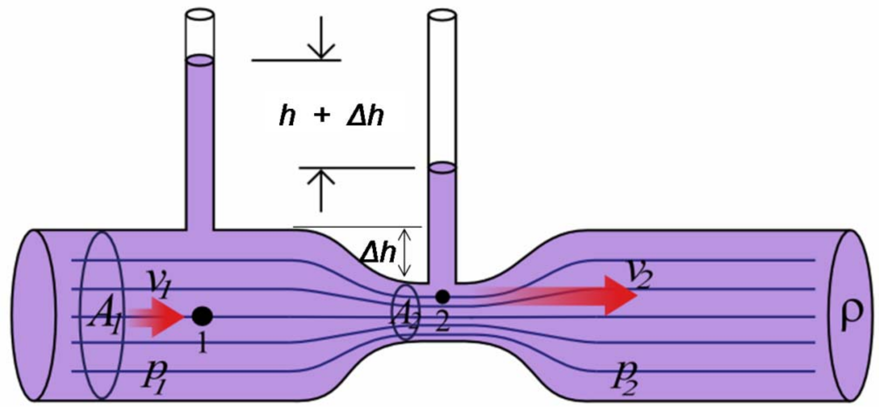
$$\Downarrow$$

$$\boxed{p_1 + \tfrac{1}{2}\rho\, v_1^2 = p_2 + \tfrac{1}{2}\rho\, v_2^2}$$



Conservation de l'énergie mécanique (5)

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 -5bis

<u>Fluide immobile</u> : la vitesse du fluide est nulle

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

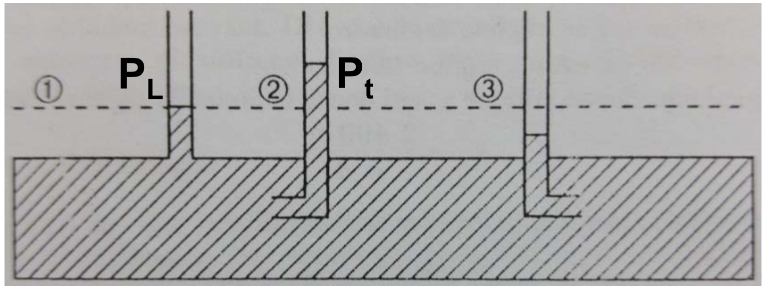
$$E_{mec} = p + \rho g z + 1/2\ \rho v^2 = Cte$$

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

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

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

détermination de la vitesse : $P_t - P_L = ½\ \rho\ v^2$



[principe du double cathéter de Pitot]

Hydrodynamique

fluides réels en mouvement

caractérisation

Caractérisation et définition

FLUIDE REEL

↓

notion de viscosité

<u>Remarque</u>

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	FLUIDE REEL
contrainte qui s'exerce sur la particule fluide	contrainte qui s'exerce sur la particule fluide
toujours perpendiculaire à la paroi	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 ω, le cylindre intérieur tourne d'un angle α par rapport à sa position d'équilibre.

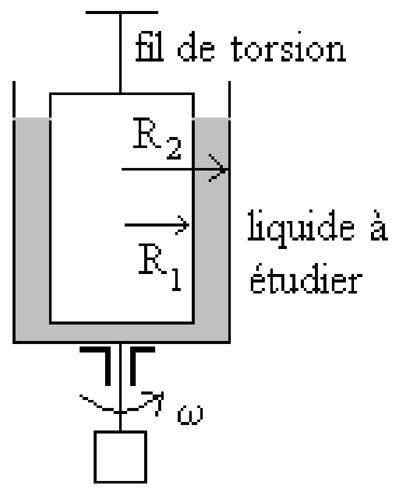
Analyse du phénomène :

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.

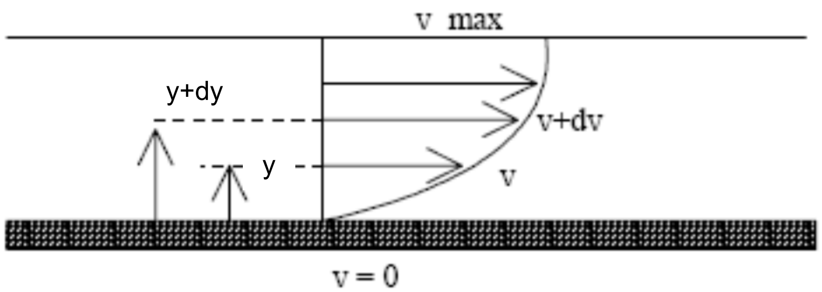
2.les particules de fluide adhèrent aux parois. Il existe donc un gradient de vitesse au sein de l'écoulement.

3.Pour les fluides dits « simples », l'angle α augmente proportionnellement a ω. Les efforts tangentiels augmentent donc proportionnellement au gradient de vitesse

Expérience de Couette



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 μ, qui exprime le rapport de la contrainte de cisaillement τ 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- <u>Viscosité cinématique</u> :
L'on définit la viscosité cinématique ν comme :

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

2- <u>contrainte visqueuse</u> :
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 <u>contrainte visqueuse</u>

3- <u>Valeurs et variations de la viscosité :</u>
Normalement c'est une constante caractéristique du liquide.

Mais elle varie avec la température : T° ↗ ⇨ η ↘

Caractérisation et différenciation

✓**Liquides newtoniens** : μ est constante à une température donnée

ex : Eau $\eta = 10^{-3}$ Pa.s ou $kg.m^{-1}.s^{-1}$ à 20° C

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

✓**Liquides non newtoniens** : μ 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 μ $\nearrow$

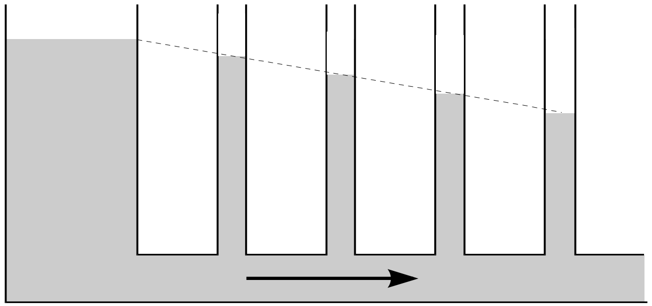
(la viscosité μ n'a théoriquement plus de sens)

quand $\Delta v / \Delta x$ est suffisamment élevé (gros vaisseaux)

(l'on peut considérer μ stable : $\mu_{sang} = 3$ ou $4\ 10^{-3}$ Pa.s à 20° C)

Ecoulement d'un fluide (liquide) réel (1)

Ecoulement d'un fluide réel : LA REALITE



Bernoulli n'est plus vérifié

$$\rho\, g\, h + 1/2\, \rho\, v2 + P \neq cte$$

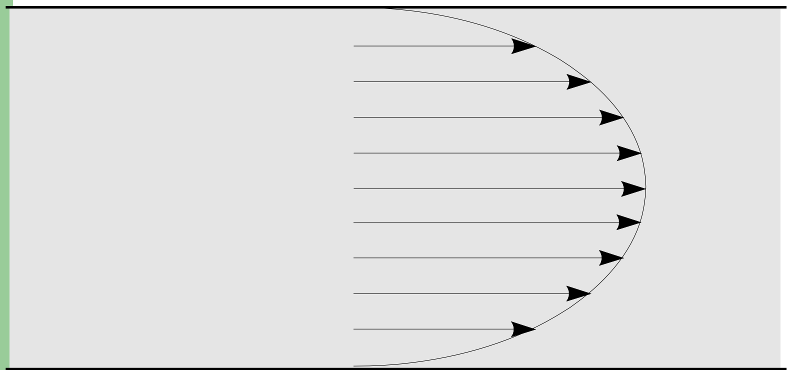
$$\rho\, g\, h + 1/2\, \rho\, v^2 + P + \textcolor{red}{\text{chaleur}}$$

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.

Ecoulement d'un fluide (liquide) réel (3)

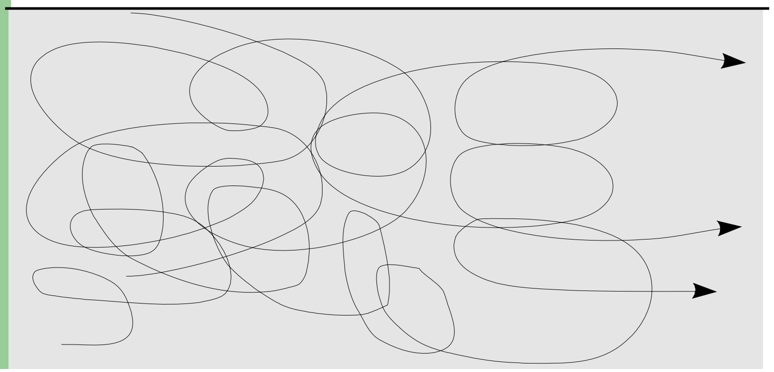
Profils de vitesses (2)



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.

Ecoulement d'un fluide (liquide) réel (4)

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 :

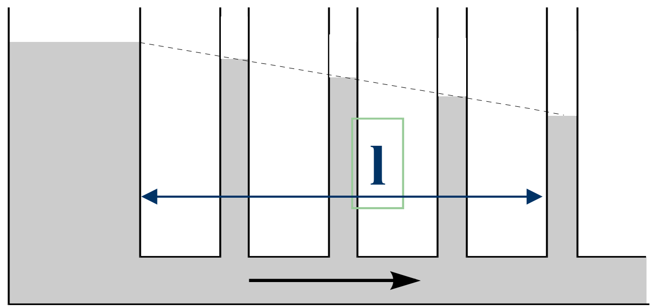
à partir d'une certaine valeur, la cohérence de l'écoulement laminaire est détruite :

c'est la vitesse critique v_c :

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

Ecoulement laminaire (de Poiseuille) -1

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



Conduite horizontale $\Rightarrow$ $\rho\ g\ h = cte$

$\rho\ g\ h + 1/2\ \rho\ v^2 + P +$ **chaleur**

$\Downarrow$

$\rho\ g\ h + 1/2\ \rho\ v^2 + P + Q = cte$

Il n'y a que P qui peut varier

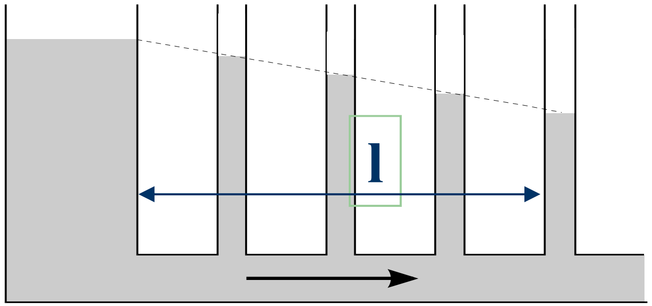
μ produit une perte d'énergie qui se manifeste par P ↘ (perte de charge)

$D = S\ v = cte$

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

Ecoulement laminaire (de Poiseuille) -2

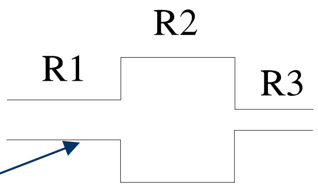
Résistance à l'écoulement : analogie électrique



Bernoulli n'est plus vérifié

$$\rho\ g\ h + 1/2\ \rho\ v^2 + P + Q = cte$$

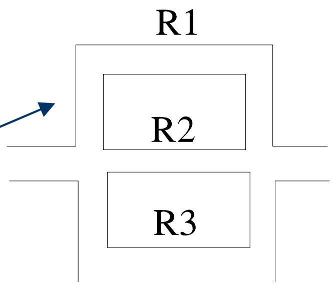
Résistance à l'écoulement laminaire $\Rightarrow$ $R = \dfrac{8 \cdot \mu \cdot l}{\pi \cdot r^4}$



Analogie électrique

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

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



Ecoulement laminaire ou turbulent

<u>Analyse des régimes d'écoulement</u>

- **Écoulement laminaire** :

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

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

Relation linéaire entre ΔP et le débit

- **Écoulement turbulent** :

Les tourbillons consomment une partie de l'énergie (Q + vibrations ⇨ bruits)
Il n'y a plus proportionnalité entre ΔP et D : c'est un régime peu efficace

⇨ Exemple de la mesure pratique de la pression artérielle