

I. Bases physiques

- ❖ Un fluide est un milieu **matériel déformable** facilement → Capacité d'écoulement.
- Définitions :
 - ✓ Milieu gazeux : déformable + compressible
 - ✓ Milieu liquide : déformable mais **incompressible**
 - ✓ Fluide idéal : absence de frottements
 - ✓ Fluide réel : frottements (viscosité ++)
- 2 aspects de la mécanique des fluides :
 - ✓ Statique : on étudie les PRESSIONS
 - ✓ Dynamique : on étudie les DEBITS

Statique d'un fluide idéal

- ❖ La pression **statique** P est égale au poids de la colonne de fluide qui s'applique sur lui.
 - **Pression relative** : poids de la colonne de liquide qui s'applique sur le capteur de pression = effet de la colonne de liquide.

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

ρ : masse volumique
 g : accélération de la pesanteur
 h : hauteur de la colonne de liquide

- **Pression absolue** : poids de la colonne de liquide à laquelle s'ajoute celle de la pression atmosphérique.

$$P_{\text{absolue}} = P_{\text{relative}} + P_{\text{atmosphérique}}$$

A) Dimensions de la pression

| Force par unité de surface | Energie par unité de volume |
|--|--|
| $[P] = \frac{[F]}{[S]}$ $[P] = \frac{M \cdot L \cdot T^{-2}}{L^2}$ $[P] = M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$ | $[P] = \frac{[E]}{[V]}$ $[P] = \frac{M \cdot L^2 \cdot T^{-2}}{L^3}$ $[P] = M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$ |

$$P = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

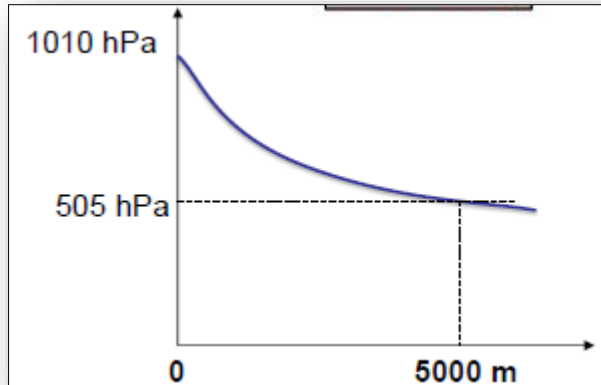
B) Unités de pression

| Le Pascal | Le Bar |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Unité du système international • 1 Pa = 1 N.m⁻² • Unité très faible à l'échelle des pressions, on utilise donc des multiples • 1 hPa = 100 Pa | <ul style="list-style-type: none"> • Ancienne unité • Unité beaucoup plus élevée • 1 Bar = 10⁵ Pa = 10² hPa |

Nb : il existe d'autres unités comme le mmHg ou le cmH₂O.

C) Pression atmosphérique

- P_{atm} = poids de la colonne d'air atmosphérique
- $P_{atm} = \rho g h = 1013 \text{ hPa}$
- Elle varie avec l'altitude (ou la profondeur)



Rmq : à 5000m
la pression
atmosphérique
est divisée par 2.

B) ♥ Principes et lois de Pascal ♥

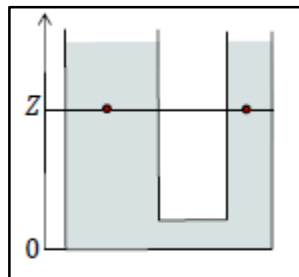
- ❖ Dans un liquide **incompressible** (/!\ non gazeux) une variation de pression se transmet intégralement et dans toutes les directions.

1^{ère} LOI

La pression est la même dans toutes les directions =
indépendante de l'orientation du capteur.

2^{ème} LOI

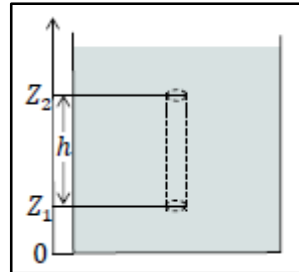
La pression est la même en tout
point de même profondeur (ou
altitude)



3^{ème} LOI

La différence de pression entre 2 points est
proportionnelle à la différence de hauteur
entre ces deux points.

$$\Delta P = -\rho g \Delta z \Rightarrow \Delta z \propto \Delta P$$



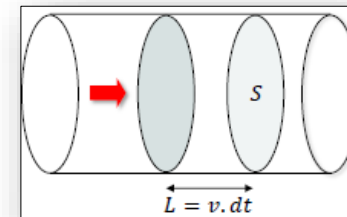
Dynamique d'un fluide idéal

- ❖ Un débit est un volume de fluide qui traverse une section S par unité de temps.

- On donne :

$$Q = S \times v$$

Q : débit en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
S : section en m^2
v : vitesse en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

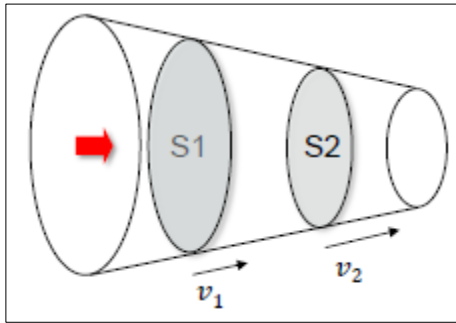


A) Principe de continuité du débit

Ce phénomène est mis en évidence lorsque l'on respecte 3 hypothèses :

- ♥ Le fluide est **incompressible** → p est constant au cours du temps
- ♥ La **section** du tuyau dans laquelle s'écoule le fluide est **variable**
- ♥ Le fluide s'écoule en **régime stationnaire** → vitesse en n points = constante

- Lorsqu'un fluide incompressible circule en régime stationnaire dans un conduit, le produit de la **section x vitesse** (débit) reste constant au cours du temps.



$$Q = S_1 \times v_1 = S_2 \times v_2$$

B) Ecoulement d'un fluide idéal

❖ Un fluide idéal s'écoule selon 3 types d'énergies :

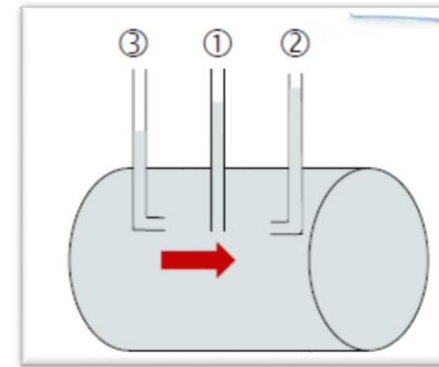
- Energie de pesanteur : exerce une **pression de pesanteur** = ρgh
- Energie cinétique (liée à la vitesse) : exerce une **pression cinétique** = $1/2\rho v^2$
- Energie de pression statique (latérale) : = P

Etant donné qu'il n'existe pas de forces de frottements, l'énergie totale d'un fluide idéal est **constante** le long du conduit. Cela nous amène à l'équation de Bernoulli.

$$\text{Energie totale} = \rho gh + 1/2\rho v^2 + P = \text{CONSTANTE}$$

C) Mesure des pressions

- Quand un fluide est en mouvement, les valeurs de pressions mesurées dépendent de l'orientation du capteur (\neq statique)



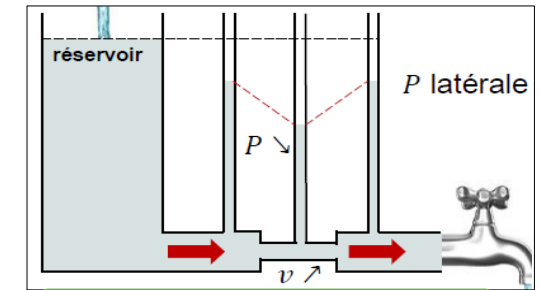
- Pression latérale: pression statique P
- Pression « terminale »: $P + 1/2\rho v^2$
- Pression « d'aval »: $P - 1/2\rho v^2$

Nb : Attention, le terme « pression d'aval » bien que contradictoire désigne bien le capteur en amont

D) Cas particulier : écoulement horizontal

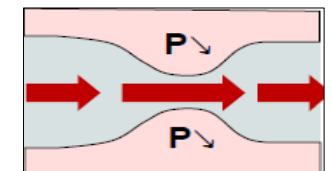
- La **pression totale** se répartit entre la **pression cinétique** et la **pression statique** car la pression de pesanteur s'annule ($h=0$).

- ✓ Lors d'une variation de section, on a une variation de la vitesse du fluide ($S \searrow, v \nearrow$)
- ✓ Ex : diminution de section, cela se traduit selon l'équation de Bernoulli par une **augmentation de la pression cinétique** et donc une **diminution de la pression statique (latérale)**.



C'est l'EFFET VENTURI!

Application : En cas de sténose vasculaire, la vitesse \nearrow mais la pression latérale \searrow ce qui peut provoquer une obstruction par spasme.



Dynamique d'un fluide réel

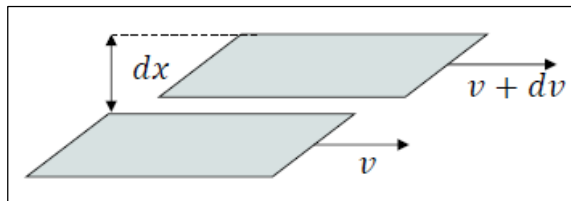
- ❖ Dans un fluide réel, il y a une perte d'énergie utilisable lors de l'écoulement qui est due aux forces de frottements et particulièrement à la **viscosité**.

- On nomme cette perte d'énergie, la « perte de charge » liée à la dissipation de l'énergie sous forme de chaleur.
- **L'EQUATION DE BERNOULLI N'EST PLUS VERIFIEE !**

$$E_t = \rho gh + 1/2 \rho v^2 + P + \text{Chaleur} = \text{CONSTANTE}$$

A) La viscosité

Deux lames de fluide circulent parallèlement à des vitesses différentes et exercent une force de frottement l'une sur l'autre → conso d'énergie.



- $F = \eta S \frac{Dv}{Dx}$ S = section et Dv/Dx = « taux de cisaillement »
- **La viscosité η est une constante caractéristique du fluide.**
- η s'exprime en Pa.s = Poiseuille
- F s'exprime en Newtons
- Les liquides newtoniens : η varie avec la température ($T^\circ C \nearrow \rightarrow \eta \searrow$)
- Les liquides non newtoniens : η varie avec la température et le « taux de cisaillement »
 - ✓ Ex : Le Sang où les GR définissent les propriétés mécaniques ($\frac{Dv}{Dx} \nearrow \rightarrow \eta \searrow$).
 - ✓ On utilise pour ces liquides une **viscosité apparente**.

B) Régimes d'écoulement d'un fluide réel

- ❖ Contrairement à un fluide idéal, les molécules d'un fluide réel se déplacent à des vitesses différentes à cause de la viscosité (interactions entre elles et avec les parois).

- 2 régimes d'écoulement pour un fluide réel :

| Écoulement laminaire | Écoulement turbulent |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ♥ La viscosité est un facteur de cohérence à v faible ♥ Couche mince au contact de la paroi ne se déplace pas ♥ Les lignes de courant ne se croisent pas ♥ v est maximale au centre ♥ Profil parabolique des vitesses | <ul style="list-style-type: none"> ♥ La viscosité n'est plus un facteur de cohérence à v faible ou élevée ♥ Les trajectoires individuelles tourbillonnent ♥ Les lignes de courant se croisent ♥ Pas de distribution systématisée des vitesses |

C) Frontière entre les deux régimes d'écoulement

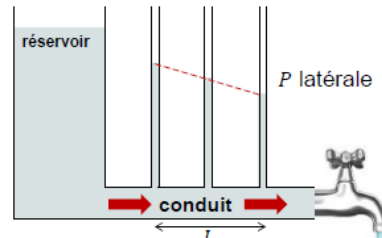
- **Dépend de 4 paramètres simultanément**
 - La vitesse moyenne d'écoulement v
 - Le diamètre du conduit d
 - La masse volumique du liquide ρ
 - La viscosité η
- $\left. \begin{array}{l} \text{○ La vitesse moyenne d'écoulement } v \\ \text{○ Le diamètre du conduit } d \\ \text{○ La masse volumique du liquide } \rho \end{array} \right\} \rightarrow \text{risque de turbulence } \nearrow$
 $\text{○ La viscosité } \eta \rightarrow \text{risque de turbulence } \searrow$

❖ Le nombre de Reynolds sert à définir le seuil entre un régime d'écoulement turbulent et laminaire.

- $$\text{Re} = \frac{\rho v d}{\eta}$$
- Si $\text{Re} \leq 2000$: Le régime d'écoulement est laminaire
- Si $\text{Re} \geq 10000$: Le régime d'écoulement est turbulent
- Entre les deux, le régime est **instable**, on ne peut rien conclure
- Vitesse critique : au-delà de laquelle le régime laminaire n'est plus garanti $\rightarrow v_c = \frac{2000\eta}{\rho d}$

D) La loi de Poiseuille

❖ Lors de l'écoulement d'un fluide réel à l'horizontale (pression pesanteur = constante) + section constante, la pression latérale P compense la « perte de charge ».



$$\Delta P = Q \frac{8\eta L}{\pi r^4}$$

Q = débit
L = distance
η = viscosité
r = rayon du conduit

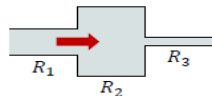
R = résistance à l'écoulement

$$\Delta P = Q \times R \text{ avec } R = \frac{8\eta L}{\pi r^4}$$

Pour les systèmes de conduits complexes, les résistances à l'écoulement se combinent comme en électricité $U = R \times I$

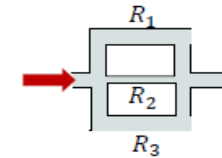
- Circuit en série : on additionne les résistances ;

$$R_t = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i$$



- Circuit en parallèle : on additionne l'inverse des résistances ;

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$



Application (diapo 26) :

Exercice : Soit une artériole avec un débit de $6 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$. Elle se divise en 100 capillaires de rayon $r = 0,4 \text{ mm}$ et de longueur $L = 2 \text{ cm}$. Quelle est la chute de pression entre l'entrée et la sortie de ce réseau capillaire ? ($\eta = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$)

$$\Delta P = Q \times R \text{ avec } R = \frac{8\eta L}{\pi r^4} \text{ résistances à l'écoulement}$$

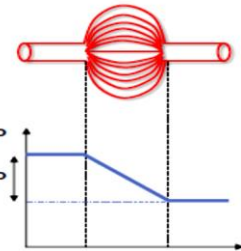
- En SI: $Q = 6 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
 $r = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ et $L = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$

$$\Delta P = Q \times R ?$$

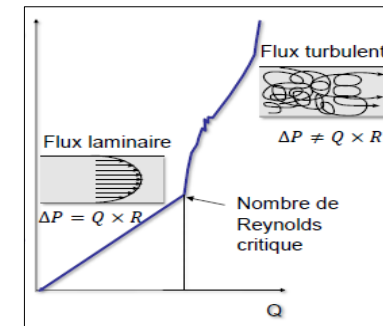
$$R_i = \frac{8\eta L}{\pi r^4} = \frac{8 \times 4 \cdot 10^{-3} \times 2 \cdot 10^{-2}}{\pi (4 \cdot 10^{-4})^4} = 796 \cdot 10^7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^{100} \frac{1}{R_i} = \frac{100}{R_i} \Rightarrow R = \frac{R_i}{100} = 796 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\Delta P = Q \times R = 1 \cdot 10^{-7} \times 796 \cdot 10^5 = 7,96 \text{ Pa}$$



E) Ecoulement en régime turbulent



Ecoulement laminaire

- Toute l'énergie est consommée pour vaincre la viscosité
- Relation linéaire entre ΔP et le débit
- Loi de Poiseuille ++

Ecoulement turbulent

- Les tourbillons : conso Energie
- Régime peu efficace
- Pas de proportionnalité
- Vibrations + chaleur = Perception d'un souffle et/ou bruit

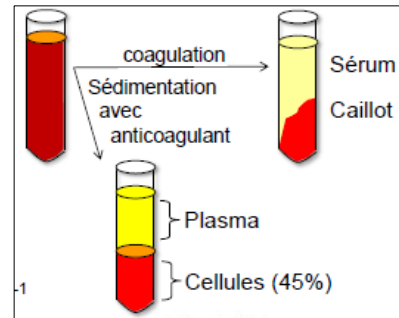
II. Propriétés liées au sang

Description du sang au repos

❖ Le sang est une suspension de cellules dans une solution macromoléculaire = plasma

- Hématocrite :

$$\frac{\text{Volume de cellules}}{\text{Volume total de la solution}} ; N = 0.45$$
- Sérum = plasma – les éléments figurés du sang piégés dans le caillot (éléments coagulants)
- Plasma = sérum + éléments coagulants. **Il se comporte comme un fluide Newtonien !**
- Les cellules sanguines sont les globules rouges, elles ont des propriétés rhéologiques qui font que le SANG se comporte de manière globale comme un **FLUIDE NON NEWTONIEN**.



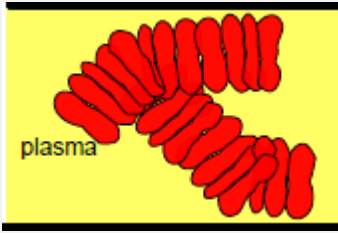
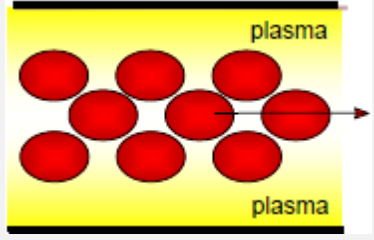
Description rhéologique du sang en écoulement dans les gros vaisseaux

❖ **Rhéologie: étude des déformations de la matière en écoulement**

La viscosité du sang est due aux interactions intercellulaires, ces interactions font que le sang se comporte comme un fluide non newtonien.

→ η varie avec dv/dx (taux de cisaillement)

→ η diminue quand dv/dx augmente : « **rhéofluidification** »

| Débit faible | Débit élevé |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ✓ Les globules rouges forment des rouleaux (« se tiennent la main ») ✓ Cela a pour conséquence directe une ↑ de la viscosité | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Les globules rouges « se lâchent la main » ✓ Circulation axiale des cellules ✓ Rhéofluidification → ↓ viscosité |
|  |  |

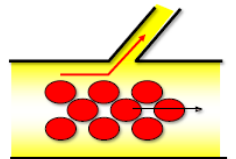
Nb : à 37°C et $Hte=0.45$, La viscosité η vaut $4.10^{-3} \text{ Pa.s}^{-1}$ (poiseuilles)

Pathologie : La polyglobulie → l'hématocrite devient supérieure à 0.55 → thromboses par hyperviscosité du sang.

Description rhéologique du sang en écoulement dans les petits vaisseaux

❖ Il existe un « phénomène d'écémage » au niveau des embranchements des petits capillaires qui provoque une diminution localisée de l'hématocrite.

- Pour passer dans les petits capillaires de taille $< 8\mu\text{m}$, le globule rouge **doit se déformer** (intervention de la viscosité intracellulaire)



Pathologie : La drépanocytose (Hémoglobine mutée) → **Falciformation** ↔ augmentation de la viscosité intracellulaire → diminution de la déformabilité → thromboses capillaires